



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE
CIENCIAS MARINAS**



DEPARTAMENTO DE OCEANOLOGÍA

**HIDROLOGÍA Y METALES PESADOS EN LA MATERIA
PARTICULADA SUSPENDIDA DEL AGUA SUPERFICIAL
DE LA PORCIÓN SUR DE LA BAHÍA DE LA PAZ,
B.C.S., MÉXICO.**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

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

PRESENTA:

ING. PESQ. CARLOS ALBERTO ROMERO BAÑUELOS



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE
CIENCIAS MARINAS**



DEPARTAMENTO DE OCEANOLOGÍA

**HIDROLOGÍA Y METALES PESADOS EN LA MATERIA
PARTICULADA SUSPENDIDA DEL AGUA SUPERFICIAL DE
LA PORCIÓN SUR DE LA BAHÍA DE LA PAZ, B.C.S., MÉXICO.**

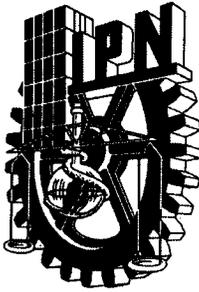
T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

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

PRESENTA:

ING. PESQ. CARLOS ALBERTO ROMERO BAÑUELOS



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION**

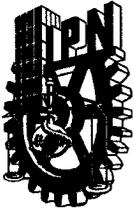
CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 11 del mes Noviembre del año 2003, el (la) que suscribe CARLOS ALBERTO ROMERO BAÑUELOS alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS con número de registro A010137 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de: DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE y cede los derechos del trabajo titulado: "HIDROLOGÍA Y METALES PESADOS EN LA MATERIA PARTICULADA SUSPENDIDA DEL AGUA SUPERFICIAL DE LA PORCIÓN SUR DE LA BAHÍA DE LA PAZ, B.C.S., MÉXICO" al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: romerobanuelos@yahoo.com.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Carlos A. Romero Bañuelos
CARLOS ALBERTO ROMERO BAÑUELOS
nombre y firma



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION
ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 11:00 horas del día 17 del mes de Octubre del 2003 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis de grado titulada:

"HIDROLOGÍA Y METALES PESADOS EN LA MATERIA PARTICULADA SUSPENDIDA DEL AGUA SUPERFICIAL DE LA PORCIÓN SUR DE LA BAHÍA DE LA PAZ, B.C.S., MÉXICO"

Presentada por el alumno:

ROMERO
Apellido paterno

BAÑUELOS
materno

CARLOS ALBERTO
nombre(s)

Con registro:

A	0	1	0	1	3	7
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

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

LA COMISION REVISORA

Director de tesis
PRIMER VOCAL

DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE

PRESIDENTE

DR. EVGUENI CHOUMILINE

SECRETARIO

DR. SERGIO AGUINIGA GARCIA

SEGUNDO VOCAL

MC. VICTOR RENÉ MAGALLANES ORDÓNEZ

TERCER VOCAL

DR. FRANCISCO DELGADILLO HINOJOSA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. FRANCISCO ARREGUN SANCHEZ



I. P. N.
CICIMAR
DIRECCION

AGRADECIMIENTOS

Instituciones:

Al Instituto Politécnico Nacional y al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas que por conducto del posgrado en Manejo de Recursos Marinos contribuyeron a mi formación académica.

Agradezco el apoyo del Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Programa Institucional de Formación de Investigadores del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo económico durante el desarrollo de la maestría.

A la Universidad Autónoma de Nayarit y al Programa de Mejoramiento del Profesorado de la Secretaría de Educación Pública por las facilidades de tiempo y apoyo económico durante el desarrollo de la maestría.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Baja California, en particular al Instituto de Investigaciones Oceanológicas que a través del Laboratorio de Oceanografía Química me facilitaron sus instalaciones, material y equipo para el análisis de metales.

Personales:

Al Dr. Rafael Cervantes Duarte, por asumir el reto, por su profesionalismo, disponibilidad y el apoyo que me brindo en todo momento durante el desarrollo de la maestría.

Al Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa, por su gran apoyo y motivación con sus comentarios siempre acertados. ¡Porqué la ciencia se debe disfrutar!.

Al Dr. Evgueni Shumilin, por su disponibilidad, atención y sus valiosos comentarios para resolver mis dudas.

Al M.C. Héctor Manuel Atilano Silva, por su valiosa asesoría y apoyo técnico en el análisis de metales.

A la M.C. Judith Marmolejo, Biol. Alida Rosales, Biol. Miguel Suárez, Ocean. Ángel Hinojosa, M.C. Fernando Aguirre, Biol. Juan Fuentes e Ing. Francisco Barrera, por su valioso apoyo en campo y laboratorio.

A los miembros del comité de revisión de tesis: Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa, Dr. Evgueni Shumilin, Dr. Sergio Aguiñiga García y M.C. Víctor René Magallanes Ordóñez cuyos comentarios, correcciones y sugerencias contribuyeron a mejorar este trabajo.

A la Dra. Ma. de Lourdes Robledo Marengo, por el primer empujón que siempre necesitamos, por su confianza e incansable labor en la formación de profesionistas.

Al M.C. Francisco Javier Castellón Fonseca, por su gran apoyo y por todo lo que ha hecho por la Universidad Autónoma de Nayarit.

Al M.S.P. Saúl Hernán Aguilar Orozco, por su valioso apoyo y por preocuparse en el mejoramiento académico en nuestra universidad.

Al Dr. José Irán Bojorquez Serrano, por su apoyo y favorecer el desarrollo académico del personal en nuestro Centro de Investigación (CEMIC).

A las Familias Delgadillo Anguiano y Agundes Meza, por brindarme su amistad y apoyo incondicional sin conocerme. ¡Estaré por siempre agradecido!.

Al Jarocho Espinoza y Poncho Martínez, por su amistad y apoyo incondicional en todo momento.

A las autoridades, investigadores y técnicos, personal del Departamento de Servicios Escolares, Biblioteca y Computo, secretarias, chóferes y lancheros del CICIMAR, ¡muchas gracias por todo!.

Al los Investigadores y personal técnico del Laboratorio de Química Marina y del Departamento de Oceanología del CICIMAR, por sus asesorías, amistad, convivencia y hacerme sentir como en casa.

A todos mis amigos (a) y compañeros (a) de la maestría y doctorado, investigadores, personal administrativo y técnico con sus respectivos (a) esposos (a) e hijos (quienes los tengan), por brindarnos su amistad, por todos aquellos momentos que convivimos y por hacer muy grata nuestra estancia a mi familia y a mí en La Paz.

Por ultimo y de manera especial deseo expresar mi agradecimiento aquellos mexicanos (a) que con el sudor de su frente contribuyen a la educación en nuestro país.

DEDICATORIAS

A mi madre: Antonia Bañuelos Jiménez, como resultado de su esfuerzo y por guiarme en el camino correcto de la vida.

A mi esposa: Mireily Libertad Ledesma Delgado, por estar conmigo en todo momento, por tu cariño y comprensión.

A mi hijo: Helios Alberto Romero Ledesma, ¡Mi Soll!. En quien encuentro motivo suficiente para seguir adelante.

A mis hermanas y esposos: Georgina y Alfredo, Karla y Manuel, por el apoyo constante que de ellos he recibido.

A mis sobrinos: Annie, Damaris y Kevin, para que sirva como ejemplo en su superación.

A la memoria de mi tío: Jorge Bañuelos Jiménez, por que sé que en el lugar que te encuentres estarás orgulloso de mí.

¡CON TODO CARIÑO A MI PEQUEÑA GRAN FAMILIA!

ÍNDICE

	Pág.
LISTA DE TABLAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	iii
GLOSARIO.....	vi
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Marco teórico.....	1
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Justificación.....	5
II. HIPÓTESIS.....	7
III. OBJETIVOS.....	7
3.1. Objetivo general.....	7
3.2. Objetivos específicos.....	7
IV. ÁREA DE ESTUDIO.....	8
4.1. Ubicación geográfica.....	8
4.2. Geología de la cuenca.....	10
4.3. Condiciones climáticas.....	11
4.4. Condiciones hidrológicas.....	12
4.5. Batimetría y sedimentos.....	13
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
5.1. Diseño experimental.....	16
5.2. Limpieza del material y colecta de las muestras.....	16
5.3. Análisis de las muestras.....	20
5.3.1. Variables hidrológicas.....	20
5.3.2. Metales.....	20
5.4. Procesamiento de los datos.....	22

Continuación...	Pág.
VI. RESULTADOS.....	24
6.1. Distribución espacial y variación temporal.....	24
6.1.1. Temperatura y salinidad.....	24
6.1.2. Fosfatos y silicatos.....	25
6.1.3. Materia particulada suspendida y clorofila <i>a</i>	26
6.1.4. Aluminio.....	36
6.1.5. Hierro.....	37
6.1.6. Manganeso.....	38
6.1.7. Cobre.....	39
6.1.8. Cadmio.....	41
6.1.9. Factores de enriquecimiento de los metales.....	47
VII. DISCUSIÓN.....	57
7.1. Condiciones hidrológicas.....	57
7.1.1. Temperatura y salinidad.....	57
7.1.2. Fosfatos y silicatos.....	62
7.1.3. Materia particulada suspendida y clorofila <i>a</i>	64
7.2. Metales en la materia particulada suspendida.....	70
7.2.1. Aluminio.....	70
7.2.2. Hierro.....	73
7.2.3. Manganeso.....	77
7.2.4. Cobre.....	82
7.2.5. Cadmio.....	86
VIII. CONCLUSIONES.....	90
IX. REFERENCIAS.....	91

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados del análisis de sedimento estándar BCSS-1 (Sedimentos Estuarinos del Golfo de San Lorenzo, Canadá).....	22
Tabla 2. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de la temperatura (°C) y salinidad en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	25
Tabla 3. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de las concentraciones de PO_4^{3-} y SiO_2 (μM) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	26
Tabla 4. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de las concentraciones de la MPS (mg L^{-1}) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	27
Tabla 5. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de las concentraciones de la MOP (mg L^{-1}) y clorofila <i>a</i> (mg m^{-3}) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	28
Tabla 6. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del contenido de Al (%) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	37
Tabla 7. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del contenido de Fe (%) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	38
Tabla 8. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del contenido de Mn (mg g^{-1}) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	39
Tabla 9. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del contenido de Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	40
Tabla 10. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del contenido de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	41
Tabla 11. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del FE del Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	47
Tabla 12. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del FE del Fe en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	48

Tabla 13. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del FE del Mn en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	49
Tabla 14. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del FE del Cu en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	50
Tabla 15. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del FE del Cd en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	51
Tabla 16. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de la razón Fe/Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	75
Tabla 17. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de la razón Mn/Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	80
Tabla 18. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de la razón Cu/Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	84
Tabla 19. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de la razón Cd/Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.....	9
Figura 2. Batimetría (a) y distribución espacial de los tipos de sedimentos (b) en la porción sur de la Bahía y Laguna de La Paz (modificados de Green-Ruiz y Larrinaga-Cunningham, 1986; Cruz-Orozco <i>et al.</i> , 1996; Godínez-Orta <i>et al.</i> , 1997).....	15
Figura 3. Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo. Enero (a), mayo y septiembre (b) del 2002.....	18
Figura 4. Sistema de colecta de agua superficial. Panorámica de la colecta de las muestras (a). Bomba libre de componentes metálicos (b).....	19
Figura 5. Distribución espacial de la temperatura (°C) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal de la temperatura promedio del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (d).....	29
Figura 6. Distribución espacial de la salinidad en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal de la salinidad promedio del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (d).....	30
Figura 7. Distribución espacial de las concentraciones de PO_4^{3-} (μM) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal de las concentraciones promedio de PO_4^{3-} del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (d).....	31
Figura 8. Distribución espacial de las concentraciones de SiO_2 (μM) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal de las concentraciones promedio de SiO_2 del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (d).....	32
Figura 9. Distribución espacial de las concentraciones de la MPS (mg L^{-1}) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal de las concentraciones promedio de la MPS del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz y zona somera de la laguna durante el 2002 (d).....	33
Figura 10. Distribución espacial de las concentraciones de la MOP (mg L^{-1}) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Mayo (a) y septiembre (b) del 2002. Variación temporal de las concentraciones promedio de la MOP del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (c).....	34

Figura 11. Distribución espacial de las concentraciones de clorofila <i>a</i> (mg m^{-3}) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Mayo (a) y septiembre (b) del 2002. Variación temporal de las concentraciones promedio de clorofila <i>a</i> del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (c).....	35
Figura 12. Distribución espacial del contenido de Al (%) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del contenido de Al en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).....	42
Figura 13. Distribución espacial del contenido de Fe (%) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del contenido de Fe en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).....	43
Figura 14. Distribución espacial del contenido de Mn (mg g^{-1}) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del contenido de Mn en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).....	44
Figura 15. Distribución espacial del contenido de Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del contenido de Cu en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).....	45
Figura 16. Distribución espacial del contenido de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del contenido de Cd en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).....	46
Figura 17. Distribución espacial del FE del Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del FE del Al en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).....	52
Figura 18. Distribución espacial del FE del Fe en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del FE del Fe en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).....	53
Figura 19. Distribución espacial del FE del Mn en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del FE del Mn en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).....	54

Figura 20. Distribución espacial del FE del Cu en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del FE del Cu en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).....	55
Figura 21. Distribución espacial del FE del Cd en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del FE del Cd en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).....	56
Figura 22. Diagrama T-S. Los triángulos, los puntos oscuros y claros representan las estaciones de muestreo en cada una de los meses de cruce, las líneas indican la clasificación de las masas de agua dadas por Torres-Orozco (1993). Los acrónimos para las diferentes masa de agua son: AGC Agua del Golfo de California, ASE Agua Superficial Ecuatorial, ASST Agua Subsuperficial Subtropical, AIP Agua Intermedia del Pacífico y APP Agua Profunda del Pacífico.....	60
Figura 23. Comportamiento anual de la temperatura ambiente y temperatura del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz (a). Comportamiento anual de la precipitación y evaporación en la Paz, y salinidad del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz (b).....	61
Figura 24. Relación Fe:Al en la MPS del agua superficial de la Bahía de La Paz durante invierno (a) y primavera (b) del 2002.....	76
Figura 25. Relación Mn:Al en la MPS del agua superficial de la Bahía de La Paz durante invierno del 2002 (a). Relación Mn:Al en la MPS del agua superficial de la zona NCL durante primavera y verano del 2002 (b).....	81
Figura 26. Relación Cu:clorofila a (a), Cu:MOP (b) y Cu:MIP (c) del agua superficial de la Bahía de La Paz. Relación Cu:clorofila a (a'), Cu:MOP (b') y Cu:MIP (c') del agua superficial de la Laguna de La Paz. Datos de primavera y verano del 2002.....	85
Figura 27. Relación Cd:Fe en la MPS del agua superficial de la zona denominada MM durante el 2002.....	88

GLOSARIO

- Advección.** Movimiento horizontal. Proceso mediante el cual son transportadas las propiedades inherentes a un fluido en movimiento en el océano (por ejemplo, calor o concentración de sal).
- Aerosoles.** Partículas en suspensión en la atmósfera. Materia sólida o líquida dispersa en el aire, de diámetro inferior a 10 μm . Dependiendo de su tamaño, pueden permanecer en suspensión en la atmósfera desde unos segundos a varios meses.
- Arcillas.** Fracción granulométrica de un sedimento producto de la erosión de las rocas cuyos componentes son todos menores de 0.004 mm en tamaño. Como material sedimentario se halla compuesto en forma predominante por silicatos de aluminio hidroxilados con estructura atómica planar.
- Biogeoquímica.** Se refiere a las interacciones químicas que se dan entre los componentes vivos ("bio") y los componentes físicos ("geo") del sistema Tierra, tal y como sucede con los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno, etc.
- Capa de mezcla.** Capa de agua superficial del océano (5-200 m) donde las propiedades son homogéneas debido a la mezcla causada por el forzamiento del viento.
- Collas.** Denominados localmente (Baja California Sur) a los vientos del noroeste, los cuales se presentan durante el invierno.
- Contaminación.** Introducción de agentes químicos, físicos o biológicos, a un medio al que no pertenecen. Cualquier modificación indeseable de la composición natural de un medio.
- Contaminación marina.** La introducción por acción del hombre de cualquier sustancia o energía en el medio marino (incluidos los estuarios) cuando produzca o puedan producir efectos nocivos tales como daños a los recursos vivos y a la vida marina, peligros para la salud humana y deterioro de la calidad del agua marina.
- Contaminante.** Forma de materia o energía presente en un medio al que no pertenece, o bien, por arriba de su concentración basal.
- Corrientes de marea.** Corrientes producidas por los cambios periódicos de mareas.
- Erosión.** Destrucción de los materiales de la superficie terrestre (rocas y suelo) por separación física de partículas de cualquier tamaño debido a la acción de los agentes externos (viento, agua, hielo). La intensidad de la erosión depende de la energía del agente erosivo, la naturaleza de los materiales (litología), el grado de meteorización, la pendiente del terreno, y del grado de cobertura vegetal.
- Espectroscopia de absorción atómica.** Método analítico basado en la absorción de luz que experimenta una mezcla gaseosa de átomos que se forma en una llama, horno o en una celda de vapor frío.
- Estratificación.** Condiciones del fluido que implica la existencia de dos o más capas horizontales arregladas según su densidad.

Factor de enriquecimiento. Una forma de evaluar el grado de enriquecimiento o empobrecimiento de un metal con relación a una fuente específica. Comúnmente se utiliza un metal conservativo como el Al, Li, Cs y Sc.

Fosforita. Roca sedimentaria de origen marino, cuyo constituyente principal es un fosfato cálcico (Apatita). Representa una de las fuentes más importantes de fósforo para uso industrial y agrícola.

Geoquímica. Rama de la geología que estudia la composición química y las reacciones que tienen o que han tenido lugar en la Tierra.

Gradiente. Magnitud de cambio que se produce en una cantidad medida con respecto al espacio o tiempo.

Limo. Fracción granulométrica de un sedimento clástico, compuesto en su mayor parte por partículas de diámetro entre las de arena y arcilla, cuyos diámetros se encuentran entre 0.062 mm y 0.004 mm. El componente principal de los limos es el cuarzo, y en segundo lugar feldespato, mica, etc. Por su modo de formación, los limos se clasifican en marinos, lacustres, fluviales, eólicos, y subdivisiones de estos tipos según los ambientes.

Marea. Es la variación periódica del nivel del mar debida al movimiento relativo y a la atracción gravitacional entre el sol, la luna y la tierra. Esta variación del nivel del mar se propaga como una onda a través de las cuencas oceánicas.

Masa de agua. Volumen de agua usualmente identificada por valores típicos de temperatura y salinidad que le son característicos y que permite distinguirlo de las aguas circundantes. Su formación ocurre en la interfase con la atmósfera y por la mezcla de dos o más tipos de agua.

Materia orgánica particulada (MOP). Materia sólida que es retenida en un filtro de 0.45 μm compuesta principalmente de una mezcla viva y muerta de fitoplancton y zooplancton, sus productos de degradación y exudación, bacterias, así como agregados macroscópicos denominados nieve marina.

Materia particulada suspendida (MPS). Materia sólida que es retenida en un filtro de 0.45 μm compuesta por una fracción orgánica e inorgánica.

Metales pesados. Elementos del grupo de los metales, con densidad superior a 4.5 g/cm³ y masa atómica alta. También llamados así por su toxicidad y poseer un riesgo para los organismos en bajas concentraciones (Cd, Cu, Pb, Hg).

Metales traza. Denominados a sí por encontrarse en bajas concentraciones (entre 0.05 y 50 μM) en el agua de mar.

Normalización. Forma de reducir los efectos naturales del tamaño de grano sobre la distribución de metales traza, para identificar los principales transportes de estos y estima la existencia de contaminación utilizando elementos conservativos como el Al, Li, Cs y Sc.

Sedimentación. Depósito de partículas previamente erosionadas y transportadas por los agentes geológicos externos desde un área generadora a un área receptora o cuenca sedimentaria. La sedimentación de partículas puede obedecer a causas mecánicas como el depósito por gravedad o el depósito de las partículas de mayor tamaño cuando el agente de transporte sufre una disminución de velocidad y por tanto de energía cinética.

Sedimentos. Agregado no consolidado formado por medio de uno o más procesos fundamentales de la sedimentación. Por su origen pueden ser endógenos o químicos, exógenos o clásticos. Por su composición pueden ser silíceos, arcillosos, feldespáticos, orgánicos, etc. Por su ambiente, continental (fluvial, lacustre, glacial, eólico) o marino (nerítico, batial, abisal).

Sedimentos terrígenos. Aquellos que provienen de material terrestre. Depósito formado por material de erosión de la superficie de la tierra firme y sedimentado tanto en el continente como en el fondo de los mares.

Termoclina. Gradiente vertical brusco de temperatura que se produce por la mezcla de aguas frías y calientes. Es aquella zona de la capa superficial del océano en la cual la temperatura del agua del mar tiene una rápida disminución en sentido vertical con poco aumento de la profundidad. Se caracteriza por el rápido cambio de un grado de temperatura o más por metro de profundidad

Turbiedad. Claridad reducida del agua producida por la presencia de partículas en suspensión debida a limos, arcillas y microorganismos vivos o muertos; los dos primeros son consecuencia de la acción erosiva y el segundo por una posible eutrofización.

RESUMEN

Con el propósito de identificar las fuentes y los procesos que influyen en la dinámica espacial y temporal del contenido de metales pesados en la materia particulada suspendida (MPS) de la porción sur de la Bahía de La Paz, se realizaron tres campañas de muestreo durante el 2002, considerando los meses de mayor y menor precipitación e intensidad de vientos en la zona (enero, mayo y septiembre). Se colectaron muestras de agua superficial en una red de 23 estaciones junto a sitios potenciales de aporte de metales (natural y antropogénico). Adicionalmente se midieron algunas variables hidrológicas como temperatura, salinidad, nutrientes y clorofila *a*. La cuantificación de los metales se realizó por el método de espectrofotometría de absorción atómica (flama aire-acetileno y horno de grafito) después de la digestión sucesiva de las muestras de la MPS con ácidos concentrados. Las variables hidrológicas se determinaron de acuerdo a las técnicas estándar. Éstas últimas presentaron cambios estacionales y mostraron un claro gradiente espacial entre el ambiente lagunar y la bahía. Las condiciones climáticas locales, la topografía, corrientes y mareas influyen en la dinámica espacio temporal de estas variables. Los contenidos de los metales Al, Fe, Mn, Cu y Cd en la MPS presentaron variaciones espacio-temporal las cuales están controladas por procesos naturales, tales como el viento, precipitación y corrientes. Se observó que la resuspensión del material particulado provocada por los vientos de invierno promueven el aporte de Al y Fe en el agua superficial de la laguna y la zona costera de la bahía, mientras que la advección de agua del Golfo de California mediante la remoción provoca el enriquecimiento de Mn y Cd en la MPS del agua superficial de la porción sur de la bahía. Se concluye que la Bahía de La Paz es un ambiente sin contribución antropogénica notoria y los niveles de metales pesados encontrados se deben a las características litológicas de la corteza continental y a la influencia de las aguas del Golfo de California.

ABSTRACT

In order to identify the sources and processes that influence the spatial and temporal dynamics of heavy metals in the suspended particulate matter (SPM) of the southern portion of La Paz Bay, three samplings were done during January, May and September 2002, it was taken into consideration that they were the months of highest and lowest rainfall and wind intensities in the zone. Surface water samples were collected at 23 sites located near potential metal sources (natural and anthropogenic). Additionally, we measured temperature, salinity, nutrients and chlorophyll *a*. Metal analysis was done in an Atomic Absorption Spectrophotometer (air-acetylene flame and graphite furnace) after successive digestion of the SPM samples with concentrated acid. The hydrological variables were determined according to standard techniques. These variables showed seasonal changes and a marked spatial gradient between the lagoon environment and the bay. Local weather conditions, topography, currents and tides tend to influence the spatial and temporal dynamics of these variables. Concentrations of Al, Fe, Mn, Cu and Cd in SPM showed spatial and temporal variations that are controlled by natural processes, such as the wind, rainfall and currents. It was observed that the resuspension of particulate material induced by winter winds favored the increase in concentrations of Al and Fe in surface waters of the lagoon and the coastal zone of the bay, while the advection of waters from the Gulf of California produced the enrichment of Mn and Cd in SPM in the surface waters of the southern portion of the bay. La Paz Bay is an environment without notorious anthropogenic heavy metals contributions, and the metal concentrations measured are due to the lithological characteristics of the continental crust and the influence of waters from the Gulf of California.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Marco teórico

En el medio ambiente marino, los márgenes continentales que incluyen los estuarios, lagunas costeras, bahías, la plataforma continental y los mares marginales juegan un papel relevante, ya que funcionan como fuentes o sumideros de varios elementos importantes desde un punto de vista biogeoquímico (Martin y Thomas, 1994). En el estudio de los ambientes marinos la biogeoquímica de los metales pesados es un aspecto relevante a considerar, debido a su importancia ecológica y a los cambios en respuesta a las alteraciones naturales y antropogénicas.

De manera natural los metales pesados son introducidos al océano principalmente a través de los escurrimientos de los ríos, vientos, ventilas hidrotermales, difusión desde los sedimentos y surgencias (Libes, 1992; Chester, 2000). Por su parte, las fuentes antropogénicas más importantes son, la industria minera y metalúrgica, refinerías de petróleo, estaciones generadoras de electricidad, descargas urbanas y dragados en la zona costera (Kennish, 1997). Se ha considerado que en algunos casos la movilización antropogénica de metales pesados puede ser tan importante y aún exceder la movilización natural (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1999).

Una ruta importante en la movilización de metales hacia el océano es a través de los sedimentos terrígenos (Salomons y Förstner, 1984), en el océano, las partículas terrígenas y biogénicas mediante la remoción y/o adsorción actúan como transporte de metales en la columna de agua (Libes, 1992; Donat y Brulan, 1995; Chester, 2000), de tal forma, el destino y transporte de los metales en los sistemas acuáticos están determinados por la naturaleza de su asociación con la materia particulada suspendida (MPS) (Warren y Zimmerman, 1993).

El análisis de metales en la MPS puede contribuir en gran parte al entendimiento de los ciclos biogeoquímicos de estos elementos. Por ejemplo, el Al particulado puede ser usado como trazador de aportes eólicos, resuspensión de sedimentos y transporte horizontal. El ciclo redox del Mn y Fe puede ser estudiado comparando los perfiles de concentración de la fracción disuelta y particulada durante la diagénesis subóxica de los sedimentos. El material particulado colectado

en trampas de sedimentos nos puede dar información de la remoción y flujo de metales hacia el fondo marino (Landing y Lewis, 1991).

Desde el punto de vista geoquímico, es importante conocer y describir en los ambientes marino-costeros como las condiciones ambientales, hidrodinámicas, geomorfológicas y demográficas determinan la presencia de metales pesados, debido a que estas zonas representan uno de los ecosistemas más complejos y dinámicos del planeta, los cuales pueden ser aún más complejos en respuesta a las alteraciones hechas por el hombre.

La Bahía de La Paz, situada en una región con características climáticas, geológicas y demográficas muy especiales ofrece una situación interesante para el estudio y conocimiento de la geoquímica de los metales. Específicamente la porción sur de la bahía, donde el ciclo natural de estos elementos pudiera estar influenciado por la actividad antropogénica (Méndez *et al.*, 1998; Shumilin *et al.*, 2001).

De las condiciones climáticas en el área de la Bahía de La Paz destacan una temporada de vientos intermitentes pero intensos en invierno y una temporada de ciclones a finales de verano (Robles Gil-Mester, 1998). La litología de la cuenca está compuesta de rocas volcánicas y sedimentarias principalmente, de donde se distinguen los depósitos fosfáticos de San Juan de La Costa (Hausback, 1984; Piper, 1991; Álvarez-Arellano y Páez-Osuna, 1995), los cuales fueron explotados por muchos años por la empresa ROFOMEX S.A. de C.V.

Por otra parte, en la porción sur de la Bahía de La Paz se localizan los principales escurrimientos de la zona, representados en su mayoría por arroyos de régimen intermitente que descargan episódicamente durante la época de lluvias y ciclones material terrígeno desde la cuenca de drenaje (Rodríguez-Meza, 1999). Además, en esta misma zona se presenta la mayor actividad humana influenciada por la Ciudad de La Paz. Si bien, actualmente esta ciudad se encuentra libre de grandes industrias que pudieran modificar el ambiente natural, su rápido crecimiento urbano en los últimos años ha traído consigo la construcción de la infraestructura necesaria para la prestación de servicios públicos municipales y para el desarrollo de la industria del turismo (una de las principales actividades económicas de la región), siendo las más importantes la construcción de marinas para yates turísticos y el

puerto de altura de Pichilingue, la operación de almacenes de combustibles de PEMEX y una planta termoeléctrica de la CFE.

Bajo este contexto y considerando las principales fuentes que influyen en el aporte de metales a la zona costera (escurrimiento pluvial, transporte eólico y actividad antropogénica), el propósito de este trabajo es el de analizar la concentración de los metales pesados presentes en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante las épocas con mayor y menor precipitación e intensidad del viento, para conocer la distribución espacial y la variación temporal de los metales en la fase particulada como una contribución para entender los procesos que controlan el aporte y su distribución en este cuerpo de agua tan importante en el Golfo de California.

1.2. Antecedentes

En los últimos años ha ocurrido una revolución en la química ambiental y marina con respecto a nuestro entendimiento de la distribución y el comportamiento químico de los elementos traza en aguas naturales, particularmente marinas. Los principales factores que iniciaron esta revolución fueron el desarrollo y la adopción de técnicas limpias (no contaminantes) para la colecta, almacenamiento y análisis de las muestras, y el gran avance en los métodos modernos de análisis e instrumentos (Donat y Brunland, 1995). El progreso de nuestro entendimiento de la química de los elementos traza fue demostrado por el incremento de los trabajos publicados sobre este tópico en la década de los 80's (Wong *et al.*, 1983; Bruland, 1983; Whitfield y Turner, 1987; Burton y Stratham, 1990).

En México se han realizado diversos estudios sobre metales desde la década de los 70's. Por ejemplo, Villanueva y Botello (1992) hicieron una revisión de los datos de la concentración de metales en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano generados desde 1972 hasta 1992 y posteriormente discuten el problema de la contaminación por metales en áreas costeras mexicanas (Villanueva y Botello, 1998).

En la zona costera de la Península de Baja California y Golfo de California los trabajos sobre metales se han enfocado principalmente a la geoquímica de estos

elementos en sedimentos. Así tenemos por ejemplo, estudios de contaminación y distribución de metales en la región fronteriza (México-EUA), yacimientos mineros y puertos (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1994; Villaescusa-Celaya *et al.*, 1997; Shumilin *et al.*, 2000; Carreón-Martínez *et al.*, 2002), caracterización y distribución de metales en bahías y lagunas costeras (Shumilin *et al.*, 1996; Godínez-Orta *et al.*, 1997; Shumilin *et al.*, 1998; Méndez *et al.*, 1998; Rodríguez-Meza, 1999; Kot *et al.*, 1999; Daesslé *et al.*, 2000; Green-Ruiz, 2000; Shumilin *et al.*, 2001; Rodríguez-Castañeda, 2001), caracterización y distribución de metales en el Bajo y Alto Golfo de California (Páez-Osuna y Osuna-López, 1990a; Shumilin *et al.*, 2002a), estudios en depósitos fosfáticos (Piper, 1991; Álvarez-Arellano y Páez-Osuna, 1995) y fragmentos de basalto pelágicos (Páez-Osuna y Osuna-López, 1989), diagénesis de sedimentos (Páez-Osuna y Osuna-López, 1992), estudios en abanicos-deltas (Rodríguez-Figueroa *et al.*, 1998), ambientes hipersalinos (Shumilin *et al.*, 2002b) y estudios asociados a ventilas hidrotermales (Carranza-Edwards *et al.*, 1986; Páez-Osuna y Osuna-López, 1990b).

Entre estos trabajos, los realizados en sedimentos de la Bahía de La Paz se encuentra el de Méndez *et al.* (1998), donde reportan los niveles de metales traza en sedimentos superficiales a lo largo de la costa sur de la bahía. Un estudio más reciente es el de Rodríguez-Castañeda (2001), que determinó las concentraciones, patrones de distribución espacial y vertical, así como los factores de enriquecimiento de los elementos mayores y traza de los sedimentos superficiales y de tres núcleos en este cuerpo de agua.

En la Laguna de La Paz, Godínez-Orta *et al.* (1997) realizaron la caracterización litológico-geoquímica de los sedimentos superficiales y Shumilin *et al.* (1998) observaron las asociaciones geoquímicas, patrones de distribución y factores de enriquecimiento de metales y metaloides en los sedimentos superficiales de la laguna. Posteriormente, Rodríguez-Meza (1999) realizó la caracterización geoquímica del ambiente lagunar analizando los componentes mayores y traza en sedimentos superficiales y suelos de arroyos adyacentes a la cuenca de drenaje. Por su parte Kot *et al.* (1999) estudiaron la distribución del Hg y Green-Ruiz (2000) la geoquímica de metales pesados de los sedimentos en la laguna y la región

adyacente a la Bahía de La Paz. Por último, Shumilin *et al.* (2001) caracterizaron la distribución del As, Sb, Se y otros elementos traza en los sedimentos superficiales de la laguna y en la boca de los arroyos adyacentes.

En la Bahía de La Paz no se cuenta con información de metales en la fracción disuelta y particulada, y en el Golfo de California son escasos. De los pocos trabajos que se han realizados en esta región se encuentra el de Castro-Castro (1999) que estudió el flujo de metales en sedimentos en suspensión en el Delta del Río Colorado. Por su parte Delgadillo-Hinojosa (2000) estudió la biogeoquímica del Cd y Mn en un transecto a lo largo del eje principal del Golfo de California, y reportó un enriquecimiento de Cd en las aguas del Golfo de California generado por la intensa mezcla vertical que ocurre en la región de las grandes islas (Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2001).

1.3. Justificación

El estudio de elementos traza en aguas naturales es de gran importancia a fin de incrementar nuestro conocimiento sobre los procesos naturales en general, el comportamiento químico y la importancia biológica de los elementos en particular, así como para entender la relación entre las emisiones antropogénicas y futuras consecuencias para el hombre y el ambiente (Salbu y Steinnes, 1995).

La Bahía de La Paz por localizarse en una región árida, se encuentra expuesta al aporte natural de metales debido a la erosión de las formaciones litológicas circundantes provocada por la acción de los vientos y los escurrimientos pluviales en temporada de ciclones. Los aportes antropogénicos a la bahía pudieran estar influenciados por la Ciudad de La Paz, que en los últimos años su crecimiento ha traído consigo el incremento de la infraestructura para cubrir las necesidades de la población.

Hasta ahora los estudios sobre metales pesados realizados en la Bahía y Laguna de La Paz se han enfocado principalmente a la acumulación y distribución en sedimentos y en menor proporción al contenido en organismos (Godínez-Orta *et al.*, 1997; Méndez *et al.*, 1998; Shumilin *et al.*, 1998; Rodríguez-Meza, 1999; Kot *et al.*, 1999; Green-Ruiz, 2000; Rodríguez-Castañeda, 2001; Shumiline *et al.*, 2001),

mientras que el conocimiento referente a las concentraciones de metales en la MPS es nulo.

La MPS juega un papel relevante en los ciclos biogeoquímicos de los metales en el ambiente marino-costero (Salomons y Förstner, 1984; Libes, 1992; Chester, 2000; Turner y Millward, 2002). El análisis del contenido de metales pesados en esta fase geoquímica colectada en tres épocas distintas considerando los meses de mayor y menor precipitación e intensidad de los vientos frente a sitios potenciales de aporte de metales (natural y antropogénico), puede dar información importante sobre las fuentes y los procesos que intervienen en la distribución espacial y la variación temporal de estos elementos en la porción sur de la Bahía de La Paz.

II. HIPÓTESIS

Las descargas episódicas de material terrígeno originadas por las lluvias en temporada de ciclones, la resuspensión y el transporte de partículas provocados por los vientos intermitentes pero intensos de invierno y la dinámica hidrológica en la zona, promueven y controlan el aporte y distribución de metales pesados en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz.

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Conocer las concentraciones, distribución espacial y variación temporal de los metales Fe, Mn, Cu, Cd y Al en la MPS como una contribución para entender los procesos que controlan el aporte y su distribución en la porción sur de la Bahía de La Paz.

3.2. Objetivos específicos

Describir la distribución espacial y variación temporal de algunas variables hidrológicas (temperatura, salinidad, fosfatos, silicatos y clorofila *a*) del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz.

Determinar las concentraciones totales de los metales Fe, Mn, Cu, Cd y Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz.

Conocer la distribución espacial y la variación de los metales Fe, Mn, Cu, Cd y Al en la MPS en las épocas de mayor y menor precipitación e intensidad de vientos en la porción sur de la Bahía de La Paz.

Identificar las fuentes y los procesos que controlan el contenido y la distribución de los metales Fe, Mn, Cu, Cd y Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz.

IV. ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Ubicación geográfica

El área de estudio se localiza en el extremo sur de la Península de Baja California, al noroeste de la República Mexicana. Se encuentra enmarcada entre los paralelos 24°06' y 24°24' de latitud norte y los meridianos 110°15' y 110°42' de longitud oeste, comprende la porción sur de la Bahía de La Paz y la Laguna Ensenada de La Paz (Figura 1).

La Bahía de La Paz es una entrada amplia de agua de mar ubicada sobre la margen sur oriental de la Península de Baja California. Está limitada hacia el oeste y sur por tierra firme, hacia el norte y oriente por las aguas del Golfo de California y las islas Espíritu Santo y La Partida. Se comunica libremente con las aguas del Golfo de California a través de una boca principal (Boca Grande) ubicada entre Punta Cabeza Mechuda y el extremo norte de la Isla La Partida, al sureste también se comunica con el Golfo de California a través de una boca secundaria (Canal San Lorenzo) ubicada entre el extremo sur de Isla Espíritu Santo y Punta las Pilitas (Álvarez-Arellano *et al.*, 1997). Desde el punto de vista estructural forma parte del graben de La Paz, es de forma alargada, con su eje mayor de 90 km orientado en dirección noroeste-sureste, su eje menor es de 30 km (Cruz-Orozco *et al.*, 1996) y cubre un área aproximada de 2,635 km² (Reyes-Salinas, 2003).

Al sur de la Bahía de La Paz se localiza la Laguna "Ensenada de La Paz". Es un cuerpo de agua protegido, limitado al norte por la barrera arenosa denominada "El Mogote" que la separa de la bahía. La laguna tiene una longitud de aproximadamente 12 km, un ancho de 5 km (Obeso-Nieblas *et al.*, 1993) y cubre un área de aproximadamente 45 km² respecto al nivel medio del mar (Gilmartin y Revelante, 1978). Se comunica con la bahía mediante un canal de mareas de aproximadamente 3 km de largo y 1.5 km de ancho (Cruz-Orozco *et al.*, 1989). Al este y sureste de la laguna se localiza la Ciudad de La Paz capital del estado de Baja California Sur, la cual cuenta con la mayor población de la región con aproximadamente 160,000 habitantes (INEGI, 2000).

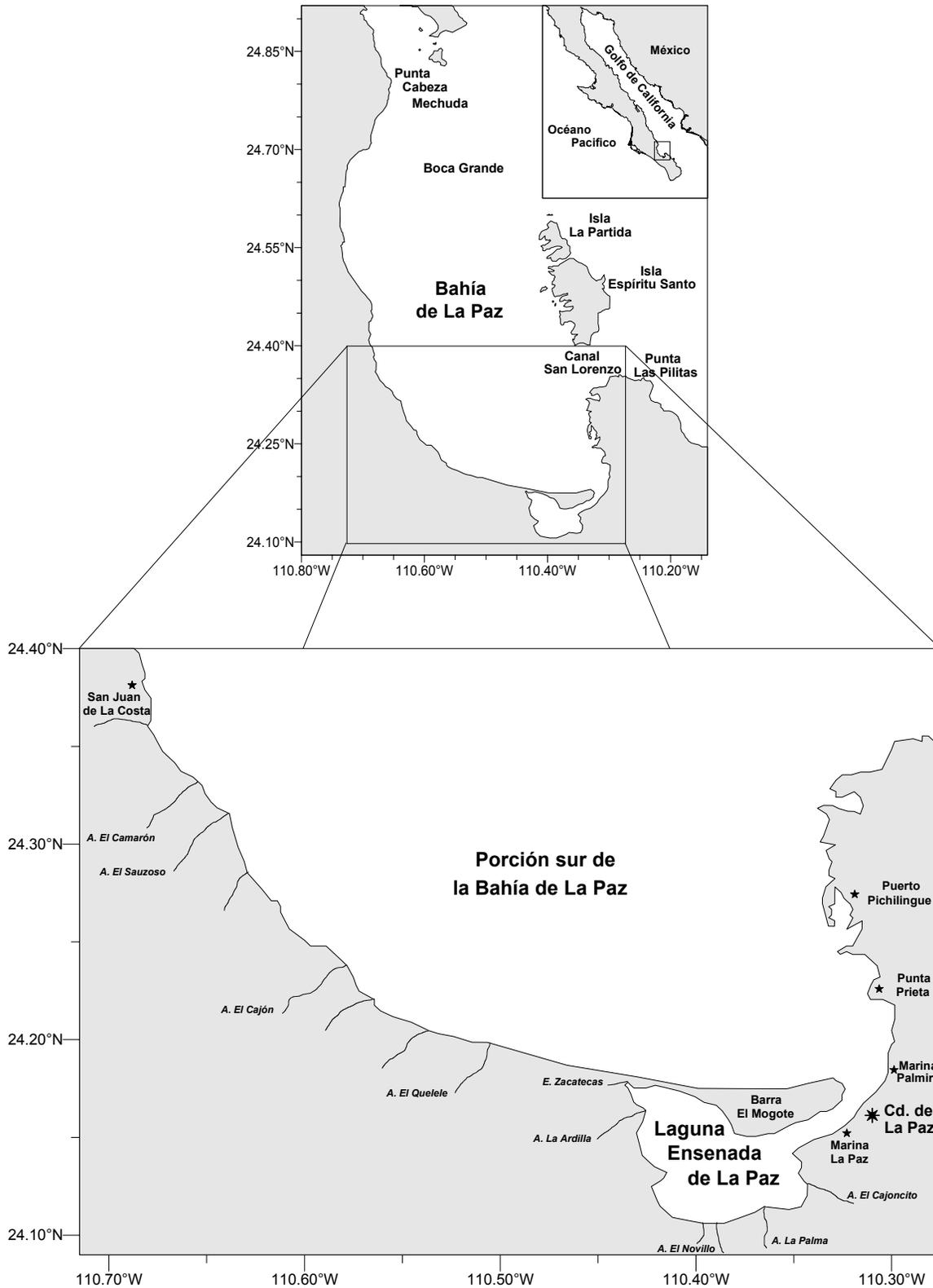


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

4.2. Geología de la cuenca

La litología circundante de la Bahía de la Paz presenta en la parte occidental, rocas que van del Terciario Medio al Reciente y constituyen tres formaciones: Formación San Gregorio, consiste de una alternancia de areniscas tobáceas, lutitas silicificadas, fangolitas, areniscas conglomeráticas y capas de fosforita intercaladas; la Formación San Isidro, que descansa en discordancia erosional sobre la Formación San Gregorio, está constituida por areniscas glauconíticas, conglomerados, lutitas y algunas capas de tobas riolíticas, y la Formación Comondú que sobreyace en discordancia erosional a la Formación San Isidro, está formada por areniscas y conglomerados volcanoclásticos, tobas riolíticas, lahares andesíticos y flujos de lava coronando la secuencia (Hausback, 1984).

El margen oriental de la bahía está constituido por una serie de rocas cuya edad varía desde el Cretácico al Reciente. Las rocas más antiguas afloran en el pilar tectónico conocido localmente como Sierra de Las Cruces, están constituidas por rocas ígneas intrusivas principalmente granitos, tonalitas y gabros de edad Cretácica (Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1988). En los alrededores de la Ciudad de La Paz se tiene una secuencia de rocas volcánicas y volcanosedimentarias, que Hausback (1984) considera como la unidad más joven de la Formación Comondú.

Al norte de la bahía se tienen las islas Espíritu Santo y La Partida, en ambas afloran rocas de origen volcánico, con excepción de la parte suroriental de la Isla Espíritu Santo donde hay parte del basamento granítico característico del sur de la península. Las rocas volcánicas comprenden tobas piroconsolidadas de composición riolítica, brechas, aglomerados volcánicos y basaltos, Los depósitos Plio-Cuaternarios y aluviales de playa están poco desarrollados (Hausback, 1984).

La costa sur de la Bahía de La Paz se caracteriza por una secuencia de sedimentos marinos y aluviales recientes. En esta zona el fallamiento normal ha originado un graben o fosa tectónica (Valle de La Paz), en donde se han depositado sedimentos que provienen de las elevaciones montañosas del oriente y occidente, los minerales más comunes que se encuentran son arena, limo y arcilla (Álvarez-Arellano *et al.*, 1997).

4.3. Condiciones climáticas

De acuerdo con la clasificación climática Köppen, modificada por García (1973), por sus condiciones de temperatura y precipitación el clima de la zona es del tipo BW(h')hw(e'), es decir, seco desértico, cálido, con una temperatura media anual mayor de 22°C, un régimen de lluvias en verano y una oscilación anual extrema de la temperatura.

La masa continental que delimita el área de estudio presenta una temperatura media anual en el ambiente de 24°C. La temperatura máxima promedio se registra en el mes de agosto con 29.6°C y la mínima se presenta en el mes de enero con 18.0°C. Se han registrado temperaturas extremas que van de los 5°C en invierno hasta 41.5°C en verano.

Las lluvias son escasas en la mayor parte del año, la mayor incidencia ocurre en verano durante el mes de septiembre donde se registra una precipitación promedio de 58 mm. La época de estiaje se presenta de marzo a junio con una precipitación promedio menor a 2 mm.

La nubosidad se presenta con mayor cobertura en los meses de verano e invierno con cielo medio nublado, mientras que la menor cobertura de nubes se observa en los meses de marzo a junio. Por su parte la incidencia solar alcanza su máximo en junio (2,384 J cm⁻²) mientras que en diciembre se registra la mínima (1,309 J cm⁻²).

La evaporación media mensual es de 206 mm, la cual varía sustancialmente con la época del año. Ésta es mayor en los meses de mayo, junio y julio, con más de 250 mm mensuales, a los que corresponde una mayor insolación, una alta temperatura y un menor contenido de humedad. Los registros de evaporación más bajos se presentan en los meses de noviembre, diciembre y enero, con una evaporación menor a los 150 mm.

Los vientos predominantes en verano tienen una componente sur, con intensidades medias de 2 a 3 m s⁻¹. Los vientos durante el invierno son del noroeste y tienen velocidades medias de 2 a 3 m s⁻¹, en ocasiones alcanzan intensidades medias de 4 m s⁻¹ y rachas de 10 m s⁻¹, los cuales son denominados localmente como "Collas" (Robles Gil-Mester, 1998).

4.4. Condiciones hidrológicas

El ciclo anual de la temperatura superficial del mar en la Cuenca de La Paz presenta dos estaciones bien definidas. Durante invierno-primavera se alcanzan los mínimos anuales (21-24°C), mientras que las temperaturas superficiales más elevadas (27-31°C) se registran durante verano-otoño (Bernal *et al.*, 2001). La salinidad superficial promedio para otoño es de 34.75 (Zaytsev *et al.*, 1998), se han reportado salinidades superficiales en un intervalo de 34.96 a 35.25 para finales de primavera (Monreal-Gómez *et al.*, 2001).

Los perfiles verticales típicos de temperatura y densidad relativa en la bahía muestran como característica principal una capa de mezcla mayor a 40 m. La transición de la columna de agua de primavera a verano es muy abrupta, y en ésta última se desarrolla una fuerte termoclina. En los meses de otoño, la temperatura superficial comienza a descender y la capa de mezcla se va haciendo más profunda. En invierno el descenso de la temperatura continúa y se desarrolla la máxima profundidad de la capa de mezcla, la cual alcanza un máximo de aproximadamente 80 m. La baja temperatura se mantiene y llega a ser mínima hasta principios de la primavera cuando se estabiliza la columna de agua (Reyes-Salinas y Cervantes-Duarte, 1998).

El régimen de mareas en la bahía depende de la oscilación con la marea del Golfo de California y ésta a su vez, con la del Océano Pacífico (Jiménez-Illescas *et al.*, 1997). La amplitud de marea en la Bahía de La Paz es de aproximadamente 1.5 m (Zaytsev *et al.*, 1998).

Los principales factores que gobiernan la circulación y la estructura termohalina de la bahía son la fuerte estructura barotrópica y la fuerza de los vientos (Jiménez-Illescas *et al.*, 1997). La velocidad de las corrientes superficiales en la bahía se registra en un intervalo de 8 a 20 cm s⁻¹, dependiendo de las condiciones de viento de la superficie y de la marea, mientras que las corrientes más profundas (30 a 40 m) tienen la mitad de la velocidad que las corrientes superficiales, pero manteniendo la misma dirección del flujo de marea (Salinas-González, 2000).

Por su parte la Laguna de La Paz se considera como un cuerpo de agua hipersalino con características antiestuarinas (Espinoza-Ávalos, 1977; Cervantes-

Duarte y Santoyo-Reyes, 1986). La temperatura estacional promedio en el interior de la laguna se incrementa de 20°C en enero a un máximo de 31°C en agosto y disminuye de 30 a 21°C de septiembre a diciembre (Jiménez-Quiroz, 1991). La salinidad promedio anual es de 36.4 (Cervantes-Duarte *et al.*, 2001). La mayor salinidad se registra en primavera y verano (>38) y la mínima en otoño (<35) (Espinoza-Avalos, 1977).

Sandoval y Gómez (1997) describen para la Laguna de La Paz un régimen de mareas semidiurno durante las mareas vivas, aproximándose a un diurno durante las mareas muertas. Además reportan velocidades de corriente de 2 cm s⁻¹ en mareas muertas y 4 cm s⁻¹ para mareas vivas en el interior de la laguna, mientras que en el canal principal registraron velocidades de 20 cm s⁻¹ en mareas muertas y 50 cm s⁻¹ durante mareas vivas. El tiempo de residencia del agua de la laguna va de 3.5 a 5.4 ciclos de marea (Morales y Cabrera, 1982; Salinas-González, 2000), lo cual representa una evacuación de 31X10⁶ m³ entre la pleamar media superior y la bajamar media inferior (Morales y Cabrera, 1982).

4.5. Batimetría y sedimentos

La porción sur de la Bahía de La Paz es la parte más somera de este cuerpo de agua, presenta una pendiente suave que se incrementa hacia al norte hasta los 200 m de profundidad, e inicia un canal bien definido con dirección a la Depresión Alfonso hasta llegar a los ~400 m de profundidad (Figura 2a).

Los sedimentos de la bahía se caracterizan por la predominancia de las arenas y los limos. Los sedimentos arenosos ocupan la parte sur, los márgenes de la bahía y el Canal San Lorenzo, mientras que los sedimentos limosos se ubican hacia la parte norte del área y en las zonas más profundas (Figura 2b). Las arenas están bien clasificadas en la desembocadura de los arroyos y la punta de la barrera arenosa de la Laguna de La Paz, con valores en la escala de 0.3 a 0.4 Φ . Arenas moderadamente bien clasificadas a moderadamente clasificadas se tienen en toda la parte sur y el resto de las playas arenosas. Por último, sedimentos mal clasificados a muy mal clasificados (1.0 a 4.0 Φ) se presentan en el resto de la bahía. En el Canal San Lorenzo la mayoría del material es autigénico de composición calcárea (Cruz-

Orozco *et al.*, 1996). El contenido de materia orgánica se reporta en un intervalo de <1 a <5%, y los carbonatos entre 20 y 25% (Cruz-Orozco *et al.*, 1996; Rodríguez-Castañeda, 2001).

En la Laguna de La Paz, el canal que la comunica con la bahía se divide en dos canales paralelos de aproximadamente 4 km de longitud y 0.6 km de ancho en total, con una profundidad media de 7 m (Obeso-Nieblas *et al.*, 1993). En el interior de la laguna se distinguen tres zonas batimétricas. La primera se localiza entre los 0 y los 2 m de profundidad y circunda a la laguna, la segunda está compuesta por dos canales de mareas secundarios y la tercera está representada por dos depresiones localizadas al suroeste y noroeste, que alcanzan profundidades de 4 y 6 m respectivamente. La primera zona cubre aproximadamente el 50% de la superficie de la laguna (Figura 2a) (Godínez-Orta *et al.*, 1997).

Los tipos de sedimentos de la laguna se diferencian en cuatro zonas: norte, sur, centro y periferia. En la zona norte los sedimentos se caracterizan por el predominio del sustrato arenoso y comprende desde el canal principal hacia el centro y norte del cuerpo lagunar, debido a la alta energía proporcionada por fuertes corrientes de marea. El material sedimentario depositado en la zona sur se compone principalmente por lodo y arena. La periferia del cuerpo lagunar es poco profunda y la composición de sus sedimentos es afectada por el escurrimiento pluvial y las descargas de aguas residuales que se llevaban a cabo anteriormente. En la zona centro el material se caracteriza por localizarse a una mayor profundidad, el sustrato es arenoso con zonas lodosas y presenta niveles altos de materia orgánica (Figura 2b) (Green-Ruiz y Larrinaga-Cunningham, 1986).

El contenido de materia orgánica en los sedimentos de la laguna se ha reportado en un intervalo de 0.05 a 3.05% y el contenido de carbonatos en concentraciones promedio de 21 a 24% (Green-Ruiz y Larrinaga-Cunningham, 1986; Rodríguez-Meza, 1999).

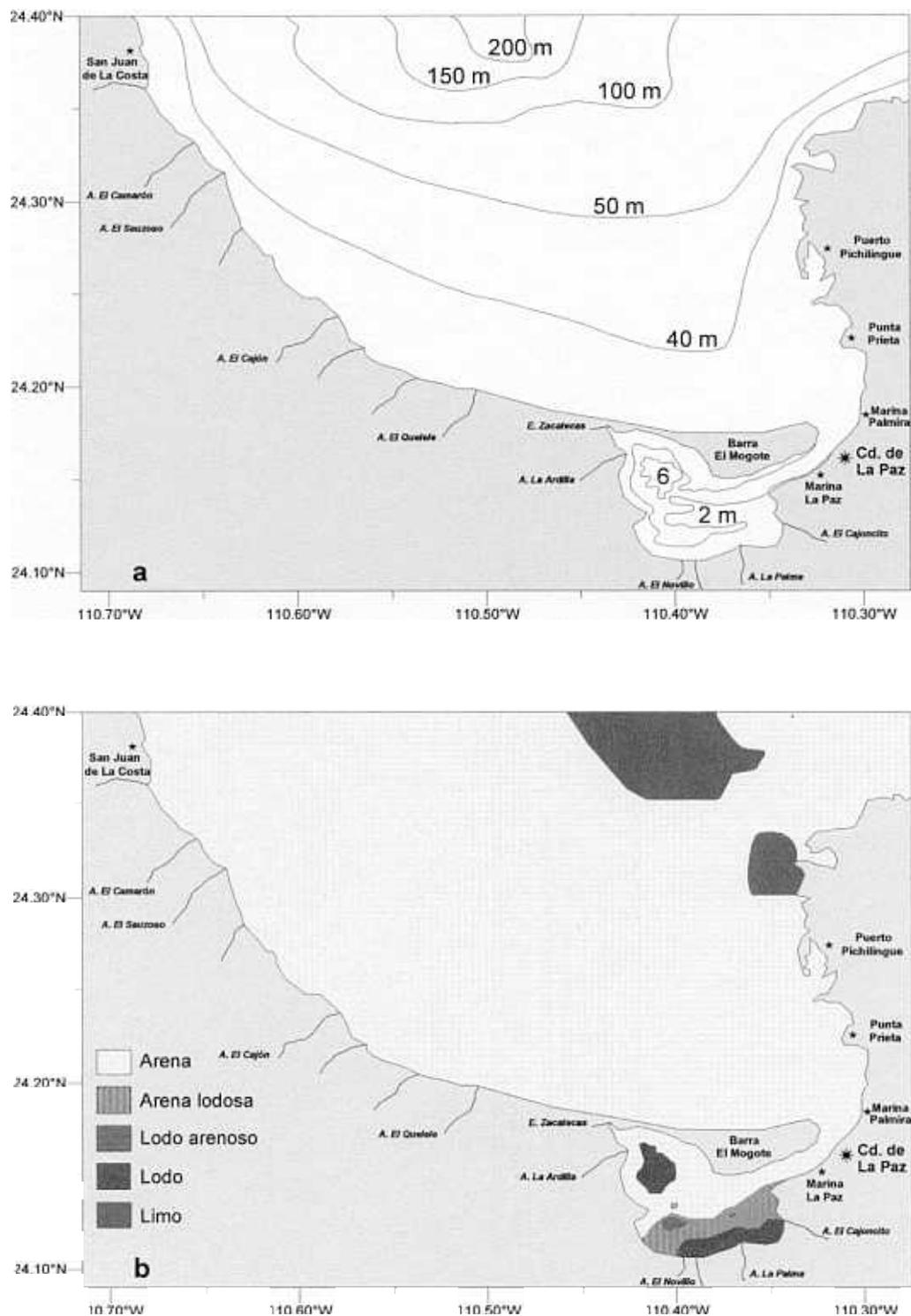


Figura 2. Batimetría (a) y distribución espacial de los tipos de sedimentos (b) en la porción sur de la Bahía y Laguna de La Paz (modificados de Green-Ruiz y Larrinaga-Cunningham, 1986; Cruz-Orozco *et al.*, 1996; Godínez-Orta *et al.*, 1997).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Diseño experimental

Se realizaron tres muestreos durante el año 2002, considerando los meses representativos de mayor y menor precipitación e intensidad de vientos en la zona. La primera campaña de muestreo se realizó en enero (condiciones de invierno), mes en el cual predominan los vientos intensos del noroeste denominados localmente como Collas; la segunda campaña en el mes de mayo (condiciones de estiaje), en este mes ocurre la menor precipitación e intensidad de los vientos; y la última campaña se realizó en septiembre (condiciones de verano), mes en el que se presenta la mayor precipitación durante el año en la zona de estudio.

Durante las campañas se colectaron muestras de agua superficial en la parte sur de la Bahía y en la Laguna de La Paz, en una red de 20 a 23 estaciones distribuidas con base a sitios de posibles fuentes potenciales de contaminación antropogénica, como: el Puerto Pichilingue, Punta Prieta (almacenes de PEMEX y termoeléctrica de la CFE), San Juan de la Costa (mina de fosforita de ROFOMEX S.A. de C.V.), Marina Palmira y Marina La Paz (las más grandes de la zona), la parte sur y sureste de la Laguna de La Paz en donde hasta el año de 1986 existían las descargas de aguas residuales de la Ciudad de La Paz; así también en sitios de posibles fuentes naturales, como la misma Laguna de La Paz y la costa sur y suroeste de la bahía, áreas donde desembocan los principales arroyos en la zona (Figura 3).

5.2. Limpieza del material y colecta de las muestras

El análisis de metales traza en la MPS del agua de mar requiere condiciones de ultra limpieza durante todo el proceso. El cuidado en la colecta de las muestras, filtración y la limpieza del material juegan un papel relevante en el control de la contaminación (Landing y Lewis, 1991; Delgadillo-Hinojosa, 2000).

En este trabajo, el material usado durante la colecta en campo y en el tratamiento de las muestras en el laboratorio se sometió a un riguroso proceso de descontaminación de metales. Básicamente, el tratamiento consiste en mantener el

material en detergente libre de fosfatos (Micro ®) durante 48 h, después de enjuagar con agua desionizada ($>18 \text{ M}\Omega$) se somete a una limpieza con HCl 6N por 48 h. Finalmente el material se enjuaga de nuevo con agua desionizada y se almacena en bolsas de polietileno (Bruland *et al.*, 1979; Kreming, 1983)

Las campañas de muestreo se llevaron a cabo en una embarcación menor de fibra de vidrio impulsada por un motor fuera de borda. Las estaciones de muestreo se ubicaron con apoyo de un navegador por satélite GPS (Global Positioning System) Magellan NAV DX-10. La temperatura se midió en cada una de las estaciones mediante el sensor térmico de un equipo HORIBA el cual tiene una precisión de $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Las muestras para metales fueron colectadas en garrafones de plástico de 19 L (previamente tratados de acuerdo el protocolo descrito anteriormente) y guardados en bolsas de polietileno. Las muestras para salinidad y nutrientes se tomaron en frascos HDPE de 500 mL y las de clorofilas en garrafones de plástico de $\frac{1}{2}$ GL protegidos de la luz. Las muestras de nutrientes y clorofilas se transportaron en una hielera hasta concluir el muestreo, posteriormente las botellas de nutrientes se almacenaron a -50°C hasta su análisis. Los análisis de las variables hidrológicas se realizaron en el Laboratorio de Química Marina del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional (CICIMAR-IPN).

Durante la colecta de las muestras de agua para el análisis de metales en la MPS, con la finalidad de evitar que la pintura de la embarcación, el combustible y el aceite del motor pudieran contaminar las muestras, se diseñó un sistema sencillo y limpio de colecta de agua superficial, fácil de utilizar en embarcaciones menores. Este sistema consiste en una bomba de $\frac{1}{4}$ HP (Horsepower) libre de componentes metálicos (turbina y rotor) acoplada a una manguera de plástico, la cual a su vez se mantiene rígida en el interior de un tubo de PVC. Para tomar todas las muestras a una misma profundidad (30 cm), en el extremo del tubo se sujetó una boya con un tirante de cuerda de poliamida a la profundidad requerida (Figura 4). Adicionalmente, se debe tener la precaución de colectar las muestras contra corriente y/o contra la dirección del viento.

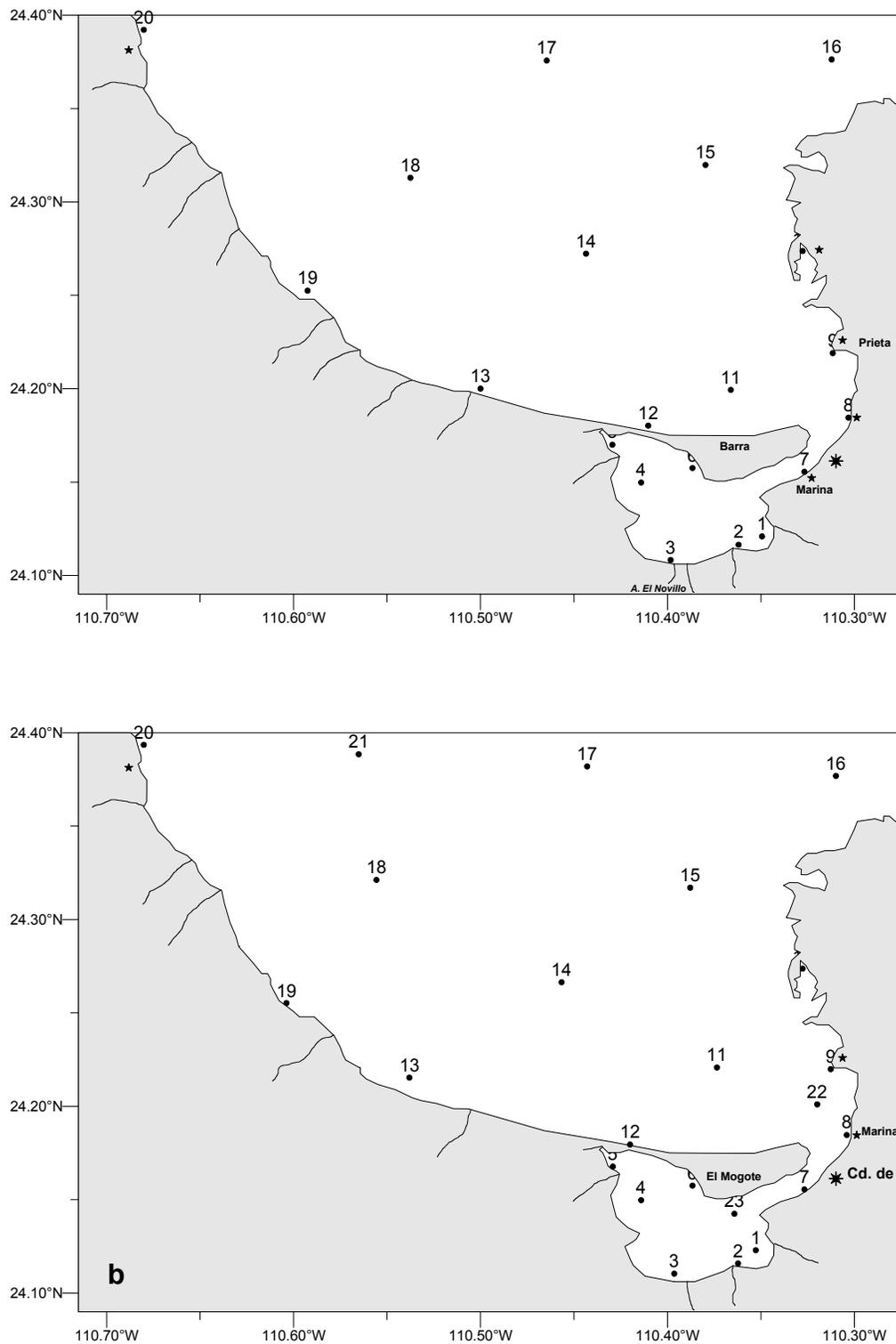


Figura 3. Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo. Enero (a), mayo y septiembre (b) del 2002.

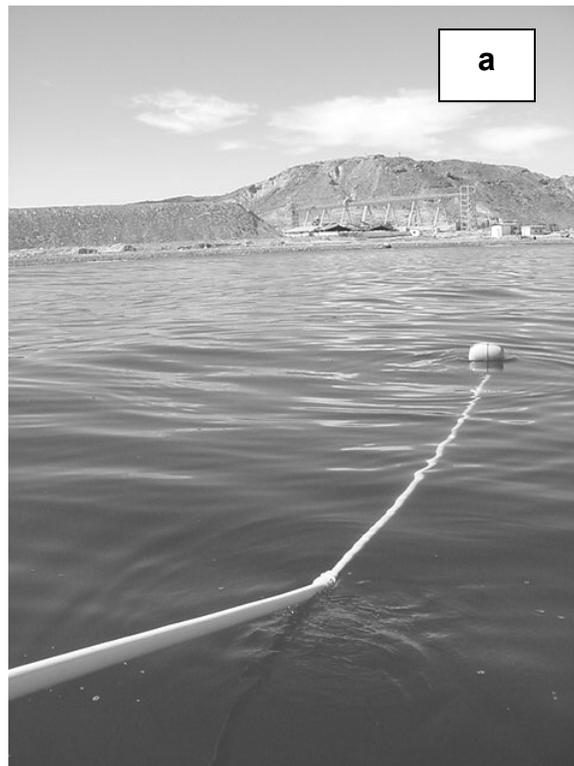


Figura 4. Sistema de colecta de agua superficial. Panorámica de la colecta de las muestras (a). Bomba libre de componentes metálicos (b).

5.3. Análisis de las muestras

5.3.1. Variables hidrológicas

En el laboratorio se determinaron la salinidad, nutrientes (fosfatos y silicatos) clorofila *a*, materia particulada suspendida (MPS) y materia orgánica particulada (MOP). Para el análisis de la salinidad se empleó un Salinómetro Portátil Guildline modelo 8410A, con precisión de 0.001 ups calibrado con agua patrón de Copenhague. Los fosfatos, silicatos y clorofila *a* se analizaron mediante los métodos espectrofotométricos descritos en Strickland y Parsons (1972) y Parsons *et al.* (1984). Las muestras para clorofila *a* se filtraron a presión negativa utilizando filtros GF/F de 25 mm de diámetro y 0.7 μm de poro nominal, los cálculos para ésta se hicieron de acuerdo a las ecuaciones de Jeffrey y Humphrey (1975). Las densidades ópticas para todos los casos se midieron en un espectrofotómetro Milton Roy modelo Spectronic 1201.

Para el análisis de la MPS y MOP, las muestras de agua se filtraron a presión negativa utilizando filtros de membrana de policarbono de 0.4 μm de tamaño de poro y 47 mm de diámetro. La MPS se determinó mediante el método gravimétrico propuesto por Banse *et al.* (1963), el cual consiste en pesar los filtros antes y después de filtrar las muestras, siendo la diferencia entre el peso inicial y el peso final el correspondiente al de la MPS. Para determinar la MOP, la MPS fue oxidada utilizando una solución H_2O_2 al 35%, y así, por diferencia en peso y conociendo el volumen filtrado se obtuvo la concentración de la MOP con un porcentaje resultante confiable de materia orgánica de $\pm 5\%$ (Peterson, 1977). Los filtros fueron pesados en una balanza analítica Ohaus modelo AP250D con precisión de ± 0.01 mg.

5.3.2. Metales

Para el análisis de metales, la MPS se obtuvo filtrando las muestras de agua a presión negativa en un sistema cerrado a través de una membrana de policarbono (Nucleopore ®) de 0.4 μm de tamaño de poro y 47 mm de diámetro previamente lavados en HCl Suprapur ® al 3N, secados y pesados de acuerdo a Landing y Lewis (1991). Una vez colectada la MPS, los filtros se almacenaron individualmente en

cajas Petri dentro de bolsas de polietileno tipo Ziplock a temperatura de congelación hasta su análisis.

Los análisis de metales en la MPS se realizaron en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California (IIO-UABC). La técnica empleada para el análisis se llevó a cabo a través del método descrito por Landing y Lewis (1991) y Delgadillo-Hinojosa (2000), éste consiste en la digestión sucesiva de la muestra con ácidos ultrapuros (HNO_3 , HClO_4 y HF Ultrex® o Suprapur®). Brevemente, las muestras se colocaron en un vaso de teflón previamente secadas y pesadas, se sometieron a digestión por 12 h a temperatura ambiente con 3 mL de HNO_3 , posteriormente se colocaron en una plancha de calentamiento a 250°C en reflujo por 30 minutos, se enfriaron y se llevaron a sequedad a 200°C , enseguida se agregó 1 mL de HClO_4 y se dejaron en reflujo por 30 minutos a 250°C , se enfriaron y posteriormente se añadieron 2 mL de HF, se mantuvieron por 45 minutos en reflujo a 200°C y se llevaron a sequedad. Finalmente los digeridos se recuperaron en HNO_3 al 5% neutralizando el residuo de HF con H_3BO_3 .

Durante los análisis, simultáneamente se obtuvieron blancos de procedimiento y se analizaron blancos de filtros sometidos al mismo proceso que las muestras, todo el procedimiento se llevó a cabo bajo condiciones de atmósfera limpia en el interior de una campana de flujo laminar (Environment class 100).

La cuantificación de los metales se llevó a cabo primeramente mediante un espectrofotómetro de absorción atómica de flama (EAA) VARIAN 220 para cuantificar en un orden de partes por millón (ppm). Posteriormente se empleó un EAA VARIAN 880 con horno de grafito equipado con un sistema de corrección de fondo Zeeman para cuantificar en el orden de partes por billón (ppb). La medición de los metales se efectuó con el método de adición de estándares para corregir la interferencia debido a la matriz.

La exactitud y precisión de los análisis se cuantificaron analizando estándares de referencia de sedimentos de estuario (BCSS-1) certificados por el National Research Council of Canada (Tabla 1). Las recuperaciones obtenidas de los

estándares no mostraron diferencias significativas entre el valor certificado y el obtenido en este trabajo.

Tabla 1. Resultados del análisis de sedimento estándar BCSS-1 (Sedimentos Estuarinos del Golfo de San Lorenzo, Canadá).

Elemento	Estándar BCSS-1	Recuperación IIO-UABC	% de recuperación	Número de replicas
Al (%)	11.83 ± 0.41	11.63 ± 0.87	98.3	10
Fe (%)	4.70 ± 0.14	4.67 ± 0.19	99.5	10
Mn (µg/g)	229 ± 15	216 ± 9	94.2	10
Cu (µg/g)	18.5 ± 2.7	18.0 ± 1.2	97.2	10
Cd (µg/g)	0.25 ± 0.4	0.25 ± 0.02	101.4	10

5.4. Procesamiento de los datos

Para conocer el patrón de distribución espacial del contenido de metales en la MPS y las variables hidrológicas analizadas, se construyeron mapas de distribución mediante el programa Surface Mapping System versión 6.01 (SURFER6). Con el fin de observar las variaciones, tendencias y el grado de asociación entre los metales y las variables hidrológicas, los datos de cada campaña se arreglaron en matrices y se calcularon los estadísticos básicos (tendencia central y dispersión), así como un análisis de correlación usando los programas Statistica versión 6.0 y la hoja de calculo de Microsoft Excel versión 2000, los gráficos se hicieron utilizando el programa Sigma Plot 2000 para Windows.

Una forma de evaluar el grado de enriquecimiento o empobrecimiento de un metal con relación a una fuente específica, es estimando el factor de enriquecimiento. Comúnmente se utiliza un metal conservativo como el Al, Li, Cs y

Sc (Salomons y Förstner, 1984; Loring, 1991; Chester, 2000). De éstos el Al ha sido ampliamente usado para la normalización de metales traza en la materia particulada y sedimentos marinos, debido a que es un constituyente mayor de los granos finos de aluminosilicatos, en donde el “bulk” de los metales traza están asociados (Loring, 1991). Su concentración promedio en las rocas de la corteza terrestre es habitualmente usado para calcular el factor de enriquecimiento (Chester y Murphy, 1990). El factor de enriquecimiento se calculó mediante la siguiente formula:

$$FE = (E/Al)_{MPS} / (E/Al)_{Corteza}$$

Donde, FE es el factor de enriquecimiento, $(E/Al)_{MPS}$ es la razón de concentración del metal y del Al medidos en las muestras y $(E/Al)_{Corteza}$ es el valor de la razón de concentración del metal y Al en el material de referencia de la corteza terrestre. Para este análisis se utilizaron los datos de las concentraciones promedio reportadas para la corteza terrestre por Taylor (1964).

VI. RESULTADOS

6.1. Distribución espacial y variación temporal

6.1.1. Temperatura y Salinidad

Los registros de temperatura superficial en enero (invierno), mostraron un gradiente muy marcado entre la bahía y la laguna. Las temperaturas mínimas registradas se encontraron en la laguna, con valores entre 16.4 a 18.7°C, mientras que en la bahía estuvieron entre 19.1 a 21.5°C (Tabla 2, Figura 5a). Para mayo (primavera), la temperatura presentó un incremento considerable sobre la media registrada en la bahía y la laguna comparado con el muestreo de invierno (4.9°C en la bahía y 8.7°C para la laguna), registrando valores en un intervalo de 23.5 a 26.6°C en la bahía y de 25.3 a 27.6°C en la laguna (Tabla 2, Figuras 5a y b). En septiembre (verano), las aguas superficiales alcanzaron una distribución casi homogénea entre la bahía y la laguna con un promedio de 29.3 y 29.0°C respectivamente, el incremento de la temperatura fue evidente, aunque en menor proporción para la laguna que la ocurrida entre el invierno y la primavera, ésta presentó un incremento sobre la media registrada en primavera de 2.7 en la laguna y de 4.3 en la bahía.

La salinidad por su parte, en invierno mostró un comportamiento inverso a la temperatura, con un gradiente que va de 35.36 en la bahía a 36.76 en el interior de la laguna (Tabla 2, Figura 6a). En primavera los valores de la bahía se mantuvieron en promedio (35.49) similares que en invierno (35.45) mostrando una distribución homogénea con valores que van de 35.25 a 35.78. En cambio la laguna, registró un incremento en su media de 1.3 comparado con los datos registrados en invierno, presentando valores que van de 35.93 a 38.64, con los registros más altos en la zona somera (parte sur) y un gradiente decreciente hacia la boca del sistema (Tabla 2, Figuras 6a y b). En verano en la bahía, la salinidad varió de 35.06 a 35.39 y de 35.48 a 37.53 en la laguna (Tabla 2, Figura 6c). De este modo, se presentó una disminución de salinidad promedio de 1 en la laguna, mientras que en la bahía fue de 0.2.

Tabla 2. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de la temperatura (°C) y salinidad en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002

Porción sur de la Bahía de La Paz						
Estadístico	Enero		Mayo		Septiembre	
	Temp.	Salinidad	Temp.	Salinidad	Temp.	Salinidad
Media	20.08	35.49	25.01	35.45	29.33	35.25
Desv. Est.	0.69	0.10	0.99	0.15	0.54	0.10
Mínimo	19.10	35.36	23.50	35.25	28.60	35.06
Máximo	21.50	35.68	26.60	35.78	30.20	35.39

Laguna de La Paz						
Estadístico	Enero		Mayo		Septiembre	
	Temp.	Salinidad	Temp.	Salinidad	Temp.	Salinidad
Media	17.74	36.35	26.41	37.65	28.97	36.72
Desv. Est.	0.79	0.40	0.90	0.89	0.44	0.82
Mínimo	16.40	35.73	25.30	35.93	28.30	35.48
Máximo	18.70	36.76	27.60	38.64	29.70	37.53

6.1.2. Fosfatos y silicatos

Las concentraciones más altas de fosfatos durante el invierno se registraron en la bahía, específicamente en la parte central del área de estudio (estaciones 14, 15 y 18) donde se registraron valores alrededor de 1.1 μM , mientras que en la laguna se registraron las concentraciones mínimas (promedio de 0.71 μM) (Tabla 3, Figuras 7a y c). En primavera se presentó una ligera disminución en la concentración de fosfatos tanto en la bahía como en la laguna. Los valores en la bahía al igual que en invierno fueron los más altos y estuvieron en un intervalo de 0.59 a 0.93 μM en la bahía, mientras que en la laguna se encontraron en un intervalo de 0.36 a 0.65 μM (Tabla 3, Figura 7b). Hacia el verano los fosfatos presentaron un comportamiento inverso en su distribución espacial registrándose las concentraciones más altas en la laguna con un promedio de 0.78 μM , mientras que las mínimas se registraron en la bahía en un intervalo de 0.36 a 0.58 μM y un promedio de 0.44 μM (Tabla 3, Figuras 7c y d). Estas fueron las más bajas concentraciones de fosfatos registradas para todo el año en la bahía.

En el caso de los silicatos, el comportamiento fue inverso al de los fosfatos presentando concentraciones mayores en la laguna y además un incremento gradual de invierno a verano (Tabla 3, Figuras 8a, b y c). En invierno la concentración

promedio en la laguna fue de 4.98 μM con un intervalo de 0.84 a 7.98 μM , mientras que en la bahía los valores registrados se encontraron en un intervalo de 0.25 a 5.50 μM con una media de 2.48 μM (Tabla 3, Figuras 8a y d). En la primavera, los silicatos presentaron un incremento de 3.6 μM en su concentración promedio en la laguna comparada con la registrada en invierno, con valores de 3.37 μM en la parte del canal hasta de 13.30 μM en la zona somera, mientras que en la bahía se mantuvo la misma concentración promedio que en invierno (2.5 μM) (Tabla 3, Figuras 8b y d). En verano, se registraron los valores más altos en el año, tanto en la laguna como en la bahía. En este periodo se registraron concentraciones mínimas de 2.77 μM y máxima de 39.43 μM para la laguna, y de 3.18 a 11.91 μM en la bahía, con una diferencia de 7 μM entre ambos cuerpos de agua (Tabla 3, Figuras 8c y d).

Tabla 3. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de las concentraciones de PO_4^{3-} y SiO_2 (μM) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Porción sur de la Bahía de La Paz						
Estadístico	Enero		Mayo		Septiembre	
	Fosfatos	Silicatos	Fosfatos	Silicatos	Fosfatos	Silicatos
Media	0.87	2.48	0.70	2.47	0.44	6.52
Desv. Est.	0.17	1.83	0.09	1.04	0.08	3.05
Mínimo	0.68	0.25	0.59	0.59	0.36	3.18
Máximo	1.13	5.50	0.93	4.13	0.64	11.91

Laguna de La Paz						
Estadístico	Enero		Mayo		Septiembre	
	Fosfatos	Silicatos	Fosfatos	Silicatos	Fosfatos	Silicatos
Media	0.71	4.98	0.58	8.64	0.78	13.51
Desv. Est.	0.12	2.32	0.12	3.26	0.15	13.49
Mínimo	0.63	0.84	0.36	3.37	0.59	2.77
Máximo	0.98	7.98	0.73	13.30	0.99	39.43

6.1.3. Materia particulada suspendida y clorofila a

La materia particulada suspendida presentó el mismo patrón de distribución durante las tres épocas, un gradiente muy abrupto de la parte somera de la laguna hacia el resto del cuerpo de agua, y de la laguna hacia la bahía (Figuras 9a, b y c). Las concentraciones máximas de MPS se registraron en la parte somera de la

laguna, donde en invierno se encontraron valores de hasta 243.6 mg L⁻¹ en la estación 3. Se observó un comportamiento muy particular de la MPS en esta zona ya que sus concentraciones rebasaron por mucho los niveles registrados en el resto de la laguna (Tabla 4).

En general, los valores de MPS disminuyeron de invierno a verano, los promedios registrados para el invierno fueron de 2.58 mg L⁻¹ en la laguna y de 0.86 mg L⁻¹ en la bahía. Durante la primavera en la laguna las concentraciones se mantuvieron casi igual que la época anterior (2.50 mg L⁻¹) y en el caso de la bahía disminuyó el 55% en su concentración (0.47 mg L⁻¹). En verano fue más notorio el decremento de la MPS en la laguna disminuyendo en un 52% su concentración, mientras que la bahía presentó un decremento de 0.1 mg L⁻¹ que la época anterior.

Tabla 4. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de las concentraciones de la MPS (mg L⁻¹) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Porción sur de la Bahía de La Paz						
Estadístico	Enero		Mayo		Septiembre	
Media	0.86		0.47		0.37	
Desv. Est.	0.45		0.59		0.41	
Máximo	1.63		2.27		1.46	
Mínimo	0.21		0.11		0.09	

Laguna de La Paz						
Estadístico	Enero		Mayo		Septiembre	
Media	2.58	171.44*	2.50	26.01*	1.29	19.30*
Desv. Est.	0.68	102.02*	1.23	8.35*	1.01	11.03*
Máximo	3.18	243.58*	4.60	34.93*	3.30	31.69 *
Mínimo	1.72	99.31*	1.25	18.38*	0.63	10.54*

* Zona somera de la laguna

La MOP registró las concentraciones más altas en la laguna y temporalmente las máximas concentraciones se presentaron en primavera tanto en la laguna como en la bahía. En primavera la concentración promedio en la laguna fue de 1.03 mg L⁻¹ en un intervalo de 0.17 a 3.22 mg L⁻¹, mientras que en la bahía la concentración promedio registrada fue de 0.11 mg L⁻¹ en un intervalo de <0.01 a 0.86 mg L⁻¹. Para verano en la laguna se observó un decremento de 0.13 mg L⁻¹ en la concentración

promedio siendo menos notorio en la bahía con 0.03 mg L^{-1} de una media de 0.90 y 0.08 mg L^{-1} respectivamente (Tabla 5, Figura 10).

La clorofila *a* presentó una distribución espacial similar a la MPS y al de la MOP, con un gradiente de mayor a menor de la laguna y la costa de la bahía hacia el centro de la misma (Figuras 11a, b y c). Los registros de clorofila *a* en primavera mostraron una concentración promedio en la laguna tres veces mayor que la de la bahía (2.13 mg m^{-3} en la laguna y 0.71 mg m^{-3} para la bahía), las concentraciones más altas se presentaron en tres puntos bien definidos: la zona somera de la laguna, el Puerto Pichilingue y las marinas (4.41 , 2.87 y 2.13 mg m^{-3} respectivamente), mientras que las concentraciones mínimas se registraron en el Canal San Lorenzo, con 0.17 mg m^{-3} (estaciones 15 y 16) (Figura 11a). En verano las variaciones en el promedio para ambos cuerpos de agua fue mínima ($+0.35 \text{ mg m}^{-3}$ en la laguna y -0.20 en la bahía mg m^{-3}), así como en primavera, las concentraciones más altas se registraron en la porción sur de la bahía, en el Puerto Pichilingue y las marinas. (Tabla 5).

Tabla 5. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de las concentraciones de la MOP (mg L^{-1}) y clorofila *a* (mg m^{-3}) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Porción sur de la Bahía de La Paz				
Estadísticos	Mayo		Septiembre	
	MOP	Clorofila <i>a</i>	MOP	Clorofila <i>a</i>
Media	0.11	0.71	0.08	0.51
Desv. Est.	0.22	0.72	0.12	0.50
Mínimo	>0.01	0.17	>0.01	0.18
Máximo	0.86	2.87	0.47	2.06

Laguna de La Paz				
Estadísticos	Mayo		Septiembre	
	MOP	Clorofila <i>a</i>	MOP	Clorofila <i>a</i>
Media	1.03	2.13	0.90	2.48
Desv. Est.	1.14	1.20	1.58	1.87
Mínimo	0.17	0.88	0.04	1.03
Máximo	3.22	4.41	4.98	6.72

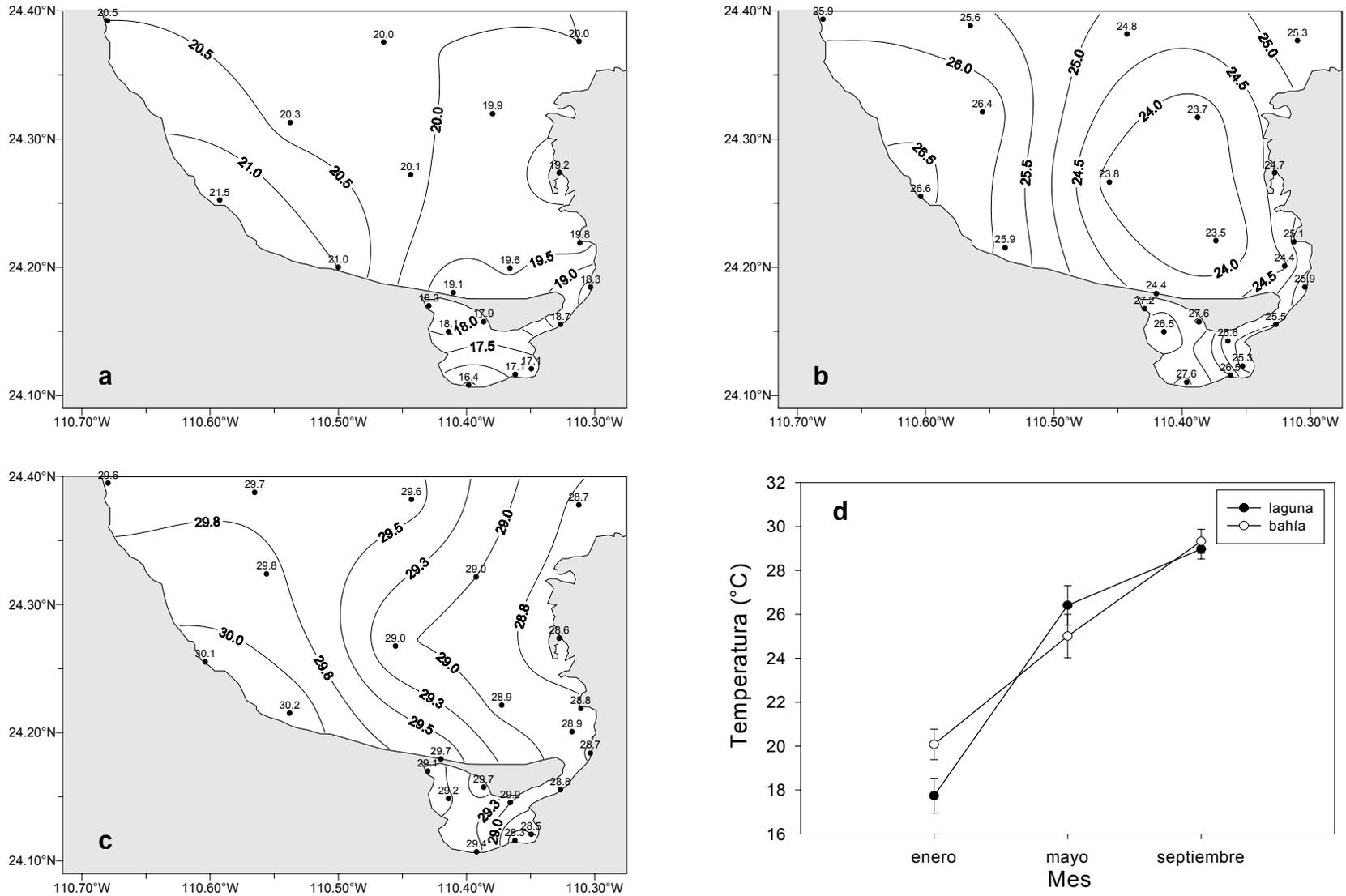


Figura 5. Distribución espacial de la temperatura (°C) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal de la temperatura promedio del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (d).

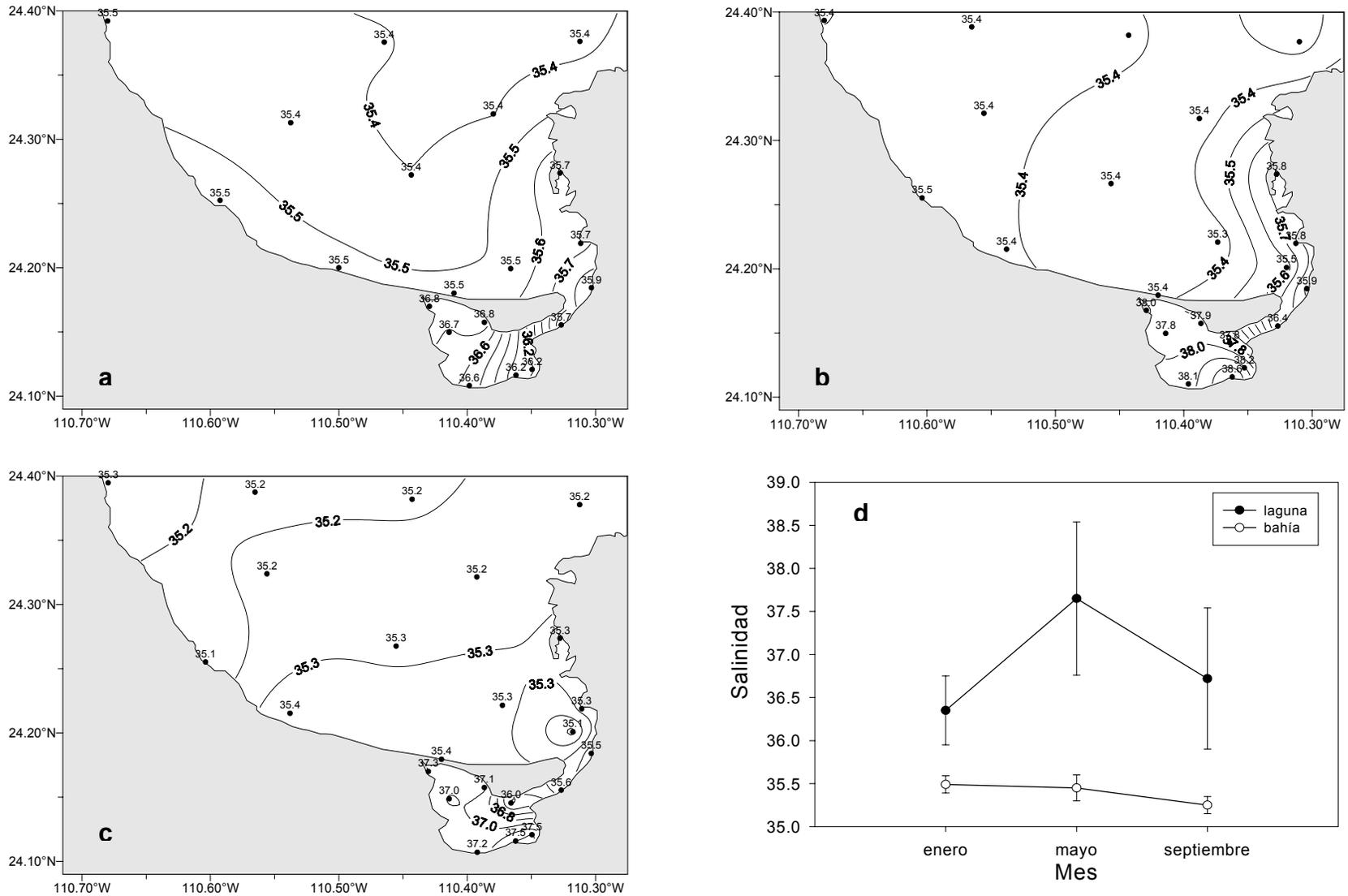


Figura 6. Distribución espacial de la salinidad en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal de la salinidad promedio del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (d).

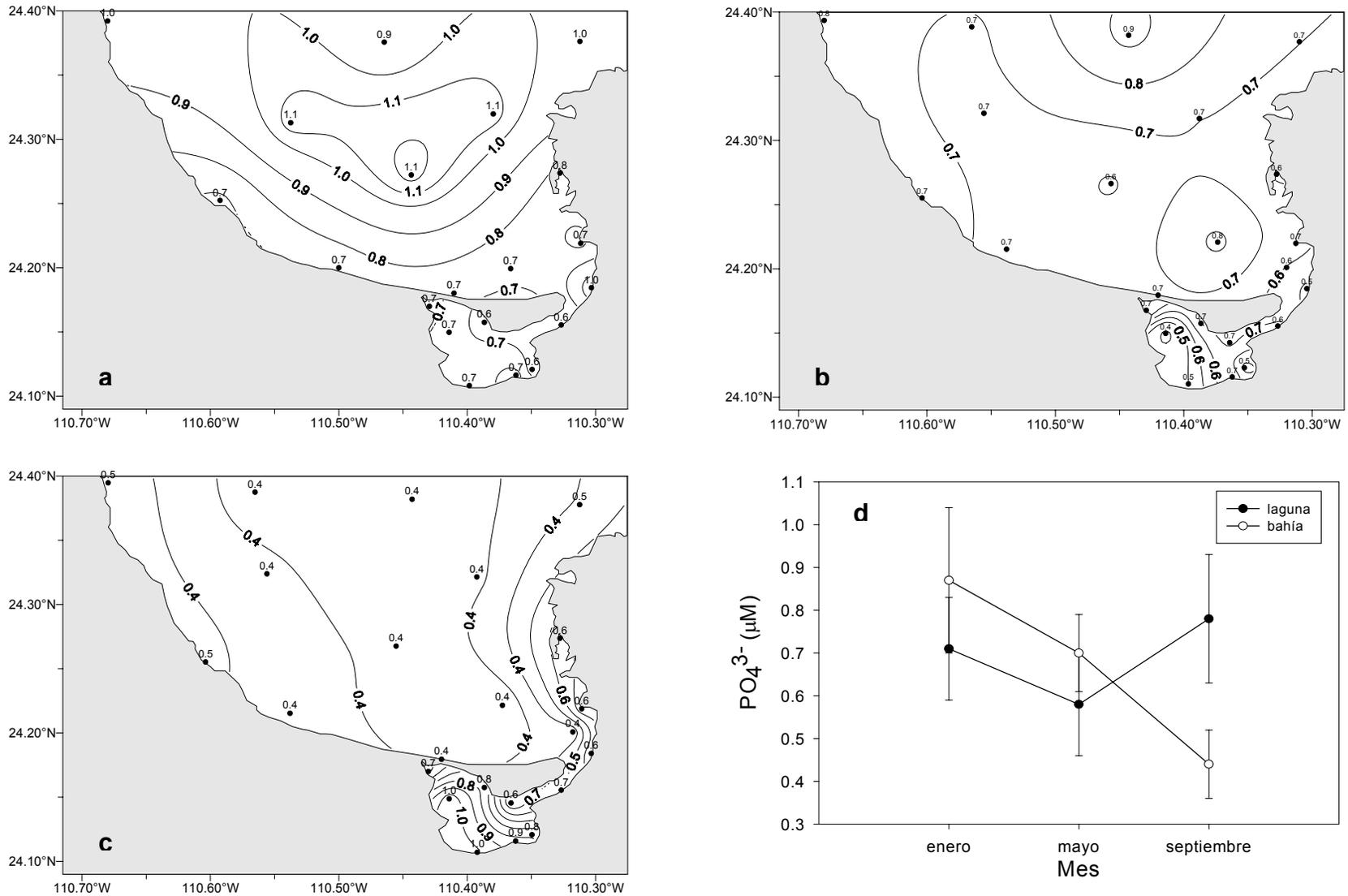


Figura 7. Distribución espacial de las concentraciones de PO_4^{3-} (μM) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal de las concentraciones promedio de PO_4^{3-} del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (d).

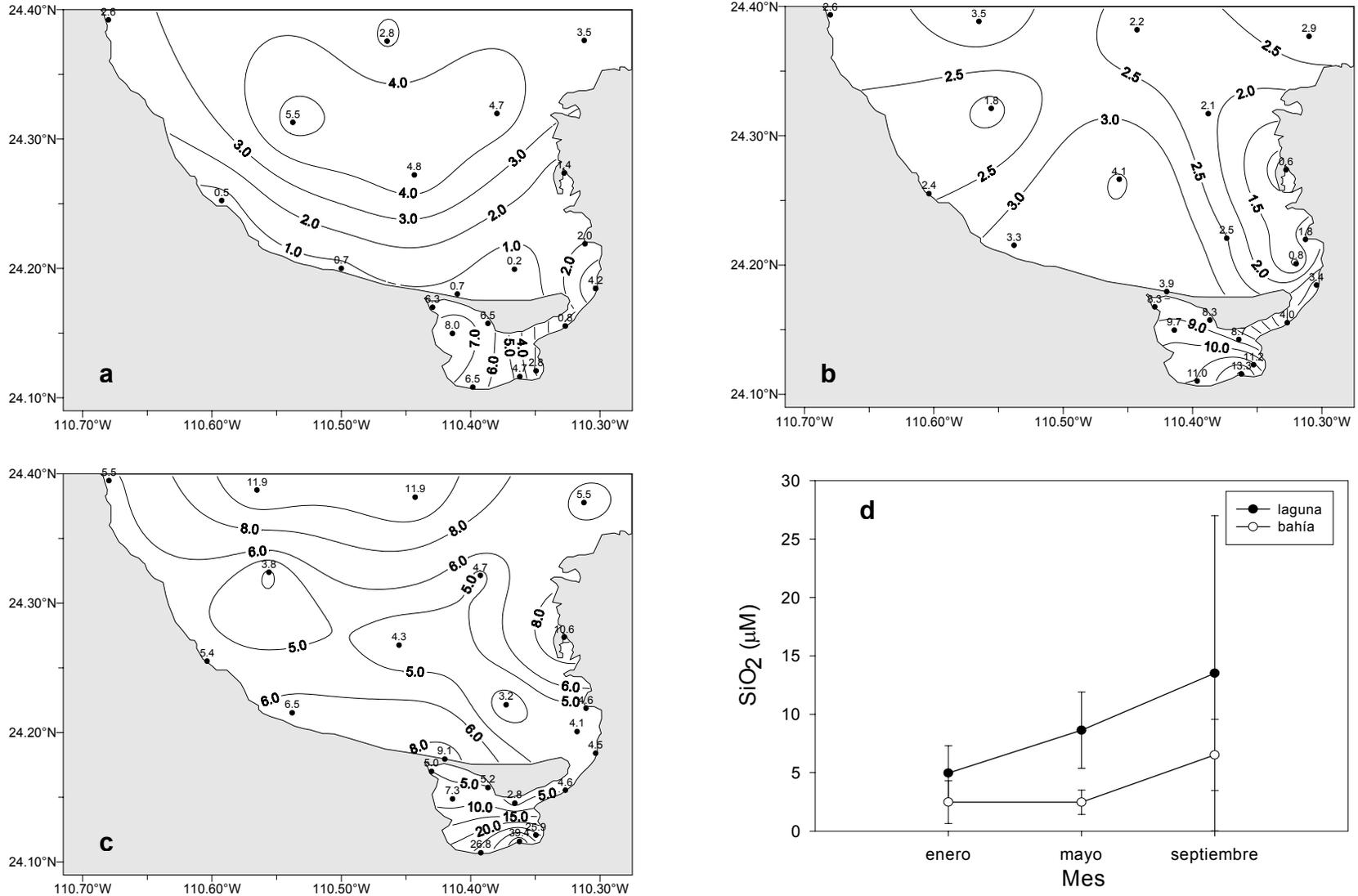


Figura 8. Distribución espacial de las concentraciones de SiO_2 (μM) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal de las concentraciones promedio de SiO_2 del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (d).

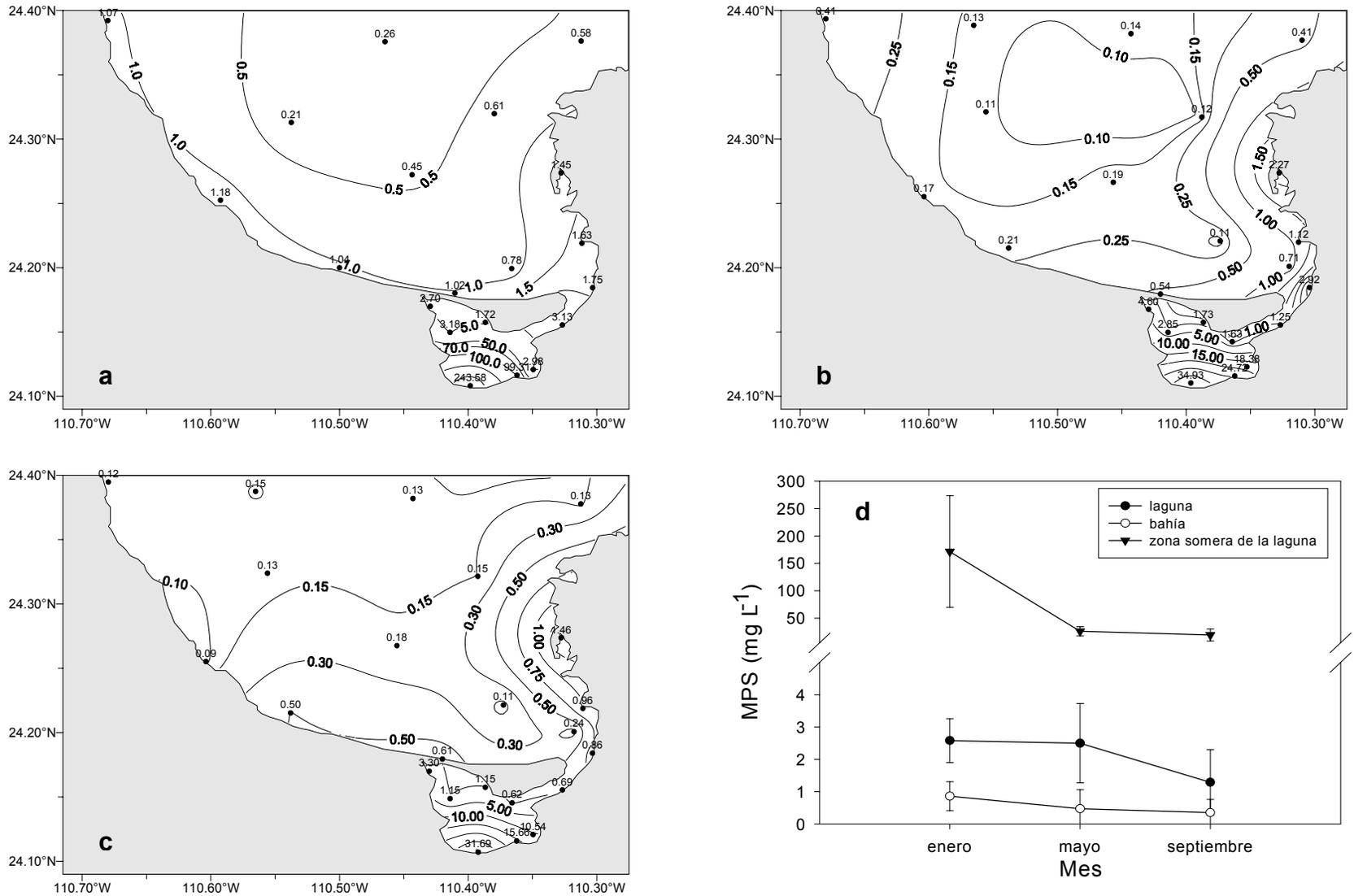


Figura 9. Distribución espacial de las concentraciones de la MPS (mg L⁻¹) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal de las concentraciones promedio de la MPS del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz y zona somera de la laguna durante el 2002 (d).

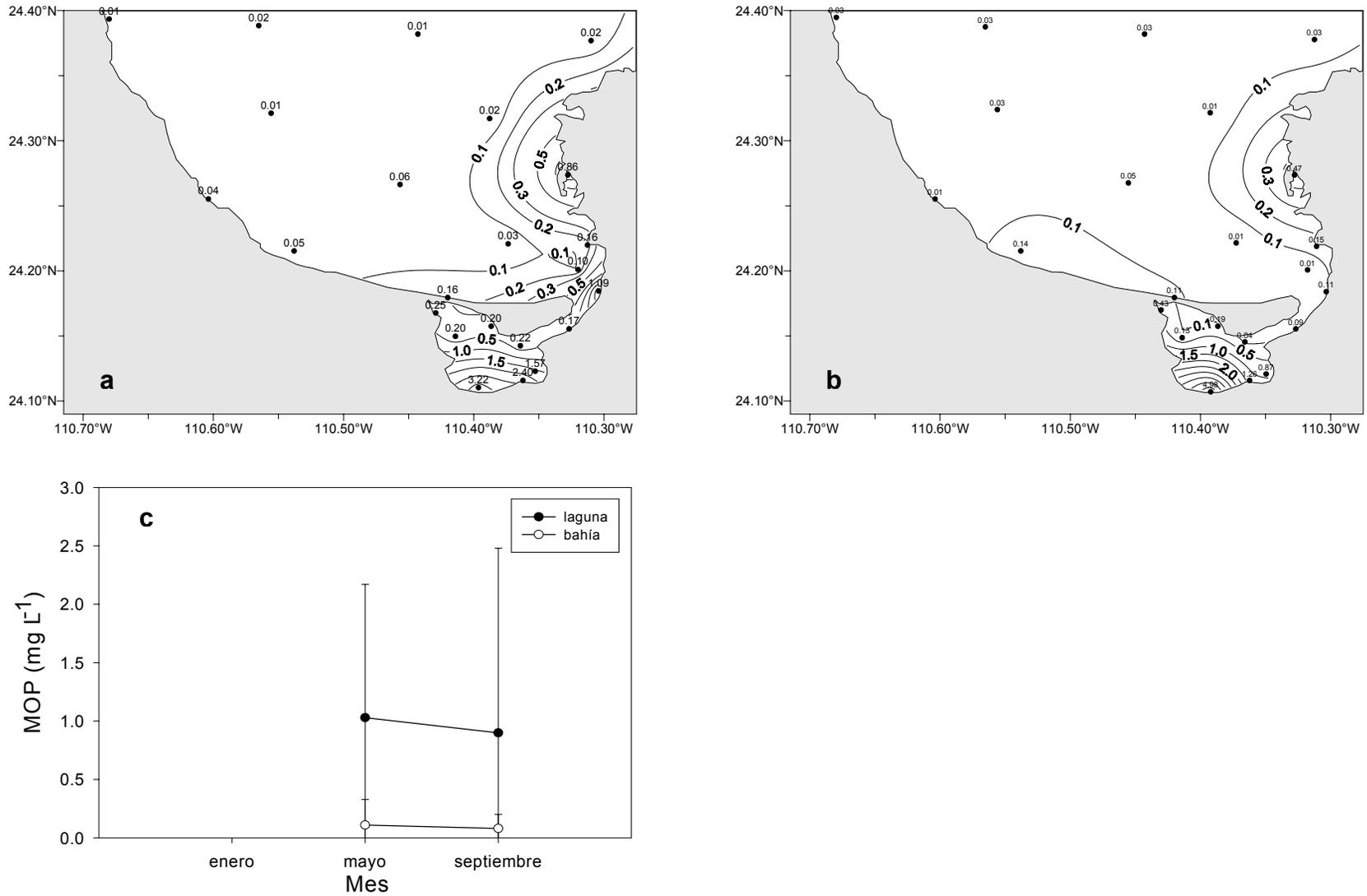


Figura 10. Distribución espacial de las concentraciones de la MOP (mg L^{-1}) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Mayo (a) y septiembre (b) del 2002. Variación temporal de las concentraciones promedio de la MOP del agua superficial de la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (c).

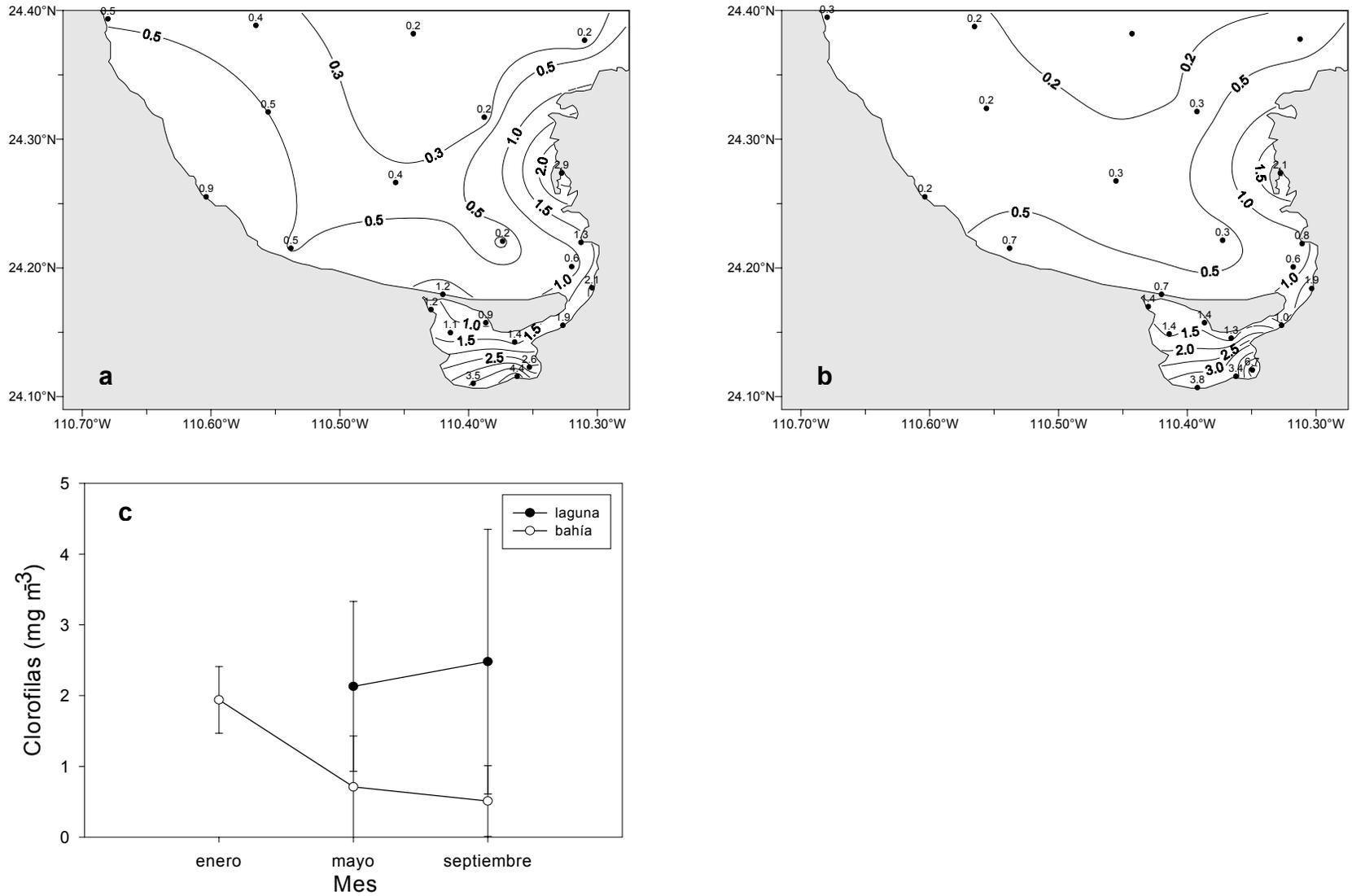


Figura 11. Distribución espacial de las concentraciones de clorofila a (mg m^{-3}) en el agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Mayo (a) y septiembre (b) del 2002. Variación temporal de las concentraciones promedio de clorofila a del agua superficial en la Bahía y Laguna de La Paz durante el 2002 (c).

6.1.4. Aluminio

De acuerdo al diseño experimental y con el objeto de tener una mejor apreciación del comportamiento de los metales considerando las características geomorfológicas de la Bahía y Laguna de La Paz, el área de estudio se dividió en cinco zonas: Zona somera de la laguna (ZSL), comprende las estaciones 1, 2 y 3 ubicadas al sur de la Laguna de La Paz; esta zona se caracteriza por ser un área de acumulación de sedimentos, su baja profundidad (<1m) y recibir los aportes de los principales arroyos que desembocan a la laguna. Zona norte y centro de la laguna (NCL), comprende el resto de las estaciones en el interior de la laguna (4, 5, 6, y 23) cuya profundidad es >1m. Muelles y marinas (MM) comprende las estaciones 7, 8, 9, y 10 que corresponden a la Marina La Paz y Palmira, el Muelle de PEMEX en Punta Prieta y el Puerto de Pichilingue respectivamente, consideradas en este caso como posibles fuentes antropogénicas de metales. Costa sur y sureste de la bahía (CSEB), comprende las estaciones 12, 13, 19 y 20, se caracteriza por su baja profundidad, gran dinámica en sus aguas (corrientes litorales) y presentar actividad minera en la estación 20 (San Juan de La Costa). Zona norte y centro de la bahía (NCB), comprende las estaciones 11, 14, 15, 16, 17, 18, 21 y 22 localizadas en la parte central y norte del área de estudio e influenciada por la dinámica de la zona profunda de la bahía (Figura 3).

Durante los tres muestreos las mayores concentraciones de Al se presentaron en las estaciones de la ZSL, principalmente en enero (invierno) registrando una concentración promedio de 14.12%. Así mismo en las estaciones denominadas MM se registró una concentración máxima de 13.48% frente al muelle de Punta Prieta. Durante los meses de mayo (primavera) y septiembre (verano) en estas mismas zonas las concentraciones promedio disminuyeron notablemente. Las estaciones de la CSEB y la zona NCB presentaron en primavera las concentraciones promedio de Al más bajas en el área de estudio (1.16 y 0.74% respectivamente), siendo en la época de vientos (enero) y de lluvias (septiembre) cuando se incrementa su concentración. En la zona NCL, a diferencia de las otras zonas, la concentración promedio más alta se presentó en primavera (6.52%) esto debido a un gradiente menor en la concentración del Al entre las estaciones de la ZSL con el resto de las

estaciones de la laguna, que en temporada de vientos y de lluvias no se presentó (Tabla 6, Figura 12).

Tabla 6. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del contenido de Al (%) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	2.24	0.74	2.53
Desv. Est.	1.81	0.68	2.10
Mínimo	0.67	0.12	0.34
Máximo	4.83	2.22	5.64
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	5.29	1.66	3.66
Desv. Est.	4.38	0.75	3.13
Mínimo	2.45	0.96	1.60
Máximo	11.81	2.71	8.31
Zona norte y centro de la laguna			
Media	3.75	6.52	2.83
Desv. Est.	2.97	0.51	1.52
Mínimo	0.86	5.83	1.37
Máximo	6.80	6.95	4.27
Zona somera de la laguna			
Media	14.12	8.65	8.83
Desv. Est.	8.24	0.42	0.16
Mínimo	4.70	8.20	8.67
Máximo	19.99	9.05	8.99
Muelles y marinas			
Media	6.43	2.61	2.29
Desv. Est.	6.39	1.36	0.76
Mínimo	0.95	1.16	1.17
Máximo	13.48	4.35	2.80

6.1.5. Hierro

En general durante los tres muestreos, la distribución del Fe en la MPS siguió un patrón bien definido, decreciendo de la costa hacia la bahía de la siguiente manera: ZSL>zona NCL>MM>CSEB>zona NCB. Al igual que el aluminio las concentraciones más altas de Fe se registraron en invierno en todas las zonas, los máximos para esta época se registraron en las estaciones de la ZSL, con una concentración promedio de 9.39% presentándose el mínimo en las estaciones de la zona CNB con 1.16% en promedio. Para la primavera y verano, las concentraciones

promedio en general se mantuvieron similares en las cinco zonas, con diferencias no mayores a 0.75% (Tabla 7, Figura 13).

Tabla 7. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del contenido de Fe (%) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	1.16	0.17	0.53
Desv. Est.	2.25	0.35	0.51
Mínimo	0.07	<0.01	0.08
Máximo	5.73	1.02	1.69
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	3.44	0.99	1.14
Desv. Est.	1.57	0.41	0.40
Mínimo	1.95	0.46	0.86
Máximo	5.20	1.36	1.73
Zona norte y centro de la laguna			
Media	6.47	3.54	2.81
Desv. Est.	0.84	0.13	0.78
Mínimo	5.54	3.36	1.90
Máximo	7.17	3.66	3.73
Zona somera de la laguna			
Media	9.39	4.38	4.34
Desv. Est.	6.30	0.14	0.06
Mínimo	3.83	4.22	4.29
Máximo	16.22	4.48	4.41
Muelles y marinas			
Media	4.78	2.32	2.49
Desv. Est.	1.90	0.29	0.38
Mínimo	3.02	2.01	2.00
Máximo	6.53	2.63	2.83

6.1.6. Manganeso

En el caso de Mn a diferencia del Al y Fe las concentraciones más altas se registraron en verano, principalmente en la zona NCL, ZSL y MM con concentraciones promedio de 4.32, 3.59 y 1.48 mg g⁻¹ respectivamente, siendo estas mismas estaciones donde se registraron las concentraciones promedio más altas en todo el año. Las concentraciones más bajas se encontraron en la zona NCB en el muestreo de invierno en un intervalo de 0.08 a 0.89 mg g⁻¹, incrementándose en promedio hasta un 1.05 mg g⁻¹ en verano. En la CSEB las concentraciones más

bajas se registraron en primavera (0.42 mg g^{-1}), presentando un incremento en los muestreos de invierno y verano con concentraciones similares (1.13 y 1.07 mg g^{-1} respectivamente) (Tabla 8, Figura 14)

Tabla 8. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del contenido de Mn (mg g^{-1}) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	0.38	0.44	1.05
Desv. Est.	0.31	0.32	0.63
Mínimo	0.08	0.16	0.31
Máximo	0.89	1.13	2.07
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	1.13	0.42	1.07
Desv. Est.	0.92	0.24	0.85
Mínimo	0.34	0.28	0.22
Máximo	2.45	0.79	2.24
Zona norte y centro de la laguna			
Media	1.53	1.86	4.32
Desv. Est.	0.28	0.67	1.62
Mínimo	1.21	1.07	1.96
Máximo	1.72	2.63	5.52
Zona somera de la laguna			
Media	2.38	2.24	3.59
Desv. Est.	0.14	0.30	0.64
Mínimo	2.27	1.90	3.11
Máximo	2.54	2.45	4.31
Muelles y marinas			
Media	0.90	1.26	1.48
Desv. Est.	0.47	0.88	1.06
Mínimo	0.52	0.29	0.46
Máximo	1.48	2.29	2.56

6.1.7. Cobre

El Cu presentó la concentración promedio más alta en la MPS durante el invierno en las estaciones de la zona NCL, debido al alto contenido de Cu registrado en la estación cercana al estero Zacatecas (estación 5) con una concentración de $260.7 \mu\text{g g}^{-1}$. En esta zona, para las épocas de primavera y verano la concentración de este elemento en la MPS disminuyó considerablemente. En esta misma época (invierno), en la ZSL se presentó la concentración máxima de Cu en la MPS con un

promedio de $84.5 \mu\text{g g}^{-1}$, y de igual forma que en las estaciones de la zona NCL, disminuyó para los muestreos de primavera y verano. En general para todo el año las concentraciones promedio más altas y constantes de Cu en la MPS se presentaron en las estaciones de los MM ($74.9 \mu\text{g g}^{-1}$ en invierno, $85.5 \mu\text{g g}^{-1}$ en primavera y $55.4 \mu\text{g g}^{-1}$ en verano), promedio influenciado principalmente por las marinas. Por su parte las concentraciones promedios más bajas de Cu en la MPS se registraron en la zona NCB y CSEB con concentraciones en un intervalo de 25.9 y $49.45 \mu\text{g g}^{-1}$ para todo el año (Tabla 9, Figura 15).

Tabla 9. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del contenido de Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	41.78	32.12	49.48
Desv. Est.	32.54	6.95	54.75
Mínimo	10.97	25.90	10.59
Máximo	92.53	47.07	174.56
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	39.71	30.15	25.88
Desv. Est.	23.50	7.95	8.50
Mínimo	14.65	21.36	17.05
Máximo	61.89	40.36	37.40
Zona norte y centro de la laguna			
Media	125.35	66.33	36.78
Desv. Est.	118.68	4.87	7.97
Mínimo	39.02	60.26	29.09
Máximo	260.69	72.19	46.11
Zona somera de la laguna			
Media	84.35	37.79	43.95
Desv. Est.	27.68	4.86	9.18
Mínimo	53.71	32.19	34.58
Máximo	107.58	40.93	52.93
Muelles y marinas			
Media	74.88	85.52	55.39
Desv. Est.	75.89	58.82	24.04
Mínimo	15.67	28.25	28.05
Máximo	180.66	159.42	82.80

6.1.8. Cadmio

El Cd por su parte presentó un comportamiento inverso en su distribución al resto de los metales. En general para los tres muestreos las concentraciones más altas de este elemento en la MPS se registraron en la zona NCB y las mínimas en la ZSL. En la época de vientos (invierno) se presentó la mayor y menor concentración promedio de Cd en la MPS en todo el año ($31.93 \mu\text{g g}^{-1}$ en la zona NCB y $0.25 \mu\text{g g}^{-1}$ en la ZSL). Para las épocas de primavera y verano las concentraciones máximas fueron 1.32, 6.12, 3.95, 1.38 y $0.61 \mu\text{g g}^{-1}$ en la CSEB, zona NCB, ZSL, y MM, respectivamente (Tabla 10, Figura 16).

Tabla 10. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del contenido de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	31.93	10.32	8.70
Desv. Est.	36.32	7.52	3.38
Mínimo	4.82	1.73	3.39
Máximo	97.54	24.17	14.18
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	8.79	6.12	5.95
Desv. Est.	2.60	3.20	5.04
Mínimo	5.05	2.89	2.34
Máximo	10.89	9.31	13.19
Zona norte y centro de la laguna			
Media	6.98	2.28	3.95
Desv. Est.	6.30	0.93	1.87
Mínimo	1.08	1.03	2.02
Máximo	13.62	3.20	6.45
Zona somera de la laguna			
Media	0.25	1.38	0.66
Desv. Est.	0.14	0.39	0.19
Mínimo	0.09	1.14	0.44
Máximo	0.36	1.83	0.78
Muelles y marinas			
Media	3.26	0.61	0.35
Desv. Est.	2.01	0.36	0.29
Mínimo	1.84	0.10	<0.01
Máximo	6.13	0.90	0.63

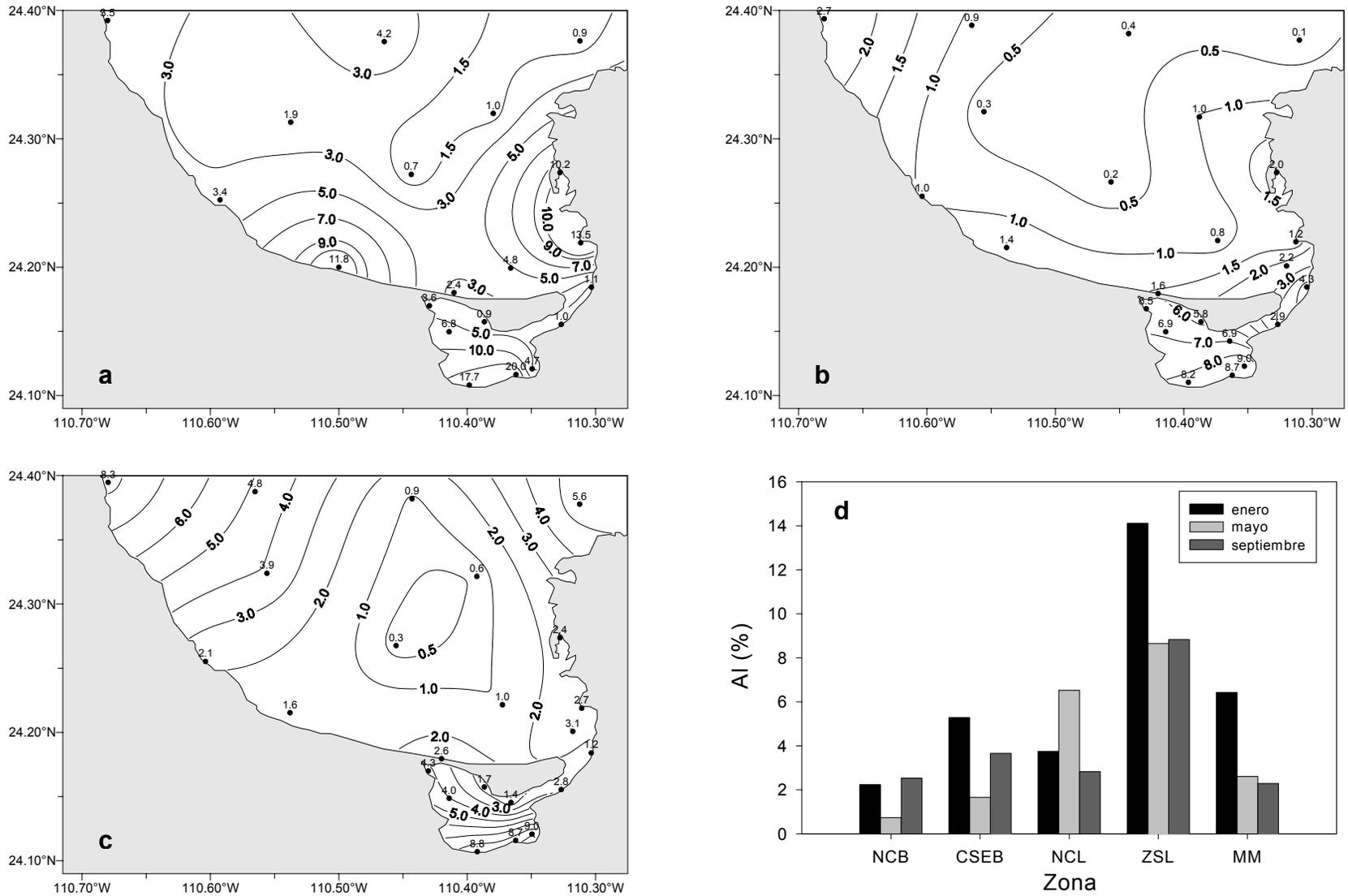


Figura 12. Distribución espacial del contenido de Al (%) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del contenido de Al en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).

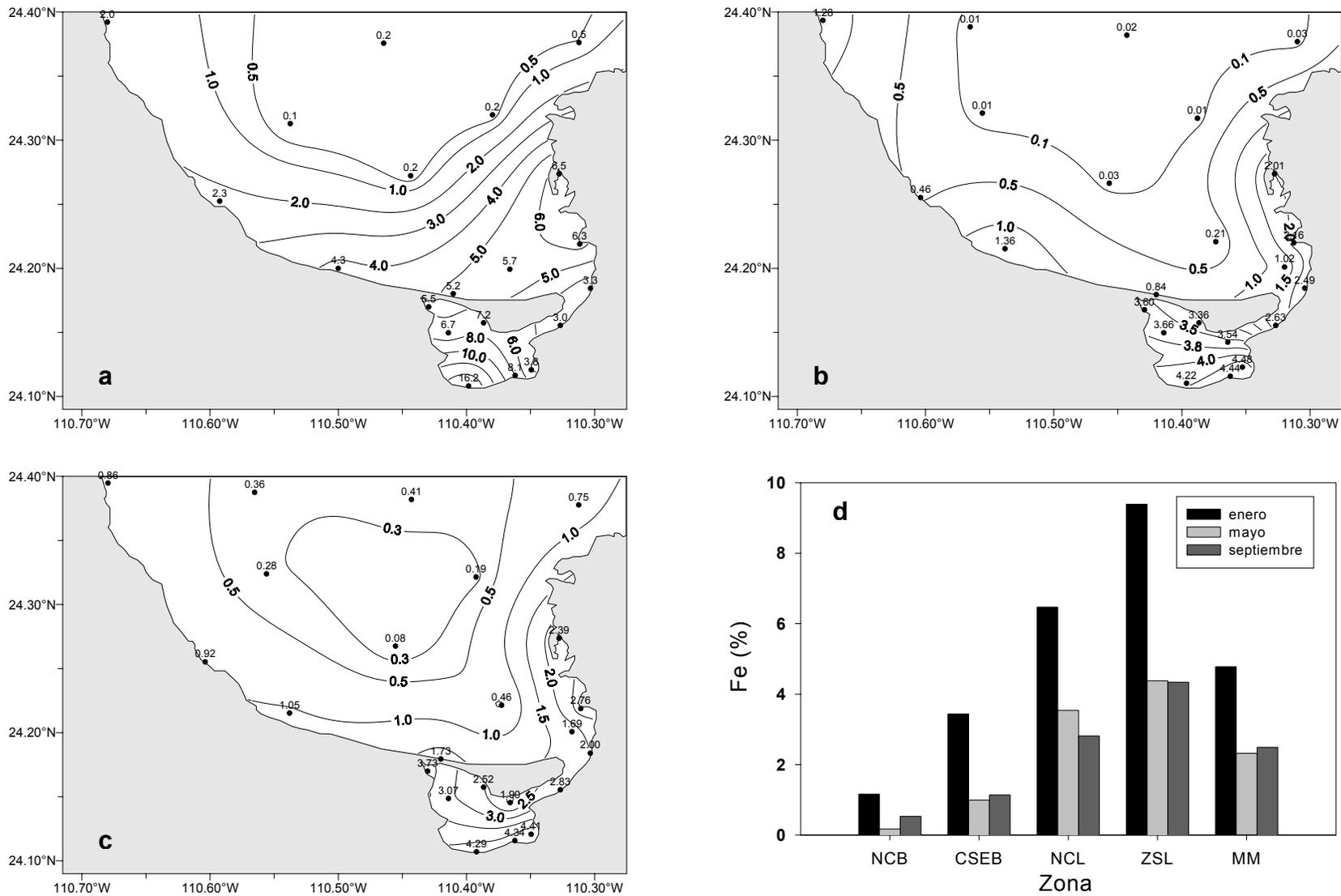


Figura 13. Distribución espacial del contenido de Fe (%) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del contenido de Fe en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).

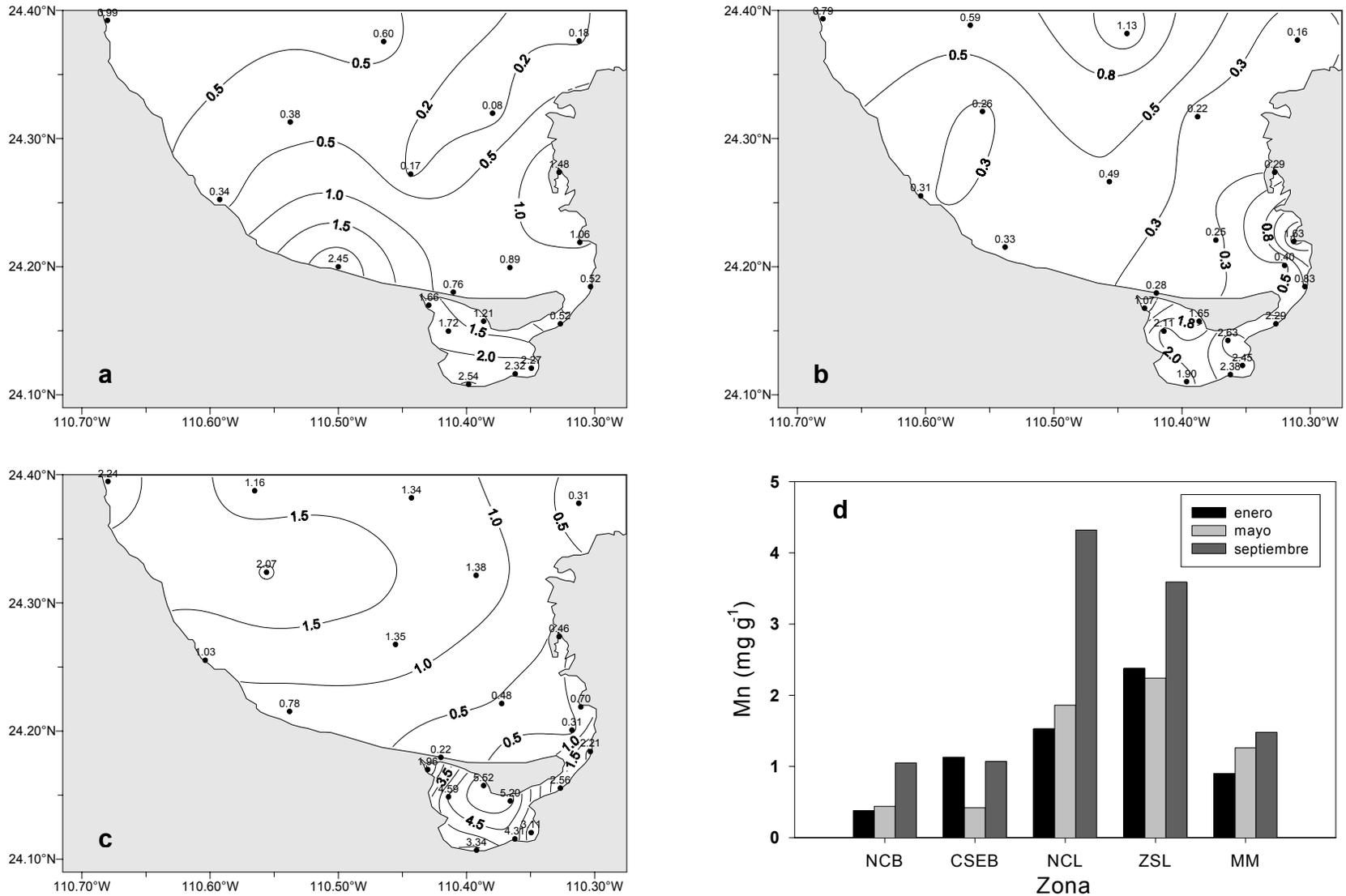


Figura 14. Distribución espacial del contenido de Mn (mg g^{-1}) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del contenido de Mn en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).

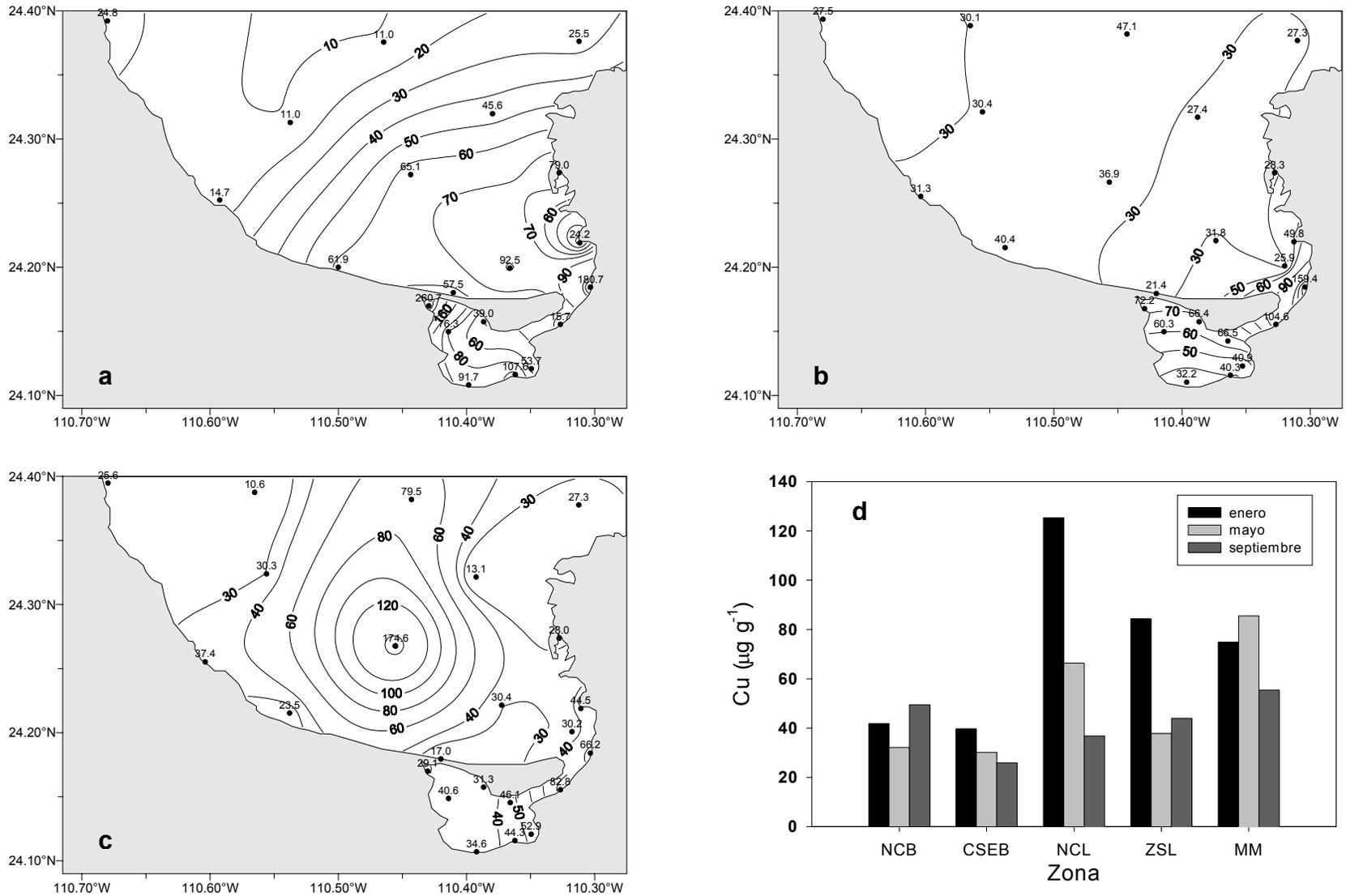


Figura 15. Distribución espacial del contenido de Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del contenido de Cu en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).

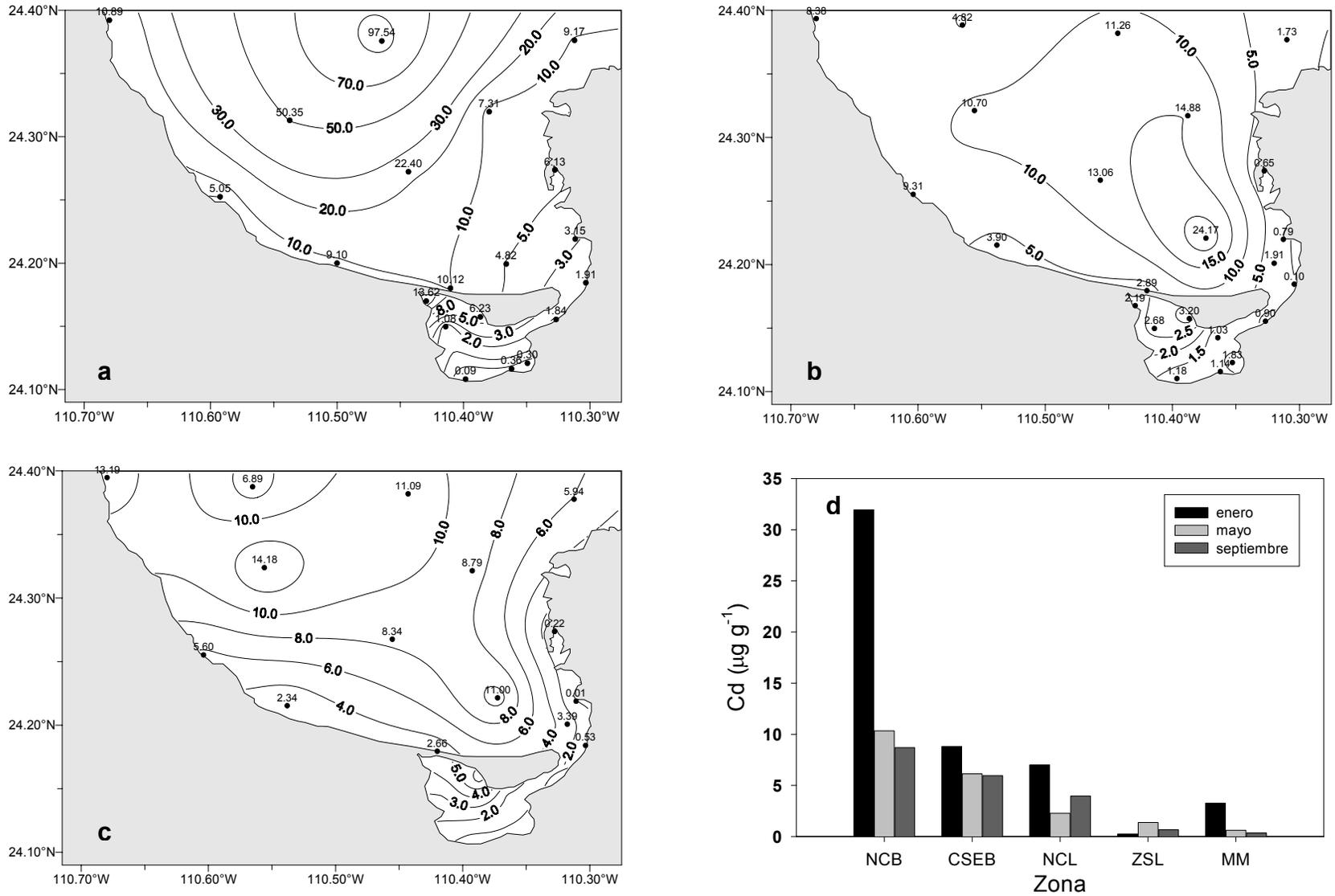


Figura 16. Distribución espacial del contenido de Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$) en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del contenido de Cd en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).

6.1.9. Factores de enriquecimiento de los metales

En general se observó una heterogeneidad de los valores del factor de enriquecimiento (FE) para los cinco metales en cada una de las zonas. Los máximos niveles del FE se presentaron para el Cd y los mínimos para el Al.

El Al presentó un gradiente en los valores del FE de la laguna y la costa hacia la parte central del área de estudio. En la mayoría de las zonas durante los tres muestreos el FE no rebasó la unidad, la excepción se presentó en la ZSL donde en el muestreo de invierno alcanzó un valor promedio de 1.72, siendo en esta época donde se presentaron los niveles más altos para la mayoría de las zonas (Tabla 11, Figura 17).

Tabla 11. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del FE del Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	0.27	0.09	0.31
Desv. Est.	0.22	0.08	0.26
Mínimo	0.08	0.01	0.04
Máximo	0.59	0.27	0.69
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	0.64	0.20	0.44
Desv. Est.	0.53	0.09	0.38
Mínimo	0.30	0.12	0.19
Máximo	1.44	0.33	1.01
Zona norte y centro de la laguna			
Media	0.46	0.79	0.34
Desv. Est.	0.36	0.06	0.18
Mínimo	0.10	0.71	0.17
Máximo	0.83	0.84	0.52
Zona somera de la laguna			
Media	1.72	1.05	1.07
Desv. Est.	1.00	0.05	0.02
Mínimo	0.57	1.00	1.05
Máximo	2.43	1.10	1.09
Muelles y marinas			
Media	0.78	0.32	0.28
Desv. Est.	0.78	0.17	0.09
Mínimo	0.12	0.14	0.14
Máximo	1.64	0.53	0.34

Los valores del FE del Fe presentaron un comportamiento similar en su distribución que el Al. El FE máximo para el Fe se presentó en la zona NCL durante el muestreo de invierno con un promedio de 5.29 seguido de las estaciones ubicadas en los MM con 2.65 de promedio en la misma época. Para el resto de los muestreos en las cinco zonas los niveles no rebasaron un FE de 1.7 (Tabla 12, Figura 18).

Tabla 12. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del FE del Fe en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	0.58	0.22	0.42
Desv. Est.	0.64	0.24	0.28
Mínimo	0.06	0.00	0.11
Máximo	1.73	0.67	0.81
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	1.36	0.90	0.68
Desv. Est.	1.18	0.35	0.38
Mínimo	0.53	0.69	0.15
Máximo	3.10	1.42	0.96
Zona norte y centro de la laguna			
Media	5.29	0.80	1.66
Desv. Est.	5.97	0.04	0.54
Mínimo	1.44	0.74	1.22
Máximo	12.17	0.84	2.20
Zona somera de la laguna			
Media	1.04	0.74	0.72
Desv. Est.	0.40	0.02	0.01
Mínimo	0.59	0.72	0.71
Máximo	1.34	0.75	0.73
Muelles y marinas			
Media	2.65	1.58	1.72
Desv. Est.	2.13	0.80	0.52
Mínimo	0.69	0.84	1.44
Máximo	4.64	2.71	2.49

El Mn presentó los niveles más altos del FE en verano para las cinco zonas registrando un promedio máximo de 18.83 en la zona NCL. El valor promedio mínimo se presentó en la zona NCB durante invierno con 1.52 incrementándose tal valor hasta alcanzar ~10 para las épocas de invierno y verano. En los muelles y marinas el promedio del FE se incrementó gradualmente de enero a septiembre (de 2.71 a

7.02), mientras que en las estaciones ubicadas en la ZSL y la CSEB presentaron valores menores, por abajo de 3.52 durante los tres muestreos (Tabla 13, Figura 19).

Tabla 13. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del FE del Mn en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	1.52	9.51	9.99
Desv. Est.	0.50	9.19	12.02
Mínimo	0.67	1.55	0.48
Máximo	2.14	27.32	34.31
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	1.95	2.22	2.90
Desv. Est.	0.81	0.54	1.71
Mínimo	0.87	1.53	0.72
Máximo	2.68	2.76	4.32
Zona norte y centro de la laguna			
Media	6.13	2.46	18.83
Desv. Est.	5.31	0.77	14.05
Mínimo	2.19	1.43	3.98
Máximo	12.18	3.28	32.93
Zona somera de la laguna			
Media	2.15	2.24	3.52
Desv. Est.	1.77	0.21	0.70
Mínimo	1.01	2.01	2.99
Máximo	4.19	2.38	4.31
Muelles y marinas			
Media	2.71	5.47	7.02
Desv. Est.	2.04	5.13	6.82
Mínimo	0.68	1.26	1.63
Máximo	4.77	12.17	16.31

En el caso del Cu y el Cd los valores del FE se comportaron de manera inversa al resto de los metales (un gradiente decreciente de la bahía hacia la laguna). Para el Cu, los niveles promedio más altos se registraron en la zona NCB en las épocas de primavera y verano con valores de 13.62 y 12.70 respectivamente, seguidos de 7.12 en invierno en las estaciones de los MM. En ésta última zona se presentaron los valores relativamente más altos después de la zona NCB, pero con menos variación en los tres muestreos. Por su parte en la ZSL se presentaron los

valores de FE más bajos durante los tres muestreos en un intervalo promedio de invierno a verano de 0.65 a 1.10 (Tabla 14, Figura 20).

Tabla 14. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del FE del Cu en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	4.96	13.62	12.70
Desv. Est.	5.24	11.43	26.23
Mínimo	0.39	1.74	0.33
Máximo	14.50	33.57	76.79
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	1.50	3.20	1.58
Desv. Est.	1.35	1.66	1.04
Mínimo	0.65	1.52	0.46
Máximo	3.51	4.89	2.70
Zona norte y centro de la laguna			
Media	6.45	1.53	2.59
Desv. Est.	4.62	0.19	1.80
Mínimo	1.68	1.32	1.02
Máximo	10.91	1.70	5.05
Zona somera de la laguna			
Media	1.10	0.65	0.74
Desv. Est.	0.53	0.06	0.15
Mínimo	0.78	0.59	0.59
Máximo	1.71	0.69	0.88
Muelles y marinas			
Media	7.12	4.84	4.26
Desv. Est.	11.67	1.88	3.02
Mínimo	0.27	2.10	1.73
Máximo	24.58	6.41	8.46

El Cd presentó un caso extraordinario, ya que se encontraron niveles de enriquecimiento extremadamente altos comparados con el resto de los metales. Se registró un gradiente abrupto de la bahía hasta la zona somera de la laguna con una diferencia hasta de 587 veces en invierno. El valor más alto en la zona NCB se presentó en primavera, donde alcanzo un FE promedio de 972.6 el cual disminuyó hasta 361.3 en verano. La CSEB presentó el mismo comportamiento que las estaciones de la zona NCB primavera>invierno>verano en un intervalo promedio de 179.59 a 69.49. No así, para las estaciones ubicadas en las zonas restantes, donde

se presentó un comportamiento heterogéneo en las tres épocas. Los niveles promedio más bajos se presentaron en las estaciones de la ZSL siendo el mínimo en la época de invierno con 1.19 (Tabla 15, Figura 21).

Tabla 15. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo del FE del Cd en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	698.48	972.60	361.26
Desv. Est.	518.68	763.72	349.37
Mínimo	41.04	35.42	43.31
Máximo	1372.52	2383.31	1008.35
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	97.72	179.59	69.49
Desv. Est.	62.69	148.42	29.54
Mínimo	31.71	76.23	41.62
Máximo	170.09	399.82	111.12
Zona norte y centro de la laguna			
Media	153.67	14.69	72.90
Desv. Est.	145.68	6.81	57.99
Mínimo	6.51	6.10	33.11
Máximo	297.82	22.60	158.05
Zona somera de la laguna			
Media	1.19	6.54	3.08
Desv. Est.	1.27	1.56	0.90
Mínimo	0.21	5.41	2.03
Máximo	2.62	8.32	3.62
Muelles y marinas			
Media	46.29	13.75	7.93
Desv. Est.	34.34	11.15	8.10
Mínimo	9.62	0.92	<0.001
Máximo	79.50	28.14	18.64

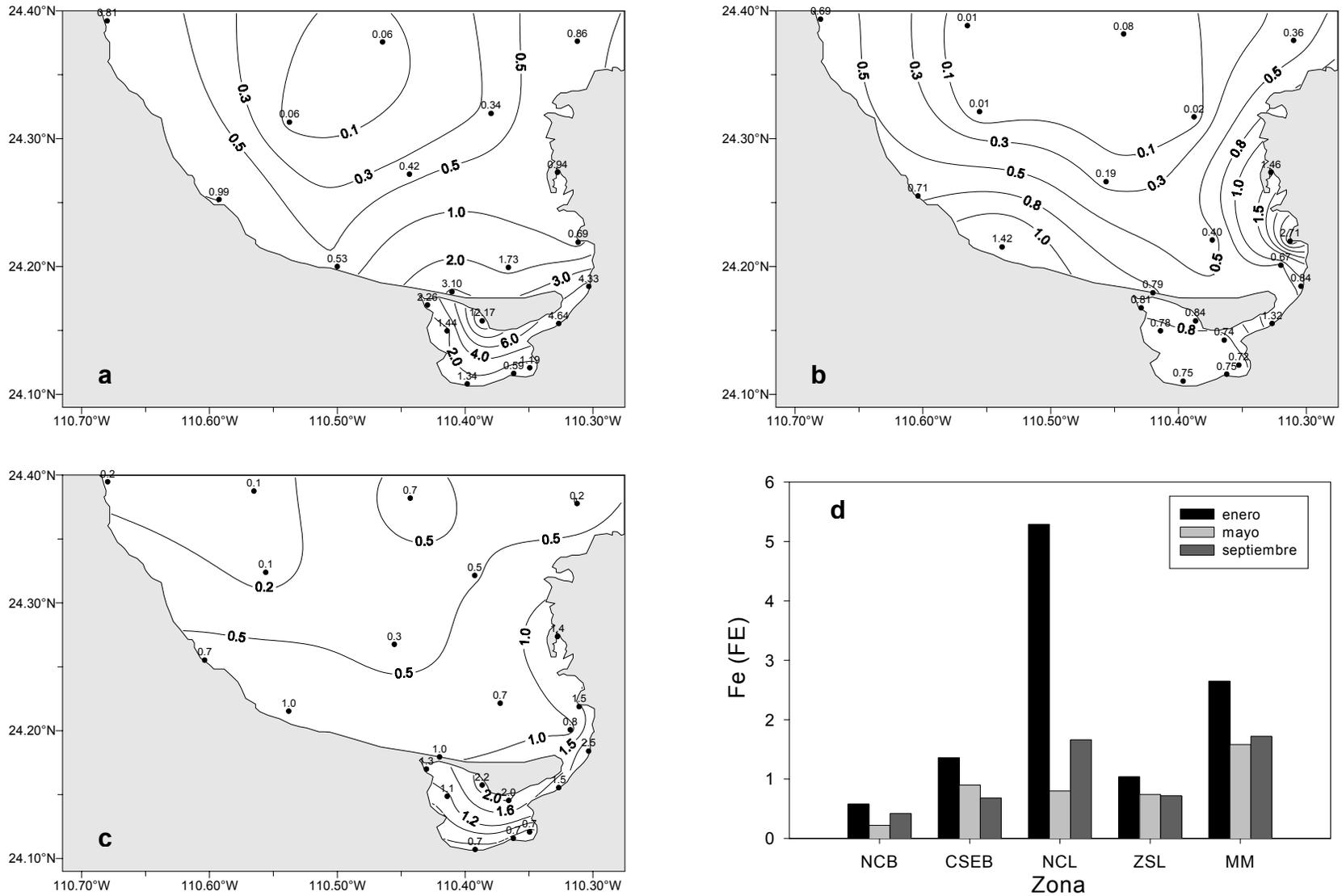


Figura 18. Distribución espacial del FE del Fe en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del FE del Fe en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).

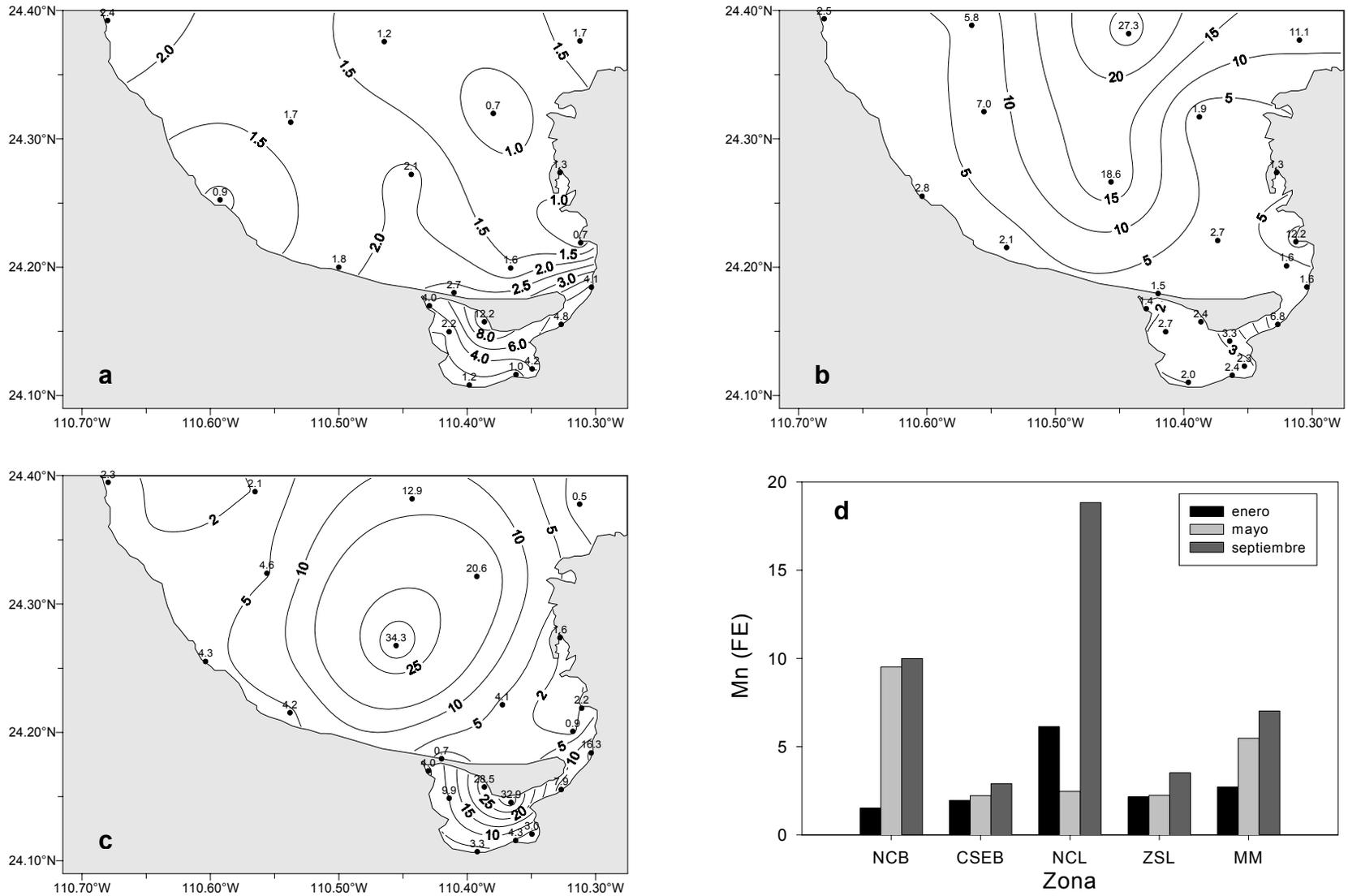


Figura 19. Distribución espacial del FE del Mn en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del FE del Mn en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).

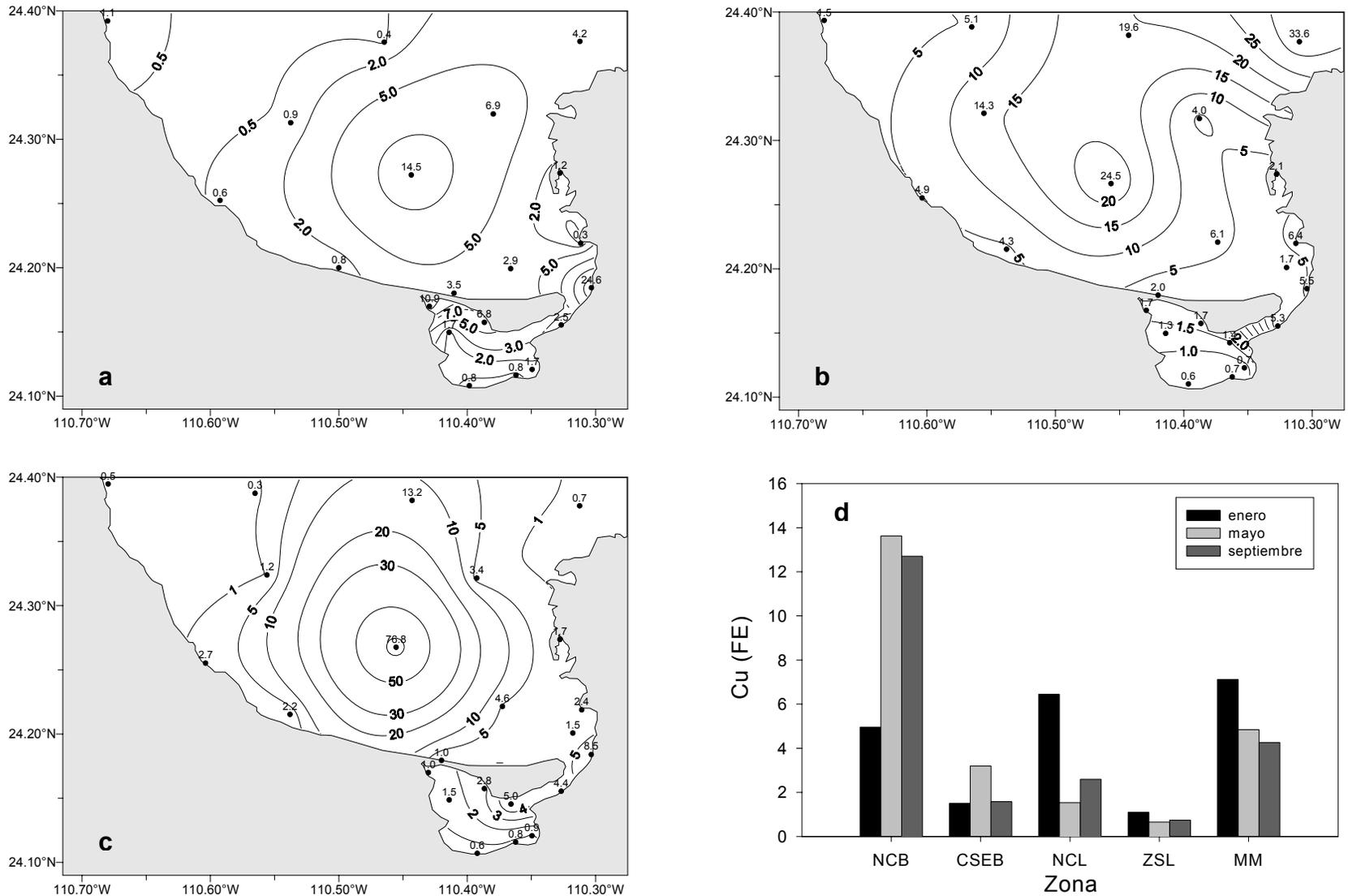


Figura 20. Distribución espacial del FE del Cu en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del FE del Cu en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).

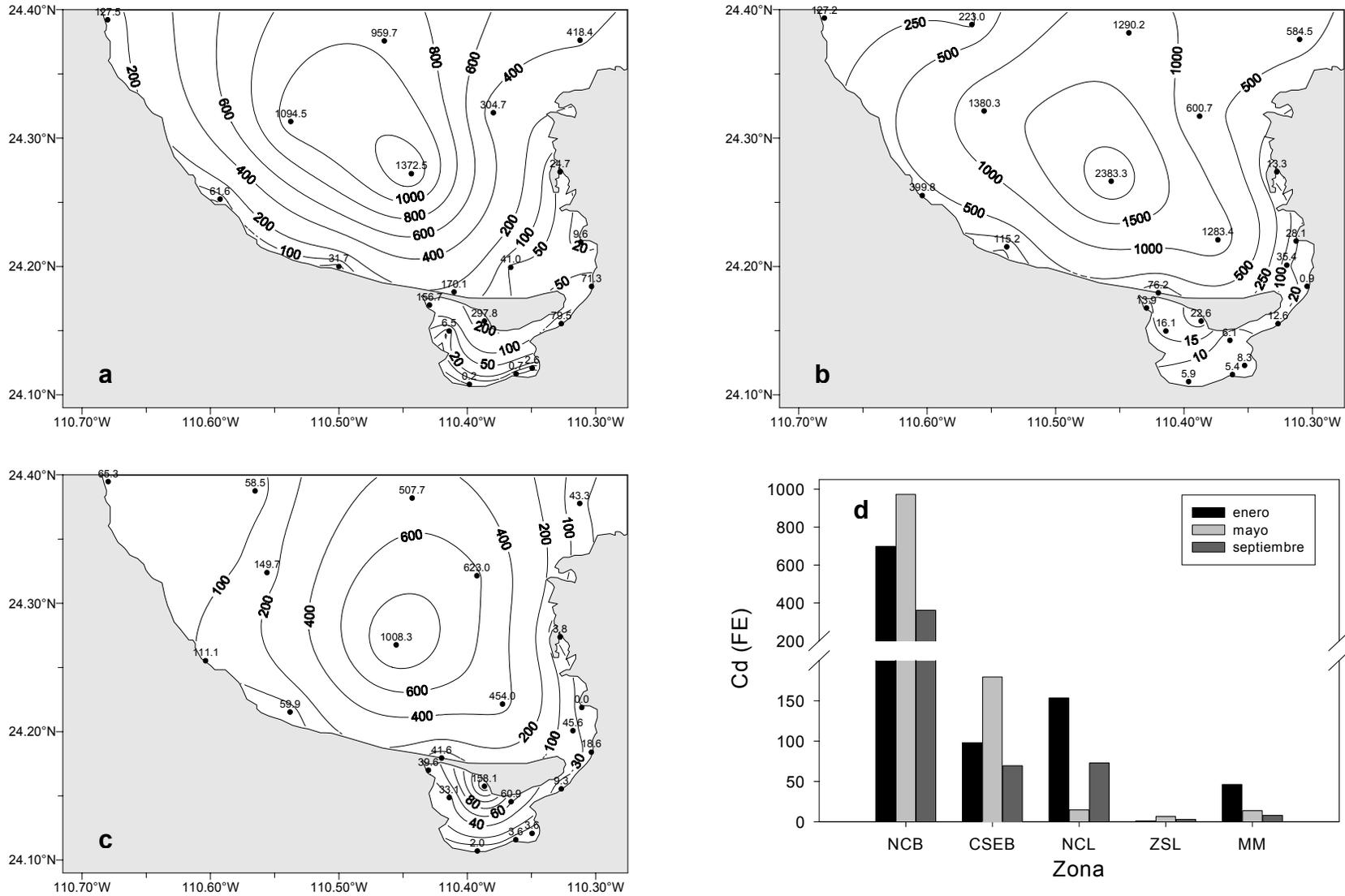


Figura 21. Distribución espacial del FE del Cd en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz. Enero (a), mayo (b) y septiembre (c) del 2002. Variación temporal del FE del Cd en la MPS del agua superficial de cinco zonas de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 (d).

VII. DISCUSIÓN

7.1. Condiciones hidrológicas

7.1.1. Temperatura y salinidad

La oceanografía del Golfo de California, cuya boca está localizada en la zona de convergencia de la Corriente Norecuatorial y el Giro del Pacífico Norte, responde sensiblemente al fenómeno de El Niño y la Oscilación Austral (ENOA) (Bernal *et al.*, 2001). A su vez la Bahía de La Paz está influenciada por el Golfo de California, especialmente en la parte profunda, por lo que la variabilidad en el sur del golfo determina en gran parte la variabilidad de mesoescala en la Bahía de La Paz (Jiménez-Illescas *et al.*, 1997). Por ejemplo Reyes-Salinas (1999) reportó la presencia de Agua del Golfo de California (AGC), Agua Superficial Ecuatorial (ASE) y Agua Subsuperficial Subtropical (ASST) en la Bahía de La Paz, las cuales son las tres principales masas de agua que ocupan la capa superficial del Golfo de California (Torres-Orozco, 1993).

Los registros de temperatura y salinidad en el presente estudio indican que las aguas superficiales de la porción sur de la Bahía de La Paz durante todo el año son aguas con características típicas del AGC (Figura 22). De acuerdo a Torres-Orozco (1993), el AGC se caracteriza por presentar una temperatura mayor a los 12°C y salinidad mayor a 35.0. Durante los tres muestreos se encontró que la temperatura promedio estuvo en un intervalo de 20.08 a 29.33°C (>12°C), y la salinidad entre 35.25 y 35.49 (>35). Esta agua es modificada por evaporación en la bahía y la laguna, lo que sugiere que, particularmente en la porción sur de la Bahía de La Paz, los parámetros climáticos locales tienen mayor influencia en la variabilidad temporal de las condiciones termohalinas del agua superficial, que a su vez pudieran estar respondiendo a un forzamiento de las condiciones de mesoescala del Golfo de California.

Por ejemplo, se observó una relación entre la temperatura del ambiente y la temperatura superficial de la parte sur de la bahía y la laguna durante el 2002 (Figura 23a). Para ambos cuerpos de agua los valores máximos y con menor variación de la temperatura ocurrieron durante el verano (septiembre), mientras que la temperatura

superficial de invierno (enero) mostró los valores mínimos y una mayor variabilidad comparada con la de verano. Al respecto Bernal *et al.* (2001) mencionan que una de las implicaciones de estas diferencias en la variabilidad estacional, es que en los cambios climáticos interanuales se manifiestan principalmente en la temperatura superficial del mar de invierno, como parece ocurrir en el resto del Pacífico Nororiental (Emery y Hamilton, 1985). Los valores máximos de temperatura superficial de verano de la Cuenca de La Paz, son debido posiblemente a una intensificación de los procesos de transferencia de calor latente a la atmósfera, a través de una mayor evaporación, y a la formación de nubes que potencian el albedo en la región y que actúan retroalimentando negativamente el calentamiento (Bernal *et al.*, 2001).

Se ha señalado que la temperatura superficial promedio en la Bahía de La Paz presenta una variación temporal y de manera periódica. Los registros promedio de temperatura superficial de $\sim 20^{\circ}\text{C}$ para invierno, $\sim 25^{\circ}\text{C}$ en primavera y $\sim 30^{\circ}\text{C}$ para verano de los datos reportados por Reyes-Salinas (1999) y Martínez-López *et al.* (2001) son similares con los resultados obtenidos en este trabajo en la porción sur de la bahía durante el 2002. Por su parte la laguna presenta mayor variabilidad en las condiciones de temperatura superficial entre las mismas épocas de diferentes años, al comparar los resultados obtenidos con los reportados por Cervantes-Duarte *et al.* (1991) y Cervantes-Duarte *et al.* (2001) muestran una variación en el promedio de $\sim 3.5^{\circ}\text{C}$ para invierno de $\sim 3.0^{\circ}\text{C}$ en primavera $\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ en verano entre 1986 y el 2002. La diferencia entre los valores pudiera ser resultado de las condiciones climáticas, aunado a las variaciones diurnas y el estado de la marea durante el muestreo.

Por otra parte, el Golfo de California está fuertemente influenciado por las tierras áridas que lo rodean, como consecuencia es la única cuenca evaporativa del Pacífico (Badán-Dangón *et al.*, 1985). Así mismo, en la Bahía de La Paz debido a que la evaporación excede la precipitación, la salinidad del agua superficial se ve incrementada (Jiménez-Illescas *et al.*, 1997). Durante el año 2002 en la Cuenca de La Paz, la evaporación fue 17.6 veces mayor que la precipitación (CNA, 2002; CIBNOR, 2002) condiciones que se dan por una alta incidencia solar y baja humedad en el ambiente. En este trabajo se observó una relación entre la salinidad superficial

y la evaporación en la porción sur de la Bahía de La Paz, la cual se manifiesta con mayor claridad en la laguna (Figura 23b).

Estacionalmente, en la laguna el promedio máximo de salinidad se presentó en primavera (mayo) coincidiendo con la máxima evaporación de los meses de muestreo. En verano la evaporación disminuyó reflejándose en el descenso de la salinidad que se ve reducida en 0.93. En el caso de la bahía durante el invierno y primavera la salinidad promedio permaneció constante (~35.5), y al igual que la laguna pero en menor proporción, en verano se ve afectada posiblemente por la disminución de la evaporación, observándose en una disminución de 0.2. En general las aguas superficiales de la bahía en términos de salinidad son homogéneas, situación que ya ha sido mencionada por Jiménez-Illescas *et al.* (1997). Por otra parte, aunque la precipitación es relativamente insignificante durante el año, pudiera existir cierta influencia sobre la disminución de la salinidad en el agua superficial durante septiembre tanto en la bahía como en la laguna aunado esto con una menor radiación solar.

Reyes-Salinas (1999) reporta para las aguas superficiales de la Bahía de La Paz salinidades de 35.47 para finales del invierno, 35.98 en primavera y de 35.33 para verano. Los registros obtenidos en este trabajo son similares y presentaron el mismo patrón temporal, siendo la diferencia máxima de 0.53 en primavera. Por su parte en la laguna al igual que la temperatura, mostró mayor variabilidad en las condiciones de salinidad superficial entre las mismas épocas de diferentes años, al comparar los resultados obtenidos con los reportados por Cervantes-Duarte *et al.* (1991) y Cervantes-Duarte *et al.* (2001) explica diferencias debidas a las condiciones climáticas, variaciones diurnas y estado de la marea.

Por otra parte, la Laguna de La Paz es considerada como un cuerpo de agua hipersalino con características antiestuarinas (Espinoza-Avalos, 1977; Cervantes-Duarte y Santoyo-Reyes, 1986; Sánchez-Martínez, 1997). Aguirre-Bahena (2002) menciona que la batimetría, el tipo de sedimentos y la velocidad de las corrientes en el interior de la laguna son los principales factores que dan a ésta, las condiciones hipersalinas. Esto debido a que las zonas someras actúan como cuencas de evaporación influenciadas por la tonalidad de los sedimentos oscuros y la baja

intensidad de las corrientes (2 y 4 cm s^{-1}) permitiendo que la radiación solar actué durante un mayor tiempo sobre esta masa de agua, incrementando la temperatura y la salinidad. Esto es importante, si consideramos que del área total de la laguna, el 50% aproximadamente tiene una profundidad entre 0 y 2 m (Godínez-Orta *et al.*, 1997), estas condiciones sugieren que en general la laguna funciona como un estanque de evaporación que exporta sal hacia la bahía. La laguna pierde agua por evaporación e incrementa su salinidad, durante el flujo de marea la bahía suministra agua menos salina a la laguna y reemplaza el agua perdida por la evaporación, así, constantemente y de manera periódica durante los ciclos de mareas se cambia agua más salada de la laguna por agua menos salada de la bahía.

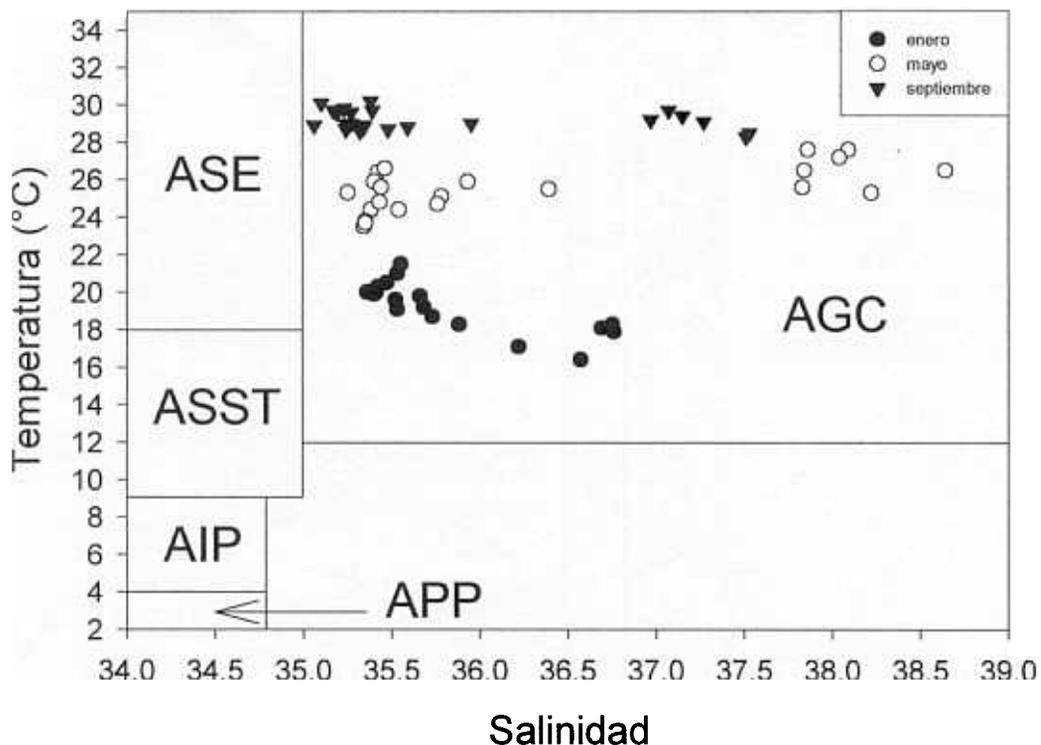


Figura 22. Diagrama T-S. Los triángulos, los puntos oscuros y claros representan las estaciones de muestreo en cada una de los meses de cruce, las líneas indican la clasificación de las masas de agua dadas por Torres-Orozco (1993). Los acrónimos para las diferentes masa de agua son: AGC Agua del Golfo de California, ASE Agua Superficial Ecuatorial, ASST Agua Subsuperficial Subtropical, AIP Agua Intermedia del Pacífico y APP Agua Profunda del Pacífico.

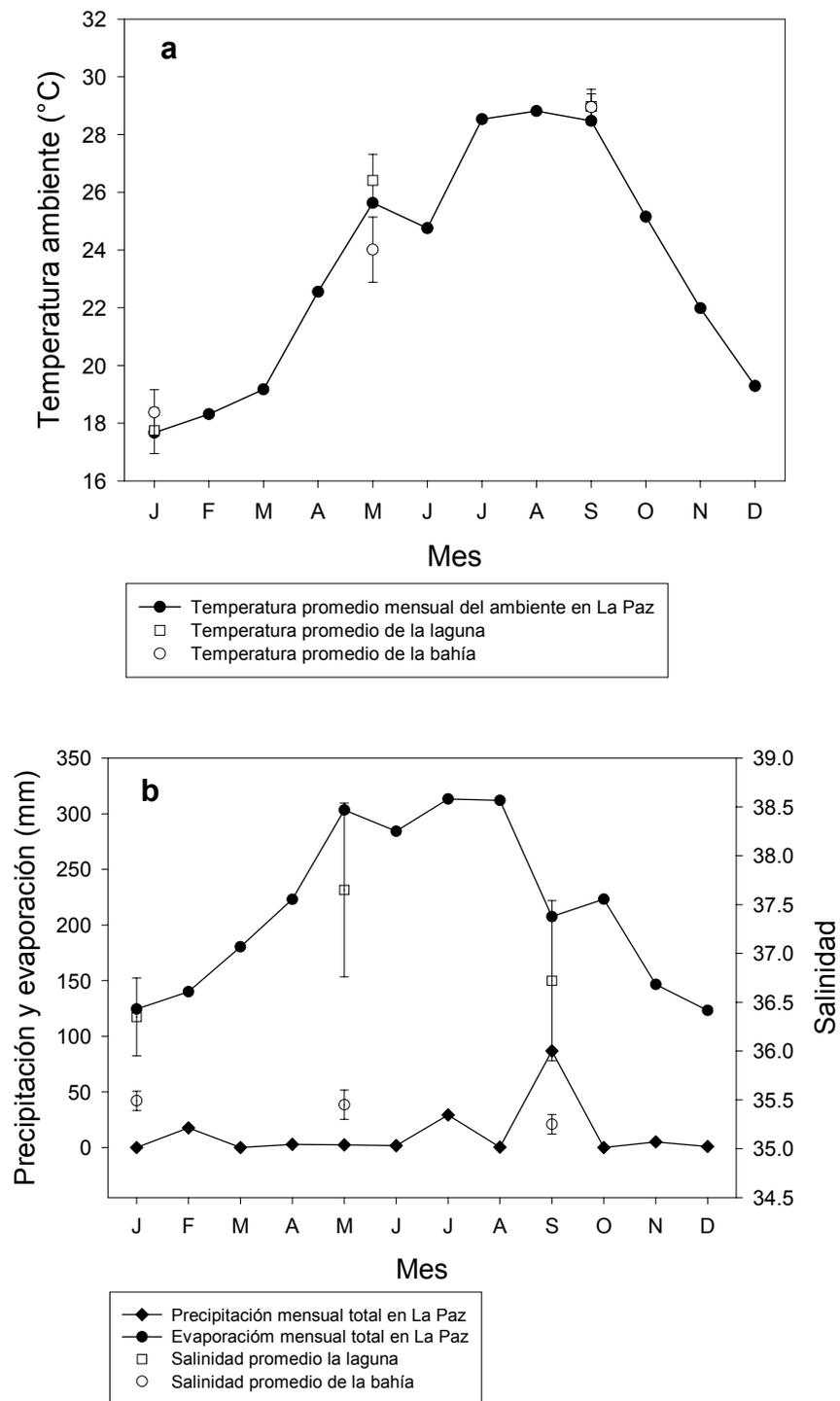


Figura 23. Comportamiento anual de la temperatura ambiente y temperatura del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz (a). Comportamiento anual de la precipitación y evaporación en La Paz, y salinidad del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz (b).

7.1.2. Fosfatos y silicatos

El fitoplancton marino requiere de ciertos elementos traza para su crecimiento, los cuales pueden ser limitantes e inhibir su crecimiento (Riley y Chester, 1989; Libes, 1992; Millero, 1996). Estos organismos tienen un gran impacto sobre el ciclo biogeoquímico marino de los elementos biolimitantes, tales como el nitrógeno, fósforo y silicio. La distribución de estos elementos en el agua de mar está influenciada también por factores físicos, tales como el movimiento de agua, el clima y las descargas de los ríos. Como resultado de las interacciones de estos procesos físicos y biológicos, en las aguas superficiales las concentraciones de los bioelementos son menores que en las aguas profundas (Libes, 1992).

El Golfo de California es reconocido como un sistema altamente productivo (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Sin embargo la distribución espacial y temporal de los nutrientes en el Golfo de California ha sido poco estudiada (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978; Torres-Valdez, 2000). En la Bahía de La Paz los estudios realizados sobre el comportamiento espacio temporal de los nutrientes son aún más escasos, siendo la Laguna de La Paz la que ha recibido mayor atención.

Reyes-Salinas (1999) con el propósito de conocer los factores que controlan la productividad primaria en la Bahía de La Paz encontró una marcada temporalidad en las concentraciones promedio de los nutrientes del agua superficial de la bahía, donde reportó una concentración promedio de fosfatos de 0.92 μM a finales del invierno, 0.74 μM en primavera y 0.38 μM para verano, y concluyó que este nutriente no es limitante para la fotosíntesis en la bahía. Sus resultados son comparables con los registrados en este trabajo (0.87 μM en invierno, 0.70 μM en primavera y 0.44 μM para invierno). Además, en el presente estudio se encontró una clara variación temporal en la distribución de los fosfatos, lo cual es consistente con lo reportado por este autor.

Por otra parte, en la laguna los fosfatos durante los muestreos de invierno y primavera siguieron el mismo comportamiento que en la bahía, con concentraciones relativamente más bajas (0.71 μM invierno y 0.58 μM primavera). En verano se registró el promedio máximo en el año con 0.78 μM , (1.8 veces más altos que en la bahía). Estudios previos han reportado un comportamiento estacional en la

concentración de fosfatos en las aguas superficiales de la laguna, las cuales a su vez difieren entre las mismas épocas de diferentes años (Cervantes-Duarte y Guerrero-Godínez, 1988; Cervantes-Duarte *et al.*, 1991; Cervantes-Duarte *et al.*, 2001). Los valores mínimos y máximos de las concentraciones de fosfatos reportados por estos autores para invierno son de 0.42 a 0.65 μM , en primavera de 0.72 a 2.04 μM y para verano de 0.40 a 1.31 μM , valores reportados en diferentes condiciones de mareas, de ahí la alta variabilidad en los resultados.

Reyes-Salinas (1999) y Cervantes-Duarte *et al.* (2001) consideran que los fosfatos no son un factor limitante en la producción primaria en la Bahía y Laguna de La Paz. Con base a los resultados obtenidos en el presente trabajo y considerando que una concentración por arriba de 0.3 μM de fosfatos promueven la división celular y por abajo de esta concentración es inhibida (Millero, 1996) se confirma su hipótesis.

En el caso de los silicatos las concentraciones son contrastantes con los reportados por Reyes-Salinas (1999) para el agua superficial de la Bahía de La Paz, quien reportó concentraciones promedio de 13.11 μM a finales de invierno, 6.22 μM en primavera y 1.89 μM para verano (comportamiento similar al de los fosfatos). Los datos obtenidos de silicatos en este trabajo mostraron un comportamiento estacional inverso, una homogeneidad en las concentraciones de invierno y primavera de ~ 2.5 μM y un máximo en verano con 6.52 μM , lo que sugiere un comportamiento particular en el aporte de silicatos para el agua superficial de la porción sur de la bahía a diferencia de los fosfatos que se comportan de manera similar.

Lo anterior pudiera ser explicado si consideramos que en el océano, la máxima concentración de silicatos ocurre a mayores profundidades que la de los fosfatos, ya que los silicatos son remineralizados cuando las estructuras silícicas de los organismos son disueltos (Libes, 1992). En el caso de la Bahía de La Paz, Reyes-Salinas y Cervantes-Duarte (1998) reportaron una capa de mezcla en la zona profunda mayor a los 80 m durante el invierno y principios de la primavera. Esta capa de mezcla posiblemente rompe la nutriclina manifestándose en el alto contenido de nutrientes durante estas épocas. En verano la columna de agua se estabiliza y se

desarrolla una fuerte termoclina, por lo que se ven reducidas las concentraciones de nutrientes en las aguas superficiales de la zona profunda de la bahía.

Caso contrario ocurre en la porción sur de la bahía en donde la concentración promedio de silicatos se incrementa durante el verano. Lo anterior sugiere un aporte diferente de silicatos en esta porción de la bahía, aporte que posiblemente se deba a los escurrimientos continentales o al intercambio de material con la laguna. Es conocido que los escurrimientos continentales son uno de los principales suministros de silicatos al océano (Riley y Chester, 1989; Millero, 1996) y posiblemente el incremento de este nutriente en verano se deba al aporte continental, ya que los mayores escurrimientos en la bahía se presentan en la zona sur en donde Cervantes-Duarte *et al.* (2001) han registrado hasta $\sim 17.0 \mu\text{M}$ en promedio de silicatos en la Laguna de La Paz y Suárez-Altamirano (2001) reportó una concentración promedio de $28.06 \mu\text{M}$ para un estero adyacente a la laguna. Además en este estudio, las variaciones en las concentraciones mínimas y máximas de silicatos en la porción sur de la bahía coincide con las variaciones registradas en la laguna ($4.98 \mu\text{M}$ en invierno y $13.51 \mu\text{M}$ en verano). Aguirre-Bahena (2002) al efectuar un balance de masa de los nutrientes encontró un proceso de exportación de silicatos hacia la bahía, condiciones antes descritas por García-Pámanes (1977), lo que explica las altas concentraciones de silicatos en la porción sur de la bahía comparadas con la zona profunda de la misma.

7.1.3. Materia particulada suspendida y clorofila a

La concentración de la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002 presentó una distribución horizontal típica, que en las aguas superficiales se caracteriza por su disminución de la zona costera hacia el océano abierto (Chester, 2000). Además mostró una variación temporal, presentado la mayor concentración promedio en invierno (0.86 mg L^{-1}) la cual disminuye hacia el verano (0.47 mg L^{-1} en primavera y 0.37 mg L^{-1} en verano). Estas concentraciones se encuentran dentro del rango reportado para la MPS en diversas aguas costeras de los océanos del mundo donde se encuentran en concentraciones de <0.1 a $>3.0 \text{ mg L}^{-1}$, mientras las mínimas concentraciones son encontradas en el océano abierto en

áreas de baja productividad (zonas oligotróficas), especialmente en los giros centrales donde las concentraciones del MPS son $<0.01 \text{ mg L}^{-1}$ (Chester, 2000).

Zeitzschel (1970), Lechuga-Devéze *et al.* (1989), López-Cortés *et al.* (1991) y González-Farías *et al.* (1995) han estudiado la distribución de las concentraciones de la MPS y algunos de sus componentes en el agua superficial del Golfo California. Para la Bahía de La Paz, solo se encuentra el trabajo de Reyes-Salinas (1999) y éste se limita al contenido de la MPS total. En su trabajo encontró las mayores concentraciones promedio en primavera (0.69 mg L^{-1}) y las menores en otoño (0.24 mg L^{-1}), contrario a los resultados obtenidos en el presente trabajo en la porción sur de la bahía durante el 2002. González-Farías *et al.* (1995) mencionan que, las variaciones en la concentración de la MPS en mar abierto son debidas principalmente al material autóctono (fitoplancton) y en la zona costera lo es el material alóctono (terrígeno). Considerando lo anterior, la diferencia temporal entre ambos trabajos posiblemente se deba a las fuentes de la MPS debido a la ubicación de las estaciones de muestreo en cada estudio, ya que la mayoría de las estaciones en el trabajo de Reyes-Salinas (1999) se encuentran en la zona pelágica de la bahía, mientras que en el presente estudio la mayoría de las estaciones se ubican en la zona nerítica.

A pesar de las diferencias de los resultados en las épocas de muestreo, la mayor variación entre las concentraciones mínimas y máximas en el año en la bahía son similares en ambos trabajos (0.45 y 0.49 mg L^{-1}). Similitud que se observa también en la concentración media anual (promedio anual de 0.53 y 0.57 mg L^{-1} respectivamente) y consistente a lo reportado por Zeitzschel (1970) para el Golfo de California (promedio de 0.57 mg L^{-1}).

Para la MOP en la Bahía de La Paz, las concentraciones más altas se registraron en primavera (0.11 mg L^{-1}) y las mínimas en verano (0.08 mg L^{-1}), concentraciones relativamente bajas comparadas con los resultados de González-Farías *et al.* (1995), quien reportó para la zona sur del Golfo de California una concentración promedio de 0.23 mg L^{-1} . En cuanto al contenido de la MOP en la MPS de la porción sur de la Bahía de La Paz, en primavera y verano se encontró una concentración promedio de 17.43% en un intervalo de <3.0 a 35.77% ,

concentraciones de acuerdo a lo esperado, debido a que muchas de las estaciones se localizan cercanas a la costa donde el material terrígeno en la MPS se incrementa. La MOP en el océano constituye una gran parte de la MPS en aguas superficiales de los océanos del mundo y comúnmente se encuentra en un ~50% del total de la MPS (Chester, 2000).

Por otra parte, para la Laguna de La Paz se ha mencionado anteriormente que la marea influye en gran medida en la dinámica de las variables fisicoquímicas (Espinoza-Avalos, 1977; García-Pámanes, 1977; Cervantes-Duarte y Guerrero-Godínez, 1988; Sánchez-Martínez, 1997; Cervantes-Duarte *et al.*, 1991; Cervantes-Duarte *et al.*, 2001; Aguirre-Bahena, 2002), y en el caso de la MPS no es la excepción, sumado a este factor, los vientos y la batimetría que contribuyen a la resuspensión de los sedimentos, principalmente en la parte sur y sureste de la laguna (Lechuga-Devéze *et al.* 1986; Cervantes-Duarte *et al.*, 2001; Aguirre-Bahena, 2002).

En el presente trabajo se encontraron las mayores concentraciones de MPS en la parte sur de la laguna, concentraciones nunca antes reportadas para este cuerpo de agua, con una concentración promedio máxima de 171.5 mg L^{-1} en invierno. Esta zona es la más somera de la laguna y debido a la intensidad de los vientos que ocurren en invierno, la resuspensión de los sedimentos es intensa, incluso la columna de agua adquiere un color oscuro. Aguirre-Bahena (2002) menciona que se debe al tipo de sustrato que se presenta en la región y de acuerdo a Green-Ruiz y Larrinaga-Cunnigham (1986) los sedimentos de esta zona están compuestos principalmente por lodos. Debido a las altas concentraciones de MPS encontradas en la zona sur de la Laguna de La Paz se consideró a esta zona como un ambiente particular y no se incluyó en el promedio para el resto de las estaciones de la laguna.

Cervantes-Duarte *et al.* (2001) reportaron una concentración promedio de MPS en las aguas de Laguna de La Paz para primavera de 3.47 mg L^{-1} y para verano de 2.34 mg L^{-1} . En este trabajo las concentraciones promedio de MPS registradas en el resto de las estaciones de la laguna (excluyendo la zona somera) presentaron el máximo en invierno (2.58 mg L^{-1}) y el mínimo en verano (1.29 mg L^{-1}).

La variabilidad en los resultados al igual que en el resto de las variables fisicoquímicas puede deberse a las condiciones de marea en que fueron colectadas las muestras.

Al respecto, Lechuga-Devéze *et al.* (1986) mencionan que la turbiedad en la Laguna de La Paz en una escala diaria, se incrementa durante marea baja y en una escala anual se incrementa durante el periodo de mayor amplitud de marea. Durante el periodo donde se presentan las mareas de mayor y menor amplitud (octubre-febrero), aunado al rompimiento de la termoclina y al aumento de la velocidad de los vientos, el intercambio de agua entre la bahía y la ensenada se incrementa relativamente. Esto ocasiona que el sedimento puesto en suspensión permanezca más tiempo en la columna de agua, dando por resultado valores de turbiedad más elevados en esta época que durante primavera y verano. Por otra parte, Aguirre-Bahena (2002) menciona que al igual que los silicatos la laguna exporta MPS en todas las condiciones de marea, siendo esta exportación más importante en las mareas vivas e intermedias y en menor grado en las mareas muertas.

Por lo que respecta a la MOP en la laguna, Aguirre-Bahena (2002) considera a la laguna como generadora y exportadora de materia orgánica, la cual va de los sistemas de manglar hacia la laguna y de ésta hacia la bahía. Jiménez-Quiroz (1991) reportó en el canal de mareas de un estero de la laguna, una concentración promedio anual de 11.32 mg L^{-1} , mientras que Sánchez-Martínez (1997) reportó en el canal principal de mareas de la laguna una concentración promedio de 0.81 mg L^{-1} en la pleamar y 0.93 mg L^{-1} en la bajamar. En el presente trabajo se encontró un promedio de 0.97 mg L^{-1} en primavera y verano. Así se confirma que la Laguna de La Paz genera y exporta MOP hacia la bahía, pero esta representa un porcentaje menor de la MPS (12.24%) comparado con la bahía (17.61%) debido a la mayor influencia de material terrígeno.

Por otra parte, la mayor porción de la MOP en la zona eufótica es debido al fitoplancton (Millero, 1996). La determinación de los pigmentos de las algas proporciona una medida química del material de las plantas vivas en el agua, ya que la clorofila *a* es rápidamente degradada después de que las células de las plantas se mueren, y es común determinar a ésta como una medida de la biomasa del

fitoplancton. Desafortunadamente, la estimación es solo aproximada ya que el contenido de pigmentos de las algas marinas varía considerablemente dependiendo de las especies y su estado nutricional (Riley y Chester, 1989).

En la Bahía de La Paz los estudios sobre la dinámica espacio temporal de la clorofila *a*, al igual que las variables antes discutidas son escasos. Reyes-Salinas (1999) considera a este cuerpo de agua como una zona de elevada productividad fitoplanctónica, cuya variabilidad está en función de un efecto combinado de los principales factores que la determinan (baja productividad durante condiciones de un cielo despejado, vientos débiles, alta transparencia, concentraciones bajas de nutrientes, y densidades bajas de fitoplancton) con una fuerte contribución de la estratificación de la columna de agua. Por otra parte, Martínez-López *et al.* (2001) coinciden en mucho con lo ya descrito anteriormente, estos autores sugieren que un fuerte acoplamiento entre los regímenes climáticos (frío-cálido), vientos, la estructura vertical de la columna de agua y la abundancia de fitoplancton contribuyen en la dinámica productiva de la bahía, situación que se encuentra acorde al patrón general de las variaciones estacional observada para las zonas subtropicales.

En este trabajo se carece de datos de la época fría, sin embargo las tendencias siguen el mismo comportamiento que las reportadas por los autores antes mencionados. Los registros máximos de la concentración de clorofila *a* se presentaron en primavera (0.71 mg m^{-3}) y los mínimos en verano (0.51 mg m^{-3}), registros comparables a los presentados por Reyes-Salinas (1999) quien reporta la concentración máxima para finales de invierno (0.89 mg m^{-3}) y la mínima para verano (0.41 mg m^{-3}). Por su parte Hinojosa-Larios (2003) registró una concentración promedio de clorofila *a* de 1.9 mg m^{-3} para la porción sur de la Bahía de La Paz durante el invierno del 2002 (Figura 11).

Este comportamiento pudiera ser explicado si consideramos que, en primavera, el efecto de la mezcla de la columna de agua iniciada en la época fría por influencia de los vientos, incrementa el flujo de nutrientes en la zona eufótica promoviendo el crecimiento fitoplanctónico. Como se discutió en el apartado correspondiente a nutrientes, dichos elementos se integran a la superficie al romperse la nutriclina por efecto de mezcla, y de acuerdo a las concentraciones

registradas no son limitantes para el crecimiento del fitoplancton por encontrarse en concentraciones relativamente altas. En verano se presenta una fuerte estratificación en la columna de agua de la bahía, limitando el flujo de nutrientes (fosfatos) a la zona eufótica y consecuentemente la disminución de la producción fitoplanctónica. En este caso en particular, los silicatos para esta época se encontraron en su máxima concentración (situación ya explicada) no así los fosfatos donde presentaron la mínima concentración promedio en el año. Existe una relación positiva entre la clorofila *a* y los fosfatos ($r=0.64$), lo que sugiere que este nutriente de cierta forma influye en la abundancia del fitoplancton y por ende en la clorofila *a* para esta época del año. Lo anterior apoya lo descrito por Reyes-Salinas (1999) y Martínez-López (2001) en donde el régimen climático, la estructura vertical de la columna de agua y la concentración de nutrientes son los factores principales que controlan la producción primaria en la Bahía de La Paz.

Por su parte en la Laguna de La Paz, Reyes-Salinas (1999) la considera dentro de una de las más productivas en la región oeste del Golfo de California. Lechuga-Devéze *et al.* (1986) observaron dos máximos en la concentración de clorofila *a* en el año en el canal de comunicación con la bahía (invierno y verano), en el interior de la laguna y quizás por una mayor disponibilidad de nutrientes la concentración de clorofila *a* se mantiene constante y elevada a lo largo del año, observando aún máximos relativos en el mismo periodo que los observados en el canal de comunicación. En el presente trabajo se observó esa homogeneidad en la distribución temporal de la concentración promedio de la clorofila *a* en la laguna (2.13 mg m^{-3} en primavera y 2.48 mg m^{-3} en verano), siendo verano donde se registró el mayor intervalo, situación similar a la presentada por Aguirre-Bahena (2002). Por otra parte, Gilmartin y Revelante (1978) reportan un intervalo de la concentración de clorofila *a* de 0.2 a 19.9 mg m^{-3} para las lagunas del Golfo de California, por lo que se puede considerar a la Laguna de La Paz como un ambiente mesotrófico entre estos ambientes.

En el caso de la distribución espacial Lechuga-Devéze *et al.* (1986) y Aguirre-Bahena (2002) reportaron que la concentración de clorofila *a* se incrementa de la boca hacia el interior de la laguna al igual que la turbiedad. Comportamiento similar

fue detectado en este trabajo con las concentraciones máximas en la parte somera de la laguna tanto en primavera como en verano. Esta zona también presentó las máximas concentraciones de MPS. Anderson (1986) y Schuchardt y Schirmer (1991) sugieren que los valores máximos de clorofilas están asociados a la máxima turbiedad de las aguas.

Lechuga-Devéze *et al.* (1986) propusieron que la turbiedad es el principal factor limitante en la producción primaria en la Laguna de La Paz. Estos autores reportaron que, a pesar de la relativa baja concentración de clorofila *a* durante el verano, la producción primaria se mantuvo con valores prácticamente iguales a aquellos encontrados en invierno cuando los valores de las concentraciones de clorofila *a* fueron mayores junto con la turbiedad. Los valores de clorofila *a* fueron menores en verano y el aumento en la profundidad de la zona eufótica puede compensar la disminución de clorofila *a* y presentar valores elevados de producción semejantes a los encontrados en invierno.

7.2. Metales en la materia particulada suspendida

7.2.1. Aluminio

El contenido de Al en la MPS del agua superficial en la porción sur de la Bahía de La Paz presentó un gradiente horizontal que se incrementa del centro de la bahía hacia la costa, mostrando también variaciones temporales (Figura 12). La distribución del Al en el agua de mar en general presenta la característica típica de un elemento de remoción, su concentración es máxima cerca de las fuentes (ríos, partículas terrígenas, sedimentos) y disminuye con la distancia de las mismas, de igual forma decrece con la profundidad y aumenta en el fondo (Donat y Bruland, 1995).

En las estaciones de la zona NCB como en la CSEB, las concentraciones promedio mínimas se registraron en primavera y las máximas en invierno y verano. El patrón de distribución espacial y las concentraciones registradas durante los periodos de muestreo sugieren que las altas concentraciones encontradas en invierno y verano posiblemente son causa de los procesos locales, tales como la intensidad de los vientos, escurrimientos pluviales y el sistema de corrientes que

ocurre en la zona, los cuales contribuyen al aporte y resuspensión del material particulado.

El transporte de partículas atmosféricas es una importante fuente de Al en las aguas superficiales de los océanos (Burton y Stratham, 1990; Donat y Bruland, 1995; Chester, 2000). Se ha calculado un flujo de 910×10^{12} g año⁻¹ de Al a la superficie oceánica, de los cuales 480×10^{12} g año⁻¹ son depositados en las aguas superficiales del Pacífico Norte (Chester, 2000). En el presente trabajo no se determinó el flujo de metales por esta vía, pero dada las características áridas de la región el flujo de Al por partículas atmosféricas puede ser considerable. En invierno, localmente, los vientos llegan a alcanzar intensidades medias de 4 m s^{-1} y rachas hasta de 10 m s^{-1} (Robles Gil-Mester, 1998), intensidad suficiente para resuspender y transportar partículas terrígenas. De manera general se observó un incremento de Al en invierno.

Por otra parte se observó la resuspensión de sedimentos y por ende de Al particulado provocado por los vientos de invierno. En esta época la capa de mezcla en la Bahía de La Paz alcanza su mayor profundidad (Reyes-Salinas y Cervantes-Duarte, 1998), y debido a la escasa profundidad del área de estudio (<100 m) existe una resuspensión de sedimentos, principalmente en la CSEB, aunado al patrón de circulación forzada por los vientos del norte que provocan la existencia de una corriente intensa paralela a la costa occidental (Jiménez-Illescas *et al.*, 1997). Lo anterior se refleja en la concentración elevada de la MPS para esta zona (promedio de 1.18 mg L^{-1}) comparada con la zona NCB (promedio de 0.48 mg L^{-1}) donde las corrientes tienen una menor intensidad. Por ejemplo, en los sedimentos superficiales de la costa sur de la bahía en un transecto de Punta Prieta a la barrera arenosa El Mogote, Green-Ruiz (2000) registró una concentración promedio de Al de 6.5%, concentración similar de los datos obtenidos en la MPS en las estaciones ubicadas sobre esa zona en este trabajo (6.9%), lo que indica una resuspensión y advección del sedimento debido a la acción del viento y las corrientes.

El proceso de resuspensión del sedimento se manifiesta en mayor grado en la laguna. Específicamente en la ZSL, donde en invierno se registró una concentración promedio (14.12%) superior al contenido de Al en la corteza terrestre (8.23%, Taylor,

1964). Nava-Sánchez y Cruz-Orozco (1989) mencionan que los procesos de sedimentación dentro de la laguna son más evidentes en esta zona. Una de las causas de introducción de sedimento a la laguna son los escurrimientos torrenciales compuestos de una serie de arroyos que aportan una gran cantidad de material terrígeno en temporada de lluvias y ciclones (Rodríguez-Meza, 1998). Cabe destacar que en el otoño del 2001 se presentó en la región el huracán Juliet (uno de los más intensos de los últimos años en la región) y, durante su permanencia las lluvias provocaron grandes avenidas de material terrígeno, escurrimientos que desembocan principalmente en la parte somera de la laguna.

Chester (2000) menciona que la MPS de los escurrimientos continentales consiste de una variedad de componentes distribuidos a través de un espectro de tamaño de partículas. Estos componentes incluyen, minerales primarios de aluminosilicatos (feldespatos, anfíboles, micas) aluminosilicatos secundarios (minerales arcillosos), cuarzos, carbonatos, e hidróxidos de Al, Fe y Mn. Se ha reportado que el contenido promedio de Al en la MPS de los ríos es de 9.4% (Martin y Whitfield, 1983), y el comportamiento del Al disuelto en pequeños sistemas río-estuarios presentan una remoción de este elemento en bajas salinidades, vía floculación, adsorción sobre partículas de sedimentos suspendidos o precipitación con materiales silicios (Chester, 2000). Procesos similares podrían ocurrir en la ZSL durante los aportes pluviales, explicando posiblemente las altas concentraciones de Al en el invierno del 2002, ya que en primavera y verano las concentraciones promedio de Al se mantuvieron constantes (8.65 y 8.83% respectivamente), pero un poco mayor al promedio reportado por Kot *et al.* (1999) de 7.7% para los sedimentos superficiales de la laguna. Evidencia clara de que el pasado fenómeno meteorológico incrementó de manera notable el contenido de Al en los sedimentos de la laguna y a causa de la resuspensión producida por los vientos de invierno se observaron concentraciones altas de Al en la MPS de esta zona.

Así, de manera general, se observó el mismo comportamiento en todo el litoral sur de la bahía y sur-suroeste de la laguna. Por lo que se sugiere que el viento es uno de los factores que influyen en la distribución de Al particulado en combinación con las condiciones de marea y corrientes que influyen en la dinámica y distribución

de los sedimentos en la porción sur de la Bahía de La Paz. Rodríguez-Meza (1999) diferencia a estos procesos en dos tipos, los estacionales como la precipitación, y los continuos como las corrientes de marea y el oleaje. Posiblemente la variabilidad en los aportes de los escurrimientos y del viento contribuye incrementando la variabilidad espacial y temporal de este elemento, ya que se observaron variaciones en cada una de las épocas de muestreo.

7.2.2. Hierro

El contenido de Fe en la MPS de la porción sur de la Bahía de La Paz presentó diferencias estacionales y un patrón similar en su distribución espacial durante las tres épocas, el cual se caracteriza por seguir un gradiente muy definido que se incrementa desde la bahía hasta el interior de la laguna (zona NCB< CSEB< MM< zona NCL< ZSL) similar a la distribución espacial de la MPS (Figuras 9 y 13).

En la zona NCB como en la CSEB, al igual que el Al, las concentraciones promedio mínimas de Fe en la MPS se registraron durante la primavera y las máximas durante el invierno. En estas zonas se encontró una correlación significativa entre el Fe y Al durante el invierno y primavera ($r=0.75$ y 0.70 $p<0.05$) (Figuras 24a y b), lo cual sugiere una conducta geoquímica similar debido a una posible asociación del Fe con los minerales de aluminosilicatos y posiblemente los procesos que controlan la distribución del contenido de Al en la MPS influyan en la distribución del contenido de Fe en las partículas en suspensión. La resuspensión de sedimentos por efecto del viento puede ser el factor predominante.

Rodríguez-Castañeda (2001) registró una concentración promedio de Fe en sedimentos de la Bahía de La Paz de 1.8% y menciona que los principales puntos de acumulación fueron frente de los arroyos El Cajón y Rodríguez ($>3\%$), atribuyéndolo a la influencia de los aportes del material terrígeno de las formaciones circundantes y de los abanico-deltas de Punta Coyote y San Juan de La Costa. En el presente estudio, en la misma zona se encontró un promedio de 3.4% en la MPS del agua superficial, lo que sugiere una resuspensión de los sedimentos en invierno, situación que no ocurre en primavera y verano cuando la intensidad de los vientos es menor y se observa también la disminución de la concentración de Fe en la MPS de esta

zona. En general para la bahía el FE promedio del Fe en las estaciones de la zona NCB durante los tres muestreos se encontró por abajo de la unidad, mientras que en las estaciones de la CSEB fueron similares a la unidad (Tabla 12), los cuales se comparan favorablemente con el FE reportado por Rodríguez-Castañeda (2001) para los sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz (0.9).

Diversos trabajos han reportado concentraciones promedios relativamente bajas de Fe en los sedimentos de la Bahía (1.8%, Rodríguez-Castañeda, 2001) y de la Laguna de La Paz (~1 a 2%, Godínez-Orta *et al.* 1997; Shumilin *et al.* 1998; Méndez *et al.* 1998; Kot *et al.* 1999; Rodríguez-Meza, 1999) comparadas con el contenido promedio de la corteza terrestre (5.63%, Taylor, 1964), pero similares al contenido de Fe en la cuenca de drenaje de la Bahía y Laguna de La Paz (~2 a 2.5%, Shumilin *et al.* 1998; Kot *et al.* 1999; Rodríguez-Meza, 1999; Rodríguez-Castañeda, 2001). Lo que refleja que estos ambientes no muestran contribución antropogénica notoria y su contenido de Fe en los sedimentos es debido de la influencia continental.

El Fe en la MPS del agua de la laguna y en sus diferentes zonas presentaron concentraciones promedio similares o por arriba del contenido de Fe reportadas en los sedimentos. Las máximas concentraciones se presentaron en invierno, principalmente en la ZSL donde se registró un promedio de 9.4%. A pesar de la alta concentración encontrada la razón Fe/Al en esta zona (0.71, Tabla 16) mostró un comportamiento similar al de la corteza terrestre (0.68, Taylor, 1964) y, su FE es comparable con el reportado por Rodríguez-Meza (1999) para los sedimento de la Laguna de La Paz (1.0), lo que sugiere para esta zona en particular una influencia netamente terrígena para este elemento en la MPS.

Un caso especial se observó en la zona NCL en invierno, donde la razón promedio Fe/Al (3.62) y el FE (5.3) fue el mayor en el año y de todas las zonas. Chester y Murphy (1990) mencionan que los valores del FE cercanos a la unidad se consideran como un indicio de que un elemento tiene un origen principalmente continental, y valores >10 se consideran para indicar que una porción considerable del elemento tiene un origen no continental. En otras palabras, su concentración no es controlada por el aporte de las fuentes continentales. Estos elementos son

denominados enriquecidos o anómalos. Por su parte Salomons y Förstner (1984) hacen la misma consideración, solo que sugieren que los elementos enriquecidos o anómalos son los metales con valores del FE mayores a 4.

Rodríguez-Meza (1999) encontró una relación entre el Fe y la materia orgánica (MO) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz, específicamente en la porción norte de la laguna donde las concentraciones más altas de Fe en los sedimentos se relacionan al alto contenido de MO y a la presencia de sedimentos finos (limo-arcilla) en la depresión que ahí se ubica (~6 m). Posiblemente la alta razón Fe/Al y su FE en la MPS durante la resuspensión de los sedimentos en esta zona durante el invierno se deba a la asociación Fe:MO.

Tabla 16. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de la razón Fe/Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	0.4	0.15	0.29
Desv. Est.	0.44	0.17	0.19
Mínimo	0.04	<0.01	0.07
Máximo	1.19	0.46	0.55
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	0.99	0.62	0.46
Desv. Est.	0.81	0.24	0.26
Mínimo	0.36	0.47	0.10
Máximo	2.12	0.97	0.66
Zona norte y centro de la laguna			
Media	3.62	0.54	1.13
Desv. Est.	4.08	0.03	0.37
Mínimo	0.99	0.51	0.77
Máximo	8.32	0.58	1.5
Zona somera de la laguna			
Media	0.71	0.51	0.49
Desv. Est.	0.27	0.01	0.01
Mínimo	0.41	0.49	0.49
Máximo	0.92	0.51	0.50
Muelles y marinas			
Media	1.81	1.08	1.18
Desv. Est.	1.45	0.55	0.35
Mínimo	0.47	0.57	0.99
Máximo	3.18	1.86	1.71

Millward y Turner (1994) mencionan que el Fe tiene una gran tendencia para formar complejos con ligandos orgánicos naturales (sustancias húmicas) y este proceso es probablemente responsable de la elevada concentración de Fe disuelto en muchos estuarios y aguas costeras. Los altos niveles de remoción de Fe disuelto de las aguas de baja salinidad son el resultado de la desestabilización y subsiguiente floculación de los coloides Fe-húmicos cargados negativamente al encontrarse con cationes mayores en el agua de mar (Millward y Turner, 1994). Situación semejante posiblemente se presenta durante el verano en la Laguna de La Paz, cuando las aguas con menor salinidad proveniente de los escurrimientos locales se mezclan con las aguas hipersalinas de la laguna. Posteriormente estos precipitados son depositados en las partes profundas del cuerpo de agua donde se han registrado las concentraciones más altas de MO (Green-Ruiz y Larrinaga-Cunningham, 1986). En invierno, la intensidad de los vientos resuspende el sedimento rico en MO y de Fe en esta zona.

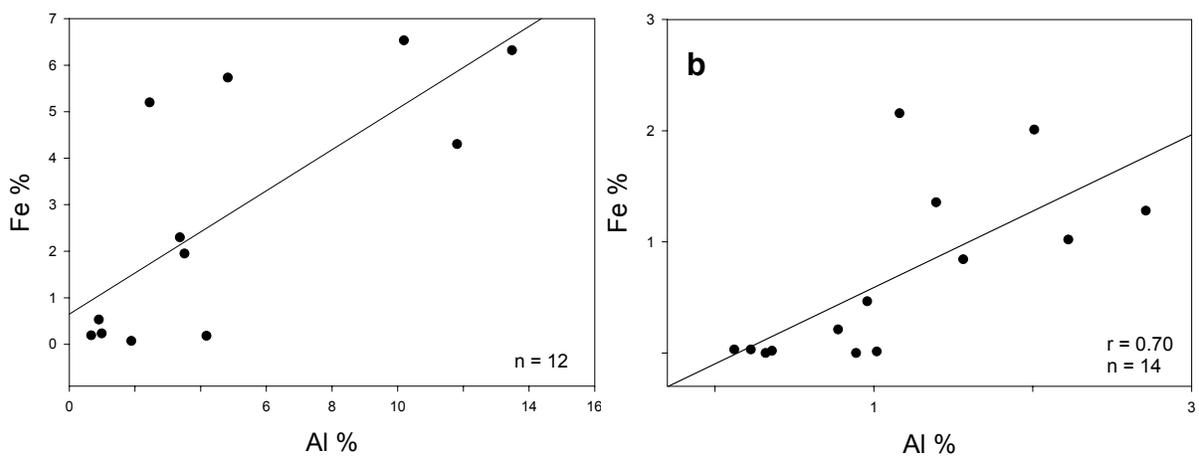


Figura 24. Relación Fe:Al en la MPS del agua superficial de la Bahía de La Paz durante invierno (a) y primavera (b) del 2002.

7.2.3. Manganeso

El contenido de Mn en la MPS presentó una distribución espacial bien definida con máximos en la zona costera y la parte norte del área de estudio (parte central de la bahía). Las concentraciones máximas se presentaron durante el verano, mientras que las mínimas en invierno en la mayoría de las zonas (Tabla 8 y Figura 14).

Las concentraciones de Mn en la MPS registradas en la zona NCB y en la CSEB fueron similares durante los tres muestreos (invierno<primavera<verano), con excepción del muestreo de invierno donde se presentó entre ambas zonas una diferencia en la concentración promedio de 0.75 mg g^{-1} . La correlación Mn y Al en ambas zonas para ésta época es de $r=0.82$ con $p<0.05$ (Figura 25a) lo que sugiere para invierno un origen terrígeno del Mn, posiblemente se deba a la influencia continental y a la cercanía con la Laguna de La Paz, aunado a los procesos de resuspensión de sedimentos por el viento y la corriente litoral.

A diferencia del Al y el Fe, el Mn durante los tres muestreos presentó concentraciones máximas en la MPS sobre la zona profunda del área de estudio. La razón Mn/Al de la MPS de las estaciones de la zona NCB es mayor (0.018 en invierno, 0.11 en primavera y 0.115 para verano) comparada con la corteza terrestre (0.011, Taylor, 1964) (Tabla 17). Las altas concentraciones registradas en la bahía durante primavera y verano pudieran estar influenciadas por otros procesos ya que no existe una correlación significativa con el Al como indicador de origen terrígeno.

Delgadillo-Hinojosa (2000), al estudiar la biogeoquímica del Mn en el Golfo de California, menciona que los procesos de advección de agua subsuperficial rica en Mn proveniente del Pacífico Nororiental afecta la distribución de éste en el Golfo de California y la disminución de la concentración de Mn disuelto con la profundidad, en combinación con los valores altos de la razón Mn/Al sugieren un enriquecimiento *in situ* de la fracción particulada de este elemento en el Golfo de California. Este autor reportó una razón Mn/Al promedio de 0.003 en partículas colectadas de aerosoles en las costas de Sonora, mientras que en la MPS colectada en trampas de deriva en la parte central de la porción sur del Golfo de California encontró una razón Mn/Al de 0.009 para invierno y de 0.016 en verano. El incremento en la razón Mn/Al en la MPS de invierno a verano encontrado por Delgadillo-Hinojosa (2000) en la región sur del

Golfo de California, aunque en menor proporción, coincide con el incremento registrado en la Bahía de La Paz. De igual forma se observa en el FE, ya que el valor promedio mínimo en la bahía se presentó durante invierno con 1.5 incrementándose tal valor hasta alcanzar ~10 para las épocas de primavera y verano (Tabla 13).

El FE promedio del Mn en la bahía es dos veces mayor a los reportados por Delgadillo-Hinojosa (2000) en la materia particulada colectado en trampas en la boca del Golfo de California, donde reporta un enriquecimiento de 2.8 en invierno y 5.1 en el verano. A pesar de la diferencia en los valores de enriquecimiento, se comparan favorablemente las variaciones estacionales y las diferencias posiblemente se deban a un mayor influencia continental en la porción sur de la Bahía de La Paz. Valores similares son reportados por Bruland *et al.* (1994), quienes encontraron que el Mn en la MPS del Pacífico Central presentó un FE de 10 con respecto al contenido de la corteza terrestre. Por su parte Kuss y Kremling (1999) estudiaron la composición en las partículas suspendidas en el Océano Atlántico y reportaron un FE de Mn de 4 a 7. Posiblemente el transporte eólico, la advección de agua subsuperficial rica en Mn que ocurre en verano y el enriquecimiento de las partículas vía remoción de Mn de la fase disuelta son los procesos que controlan la dinámica del Mn en la MPS del agua superficial de la Bahía de La Paz. La diferencia en las concentraciones reportadas en ambos trabajos pudiera ser debida a la influencia costera, en este caso la dinámica del Mn en la laguna.

Por otra parte, las concentraciones de Mn en la MPS registradas en las diferentes zonas de la laguna durante los tres muestreos fueron similares o por arriba de la concentración promedio de la corteza terrestre (0.95 mg g^{-1}) (Taylor, 1964) y mucho mayor a las registradas en los sedimentos de la misma y el contenido en sedimentos de los arroyos adyacentes (0.18 y 0.30 mg g^{-1} respectivamente) (Kot *et al.*, 1999). En general, las máximas concentraciones de Mn en la MPS de la laguna se presentaron en ZSL. A pesar de las altas concentraciones registradas (hasta 3.59 mg g^{-1} en verano) la razón Mn/Al es menor durante la primavera y verano (~0.025) comparada con el resto de las estaciones de la laguna, lo que sugiere una mayor influencia terrígena que en las otras zonas de la laguna.

Durante el verano en toda la laguna se presentaron las máximas concentraciones y posiblemente para esta época en gran parte se deba a los escurrimientos pluviales. Una de las principales rutas de aporte de Mn en la zona costera son los ríos. Gran parte del Mn disuelto suministrado por los ríos se encuentra en el estado Mn(II) el cual puede experimentar una conversión oxidativa y ser transformado en Mn(IV) (Mn particulado) cuando los variables físicas y químicas cambian en la mezcla de agua dulce y salina (Chester, 2000).

Particularmente en las estaciones de la zona NCL, durante el verano se presentó la mayor concentración de Mn (4.32 mg g^{-1}) y la razón Mn/Al es sumamente alta (0.22). Martin y Whitfield (1983) han reportado una concentración promedio de Mn en la MPS de los ríos de 1.05 mg g^{-1} , y la razón Mn/Al para estas partículas es similar al de la corteza terrestre (0.011). Esta última concentración y la razón Mn/Al se encuentran por abajo de los registrados en la MPS de la laguna en este trabajo, la cual presentó un FE de 18.8. Lo anterior sugiere que la dinámica del Mn se deba a condiciones de oxidación-reducción, llevadas a cabo en la columna de agua y en los sedimentos de la laguna. El enriquecimiento de Mn en la MPS posiblemente se debe a concentraciones altas de Mn disuelto, ya que generalmente el contenido de Mn en la MPS durante todo el año es alto y se incrementa durante el verano posiblemente por influencia de los escurrimientos en esta época.

La química del Mn es compleja, y el comportamiento en aguas estuarinas es fuertemente influenciado por la química redox del ambiente (Millward y Turner, 1994) y fácilmente experimenta reacciones entre la fase disuelta y particulada en respuesta a los cambios físicos y químicos del agua. Estas reacciones redox también continúan después de la depositación del Mn(IV) en los sedimentos. En muchos sedimentos estuarinos el Mn(IV) es reducido a Mn(II) durante la diagénesis, liberando así Mn(II) en el agua intersticial (Chester, 2000). Por lo que no es raro encontrar concentraciones bajas de Mn en los sedimentos y altos en la MPS en la zona costera.

La alta razón Mn/Al en la MPS de las estaciones de la zona NCL y la correlación promedio Mn:Al ($r=-0.85$ $p<0.05$) durante primavera y verano (Figura 25b) descartan un aporte de Mn particulado de origen terrígeno. Lo que sugiere un

enriquecimiento de Mn en la MPS a través de la oxidación en la columna de agua, posiblemente rica en Mn(II) proveniente del agua intersticial de la parte profunda de la laguna, que por el contenido alto de MO (Green-Ruiz y Larrinaga-Cunningham, 1986) presenta un ambiente reductor. Por ejemplo, Warnken *et al.* (2001) reportan en el agua intersticial de la Bahía de Galveston, Texas, un enriquecimiento de Mn de 50 a 5000.

Tabla 17. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de la razón Mn/Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	0.018	0.110	0.115
Desv. Est.	0.006	0.106	0.139
Mínimo	0.008	0.018	0.066
Máximo	0.025	0.315	0.396
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	0.022	0.026	0.033
Desv. Est.	0.009	0.006	0.020
Mínimo	0.010	0.018	0.008
Máximo	0.031	0.032	0.050
Zona norte y centro de la laguna			
Media	0.071	0.028	0.217
Desv. Est.	0.061	0.009	0.162
Mínimo	0.025	0.017	0.046
Máximo	0.141	0.038	0.380
Zona somera de la laguna			
Media	0.025	0.026	0.041
Desv. Est.	0.020	0.002	0.008
Mínimo	0.012	0.023	0.035
Máximo	0.048	0.027	0.050
Muelles y marinas			
Media	0.031	0.063	0.081
Desv. Est.	0.024	0.059	0.079
Mínimo	0.008	0.015	0.019
Máximo	0.055	0.140	0.188

Por otra parte Sundby *et al.* (1981) mencionan que el enriquecimiento del Mn en las partículas de los sedimentos ocurre principalmente en tamaños discretos de partículas (0.5 a 4.0 μm). Estas partículas son también encontradas en la columna de agua incluyendo las aguas superficiales y sugieren que pueden ser resuspendidas

por la dinámica de circulación del estuario, como consecuencia de su pequeño tamaño algunas escapan al océano abierto. En la Laguna de La Paz las corrientes de mareas pudieran jugar un papel importante en la movilización del Mn(II) del agua intersticial al resto de la columna de agua y en la resuspensión de partículas finas. No se descarta también como se mencionó arriba la entrada de Mn(II) vía escurrimientos ya que en verano se presentan las concentraciones más altas en toda la laguna.

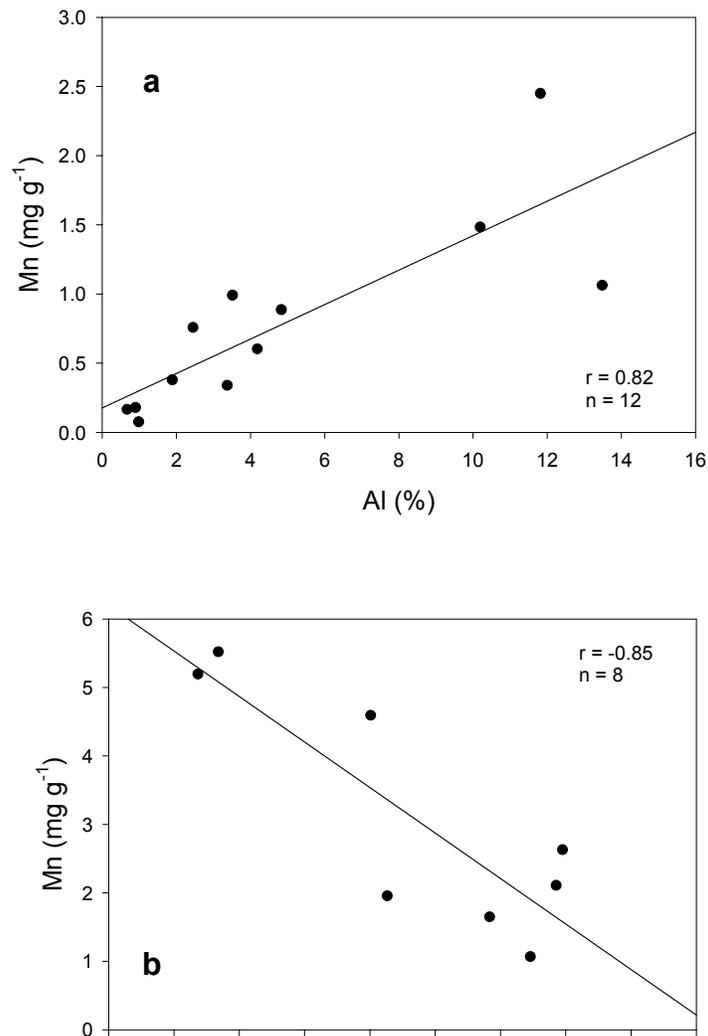


Figura 25. Relación Mn:Al en la MPS del agua superficial de la Bahía de La Paz durante invierno del 2002 (a). Relación Mn:Al en la MPS del agua superficial de la zona NCL durante primavera y verano del 2002 (b).

7.2.4. Cobre

El contenido de Cu en la MPS de la porción sur de la Bahía de La Paz presentó variaciones estacionales, su distribución espacial es muy heterogénea y mostró algunos puntos de alta concentración. En las estaciones de la zona NCB y la CSEB las concentraciones promedio del Cu en la MPS más altas se registraron en verano e invierno respectivamente. En ambas épocas en algunas estaciones se registraron concentraciones altas ($174.6 \mu\text{g g}^{-1}$ en verano y $92.5 \mu\text{g g}^{-1}$ en invierno) (Figura 15). Las altas concentraciones de Cu en la MPS no son raras, esto debido a su comportamiento biogeoquímico en el agua de mar.

El Cu es considerado como un elemento con distribución combinada, tipo nutriente y tipo remoción. Presenta una disminución en su concentración de la fase disuelta en las aguas superficiales (indicando una asociación con el fitoplancton) y se ve afectado por la remoción *in situ* por partículas (Chester, 2000). Por otra parte, la mayoría de la MPS en el océano, tales como minerales de arcillas, oxihidróxidos de metales y la MOP, poseen una pequeña carga negativa neta a pH del agua de mar. Por consiguiente, los cationes metálicos son electrostáticamente atraídos a sus superficies (Libes, 1992), por lo que los componentes de la materia MPS del agua de mar juegan un papel relevante en la biogeoquímica de este elemento. Se han registrado concentraciones altas de Cu en la MPS y en algunos de sus componentes en comparación con el contenido promedio en la corteza terrestre, por ejemplo, Bua y Chessleet (1978) reportaron una concentración promedio de Cu en la MPS del agua superficial del Atlántico Norte Tropical de $145 \mu\text{g g}^{-1}$ y Fowler (1977) reportó en pelotillas fecales una concentración promedio de $226 \mu\text{g g}^{-1}$. Concentraciones más bajas se han reportado para el fitoplancton y zooplancton de la Bahía de Monterrey, California en un intervalo de 1.3 a $45 \mu\text{g g}^{-1}$ y 4.4 a $23.0 \mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente (Martin y Whitfield, 1983)

En el presente trabajo se observó en la Bahía de La Paz una correlación entre la concentración promedio del Cu con algunos componentes de la MPS (clorofila *a*, MOP y MIP). Aunque no se cuenta con datos de MOP, MIP y clorofila *a* para el muestreo de invierno, los datos de primavera y verano mostraron una correlación significativa de Cu:clorofila *a* ($r=0.80$ $p<0.05$), Cu:MOP ($r=0.79$ $p<0.05$) y Cu:MIP

($r=0.89$ $p<0.05$) (Figura 26a, b y c), lo que sugiere que los procesos de remoción por parte del fitoplancton y las partículas terrígenas influyen principalmente en la distribución del Cu en la MPS del agua superficial de la zona de estudio.

Por su parte en la laguna, en las estaciones de la zona NCL, ZSL y MM, las concentraciones encontradas de Cu en la MPS estuvieron por arriba del contenido en los sedimentos registrados por Green-Ruiz (2000) ($9.1 \mu\text{g g}^{-1}$) y se encuentran un poco más cercanos a las concentraciones reportadas por Méndez *et al.* (1998) (intervalo de ~ 5 a $\sim 50 \mu\text{g g}^{-1}$). Las concentraciones más altas se registraron en invierno y se observaron altas concentraciones en la estación cercana al Estero Zacatecas (estación 5, $260.7 \mu\text{g g}^{-1}$) y en las marinas (estación 8, $180.7 \mu\text{g g}^{-1}$). Posteriormente en primavera y verano las concentraciones disminuyeron.

En general, para todo el año las concentraciones más altas y constantes de Cu se presentaron en las estaciones de las marinas con un FE alto (7.1 en invierno, 4.8 en primavera y 4.3 en verano). Posiblemente haya una influencia antropogénica, lo cual se refleja en la consistencia en sus concentraciones comparada con el resto de las estaciones. Pero, los registros altos encontrados en la bahía así como la razón Cu/Al (Tabla 18) no permite descartar la posibilidad de una contribución natural.

La razón Cu/Al del contenido promedio de la corteza terrestre dadas por Taylor (1964) es de 6.6×10^{-4} . En este trabajo, solo en la ZSL se encontró una razón similar durante los tres muestreos (4.4×10^{-4} a 7.3×10^{-4}), mientras que en el resto de las estaciones de la laguna y los MM las razones Cu/Al fueron mayores a 0.001 (Tabla 18), por lo que podemos deducir que, solo en la zona somera de la laguna existe una influencia terrígena, descartando tal influencia en el resto de las estaciones, y sugiriendo para éstas una posible remoción *in situ* por las partículas en suspensión. La relación Cu:clorofila *a* ($r=0.69$ $p<0.05$), Cu:MOP ($r=0.90$ $p<0.05$) y Cu:MIP ($r=0.97$ $p<0.05$) (Figura 26a', b' y c') en las estaciones de la zona NCL y MM durante la primavera y verano muestran la gran asociación del Cu con algunos componentes de la MPS. Lo anterior hace suponer un enriquecimiento de Cu disuelto, y los procesos de adsorción por los componentes de la MPS posiblemente enriquecen el Cu en la fase particulada.

Tabla 18. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de la razón Cu/Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	3.3×10^{-3}	9.1×10^{-3}	8.5×10^{-3}
Desv. Est.	3.5×10^{-3}	7.6×10^{-3}	1.7×10^{-2}
Mínimo	3.0×10^{-4}	1.2×10^{-3}	2.0×10^{-4}
Máximo	9.7×10^{-3}	2.2×10^{-2}	5.1×10^{-2}
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	1.0×10^{-3}	2.1×10^{-3}	1.1×10^{-3}
Desv. Est.	9.0×10^{-4}	1.1×10^{-3}	7.0×10^{-4}
Mínimo	4.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	3.1×10^{-4}
Máximo	2.3×10^{-3}	3.3×10^{-4}	1.8×10^{-3}
Zona norte y centro de la laguna			
Media	4.3×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.7×10^{-3}
Desv. Est.	3.1×10^{-3}	1.3×10^{-4}	1.2×10^{-3}
Mínimo	1.1×10^{-3}	8.8×10^{-4}	6.8×10^{-4}
Máximo	7.3×10^{-3}	1.1×10^{-3}	3.4×10^{-3}
Zona somera de la laguna			
Media	7.3×10^{-4}	4.4×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Desv. Est.	3.6×10^{-4}	4.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}
Mínimo	5.2×10^{-4}	3.9×10^{-4}	3.9×10^{-4}
Máximo	1.1×10^{-3}	4.6×10^{-4}	5.9×10^{-4}
Muelles y marinas			
Media	4.8×10^{-3}	3.2×10^{-3}	2.8×10^{-3}
Desv. Est.	7.8×10^{-3}	1.3×10^{-3}	2.0×10^{-3}
Mínimo	2.0×10^{-4}	1.4×10^{-3}	1.2×10^{-3}
Máximo	1.6×10^{-2}	4.3×10^{-3}	5.6×10^{-3}

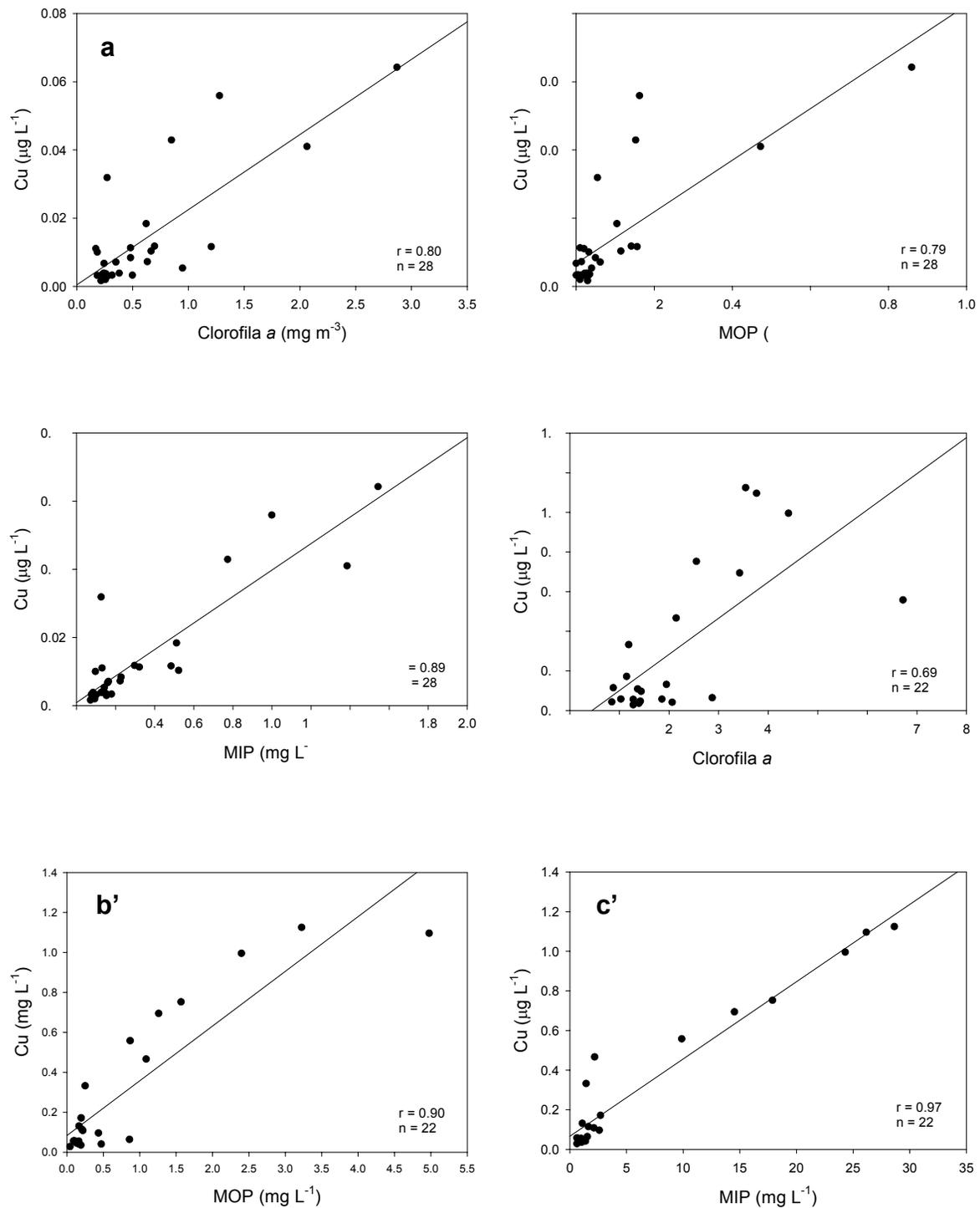


Figura 26. Relación Cu:clorofila a (a), Cu:MOP (b) y Cu:MIP (c) del agua superficial de la Bahía de La Paz. Relación Cu:clorofila a (a'), Cu:MOP (b') y Cu:MIP (c') del agua superficial de la Laguna de La Paz. Datos de primavera y verano del 2002.

7.2.5. Cadmio

El Cd en la MPS presentó un comportamiento inverso en su distribución espacial al resto de los metales, debido a que sus concentraciones más altas se registraron en la bahía (zona NCB) y decrecieron hacia la laguna (ZSL) hasta en ~120 veces menor del promedio durante el muestreo de invierno. Estacionalmente la concentración promedio máxima registrada de Cd en la MPS en la zona NCB fue de $31.93 \mu\text{g g}^{-1}$ durante el invierno y disminuyó a $8.70 \mu\text{g g}^{-1}$ en verano (Tabla 10). Para esta zona se observó una variación similar en la estacionalidad de la concentración del Cd en la MPS con la productividad primaria en la Bahía de La Paz reportada por Reyes-Salinas (1999). Este autor menciona que la máxima productividad primaria en la bahía se presenta en invierno y disminuye hacia el verano.

Por su parte, Delgadillo-Hinojosa (2000) menciona que las aguas superficiales del Golfo de California se encuentran enriquecidas con Cd, en su estudio encontró las concentraciones más altas de este elemento durante el invierno, siendo verano cuando se presentaron las mínimas concentraciones, además sugiere que la distribución del Cd está estrechamente relacionada con el ciclo de producción de la MOP. Estudios previos han reportado la influencia de las aguas del Golfo de California en la Bahía de La Paz (Jiménez-Illescas *et al.*, 1997; Reyes-Salinas, 1999), considerando las variaciones estacionales de la concentración Cd reportadas por Delgadillo-Hinojosa (2000) para el agua superficial del Golfo de California, así como la estacionalidad de la producción primaria en la Bahía de La Paz (Reyes-Salinas, 1999) indican una posible remoción del Cd, la cual es comparable con la variabilidad promedio de las concentraciones del Cd en la MPS de agua superficial de la bahía en este estudio.

El Cd es considerado como un elemento tipo nutriente, estos elementos están involucrados con los ciclos biológicos internos derivados de la materia particulada. Consecuentemente, sus concentraciones son disminuidas en las aguas superficiales por remoción directa del fitoplancton y/o adsorción sobre partículas biogénicas (Donat y Brulan, 1995). Por ejemplo dentro de los componentes biogénicos de la MPS del océano Collier y Edmond (1983) reportaron una concentración promedio en el "bulk" de plancton de $22.0 \mu\text{g g}^{-1}$ y Fowler (1977) encontró en pelotillas fecales una

concentración de $19.6 \mu\text{g g}^{-1}$, por lo que el contenido de Cd en la MPS del agua superficial en los mares productivos puede ser alto.

Por otra parte, el contenido de Cd en la MPS del agua superficial de la mayoría de las estaciones de la Laguna de La Paz fue mayor que el contenido promedio de la corteza terrestre reportada por Taylor (1964) ($0.2 \mu\text{g g}^{-1}$) y similares a las concentraciones reportadas por Álvarez-Arellano *et al.* (1995) para las formaciones fosfáticas del sur de la Península de Baja California, así como para los arroyos de la porción sur de la Bahía de La Paz reportadas por Shumilin *et al.* (2001) (promedio de $11.0 \mu\text{g g}^{-1}$). Esto es de esperarse, si consideramos, las características litológicas de la región. Al oeste de la Cuenca de La Paz se localiza la formación San Gregorio la cual contiene entre otras formas, areniscas conglomeráticas y capas de fosforita intercaladas (Álvarez-Arellano *et al.*, 1997). La fosforita es una roca sedimentaria de origen marino propiciada de mares antiguos con alta productividad (Álvarez-Arellano *et al.*, 1989). Entre muchos elementos que se acumulan en este tipo de roca se encuentra el Cd, el cual se ha encontrado en concentraciones de $15.0 \mu\text{g g}^{-1}$ en los yacimientos de San Juan de La Costa (Álvarez-Arellano *et al.*, 1995), de ahí que las concentraciones registradas puedan deberse al contenido natural en la corteza terrestre, específicamente en las estaciones cercanas a la costa y en la laguna, donde la influencia del material terrígeno en la MPS se incrementa.

EL Cd presentó los niveles de enriquecimiento más altos de los metales analizados. En invierno se presentó un gradiente abrupto con una diferencia hasta de 587 veces entre la bahía y la zona somera de la laguna. Si comparamos solo el componente terrígeno de la MPS, y tomando en cuenta las características litológicas de la región, que se caracteriza por presentar concentraciones superiores de Cd al contenido promedio de la corteza terrestre, resulta una disminución considerablemente hasta ~55 veces del FE. Esto si tomamos el promedio ($11.0 \mu\text{g g}^{-1}$) de los datos reportados de Cd por Álvarez-Arellano *et al.* (1995) y Shumilin *et al.* (2001). Por lo que se puede sugerir, que el contenido de Cd en la MPS de la porción sur de La Bahía de La Paz, a pesar de sus altas concentraciones puede deberse a las condiciones naturales.

Las concentraciones promedio más altas de Cd en la MPS durante los tres muestreos en la laguna se registraron en invierno, en las estaciones de la zona NCL y MM ($6.98 \mu\text{g g}^{-1}$ y $3.26 \mu\text{g g}^{-1}$ respectivamente), mientras que la mínima se encontró en la ZSL ($0.25 \mu\text{g g}^{-1}$), concentración similar a la reportada para el promedio de la corteza terrestre. Green-Ruiz (2000) registró un promedio de $3.5 \mu\text{g g}^{-1}$ para los sedimentos de la laguna con una razón Cd/Al de 5.0×10^{-5} , lo que sugiere una dilución del Cd de la MPS en la parte somera, mientras que en la zona más profunda posiblemente exista una remoción del Cd disuelto sobre las partículas suspendidas. Lo anterior podría ser explicado si comparamos la razón Cd/Al. En la zona somera se presentó una razón de 3.1×10^{-6} , mientras que en las estaciones de la laguna y los muelles y marinas la razón Cd/Al es mayor (3.7×10^{-4} y 1.1×10^{-4}) (Tabla 19). Chester (2000) menciona que el Fe es un elemento importante en los procesos geoquímicos en sistemas acuáticos, debido a que sus diferentes especies de óxidos e hidróxidos actúan como removedores de varios elementos traza. La correlación entre el Cd y Fe en las estaciones de MM durante los tres muestreos es alta ($r=0.9$ con $p<0.05$) y probablemente por esta vía se este enriqueciendo la MPS en esta zona (Figura 27).

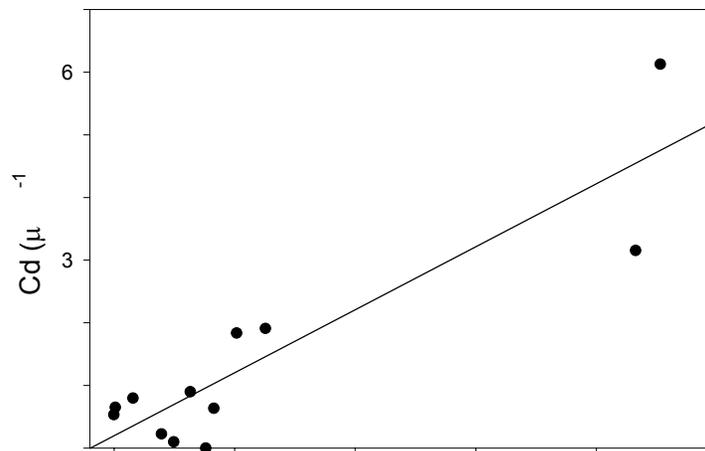


Figura 27. Relación Cd:Fe en la MPS del agua superficial de la zona denominada MM durante el 2002.

Tabla 19. Media aritmética, desviación estándar, mínimo y máximo de la razón Cd/Al en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz durante el 2002.

Zona norte y centro de la porción sur de la bahía			
Estadístico	Enero	Mayo	Septiembre
Media	1.7×10^{-3}	2.4×10^{-3}	8.8×10^{-4}
Desv. Est.	1.3×10^{-3}	1.9×10^{-3}	8.5×10^{-4}
Mínimo	1.0×10^{-4}	9.0×10^{-5}	1.1×10^{-4}
Máximo	3.3×10^{-3}	5.8×10^{-3}	2.4×10^{-3}
Costa sur y sureste de la bahía			
Media	2.4×10^{-4}	4.4×10^{-4}	1.7×10^{-4}
Desv. Est.	1.5×10^{-4}	3.6×10^{-4}	7.2×10^{-5}
Mínimo	8.0×10^{-5}	1.9×10^{-4}	1.0×10^{-4}
Máximo	4.1×10^{-4}	9.7×10^{-4}	2.7×10^{-4}
Zona norte y centro de la laguna			
Media	3.7×10^{-4}	3.6×10^{-5}	1.8×10^{-4}
Desv. Est.	3.5×10^{-4}	1.7×10^{-5}	1.4×10^{-4}
Mínimo	1.6×10^{-5}	1.5×10^{-5}	8.0×10^{-5}
Máximo	7.2×10^{-4}	5.5×10^{-5}	3.8×10^{-4}
Zona somera de la laguna			
Media	2.9×10^{-6}	1.6×10^{-5}	7.5×10^{-6}
Desv. Est.	3.1×10^{-6}	3.8×10^{-6}	2.2×10^{-6}
Mínimo	5.0×10^{-7}	1.3×10^{-5}	4.5×10^{-6}
Máximo	3.4×10^{-6}	2.0×10^{-5}	8.8×10^{-6}
Muelles y marinas			
Media	1.1×10^{-4}	3.3×10^{-5}	1.9×10^{-5}
Desv. Est.	8.0×10^{-5}	2.7×10^{-5}	2.0×10^{-5}
Mínimo	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
Máximo	1.9×10^{-4}	6.8×10^{-5}	1.5×10^{-5}

VIII. CONCLUSIONES

Las condiciones termohalinas del agua superficial en la porción sur de la Bahía de La Paz presentaron variaciones estacionales que responden a las condiciones climáticas locales como, la temperatura del ambiente y la evaporación.

Las concentraciones de fosfatos, silicatos y la MPS presentaron cambios estacionales y mostraron claras diferencias entre el ambiente lagunar y el marino. Las condiciones hidrodinámicas y la influencia continental influyen en la distribución espacial y temporal de estas variables en la porción sur de la Bahía de La Paz.

La resuspensión y el transporte del material particulado provocados por los vientos de invierno promueven el aporte de Al y Fe en el agua superficial de la Laguna y la zona costera de la Bahía de La Paz.

Posiblemente la advección de agua del Golfo de California y la remoción provocan el enriquecimiento de Mn y Cd en la MPS del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz.

Los eventos meteorológicos de gran escala como los huracanes a través de los escurrimientos aportan material terrígeno y cantidades significativas de metales como Al y Fe a la Laguna de La Paz.

La distribución espacial y la variación temporal del contenido de Al, Fe, Mn Cu y Cd en la MPS del agua superficial de la porción sur de La Bahía de La Paz están controladas principalmente por procesos naturales como, los vientos, escurrimientos pluviales y corrientes.

La porción sur de la Bahía de La Paz es un ambiente sin contribución antropogénica notoria y el contenido de metales en la MPS es debido a las características litológicas de la corteza continental y a la influencia de las aguas del Golfo de California.

IX. REFERENCIAS

- Aguirre-Bahena, F., 2002. Dinámica de los componentes de la materia particulada suspendida y otras variables hidrológicas en la Ensenada-Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, México. 147 pp.
- Álvarez-Arellano, A., 1989. La roca fosfórica en Baja California Sur. Origen, evolución y uso. *Geomet.* 157: 38-46.
- Álvarez-Arellano, A. y F. Páez-Osuna, 1995. Estudio geoquímico de siete muestras de las formaciones fosfáticas del sur de la Península de Baja California, México. *Geofísica Internacional.* 4: 411-416.
- Álvarez-Arellano, A., H. Rojas-Soriano., y J.J. Prieto-Mendoza., 1997. Geología de la Bahía de La Paz y áreas adyacentes. En: *La Bahía de La Paz, Investigación y Conservación.* Urbán, R.J. y M. Ramírez (Eds.). UABS-CICIMAR-SCRIPPS, La Paz, México. pp. 13-29.
- Álvarez-Borrego, S., J.A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, J.M. Acosta-Ruiz y R.A. Schwartzlose, 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas.* 5(2): 53-71.
- Álvarez-Borrego, S. and J.R. Lara-Lara, 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. En: *The Gulf and Peninsular Province of the Californias.* Dauphin, J.P. and Simoneit, B.R. (Eds.). AAPG Memoir. 47: 555-567.
- Anderson, G.F., 1986. Silica, diatoms and a freshwater productivity maximum in Atlantic coastal plain estuaries, Chesapeake Bay. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, 22:183-197.
- Aranda-Gómez J.J. y J.A. Pérez-Venzor, 1988. Estudio geológico de Punta Coyote, Baja California Sur. *Rev. Inst. Geol., UNAM.* 7: 1-21.
- Badán-Dangón, A., D.J. Koblinsky and T. Baumgartner, 1985. Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns. *Oceanol. Acta.* 8(1): 13-22.
- Banse, K., C.P. Falls and L.A. Hobson, 1963. A gravimetric method for determining suspended matter in sea water using Millipore filters. *Deep-Sea Res.* 10: 639-642.
- Bernal G., P. Ripa, J.C. Herguera, 2001. Variabilidad oceanográfica y climática en el Bajo Golfo de California: Influencia del Trópico y Pacífico Norte. *Ciencias Marinas.* 27(4): 595-617.

- Bruland, K.W., R.P. Franks, G.A. Knauer and J.H. Martin, 1979. Sampling and analytical methods for the determination of copper, cadmium, zinc, and nickel at the nanogram per liter level in seawater. *Analyt. Chim. Acta.* 105: 233-245.
- Bruland, K.W., 1983. Trace elements in sea-water. In: *Chemical Oceanography*. Riley, J.P and R. Chester (Eds.). Academic Press, London. 8: 157-220.
- Bruland, K.W., K.J. Orians and J.P. Cowen, 1994. Reactive trace metals in the stratified central North Pacific. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 58(15): 3171-3182.
- Buat M.P. and R. Chester, 1979. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metals chemistry of oceanic suspended matter. *Earth Planet. Sci. Lett.* 42: 399-411.
- Burton J.D. and P.J. Stratham, 1990. Trace metals en seawater. In: *Heavy Metals in the Marine Environment*. Furness R.W. and P.S. Rainbow (Eds.). CRC Press. Inc. Florida. pp. 5-25.
- Carranza-Edwards A., L. Rosales-Hoz, G. Villaseñor-Cabral, R. Lozano y Y. Hornelas-Orozco, 1986. Sulfuros metálicos submarinos de la Península de Baja California. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México.* 17(2): 287-298.
- Carreón-Martínez, L.B., M.A. Huerta-Díaz, C. Nava-López., and A. Siqueiros-Valencia, 2002. Levels of reactive mercury and silver in sediments from the Port of Ensenada, Baja California, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 68: 138-147.
- Castro-Castro, P.G., 1999. Flujo de metales en sedimentos en suspensión en el Delta del Río Colorado. Tesis de Maestría. FCM-UABC. Ensenada, México. 90 pp.
- Cervantes-Duarte, R. y H. Santoyo, 1986. Nota acerca del metabolismo de una laguna hiperhalina de Baja California Sur. *Inv. Mar. CICIMAR.* 3(1): 133-139.
- Cervantes-Duarte, R. y R. Guerrero-Godínez, 1988. Variación espacio-temporal de nutrientes de la Ensenada de La Paz, B.C.S., México. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México.* 15(2): 129-142.
- Cervantes-Duarte, R., S. Aguiñiga-García y R. Guerrero-Godínez, 1991. Variación estacional de temperatura, salinidad y nutrientes en la Ensenada de La Paz, B.C.S. (1986-1988). *Rev. Inv. Cient. UABCS,* 2(2): 56-64.
- Cervantes-Duarte R., F. Aguirre-Bahena, A. Reyes-Salinas y J.E. Valdez-Holguín 2001. Caracterización hidrológica de una laguna costera de Baja California Sur, México. *Oceánides.* 16(2): 93-105.

- Chester, R., 2000. *Marine Geochemistry*. Second Edition. Blackwell Science. Liverpool. 505 pp.
- CIBNOR, 2000. Observaciones meteorológicas en La Paz, B.C.S. Estación Meteorológica del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, México.
- Collier, R.W. and Edmond, J.M., 1983. Plankton composition and trace elements fluxes from the surface ocean. In: *Trace Elements in Sea Water*. Wong C.S., E. Boyle, K.W. Bruland, J.D. Burton and E.D. Goldberg (Eds.). Plenum: New York. pp. 789-809.
- CNA, 2002. Observaciones meteorológicas en La Paz, B.C.S. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Estatal de B.C.S., La Paz, México.
- Cruz-Orozco, R., P. Rojo-García, L. Godínez-Orta, y E. Nava-Sánchez, 1989. Topografía, hidrología y sedimentos de las márgenes de la Laguna de La Paz B.C.S. *Rev. Inv. Cient. UABCS* 1: 3-15.
- Cruz-Orozco, R., C. Martínez-Noriega y A. Mendoza-Maravillas, 1996. Batimetría y sedimentos de la Bahía de La Paz, B.C.S., México. *Océánides* 11(1): 21-27.
- Daesslé, L.W., J.D. Carriquiry, R. Navarro and J.A. Villaescusa-Celaya, 2000. Geochemistry of surficial sediments from Sebastián Vizcaíno Bay, Baja California. *Journal of Coast. Res.* 16(4): 1133-1145.
- Delgadillo-Hinojosa, F., 2000. Biogeoquímica del cadmio y manganeso en el Golfo de California. Tesis de Doctorado. FCM-UABC. Ensenada, México. 181 pp.
- Delgadillo-Hinojosa, F., J. Macías-Zamora, J. Segovia-Zavala, and S. Torres-Valdes, 2001. Cadmium enrichment in the Gulf of California. *Mar. Chem.* 75: 109-122.
- Donat, J.R., and K.W. Bruland, 1995. Trace elements in the oceans. In: *Trace Elements in Natural Water*. Salbu, B. and E. Steinnes (Eds.). CRS Press. Inc. Florida. pp. 247-283.
- Emery, W.J. and K. Hamilton, 1985. Atmospheric forcing of interannual variability in the Northeast Pacific Ocean: Connections with El Niño. *Geophys. Res.* 90(1): 857-868.
- Espinoza-Ávalos, J., 1977. Los principales parámetros físico-químicos de las aguas de la Ensenada de La Paz, B.C.S. Informe general de labores del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur. Resultados de las investigaciones 1977. La Paz, B.C.S. pp. 5-27.
- Fowler, S.W., 1977. Trace elements in zooplankton particulate products. *Nature*. 269: 51-3.

- García, E., 1973. Modificación al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. En: *Lagunas Costeras Mexicanas*. Contreras, F. (Ed.). Centro de Ecodesarrollo. Secretaría de Pesca. México. 253 pp.
- García-Pámanes, J., 1977. La distribución superficial de nitratos y silicatos en la Ensenada de La Paz, Baja California Sur. Informe General de Labores del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur. Resultados de las Investigaciones 1977. La Paz, BCS. pp. 28-46.
- Gilmartin M. and N. Revelante, 1978. The phytoplankton characteristics of the barrier island lagoons of the Gulf of California. *Est. Coast. Mar. Sci.* 7: 29-45.
- Godínez-Orta L., E. Shumilin, D. Sapozhnikov, D. Rodríguez-Meza, 1997. Características litológico-geoquímicas de los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz, B.C.S. *Actas INAGEQ*. 3: 225-233.
- González-Farías, F., M. Hernández-García, F. Flores-Verdugo y O. Calvario-Martínez, 1995. Distribución de la materia orgánica particulada y bacterias heterótrofas en aguas superficiales del Mar de Cortés. En: *Temas de Oceanografía Biológica en México II*. González-Farías F. y J. De La Rosa-Vélez (Eds.). UABC, Ensenada, México. 1995. pp. 87-110.
- Green-Ruiz C. y H. Larrinaga-Cunningham, 1986. Sedimentología y geoquímica de la Laguna de La Paz., B.C.S., México. Tesis de Licenciatura. UABCS. La Paz, México. 83 pp.
- Green-Ruiz C.R., 2000. Geoquímica de metales pesados y mineralogía de la fracción arcillosa de los sedimentos de cuatro puertos del Golfo de California. Tesis de Doctorado. ICMYL-UNAM. Mazatlán, México.
- Gutiérrez-Galindo, E.A., G. Flores-Muñoz, V. Ortega-Lara, y J.A. Villaescusa-Celaya, 1994. Metales pesados en sedimentos de la costa fronteriza Baja California (México)-California (EUA). *Ciencias Marinas*. 20(1): 105-124.
- Gutiérrez-Galindo, E.A., Villaescusa-Celaya J.A., Arreola-Chimal A., 1999. Bioacumulación de metales en mejillones de cuatro sitios selectos de la región costera de Baja California. *Ciencias Marinas*. 25(4): 557-578.
- Hausback, B.P., 1984. Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico. In: *Geology of the Baja California Peninsula*. V.A. Frizzell Jr. (Ed.). Pacific Science, SEPM. 39: 219-236.
- Hinojosa-Larios, J.A., 2003. Caracterización de los perfiles estacionales de clorofila *a* en La Bahía de La Paz (datos no publicados).
- INEGI, 2000. La Paz Baja California Sur. Cuaderno estadístico municipal. Edición 2000. La Paz, México. 187 pp.

- Jeffrey, S.W. and G.F. Humphrey, 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophyll a, b, c₁ and c₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physiol. Pflanzen*. 167: 191-194.
- Jiménez-Quiroz, M., 1991. Contribución al conocimiento de los productores primarios de la Ensenada de La Paz, análisis de la comunidad de manglar. Tesis de Maestría, CICIMAR-IPN. La Paz, México. 223 pp.
- Jiménez Illescas A.R., M. Obeso-Nieblas y D.A. Salas-de León, 1997. Oceanografía física de la Bahía de La Paz. B.C.S. En: *La Bahía de La Paz, Investigación y Conservación*. Urbán, R.J. y M. Ramírez (Eds.). UABS-CICIMAR-SCRIPPS. La Paz, México. pp. 31-41.
- Kennish, M.J., 1997. *Practical Handbook of Estuarine and Marine Pollution*. CRC Press Marine Science Series. Florida. 524 pp.
- Kot F.S., C. Green-Ruiz, F. Páez-Osuna, E. Shumilin, and D. Rodríguez M., 1999. Distribution of mercury in sediments from La Paz Lagoon, Peninsula of Baja California, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 63: 45-51.
- Kremling, K., 1983. Determination of trace metals. In: *Methods of Seawater Analysis*. Grasshoff, K., M. Ehrhardt, and K. Kremling (Eds.). Verlag Chemie, Weinheim. 419 pp.
- Kuss, J. y K. Kremling, 1999. Particulate trace element fluxes in the deep northeast Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.* 46: 149-169.
- Landing, W.M. y B.L. Lewis, 1991. Collection, processing, and analysis of marine particulate and colloidal material for transition metals. In: *Marine Particles: Analysis and Characterization*. American Geophysical Union. Geophysical Monograph 63: 263-272.
- Lechuga-Devéze, C.H., J. García-Pámanes y J.J. Bustillos-Guzmán, 1986. Condiciones ecológicas de una laguna costera de la costa oeste del Golfo de California. Turbiedad y clorofila a. *Ciencias Marinas*. 12(1): 19-31.
- Lechuga-Devéze, C.H., B. Ayala-Rocha, I. Garate-Lizarraga, 1989. Proteínas, carbohidratos y clorofila a de la materia orgánica particulada, en tres diferentes ambientes oceánicos: Mar de Portugal, Golfo de California y NM de Baja California Sur. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México*. 16(1): 147-156.
- Libes, S.M., 1992. *An Introduction to Marine Biogeochemistry*. John Wiley and Sons, Inc. New York. 734 pp.

- López-Cortés, D.J. C.H. Lechuga-Devéze y J.J. Bustillo-Guzmán, 1991. Influencia hidrodinámica de la materia orgánica particulada en la zona central del Golfo de California (otoño, 1987). *Rev. Lat-Amer. Microbiol.* 33: 305-312.
- Loring, D.H., 1991. Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments. *ICES J. Mar. Sci.* 48: 101-115.
- Martin J.M, M. Whitfield, 1983. The significance of the river input of chemical elements to the ocean. In: *Trace Elements in Sea Water*. Wong C.S., E. Boyle, K.W. Bruland, J.D. Burton and E.D. Goldberg (Eds.). Plenum: New York. pp. 226-296.
- Martin, J.M. and A.J. Thomas, 1994. The global insignificance of telluric input of dissolved trace metals (Cd, Cu, Ni and Zinc) to ocean margins. *Mar. Chem.* 46: 165-178.
- Martínez-López, A., R. Cervantes-Duarte, A. Reyes-Salinas y J.E. Valdez-Holguín, 2001. Cambio estacional de clorofila *a* en la Bahía de La Paz. B.C.S., México. *Hidrobiológica*. 11(19): 45-52.
- Méndez, L., B. Acosta, S.T. Álvarez-Castañeda y C.H. Lechuga-Devéze, 1998. Trace metals distribution along the Southern Coast of Bahía de La Paz (Gulf of California), México. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 61: 616-622.
- Millero, F.J., 1996. Chemical Oceanography. CRC Press, Marine Sciences Series. Florida. 469 pp.
- Millward E.G. and A. Turner, 1994. Trace metals in estuaries. In: *Trace Elements in Natural Water*. Salbu, B. and E. Steinnes (Eds.). CRS Press. Inc. Florida. pp. 223-245.
- Monreal-Gómez, M.A., A. Molina-Cruz and D.A. Salas-De León, 2001. Water masses and cyclonic circulation in Bay of La Paz, Gulf of California, During June 1998. *Mar. Syst.* 30: 305-315.
- Morales G.E. y H.R. Cabrera-Muro, 1982. Aplicación de un modelo numérico unidimensional a la Ensenada de La Paz, B.C.S. *Ciencias Marinas*. 8(2): 69-89.
- Nava-Sánchez E.H. y R. Cruz-Orozco, 1989. Origen y evolución geomorfológica de la Laguna de La Paz, Baja California, Sur, México. *Inv. Mar. CICIMAR*. 4(1): 49-58.
- Obeso-Nieblas, M., A.R. Jiménez-Illescas, y S. Troyo-Diéguez, 1993. Modelación hidrodinámica de la marea de la Ensenada de La Paz, B.C.S. *Inv. Mar. CICIMAR*. 8(1): 1-11.

- Páez-Osuna, F. y J.I. Osuna-López, 1989. Metales pesados en fragmentos de basalto de la Boca del Golfo de California. Nota científica. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México*. 16(1): 183-188.
- Páez-Osuna, F. and J.I. Osuna-López, 1990a. Heavy metals distribution in geochemical fractions of surface sediments from the lower Gulf of California. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México*. 17(2): 287-298.
- Páez-Osuna, F. y J.I. Osuna-López, 1990b. Aspectos genéticos de los sedimentos marinos de la Boca del Golfo de California evidenciado por la geoquímica de sus metales pesados. *Geofísica Internacional*. 29: 47-58.
- Páez-Osuna, F. y J.I. Osuna-López, 1992. Diagénesis temprana de metales pesados en sedimentos del Pacífico adyacente a la boca del Golfo de California. *Geofísica Internacional*. 31(3): 289-304.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press. New York. 173 pp.
- Peterson, R.E., 1977. A study of suspended particulate matter. Arctic Ocean and Northern Oregon Continental Shelf. PhD. Thesis. Oregon State University. 122 pp.
- Piper, D.Z., 1991. Geochemistry of the tertiary sedimentary phosphate deposit: Baja California Sur, Mexico. *Chem. Geol.* 92: 283-316.
- Rao, S.S., 1993. Particulate Matter and Aquatic Contaminants. Lewis Publishers. Florida. 216 pp.
- Reyes-Salinas A. y R. Cervantes-Duarte, 1998. Masa de agua de La Bahía de La Paz. Boletín No. 66. CICIMAR-IPN. 1 p.
- Reyes-Salinas, A., 1999. Factores que controlan la productividad primaria en la Bahía de La Paz, B.C.S, Tesis de Maestría, CICIMAR-IPN. La Paz, México 122 pp.
- Riley, J.P. y R. Chester., 1989. Química Marina. Primera ed. AGT Editor. México D.F. 459 pp.
- Reyes-Salinas A. y R. Cervantes-Duarte, R.M. Morales-Pérez, J.E. Valdez Holguín, 2003. Variabilidad de la productividad primaria y su relación con la estratificación vertical en la Bahía de La Paz, B.C.S. *Hidrobiología*. 13 (12): 103-110.
- Robles Gil-Mester, S.M.G., 1998. El clima en la ciudad de La Paz, Baja California Sur. Tesis de Maestría. FFL-UNAM. México, D.F. 233 pp.

- Rodríguez-Castañeda, A.P., 2001. Elementos mayores y traza en sedimentos y macroalgas de la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría, CICIMAR-IPN. La Paz, México. 179 pp.
- Rodríguez-Figueroa G., E. Shumilin, F. Páez-Osuna, E. Nava-Sánchez y D. Sapozhnikov, 1998. Ocurrencia de metales y metaloides en sedimentos superficiales de cuatro abanico-deltas de la costa oriental de Baja California Sur. *Actas INAGEQ*. 4: 43-50.
- Rodríguez-Meza, G.D., 1999. Elementos mayores y traza en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz, B.C.S, México. Tesis de Maestría, CICIMAR-IPN. La Paz, México. 163 pp.
- Salbu, B. and E. Steinnes, 1995. Trace Elements in Natural Water. CRS Press. Inc. Florida. 302 pp.
- Salinas-González, F., 2000. Mezcla turbulenta y transporte de masas en la Bahía y Ensenada de La Paz: Experimentación y modelación numérica. Tesis de Doctorado. CICIMAR-IPN. La Paz, México. 260 pp.
- Salomons, W. and U. Förstner, 1984. Metals in the Hydrocycle. Springer-Verlag. Germany. 349 pp.
- Sánchez-Martínez, M.A., 1997. Interacción de variables hidrodinámicas entre la Ensenada de La Paz y la Bahía de La Paz, B.C.S., México. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, México. 57 pp.
- Sandoval M.F and Gómez V.H., 1997. Tides and tidal currents in Ensenada de la Paz lagoon, Baja California Sur, México. *Geofísica Internacional*. 36 (1): 37-47.
- Schuchardt, B. and M. Schirmer, 1991. Phytoplankton maxim in the tidal freshwater reaches of two coastal plain estuaries. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 32: 187-106.
- Shumilin E., L. Godínez-Orta, R. Cruz-Orozco, D. Sapozhnikov, S. Solis-Nuñez y Y. Sapozhnikov, 1996. Características litólogo-geoquímicas de los sedimentos superficiales de Bahía Concepción, B.C.S. *Actas INAGEQ*. 2: 79-84.
- Shumilin E., C. Green-Ruíz, D. Sapozhnikov, D. Rodríguez-Meza y F. Páez-Osuna, 1998. Asociaciones geoquímicas y patrones de distribución espacial de metales y metaloides en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz, Baja California Sur. *Actas INAGEQ*. 4: 23-32.
- Shumilin E.N., G. Rodríguez-Figueroa, O. Morton-Bermea, E. Lounejeva-Baturina, E. Hernández and G. Rodríguez-Meza, 2000. Anomalous trace element composition of coastal sediments near the copper mining district of Santa Rosalía, Peninsula of Baja California, Mexico. *Bul. Envir. Contam. Toxicol.* 65: 261-268.

- Shumilin E., F. Páez-Osuna, C. Green-Ruiz; D. Sapozhnikov, G. Rodríguez-Meza and L. Godínez-Orta, 2001. Arsenic, antimony, selenium and other trace elements in sediments of the La Paz Lagoon, Peninsula of Baja California, Mexico. *Mar. Poll. Bull.* 42(3): 174-178.
- Shumilin E.N., J.D. Carriquiry, V.F. Camacho-Ibar, D. Sapozhnikov, S. Kalmykov, A. Sanchez, S. Aguiñiga-García, and Y.A. Sapozhnikov, 2002a. Spatial and vertical distributions of elements in sediments of the Colorado River delta and Upper Gulf of California. *Mar. Chem.* 79: 113-131.
- Shumilin E.N., M. Grageda-Muñoz, N. Silverberg, D. Sapozhnikov, 2002b. Observations on trace elements hypersaline geochemistry in surficial deposit of evaporation ponds of Exportadora de Sal, Guerrero Negro, Baja California Sur, Mexico. *Mar. Chem.* 79: 133-153.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons, 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. 2nd edition. Bulletin of the Fisheries Research Board of Ottawa, Canada. 310 pp.
- Suárez-Altamirano J.M., 2001. Dinámica hidrológica en el estero "El Conchalito", La Paz, B.C.S., México. Tesis de Licenciatura. UABCS, La Paz, México. 82 pp.
- Sundby, B., N. Silverberg and R. Chesselet, 1981. Pathways of manganese in open estuarine system. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 45, 293-307.
- Taylor, R.S., 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 28: 1273-1285.
- Torres-Orozco, E., 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría. CICESE, Ensenada, México. 80 pp.
- Torres-Valdez, S., 2000. Distribución espacial y variabilidad temporal de nutrientes en el Golfo de California. Tesis de Maestría. FCM-UABC, Ensenada, México. 62 pp.
- Turner A. and G.E. Millward, 2002. Suspended particles: Their role in estuarine biogeochemical cycles. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 55:587-883.
- Villaescusa-Celaya J.A., E.A. Gutiérrez-Galindo, G. Flores-Muñoz, 1997. Metales pesados en la fracción geoquímica de sedimentos de la región fronteriza de Baja California, México y California, EUA. *Ciencias Marinas.* 23(1): 43-70.
- Villanueva, S.A. y A.V. Botello, 1992. Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano: Una revisión. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 8: 47-61.

- Villanueva, S.A. and A.V. Botello, 1998. Metal pollution in coastal areas of Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 157: 53-94.
- Warren, L.A., and P. Zimmerman, 1993. Trace metals-suspended particulate mater associations in un fluvial system: Physical and chemical influences. In: *Particulate Matter and Aquatic Contaminants*. Rao, S.S. (Ed.). Lewis Publishers. Florida. pp. 127-157.
- Warnken K.W, A.G Gary, L.G. Lawrence and P.H. Santschi, 2001. Sediment-water exchange of Mn, Fe, Ni and Zn in Galveston Bay, Texas. *Mar. Chem.* 73: (3-4). 215-231.
- Whitfield, M. and D.R. Turner, 1987. The role of particles in regulating the composition of seawater. In: *Aquatic Surface Chemistry*. Stumm, W. (Ed). John Wiley and Sons, New York. 457 pp.
- Wong, C.S., E. Boyle, K.W. Bruland, J.D. Burton, and E.D. Goldberg, 1983. Trace Metals in Seawater. Plenum Press, New York.
- Zaytsev, O.V., F. Salinas-González and S. Troyo-Diéguez, 1998. Water dynamics and mixing studies in the coastal zone of the Gulf of California. Proceedings of Canadian Hydrographic Conference. pp. 267-276.
- Zeitzschel B., 1970. The quantity, composition and distribution of suspended particulate mater in the Gulf of California. *Mar. Biol.* 7: 305-318.