



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE
CIENCIAS MARINAS**

DEPARTAMENTO DE OCEANOLOGÍA

**ELEMENTOS MAYORES Y TRAZA EN LOS SEDIMENTOS
SUPERFICIALES DE LA LAGUNA DE LA PAZ, B. C. S., MÉXICO.**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

LIC. GUADALUPE DURGA RODRÍGUEZ MEZA

LA PAZ, BAJA CALIFORNIA SUR, MEXICO. JULIO DE 1999

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE
CIENCIAS MARINAS
BIBLIOTECA
I.P.N.
DONATIVO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	iv
GLOSARIO	v
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
I. 1. Antecedentes.....	4
I. 2. Objetivos.....	7
I. 3. Área de estudio.....	9
II. METODOLOGÍA	16
II. 1. Trabajo de campo.....	16
II. 2. Trabajo de laboratorio.....	16
II. 3. Trabajo de gabinete.....	19
III. RESULTADOS	21
III. 1. Distribución espacial de los componentes mayores en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	23
III. 1. 1. Calcio	25
III. 1. 2. Hierro.....	25
III. 1. 3. Potasio.....	28
III. 1. 4. Carbono orgánico	28
III. 1. 5. Carbonatos	29
III. 2. Distribución espacial de elementos traza en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	31
III. 2. 1. Antimonio.....	31
III. 2. 2. Arsénico.....	33
III. 2. 3. Bario	34
III. 2. 4. Bromo	35
III. 2. 5. Cesio.....	37
III. 2. 6. Cobalto	37
III. 2. 7. Cromo	39
III. 2. 8. Escandio	42

III. 2. 9. Estroncio.....	43
III. 2. 10. Hafnio	45
III. 2. 11. Mercurio.....	45
III. 2. 12. Níquel	48
III. 2. 13. Rubidio.....	49
III. 2. 14. Selenio.....	49
III. 2. 15. Tantalio	51
III. 2. 16. Torio.....	52
III. 2. 17. Uranio	52
III. 2. 18. Zinc.....	54
III. 2. 19. Zirconio	57
III. 3. Distribución espacial de los elementos de Tierras Raras (ETR) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	59
III. 3. 1. Elementos de tierras raras ligeras (ETRL).....	59
III. 3. 2. Elementos de tierras raras promedio (ETRM)	64
III. 3. 3. Elementos de tierras raras pesadas (ETRP)	65
III. 4. Análisis estadísticos.....	72
III. 4. 1. Componentes principales y análisis de factores para los componentes mayores y elementos traza en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	72
III. 4. 1. 1. Componentes mayores y elementos traza.....	72
III. 4. 1. 2. Elementos del grupo de las Tierras Raras.....	79
III. 4. 2. Asociaciones de componentes mayores y elementos traza en los sedimentos de la Laguna de La Paz	83
III. 4. 3. Factor de enriquecimiento (FE) de los elementos en los sedimentos de la Laguna de La Paz	93
III. 4. 4. Caracterización del comportamiento geoquímico de los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR) en los sedimentos de la Laguna de La Paz.....	104
III. 4. 4. 1. Anomalía de Eu.....	108
III. 4. 4. 2. Anomalía de Ce.....	110
III. 4. 4. 3. Patrón de distribución.....	112
III. 4. 4. 4. Distribución espacial	115
IV. DISCUSIÓN	118

ψ IV. 1. Factores que controlan la distribución de los elementos en los sedimentos de la Laguna de La Paz	118
IV. 1. 1. Transporte litoral y corrientes	118
IV. 1. 2. Precipitación pluvial.....	121
IV. 1. 3. Transporte eólico	123
IV. 1. 4. Corrientes de marea	125
IV. 2. Influencia continental y zonas de acumulación de los elementos en los sedimentos de la Laguna de La Paz	129
IV. 2. 1. Variabilidad espacial	131
IV. 2. 1. 1. Porción norte.....	131
IV. 2. 1. 2. Porción sur.....	132
IV. 2. 2. Zonas de acumulación de elementos	134
IV. 3. Calidad geoquímica de los sedimentos de la Laguna de La Paz.....	137
IV. 3. 1. Tipo de influencia	137
IV. 3. 1. 1. Actividad antropogénica	137
IV. 3. 1. 2. Aporte de material continental.....	139
IV. 3. 2. Concentración anómala de elementos	141
IV. 3. 2. 1. Arsénico	141
IV. 3. 2. 2. Antimonio (Sb) y Selenio (Se).....	143
IV. 3. 2. 3. Elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR).....	145
V. CONCLUSIONES..	148
VI. LITERATURA CITADA	150
ANEXOS	
Anexo I. Concentración de elementos mayores y traza en sedimentos de la Laguna de La Paz	I
Anexo II. Concentración de los elementos mayores y traza en sedimentos del Estero Zacatecas y en sedimentos continentales de la zona de arroyos	XIII
Anexo III. Matriz de correlación de las concentraciones de elementos mayores y traza de los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	XVII

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Laguna de La Paz	9
Figura 2. Geología de la cuenca adyacente a la Laguna de La Paz	11
Figura 3. Batimetría de la Laguna de La Paz	13
Figura 4. Distribución espacial de los tipos de sedimentos en la Laguna de La Paz.....	14
Figura 5. Estaciones de colecta de sedimentos superficiales en la Laguna de La Paz y sedimentos continentales adyacentes	17
Figura 6. Distribución de la concentración de Ca (a) y Fe (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	26
Figura 7. Distribución de la concentración de carbono orgánico (a) y carbonatos (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	30
Figura 8. Distribución de la concentración de Sb (a) y As (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	32
Figura 9. Distribución de la concentración de Ba (a) y Br (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	36
Figura 10. Distribución de la concentración de Cs (a) y Co (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	38
Figura 11. Distribución de la concentración de Cr (a) y Sc (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	41
Figura 12. Distribución de la concentración de Sr (a) y Hf (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	44
Figura 13. Distribución de la concentración de Hg (a) y Ni (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	47
Figura 14. Distribución de la concentración de Rb (a) y Se (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	50
Figura 15. Distribución de la concentración de Ta (a) y Th (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	53
Figura 16. Distribución de la concentración de U (a) y Zn (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	56
Figura 17. Distribución de la concentración de Zr (a) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	58
Figura 18. Distribución de la concentración de La (a) y Ce (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	60

Figura 19. Distribución de la concentración de Pr (a) y Nd (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	61
Figura 20. Distribución de la concentración de Sm en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	62
Figura 21. Distribución de la concentración de Eu en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	62
Figura 22. Distribución de la concentración de Gd (a) y Tb (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	66
Figura 23. Distribución de la concentración de Dy (a) y Ho (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	67
Figura 24. Distribución de la concentración de Er (a) y Tm (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	68
Figura 25. Distribución de la concentración de Yb (a) y Lu (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	69
Figura 26. Asociaciones de elementos mayores, traza, carbonatos y carbono orgánico por el análisis de factores para los sedimentos superficiales en la Laguna de La Paz	79
Figura 27. Componentes principales para los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR) de los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	82
Figura 28. Esquema de las zonas de acumulación de elementos mayores y elementos traza en los sedimentos de la Laguna de La Paz, tomando como referencia los subambientes propuestos por Green y Larrinaga (1986) (I. Canal, II. Depresiones norte y frente a Chametla, III. Descarga de aguas residuales, IV. Estero Zacatecas, V. Punta Comitán, VI. Depresión sur, VII. Palmira).....	90
Figura 29. Factor de enriquecimiento (FE) de los elementos mayores y traza en los sedimentos de la laguna, del Estero Zacatecas y sedimentos continentales	94
Figura 30. Distribución del factor de enriquecimiento (FE) para Se en los sedimentos lagunares y sedimentos continentales	98
Figura 31. Distribución del factor de enriquecimiento (FE) para Fe en los sedimentos lagunares y sedimentos continentales	101
Figura 32. Distribución de las zonas de enriquecimiento (ENR) y empobrecimiento (EMP) de los elementos mayores y traza de acuerdo al valor de FE en los sedimentos lagunares	103

Figura 33. Comportamiento de la normalización de las concentraciones de ETR con lutita, en los sedimentos lagunares, del Estero Zacatecas y sedimentos continentales	107
Figura 34. Normalización de los datos de concentración de ETR en la corteza continental (Taylor, 1964; Nance y Taylor 1977); sedimentos y nódulo del Océano Pacífico (Watkins <i>et al.</i> 1995), sedimentos de San Juan de la Costa (Piper, 1991) y la presente área de estudio.	113
Figura 35. Distribución espacial de los valores normalizados de Eu en los sedimentos lagunares	116
Figura 36. Factores que influyen en la distribución y acumulación de sedimentos en la Laguna de La Paz (I. corrientes litorales, II. aporte eólico de El Mogote, III. Influencia por el escarpe de erosión, IV. aporte y acumulación de partículas en la zona de manglar, V. patrón de circulación y corrientes de marea, VI. descarga por subcuencas de drenaje)	127
Figura 37. Localización de los tres tipos de componentes que caracterizan a los sedimentos de la Laguna de La Paz (Componente terrígeno (I), Componente biogénico (II), Componente fosfático (III))	136
Figura 38. Localización de las zonas con concentraciones anómalas de elementos, tanto en los sedimentos lagunares como continentales	146

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Contribución de los grupos mineralógicos en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz	15
Tabla II. Concentración de los elementos mayores y traza en los sedimentos de la Laguna de La Paz, del Estero Zacatecas y sedimentos continentales	21
Tabla III. Concentración promedio ($\mu\text{g/g}$) de los elementos de Tierras Raras Ligeras (ETRL) en los sedimentos y corteza continental de distintas áreas de estudio	63
Tabla IV. concentración promedio ($\mu\text{g/g}$) de los elementos de Tierras Raras Pesadas (ETRP) en los sedimentos y corteza continental de distintas áreas de estudio.....	71
Tabla V. Análisis de componentes principales para elementos mayores y traza, carbonatos y carbono orgánico en los sedimentos de la Laguna de La Paz	72
Tabla IV. Contribución de los caracteres para los 4 primeros componentes con Matriz Rotada Varimax (> 0.7) en el análisis de los elementos	73
Tabla V. Componentes principales para los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR) en los sedimentos	81
Tabla VI. Contribución de los caracteres en los dos componentes con Matriz Rotada Varimax, en el análisis de los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR)	81
Tabla VII. Coeficientes de correlación entre los elementos del grupo 1, que se registran en los sedimentos de distintas áreas de investigación	84
Tabla VIII. Coeficientes de correlación del Zn con los establecidos en los sedimentos marinos de distintas áreas de investigación en México	89
Tabla IX. Factores de enriquecimiento de los elementos mayores y traza en los sedimentos lagunares, del Estero Zacatecas y continentales	95
Tabla X. Valores normalizados de los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR) en los sedimentos de la Laguna de La Paz y la concentración en lutita norteamericana ($\mu\text{g/g}$)	105

GLOSARIO

- ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA.** Método que se basa en la medida de la radiactividad que ha sido inducida en las muestras por irradiación con neutrones. Una fuente radiactiva típica de neutrones es un elemento transuránico que experimenta fisión espontánea dando neutrones.
- ANOMALÍA GEOQUÍMICA.** Implica más que valores inusuales, altos (o bajos) del contenido de un elemento o elementos en la media, se relaciona a una serie de valores con variación de la condición normal.
- ARENISCA FOSFÁTICA*.** Roca sedimentaria clástica de grano medio que presenta colofana en un área menor al 50% de una sección delgada.
- CONTAMINACIÓN¹.** Es la presencia de concentraciones elevadas de sustancias en el agua, sedimentos u organismos, i.e. concentraciones que están cerca del nivel natural para el área y para el organismo.
- DEPÓSITOS EÓLICOS.** Se forman por el acarreo de arenas y polvos suspendidos en el viento y se acumulan en la superficie al caer o ser arrastrados.
- DIAGÉNESIS.** Cambios en la composición química de sedimentos después de su depositación. Los cambios son dirigidos por reacciones redox que son mediados por la descomposición de carbono orgánico, y algunos de los conceptos básicos relacionados en procesos redox sedimentarios.
- ELEMENTO NORMALIZADOR.** Es un elemento químicamente estable, cuyo comportamiento es de tipo conservativo además debe ser un elemento constituyente de aluminosilicatos de grano fino (arcilla).
- ELEMENTO TRAZA¹.** Término que se refiere a elementos que ocurren en muy bajos niveles en un sistema dado, o bien que acontecen en un nivel de unas pocas partes por millón o menos.
- EROSIÓN.** Conjunto de procesos por medio de los cuales se produce separación de los productos del intemperismo del sustrato original. Los agentes principales de la erosión son: el agua superficial (en manto, arroyos, ríos), el hielo, el viento, las aguas subterráneas, las olas marinas, organismos.
- FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO.** La calidad de los sedimentos es frecuentemente valorada utilizando técnicas de normalización geoquímica. Este factor relaciona la concentración de los metales estudiados y un metal conservativo (comúnmente usados: Al, Li, Cs, Fe, Rb, Sc, etc.) en el sedimento que se analiza con referencia a la misma relación de metales en la corteza terrestre.
- FORMACIÓN².** Es una agrupación de estratos de roca la cual está unificada con respecto a estratos adyacentes, por poseer rasgos litológicos únicos que le permitan ser registrados en un mapa, con límites definidos y una localidad tipo.
- FOSFORITA*.** Roca sedimentaria marina rica en P_2O_5 (pentóxido de fósforo), con colofana en que ésta cubre 50 o más por ciento del área de una sección delgada. Es de origen marino y representa una de las fuentes más importantes de fósforo para uso industrial y agrícola.

- GEOQUÍMICA**². El estudio de la distribución y cantidades de los elementos químicos en minerales, rocas, suelos, agua y la atmósfera, y el estudio de la circulación de los elementos en la naturaleza, sobre la base de las propiedades de sus átomos e iones.
- INTEMPERISMO**. Proceso de transformación y destrucción de los minerales y las rocas en la superficie de la Tierra, a poca profundidad, bajo la acción de agentes físicos, químicos y orgánicos.
- NORMALIZACIÓN**. Es la forma de compensar la variabilidad de elementos traza en sedimentos de algunas contribuciones de metal antropogénico, y que son detectados y cuantificados.
- NORMALIZACIÓN GEOQUÍMICA**. Procedimiento que relaciona la normalización matemática de las concentraciones de metales traza por las concentraciones de componentes naturales en el ambiente. Al, Fe, Sc y Cs son usados para reducir el efecto natural de tamaño de grano sobre las distribuciones de elementos traza, identificación de transportadores naturales y para estimar la extensión de la contaminación.
- OOIDEO FOSFÁTICO***. Tipo de masa fosfática. Clasto de colofana, formado en una o más etapas por acreción en un ambiente marino y somero, generalmente esferoidal o elipsoidal y un diámetro menor de 2 mm, que en su interior, en sección delgada, presenta un córtex compuesto por una o más láminas concéntricas alrededor de un núcleo.
- POLUCIÓN**¹. Es la introducción por el hombre, directa o indirectamente, de sustancias o energía al medioambiente marino resultando en efectos de deterioro, como son: daño a recursos vivos; riesgos a la salud humana; obstáculos de actividades marinas, incluyendo pesquerías; deterioro de la calidad para el uso de agua marina; y reducción de atractivos.
- SEDIMENTACIÓN**³. Es la interacción de la atmósfera y la hidrosfera sobre la corteza terrestre. Cualquiera de los tipos de acumulación en condiciones naturales, que se produce cuando detritos en movimiento pasan al estado de reposo.
- SEDIMENTOS TERRÍGENOS**². Son esencialmente productos sólidos de la denudación en tierra firme (detritus de roca, granos minerales y partículas arcillosas) llevados a una cuenca por diversos agentes de transporte (ríos, viento, etc).

Tomado de: * Machorro (1991), ¹ Manahan (1993), ² Cruz-Marín (1997), ³ Mason (1960).

RESUMEN

Muestras de sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz y suelos de los arroyos adyacentes a la cuenca de drenaje fueron tomados en 1996, con el objeto de realizar la caracterización geoquímica del ambiente. Componentes mayores (Ca, Fe, K, carbonatos) y elementos traza (As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Gd, Hf, Hg, Ho, La, Lu, Nd, Ni, Pr, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, Yb, Zn y Zr) se determinaron usando técnicas analíticas estándar para el análisis de carbonatos y carbono orgánico, y análisis de activación neutrónica instrumental para el resto de los elementos. Los resultados obtenidos demuestran que las concentraciones mayores y traza son similares o bajas que la composición promedio de la corteza continental, con excepción de As, Sb y Se, cuyos contenidos fueron más altos. Los valores del factor de enriquecimiento (FE) de estos tres elementos son también altos ($FE > 17$). Estos enriquecimientos de los sedimentos de la Laguna de La Paz de As, Sb y Se son atribuidos a la influencia de material terrígeno (y transporte eólico) desde la cuenca de drenaje, compuesto parcialmente por rocas volcánicas y volcanosedimentarias rocas en minerales pesados y fosfáticos. Los patrones observados de las distribuciones espaciales de los elementos en sedimentos, así como los resultados del análisis de correlación, análisis de factores y de grupos, permiten distinguir la existencia de tres asociaciones principales de elementos. El primer grupo incluye Fe, Co, Cr, Cs, Hg, Sc, Th y carbono orgánico que son considerablemente enriquecidos en el material sedimentario de dos depresiones, constituidas por sedimentos finos y probablemente controlados por el material terrígeno que entra de la cuenca de drenaje y la acumulación de las partículas grano-fino. El segundo grupo se compone de Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm, Yb, As, Se, Sb que son mucho más abundantes en los sedimentos gruesos de la parte norte de la Laguna de La Paz, solamente dado a la entrada natural de rocas volcánicas y sedimentarias erosionadas de la subprovincia geológica Sierra La Giganta adyacente. El tercer grupo es representado por Ca y Sr que son controlados por la depositación intensiva de carbonatos biogénicos marinos cerca del Estero Zacatecas y la Marina Palmira. La localización de los sitios de la acumulación de elementos indica la presencia de siete sub-ambientes específicos con diferente composición de los sedimentos: a) Estero Zacatecas, b) depresión norte, c) Punta Comitán, d) depresión sur, e) Chametla, f) la antigua zona de descarga de aguas residuales y g) Palmira. No se encontró contaminación antropogénica por los elementos traza As, Sb, Se, Cr, Fe, Ni y Zn en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz, indicando solamente la influencia terrígena

natural de la cuenca de drenaje adyacente y al abastecimiento de materiales biogénicos marinos desde la Bahía de La Paz por corrientes de marea.

ABSTRACT

Surface sediment samples of the La Paz Lagoon and soils of the arroyos of the adjacent drainage basin were taken in 1996 with the objective to realize the geochemical characterization of environment. Major components (carbonates, K, Ca, Fe) and trace elements (As, Ba, Br, Co, Cr, Cs, Hf, Hg, Ni, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Ta, Th, U, Zn, Zr, Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm y Yb) were determined there using standard analytical techniques for the analysis of carbonates and organic carbon, and instrumental neutron activation analysis for the rest of elements. The obtained results demonstrated that major and trace elements concentrations are similar or lower than the average composition of the continental crust, with exception of As, Sb and Se, whose contents were much larger. Enrichment factor values (EF) of these three elements is also very high of (EF > 17). These enrichments of sediments of the La Paz lagoon of As, Se and Sb are attributed to the influence of the terrigenous input (ephemeral water streams after heavy rain and also transport) from the drainage basin, composed partially by volcanic and volcanosedimentary rocks rich in heavy and phosphatic minerals. The observed patterns of spatial distributions of elements in sediments, as well as results of correlation analysis, factor and group analyses, allow to distinguish the existence of three principal associations of elements. First group includes Fe, Sc, Co, Cr, Cs, Hg, Th and organic carbon which are considerably enriched in sedimentary material of two depressions, constituted by fine sediments and probably controlled by the terrigenous input from the drainage basin and accumulation of fine-grained particles in deep, sites. Second group is composed of by Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm Yb, As, Se, Sb which are much more abundant in coarse sediments of the northern part of the La Paz Lagoon, mainly due to natural inputs of eroded volcanic and sedimentary rocks of the adjacent geological sub-province Sierra de La Giganta. Third group is represented by Ca and Sr being controlled by the intensive deposition of marine biogenic carbonates near Estero Zacatecas and Marina Palmira. The position of the sites of the accumulation of elements indicates the presence of seven specific sub-environments with different composition of sediments: a) Estero Zacatecas; b) northern depression; c) Punta Comitán; d) southern depression; e) Chametla; f) waste water discharge zone; g) Palmira. No major anthropogenic contamination by the trace elements As, Sb, Se, Cr, Fe, Ni and Zn was found in surficial sediments of the La Paz Lagoon, indicating only natural terrigenous influences of the adjacent drainage basin and a supply of marine biogenic materials from the La Paz Bay by tidal currents.

I. INTRODUCCIÓN

Las lagunas costeras son ambientes semicerrados separados del mar por islas o barreras arenosas, por lo que son zonas de transición entre el mar y el continente (Drude De Lacerda, 1994). Estos cuerpos de agua de importancia ecológica se caracterizan por ser zonas de alta productividad causadas por aportes de cantidades grandes de nutrientes al mar desde las cuencas de drenaje adyacentes (Jiménez-Quiroz, 1991) y por proveer terrenos para los huevecillos y criaderos de especies migratorias.

La presencia de diversas especies comerciales en los cuerpos lagunares protegidos propicia el aprovechamiento de estos recursos y un incremento en asentamientos humanos. Esta situación ocasiona diversificación de usos del entorno y cambios o alteraciones en el ecosistema que conllevan la disminución de la diversidad biológica, mermas en existencias de especies comerciales, eutrofización, además de variaciones en las características geoquímicas del ambiente, debido a la contaminación antropogénica.

El enfoque geoquímico para los ambientes marinos costeros, es de gran interés en los últimos años debido a los cambios que producen los asentamiento humanos y la actividad industrial porque son ambientes de deposito donde se afecta las propiedades ambientales y fisicoquímicas de los contaminantes, alteran su biodisponibilidad y su riesgo ambiental. Entre los aspectos de interés están la obtención de las concentraciones naturales (Taylor, 1964; De Baar *et al.*, 1985; Ross y McLennan, 1985) y anómalas de los elementos traza (Bryan y Langston, 1992; Tkalin *et al.*, 1996); la identificación de las fuentes de aporte (Förstner, 1980; Drude De Lacerda, 1994); las zonas de su acumulación y tipos de distribución (espaciales y verticales de los elementos) (Herut *et al.*, 1993; Shumilin *et al.*, 1998); la variación temporal de la concentración en los sedimentos (Holmes, 1986; Morrisey *et al.*, 1994); entre otros que contribuyen en la descripción del área.

La presencia de elementos traza en los ambientes marinos se debe principalmente a causas naturales, que suceden por transporte de material continental suspendido y disuelto, ya sea por la precipitación fluvial, la descarga de los ríos (cuencas de drenaje) o vía atmosférica, así como la actividad antropogénica. Esto hace destacar a las lagunas costeras por ser áreas de depositación de los elementos con la composición de las partículas introducidas de la tierra o del lado marino, por su carácter somero y por ser un cuerpo de agua protegido.

El material continental de la Península de Baja California se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas y sedimentarias (fosforita). La presencia de fosforitas se registran en la porción norte de en la Formación Monterrey (o F. San Gregorio) (McArthur y Walsh, 1984; Piper, 1994), en la mina de San Juan de la Costa (Piper, 1991) y en los sedimentos lagunares de Bahía Magdalena (Álvarez-Arellano, 1995); de estas solamente el material de San Juan de la Costa puede contribuir en la acumulación y en la concentración de elementos traza en los sedimentos superficiales de la laguna de La Paz. Ambos materiales contribuyen en la caracterización geoquímica de la zona, sin embargo la contribución de las rocas fosfatadas para la Laguna de La Paz es importante tomar en cuenta debido a la diversidad de elementos traza que lo integran y por la concentración en que se llegan a estimar, como se reporta en las costas de Río Negro (Argentina) (Román *et al.*, 1995), Namibia y sur de Africa (Watkins *et al.*, 1995), India (McArthur y Walsh, 1984) y de Estados Unidos (Windom, 1989; Piper, 1994).

Esta particularidad en la fosforita se atribuye al contenido elevado de material orgánico, a la razón alta de área superficial/masa y a los minerales asociados (McArthur y Walsh, 1984; Piper, 1994; Watkins *et al.*, 1995). Por otro lado, algunos de los elementos que se acumulan en este tipo de rocas son As, Cd, Cu, Cr, Mn, Ni, Ti, U, V, Zn y los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR) (Galli-Olivier, 1993; Álvarez-Arellano 1989, 1995).

*El aporte y acumulación de la fosforita en los sedimentos de la Laguna de La Paz, probablemente sucede a través del transporte por corrientes de marea, oleaje, viento,

descarga por arroyos y a causa del patrón de circulación de masas de agua, que se producen en la región y en la Bahía de La Paz. La relación de estos factores, probablemente es lo que permiten que el material continental llegue a depositarse en las zonas aledañas.

I. 1. ANTECEDENTES

Los trabajos geoquímicos relacionados con la caracterización de las condiciones naturales de áreas y de aquellas zonas afectadas por algún impacto humano se reportan para diferentes partes del mundo, incluyendo México, como señalan Villanueva y Botello (1998). En las zonas templadas de los países en desarrollo, se han realizado numerosos trabajos sumamente importantes que permiten conocer los patrones de distribución espacial de elementos mayores y traza en los sedimentos costeros, la influencia de las condiciones oceanográficas, zonas de acumulación, asociaciones geoquímicas de los elementos en los sedimentos y la caracterización de la contribución de las fuentes de aporte natural (Taylor, 1964; De Baar *et al.*, 1985; Ross y McLennan, 1985) y antropogénico (Bryan y Langston, 1992; Tkalin *et al.*, 1996). Algunos de estos trabajos corresponden a la parte norte del país, como en Mexicali (Gutiérrez *et al.*, 1990), la zona fronteriza entre Baja California y California (Ortega, 1991; Gutiérrez *et al.*, 1994), Bahía Vizcaino (Daesslé-Heuser, 1993), Bahía de Todos Santos (Pamplona *et al.*, 1992; Romero, 1995) y Bahía San Quintín (Martínez-Magaña, 1995).

Entre los trabajos realizados en ambientes tropicales del Pacífico Oriental, destacan el trabajo de Osuna-López (1981), quien observa la geoquímica de algunos oligoelementos en aguas hipersalinas y sedimentos de la Bahía de Ceuta (Sinaloa), Green-Ruíz (1996) y Green-Ruíz y Páez-Osuna (1997) sobre la geoquímica de los sedimentos de la laguna costera subtropical Altata-Ensenada del Pabellón (Sinaloa).

Por otro lado, para la parte abierta (pelágica) del Pacífico mexicano y del Golfo de California, destaca el trabajo de Goldberg y Arrhenius (1958), referente a la química de los sedimentos pelágicos del Pacífico; de Goldberg *et al.* (1963), sobre las distribuciones de elementos del grupo de las Tierras Raras en ambiente marino; de McArthur y Walsh (1984), concerniente a la geoquímica de las Tierras Raras de fosforitas; de Graybeal y Ross (1984),

sobre la removilización de metales de transición en sedimentos superficiales pelágicos; de Glasby *et al.* (1987), sobre la distribución de elementos del grupo de Tierras Raras y elementos menores en nódulos de manganeso y sedimentos; Ortega-Osorio (1988), con el estudio geoquímico metalúrgico de depósitos hidrotermales de las regiones dorsal del Pacífico mexicano (21° N) y cuenca de Guaymas; Páez-Osuna y Osuna-López (1990), sobre aspectos genéticos de los sedimentos marinos en el Golfo de California.

En la Laguna de La Paz hasta la fecha solo se han aclarado aspectos lejanos a la geoquímica; como ha sido la evaluación de la contaminación bacterial, que reportaron Gómez (1978) y Trejo y Mayoral (1984), donde se señaló que la descarga de aguas residuales al ambiente lagunar no representaron una fuente importante de elementos traza, pero si de organismos patógenos (bacterias coliformes) debido a las concentraciones altas en almejas, resultado que se asocio a la capacidad de filtración y de acumulación de partículas orgánicas e inorgánicas. Además que la distribución de estos organismos patógenos en los sedimentos del cuerpo lagunar fue influenciada por la dinámica de las corrientes, vientos y mareas. Por otra parte, Pérez *et al.* (1993) obtienen contenidos de Pb (0.04-6.7 ug Pb/g) en peso seco de *Chione californiensis* que están por arriba de la norma oficial de la salud (1 ug Pb/g).

Jiménez-Quiroz (1991) señala varias zonas de manglar de la Laguna de La Paz que contribuyen a la estabilización de los sedimentos y a la diversidad biológica de esta área. Por otro lado, ya se ha caracterizado la geología de la Península de Baja California; la geoquímica de la fosforita que se explota de la Formación San Gregorio en San Juan de la Costa y su influencia en algunos depósitos sedimentarios, como en la barrera arenosa El Mogote (Fonseca-Rivera, 1991; Machorro, 1991; Pimentel-Hernández *et al.*, 1991; Piper, 1991; Gallivier, 1993).

El origen, topografía, sedimentología y algunos aspectos geoquímicos (minerales pesados, contenido de fósforo, carbono orgánico y carbonatos) de la Laguna de La Paz se

discuten por Green-Ruíz y Larrinaga-Cunningham (1986), Osuna (1986), Cruz-Orozco *et al.* (1989), Nava-Sánchez y Cruz-Orozco (1989) y Mendoza-Maravillas (1990), quienes indican que el aporte litoral del oeste de la Bahía de La Paz contribuye considerablemente a la formación y crecimiento de la barrera arenosa El Mogote, además de sus características mineralógicas por la depositación de masas fosfáticas.

La descripción de las condiciones hidrodinámicas de la Laguna de La Paz se da por Jiménez-Illescas (1983), Gómez *et al.* (1984), Obeso-Nieblas (1986) y Jiménez-Illescas *et al.* (1997). En estos trabajos se señala la influencia del flujo de agua que proviene de la parte oeste de la Bahía de la Paz y del canal de San Lorenzo y se menciona la zonificación que sigue al entrar a este cuerpo lagunar, además del tiempo de renovación del agua que intercambia con la Bahía de La Paz.

Recientemente, en los trabajos de Godínez-Orta *et al.* (1997) y Shumilin *et al.* (1998) en forma muy general se caracterizó la concentración total de algunos componente mayores y elementos traza en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz. Estos autores señalan que elementos como As, Sb y Se presentan un contenido mayor del que se obtiene en la corteza continental (enriquecimiento), y lo atribuyen al aporte de material continental, considerando que en la península se encuentra tres formaciones geológicas (F. San Gregorio, San Isidro y Comondú) que incluyen material volcánico, sedimentario y fosfático. Por otro lado, Méndez *et al.* (1998) en los sedimentos de la laguna registran valores anómalos de Pb que se asocian a la actividad antropogénica de la zona urbana, por la presencia de embarcaciones, una zona de yates, descargas de combustibles y aceites.

I. 2. OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar los niveles de concentración de los elementos mayores y traza en los sedimentos superficiales, sus patrones de distribución espacial y caracterizar la calidad geoquímica del ambiente sedimentario de la Laguna de La Paz, B. C. S., México.

Objetivos particulares

- 1) Determinar las características generales (contenido de los carbonatos, carbono orgánico, Ca, Fe y K) de los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.
- 2) Evaluar el rango de las concentraciones de los elementos traza (As, Ba, Br, Co, Cr, Cs, Hf, Hg, Ni, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Ta, Th, U, Zn y Zr), incluyendo los elementos del grupo de las Tierras Raras (Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm y Yb), en los sedimentos lagunares, sedimentos de la zona del Estero Zacatecas y en material sedimentario de origen continental en el cauce de los arroyos de la cuenca de drenaje adyacente a la laguna.
- 3) Conocer la distribución espacial de la concentración de los elementos traza en sedimentos, con atención especial a los elementos de importancia ambiental.
- 4) Establecer los factores de enriquecimiento (FE) de los componente mayores y elementos traza en los sedimentos de la laguna y suelos del cauce de los arroyos, empleando el Sc como indicador del material proveniente de la corteza terrestre, y la normalización con lutita norteamericana de la concentración de los elementos del grupo de las Tierras Raras en el material sedimentario de la laguna y sus alrededores.

- 5) Desarrollar las hipótesis sobre los factores que controlan los contenidos y distribuciones espaciales de los elementos mayores y traza en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.
- 6) Evaluar el estado de salud geoquímico de los sedimentos de la Laguna de La Paz y de los suelos de los arroyos principales en relación a los elementos traza de importancia ambiental.

I. 3. ÁREA DE ESTUDIO

Laguna de La Paz

La Laguna de La Paz está ubicada en el estado de Baja California Sur, entre las coordenadas geográficas 24.10° y 24.18° de latitud norte y 110.31° y 110.44° de longitud oeste, cuenta con un área aproximada de 45 km² y está comunicada con la Bahía de La Paz por un canal de marea de 1.5 km de ancho y 4 km de largo (Fig. 1).

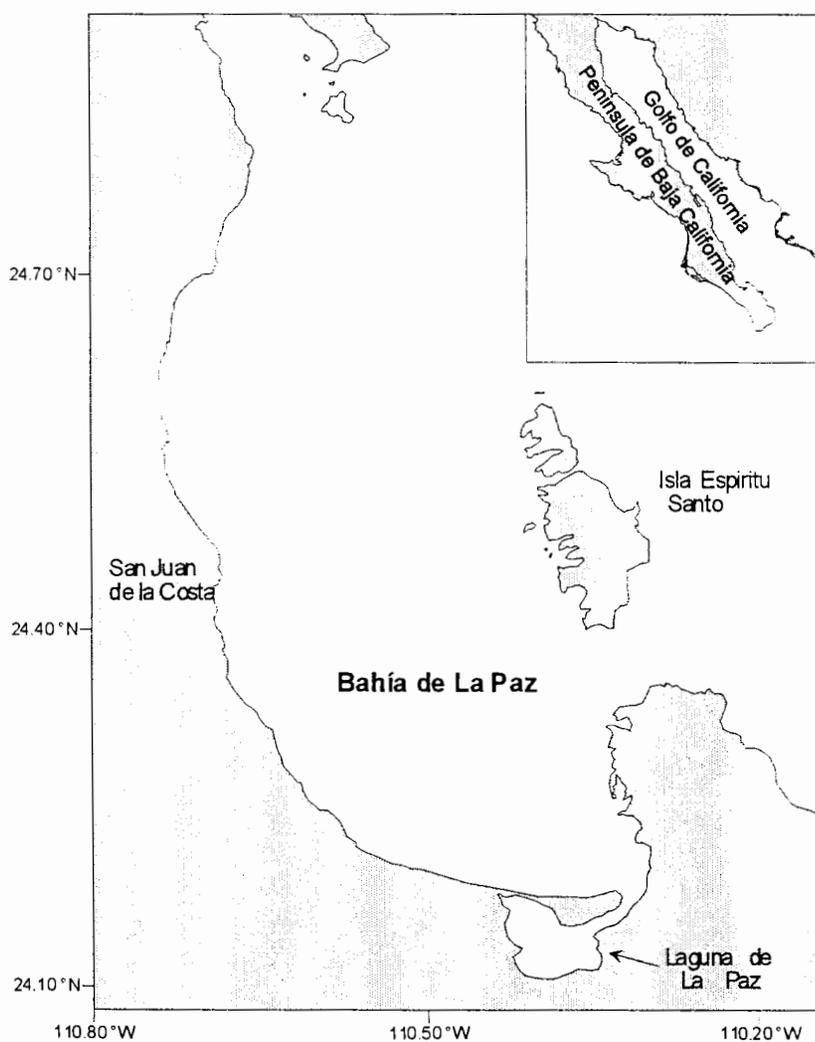


Fig. 1. Localización de la Laguna de La Paz

El clima predominante de esta zona de la península de baja California es de cálido a seco en las planicies, con poca variación hacia las partes altas. La Laguna de La Paz se encuentra ubicada en una zona donde se observan perturbaciones ciclónicas que se generan en el Golfo de Tehuantepec, principalmente en el mes de septiembre. La mayor precipitación se registra entre los meses junio a octubre, cuando predominan los vientos del suroeste; mientras que en el invierno y principios de la primavera los vientos dominantes son del noroeste (Obeso-Nieblas *et al.*, 1993).

La Laguna de La Paz se ubica en el extremo noroeste de una gran planicie formada por el graben de La Paz y se limita por dos grandes sistemas de fallas normales. Uno de estos sistemas de fallas se localiza al *noroeste* con un rumbo noroeste-sureste que expone las Formaciones San Gregorio, San Isidro y Comondú, y el otro al *sureste* con rumbo norte-sur donde aflora la Formación Comondú al norte y el batolito granítico Cretácico al sur (Álvarez-Arellano *et al.*, 1997) (Fig. 2).

Las características del tipo de roca, edad geológica y la localización en el área de las tres formaciones geológicas denominadas Comondú, San Isidro y San Gregorio, son descritas por Osuna (1986), Gamiño (1987), Garduño-Hernández (1987), Martínez-Camacho (1988), Mendoza-Maravillas (1990), Fonseca-Rivera (1991), Prieto-Mendoza (1991), Piper (1991) (Fig. 2). Las conclusiones de estos trabajos coinciden en lo siguiente:

- ❖ *Formación San Gregorio* (Oligoceno superior-Mioceno inferior) es la más antigua que aflora en el área y está constituida por rocas sedimentarias marinas con litofacies silicoclásticas de ambiente marino somero, con lutitas silíceas y fosfáticas, limolitas laminares, arenas fosfáticas económicamente explotables, conglomerados volcánico fosfáticos en la base, toba diatomácea en la parte media de la secuencia y facies de

fosforitas en la parte superior. Se observa abundante material ígneo extrusivo (ceniza volcánica), debido a la actividad volcánica durante el Oligoceno Superior.

- ❖ *Formación San Isidro* (Mioceno inferior-medio) está formada de rocas sedimentarias marinas someras: arenisca conglomerádica con intercalaciones de toba, coquinita, conglomerado y toba redepositada.

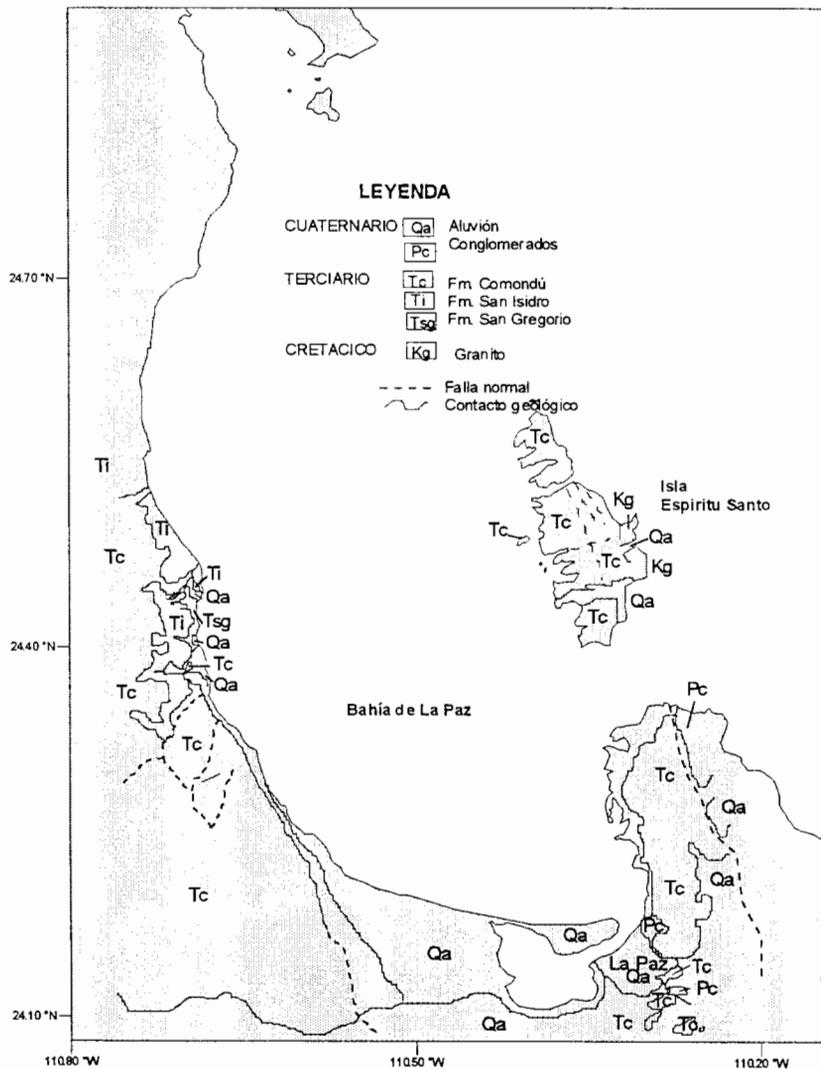


Fig. 2. Caracterización geológica general de la zona adyacente a la Bahía de La Paz (S.P.P, 1984; Álvarez-Arellano et al., 1997).

- ❖ *Formación Comondú* (Mioceno medio-superior) de origen volcánico, está compuesta por rocas sedimentarias y volcánicas, arenisca volcánica, toba riolítica, flujos de lava, material andesítico y conglomerado fluvial, que sobreyacen en contacto transicional con la Formación San Isidro.

El transporte de los materiales erosionados por los arroyos que desembocan en la Laguna de La Paz y la bahía del mismo nombre ocurre a través de una red de tipo dendrítico compuesta en su mayor parte de arroyos de régimen intermitente (S.P.P., 1981). El material continental que se transporta hacia la Laguna de La Paz proviene de varias fuentes de diferente naturaleza: a) los arroyos La Palma, El Novillo, La Ardilla y El Cajoncito, ubicados en la parte sur y este de la laguna; b) la descarga de aguas municipales (que se estimaba en 5,010 toneladas de sólidos totales al año hasta 1988) (Nava-Sánchez y Cruz-Orozco, 1989), c) el aporte eólico, corrientes costeras y el flujo de marea (Jiménez-Illescas, 1996).

Parte del aporte de material sedimentario depositado en la laguna procede del recambio de agua con la Bahía de La Paz a través de dos canales de marea, uno principal y otro secundario, localizados en la boca de la laguna. El canal de entrada se extiende en forma parabólica por aproximadamente 12 km hasta terminar en la parte central de la Laguna de La Paz, donde alcanza profundidades de hasta 10 m. Por otro lado, el canal secundario (descarga) se encuentra frente a la barrera arenosa denominada El Mogote que se extiende 2.2 km con un ancho promedio de 220 m y profundidades máximas de 3 m (Godínez-Orta *et al.*, 1997). El tipo de mareas en la Laguna de La Paz es mixto con predominancia de la señal semidiurna y la velocidad del recambio de agua es lenta, lo que indica un área de fácil captación de materiales pero de lenta evacuación (Gómez *et al.*, 1984).

La batimetría de la Laguna de La Paz se caracteriza por profundidades menores de 2 m en más de un 50% del área, dos depresiones ubicadas en la parte norte (7 m) y sur (4 m) del interior de la laguna, y fondos con más de 8 m en el canal que comunica con la Bahía de La

La Paz (Fig. 3). Las profundidades bajas que se observan en esta laguna contribuyen a la sedimentación rápida de las partículas en suspensión a través de la disminución de las velocidades de flujo del agua de mar (~5cm/seg) (Gómez *et al.*, 1984), lo que permite la acumulación de materiales terrígenos transportados de la cuenca de drenaje durante las precipitaciones pluviales eventuales, en su mayoría cerca de las desembocaduras de los arroyos.

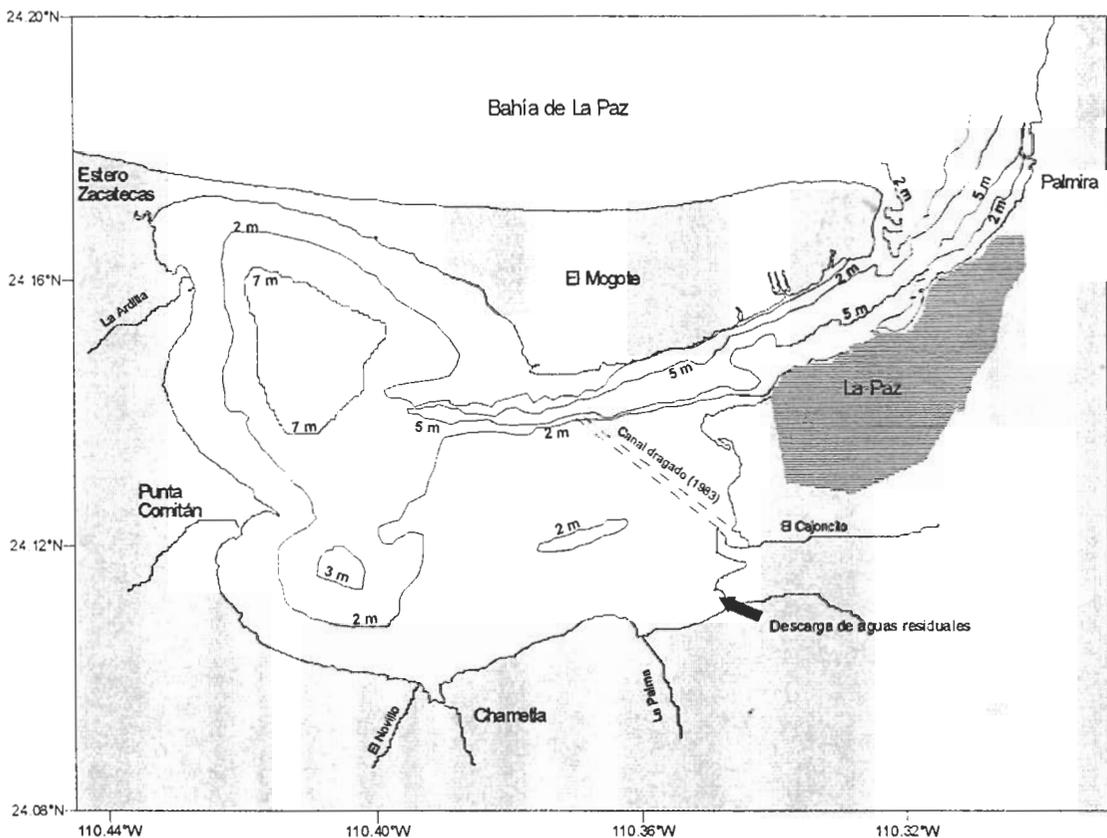


Fig. 3. Batimetría de la Laguna de La Paz

El análisis granulométrico y mineralógico de los sedimentos de la Laguna de La Paz está descrito por Green-Ruíz y Larrínaga-Cunningham (1986), Pérez-Nevárez (1995), Godínez-Orta *et al.* (1997) y Derkachev *et al.* (en prensa). Los tipos de sedimentos diferencian

la laguna en cuatro partes: norte, sur, centro y periferia (Fig. 4). En la parte *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. El material sedimentario depositado en la región *sur* se compone principalmente por lodo y arena, del cuerpo lagunar la *periferia* 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 parte *centro*, el material se caracteriza por una mayor profundidad y niveles altos de materia orgánica, el sustrato es arenoso con zonas de lodo (Fig. 4).

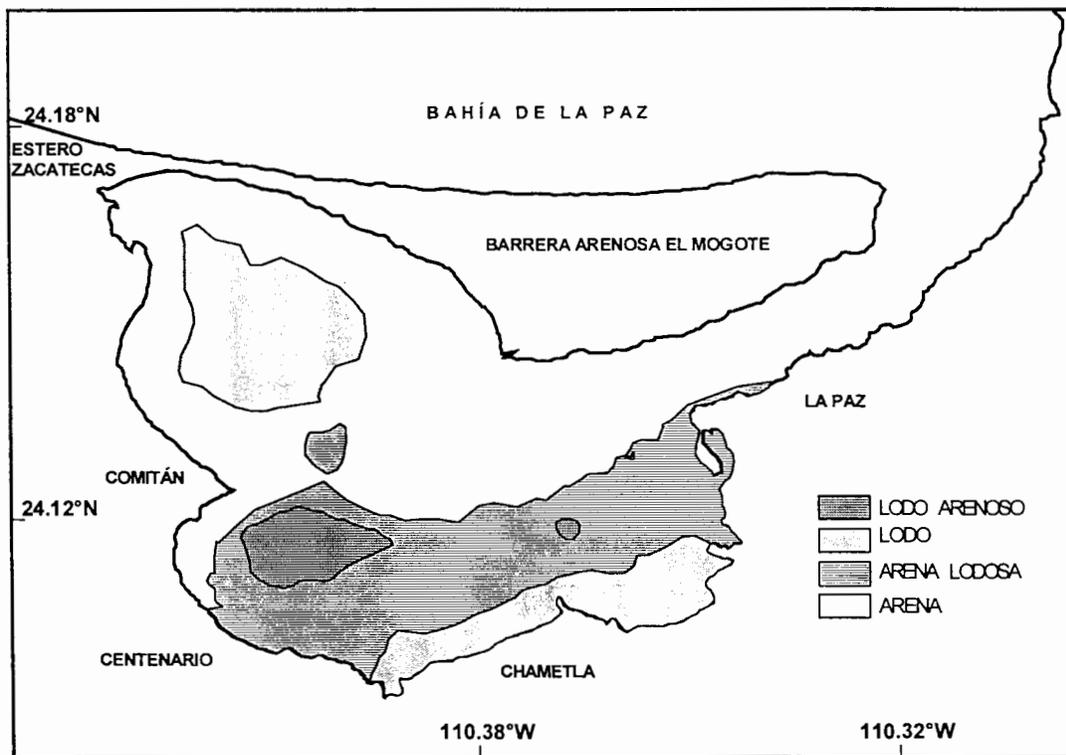


Fig. 4. Distribución espacial de los tipos de sedimentos en la Laguna de La Paz.

Por otro lado, la mineralogía de los sedimentos de la Laguna de La Paz se caracteriza por la presencia de diferentes componentes, como el cuarzo que es el mineral dominante (60%-80%) y los fragmentos de roca, calcita biogénica y minerales ferromagnesianos se encuentran en menor abundancia (Tabla I). Las micas, feldespatos y los ooídeos son escasos en los sedimentos de esta laguna.

Tabla I. Contribución (%) de los grupos mineralógicos en los sedimentos de la Laguna de La Paz, B. C. S., México (Godínez-Orta *et al.*, 1997).

Grupo Mineralógico	Cuarzo	Fragmentos de rocas	Carbonato de calcio	Feldespatos	Micas	Ooídeos
Contribución %						
<u>Min. - Max.</u>	<u>18 - 80</u>	<u>0 - 63</u>	<u>0 - 69</u>	<u>0 - 23</u>	<u>0 - 9</u>	<u>0 - 14</u>
Promedio	54	24	15	5	1	1

II. METODOLOGÍA

II. 1. TRABAJO DE CAMPO.

Para conocer la concentración de los elementos mayores y traza en los sedimentos de la Laguna de La Paz y en los suelos continentales de los arroyos de la cuenca de drenaje adyacente al cuerpo de agua con base en la batimetría, se estableció una red de estaciones que abarcó la mayor parte del cuerpo de agua. Se tomaron 94 muestras de sedimentos superficiales de la laguna; 8 del Estero Zacatecas debido a que comprende una zona de acumulación de material continental que proviene de la Bahía de La Paz y de aporte para la laguna del mismo nombre. Por otra parte, se obtuvieron 16 muestras de sedimentos continentales adyacentes a la laguna (Fig. 5). La posición de las estaciones fue determinado con el uso de un geoposicionador GPS (global positioning system) Magellan 5000 con un error de 25 m a 100 m.

El material sedimentario superficial se colectó mediante una draga Van Veen y se guardaron en bolsas de plástico previamente tratadas con ácidos. El material se mantuvo en refrigeración hasta su procesamiento en el laboratorio.

II. 2. TRABAJO DE LABORATORIO

El análisis de la composición geoquímica de las muestras obtenidas de los sedimentos lagunares y de los suelos de los arroyos incluyó la determinación de la concentración de los carbonatos, carbono orgánico, elementos mayores y elementos traza.

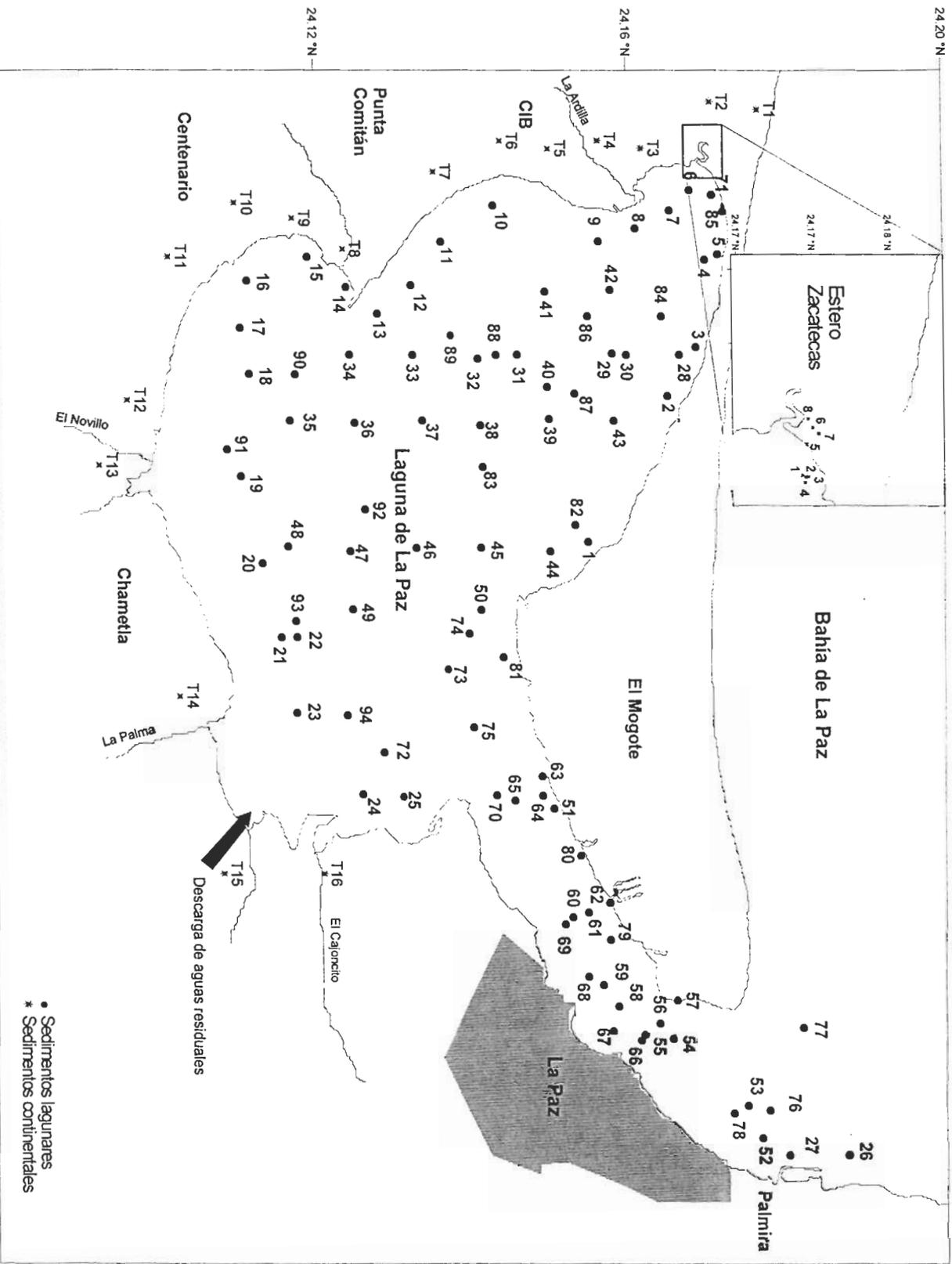


Fig. 5. Estaciones de colecta de sedimentos lagunares y sedimentos continentales adyacentes a la Laguna de La Paz.

El contenido de carbonatos se determinó mediante la metodología propuesta por Rauret *et al.* (1987) y del carbono orgánico a través de la técnica sugerida por Walkley y Black (1934), modificada por Loring y Rantala (1977). Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica y Contaminación Costera del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM (Mazatlán, Sinaloa).

El tratamiento previo para la determinación de los *elementos mayores y elementos traza* en el material colectado consistió en secarlo a una temperatura de 60°C, para trabajar solamente con 100 mg de la fracción menor a 200 micras, que se separó por medio de tamices de plástico. La concentración de los elementos en las submuestras se obtuvo con el método de activación neutrónica en el Instituto de Geoquímica y Química Analítica de V. I. Vernadski en Moscú, Rusia. El método consistía en empaquetar el material en papel de aluminio e irradiar las muestras con neutrones lentos (flujo $2.8 \times 10^{13} \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$). La radiactividad inducida de cada muestra se midió con un espectrómetro de rayos gamma, marca Nokia con 4096 canales y con detector Ge (Li) de alta resolución. Las fuentes espectrométricas de los rayos gamma se usaron para la calibración instrumental (^{152}Eu) (Godínez-Orta *et al.*, 1997). Los errores del método son 2-5% para Sc, Cr, Fe, Co, La, Sm; 5-8% para Ce, Yb, Lu, U, Th, Hf; 8-10% para K, Rb, Cs, Ca, As, Sb, Ta, Tb; 10-15% para Sr, Ba, Ni, Zr y Nd.

Se analizaron un total de 35 elementos, diferenciados como mayores (Ca, Fe y K) y traza (As, Ba, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nd, Ni, Pr, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, Yb, Zn y Zr).

Por otra parte, en las alícuotas de las submuestras se obtuvo la *concentración de Hg* a través de la técnica descrita por Dumarey *et al.* (1987), la cual consiste en hacer digestiones en húmedo. Para esto, el material empleado se limpió previamente como lo señalan Sturgeon y Berman (1987). Las mediciones se realizaron con espectrofotometría de absorción atómica

de flama (con el "vapor frío") en el Instituto de Problemas Ecológicos del Agua de la Academia de Ciencias de Rusia y durante el procesamiento se emplearon soluciones estándar G50-3497-86 provenientes del Instituto de Físico-química de la Academia Nacional de Ciencias de Ucrania. La precisión de los análisis es de 0.01 µg/g.

II. 3. TRABAJO DE GABINETE

Para tener conocimiento de la *distribución espacial* de la concentración de los elementos en los sedimentos superficiales, fue necesario emplear el programa computacional SURFER 6.01, con el que se elaboró el mapa de la Laguna de La Paz, digitalizado previamente con el empleo de una tableta digitalizadora marca SUMMAGRAPHICS modelo SUMMAGRID IV™. Los datos fueron manejados en computadora para establecer los patrones de distribución espacial de los elementos traza en los sedimentos superficiales, encontrar las zonas de acumulación en el área, aclarar las asociaciones con minerales, de carbonatos, contenido de orgánico y elementos mayores, además de caracterizar la posible relación con la presencia de los arroyos cercanos de la cuenca de drenaje. El material acumulado en el cauce de los arroyos cercanos a la laguna se referirá como el sedimento continental.

El *análisis estadístico* consistió en la determinación de la media del contenido, desviación estándar y el coeficiente de correlación (r) entre los elementos; en el cálculo del factor de enriquecimiento (FE) para la concentración de los elementos traza y de la normalización con lutita norteamericana para los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR).

El factor de enriquecimiento (FE) se obtuvo mediante el uso de Sc como elemento indicador del aporte de la corteza terrestre, a través de la siguiente fórmula (Windom *et al.*,

1989; Loring, 1991): $FE = \frac{\frac{El_{sedimento}}{Sc}}{\frac{El_{corteza}}{Sc}}$, donde El es la concentración del elemento y Sc es la

concentración del escandio. Para dicho análisis es necesario emplear la concentración natural que indica Taylor (1964) para cada elemento en la corteza continental.

Por otro lado, la normalización (N_m) se realizó para la concentración de los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR) empleando los datos de Ross y McLennan (1985) de la lutita norteamericana (CLNA), que se considera como una línea base para discutir la tendencia de enriquecimiento de estos elementos (Pattan y Banakar, 1993). La normalización de los valores se obtuvo con la siguiente fórmula: $N_m = \frac{El_{sedimento}}{El_{lutita}}$, donde $El_{sedimento}$ es la concentración del elemento que se obtiene en los sedimentos superficiales y continentales ($\mu\text{g/g}$), mientras que El_{lutita} corresponde a la concentración promedio de ese mismo elemento en la lutita de la corteza norteamericana ($\mu\text{g/g}$).

Este tipo de normalización es esencial para excluir los efectos del tamaño de grano y el origen en la variabilidad natural del elemento (anomalías). Además se aclara la influencia por aporte antropogénico en los sedimentos (McArthur y Walsh, 1984; Loring, 1991; Daesslé-Heuser, 1993; De-Carlo *et al.*, 1996).

III. RESULTADOS

Los resultados de la determinación de la concentración de elementos en los sedimentos de la Laguna de La Paz, en forma general se presentan en la Tabla II. El contenido de carbonatos, carbono orgánico y cada uno de los elementos en los sedimentos lagunares, se presentan de forma completa en el Anexo I; mientras que los datos de la zona del Estero Zacatecas y los sedimentos continentales se detallan en el Anexo II.

Tabla II. Concentración de los componentes mayores (%) y elementos traza ($\mu\text{g/g}$) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz (número de estaciones).

Elemento		Laguna (94)	Estero Zacatecas (7)	Sedimento continental (16)	Corteza Terrestre ¹
Ca	Min.	1	2	1	-
	Max.	20	5	6	-
	Prom. \pm std	5 \pm 4	4 \pm 1	3 \pm 1	4.15%
Fe	Min.	0.1	1	0.5	-
	Max.	4	2	5	-
	Prom. \pm std	2 \pm 1	2 \pm 0.4	2 \pm 1	5.63%
K	Min.	0.4	1	1	-
	Max.	4	3	5	-
	Prom. \pm std	1 \pm 1	2 \pm 1	2 \pm 1	2%
Carbonato	Min.	1.3	6.5	0.4	-
	Max.	92.0	38.3	9.5	-
	Prom. \pm std	24.0 \pm 22.3	19.0 \pm 12.0	4.0 \pm 3.0	-
C. orgánico	Min.	0.06	0.2	0.07	-
	Max.	3.05	1.3	3.40	-
	Prom. \pm std	1.1 \pm 0.9	0.7 \pm 0.4	1.8 \pm 1.0	-
Sb	Min.	0.02	0.3	0.3	-
	Max.	5.0	1.0	6.0	-
	Prom. \pm std	1.0 \pm 1.0*	0.7 \pm 0.4*	2.0 \pm 1.0*	0.2 $\mu\text{g/g}$

* Concentraciones que sobrepasan el valor de la corteza continental; ¹ Taylor (1964).

Tabla II (continuación). Concentración de los componentes mayores (%) y elementos traza ($\mu\text{g/g}$) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz (número de estaciones).

Elemento		Sedimento lagunar (94)	Estero Zacatecas (8)	Sedimento continental (16)	Corteza Terrestre ¹
As	Min.	0.5	13	2	-
	Max.	44.0	24	28	-
	Prom. \pm std	$10.0 \pm 7^*$	$19 \pm 4^*$	$9 \pm 10^*$	1.8
Ba	Min.	50	250	245	-
	Max.	860	530	1020	-
	Prom. \pm std	$382 \pm 169^*$	$370 \pm 93^*$	$560 \pm 219^*$	425
Br	Min.	0.02	1	0.01	-
	Max.	16.0	3	1.00	-
	Prom. \pm std	2.0 ± 2	2 ± 1	0.10 ± 0.2	2.5
Cs	Min.	0.05	2	2	-
	Max.	12.0	3	13	-
	Prom. \pm std	$4.0 \pm 3^*$	$3.0 \pm 0.6^*$	$3 \pm 3^*$	1
Co	Min.	0.4	2	2.0	-
	Max.	14	9	18.5	-
	Prom. \pm std	5.0 ± 3	5 ± 3	6.0 ± 5	29
Cr	Min.	4	16	3	-
	Max.	89	60	165	-
	Prom. \pm std	22 ± 15	34 ± 19	27 ± 37	185
Sc	Min.	1	4	2	-
	Max.	19	14	23	-
	Prom. \pm std	6 ± 4	9 ± 3	6 ± 5	30
Sr	Min.	91	110	60	-
	Max.	3510	855	575	-
	Prom. \pm std	$615 \pm 549^*$	$343 \pm 204^*$	$295 \pm 156^*$	260
Hf	Min.	0.3	2	2	-
	Max.	7.0	5	7	-
	Prom. \pm std	2.0 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3
Hg	Min.	0.01	0.01	0.01	-
	Max.	0.05	0.03	0.03	-
	Prom. \pm std	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.09	0.02 ± 0.01	0.08
Ni	Min.	10	40	10	-
	Max.	220	280	90	-
	Prom. \pm std	48 ± 35	90 ± 93	50 ± 26	105
Rb	Min.	0.2	16	25	-
	Max.	87.0	59	85	-
	Prom. \pm std	$44.0 \pm 18^*$	$51 \pm 13^*$	$48 \pm 15^*$	32

* Concentraciones que sobrepasan el valor de la corteza continental; ¹ Taylor (1964).

Tabla II (continuación). Concentración de los componentes mayores (%) y elementos traza ($\mu\text{g/g}$) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz (número de estaciones).

Elemento		Sedimento lagunar (94)	Estero Zacatecas (8)	Sedimento continental (16)	Corteza Terrestre ¹
Se	Min.	0.1	1	0.3	-
	Max.	8.0	3	3	-
	Prom. \pm std	$1.0 \pm 1.0^*$	$1 \pm 1^*$	$0.8 \pm 1^*$	0.05
Ta	Min.	0.03	0.1	0.1	-
	Max.	1.0	0.6	1.0	-
	Prom. \pm std	0.40 ± 0.3	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.3	1.0
Th	Min.	1	3	2	-
	Max.	7	9	5	-
	Prom. \pm std	3 ± 1	4 ± 2	4 ± 1	3.5
U	Min.	0.2	1	1	-
	Max.	15.0	4	16	-
	Prom. \pm std	$3.0 \pm 2.0^*$	$2 \pm 1^*$	$5 \pm 4^*$	0.91
Zn	Min.	3	16	10	-
	Max.	130	42	110	-
	Prom. \pm std	34 ± 25	33 ± 9	30 ± 28	80
Zr	Min.	4	15	11	-
	Max.	430	185	380	-
	Prom. \pm std	82 ± 79	41 ± 50	$120 \pm 95^*$	100
La	Min.	1	12	2	-
	Max.	53	26	27	-
	Prom. \pm std	15 ± 8	20 ± 4	18 ± 6	16
Ce	Min.	3	20	5	-
	Max.	90	48	49	-
	Prom. \pm std	26 ± 13	36 ± 8	33 ± 11	83
Pr	Min.	0.4	2	1	-
	Max.	8.0	5	5	-
	Prom. \pm std	3.0 ± 1.0	4 ± 1	4 ± 1	3.9
Nd	Min.	2	8	3	-
	Max.	27	20	20	-
	Prom. \pm std	10 ± 5	14 ± 4	14 ± 4	16
Sm	Min.	1	2	1	-
	Max.	7	5	5	-
	Prom. \pm std	3 ± 1	3 ± 1	3 ± 1	3.5
Eu	Min.	0.1	1	0.3	-
	Max.	2.0	1	2.0	-
	Prom. \pm std	1.0 ± 0.3	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.3	1.1

* Concentraciones que sobrepasan el valor de la corteza; ¹ Taylor (1964).

Tabla II (continuación). Concentración de los componentes mayores (%) y elementos traza ($\mu\text{g/g}$) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz (número de estaciones).

Elemento		Sedimento lagunar (94)	Estero Zacatecas (8)	Sedimento continental (16)	Corteza Terrestre ¹
Gd	Min.	1	2	1	-
	Max.	7	6	6	-
	Prom. \pm std	3 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	3.3
Tb	Min.	0.1	0.3	0.2	-
	Max.	1.0	1.0	1.0	-
	Prom. \pm std	0.4 ± 0.2	1.0 ± 0.1	0.6 ± 0.2	0.6
Dy	Min.	1	2	1	-
	Max.	6	5	6	-
	Prom. \pm std	3 ± 1	4 ± 1	4 ± 1	3.7
Ho	Min.	0.1	0.4	0.3	-
	Max.	1.0	1.0	1.0	-
	Prom. \pm std	0.6 ± 0.2	$1.0 \pm 0.2^*$	$1.0 \pm 0.3^*$	0.78
Er	Min.	0.3	1	1	-
	Max.	4.0	3	4	-
	Prom. \pm std	1.6 ± 0.6	2 ± 1	2 ± 1	2.2
Tm	Min.	0.04	0.1	0.1	-
	Max.	0.50	0.5	1.0	-
	Prom. \pm std	0.20 ± 0.10	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.32
Yb	Min.	0.2	1	1	-
	Max.	3.0	3	4	-
	Prom. \pm std	1.0 ± 0.5	2.0 ± 0.5	2 ± 1	2.2
Lu	Min.	0.02	0.1	0.1	-
	Max.	0.50	0.5	6.0	-
	Prom. \pm std	0.20 ± 0.10	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.3

* Concentraciones que sobrepasan el valor de la corteza continental; ¹ Taylor (1964).

III. 1. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS COMPONENTES MAYORES EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES DE LA LAGUNA DE LA PAZ

III. 1. 1. Calcio

La concentración promedio de Ca oscila de 3% en los sedimentos continentales a 5% en los sedimentos lagunares. Los sedimentos superficiales de Palmira y el Estero Zacatecas son los que presentan la concentración más alta de Ca y tienen mayor abundancia de carbonatos (fragmentos de conchas y coral) (Fig. 6a). Por otra parte, en los sedimentos continentales los puntos del Estero Zacatecas, Chametla y la zona del CIB es donde se encuentra el más alto contenido de Ca (~3%), también asociado a los fragmentos calcáreos y quizás minerales.

Las referencias de este elemento son escasas; sin embargo, Taylor (1964) lo estima en 4.5% para la corteza continental. Este valor permite definir a la Laguna de La Paz como una zona con elevado contenido de Ca en el sedimento, que se relaciona con la alta productividad del bentos y se refleja con fragmentos calcáreos (conchas y coral). Por otro lado, Bahía Magdalena presenta el mismo comportamiento que la laguna con un promedio de 5.3% (Álvarez-Arellano, 1995) y se asocia a la productividad elevada y los abundantes moluscos explotables comercialmente.

III. 1. 2. Hierro

La concentración promedio de Fe en la Laguna de La Paz fue de 2%, tanto en los sedimentos lagunares como los sedimentos continentales. La distribución espacial diferencia a los sedimentos de las depresiones norte y sur, además frente a la zona de Chametla, por los contenidos de Fe altos (> 2%) (Fig. 6b). Por su localización, estas zonas son propicias a presentar influencia de tipo terrígeno, a través de la descarga de los arroyos ubicados en la parte oeste y sur de la laguna. Por otro lado, las concentraciones en los sedimentos

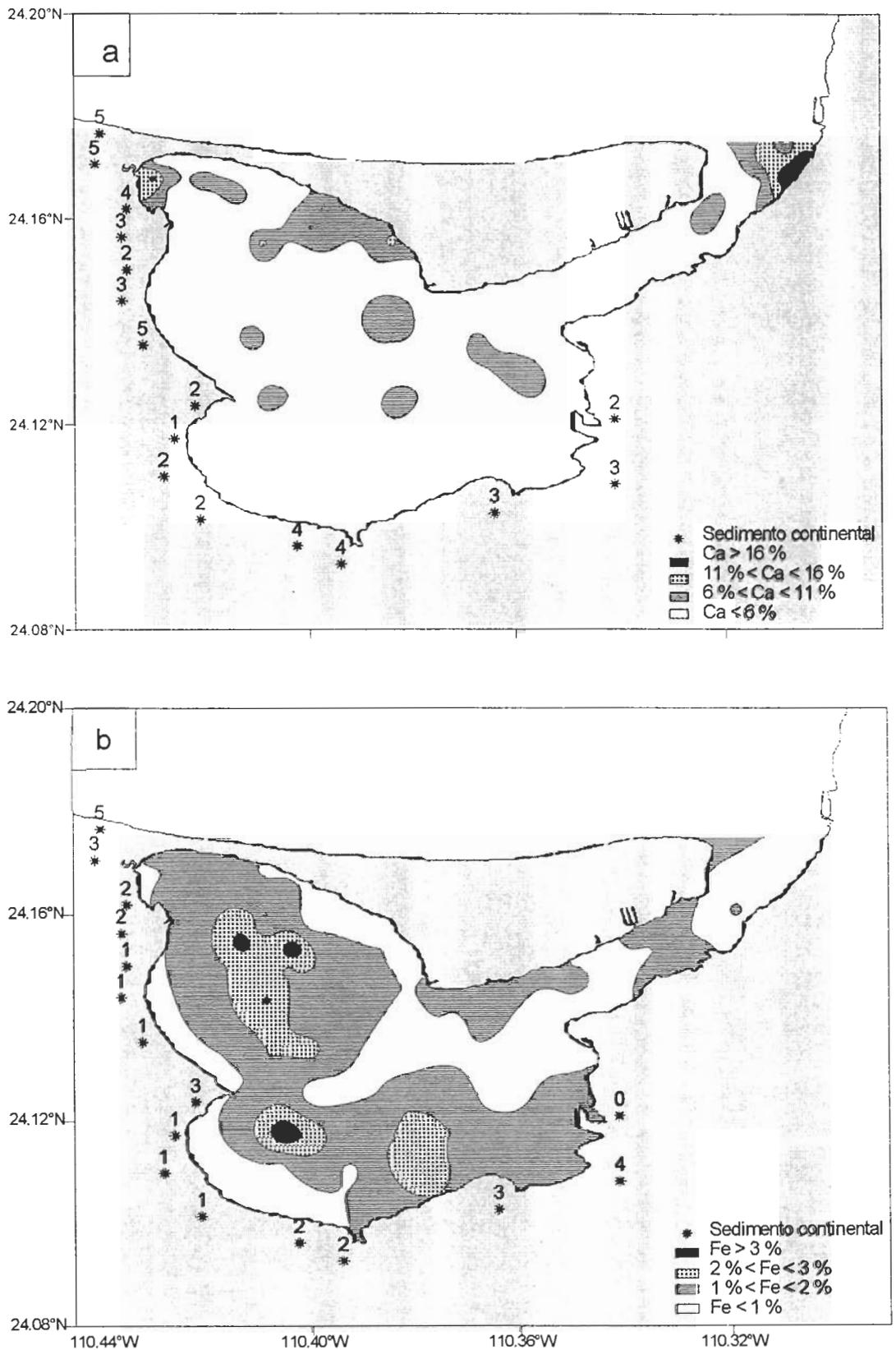


Fig. 6. Distribución de la concentración de Ca (a) y Fe (b) en sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

continentales catalogan al Estero Zacatecas, Punta Comitán y la antigua zona de descarga de aguas residuales como los puntos donde Fe contiene más de 3%.

El contenido de Fe en la corteza es de 5.6% (Taylor, 1964), más alto de lo que se observa en los sedimentos de la Laguna de La Paz. Resultados semejantes a la corteza se obtienen en la Ensenada El Pabellón, en Sinaloa (5.4%) (Green-Ruiz y Páez-Osuna, 1997) y el Río Coatzacoalcos, en Veracruz (5.9%) (Ortíz y Carranza, 1997), aunque este último área es industrializada y probablemente la descarga de residuos influye en la estimación de este elemento.

Existen otras zonas donde ha sido determinada la concentración de Fe en los sedimentos. Tal es el caso, de la cuenca de Mazatlán (Sinaloa), donde Páez-Osuna y Osuna-López (1990) reportan valores de Fe promedio de 4%; de Bahía Magdalena (B.C.S.) cuyo contenido fue cuantificado en 1% (Álvarez-Arellano, 1995); de la Bahía de Todos Santos (B. C.) con concentración de 2.4% (Romero-Vargas, 1995); el Golfo de Aqaba (Jordania), con un contenido de 1% (Abu Hilal, 1993) y el Mar Pechora (Rusia), donde Loring *et al.* (1995) reportan concentraciones de 2.9%. Cada uno de estos reportes representa las condiciones de la depositación de material erosionado e intemperizado de rocas continentales y la actividad hidrotermal. Todas estas áreas tienen un resultado similar a la Laguna de La Paz, además de que las concentraciones antes señaladas representan ambientes sin contribución antropogénica notoria, es decir, el contenido es solamente un producto de la influencia continental (materiales finos limo/arcilla) y las características de la zona. Por otro lado, un valor menor al promedio de la Laguna de La Paz se obtiene en la Bahía Ceuta (Sinaloa), con 0.7% de Fe (Osuna-López, 1981).

Por otra parte, se tienen registros del contenido de Fe en ambientes con actividad antropogénica, como por ejemplo en el Mar de Japón, donde la concentración de Fe en los sedimentos de la Bahía Cuerno Dorado es de 3.6% (Tkalin *et al.*, 1996) y en Inglaterra, donde

el material sedimentario del estuario industrializado Restronguet Creek presenta 5% de Fe (Bryan y Langston, 1992). Ambas concentraciones son semejantes al promedio de la Laguna de La Paz y de la corteza continental, sin embargo, ambos datos reflejan el aporte de residuos industriales y domésticos.

III. 1. 3. Potasio

La concentración de K en los sedimentos lagunares fue 1%, mientras en el Estero Zacatecas y el sedimento continental se registró 2%. No fue posible obtener la distribución espacial de este elemento debido al escaso número de datos de concentración estimados.

III. 1. 4. Carbono Orgánico

La concentración promedio de carbono orgánico oscila de 0.7% en los sedimentos del Estero Zacatecas, a 1% en los lagunares y 1.7% en los continentales. La mayor acumulación del carbono orgánico se registra en los sedimentos de la depresión norte y frente a las zonas de El Mogote y el manglar El Conchalito, con más de 2% (Fig. 7a). Por otro lado, en el sedimento continental los registros más altos se obtienen en Punta Comitán y Chametla (Corg > 1.5%), probablemente asociados a las descargas de aguas residuales que se vertieron anteriormente en la porción sureste de la laguna y a los árboles de manglar.

Los registros de carbono orgánico en los sedimentos de esta laguna son de Green-Ruiz y Larrinaga-Cunningham (1986), cuyos valores oscilan de 0.05% a 1.7% y señalan que la mayor abundancia se observa en la porción sureste de la laguna donde se vertieron aguas residuales. Sin embargo, en el presente trabajo el mayor contenido se encuentran en los sedimentos de la depresión norte y frente a El Mogote, asociados al aporte de material desde la barrera El Mogote y la depositación de material en la zona de mangles, que contribuyen en la acumulación de partículas finas (limo-arcilla), el aporte de material orgánico y la absorción de

elementos. Las variaciones en los resultados de ambos estudios son probablemente debidas al número de estaciones consideradas y la ubicación de cada una de estas.

Por otra parte, se reportan valores de carbono orgánico entre 0.02% a 0.28% en el material de la barrera arenosa El Mogote (Mendoza-Maravillas, 1990), bajos respecto a la laguna; pero se puede considerar la influencia desde este área hacia los sedimentos debido a la presencia de árboles de manglar y marismas. Por otro lado, en Bahía Magdalena se obtiene un promedio de 2%, que sobrepasa a la Laguna de La Paz (1% carbono orgánico), como consecuencia de la productividad que la caracteriza (Álvarez-Arellano, 1995). En los sedimentos del Río Coatzacoalcos (Veracruz) se aprecian oscilaciones entre 0.2% a 1.6% (Ortíz y Carranza, 1997), semejantes a los valores de la Laguna de La Paz; sin embargo, debe considerarse que Coatzacoalcos es una zona industrializada con asentamientos humanos que posiblemente producen variaciones en los valores que se obtienen.

III. 1. 5. Carbonatos

La concentración promedio de carbonatos varía de 4% en los sedimentos continentales a 24% en los lagunares. Las zonas de mayor contenido de este componente en los sedimentos se localizan frente a las áreas de Palmira, el Estero Zacatecas, El Mogote y el manglar El Conchalito, debido a la presencia de abundantes fragmentos de conchas y coral (Fig. 7b). En los sedimentos continentales se diferencia a la antigua zona de descarga de aguas residuales, Chametla, Centenario y el Estero Zacatecas con más de 5% en carbonatos.

El contenido que se registra de los carbonatos en el presente trabajo es semejante con lo que reportan Green-Ruíz y Larrinaga-Cunningham (1986) en los sedimentos lagunares tomados anteriormente (21% promedio de carbonatos), además de coincidir en que Palmira y el Estero Zacatecas son las zonas de mayor contenido, dada la presencia de abundantes fragmentos calcáreos.

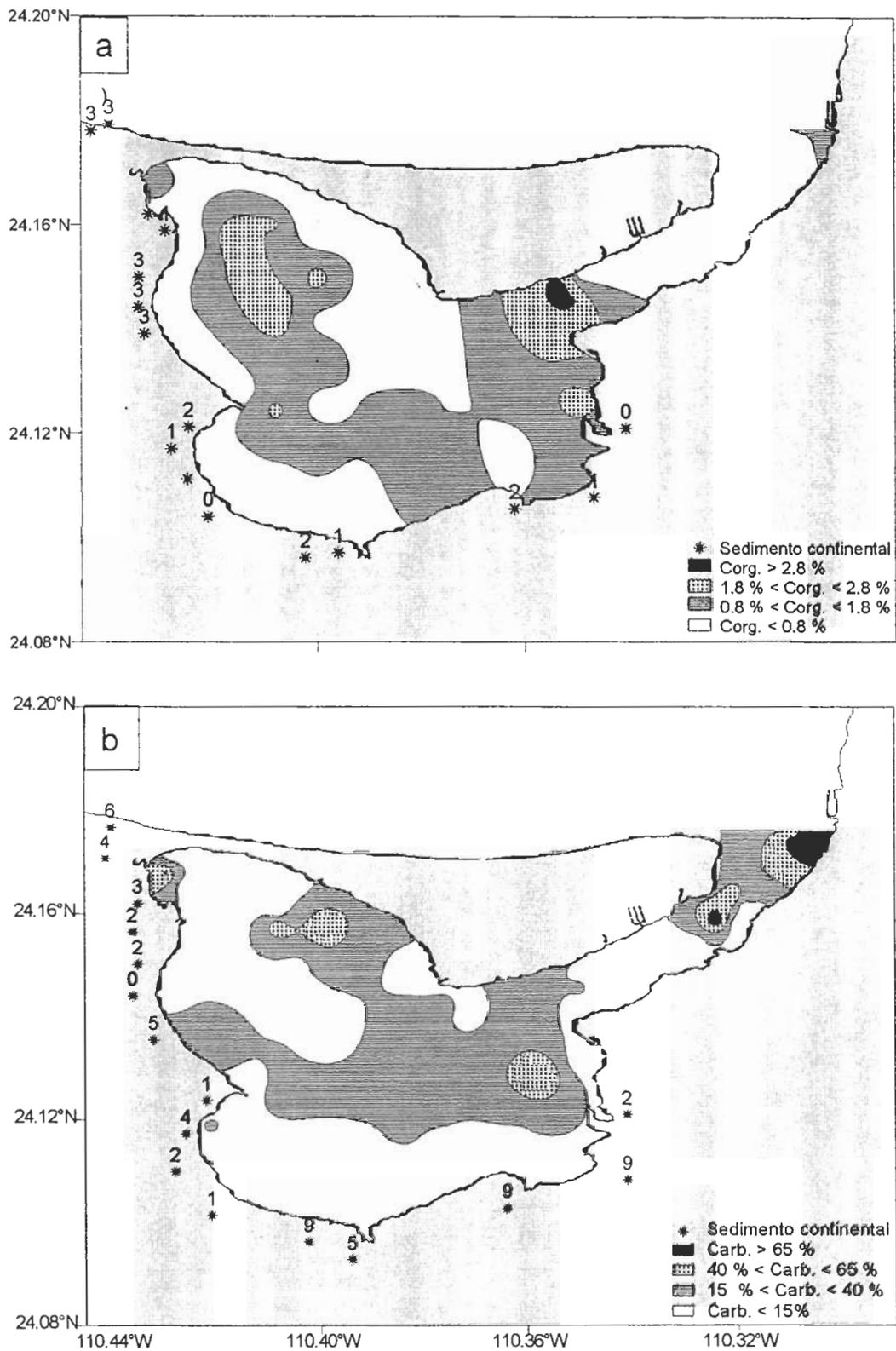


Fig. 7. Distribución de la concentración de carbono orgánico (a) y carbonatos (b), en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz

III. 2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ELEMENTOS TRAZA EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES DE LA LAGUNA DE LA PAZ

III. 2. 1. Antimonio ✓

La concentración promedio de Sb en los sedimentos oscila entre 1 $\mu\text{g/g}$, para los lagunares y del Estero Zacatecas, a 2 $\mu\text{g/g}$ en los continentales. La distribución muestra que la acumulación de Sb ocurre principalmente en los sedimentos frente a la barrera arenosa El Mogote, con más de 3 $\mu\text{g/g}$ (Fig. 8a). Por otro lado, en los sedimentos continentales la mayor abundancia ($\sim 2 \mu\text{g/g}$) se registra en las zonas de Punta Comitán, Estero Zacatecas, el CIB y Centenario, lo que probablemente las define como fuentes de aporte de Sb en este ambiente, asociadas a la descarga de material terrígeno, durante el verano, por lluvias torrenciales.

Los sedimentos de la Laguna de La Paz se caracterizan por sobrepasar el valor promedio de Sb en la corteza continental (0.2 $\mu\text{g/g}$) hasta en 5 veces en el caso de los sedimentos lagunares y 10 veces en los sedimentos continentales. Las referencias del contenido de Sb en algunas áreas del mundo, como Long Island Sound (E.U.A.), señalan 5 $\mu\text{g/g}$ (Greig *et al.*, 1977), estimación que difiere en 25 veces de la corteza continental, y hasta 7 $\mu\text{g/g}$ (33 veces) como sucede en la Veta Regina, en Durango (Canseco *et al.*, 1997), que muestra que en algunas zonas este elemento es abundante, ya sea producto de la actividad minera que se realizó o bien por la presencia de formaciones geológicas en el área. Estos registros permiten señalar que no solo la Laguna de La Paz presenta diferencias respecto a la corteza continental y que, probablemente, las concentraciones del Sb obtenidas para el material sedimentario se asocian a la litología específicas de las rocas.

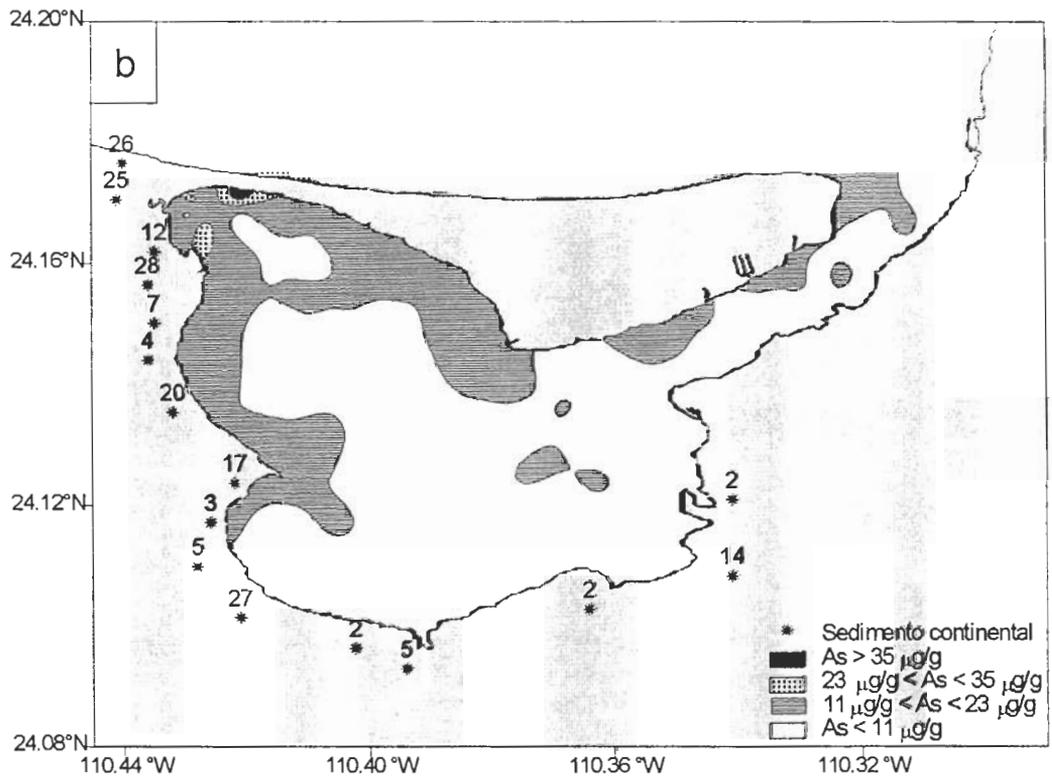
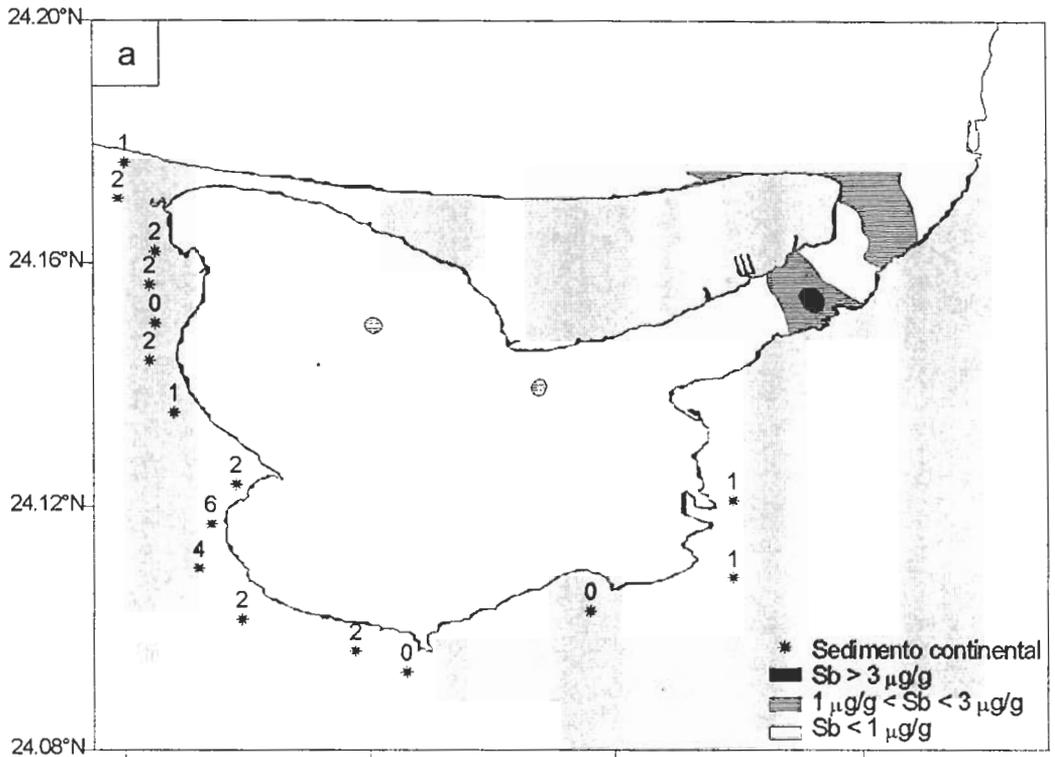


Fig. 8. Distribución de la concentración de Sb (a) y As (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

III. 2. 2. Arsénico

El contenido promedio de As varía en los sedimentos superficiales de 9 $\mu\text{g/g}$, en los continentales, a 19 $\mu\text{g/g}$ del Estero Zacatecas. La concentración más alta de este elemento en los sedimentos del interior de la laguna se registra frente al Estero Zacatecas y en la barrera arenosa El Mogote ($\sim 30 \mu\text{g/g}$), mientras que en el material continental se encuentran en el Estero Zacatecas, el CIB, Punta Comitán y Centenario ($\text{As} > 15 \mu\text{g/g}$) (Fig. 8b). Es posible que los últimos puntos, donde el sedimento continental presenta concentraciones altas de As, sean una de las fuentes de aporte a los sedimentos lagunares debido a la descarga y acumulación de material terrígeno por arroyos, como se aprecia en el Estero Zacatecas.

Las concentraciones de As en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz sobrepasan en más de 5 veces el valor promedio de 1.8 $\mu\text{g/g}$ de la corteza continental (Taylor, 1964). Existen otras zonas con similar tendencia en el As; tal es el caso del Río Mississippi (3 $\mu\text{g/g}$), el Mar Rojo (8 $\mu\text{g/g}$) (Goldschmidt, 1958), el Mar Pechora, en Rusia (55 $\mu\text{g/g}$) (Loring *et al.*, 1995), en las cercanías de Mombasa, en Kenia (9.7 $\mu\text{g/g}$), y que son característicos de ambientes sin alteraciones donde sólo se presenta la influencia de tipo natural, a excepción del Río Mississippi que recibe influencia antropogénica.

Por otra parte, estimaciones de niveles de As en los sedimentos semejantes al promedio que se registra en el Estero Zacatecas (19 $\mu\text{g/g}$) se encuentran en el estuario Poole (14 $\mu\text{g/g}$) y el estuario Medway (18 $\mu\text{g/g}$) de la Gran Bretaña (Bryan y Langston, 1992), los cuales son zonas industrializadas con importante aporte de material residual, que permiten diferenciar el Estero Zacatecas del cuerpo lagunar, como un área enriquecida naturalmente en As dada la escasez de actividades antropogénicas.

Algunas de las características de As que destacan son: su asociación con Fe y Mn, la degradación de materia orgánica, transporte físico/biológico y la actividad antropogénica (Chaloupka y Aller, 1995). Tomando en cuenta estas características, posiblemente el material

continental intemperizado y depositado en la barrera arenosa El Mogote y en los sedimentos del Estero Zacatecas intervienen como fuente de aporte de elementos. Se tiene el registro del contenido de As en agua subterránea de la zona minera de San Antonio (B.C.S.), donde se encontró que ésta presenta valores por arriba del límite permisible, consecuencia de la litología del área, los desechos mineros producidos y los factores que controlan la movilización del elemento (reacciones abióticas y bióticas) (Martínez-Flores, 1998). Probablemente es lo que sucede con la Laguna de La Paz debido a los valores altos que se observan.

III. 2. 3. Bario

La concentración promedio de Ba varía en los sedimentos de 370 $\mu\text{g/g}$, en el Estero Zacatecas, a 560 $\mu\text{g/g}$, en los continentales. Los valores más altos de este elemento en los sedimentos lagunares se encontraron en el canal, frente a la antigua zona de descarga de aguas residuales y en la parte central de la laguna (400 $\mu\text{g/g}$). Mientras que en el sedimento continental el Ba se concentra en las zonas del Estero Zacatecas, el CIB, Punta Comitán, Chametla y la antigua zona de descarga de aguas residuales ($\text{Ba} > 500 \mu\text{g/g}$) (Fig. 9a). Probablemente la presencia de Ba en los sedimentos de la laguna se asocia al material removido durante la precipitación pluvial (arroyos), el transporte eólico de las partículas y la hidrodinámica de la laguna.

Los resultados sobre los niveles de Ba en el material sedimentario de la Laguna de La Paz son semejantes a la concentración de Ba en la corteza continental que se reporta (425 $\mu\text{g/g}$) (Taylor, 1964); a excepción del promedio en el sedimento continental. El contenido elevado de Ba en los sedimentos continentales representa para la laguna una fuente importante de aporte, que puede darse por las descargas torrenciales de agua pluvial que estacionalmente se observan y por la influencia del viento.

Otras áreas donde el registro de la concentración de Ba muestra valores semejantes al promedio en los sedimentos continentales de la Laguna de La Paz, son los ríos Yangtze con $560\mu\text{g/g}$ y Amarillo, con $600\mu\text{g/g}$, en China (Yuan-Hui *et al.*, 1984). Los valores de los sedimentos lagunares y del Estero Zacatecas son comparables con los registros cerca de Mombasa, en Kenia ($361\mu\text{g/g}$) (Williams *et al.*, 1997). La comparación entre las áreas permite señalar que los contenidos de la Laguna de La Paz son consecuencia de las condiciones naturales que caracterizan la localidad pero también influenciada por los aportes eventuales por descargas torrenciales de material continental.

Es importante mencionar que el Ba es un elemento que permite detectar el impacto antropogénico (Holmes, 1981), debido a que la barita (BaSO_4) se usa en los lodos de perforación y se introduce a los sedimentos por actividades de exploración y explotación petrolera (Rosales *et al.*, 1992). Aunque también, el Ba en forma de barita se reporta como un mineral accesorio en los depósitos hidrotermales (Ortega, 1988). De esta forma, posiblemente la presencia de Ba en la Laguna de La Paz refleja el uso de la barita en las perforaciones que se realizan en San Juan de la Costa para la extracción de rocas fosfatadas, además de la abundancia de este elemento en el material continental.

III. 2. 4. Bromo

El contenido promedio de Br es de $2\mu\text{g/g}$ en los sedimentos lagunares y del Estero Zacatecas; mientras que en los sedimentos continentales se obtuvo $0.1\mu\text{g/g}$. La acumulación mayor de este elemento en los sedimentos ocurre en la depresión sur ($8\mu\text{g/g}$) y en Chametla ($4\mu\text{g/g}$), cuyo fondo está dominado por material fino con alto contenido de carbono orgánico. Por otra parte, en el sedimento continental Chametla, el CIB y el Estero Zacatecas son los puntos donde se obtiene más de $0.2\mu\text{g/g}$ de Br (Fig. 9b).

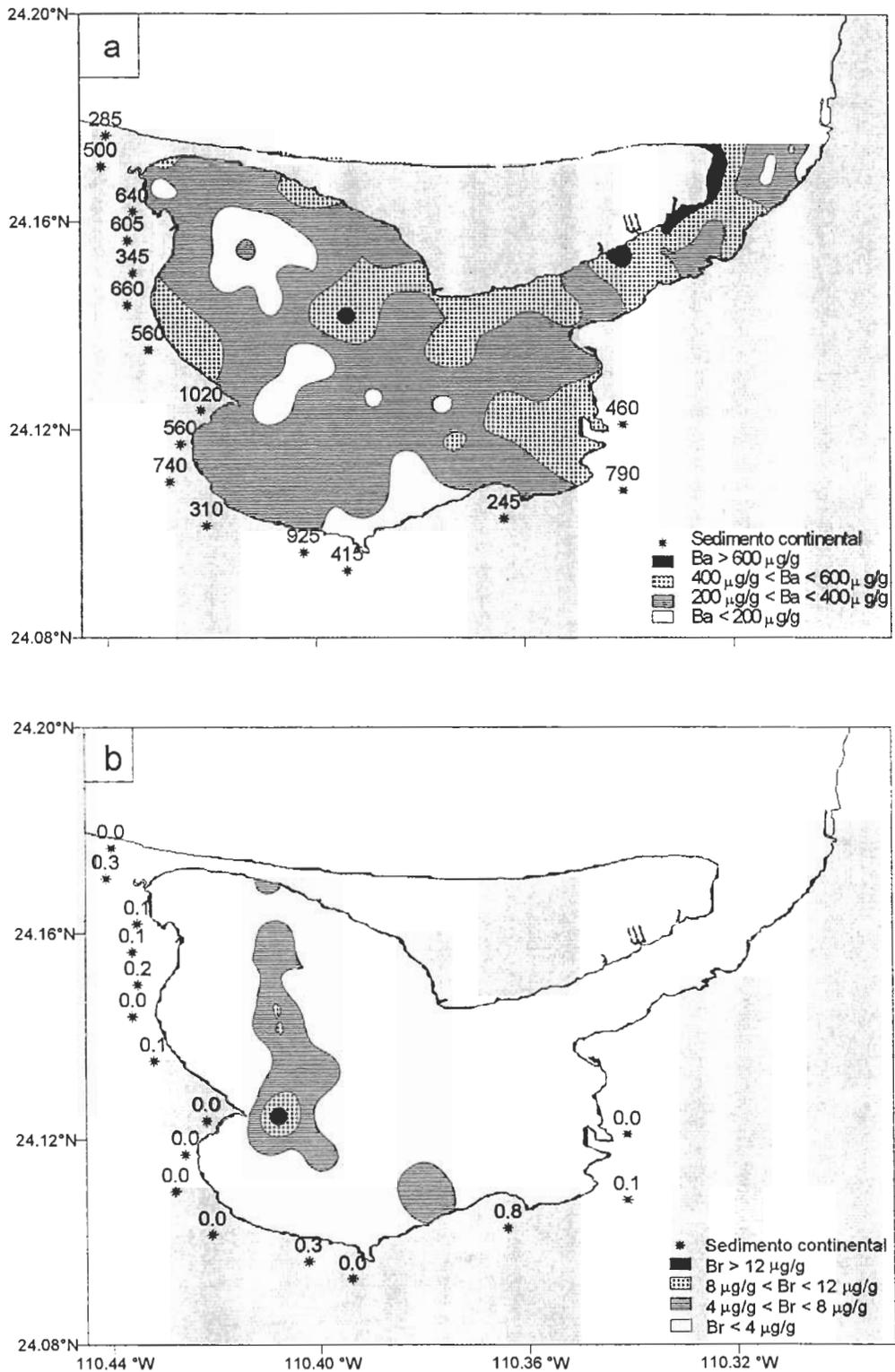


Fig. 9. Distribución de la concentración de Ba (a) y Br (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

Las referencias de este elemento son pocas pero se aprecia que la concentración promedio en la corteza continental ($2.5 \mu\text{g/g}$) es similar a la encontrada en la Laguna de La Paz.

III. 2. 5. Cesio

El promedio de la concentración de Cs oscila de $3 \mu\text{g/g}$, en los sedimentos superficiales del Estero Zacatecas y continentales, a $4 \mu\text{g/g}$ en los lagunares. Las zonas de acumulación del Cs en los sedimentos lagunares se encuentran en las depresiones de las partes norte y sur, y en Chametla ($\text{Cs} > 8 \mu\text{g/g}$) (Fig. 10a).

Los puntos donde el sedimento continental registra más de $4 \mu\text{g/g}$ en Cs son: Chametla, la antigua zona de descarga de aguas residuales y el Centenario. Los datos de referencia son escasos, aunque el contenido promedio de este elemento en la laguna es comparable con el valor en la corteza continental ($3 \mu\text{g/g}$) (Taylor, 1964).

III. 2. 6. Cobalto

La concentración promedio de Co varía de $5 \mu\text{g/g}$, en los sedimentos lagunares y del Estero Zacatecas, a $6 \mu\text{g/g}$ en el material continental. Las zonas de contenido alto de este elemento ($10 \mu\text{g/g}$) en el cuerpo lagunar ocurren en la depresión norte y frente a las zonas del Centenario y Chametla (Fig. 10b). Por otro lado, los valores de Co en el sedimento continental destacan al Estero Zacatecas y Chametla como posibles zonas de aporte.

Tomando en cuenta la concentración de Co en la corteza continental (promedio $25 \mu\text{g/g}$) los sedimentos lagunares presentan contenido bajo. Un valor comparable al de este cuerpo lagunar se registra en Bahía Magdalena ($5.6 \mu\text{g/g}$) (Álvarez-Arellano, 1995), mientras que se señalan registros más altos para el Río Papaloapan, en Veracruz (Rosales *et al.*, 1986), la

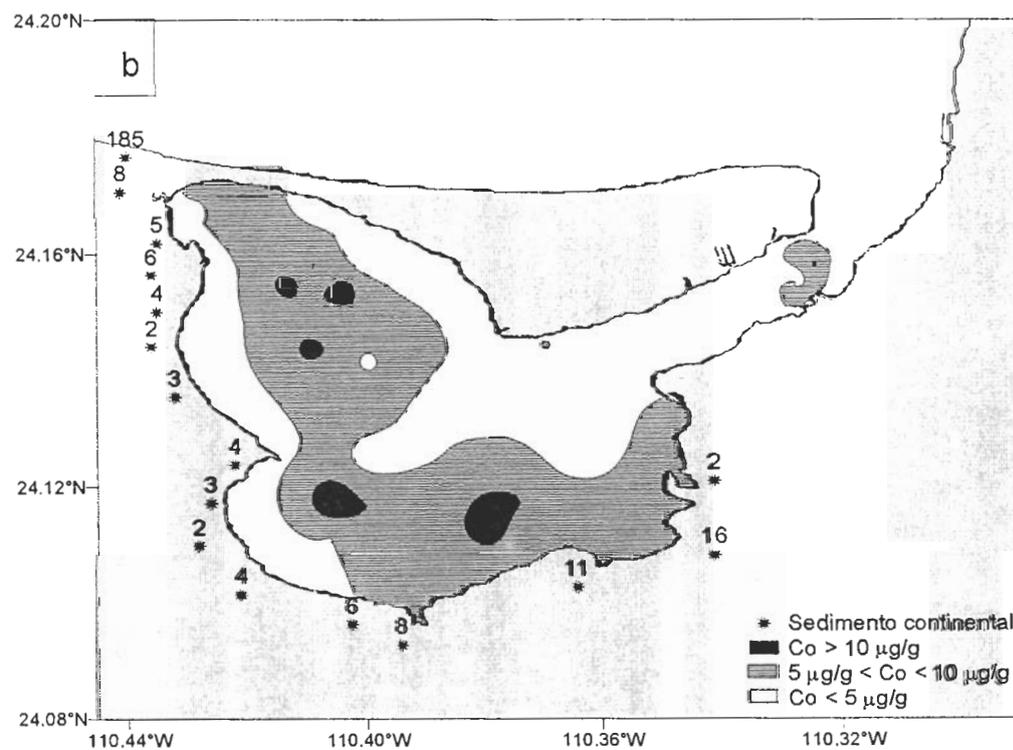
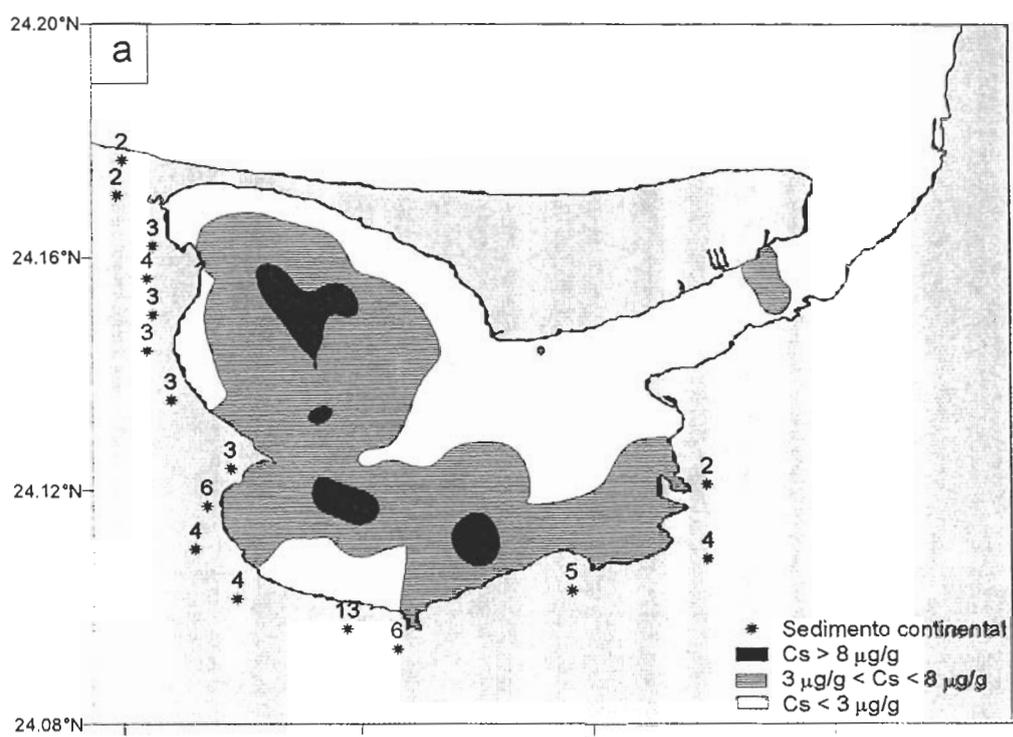


Fig. 10. Distribución de la concentración de Cs (a) y Co (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz

Laguna Altata, en Sinaloa (Green-Ruiz y Páez-Osuna, 1997) y el Puerto de Mazatlán (Soto-Jiménez y Páez-Osuna, 1997), todas con 17 $\mu\text{g/g}$ de Co que los diferencia debido que son ambientes propensos a la acumulación de desechos provenientes de industrias y asentamientos humanos.

Por otro lado, la concentración de Co en el material sedimentario de localidades como: Long Island Sound (8 $\mu\text{g/g}$) (Greig *et al.*, 1977); Río Amarillo (12 $\mu\text{g/g}$) y Río Yangtze (24 $\mu\text{g/g}$), en China (Yuan-Hui *et al.*, 1984); el estuario Poole (11 $\mu\text{g/g}$) y el estuario Hamble (10 $\mu\text{g/g}$), en la Gran Bretaña (Bryan y Langston, 1992), la Bahía Strelok en el Mar de Japón (5 $\mu\text{g/g}$) (Tkalin *et al.*, 1996) y cerca de Mombasa, en Kenia (13 $\mu\text{g/g}$) (Williams *et al.*, 1997); reflejan la escasa influencia antropogénica, la litología característica y la hidrodinámica del área. Además que dichos resultados son semejantes con los contenidos promedio en los sedimentos de la Laguna de La Paz, que probablemente reflejan las condiciones naturales de esta zona. En algunos casos el material continental esta enriquecido en elementos traza, lo que contribuye a reportar concentraciones altas como sucede en la cordillera submarina Kolbeinsey, que tienen entre 43 $\mu\text{g/g}$ y 52 $\mu\text{g/g}$ de Co y consisten de vidrios volcánicos y fragmentos de roca volcánica (Lackschewitz *et al.*, 1994).

En ambientes con impacto antropogénico el Co se encuentra desde 13 $\mu\text{g/g}$, en el estuario Mersey, a 21 $\mu\text{g/g}$, en el estuario Restronguet Creek, en la Gran Bretaña (Bryan y Langston, 1992); 10 $\mu\text{g/g}$ en la Bahía Amursky, en el Mar de Japón (Tkalin *et al.*, 1996). Son casos donde la diferencia con la corteza continental (25 $\mu\text{g/g}$ en promedio) no es significativa.

III. 2. 7. Cromo

La concentración promedio de Cr en los sedimentos oscila de 22 $\mu\text{g/g}$, en los lagunares a 34 $\mu\text{g/g}$ en el Estero Zacatecas. Los valores más altos de este elemento se encuentran en los

sedimentos frente a las zonas del Estero Zacatecas, El Mogote y Punta Comitán. Por otra parte, los puntos donde el sedimento continental obtiene abundante Cr se ubican en el Estero Zacatecas, la antigua zona de descarga de aguas residuales, el CIB y Chametla (Fig. 11a). Las concentraciones de Cr en los sedimentos de la Laguna de La Paz son menores que el contenido promedio ($100 \mu\text{g/g}$) de la corteza continental (Taylor, 1964).

Existen reportes de la concentración de Cr en los sedimentos de ambientes costeros mexicanos que son menores de lo que se registra en la Laguna de La Paz, como sucede en la frontera entre Estados Unidos y México ($12 \mu\text{g/g}$) (Ortega-Lara, 1991), Laguna Mandinga ($7.4 \mu\text{g/g}$) y Laguna Tampamachoco ($9.5 \mu\text{g/g}$) en Veracruz (Villanueva y Botello, 1992), y la Laguna Altata ($16 \mu\text{g/g}$) en Sinaloa (Green-Ruiz y Páez-Osuna, 1997). Estas son localidades donde se consideraría obtener concentraciones elevadas debido a la influencia por actividades antropogénicas. Por otra parte, resultados semejantes con la laguna se registran en los sedimentos del sur de California ($25 \mu\text{g/g}$) (Katz y Kaplan, 1981; Olmez *et al.*, 1991) y Bahía Magdalena en Baja California ($20 \mu\text{g/g}$) (Álvarez-Arellano, 1995), ambos sitios con influencia principalmente de tipo natural (intemperismo y erosión de rocas, descarga pluvial, hidrodinámica).

En ambientes del litoral mexicano con descargas industriales y actividad antropogénica se encuentran concentraciones que sobrepasan los valores promedio de Cr en los sedimentos de la Laguna de La Paz, tal es el caso del Río Papaloapan ($66 \mu\text{g/g}$) y Río Alvarado ($109 \mu\text{g/g}$) en Veracruz (Villanueva y Botello, 1992); Bahía San Quintín ($43 \mu\text{g/g}$) (Martínez-Magaña, 1995), Bahía de Todos Santos ($47 \mu\text{g/g}$) (Romero-Vargas, 1995) y la región fronteriza de Baja California (México) y California (E.U.A.) ($64 \mu\text{g/g}$) (Villaescusa *et al.*, 1997) en Baja California.

En otras partes del mundo las concentraciones son también altas, como se observa en Long Island Sound ($83 \mu\text{g/g}$) (E.U.A.) (Greig *et al.*, 1977), Clyde Sea ($122 \mu\text{g/g}$) (Gran Bretaña) (Förstner, 1980); Bahía Baffin ($91 \mu\text{g/g}$), Bahía Fundy ($73 \mu\text{g/g}$) y el Atlántico ($80 \mu\text{g/g}$)

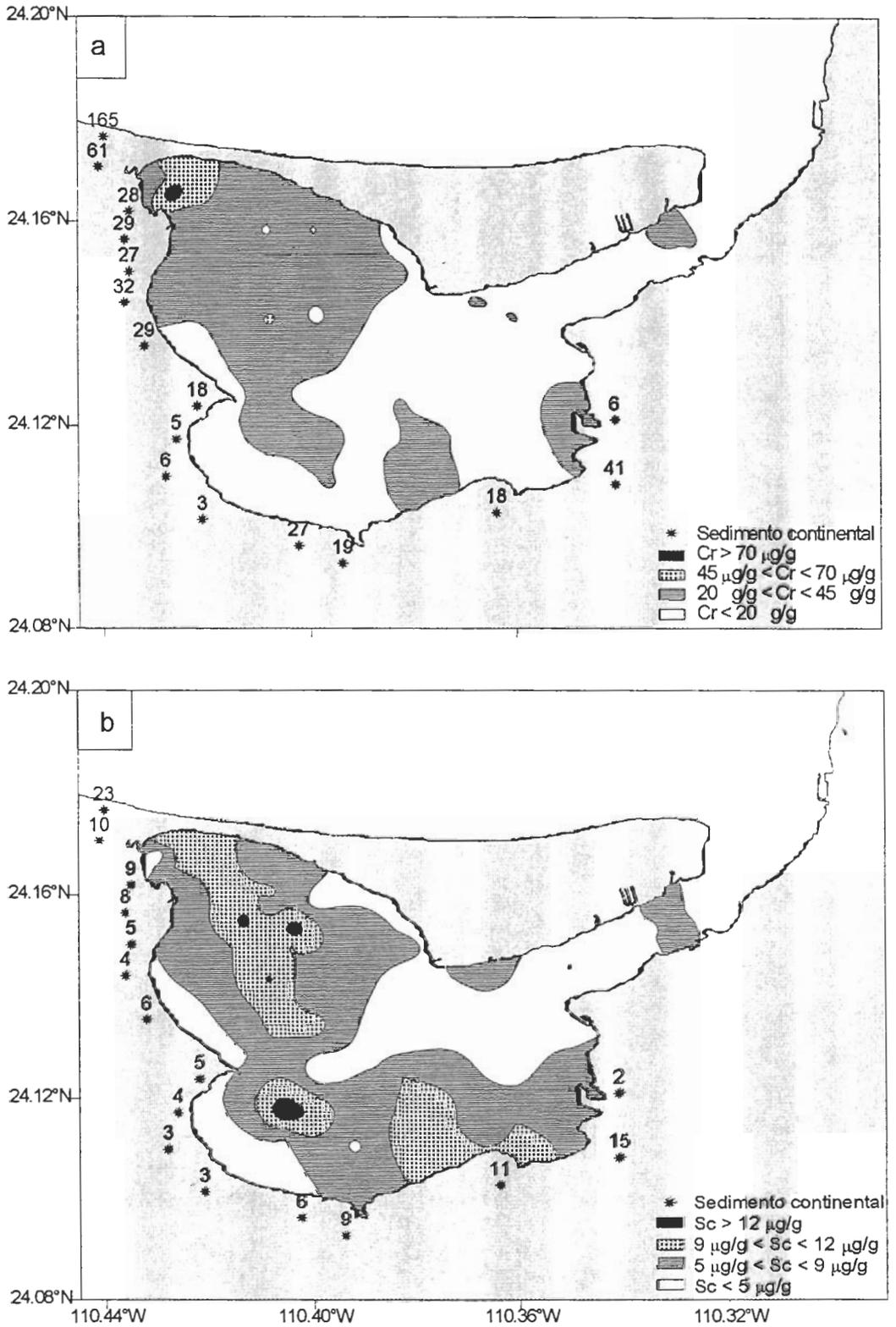


Fig. 11. Distribución de la concentración de Cr (a) y Sc (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz

(Campbell y Loring, 1980); Río Yangtze (83 $\mu\text{g/g}$) y el Río Amarillo (72 $\mu\text{g/g}$) (China) (Yuan-Hui *et al.*, 1984); Golfo Árabe (17 $\mu\text{g/g}$) (Sadiq, 1989); el estuario Hamble (37 $\mu\text{g/g}$) y el estuario Poole (49 $\mu\text{g/g}$) (Gran Bretaña) (Bryan y Langston, 1992), la Bahía Strelak (41 $\mu\text{g/g}$) (Mar de Japón) (Tkalin *et al.*, 1996) y en las cercanías de Mombasa en Kenia (53 $\mu\text{g/g}$) (Williams *et al.*, 1997), que representan ambientes con escaso impacto antropogénico y cuyo contenido que se reporta es reflejo de las características naturales que los caracterizan.

III. 2. 8. Escandio

La concentración promedio del Sc es 6 $\mu\text{g/g}$ tanto en los sedimentos lagunares como continentales. Las zonas con contenido alto de este elemento (9 $\mu\text{g/g}$) corresponden a las depresiones de la parte norte y sur de la laguna, además de Chametla. Por otro lado, en los sedimentos continentales la mayor abundancia se encuentra en el Estero Zacatecas, la antigua zona de descarga de aguas residuales, Chametla, el CIB y Punta Comitán.

El valor promedio registrado en la Laguna de La Paz es de 3 a 4 veces menor respecto al contenido en la corteza continental (22 $\mu\text{g/g}$ promedio) e indica que el Sc es poco abundante en este cuerpo lagunar. Las referencias son escasas, pero se señala su asociación con minerales (piroxenos, anfíboles, biotita) (Goldschmidt, 1958) debido a que precipita junto con arcillas y bauxitas en cantidades pequeñas (3 $\mu\text{g/g}$ -5 $\mu\text{g/g}$). Por otra parte, en los sedimentos de Long Island Sound este elemento se estima en 3.5 $\mu\text{g/g}$ (Greig *et al.*, 1977), valor que es menor respecto al de la Laguna de La Paz y la corteza continental.

Tomando en cuenta para la Laguna de La Paz, los puntos de acumulación y de mayor contenido de Sc en los sedimentos continentales es quizás en la parte oeste de la laguna donde se este depositando más este elemento, asociado a las corrientes litorales en la Bahía de La Paz, aporte terrígeno por la descarga de arroyos y el transporte eólico por las dunas

activas de la barrera arenosa El Mogote. Además de incluir la antigua zona de descarga de aguas residuales, donde se encuentra la desembocadura de un arroyo temporal.

III. 2. 9. Estroncio

La concentración promedio de Sr en los sedimentos varía de 295 $\mu\text{g/g}$ en los continentales a 615 $\mu\text{g/g}$ en los lagunares. La distribución de la concentración de este elemento permite definir al material de Palmira como la zona con mayor contenido ($\text{Sr} > 1400 \mu\text{g/g}$), que se caracteriza por la presencia de abundantes fragmentos carbonatados, disminuyendo la abundancia de Sr en el Estero Zacatecas. Por otra parte, en los sedimentos continentales destacan la antigua zona de descarga de aguas residuales, manglar El Conchalito, Chametla, Punta Comitán y el Estero Zacatecas, probablemente debido a la acumulación y abundancia de minerales (apatita, calcita, piroxenos, anfíboles) (Goldberg y Arrhenius, 1958; Goldschmidt, 1958), con abundante Sr que además influirán en los sedimentos del cuerpo lagunar (Fig. 12a).

El contenido de este elemento en la corteza continental es de 375 $\mu\text{g/g}$ (Taylor, 1964) lo que diferencia a los sedimentos de la laguna que presentan 240 $\mu\text{g/g}$ más que dicho valor. Esto señala a la Laguna de La Paz como un área propensa a la acumulación de Sr, posiblemente debido al aporte de material calcáreo antiguo transportado por los arroyos y el recientemente depositado en bancos de moluscos dentro de la laguna.

Se tienen registros de la concentración de Sr en los sedimentos de ríos de China, como el Yangtze (150 $\mu\text{g/g}$) y el Río Amarillo (220 $\mu\text{g/g}$) (Yuan-Hui *et al.*, 1984) y en Cerro Prieto, en Baja California (237 $\mu\text{g/g}$) (Quintanilla y Suárez, 1996), que son semejantes respecto al promedio que se registró en el material continental de la Laguna de La Paz, mientras que el dato de los sedimentos lagunares es próximo al valor que se reporta en las cercanías de Mombasa en Kenia (600 $\mu\text{g/g}$) (Williams *et al.*, 1997), que es una zona principalmente con influencia litológica.

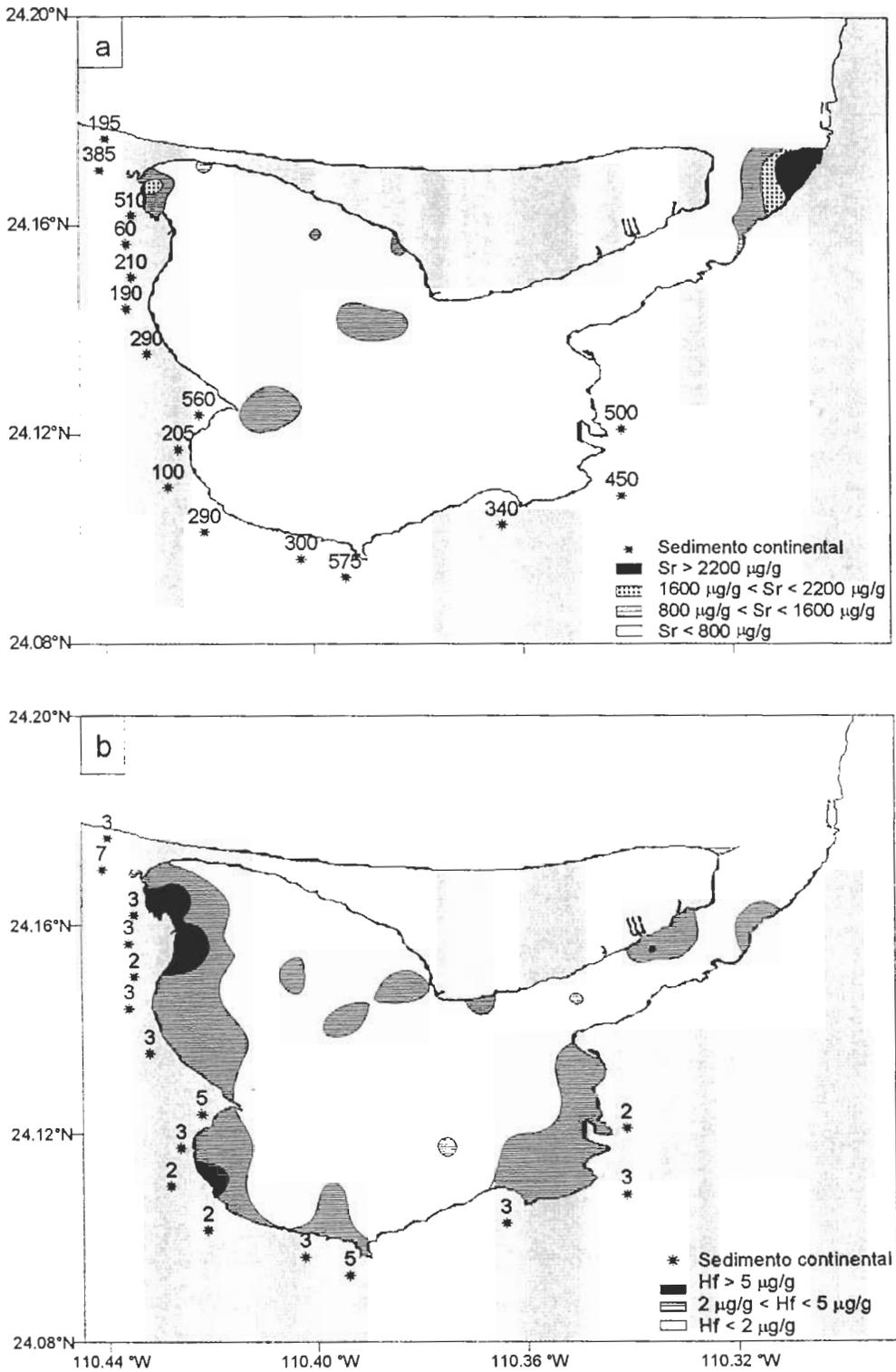


Fig. 12. Distribución de la concentración de Sr (a) y Hf (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

III. 2. 10. Hafnio

El contenido promedio de Hf en los sedimentos oscila entre 2 $\mu\text{g/g}$ en los lagunares a 3 $\mu\text{g/g}$ en el Estero Zacatecas y en los continentales (Fig. 12b). Las zonas de acumulación en el interior de la laguna ocurren frente a las zonas del Estero Zacatecas, CIB y Punta Comitán con más de 4 $\mu\text{g/g}$. Con respecto a los sedimentos continentales, los puntos cuya concentración fue alta ($\text{Hf} > 3 \mu\text{g/g}$) se ubicaron en el Estero Zacatecas, Punta Comitán y Chametla.

La concentración de Hf en la Laguna de La Paz es semejante al contenido promedio de la corteza continental (3 $\mu\text{g/g}$) (Taylor, 1964) e indica un comportamiento estable en este ambiente. En otro trabajo se reporta el contenido en rocas ígneas y sedimentarias de 2.9 $\mu\text{g/g}$ en Australia (Nance y Taylor, 1977), el cual es similar a la laguna y a la corteza. De acuerdo al trabajo de Goldschmidt (1958), se observa que el Hf se concentra en rocas ígneas y en sedimentos con minerales como arcillas y bauxitas. Es posible que la Formación Comondú, de origen volcánico, intervenga como una fuente de aporte de ese elemento en los sedimentos de la laguna, sobretodo en la porción noroeste donde se encuentra la mayor abundancia tanto en el material lagunar como continental.

III. 2. 11. Mercurio

La concentración promedio de Hg es de 0.02 $\mu\text{g/g}$ tanto en los sedimentos lagunares como los continentales. El contenido mayor en el interior de la laguna se observa en el material de la depresión norte y frente a Chametla con más de 0.035 $\mu\text{g/g}$. Por otro lado, los puntos con abundante Hg en el sedimento continental se encontraron en la antigua zona de descarga de aguas residuales y Chametla ($\text{Hg} > 0.02 \mu\text{g/g}$) (Fig. 13a).

Tomando como referencia el valor en la corteza continental (0.08 $\mu\text{g/g}$) se observa que la estimación en la Laguna de La Paz es 4 veces menor de este dato promedio. Sin embargo,

se tienen referencias de algunas áreas de México donde se sobrepasa esta concentración, como en Veracruz en las lagunas de Tampamachoco (0.011 $\mu\text{g/g}$), Mandinga (0.028 $\mu\text{g/g}$) y Coatzacoalcos (0.125 $\mu\text{g/g}$) (Villanueva y Botello, 1992), debido a la descarga de aguas residuales que provienen de industrias y asentamientos humanos. En comparación con la concentración de este elemento en los sedimentos de otras partes del mundo, como la Bahía Baffin (0.09 $\mu\text{g/g}$) y Bahía Fundy (0.06 $\mu\text{g/g}$) (Campbell y Loring, 1980); así como, en el Mar Pechora en Rusia (0.02 $\mu\text{g/g}$) (Loring *et al.*, 1995), se registran concentraciones próximas a la corteza dado que estos ambientes son influenciados por la actividad natural. Existen otros reportes donde la abundancia de Hg refleja situaciones especiales como en las chimeneas hidrotermales (Osuna-López, 1981) y en el material continental de la Veta Regina en Durango (0.2 $\mu\text{g/g}$) donde su presencia se asocia al afloramiento geológico de rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental (Canseco *et al.*, 1997). Es posible que la presencia de Hg en los sedimentos de la Laguna de La Paz provengan del material volcánico intemperizado de la Formación Comondú, aunque también la descarga de aguas residuales es otra fuente que se debe considerar.

Los reportes donde se señala la influencia de la actividad antropogénica en la concentración de Hg en los sedimentos, son de Long Island Sound en E. U. A. (0.5 $\mu\text{g/g}$) (Greig *et al.*, 1977); en el estuario Medway (1 $\mu\text{g/g}$) y en el estuario Mersey (3 $\mu\text{g/g}$) de la Gran Bretaña (Bryan y Langston, 1992); la Bahía Cuerno Dorado (1.4 $\mu\text{g/g}$) del Mar de Japón (Tkalin *et al.*, 1996). Estos registros permiten considerar al área de la antigua zona de descargas en la Laguna de La Paz como una zona de dispersión de Hg, considerando que el contenido en los alrededores es mayor. Por otro lado, se observa que la influencia de la actividad agrícola y de los desechos mineros son significativos para los sedimentos de Paraiba del sur de Brasil, debido que destacan por concentraciones entre 110 $\mu\text{g/g}$ a 150 $\mu\text{g/g}$ (Lacerda *et al.*, 1993) y que sobrepasan el promedio en la corteza continental (0.08 $\mu\text{g/g}$).

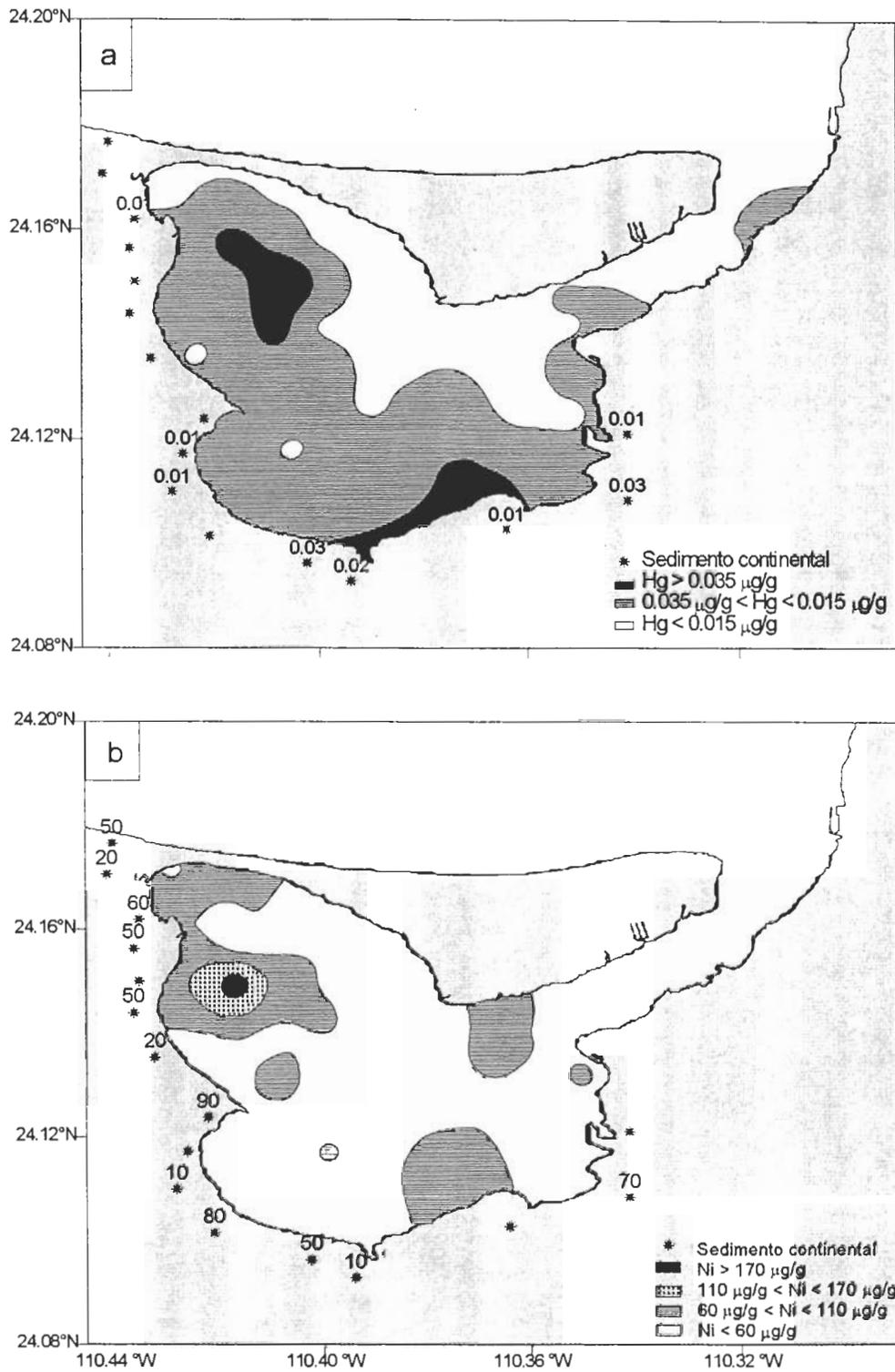


Fig. 13. Distribución de la concentración de Hg (a) y Ni (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

III. 2. 12. Níquel

La concentración promedio de Ni en los sedimentos oscila entre 48 $\mu\text{g/g}$ en los lagunares a 90 $\mu\text{g/g}$ en el Estero Zacatecas. La zona de acumulación principal en el interior de la laguna es frente al CIB ($\text{Ni} > 150 \mu\text{g/g}$) donde coinciden las desembocaduras de algunos arroyos. Por otra parte, el sedimento continental de Punta Comitán, Centenario, la antigua zona de descarga de aguas residuales y el Estero Zacatecas, presentan valores por arriba de 60 $\mu\text{g/g}$ de Ni diferenciándolas como posibles fuentes de aporte para el cuerpo lagunar (Fig. 13b).

Los datos promedio de Ni en la Laguna de La Paz son menores que 75 $\mu\text{g/g}$, concentración en la corteza continental (Taylor, 1964), a excepción del Estero Zacatecas que le sobrepasa con 15 $\mu\text{g/g}$. Los registros en otras partes de México, como es: Bahía Magdalena (8 $\mu\text{g/g}$) (Álvarez-Arellano, 1995), Bahía San Quintín (45 $\mu\text{g/g}$) (Martínez-Magaña, 1995), Bahía de Todos Santos (11.4 $\mu\text{g/g}$) (Romero-Vargas, 1995) y la región fronteriza de Baja California (México) y California (E.U.A.) (17 $\mu\text{g/g}$) (Villaescusa *et al.*, 1997), muestran valores bajos con respecto a la corteza y la Laguna de La Paz, a excepción de B. San Quintín

Por otro lado, referencias de Ni en diversas partes del mundo, como Long Island Sound (E.U.A.) (11 $\mu\text{g/g}$) (Greig *et al.*, 1977), Golfo Árabe (15 $\mu\text{g/g}$) (Sadiq, 1989), el sur de California (15 $\mu\text{g/g}$) (Katz y Kaplan, 1981; Olmez *et al.*, 1991); el Estuario Hamble (19 $\mu\text{g/g}$) y el Estuario Mersey (29 $\mu\text{g/g}$) de Gran Bretaña (Bryan y Langston, 1992), el Mar Pechora en Rusia (25 $\mu\text{g/g}$) (Loring *et al.*, 1995), la Bahía Cuerno dorado (26 $\mu\text{g/g}$) (Tkalin *et al.*, 1996) y en las cercanías de Mombasa en Kenia (19 $\mu\text{g/g}$) (Williams *et al.*, 1997), señalan concentraciones bajas de lo que se reporta en la corteza y para la Laguna de La Paz, a excepción de la Bahía Cuerno Dorado y el Estuario Mersey donde el promedio representa la influencia antropogénica que se producen por la descarga de aguas residuales.

III. 2. 13. Rubidio

La concentración promedio de Rb en los sedimentos superficiales varía de 44 $\mu\text{g/g}$ en los lagunares a 51 $\mu\text{g/g}$ en el área del Estero Zacatecas. En la distribución se encuentra que el contenido mayor de Rb ocurre en el material de la depresión sur y frente a las zonas del CIB y Centenario (Fig. 14a). Por otro lado, el sedimento continental de Chametla, Centenario, Punta Comitán, CIB y el Estero Zacatecas, presenta los valores más altos de Rb (50 $\mu\text{g/g}$) y que probablemente llegan a influenciar los sedimentos lagunares cercanos a través de las precipitaciones pluviales y por acción del viento.

Comparando la concentración de la laguna con respecto al promedio de la corteza continental (90 $\mu\text{g/g}$) (Taylor, 1964) se aprecia que este ambiente el Rb es escaso.

III. 2. 14. Selenio

La concentración promedio de Se en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz es de 1 $\mu\text{g/g}$. En su distribución se encuentran que las zonas de contenido alto ($\text{Se} > 5 \mu\text{g/g}$) ocurren cerca de la depresión norte y de Punta Comitán (Fig. 14b). Por otra parte, la abundancia de Se en los sedimentos continentales diferencia a la antigua zona de descarga de aguas residuales y el CIB, como los puntos con más de 3 $\mu\text{g/g}$ de Se.

Tomando como referencia el valor promedio en la corteza continental de Se (0.05 $\mu\text{g/g}$) (Taylor, 1964), se aprecia que los valores encontrados en este ambiente lagunar son hasta 20 veces mayor al valor citado e indica la presencia muy notable de este elemento en los sedimentos lagunares y continentales, posiblemente originados de los componentes naturales (litología) de esta laguna.

Las referencias destacan algunas zonas con concentraciones anómalas de Se, como sucede en Long Island Sound (1.5 $\mu\text{g/g}$) (Greig *et al.*, 1977) que sobrepasa en 30 veces el

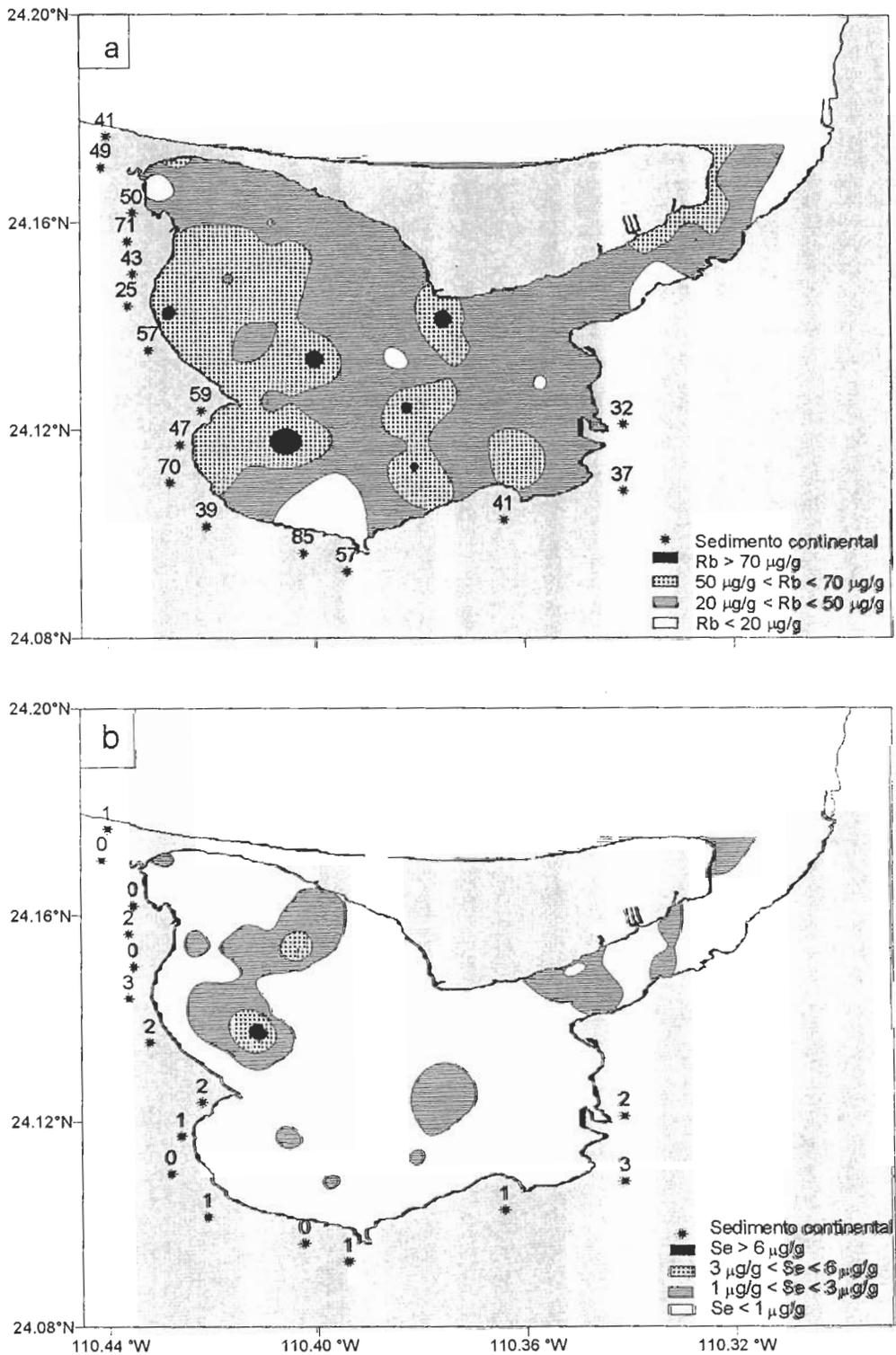


Fig. 14. Distribución de la concentración de Rb (a) y Se (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

promedio, sin embargo, es debido al uso antropogénico en el siglo pasado. Otra área es la Bahía San Francisco (E.U.A.) donde la concentración en los sedimentos de algunos ríos pueden variar de 0.040-0.104 $\mu\text{g/g}$ como en el río Sacramento (actividad antropogénica escasa) a 4 $\mu\text{g/g}$ en el Río San Joaquín (área con desarrollo urbano/industrial) (Johns *et al.*, 1988), que son datos con incrementos de más de 80 veces respecto al promedio en la corteza continental. El aumento en la concentración de Se también se registra en estuarios de la Gran Bretaña, como el Estuario Mersey (0.3 $\mu\text{g/g}$) y el Estuario Poole (1.5 $\mu\text{g/g}$) (Bryan y Langston, 1992), donde los valores presentan similar comportamiento con la Laguna de La Paz. Estas referencias permiten considerar a la laguna como un ambiente enriquecido en Se que probablemente se origina de la naturaleza del material continental (formaciones geológicas) que se vierte en la laguna, dada la escasez de desarrollos industriales.

III. 2. 1. 15. Tantalio

La concentración promedio de Ta en los sedimentos de la Laguna de La Paz se encuentra aproximadamente en 0.5 $\mu\text{g/g}$. En la distribución se observa que los contenidos altos ($\text{Ta} > 0.7 \mu\text{g/g}$) ocurren en los sedimentos del Estero Zacatecas, CIB, la antigua zona de descarga de aguas residuales y en el canal (Fig. 15a). Por otra parte, la abundancia de Ta en los sedimentos continentales diferencia al Estero Zacatecas, CIB, Punta Comitán y Centenario, que probablemente intervienen como fuentes de aporte a través de la descarga y acumulación de material terrígeno durante la descarga de arroyos en el verano.

Las referencias de este elemento son escasas, pero se aprecia con la concentración promedio en la corteza continental (1.0 $\mu\text{g/g}$) (Taylor, 1964) que el valor registrado en la Laguna de La Paz es normal.

III. 2. 16. Torio

La concentración promedio de Th en los sedimentos oscila entre 3 $\mu\text{g/g}$ en los lagunares a 4 $\mu\text{g/g}$ del Estero Zacatecas y en los continentales. El contenido mayor en el interior de la laguna se observa en el material frente al Estero Zacatecas y a las depresiones de la parte norte y sur con mas de 3 $\mu\text{g/g}$ (Fig. 15b). Por otra parte, la concentración en el material continental destaca al Estero Zacatecas y Punta Comitán (Th > 5 $\mu\text{g/g}$), que probablemente influyen los sedimentos lagunares considerando la cercanía entre estos y las descargas torrenciales de material continental durante las precipitaciones pluviales.

El contenido promedio que se registra de Th en la laguna es aproximadamente la mitad respecto al de la corteza continental (9.6 $\mu\text{g/g}$) (Taylor, 1964). Otras referencias son escasas, aunque se aprecia que en la corteza de Kalgoorlie en Australia el Th se encuentra en concentración de 4.3 $\mu\text{g/g}$ (Nance y Taylor, 1977) y que es semejante a lo registrado en la Laguna de La Paz.

III. 2. 17. Uranio

El contenido promedio de U en los sedimentos oscila entre 2 $\mu\text{g/g}$ en el Estero Zacatecas a 5 $\mu\text{g/g}$ en el material continental. La distribución de este elemento permite diferenciar los sedimentos de la parte norte de este cuerpo lagunar frente a El Mogote, con más de 6 $\mu\text{g/g}$. En el caso de los sedimentos continentales destacan los puntos del Estero Zacatecas, el CIB y Chametla con U en más de 5 $\mu\text{g/g}$ (Fig. 16a). Los valores que se encontraron en la Laguna de La Paz sobrepasan de 2 a 5 veces, el contenido promedio de la corteza continental de 0.9 $\mu\text{g/g}$ (Taylor, 1964), lo que permite señalar a esta área como una fuente de U de origen natural que influye en las concentraciones que se registran.

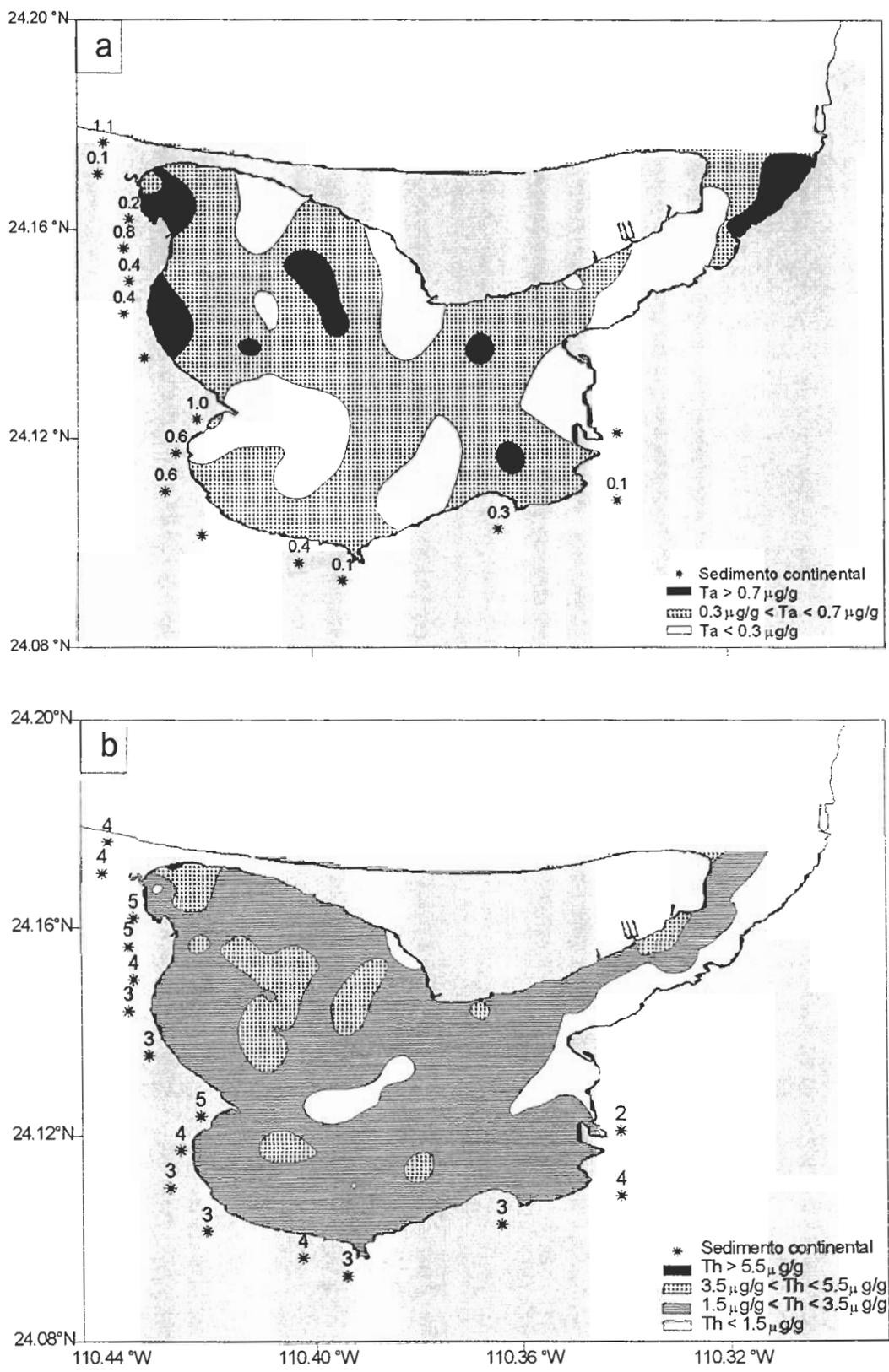


Fig. 15. Distribución de la concentración de Ta (a) y Th (b) en sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

La abundancia con la que se encuentra U en los sedimentos de esta laguna, probablemente reflejan la litología particular en la zona, debido que Goldberg *et al.* (1963) registra valores de 100 $\mu\text{g/g}$ de U en la fosforita, material que abunda en la región y que forma parte de la Formación San Gregorio, además que en la capa de Humboldt se encontró 50 gr de U_3O_8 por tonelada métrica de fosforita (Galli-Olivier, 1993). Por otra parte, el aporte de material vulcanosedimentario de la Formación Comondú en los sedimentos de la laguna, puede contribuir para encontrar concentraciones altas de elementos (Co, V, Fe, Cu), como sucede en la cordillera de Kolbeinsey, donde el material consiste de vidrios volcánicos y fragmentos de roca volcánica (Lackschewitz *et al.*, 1994).

III. 2. 18. Zinc

El contenido promedio de Zn en los sedimentos varía de 30 $\mu\text{g/g}$ en los continentales a 33 $\mu\text{g/g}$ en los lagunares y del Estero Zacatecas. La distribución destaca los sedimentos de las depresiones norte y sur de la laguna donde el contenido del elemento es notable ($\text{Zn} > 80\mu\text{g/g}$). Para el caso del sedimento continental, los valores más altos corresponden a la antigua zona de descarga de aguas residuales, Punta Comitán, Chametla y el Estero Zacatecas con más de 50 $\mu\text{g/g}$ de este elemento (Fig. 16b).

Los valores de Zn en los sedimentos de la Laguna de La Paz son menores al promedio de 70 $\mu\text{g/g}$ que se registra en la corteza continental (Taylor, 1964), mismo comportamiento se observa con el material de la Bahía Ceuta (19 $\mu\text{g/g}$) en Sinaloa (Osuna-López, 1981), Bahía Magdalena (17 $\mu\text{g/g}$) (Álvarez-Arellano, 1995) y la Bahía de Todo Santos (37 $\mu\text{g/g}$) en Baja California (Romero-Vargas, 1995), donde reflejan las condiciones características del área. Por otro lado, los sedimentos de la región fronteriza de Baja California (México) y California (E.U.A.) presentan un promedio de 35 $\mu\text{g/g}$ semejante con lo que se registra a las anteriores áreas,

aunque este lugar es influenciado por las descargas del Estuario de Tijuana, Punta Bandera y Punta Loma (Villaescusa *et al.*, 1997)

En otras localidades donde el contenido de Zn sobresale respecto de la corteza y la Laguna de La Paz, son Cerro Prieto en Baja California (97 $\mu\text{g/g}$) (Quintanilla y Suárez, 1996) y la Laguna Altata en Sinaloa (80 $\mu\text{g/g}$) (Green-Ruiz y Páez-Osuna, 1997), que se atribuye a la acumulación de materiales que entran al medio a través de la erosión de rocas, actividad hidrotermal y la descarga de aguas residuales.

La estimación de Zn en otras partes del mundo como Long Island Sound (89 $\mu\text{g/g}$) (Greig *et al.*, 1977); la Bahía Fundy (77 $\mu\text{g/g}$) y el Mar Atlántico (165 $\mu\text{g/g}$) (Campbell y Loring, 1980); los ríos Yangtze (107 $\mu\text{g/g}$) y el Amarillo (75 $\mu\text{g/g}$) en China (Yuan-Hui *et al.*, 1984), el Golfo de Aqada (72 $\mu\text{g/g}$) en Jordania (Abu Hilal, 1993) y en las cercanías de Mombasa en Kenia (84.5 $\mu\text{g/g}$) (Williams *et al.*, 1997), permiten observar valores próximos o más altos que el de la corteza y la Laguna de La Paz, pero que sin embargo, representan ambientes naturales que se caracterizan por estar propensos a la depositación de diversos materiales transportados por las corrientes, las masas de agua, la descarga por precipitación pluvial, entre otros.

El contenido de Zn en zonas con asentamientos humanos y descargas de aguas residuales, puede variar entre 362 $\mu\text{g/g}$ como en la Bahía Cuerno Dorado en el Mar de Japón (Tkalin *et al.*, 1996) a 2821 $\mu\text{g/g}$ en el estuario Restronguet Creek de la Gran Bretaña (Bryan y Langston, 1992) cuyo problema es grave debido a las descargas de las industrias cercanas.

Tomando como referencia las concentraciones que se obtienen en ambiente con escasa y alta influencia antropogénica, se considera que los valores de Zn en la Laguna de La Paz proceden del aporte de material terrígeno desde la Bahía de La Paz y los alrededores, ya sea por la descarga de arroyos, transporte eólico, corrientes litorales y de marea.

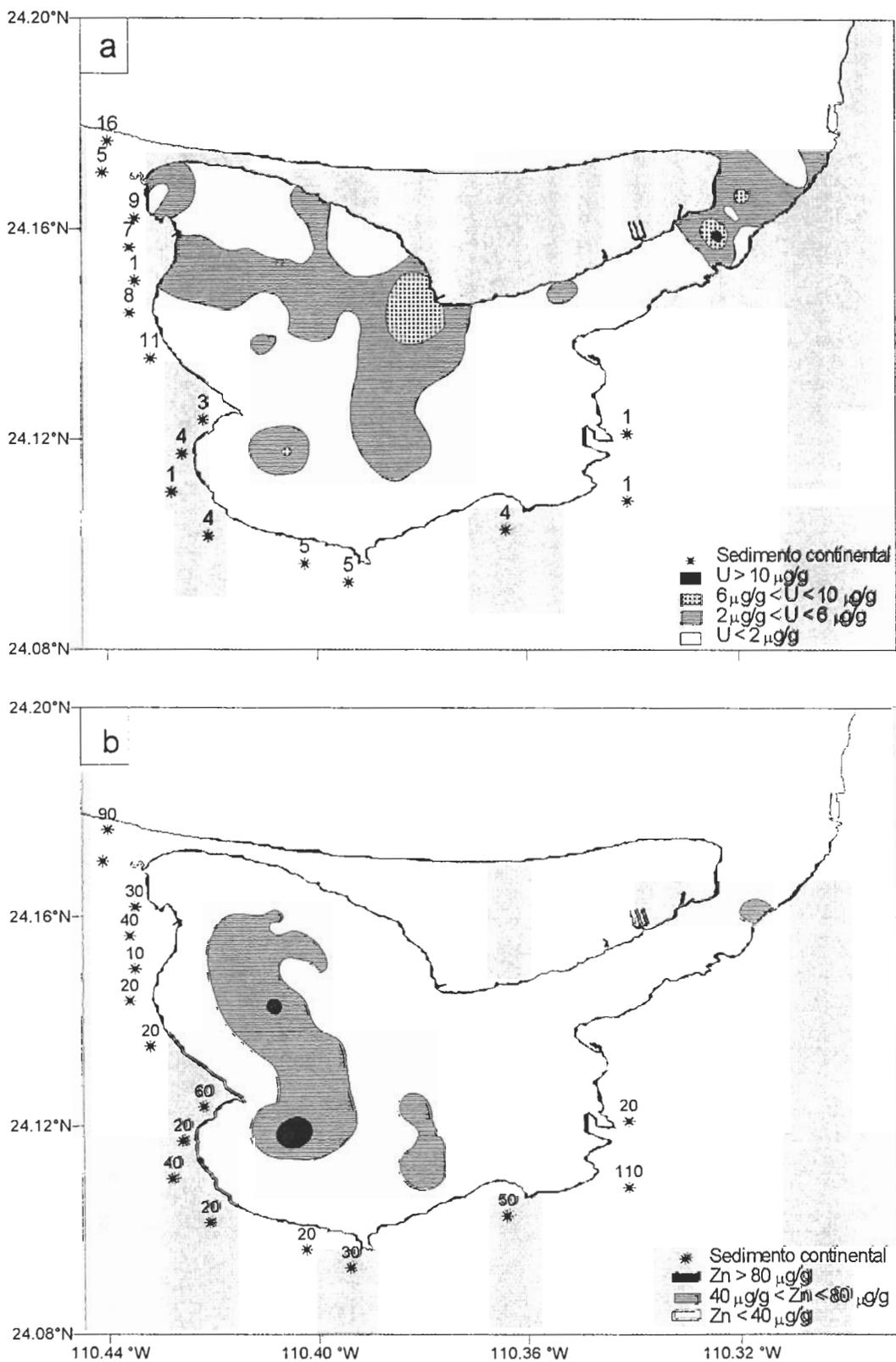


Fig. 16. Distribución de la concentración de U (a) y Zn (b) en sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

III. 2. 19. Zirconio

El contenido de Zr en los sedimentos superficiales oscila entre 41 $\mu\text{g/g}$ en el Estero Zacatecas a 120 $\mu\text{g/g}$ en los continentales. En la distribución se destacan los sedimentos frente a la barrera arenosa El Mogote (punta), que presentan valores por arriba de 180 $\mu\text{g/g}$ de este elemento. Por otra parte, en los continentales sobresalen los puntos del Estero Zacatecas, Chametla, Centenario, Punta Comitán y el CIB, donde se encuentra más de 200 $\mu\text{g/g}$ de Zr (Fig. 17). Esta abundancia indica que posiblemente el Zr se incorpora a los sedimentos de la laguna a través del aporte de material continental.

El promedio de Zr en la corteza es 165 $\mu\text{g/g}$ (Taylor, 1964), el cual es mayor de lo que se observa en la Laguna de La Paz. Por otro lado, se cuentan con algunos registros de otras áreas en el mundo como en China, donde los ríos Yangtze (160 $\mu\text{g/g}$) y el Amarillo (140 $\mu\text{g/g}$) (Yuan-Hui *et al.*, 1984) reflejan las concentraciones que derivan del aporte continental, erosionado, acumulado y transportado, y que son muy semejantes con el promedio que se registran en el sedimento continental de la Laguna de La Paz. Por otra parte, en las cercanías de Mombasa en Kenia este elemento es muy abundante (337 $\mu\text{g/g}$) (Williams *et al.*, 1997).

De acuerdo con el trabajo de Espitia *et al.* (1997), este elemento se puede encontrar en depósitos ígneos asociado a minerales pesados (ilmenita, granate, monacita) de arenas zirconíferas. En el caso de la Laguna de La Paz, este elemento probablemente proviene del material ígneo intemperizado de la Formación Comondú, cuyo origen es volcánico.

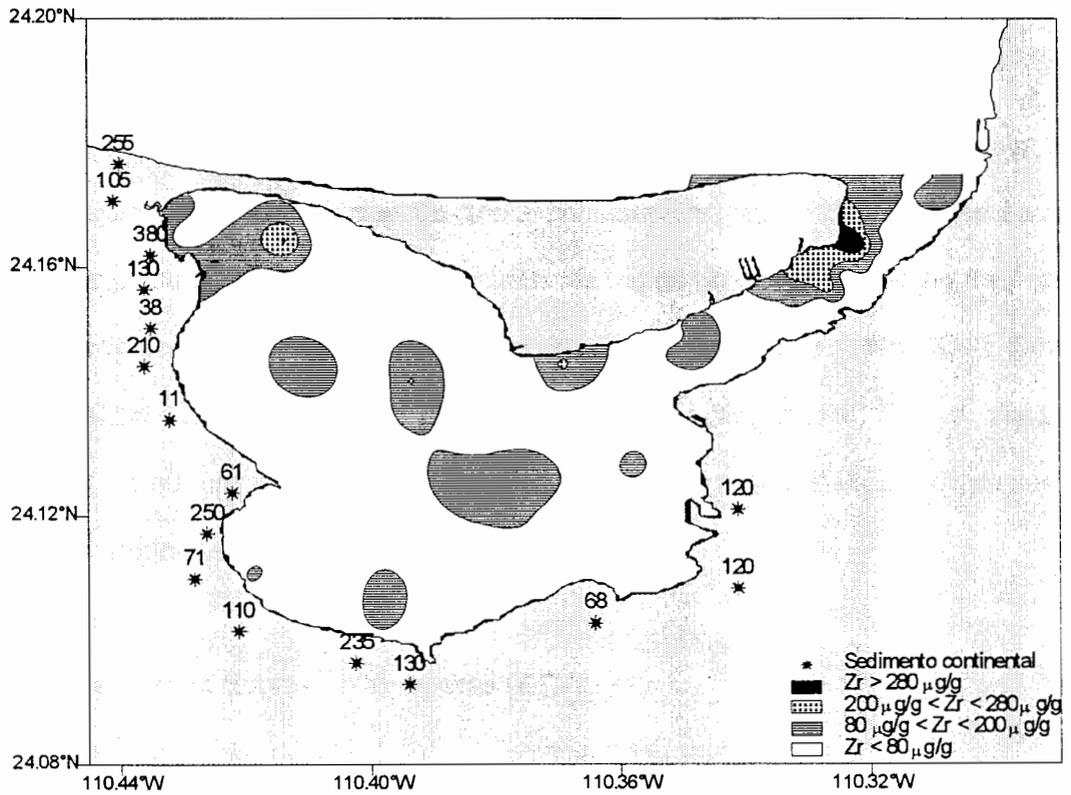


Fig. 17. Distribución de la concentración de Zr en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

III. 3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ELEMENTOS DEL GRUPO DE TIERRAS RARAS (ETR) EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES DE LA LAGUNA DE LA PAZ

Los elementos del grupos de las Tierras Raras (ETR) se caracterizan por presentar propiedades químicas similares, que los diferencia como un grupo independiente dentro de los elementos traza. De acuerdo a sus particularidades, estos pueden separan en tres grupos: los llamados elementos de las tierras raras ligeras (*ETRL*) (La, Ce, Pr, Nd, Sm), tierras raras promedio (*ETRM*) (Eu) y tierras raras pesadas (*ETRP*) (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu). El Eu se considera como un elemento independiente por sus características anómalas que se destacarán posteriormente.

III. 3. 1. Elementos de tierras raras ligeras (ETRL)

Este grupo de elementos incluye a: La, Ce, Pr, Nd y Sm, cuyas concentraciones promedio se detallan en la Tabla II. La distribución espacial de sus contenidos en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz, permite identificar puntos comunes de acumulación como el Estero Zacatecas, el área de influencia del arroyo La Ardilla, el canal (frente a El Mogote) y frente a CICIMAR (Figs. 18, 19, 20a). Tomando en cuenta la ubicación de las áreas propensas a la acumulación, se observa que coinciden con la desembocadura de arroyos y de sitios propensos a la depositación de material terrígeno o continental, como son las áreas de manglares (El Mogote, punta CICIMAR, Estero Zacatecas). Probablemente estos sean algunos de los factores que determinan su concentración y depositación en los sedimentos y su distribución espacial en la Laguna de La Paz.

Por otra parte, el contenido promedio en los sedimentos continentales diferencia las zonas del Estero Zacatecas, el área del cauce del arroyo La ardilla y Punta Comitán. Estas localidades, por la concentración que alcanzan de los elementos, son probablemente las vías de entrada de los elementos a través del material erosionado e intemperizado de las serranías

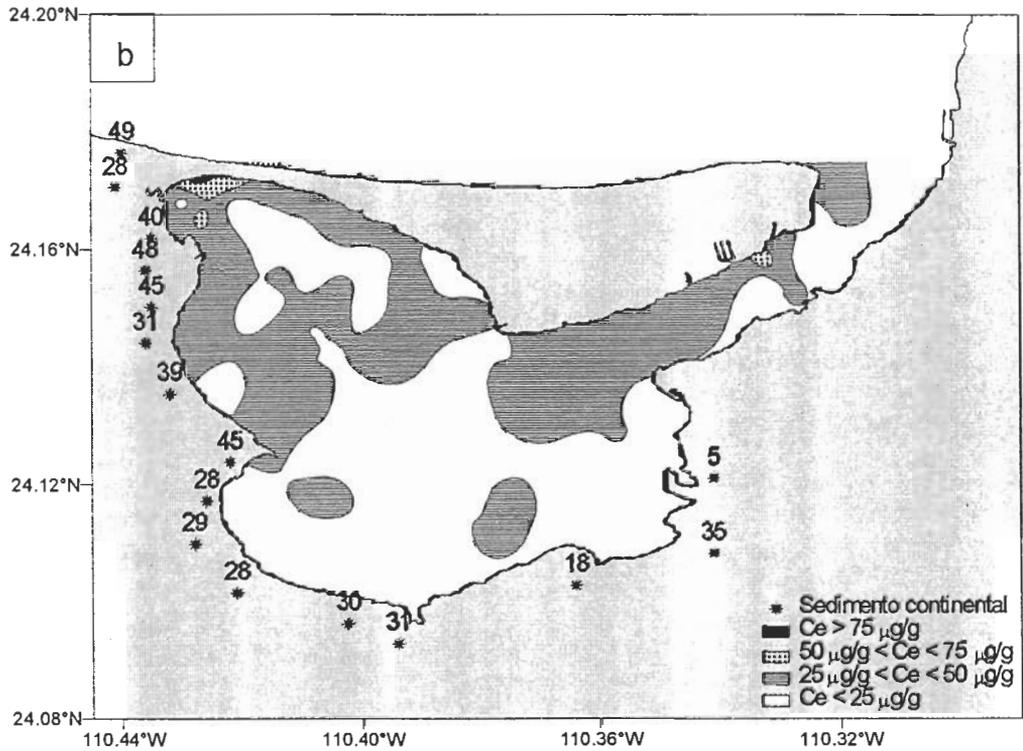
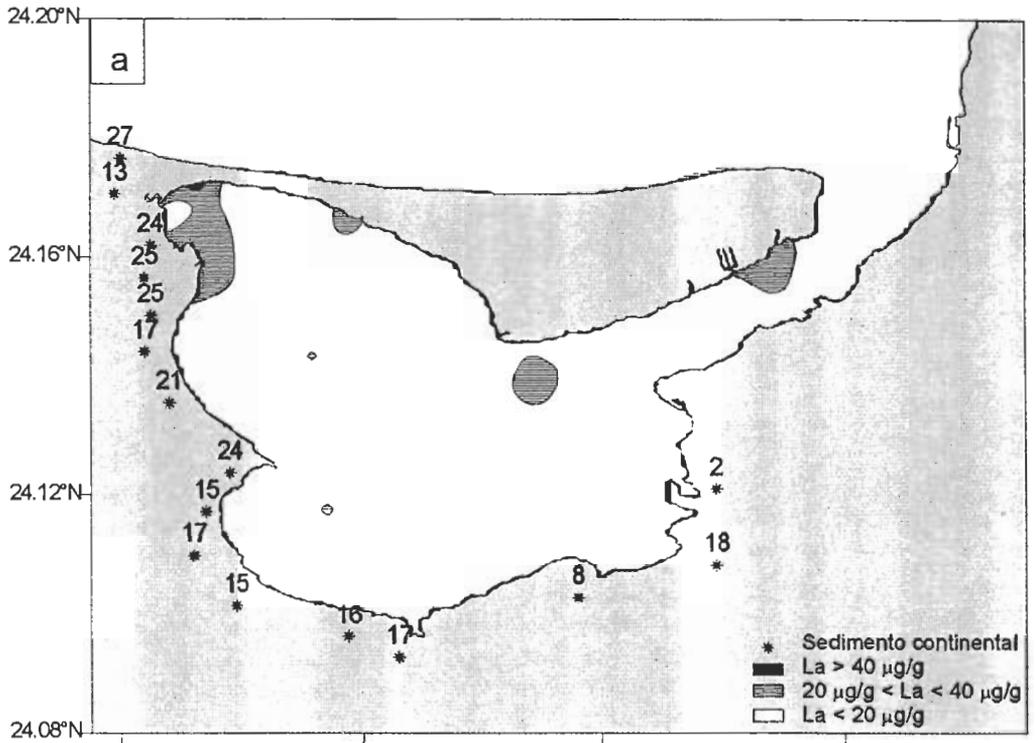


Fig. 18. Distribución de la concentración de La (a) y Ce (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz

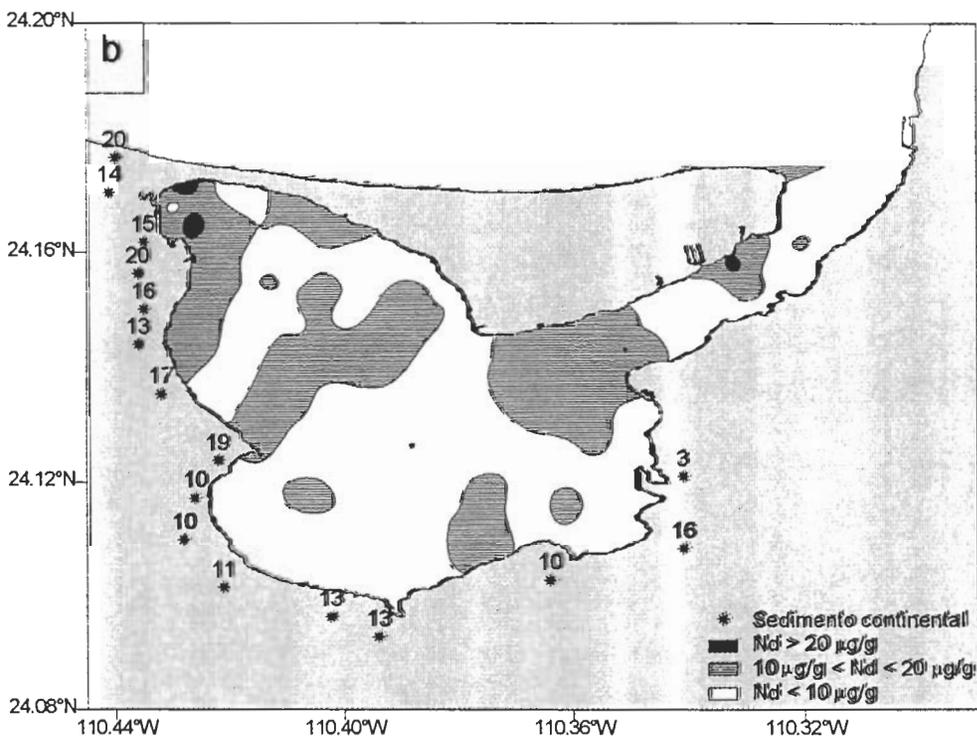
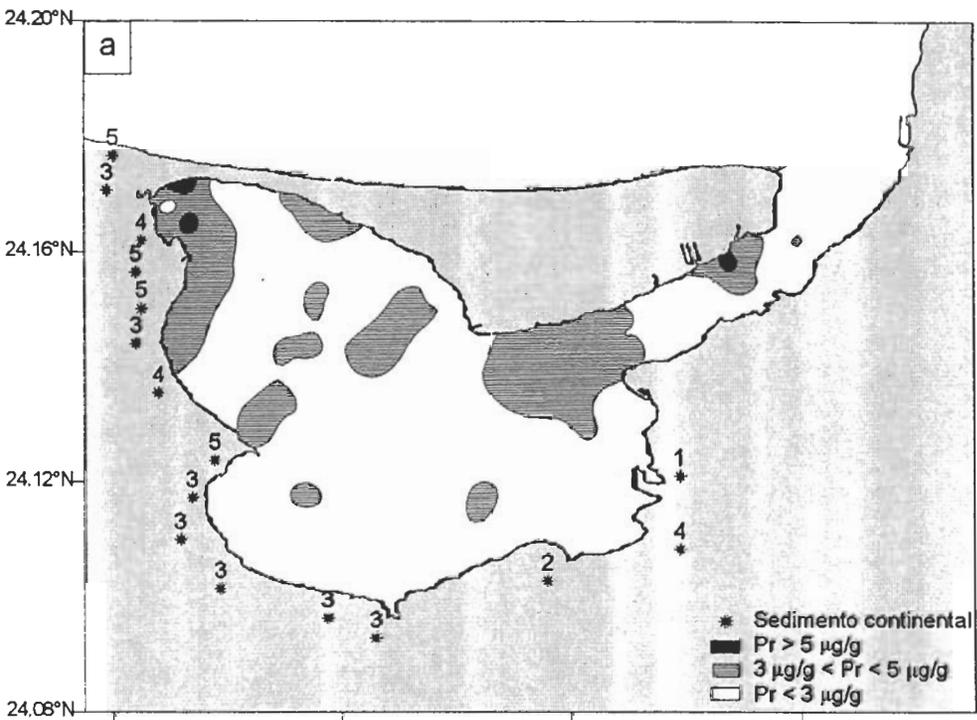


Fig. 19. Distribución de la concentración de Pr (a) y Nd (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz

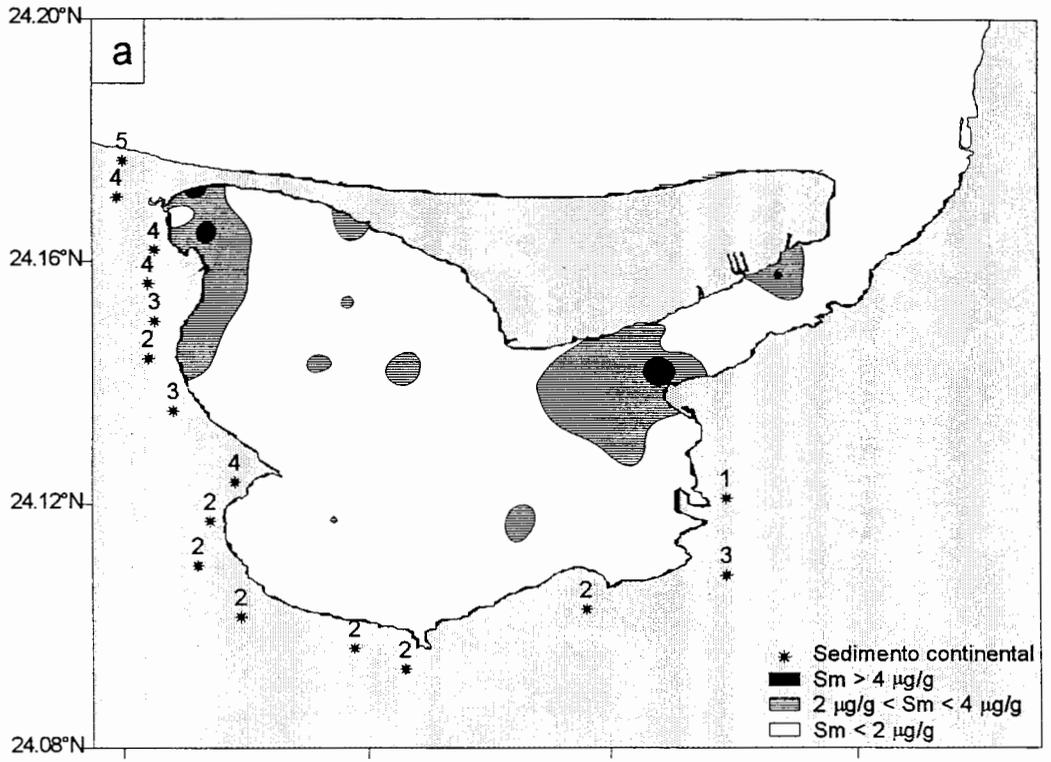


Fig. 20. Distribución de la concentración de Sm en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz

en los alrededores. Sin embargo, se aprecia que la mayor influencia se produce en la porción noroeste de la Laguna de La Paz, es quizás se asocia a la acumulación de material en la barrera arenosa El Mogote y al patrón de circulación del agua en la Bahía de La Paz (Jiménez, 1996; Jiménez *et al.*, 1997).

Tomando en cuenta las concentraciones promedio que se señalan para cada uno de los elementos en la corteza continental (Taylor, 1964), se observa que los valores de La, Ce, Pr, Nd y Sm en los sedimentos lagunares, del Estero Zacatecas y en los continentales, son semejantes o menores a los señalados (Tabla II). Esto indica que las concentraciones registradas en la Laguna de La Paz son influenciadas por las características litológicas y la hidrodinámica de la zona que por alguna de tipo antropogénico.

Tabla III. Concentraciones promedio ($\mu\text{g/g}$) de los elementos de las tierras raras ligeras (ETRL) en los sedimentos y corteza continental de distintas áreas de estudio.

Área de estudio	La	Ce	Pr	Nd	Sm
Corteza continental ¹	30	60.0	8	28	6
Corteza continental ²	32	73.0	8	33	6
San Juan de la Costa ³	38	46.0	6	25	5
San Juan de la Costa (basalto) ³	101	78.0	-	-	10
Bahía Vizcaino ⁴	12	14.5	3	7	2
Cerro Prieto ⁵	26	21.0	-	-	-
<i>Laguna de La Paz</i>	15	26.0	3	10	3

¹Taylor, (1964); ²Ross y McLennan, (1985); ³Piper, (1991); ⁴Daesslé-Heuser, (1993); ⁵Quintanilla y Suárez, (1996)

Existen otras regiones donde ha sido determinada la concentración de estos elementos, tal es el caso, de San Juan de la Costa (Piper, 1991), Bahía Vizcaino (Daesslé-Heuser, 1993) y Cerro Prieto (Quintanilla y Suárez, 1996). De acuerdo a estos registros, los contenidos que se

tienen en los sedimentos de la Laguna de La Paz, son semejantes y en algunos casos menores de los que se señalan en este trabajo.

Por otra parte, es importante considerar la contribución del material continental de San Juan de la Costa en las características geoquímicas de los sedimentos de la Laguna de La Paz, tomando en cuenta que concentraciones de ETRL en material marino, como basalto, son altas además que dicho material erosionado e intemperizado, llega a acumularse en la porción sur de la bahía (El Mogote) a través de la acción de las corrientes, oleaje, corrientes de marea y viento.

III. 3. 2. Elementos de tierras raras promedio (ETRM)

El elemento de tierra rara promedio se considera únicamente el Eu debido que puede fraccionarse de los restantes ETR bajo condiciones reductoras, que producen un cambio de valencia al pasar de un estado trivalente (Eu^{3+}) a divalente (Eu^{2+}). La reducción en el Eu, permite su enriquecimiento en los sedimentos superficiales por la facilidad con que el ion Eu^{2+} es aceptado en minerales, como los feldespatos (Clark, 1984; McArthur y Walsh, 1984).

En la Laguna de La Paz, la concentración promedio de Eu en los sedimentos es $1 \mu\text{g/g}$ tanto en el material lagunar como continental. Las zonas de mayor acumulación en los sedimentos superficiales se encontraron frente a la barrera arenosa El Mogote y en el Estero Zacatecas ($\text{Eu} > 1 \mu\text{g/g}$) (Fig. 21), mientras en los sedimentos continentales los puntos localizados en el Estero Zacatecas, CIB, Punta Comitán, Centenario, Chametla y la antigua zona de descarga de aguas residuales, probablemente intervienen como fuentes de aporte de Eu para los sedimentos lagunares dadas las concentraciones ($1 \mu\text{g/g}$).

Es posible, tomando en cuenta las áreas de acumulación, que el Eu se asocie a las descargas de material continental por arroyos (estacional), el aporte eólico en la zona de dunas

de El Mogote y a la acumulación de material en las zonas de manglar, localizadas en el Estero Zacatecas y en la parte adyacente al canal en la barrera arenosa.

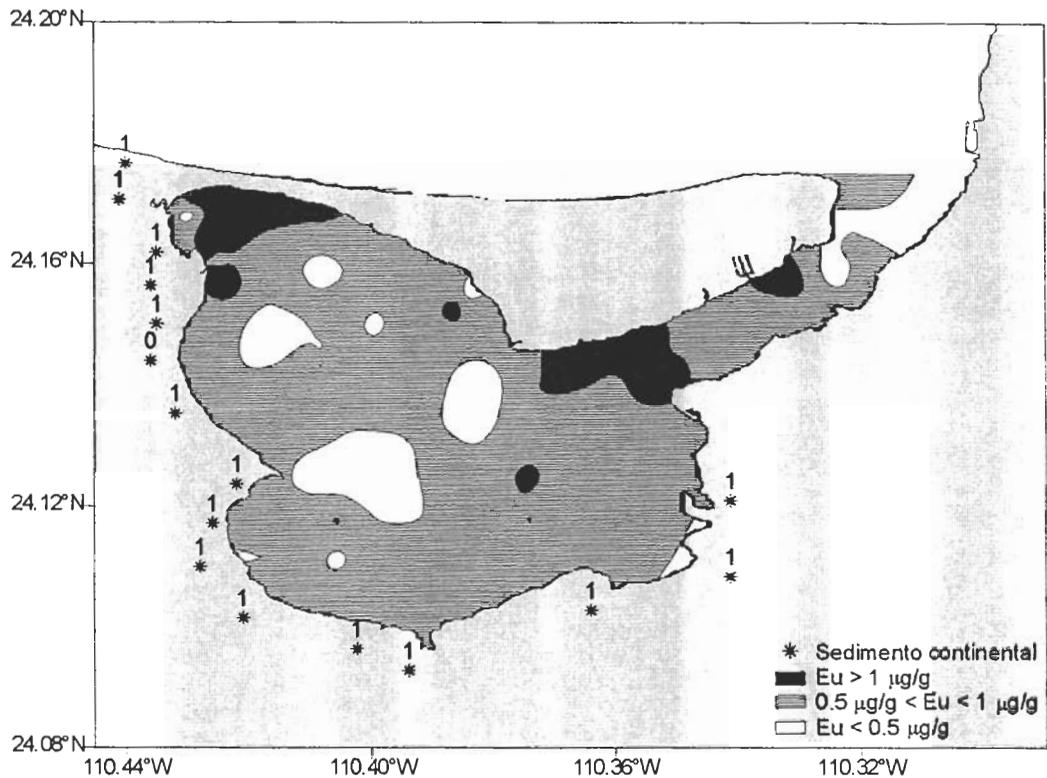


Fig. 21. Distribución de la concentración de Eu en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

El valor promedio que se estima en la corteza continental es $1 \mu\text{g/g}$ (Taylor, 1964; Nance y Taylor, 1977; Ross y McLennan, 1985), semejante al que se obtiene en los sedimentos de la Laguna de La Paz. Existen otras zonas donde ha sido determinada la concentración de Eu, tales como, San Juan de la Costa ($1.4 \mu\text{g/g}$ en sedimentos- $3 \mu\text{g/g}$ en basalto) (Piper, 1991) y en Bahía Vizcaíno ($0.5 \mu\text{g/g}$) (Daesslé-Heuser, 1993). El contenido que se registra en los sedimentos son próximos a los que tiene la laguna, aunque se aprecia que en la Bahía Vizcaíno, el Eu está empobrecido. Nuevamente se observa que San Juan de la Costa es una fuente importante de aporte de Eu en la Laguna de La Paz, debido a las

concentraciones que se reportan en el basalto y al transporte de material intemperizado por la hidrodinámica en el área.

III. 3. 3. Elementos de tierras raras pesadas (ETRP)

Los elementos de las tierras raras pesadas contempla: Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu, cuyas concentraciones se presentan en la Tabla II. La distribución espacial de las concentraciones en los sedimentos del interior de la laguna, diferencia algunas zonas comunes de acumulación como: la desembocadura del arroyo La Ardilla, la parte más delgada de El Mogote y el área adyacente a la barrera en el canal. Por otra parte, los puntos con mayor abundancia de estos elementos en los sedimentos continentales son el Estero Zacatecas, el cauce del arroyo La Ardilla y Punta Comitán, y con menor contribución se puede considerar a la antigua zona de descarga de aguas residuales (Figs. 22, 23, 24, 25).

Se tienen registros de la concentración de estos elementos para otras áreas de investigación y en la corteza continental (Tabla IV), donde se observa que los valores promedio en los sedimentos de la Laguna de La Paz son semejantes a los reportados en la corteza continental y con lo reportado por Piper (1991), en los sedimentos de San Juan de la Costa. Por otra parte, los valores que registra Daeeslé-Heuser (1993) en la Bahía Vizcaíno son menores respecto de la corteza y la laguna en los elementos Gd, Ho, Er, Yb.

La comparación entre los patrones de distribución de los elementos de tierras raras ligeras (ETRL), tierras raras promedio (ETRM) y las tierras raras pesadas (ETRP), no muestra diferencia alguna ya que presentan en común las mismas zonas de acumulación (sedimento lagunar: Estero Zacatecas, el área de influencia del arroyo La Ardilla y en el canal junto a El Mogote; sedimento continental: Estero Zacatecas, el arroyo La Ardilla y Punta Comitán).

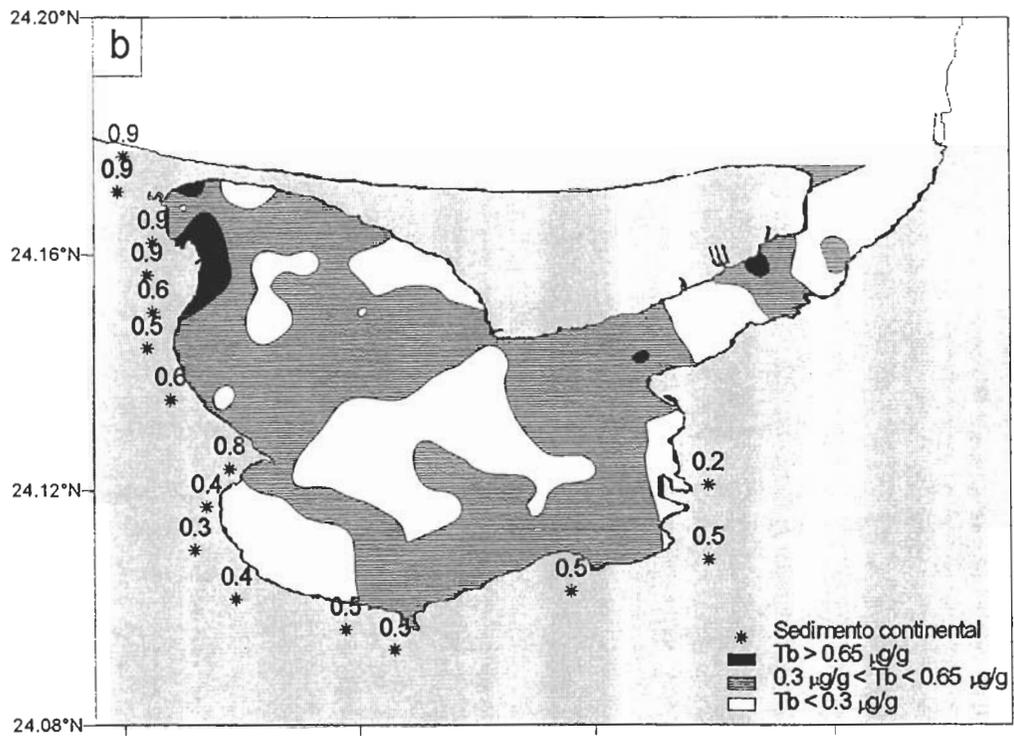
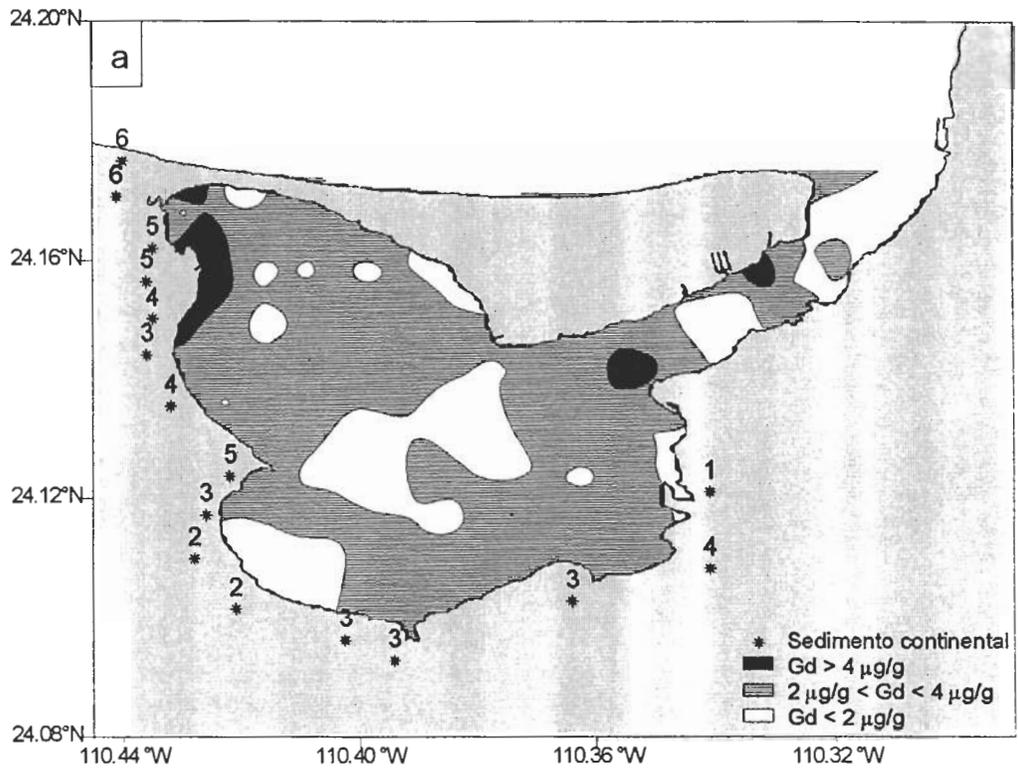


Fig. 22. Distribución de la concentración de Gd (a) y Tb (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

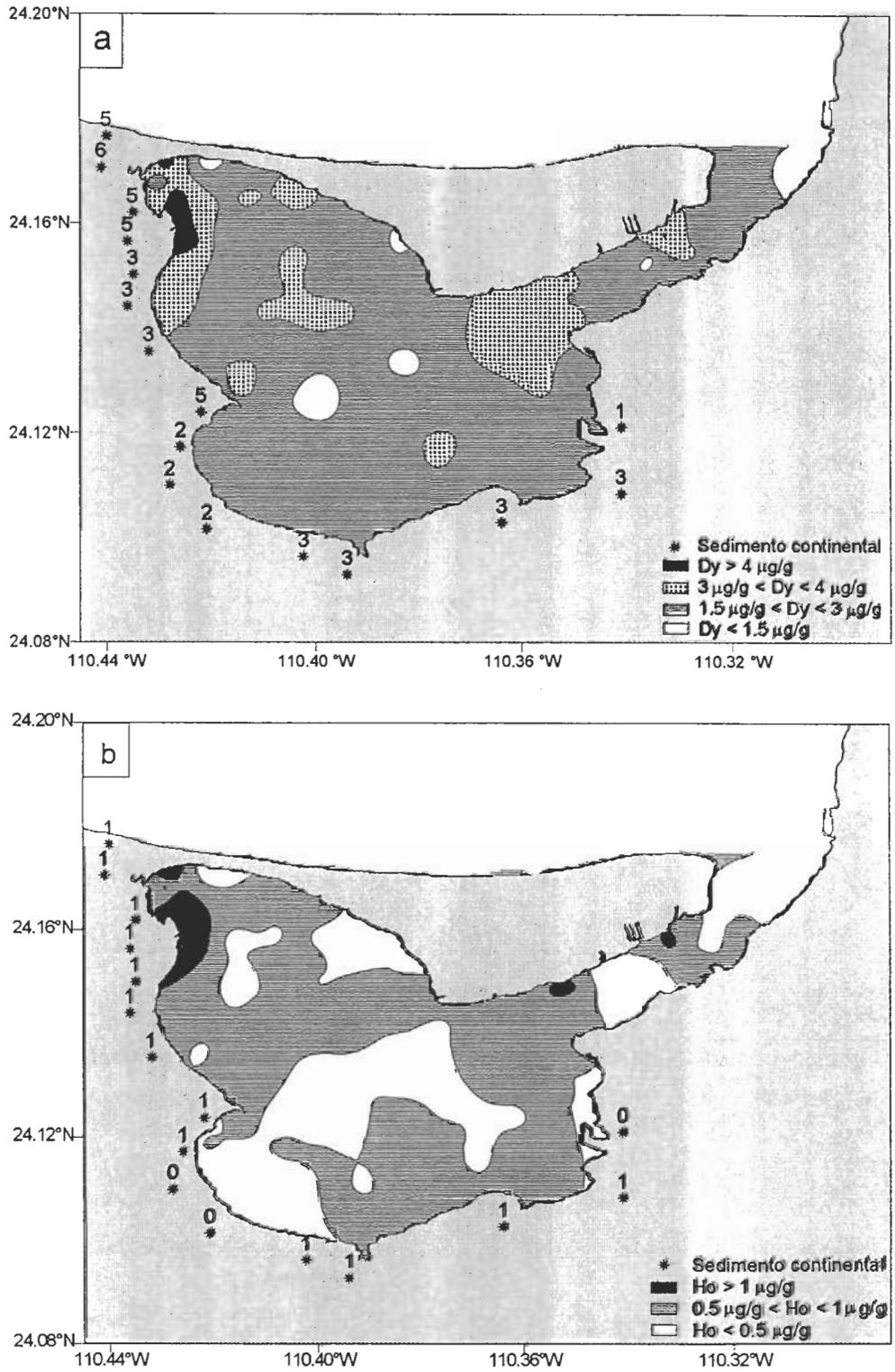


Fig. 23. Distribución de la concentración de Dy (a) y Ho (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz

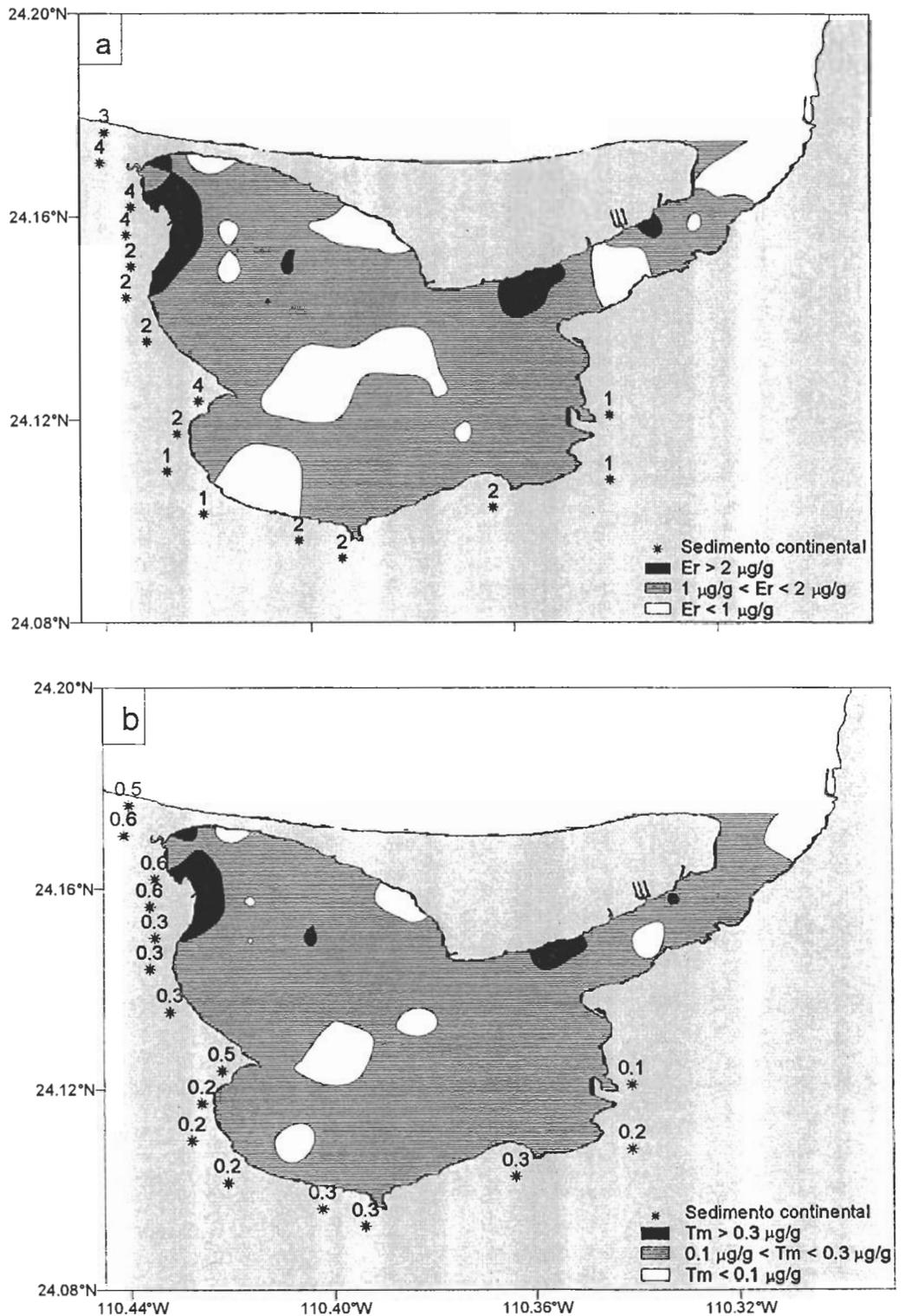


Fig. 24. Distribución de la concentración de Er (a) y Tm (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

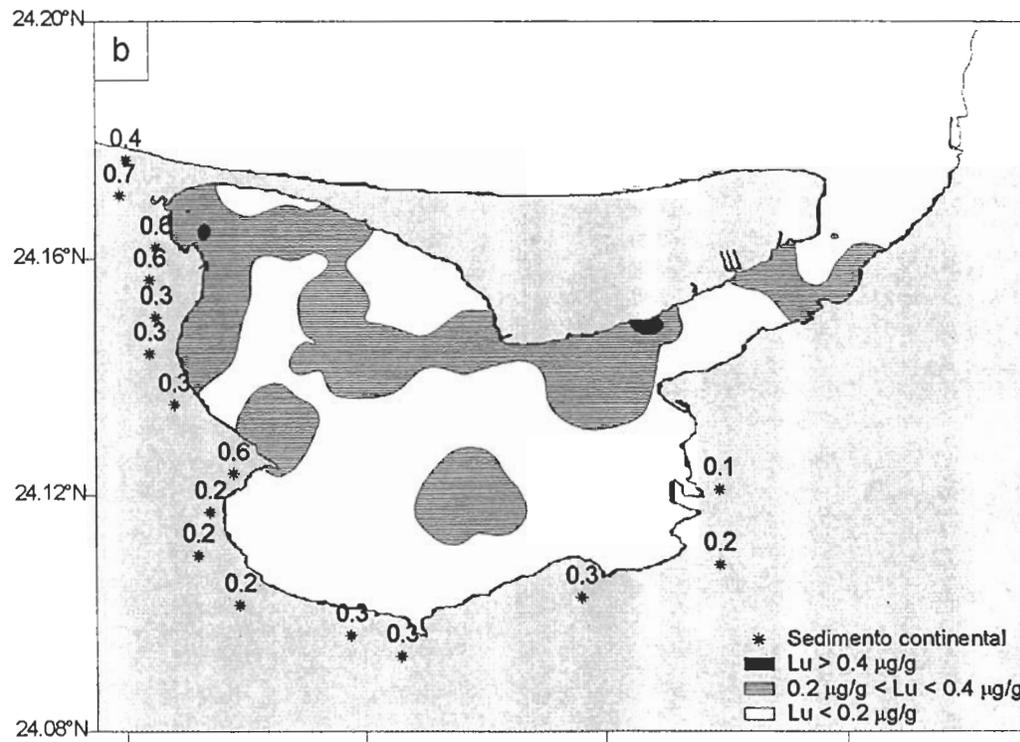
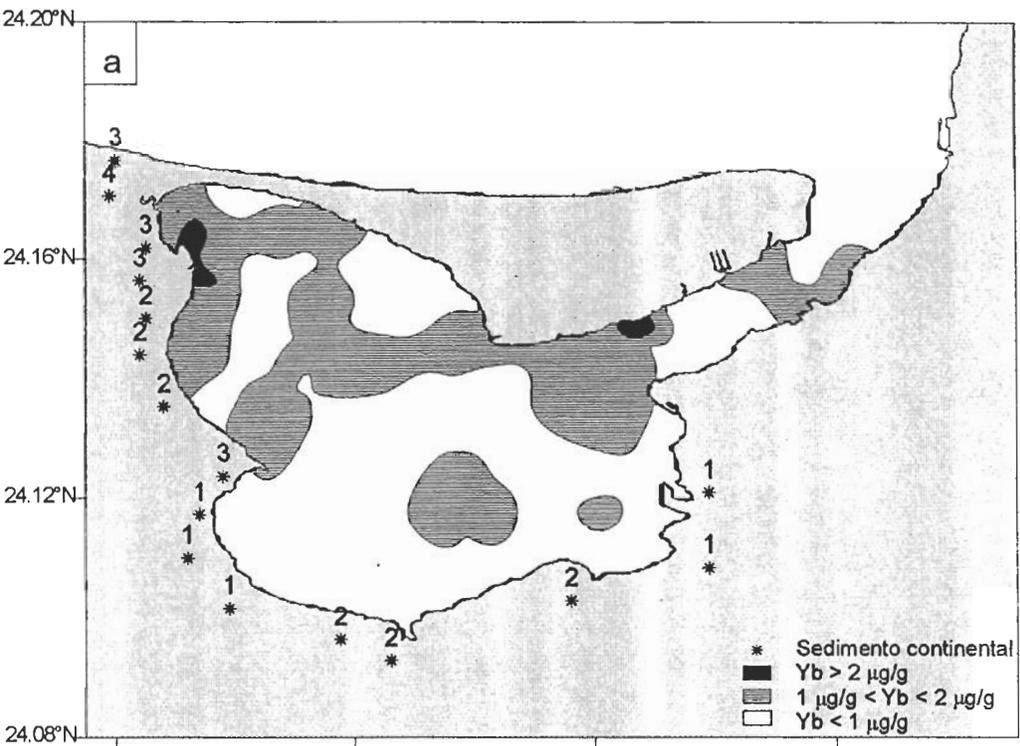


Fig. 25. Distribución de la concentración de Yb (a) y Lu (b) en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

Tabla IV. Concentraciones promedio ($\mu\text{g/g}$) de los elementos de las tierras raras pesadas (ETRP) en los sedimentos y corteza continental de distintas áreas de estudio.

Área de estudio	Dy	Gd	Tb	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Corteza continental ¹	3.0	5.4	0.90	1.20	3.0	0.5	2.0	0.5
Corteza continental ²	3.0	5.0	0.85	1.00	3.4	0.5	-	0.5
Corteza continental ³	3.0	3.0	0.40	0.60	1.7	-	-	-
San Juan de la Costa ⁴	-	6.5	-	1.00	3.0	-	2.6	0.4
S. Juan de la Costa (basalto) ⁴	-	13.9	-	3.00	7.0	-	6.7	1.0
Bahía Vizcaino ⁵	1.6	1.5	-	0.25	1.0	-	0.8	-
Laguna de La Paz	3.0	3.0	0.40	0.60	1.6	0.2	1.0	0.2

¹Taylor, (1964); ²Ross y McLennan, (1985); ³Nance y Taylor (1977), ⁴Piper, (1991); ⁵Daesslé-Heuser, (1993).

III. 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

III. 4. 1. Componentes principales y análisis de factores para los componentes mayores y elementos traza en los sedimentos de la Laguna de La Paz

El presente análisis es una herramienta estadística multivariante para la exploración de variables que permitirán definir agrupaciones entre elementos, áreas de concentraciones altas y algunos de los procesos físicos (Bopp y Biggs, 1981; DelValls *et al.*, 1997), que probablemente caracterizan los sedimentos de la Laguna de La Paz. Este método evidencia los factores representativos y las diferentes relaciones entre los elementos que se manejan (21 elementos) junto con la concentración de carbonatos y carbono orgánico en el material sedimentario de la laguna.

III. 4. 1. 1. Componentes mayores y elementos traza

Al aplicar el programa de componentes principales a los datos obtenidos, se observa que para la Laguna de La Paz, 4 factores definen una variancia explicada mayor de 80% (Tabla V). Las variables de más significancia en cada uno de estos componentes se definen por un peso superior a 0.7, que refleja la variancia explicada mayor o igual a 70% (Tabla VI).

Tabla V. Análisis de componentes principales para los elementos mayores y traza, carbonatos y carbono orgánico en los sedimentos de la Laguna de La Paz.

Eigenvalores		Extracción de los Componentes Principales		
Valor	Eigenval.	% Variancia Total	Eigenval. Cumul.	Cumul. %
1	15.79	42.67	15.79	42.67
2	9.66	26.11	25.45	68.78
3	3.94	10.67	29.39	79.45
4	1.47	3.99	30.87	83.45

Tabla VI. Contribución de los caracteres para los 4 primeros componentes con Matriz Rotada Varimax (> 0.70) en el análisis de los elementos.

Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Dy (0.97)	Sc (-0.95)	Sr (-0.92)	U (0.77)
Er (0.96)	Cs (-0.94)	Ni (-0.87)	
Ho (0.96)	Co (-0.93)	Ca (-0.84)	
Tb (0.96)	Cr (-0.93)	Rb (0.73)	
Gd (0.95)	Fe (-0.91)	Carbonatos (-0.72)	
Tm (0.94)	Br (-0.87)		
Pr (0.91)	Hg (-0.83)		
Sm (0.91)	C. orgánico (-0.83)		
Nd (0.91)	Zn (-0.79)		
Yb (0.91)			
La (0.88)			
Lu (0.87)			
Eu (0.72)			

Los factores que describen las posibles relaciones entre elementos se representan de la siguiente manera (Tabla VI):

FACTOR 1. El primer factor controla los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR) (*La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu*) y explica un 42.6% de la varianza de los datos.

La contribución para cada uno de los elementos muestra similitud a excepción del Eu que obtiene el menor valor entre los ETR. El tipo de relación que mantienen en este factor se considera que provienen de las propiedades químicas semejantes que presentan (radio, masa, carga del cation) y a la asociación natural con ciertos minerales (feldespatos, clinopiroxenos, calcita, apatita) (Goldschmidt, 1958).

Las relaciones con los componentes biogénicos y la distribución espacial en la Laguna de La Paz en el capítulo III. 4. 2, y las diferencias entre estos elementos se detallan en el capítulo III. 4. 4.

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE
CIENCIAS MARINAS
BIBLIOTECA
I.P.N.
DONATIVO

FACTOR 2. Este segundo factor contribuye en 26% de la varianza total y señala a **Br, Co, Cr, Cs, Fe, Hg, Sc, Zn y carbono orgánico (Corg)**, como los componentes cuyo valor de contribución es significativo (Tabla VI) y que posiblemente identifican una agrupación. De acuerdo a la magnitud y tipo de elementos que se definen en este grupo, Bopp y Biggs (1981) consideran que éstos describen la composición de la matriz geoquímica de los sedimentos. Tal situación en la Laguna de La Paz se manifiesta a través del contenido de carbono orgánico y de Fe, que además contribuyen a definir la velocidad de incorporación de elementos en los sedimentos, su distribución y la fuente de contaminantes (DelValls *et al.*, 1997).

Algunos de los elementos que contribuyen en mayor magnitud a definir esta agrupación (Co, Cr, Cs, Fe, Sc) reflejan el aporte de material continental que se produce por las condiciones naturales del área, por lo que además ciertos elementos (Fe, Sc) se emplean para la normalización de la concentración de elementos de ambientes libres de contaminación y con actividad antropogénica (Loring, 1991; Tkalin *et al.*, 1996). Resultados semejantes obtiene Lackschewitz *et al.* (1994) en los sedimentos de la cordillera mesoocéanica Kolbeinsey cerca de Islandia, donde los elementos Al, Co, Cu, Fe, Mn, Ni y Zn representan la litología característica, con la abundancia del vidrio volcánico y de los fragmentos de roca volcánica, que definen un componente volcánico. De esta forma, el *Factor 2* de los datos de concentración en la Laguna de La Paz, se representa por elementos indicadores del aporte continental que se asocian al contenido alto de carbono orgánico en los sedimentos de la fracción arcillosa.

Esta asociación del Factor 2 (**Br, Co, Cr, Cs, Fe, Hg, Sc, Zn y carbono orgánico**) en los sedimentos de la Laguna de La Paz se atribuye a la relación con minerales de procedencia continental, debido a que este ambiente no presenta otro aporte de elementos distinto al del origen terrígeno, resultado de la acción del intemperismo y erosión de rocas. En esta zona el material que predomina procede de las formaciones geológicas denominadas San Gregorio,

San Isidro y Comondú (Osuna, 1986; Machorro, 1991; Pimentel-Hernández *et al.*, 1991; Piper, 1991) constituidos por las rocas ígneas y sedimentarias.

Los estudios de los sedimentos profundos del sur de California y Océano Pacífico realizados anteriormente, indican que algunos de los minerales aportados desde las costas (olivinos, pirita, pirrotita, piroxenos, apatita, anfíboles y otros) son una fuente importante de elementos traza con concentraciones altas (Goldberg y Arrhenius, 1958; Goldschmidt, 1958; Kunzendorf *et al.*, 1993). A través de la descripción mineralógica de los sedimentos de la Laguna de La Paz que realizan Derkachev *et al.* (en prensa), se definen zonas de acumulación que son semejantes a las que presentan algunos de los elementos en el presente trabajo y es posible que algunos de los minerales que proceden del material continental contribuya en la presencia y concentración de elementos en los sedimentos.

FACTOR 3. La varianza total que presenta este tercer factor es 10.7% y se define por **Ca, Ni, Sr y carbonatos** (Tabla VI), que describen posiblemente la asociación entre estos elementos y el componente biogénico calcáreo de los sedimentos de la Laguna de La Paz.

El Ca y Sr muestran relación con el contenido de carbonatos que se obtiene debido a la semejanza que presentan en el patrón de distribución espacial, ya que concuerdan con las zonas de acumulación en el Estero Zacatecas y Palmira. La mayor relación se observa en Palmira, de ambos elementos con el componente biogénico, debido a la presencia de abundantes fragmentos de conchas y de los restos de coral. El Ni que presenta menor relación con los componentes anteriores se observa en los sedimentos del Estero Zacatecas, que es una zona común de acumulación entre estos elementos. Este tipo de relación es también registrada por Lackschewitz *et al.* (1994) en los sedimentos de la cordillera mesoocéánica de Kolbeinsey, donde se obtienen correlaciones frecuentes entre Sr y el carbonato de calcio, debido a que durante la formación de este carbonato el Sr se extrae del agua de mar y es capturado en el material de la concha carbonatada.

Las referencias de Ca, Ni y Sr indican la asociación con sedimentos de grano grueso o arenoso y la presencia de fragmentos calcáreos (Álvarez-Arellano, 1995; Astakhov, 1996), aunque también es posible encontrarlos asociados con la fracción fina de los sedimentos y la salinidad del agua de mar como lo señalan Bopp y Biggs (1981).

Una de las características que identifican tanto al Estero Zacatecas como a Palmira es el aporte de material continental, el cual incluye diversos minerales como son olivino, piroxenos y hornblendas (Derkachev *et al.*, en prensa). En estos componentes inorgánicos es común encontrar al Ca, Ni y Sr en concentraciones altas en los sedimentos profundos del sur de California (Goldschmidt, 1958), Océano Pacífico (Goldberg y Arrhenius, 1958); suelos del basamento en la Sierra de Guanajuato (Hernández *et al.*, 1997) y en el sistema hidrológico de Telléz-Tizayuca (Hidalgo, México) (Mayol *et al.*, 1997). Se sugiere que las rocas volcanosedimentarias son también una fuente de aporte de minerales que incluyen éstos elementos y otros, por la abundancia en la que se encuentran en estas áreas, mismos que se observan en los alrededores de la laguna como parte del material que constituyen las formaciones geológicas San Gregorio, San Isidro y Comondú.

De acuerdo a las características que se observan de la asociación entre estos elementos y su distribución espacial, se sugiere la existencia de una relación con el aporte de material continental como son los minerales derivados de rocas ígneas. La coincidencia en los puntos de acumulación de estos elementos en la Laguna de La Paz y el contenido de carbonatos, es descrita del mismo modo por Yuan-Hui (1984), Álvarez-Arellano (1995) y Astakhov (1996), quienes observan que el Ca y Sr se relaciona con bioclóstos calcáreos, apatita biogénica, calcita, carbonatos, que forman parte de los componentes biogénicos del material sedimentario, depositado en los alrededores de la Laguna y Bahía de La Paz.

FACTOR 4. Este cuarto factor solamente se representa por un elemento que es *U* con un 3.9% de la varianza total (Tabla VI). El análisis no muestra que este componente guarde

relaciones con el contenido de carbono orgánico y carbonatos en los sedimentos sino mas bien debe estar influenciado por las condiciones naturales de la zona.

La distribución espacial del U en la Laguna de La Paz muestra que este elemento se asocia a sedimentos de tipo arenoso de la porción norte donde se ubica la barrera arenosa El Mogote, que se caracteriza por recibir influencia de material intemperizado y erosionado de la Bahía de La Paz donde destacan las rocas fosfatadas de la Formación San Gregorio y el material volcánico de la Formación Comondú. De acuerdo a la caracterización mineralógica de Mendoza-Maravillas (1990) y Prieto-Mendoza (1991) en El Mogote, se aprecia que los sedimentos circundantes son probablemente influenciados por la acumulación de las partículas fosfáticas en esta zona.

Es importante mencionar que de acuerdo a los trabajos realizados por Fonseca-Rivera (1991), Piper (1991, 1994), Álvarez-Arellano (1989, 1995), la importancia de la roca fosfórica o fosforita radica en su contenido elevado de fósforo en los sedimentos, material que es importante debido a que el Ca del fosfato sedimentario (carbonato-hidróxil-fluor-apatita) puede ser sustituido por elementos como el Sr, U y por los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR). Esta situación representa probablemente el origen del U y su acumulación en los sedimentos de la Laguna de La Paz, debido al flujo de agua que ocurre de la parte oeste al sur en la Bahía de La Paz y que permite el transporte de partículas extraídas e intemperizadas de las formaciones San Gregorio y Comondú.

De acuerdo a los análisis realizados en ROFOMEX, Galli-Olivier (1993) señala que el U es generalmente el elemento traza mas conspicuo de la fosforita debido a que la capa Humboldt puede llegar a contener hasta 50 gr de U_3O_8 por tonelada métrica de fosforita. Para la Laguna de La Paz, lo anterior puede representar una fuente importante de U y de otros elementos en los sedimentos superficiales; donde su migración y distribución durante la erosión y sedimentación, en el caso del U, también se relaciona con procesos de oxidación y reducción (Goldschmidt, 1958).

Las características que describen la distribución y probablemente la fuente de U para este cuerpo lagunar, sugieren que el Factor 4 se origina del aporte y asociación de las masas fosfáticas que caracterizan el sedimento continental de la Península de Baja California. Aunque posiblemente también de material volcánico que caracteriza la Formación Comondú, debido que Lackschewitz *et al.* (1994) obtienen en sedimentos con abundantes fragmentos y vidrios volcánicos concentraciones altas de elementos como Al, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Si, V y Zn. Por esta razón, el material volcánico de la formación geológica antes señalada representa para los sedimentos de la Laguna de La Paz otra fuente de aporte probable de U y para otros elementos.

Tomando en cuenta la composición geoquímica de los sedimentos lagunares y el análisis estadísticos de los resultados de este trabajo, se establecen 3 componentes distintos que caracterizan el material sedimentario de la Laguna de La Paz:

- a) *Componente fosfático* (rocas fosfatadas de la Formación San Gregorio). En este caso se considera, por un lado, a los ETR (*La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu*) cuyas propiedades hace considerarlos con un grupo específico, y en el otro, al U debido que en ambos casos parecen asociarse con este tipo de roca.
- b) *Componente terrígeno* (aporte de material continental producto del intemperismo y erosión de las rocas) que determina los contenidos de *Br, Co, Cr, Cs, Fe, Sc, Hg y Zn*.
- c) *Componente biogénico* (asociación con fragmentos de conchas y de coral) (*Ca, Sr*).

La relación de los componentes terrígeno y biogénico se manifiesta además en los sedimentos superficiales de la cordillera mesoocéanica de Kolbeinsey (Lackschewitz *et al.*, 1994), conjuntamente un componente volcánico (vidrio volcánico, fragmentos de roca volcánica y minerales).

Por otra parte, la relación de los factores que caracterizan la variabilidad de la concentración de los elementos mayores y traza en los sedimentos superficiales de la Laguna

de La Paz se representa de manera gráfica en la figura 26, esto permite mayor detalle de las relaciones que mantienen entre si.

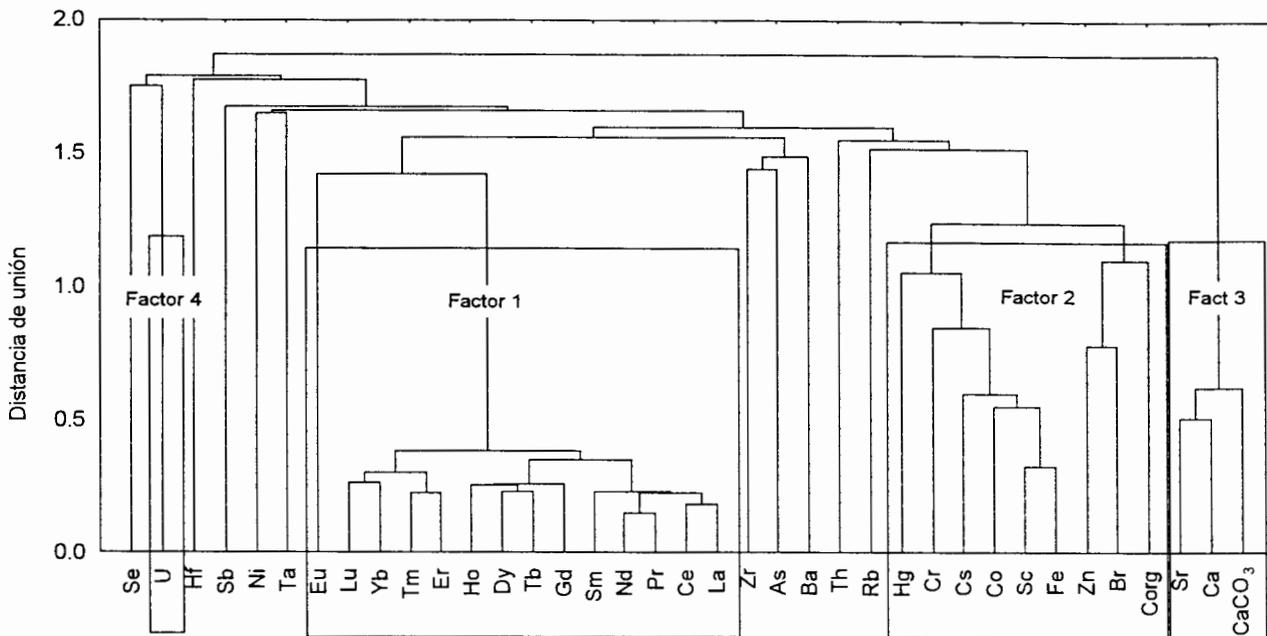


Fig. 26. Asociaciones de elementos mayores, traza, carbonatos y carbono orgánico, por el análisis de factores para los sedimentos superficiales.

III. 4. 1. 2. Elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR)

Como se indica anteriormente, el grupo de elementos denominados lantánidos o Tierras Raras (ETR) constituye una agrupación con características particulares. Por ello se realiza un análisis por separado debido a la similitud que se observa en su comportamiento tanto en la distribución como en los valores del análisis de componente principales.

Las figuras de la distribución espacial muestran claramente que los ETR, se concentran principalmente en los sedimentos del Estero Zacatecas y El Mogote (canal) de la parte noroeste y norte del interior de la Laguna de La Paz, donde probablemente se asocian a las

arenas, la fracción arcillosa y posiblemente a los carbonatos. Aunque se señala por Liu (1992), Shen (1991) y Liu *et al.* (1994) que en los sedimentos profundos del Océano Pacífico los contenidos menores de ETR ocurren en los sedimentos calcáreos.

Por otro lado, se indica que los ETR pueden estar agregados a algunos minerales de tipo autógenos (ej. esmectita, filipsita, barita, plagioclasa detrítica y carbonato de calcio biogénico), los que quizás son introducidos a esta laguna costera a través de la descarga de sedimento continental. Por medio del trabajo mineralógico más completo que realiza Derkachev *et al.* (en prensa) sobre la fracción pesada de los sedimentos de la laguna, se identifica a los minerales que abundan en la parte noroeste como son piroxenos, hematita, magnetita, ilmenita, hornblendas y epidota, que son otros de los materiales que acumulan ETR en los diferentes ambientes marinos (Clark, 1984; Fleet, 1984).

La predominancia de estos elementos en el noroeste de la Laguna de La Paz parece asociarse a la influencia de tipo terrígeno, por el aporte de material continental proveniente del interior de la Bahía de La Paz (parte oeste), afectada por la Formación San Gregorio que se explota económicamente por su alto contenido de masas fosfáticas. De acuerdo a McArthur y Walsh (1984) y Watkins *et al.* (1995), este tipo de material presenta concentraciones altas de diversos elementos incluyendo los ETR que se asocian al material orgánico abundante, que posiblemente interviene para la acumulación de los elementos en mayor proporción, dando como resultado los contenidos elevados de ETR respecto de la corteza continental.

Los resultados del análisis de componentes principales para los ETR muestra la contribución importante de dos factores. En el primero, se observan algunos de los elementos que son considerados por Olmez *et al.* (1991) y Román *et al.* (1995) como elementos ligeros (LREE) La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd y Tb, y en el segundo, los pesados (HREE) Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu. La variancia mayor que se obtiene para los ETR depende principalmente del factor 1, que explica un 84.9%, mientras que el factor 2 explica solamente el 9.1% (Tabla VII y VIII).

Tabla VII. Componentes principales para los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR) en los sedimentos de la Laguna de La Paz.

Eigenvalores		Extracción Componentes Principales		
Valor	Eigenval.	% Variancia Total	Eigenval. Cumul.	Cumul. %
1	11.9	84.9	11.9	84.9
2	2.18	9.1	13.2	94.1

Tabla VIII. Contribución de los caracteres en los dos componentes con Matriz Rotada Varimax, en el análisis de los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR), encontrados en los sedimentos de la Laguna de La Paz.

Elemento	Factor 1	Factor 2
La	0.87	0.33
Ce	0.89	0.36
Pr	0.90	0.42
Nd	0.88	0.45
Sm	0.84	0.46
Eu	0.72	0.35
Gd	0.77	0.6
Tb	0.71	0.67
Dy	0.65	0.74
Ho	0.59	0.79
Er	0.47	0.87
Tm	0.42	0.9
Yb	0.33	0.93
Lu	0.23	0.95

La diferencia que se aprecia entre LREE y HREE (Tabla VIII) puede atribuirse a: (1) las proporciones en las cuales se han encontrado los LREE, tal es el caso de algunos depósitos minerales (bastnasita) donde estos elementos llega a estar entre 1000 a 6000 veces por arriba de los HREE (Olmez *et al.*, 1991); (2) la incorporación preferencial dentro de los sedimentos de los elementos ligeros sobre los ETR pesados (Fleet, 1984); (3) la velocidad de remoción de los elementos (McArthur y Walsh, 1984); (4) la capacidad de formar los complejos inorgánicos de ETR (ej. carbonatos).

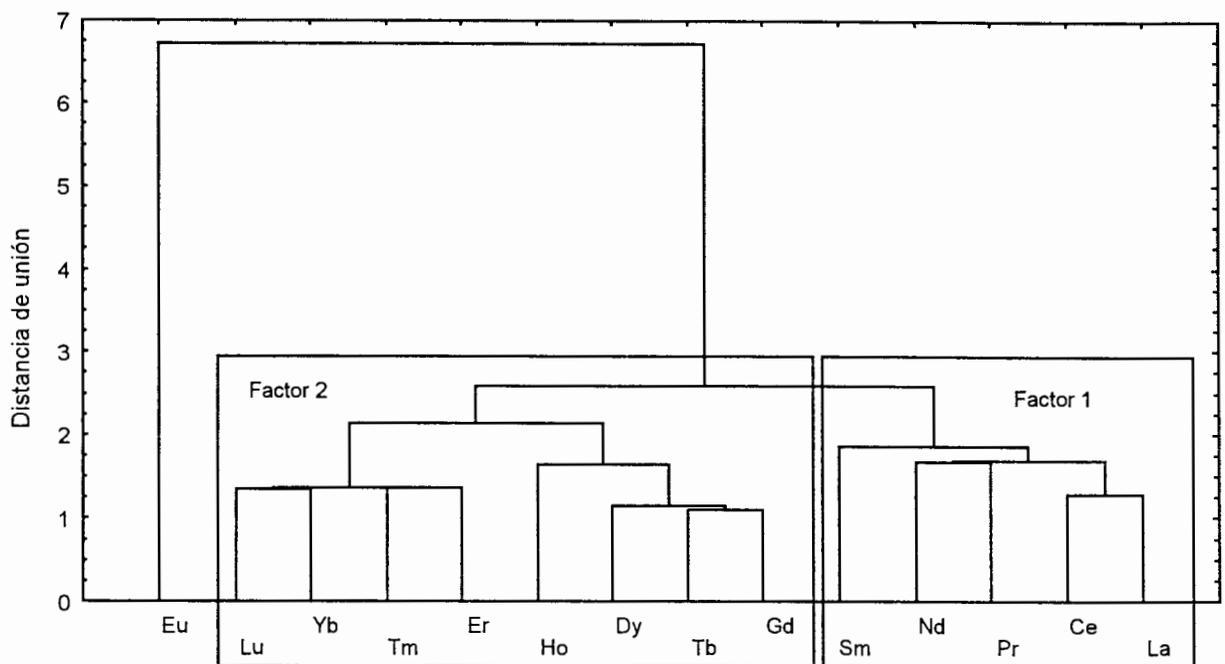


Fig. 27. Componentes principales para los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR) de los sedimentos.

El comportamiento que se observa en la figura 27, representa la diferenciación de los grupos LREE y HREE, así como del elemento Eu. Estas asociaciones se consideran por la concentración en la que se encuentran en los sedimentos superficiales de la laguna, además de los resultados en el coeficiente de correlación (r) donde el Eu denota valores por debajo 0.5 con respecto a los restantes elementos del grupo. Estas diferencias contribuyen a observarlo de forma independiente de LREE y HREE, dada las propiedades químicas específicas del Eu debido a la posibilidad de formar Eu^{2+} en los procesos hidrotermales con altos contenidos de reductores (S^{2-}), alta temperatura y alta presión.

III. 4. 2. Asociaciones de componentes mayores y elementos traza en los sedimentos de la Laguna de La Paz

Las asociaciones entre los componente mayores y los elementos traza en los sedimentos de este cuerpo lagunar se definen por la significancia del coeficiente de correlación (Anexo III) y a través de los patrones de distribución de cada elementos, resultados que coinciden los señalados en el capítulo III.4.1 (análisis de factores y componente principales). Esto se realiza para caracterizar y diferenciar zonas en el interior de la laguna en relación a la concentración del elemento (acumulación), la distribución de carbono orgánico y carbonatos en los sedimentos. Además permite observar las afinidades geoquímicas de los elementos y el tipo de asociaciones que se encuentran con materiales biogénicos.

Los elementos como K, Ta y Au no se contemplan en estas agrupaciones debido a que el número de los datos fue insuficiente para la elaboración del mapa de distribución y su posterior descripción.

En base al análisis del patrón de distribución espacial de los elementos en los sedimentos superficiales del interior de la Laguna de La Paz, es posible distinguir claramente tres agrupaciones:

El *primer grupo* está compuesto por los elementos **Co, Cr, Cs, Fe, Sc, Th y carbono orgánico**, que presentan en común las zonas de acumulación mayor en las depresiones lagunares norte y sur (ej. la distribución de Fe, Fig. 6b). Ambas zonas se caracterizan por la abundancia alta de sedimentos finos (limo-arcilla) que favorecen al incremento en la adsorción de los elementos por el aumento del área superficial (Dossis y Warren, 1980), debido a interacciones débiles (fuerzas de Van der Waals) entre ion-dipolo o dipolo-dipolo entre la superficie de las partículas y los elementos (Salomons y Förstner, 1984). Por otra parte, es importante mencionar la presencia del carbono orgánico en estos sedimentos ya que favorecen

la adsorción, solubilización, desorción de los elementos en el medio por cambios fisicoquímicos.

Los elementos que se reúnen en esta agrupación se definen además por el valor del coeficiente de correlación que obtienen en los sedimentos lagunares y que se presentan en la Tabla IX. De éstas se diferencian las relaciones Fe-Sc y Co-Sc que son las de mayor significancia ($r > 0.9$), seguidas de Co-Fe, Cr-Sc, Cr-Fe y Cr-Co cuyo coeficiente oscila entre 0.67 a 0.89.

Algunas referencias de la correlación entre elementos, destacan los sedimentos del Río Papaloapan, Veracruz (Rosales-Hoz *et al.*, 1986); Bahía Magdalena (Álvarez-Arellano, 1995) y Bahía de Todo Santos en Baja California (Romero-Vargas, 1995); Laguna subtropical Altata en Sinaloa (Green-Ruiz, 1996) y el nódulo de manganeso del Océano Pacífico (Glasby *et al.*, 1987) (Tabla IX). Tomando en cuenta los datos registrados se observa que es la relación Fe-Cr la que obtiene mayor significancia ($r > 0.5$) en áreas como la Bahía de Todo Santos, Bahía Magdalena y el Océano Pacífico, además que obtiene valores semejantes con la Laguna de La Paz. Por otro lado, en los sedimentos del Río Papaloapan y la Laguna Altata es donde se registra la menor asociación ($r = 0.5$).

Tabla IX. Coeficientes de correlación entre los elementos del Grupo 1, que se registran en los sedimentos de distintas área de investigación.

Área	Fe - Sc	Fe - Cr	Fe - Co	Sc - Co	Cr - Co	Sc - Cr
Río Papaloapan (Ver.) ¹	-	0.55	-0.4	-	-0.4	-
Océano Pacífico ²	0.8	0.7	0.77	0.63	0.59	0.74
B. Magdalena (B. C.) ³	-	0.70	-	-	0.8	-
B. Todo Santos (B. C.) ⁴	-	0.86	-	-	-	-
Laguna Altata (Sin.) ⁵	-	0.5	0.35	-	0.58	-
Laguna La Paz	0.96	0.76	0.89	0.93	0.67	0.81

¹Rosales-Hoz *et al.*, (1986); ²Glasby *et al.*, (1987); ³Álvarez-Arellano, (1995); ⁴Romero-Vargas, (1995); ⁵Green-Ruiz (1996).

En otra de las relaciones, como Cr-Co, los datos muestran variaciones que diferencian los sedimentos de las localidades en: a) correlación alta en B. Magdalena, b) correlación media a la L. Altata, el nódulo del O. Pacífico y la Laguna de La Paz, y c) correlación baja al R. Papaloapan. Esta distinción entre las áreas probablemente representa las diferencias que existen entre el tipo de sedimento, las condiciones ambientales, la litología del área, entre otros.

De estas localidades la mayor semejanza con los datos de la Laguna de La Paz se obtiene con las correlaciones en el nódulo de manganeso del Océano Pacífico (Glasby *et al.*, 1987), en las asociaciones de Fe-Sc y Fe-Cr en donde los datos son parecidos en magnitud, además de Fe-Co, Cr-Co y Sc-Cr, pero con significancia menor respecto de las relaciones de la laguna.

La *segunda agrupación* está integrada por **Ca, Sr y carbonatos**, en cuya relación se obtiene un coeficiente significativo mayor de 0.7 ($r > 0.5$). Para estos elementos las concentraciones mas altas se detectan en los sedimentos de Palmira y el Estero Zacatecas (Fig. 6a y 12a), donde se observan abundantes fragmentos calcáreos y restos de coral. Ambos puntos, a su vez, son influenciados por el aporte de sedimento continental que proviene de los cauces de arroyos en la parte oeste en el interior de la laguna y desde la Bahía de La Paz a través del canal.

El Ca y el Sr siguen un comportamiento similar al que presenta la distribución de los carbonatos en los sedimentos de la laguna (Fig. 7b), dado que la zona principal de acumulación para este componente biogénico ocurre en Palmira y en el Estero Zacatecas. El valor del coeficiente de correlación entre ambos elementos es de 0.89.

Las referencias para estos elementos señalan que el Ca en los sedimentos del margen costero de Bahía Magdalena se asocia con Co (0.86), Cr (0.89), Ni (0.79), Zn (0.75) con obtienen valores de correlación importantes ($r > 0.5$), además de relacionarse a fondos de grano grueso y bioclastos calcáreos. Por otro lado, para el Sr se registran valores de 0.84 en

relación a los carbonatos en sedimentos del Golfo de México (Rosales-Hoz *et al.*, 1992), valores que son mas altos de lo que se obtiene en la Laguna de La Paz (0.7). Otro tipo de asociaciones de estos elementos se observan con algunos minerales de procedencia continental (piroxenos, apatita, anfíboles, feldespatos, calcita) y componentes biogénicos (Goldberg y Arrhenius, 1958; Goldschmidt, 1958), en el Océano Pacífico y sur de California. Estas observaciones permiten considerar que en ambas zonas de la Laguna de La Paz, Palmira y Estero Zacatecas, donde se identifican Ca y Sr, son posiblemente influenciadas por minerales u otros componentes, aunque principalmente a través de la relación con la parte biogénica de los materiales.

La *tercera de las agrupaciones* se define por los ETR (*Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm, Yb*), que describen un patrón de distribución espacial particular, donde las mayores acumulaciones se observan principalmente en los sedimentos del Estero Zacatecas, frente a la barrera arenosa El Mogote y al CICIMAR (Fig. 18). La concentración en el material acumulado en el cauce de los arroyos diferencian al Estero Zacatecas, Punta Comitán y Chametla, como zonas que pueden generar influencia en los sedimentos de la laguna, a través del aporte de elementos tales como los ETR.

Los coeficientes de correlación que se obtienen para estos elementos están por arriba de 0.6, a excepción del Eu cuyos valores del coeficiente son significativamente menores ($0.3 < r < 0.5$) con los elementos: Dy, Er, Gd, Lu, Nd, Sm, Tm y Yb. Tomando en cuenta los resultados de otras áreas, se observa que para la Bahía Vizcaíno (B.C.) los resultados del coeficiente correlación entre ETR están por arriba de 0.9 (Daesslé-Heuser, 1993); aunque, como se señala antes para el área de estudio se aprecian diferencias en la significancia de Eu y Er, que arrojan valores de correlación por debajo de 0.6. Las asociaciones entre los elementos de las Tierras Raras también se han obtenido en nódulos de manganeso del suroeste del Pacífico, donde los ETR alcanzan correlaciones cuya significancia es mayor de 0.7 y, en este caso, el Eu no muestra variación respecto a los otros ETR.

Los niveles de la concentración de los ETR en los sedimentos de la Laguna de La Paz, se correlacionan con los datos obtenidos en los estudios geoquímicos de San Juan de la Costa (B.C.S.) (Piper, 1991), Bahía Vizcaíno (B.C.) (Daesslé-Heuser, 1993) y la corteza continental (Taylor, 1964; Ross y McLennan, 1985). Los resultados muestran que los sedimentos de la Laguna de La Paz relacionados con los de Bahía Vizcaíno son los que presentan la significancia más alta de la correlación con 0.98 ($r > 0.5$); de igual manera, la relación con los sedimentos de San Juan de la Costa da un valor de 0.97 y con el contenido en basalto de la misma área donde alcanza 0.9.

Los datos que se obtienen de la correlación de ETR en las dos áreas (Bahía Vizcaíno y San Juan de la Costa) quizás evidencia sobre la existencia de una fuente común de los elementos debido a que tanto Bahía Vizcaíno, San Juan de la Costa como la Laguna de La Paz se encuentran ubicadas en la Península de Baja California; o bien, que los contenidos de manera espacio-temporal son poco variables.

La comparación de los valores de ETR de los sedimentos de la Laguna de La Paz con las estimaciones de Taylor (1964) y Ross y McLennan (1985) para la corteza continental, dan un coeficiente de correlación de 0.99 para ambos casos. Esto puede indicar que los contenidos de ETR en este ambiente lagunar, quizás proceden de un origen continental, a través del aporte de sedimento continental que se produce, ya sea de manera estacional por las lluvias torrenciales ó de forma continua por el transporte eólico, atmosférico y la acción de corrientes marinas.

Otro tipo de asociaciones y patrones de distribución espacial menos evidentes en el interior de la laguna, se definen en los dos grupos siguientes:

El **Br y Zn** presentan un comportamiento similar en los sedimentos de la laguna, ya que ambos tienen, frente a Punta Comitán, concentraciones altas, mientras que valores menores se observan en la zona de descarga del arroyo La Ardilla (noroeste). Aunque también los

resultados del coeficiente de correlación muestran que ambos elementos se asocian al Fe y a algunos otros, pero la significancia en este caso es menor.

La distribución espacial de la concentración de Br y Zn no muestra relación alguna con los carbonatos debido al contenido relativamente bajo (~25%) que éstos presentan en los sedimentos superficiales de Punta Comitán, además que el coeficiente de correlación de ambos elementos con este componente biogénico es bajo ($-0.1 < r < -0.2$). Por otro lado, el Br y Zn probablemente se asocian con el carbono orgánico debido a los datos de correlación que se encuentran en 0.4 con Zn y 0.5 para Br.

Las referencias sobre la asociación con otros elementos se enfocan principalmente al Zn, debido a que son pocos los análisis que se han realizado para el Br, destacando los valores que corresponden a los sedimentos de las áreas siguientes (Tabla X): el río Papaloapan Veracruz (Rosales-Hoz *et al.*, 1986), la frontera de México-E.U.A. (Ortega, 1991), el Golfo de México (Rosales-Hoz *et al.*, 1992), la Bahía Magdalena (Álvarez-Arellano, 1995) y la Bahía de Todos Santos (Romero-Vargas, 1995). La comparación entre los valores del coeficiente de correlación indica que la Laguna de La Paz es similar con lo que se obtiene en el Golfo de México, las bahías Magdalena y Todos Santos, principalmente con la relación Fe-Zn y Zn-Co; y respecto a la asociación con el carbono orgánico la laguna presenta correspondencia con el Río Papaloapan, donde la relación Zn-Corg es poco relevante.

El **Rb y Th** se encuentran distribuidos en la mayor parte de los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz, con excepción de algunas pequeñas zonas en el canal. El valor del coeficiente de correlación entre ambos elementos es 0.70 ($r > 0.5$) y que representa la asociación de ambos elementos por los sedimentos de la parte oeste de la laguna. Por otro lado, los resultados de la correlación con el carbono orgánico (Rb $r = 0.06$ y Th $r = 0.06$) y carbonatos (Rb $r = -0.57$ y Th $r = -0.2$) no muestran que sean factores a los que este relacionado su distribución espacial en el interior de la laguna.

Tabla X. Coeficientes de correlación del Zn con elementos establecidos en los sedimentos marinos de distintas áreas de investigación en México.

Área	Fe	Ni	Cr	Ca	Co	C.org	Carb
Veracruz (México) ¹	-	0.6	0.2	-	-	0.3	0.3
Frontera de México - E.U.A. ²	-	-	0.9	-	-	-	-
Golfo de México ³	0.9	-0.8	0.6	-	-	-	-
Bahía Magdalena (B.C.S.) ⁴	0.9	-	0.8	0.75	0.7	-	-
Bahía de Todo Santos (B. C.) ⁵	0.9	0.6	0.8	-	-	0.8	0.1
<i>Laguna de La Paz</i>	0.6	0.1	0.3	0.1	0.5	0.4	0.1

¹Rosales-Hoz *et al.*, (1986); ²Ortega, (1991); ³Rosales-Hoz *et al.*, (1992); ⁴Álvarez-Arellano, (1995); ⁵Romero-Vargas, (1995).

Las referencias de este coeficiente para Th y Rb en otras áreas son escasas, aunque bien pueden asociarse con Ca, K y ETR debido a su presencia en minerales, tales como apatita y feldespatos (Goldschmidt, 1958). Sin embargo, las correlaciones con estos elementos en la Laguna de La Paz no indican valores significativos ($r > 0.5$), aunque se esperaría algún tipo de asociación debido a la amplia distribución de ambos elementos y a la influencia del aporte de sedimento continental de los alrededores.

Los elementos que no se presentan en las agrupaciones antes descritas, muestran patrones de distribución particulares que se detallan en el capítulo III. 2.

Tomando en cuenta las formas principales de distribución espacial de los elementos en sedimentos lagunares, se distinguen zonas de acumulación que parecen coincidir con algunos de los subambientes sedimentarios que señalan Green-Ruíz y Larrinaga-Cunningham (1986) para la misma laguna. De acuerdo a esto, las zonas se ubican y se describen de la manera siguiente (Fig. 28):

- I. *Canal*. En la zona del canal se realiza el intercambio de agua con la Bahía de La Paz y es la parte más dinámica de la laguna, debido a las velocidades que alcanza el flujo y reflujo del agua y por ende la cantidad de material que transporta. Presenta influencia de tipo terrígeno de manera estacional, proveniente de las serranías localizadas al este de la laguna, del

transporte eólico y del contenido orgánico proveniente de los manglares de la barrera arenosa El Mogote (norte). Los elementos que se observan en esta parte de la laguna son *Ba, Ca, Rb, Sb, Sr, Th, U, Zn* y de las Tierras Raras (*Ce, Dy, Eu, Gd, Ho, Nd, La, Lu, Pr, Sm, Tb, Tm, Yb*).

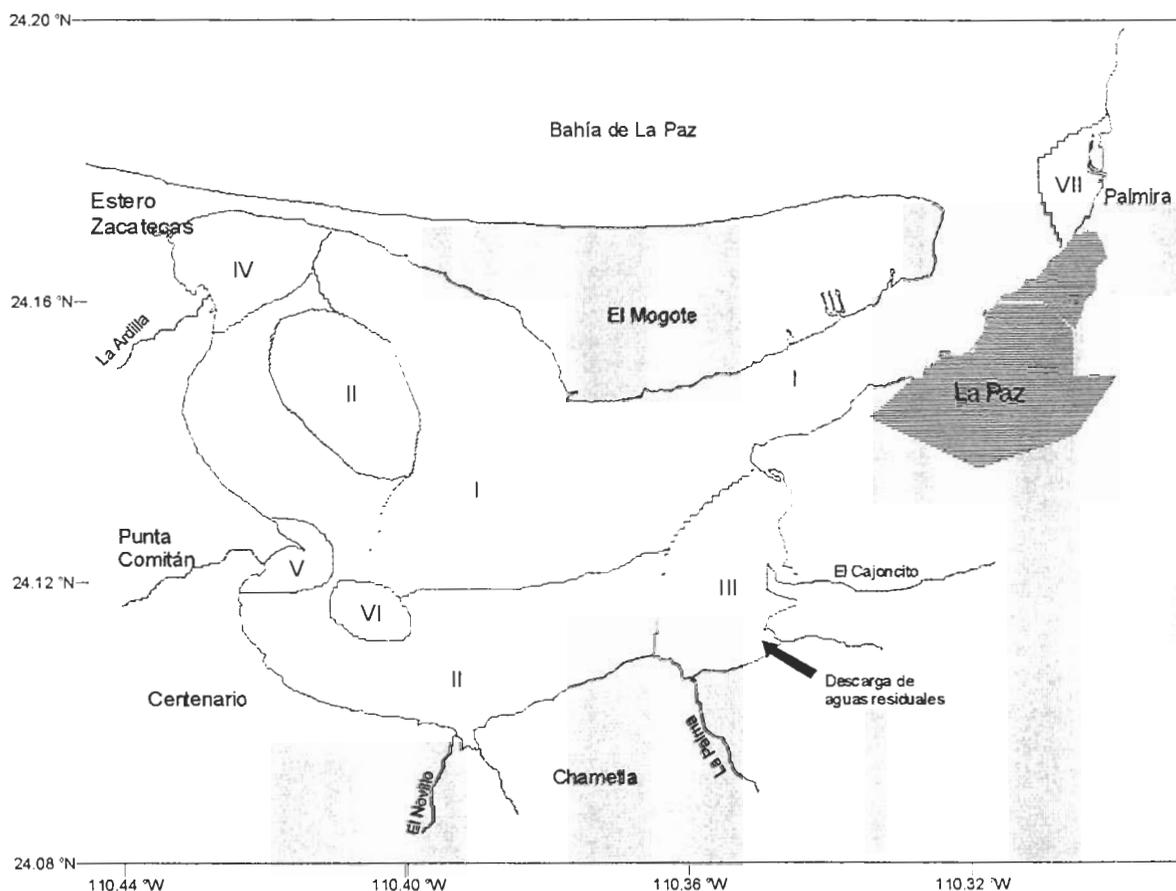


Fig. 28. Esquema de las zonas de acumulación de elementos mayores y elementos traza en los sedimentos de la Laguna de La Paz, tomando como referencia los subambientes propuestos por Green-Ruíz y Larrinaga-Cunningham (1986) (I canal, II depresión norte y frente a Chametla, III descarga de aguas residuales, IV Estero Zacatecas, V Punta Comitán, VI depresión sur, VII Palmira).

II. *Depresión norte y frente a Chametla.* La depresión tiene profundidades máximas aproximadas de 7 m, su fondo presenta un contenido de carbono orgánico alto (3%) y sedimentos finos (limo - arcilla); por otro lado, Chametla comprende una zona somera donde

las profundidades son menores de 2 m con abundante material fangoso. Ambas zonas presentan contenidos elevados de algunos elementos, pero es más notorio en la depresión profunda probablemente por el aporte de materiales continentales de los arroyos, el transporte eólico y el carbono orgánico del Estero Zacatecas, los manglares de la barrera arenosa El Mogote y desde la Bahía de La Paz. Los patrones de distribución espacial de los elementos indican la presencia en los sedimentos de: *Ba, Co, Cs, Fe, Hg, Ni, Rb, Sc, Se, Th* y *Zn*.

III. *Descarga de aguas residuales*. Se ubica en el interior de la laguna sobre su margen sur, su fondo está constituido por una mezcla de arena, limo y arcilla, con abundantes restos de detritus de manglar. En esta parte se llegaron a descargar durante algunos años aguas residuales antes de la instalación de la planta de tratamiento, y por tanto se depositaron ahí una gran cantidad de sólidos. Por otro lado, en 1983 los sedimentos acumulados fueron dragados del área, por lo que probablemente, la remoción ocasionó el flujo de los elementos hacia otras áreas de la laguna. Las distribuciones espaciales muestran que algunos de los elementos relativamente abundantes en este fondo sedimentario son *Ba, Co, Cs* y *Hg*, pero en concentraciones bajas referidas al promedio de la corteza continental.

IV. *Estero Zacatecas*. Comprende una zona somera con influencia de tipo continental a través del aporte de material erosionado en los alrededores y de los sedimentos procedentes de la Bahía de La Paz; además de producirse el aporte orgánico por los árboles de manglar y componentes calcáreos. Los elementos determinados en los sedimentos de esta parte son *As, Ca, Cr, Hf, K, Sc, Th, Zn, Zr* y ETR (*Ce, Dy, Eu, Gd, Ho, Nd, La, Lu, Pr, Sm, Tb, Tm, Yb*).

V. *Punta Comitán*. Se considera como una zona de acumulación de sedimentos redepositados provenientes de un antiguo depósito aluvial que sobresale en la margen occidental de la laguna. Las arenas predominan en esta región con bajo contenido de carbonatos y carbono orgánico. Los patrones de distribución de los elementos en los sedimentos no muestran a

esta área como punto de acumulación, pero se observan algunos elementos con contenido bajo.

VI. *Depresión sur*. En esta parte se observa una pequeña depresión con un fondo de arena, limo y arcilla; y debido a la cercanía con Punta Comitán recibe aportes de material continental proveniente de los sedimentos redepositados. Los elementos que presentan mayores concentraciones en esta zona son *Br, Co, Cs, Fe, Rb, Sc, Th, U y Zn*.

VII. *Palmira*. Esta es la parte mas externa de la laguna y comprende parte de la boca del canal que comunica con la Bahía de La Paz. Es una zona influenciada por la acumulación del material calcáreo, favorecida por los aportes de nutrientes a través de las corrientes de marea, además de estar modificada por la marina Palmira desarrollada. Se caracteriza por sus sedimentos gruesos con contenido alto de carbonatos donde se registran elevadas concentraciones de *Ca, K y Sr*, además de los carbonatos.

Esta última localidad no se incluye en los subambientes sedimentarios de Green-Ruiz y Larrinaga-Cunningham (1986), debido a que comprende la parte mas externa de la laguna, pero se considera importante introducirla debido a las altas concentraciones en que se encuentran algunos elementos en el área de estudio.

III. 4. 3. Factor de enriquecimiento (FE) de los elementos en los sedimentos de la Laguna de La Paz

En sedimentos marinos el estandarizar el contenido por un material de referencia (Al, Cs, Fe, Li, Rb, Sc), define el factor de enriquecimiento (FE), que se emplea para excluir los efectos del tamaño de grano, la variabilidad natural y aclara la influencia por aporte antropogénico en los sedimentos (Salomons y Förstner, 1984; Loring, 1991; Daesslé-Heuser, 1993; Daskalakis y O'Connor, 1995; De-Carlo *et al.*, 1996). Los resultados de este factor que

se obtienen con la formula: $FE = \frac{\frac{EI_{sed}}{Sc}}{\frac{EI_{corteza}}{Sc}}$, donde EI es la concentración del elemento y Sc

(escandio) es el elemento de referencia, permiten diferenciar grupos de elementos con valores del factor diferente en la Laguna de La Paz. La representación gráfica de los valores se presenta en la figura 29 y los datos en general se muestran en la Tabla XI. Por otra parte, se analiza la distribución espacial de los elementos con un FE alto, lo que permite definir zonas en el interior de la laguna donde quizás se estén incorporando los elementos al sedimento de este ambiente.

Se diferencian 3 grupos de elementos cuyas características son:

Grupo Se, As y Sb. Estos elementos destacan debido a que obtienen los mas altos valores de este factor (FE > 15). Salomons y Förstner (1984) mencionan que los elementos con valores mayores de 4 son llamados enriquecidos o anómalos y tienen otra fuente que la erosión de la corteza, probablemente de origen antropogénico.

La presencia de estos elementos en los sedimentos de la Laguna de La Paz se atribuye al aporte de materiales que proviene del intemperismo de las rocas volcanosedimentarias que rodean a este cuerpo de agua. La influencia de la descarga de material continental se registra en los sedimentos de la Bahía de San Francisco, donde la concentración de Se oscila entre

0.04 $\mu\text{g/g}$ y 0.1 $\mu\text{g/g}$ (Johns *et al.*, 1988), valores semejantes a la concentración promedio (0.05 $\mu\text{g/g}$) de Taylor (1964) en la corteza continental.

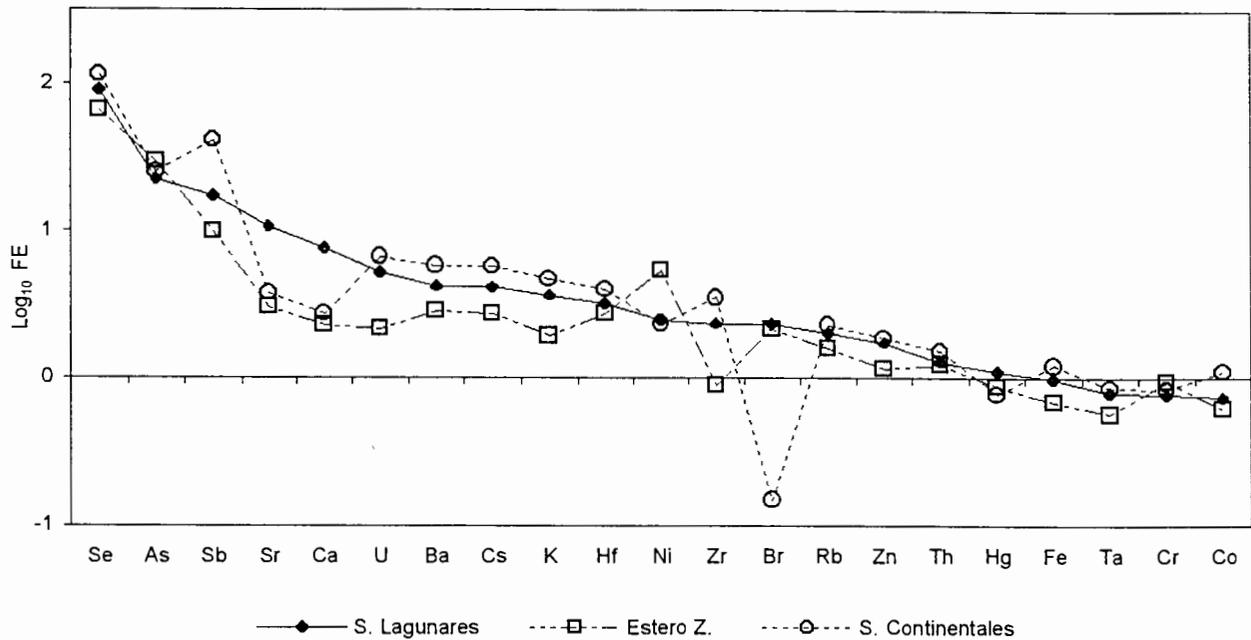


Fig. 29. Factor de enriquecimiento (FE) de los elementos mayores y elementos traza en los sedimentos lagunares, del Estero Zacatecas y en sedimentos continentales de la cuenca de drenaje.

Valores del factor de enriquecimiento para algunos de estos elementos se reportan en la cuenca Lerma-Chapala, donde As y Se presentan valores del FE mayores de la unidad, pero que siguen una distribución semejante a los niveles encontrados en la corteza terrestre (Posada-Ramos *et al.*, 1994), atribuyendo tales resultados a un origen continental.

El fuerte enriquecimiento de As, Sb y Se en rocas sedimentarias se explica por la alta capacidad de adsorción de las acumulaciones de Fe y los óxidos de Mn para estos elementos, además de absorber cationes (Ba, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) (Salomons y Förstner, 1984). Por otra parte, la presencia de los elementos traza en los sedimentos del interior de la laguna no sólo es

el resultado del aporte de material intemperizado de las rocas volcanosedimentarias sino también puede influir la presencia de masas fosfáticas que se extraen en San Juan de la Costa.

Tabla XI. Factor de enriquecimiento (FE) de los componentes mayores y elementos traza en los sedimentos lagunares, del Estero Zacatecas y continentales.

Elemento		Sedimentos lagunares	Estero Zacatecas	Sedimentos continentales
Se	Max.	386	98	508
	Min.	11	27	12
	Prom.	90 ± 68	65 ± 25	113 ± 129
As	Max.	80.0	41	120
	Min.	0.8	15	2.6
	Prom.	22.0 ± 16.0	29 ± 10	25 ± 28
Sb	Max.	92.5	21.6	167.2
	Min.	0.4	3.7	3.2
	Prom.	17.0 ± 19.0	10.0 ± 6.0	41.0 ± 46
Sr	Max.	156.0	5.3	18.0
	Min.	0.32	0.56	0.4
	Prom.	11.0 ± 22.0	3.0 ± 2.0	4.0 ± 4
Ca	Max.	102	3.0	6.4
	Min.	0.5	1.5	1.2
	Prom.	8.0 ± 14.0	2.0 ± 0.5	3.0 ± 1.4
U	Max.	42.3	3.4	18.0
	Min.	0.2	1.0	0.3
	Prom.	5.0 ± 7.3	2.0 ± 2.0	7.0 ± 4.6
Ba	Max.	15.5	6.2	15.0
	Min.	0.3	1.0	0.6
	Prom.	4.0 ± 3.0	3.0 ± 2.0	6.0 ± 4
Cs	Max.	12.0	6.0	15.0
	Min.	0.3	1.4	0.7
	Prom.	4.0 ± 2.0	3.0 ± 0.5	6.0 ± 4
K	Max.	11.7	2.6	10.8
	Min.	0.4	1.2	0.6
	Prom.	3.6 ± 3.6	2.0 ± 1.0	5.0 ± 3.0
Hf	Max.	15.4	4.5	9
	Min.	0.4	1.2	1
	Prom.	3.0 ± 2.0	3.0 ± 1.0	4 ± 2

Tabla XI (continuación). Factor de enriquecimiento (FE) de los componentes mayores y elementos traza en los sedimentos lagunares, del Estero Zacatecas y continentales.

Elemento		Sedimentos lagunares	Esteros Zacatecas	Sedimentos continentales
Ni	Max.	10.0	8.7	8.4
	Min.	0.2	2.0	0.3
	Prom.	3 ± 2.0	5.0 ± 2.0	2.0 ± 2.0
Zr	Max.	15.2	2.0	10.0
	Min.	0.1	0.2	0.2
	Prom.	2.0 ± 3	1.0 ± 0.5	4.0 ± 3
Br	Max.	16.5	4.7	0.70
	Min.	0.04	0.9	0.01
	Prom.	2.0 ± 3.0	2.0 ± 1.0	0.10 ± 0.20
Rb	Max.	5.60	3.5	5.3
	Min.	0.008	0.3	0.4
	Prom.	2.0 ± 1.0	2 ± 1.0	2.0 ± 1.0
Zn	Max.	6.1	1.6	4.0
	Min.	0.1	0.8	0.6
	Prom.	2.0 ± 1.0	1.0 ± 0.3	2.0 ± 1.0
Th	Max.	2.8	2.4	2.5
	Min.	0.4	0.6	0.3
	Prom.	1.0 ± 0.5	1.0 ± 0.6	2.0 ± 0.7
Hg	Max.	3.5	2.2	1.7
	Min.	0.2	0.3	0.2
	Prom.	1.0 ± 0.7	0.9 ± 0.7	1.0 ± 0.5
Fe	Max.	1.7	0.8	2.4
	Min.	0.6	0.6	0.8
	Prom.	1.0 ± 0.2	0.7 ± 0.1	1.0 ± 0.4
Ta	Max.	3.2	0.9	2.2
	Min.	0.05	0.1	0.1
	Prom.	0.8 ± 0.6	0.6 ± 0.3	1.0 ± 0.7
Cr	Max.	3	1.3	2
	Min.	0.3	0.6	0.2
	Prom.	0.7 ± 0.4	1.0 ± 0.3	1.0 ± 0.5
Co	Max.	4.0	1.4	0.7
	Min.	0.3	0.4	0.5
	Prom.	0.7 ± 0.3	0.6 ± 0.3	1.0 ± 1.5

Este tipo de material se caracteriza por un contenido alto de carbono orgánico que permite la concentración de diversos elementos, entre ellos el Sr, ETR y muy probablemente Pb y As (Mason, 1960; Windom *et al.*, 1989; Álvarez-Arellano 1989 y 1995); debido a una paleoproduktividad primaria alta en San Juan de la Costa durante el Oligoceno-Mioceno, ya que ocurrió en una cuenca de baja energía, compuesta de lodos y arcillas, ligeramente anóxico y con gran cantidad de materia orgánica (Cruz-Marín, 1997). La asociación de fosforita con elementos traza y ETR se observa en otras localidades como las costas de Africa (Watkins *et al.*, 1995), de la propia península de Baja California (Piper, 1991) y en los Estados Unidos (Piper, 1994).

Los sedimentos de la laguna con los valores altos de FE para Se, As y Sb, se observan en la parte norte (frente a la barrera arenosa El Mogote y Punta Comitán) y al sur (frente a Chametla) (ej. distribución de FE para Se, Fig. 30). Los valores en la cercanía de la barrera arenosa *El Mogote* se atribuyen al aporte de material erosionado desde la parte oeste de la bahía, donde se presenta la Formación San Gregorio rica en fosforita, y el cual se transporta hacia el área de la Laguna de La Paz principalmente por corrientes de marea y oleaje; y probablemente, por el transporte eólico en la parte mas delgada de El Mogote como sugieren Green-Ruíz y Larrinaga-Cunningham (1986). Los valores de FE en los sedimentos frente a *Punta Comitán* y *Chametla*, pueden deberse a que esta área de la laguna, la cual comprende una planicie, converge material terrígeno que proviene de las sierras cercanas, descargado durante las precipitaciones pluviales que se presentan temporalmente y contribuyen a la presencia de diversos materiales en los sedimentos superficiales, además del aporte de carbono orgánico derivado de las zonas de manglar existentes en los alrededores.

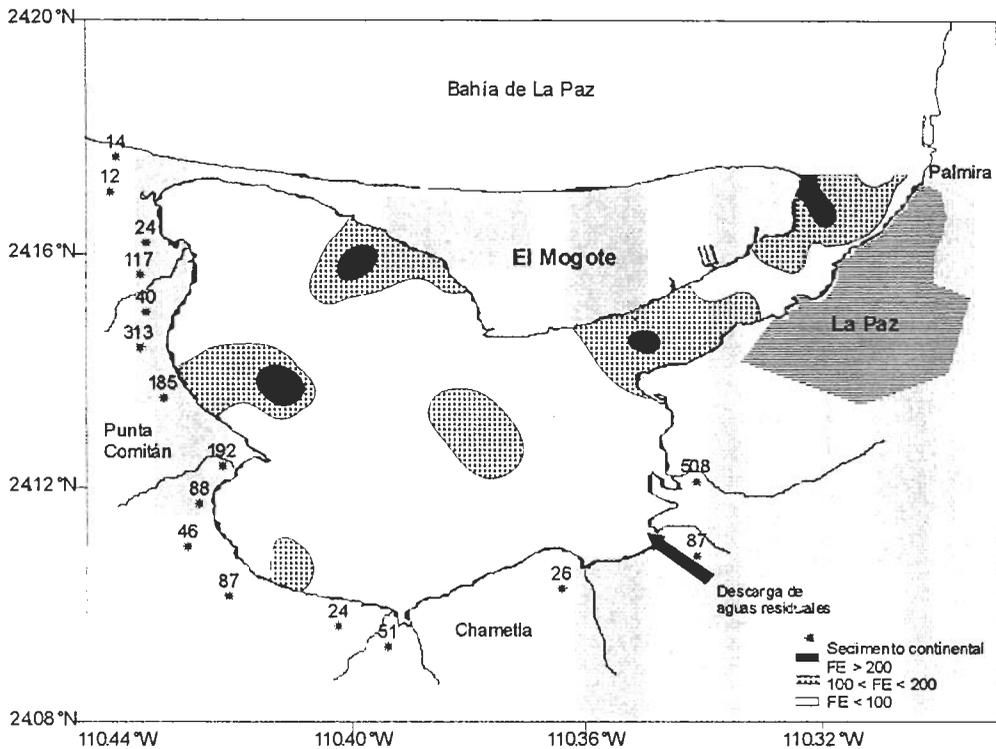


Fig. 30. Distribución de los valores del factor de enriquecimiento (FE) para Se en la Laguna de La Paz.

Grupo *Ba, Br, Ca, Cs, Hf, Hg, K, Ni, Rb, Sr, Th, Zn, Zr y U*. Incluye los elementos que arrojan valores entre 1 y 15 del FE. El resultado que se aprecia en la figura 29 se atribuye a la semejanza entre la concentración en los sedimentos de la laguna con la concentración promedio de la corteza, debido que Salomons y Förstner (1984) consideran que valores cercanos a la unidad sugieren que la erosión continental es probablemente la fuente de los sedimentos y, por lo tanto, de los elementos. Sin embargo, hay que señalar que algunos de los elementos sobrepasan el valor antes señalado, probablemente por su abundancia en las rocas fosfatadas de la Formación San Gregorio y rocas volcanosedimentarias de la Formación Comondú. Las zonas con los valores mas altos de FE para este grupo están en la porción norte, sur y este de la laguna, que puede explicarse por la incorporación de material

sedimentario continental a través de los arroyos, corrientes, oleaje, marea y por el transporte eólico desde las costas adyacentes.

Estas zonas que sobresalen en la Laguna de La Paz presentan características similares a las que señala Martínez-Magaña (1995), quien observa que el Ni se acumula en Bahía San Quintín, en mayor proporción, en los sectores de baja energía como las marismas y en biodepósito, como sucede en Chametla. Posibles variaciones en las zonas de enriquecimiento con respecto a cada uno de los elementos en los sedimentos del interior de la laguna, no se distinguen, como sucede en Bahía San Quintín, donde se presenta heterogeneidad en la distribución, y la cual puede ser resultado de las condiciones oceanográficas características de la zona.

De acuerdo a los reportes en sedimentos profundos de Goldberg y Arrhenius (1958), Goldschmidt (1958) y Mason (1960), los elementos mencionados quizás proceden del aporte de material de tipo terrígeno, dadas las relaciones que se encuentran con los minerales (plagioclasa, biotita, feldespato) que componen las rocas; así como, su asociación con componentes biogénicos (carbonato, sílice). De esta forma se establece que el valor que obtienen de FE estos elementos representan el aporte y la presencia de materiales inorgánicos y biogénicos naturales característicos en el área.

Los valores del FE de Ni en los sedimentos de la Laguna de La Paz oscilan entre 2.4 en los continentales y 5.4 en los del Estero Zacatecas, similares a los que obtiene Martínez-Magaña (1995) para Bahía San Quintín de 2.2 de FE, aunque algunas variaciones deben esperarse por las características de cada área y las condiciones ambientales que prevalecen, como se aprecia con los sedimentos de Estero Zacatecas cuyo valor sobresale por duplicar el valor del FE de Ni en la laguna.

Respecto al Zn, los sedimentos lagunares y continentales (FE ~2) registran valores menores del que se obtiene en los sedimentos de la Bahía San Quintín (FE ~2.5). En el caso de ambientes con problemas de contaminación, como sucede en la Bahía Newark en Nueva

Jersey (E.U.A), el FE de este elemento se estima hasta en 15.6 (Meyerson *et al.*, 1981), dato que sobrepasa entre 6 y 8 veces las estimaciones del FE en la Bahía San Quintín y la Laguna de La Paz. Por otro lado, se reporta que el FE del Hg en el material de Nueva Jersey oscila de 1.5 detrás de la Isla Prall a 155 en el Río Passaic, mientras que en la Laguna de La Paz se encuentra en 1, lo que muestra que los sedimentos de N. Jersey presentan problemas de contaminación debido a la urbanización de estuarios influyen zonas cercanas (hidrodinámica), mientras que los de la laguna deben reflejar las condiciones litológicas características.

Grupo Fe, Co, Cr y Ta. Comprende los elementos, cuyos valores de FE son menores de la unidad y presentan un contenido semejante o por debajo de lo que se establece para la corteza continental. Por ello, es posible que provengan de una fuente de tipo natural, tomando en cuenta que Salomons y Förstner (1984) señalan que la procedencia de los elementos con un FE cercano a la unidad es la erosión continental. Sin embargo, la disminución en los valores del FE en estos elementos se atribuyen a una dilución del sedimento continental, ya sea por componentes biogénicos de los sedimentos (carbonatos) y algunos minerales (cuarzo, feldespatos), que comúnmente se observan en los sedimentos marinos y en otros ambientes (Fleet, 1984; Glasby *et al.*, 1987; Windom *et al.*, 1989). Este tipo de materiales en el fondo sedimentario de la laguna presentan una amplia distribución, pero es principalmente en el Estero Zacatecas y Palmira donde la concentración de carbonatos es mayor, además de ser los puntos donde el FE es alto (Godínez-Orta *et al.*, 1997).

Casos similares de empobrecimiento se observan en los sedimentos de la laguna costera Altata (Sinaloa, México) donde los elementos como V, Cd, Cr, Ni, Zn, Co, Mn, Li, Fe y Cu, obtienen valores de FE por debajo de la unidad, que se interpreta también como resultado de la dilución por la presencia de materia orgánica y carbonato de calcio (Green-Ruíz, 1996). Estos componentes biogénicos, en ambos casos de las lagunas subtropicales de baja latitud (Laguna de La Paz y Laguna Altata) muestran ser un factor importante en el empobrecimiento

de estos elementos, debido a la alta productividad de la zona y alta temperatura ambiental que favorece la formación de carbonatos.

Referencias de los valores obtenidos de este factor para otras áreas de investigación, como la Bahía San Quintín, muestran que el Cr tiene un valor de 1.6 en el FE, el cual es alto respecto a los que se registran en los sedimentos de la Laguna de La Paz, que oscilan entre 0.7 y 1. En el caso del Fe, el factor de enriquecimiento oscila de 0.7 en los sedimentos del Estero Zacatecas a 1 en los lagunares, resultados semejantes al que obtiene Daesslé-Heuser (1993) en Bahía San Quintín con 0.5.

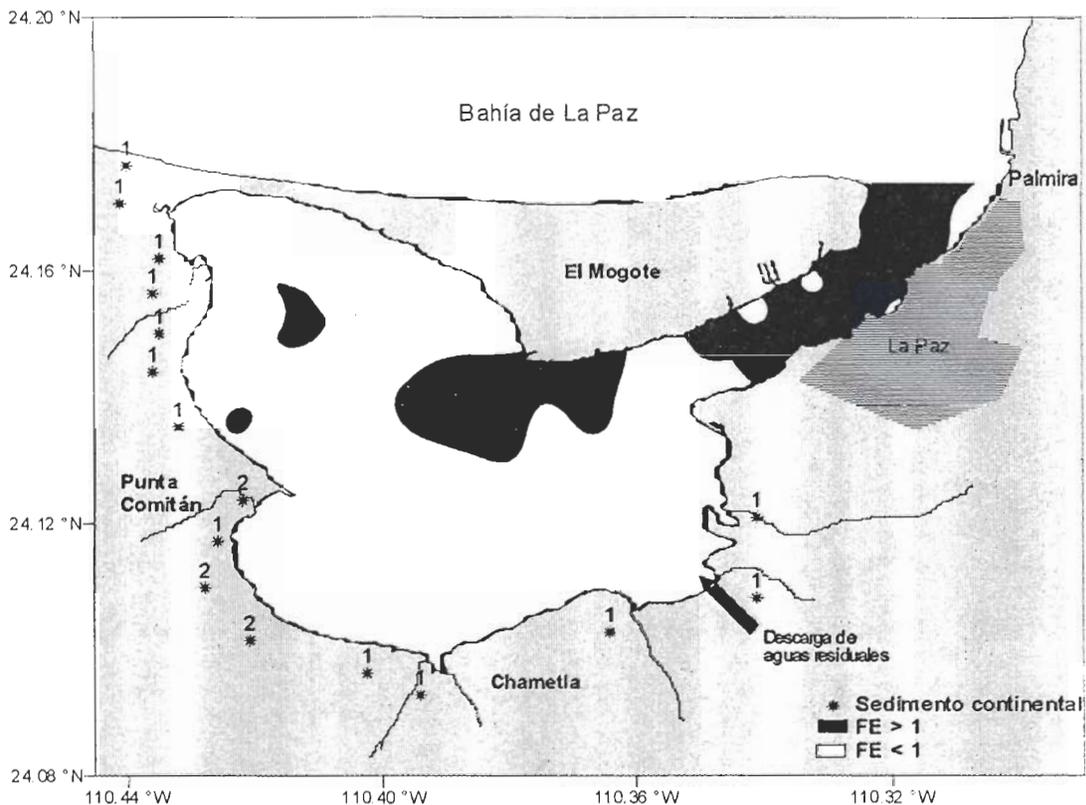


Fig. 31. Distribución de los valores del factor de enriquecimiento (FE) para Fe en la Laguna de La Paz.

En relación a las zonas de empobrecimiento o dilución en la laguna, de elementos como Fe, Cr, Co y Ba; son principalmente el Estero Zacatecas y Palmira las que se identifican (ej.

distribución del FE para Fe, Fig. 31), debido a la presencia de abundantes fragmentos carbonatados (componente biogénico) que interviene como material diluyente de la concentración de los elementos. Dicho proceso es también observado por Fleet (1984) y Windom *et al.* (1989) en sedimentos de ambientes costeros y estuarinos de los Estados Unidos.

De manera general, la distribución espacial de los valores del factor de enriquecimiento (FE) de cada uno de los grupos, diferencian a los sedimentos lagunares en: a) la *zona sur*, donde se ubica Chametla y b) la *zona norte* frente a la barrera arenosa El Mogote. Ambas se diferencian debido a los valores altos que se registran del FE para algunos de los elementos (enriquecimiento) y se atribuye a la erosión de rocas continentales características de la cuenca de drenaje, el transporte y la depositación de los materiales (minerales, componente biogénicos), que generan se registren valores anómalos de concentración. Otra área de enriquecimiento en el interior de la laguna es Punta Comitán (*oeste*), donde Nava-Sánchez y Cruz-Orozco (1989) señalan la presencia de un escarpe de rocas que están sometidas al proceso de erosión y la redepositación de los sedimentos (Fig. 32).

Tomando en cuenta la ubicación de las zonas diferenciadas como de "enriquecimiento"- "empobrecimiento" y la distribución de los componente mineralógicos principales que presenta Derkachev *et al.*, (en prensa) para los sedimentos del interior de la laguna, se aprecia que los puntos de acumulación de los elementos coinciden con los contenidos máximos de algunos minerales, como son: ortopiroxeno, ooídeos fosfáticos, hematita, magnetita, zircon, apatita y epidota. Dichos componentes continentales son considerados por Goldberg y Arrhenius (1958), Goldschmidt (1958), Clark (1984), Fleet (1984), como posibles fuentes de aporte para los elementos mayores y traza, por la diversidad y abundancia en que se encuentran presentes, los cuales provienen de la intemperización de rocas volcanosedimentarias.

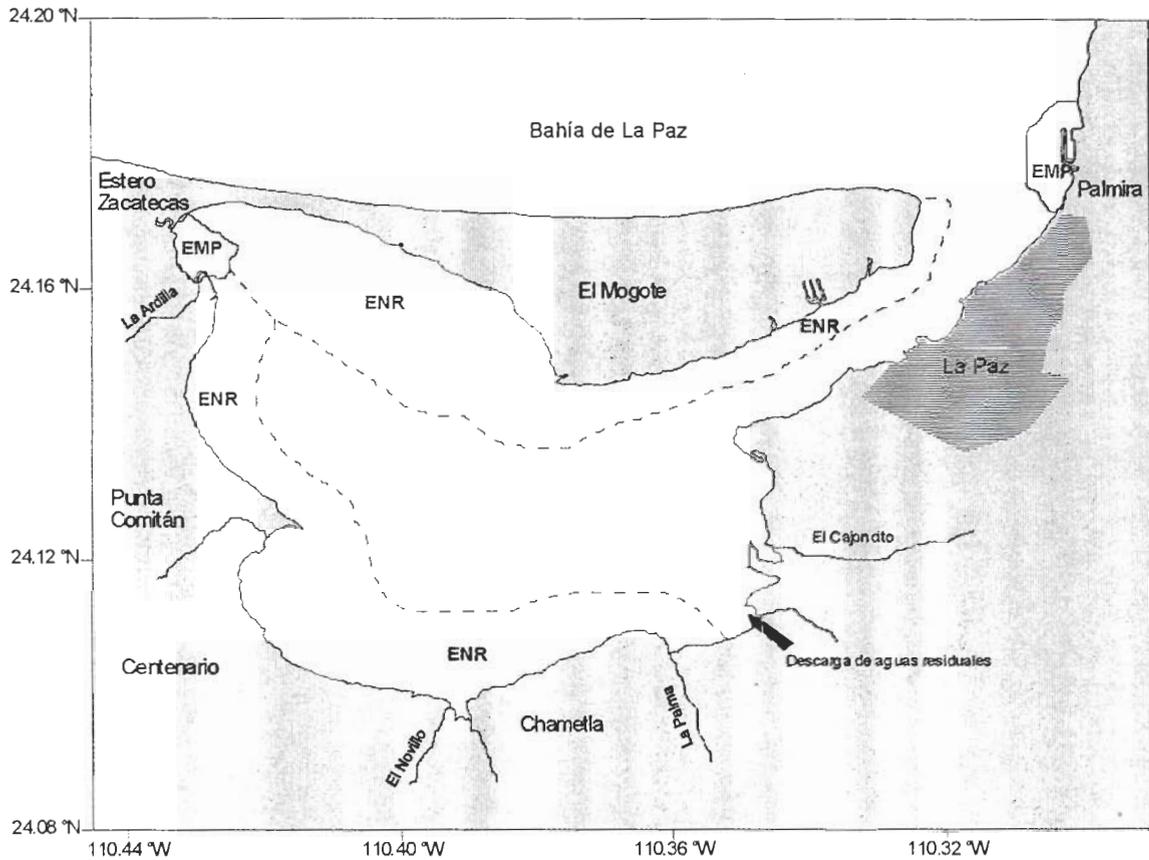


Fig. 32. Zonas de enriquecimiento (ENR) y de empobrecimiento (EMP) de los elementos mayores y traza, de acuerdo al valor del FE en los sedimentos lagunares.

III. 4. 4. Caracterización del comportamiento geoquímico de los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR) en los sedimentos de la Laguna de La Paz

Debido a la semejanza química de los ETR entre sí, su caracterización del comportamiento geoquímico en el ambiente se realiza por medio de la normalización de la concentración en los sedimentos de la Laguna de La Paz tomando en cuenta los valores de Ross y McLennan (1985) referentes a la composición y evolución de lutita en la corteza terrestre de la plataforma de Norteamérica, que se considera como una línea base para discutir la tendencia de enriquecimiento o empobrecimiento de estos elementos (Pattan y Banakar, 1993) en el material sedimentario. La normalización de los valores se hizo de la siguiente manera: $Nm = \frac{El\ sedimento}{El\ lutita}$, donde se emplea la concentración de cada elemento en los sedimentos (lagunares, del Estero Zacatecas y continentales) y el promedio del mismo elemento en la lutita. Se maneja este material debido a que presenta una similaridad en la abundancia absoluta de ETR relativo a otros materiales, además de representar los contenidos en la corteza continental superficial (Fleet, 1984).

Los datos que se obtienen, tanto de los sedimentos lagunares, como del Estero Zacatecas y de los sedimentos continentales adyacentes, se presentan en la Tabla XII. Estos valores normalizados, mostrados en la figura 33, presentan oscilaciones entre 0.3 (mínimo) que corresponde al Nd de los sedimentos lagunares y 0.8 (máximo) del Eu en el material del Estero Zacatecas. Otros elementos que se diferencian son Gd en el Estero Zacatecas y Ho del sedimento continental por los valores altos que presentan.

Los valores de la relación ETR/ lutita, en los sedimentos lagunares y continentales siguen un comportamiento similar por lo que se llegan a diferenciar dos grupos de elementos, los denominados elementos de Tierras Raras ligeras (ETRL) (La, Ce, Pr, Nd, Sm) y los de

Tierras Raras pesadas (ETRP) (Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu). Los primeros elementos (ETRL) presentan disminución en los valores normalizados con respecto a ETRP lo que se atribuye a diferencias de concentración, o bien a las condiciones químicas en que se encuentran en el ambiente, debido a que De Baar *et al.* (1985) señalan mayor estabilidad de los ETRP por la fuerte complejidad inorgánica y que en el estado hidrolizado son fácilmente removidos.

Tabla XII. Valores normalizados de los elementos del grupo de las Tierras Raras en los sedimentos de la Laguna de La Paz y la concentración en lutita norteamericana ($\mu\text{g/g}$).

Elemento		Sedimento lagunar	Estero Zacatecas	Sedimento continental	Lutita norteamericana ⁽¹⁾ ($\mu\text{g/g}$)
La	Max.	1.70	0.8	0.80	-
	Min.	0.03	0.4	0.06	-
	Prom.	0.50 ± 0.20	0.6 ± 0.1	0.60 ± 0.20	32
Ce	Max.	1.20	0.7	0.70	-
	Min.	0.03	0.3	0.06	-
	Prom.	0.40 ± 0.20	0.5 ± 0.1	0.50 ± 0.20	73
Pr	Max.	1.00	0.7	0.70	-
	Min.	0.04	0.3	0.08	-
	Prom.	0.40 ± 0.20	0.5 ± 0.1	0.50 ± 0.10	7.9
Nd	Max.	0.80	0.6	0.60	-
	Min.	0.06	0.2	0.09	-
	Prom.	0.30 ± 0.10	0.4 ± 0.1	0.40 ± 0.10	33
Sm	Max.	1.1	0.8	0.8	-
	Min.	0.1	0.3	0.2	-
	Prom.	0.4 ± 0.2	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.2	5.7
Eu	Max.	1.20	1.0	1.2	-
	Min.	0.08	0.5	0.2	-
	Prom.	0.60 ± 0.3	0.8 ± 0.1	0.8 ± 0.2	1.24
Gd	Max.	1.3	1.1	1.1	-
	Min.	0.2	0.4	0.2	-
	Prom.	0.6 ± 0.2	0.8 ± 0.2	0.7 ± 0.2	5.2

⁽¹⁾ Datos de Ross y McLennan (1985)

Tabla XII (continuación). Valores normalizados de los elementos del grupo de las Tierras Raras en los sedimentos de la Laguna de La Paz y la concentración en lutita norteamericana ($\mu\text{g/g}$).

ELEMENTO		Sedimento lagunar	Estero Zacatecas	Sedimento continental	Lutita norteamericana ⁽¹⁾ ($\mu\text{g/g}$)
Tb	Max.	1.2	1.0	1.0	-
	Min.	0.1	0.4	0.2	-
	Prom.	0.5 ± 0.2	0.7 ± 0.2	0.7 ± 0.24	0.85
Dy	Max.	1.0	0.9	1.0	-
	Min.	0.1	0.3	0.2	-
	Prom.	0.5 ± 0.17	0.6 ± 0.17	0.6 ± 0.22	5.8
Ho	Max.	1.20	1.1	1.3	-
	Min.	0.10	0.4	0.3	-
	Prom.	0.55 ± 0.22	0.7 ± 0.2	0.8 ± 0.3	1.04
Er	Max.	1.00	1.0	1.2	-
	Min.	0.08	0.3	0.3	-
	Prom.	0.50 ± 0.18	0.6 ± 0.2	0.7 ± 0.3	3.4
Tm	Max.	1.00	1.0	1.3	-
	Min.	0.07	0.3	0.3	-
	Prom.	0.50 ± 0.19	0.6 ± 0.2	0.7 ± 0.3	0.5
Yb	Max.	1.00	0.9	1.3	-
	Min.	0.04	0.2	0.3	-
	Prom.	0.40 ± 0.17	0.5 ± 0.2	0.7 ± 0.3	3.1
Lu	Max.	1.10	0.9	1.4	-
	Min.	0.04	0.2	0.3	-
	Prom.	0.40 ± 0.2	0.6 ± 0.2	0.7 ± 0.3	0.48
Eu _{anom.}	Prom.	1.20	1.10	1.30	-
Ce _{anom.} ⁽²⁾	Prom.	0.88	0.90	0.90	-
Ce _{anom.} ⁽³⁾	Prom.	-0.03	-0.02	-0.02	-
La _n / Yb _n ⁽²⁾	Prom.	1.25	1.20	0.85	-

⁽¹⁾ Datos de Ross y McLennan (1985); ⁽²⁾ ecuación de Jafri *et al.*, (1993) y ⁽³⁾ Watkins *et al.*, (1995)

Por estas razones, la diferencia entre los ETR se puede generar por variaciones ambientales, condiciones oceanográficas y al aporte de material terrígeno, debido a los cambios que se pueden producir en los sedimentos (material de depositación) y en las

características fisicoquímicas del agua de mar, considerando que esta es una fuente importante de aporte de ETR en el ambiente (Fleet, 1984; Watkins *et al.*, 1995).

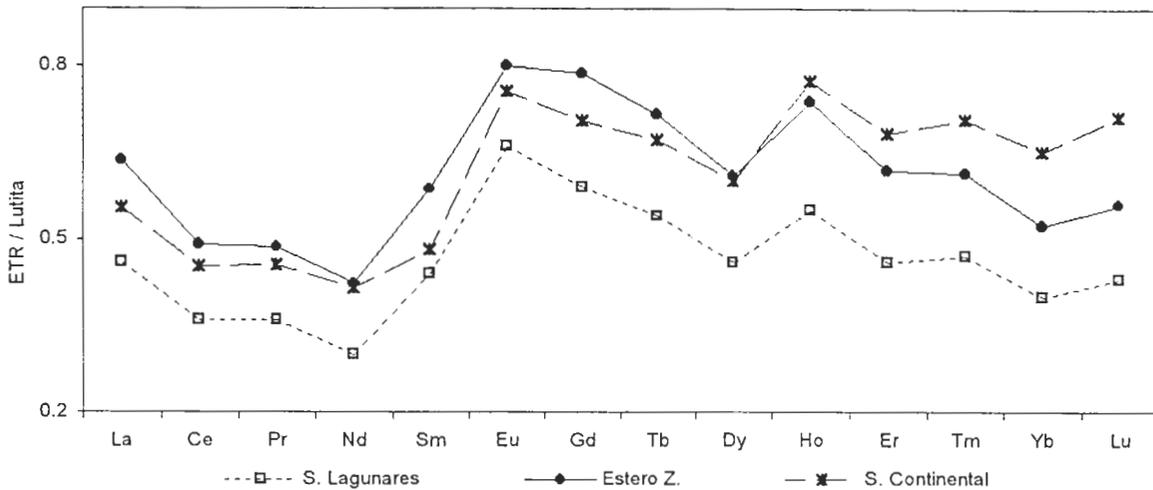


Fig. 33. Comportamiento de normalización de las concentraciones de ETR con lutita, en los sedimentos lagunares, del Estero Zacatecas y en los sedimentos continentales

Referencias sobre la asociación del material continental con ETR se observan en las costas de Africa, Estados Unidos, Argentina, Océano Pacífico, entre otras localidades, para estas áreas los autores coinciden en señalar que las fosforitas son un material continental que destaca por los contenidos altos en que estos elementos se llegan a observar; de igual manera, en los nódulos de manganeso y en basaltos. En la Península de Baja California los contenidos de ETR y algunos metales en sedimentos, reflejan ambientes con aporte de rocas fosfatadas como en San Juan de la Costa (B. C. S.) (Piper, 1991), Bahía Vizcaíno (Daesslé-Heuser, 1993) y Bahía Magdalena (Álvarez-Arellano, 1995), que presentan valores altos, tanto en los sedimentos como en el material continental. Estos se atribuye a la productividad primaria elevada que caracterizó, en épocas pasadas, a los mares que cubrieron a la península motivando el enriquecimiento de los materiales sedimentarios por diversos elementos.

Las fosforitas en los sedimentos de la Laguna de La Paz derivan del aporte de material continental por la descarga de arroyos, así como del transporte por corrientes, marea, oleaje y transporte eólico, entre otros factores, de partículas que provienen de la Bahía de La Paz, en donde se localiza San Juan de la Costa. Dicha influencia se observa a través de la presencia de fracciones fosfáticas (ooídeos, coprolitos, peloides, intraclastos) en la barrera arenosa El Mogote y en los sedimentos cercanos a esta área (Mendoza-Maravillas, 1990; Prieto-Mendoza, 1991), que ocasionan se encuentren contenidos altos de fósforo (1% a 6%), determinado como $P_2 O_5$ y que sobrepasa el valor de referencia de 0.08% a 0.17% en los sedimentos continentales (Álvarez-Arellano, 1995).

III. 4. 4. 1. Anomalía de Eu

Los valores normalizados con lutita que se obtienen en la Laguna de La Paz muestran diferencias con respecto a otras partes del mundo, específicamente en el resultado que presenta *Eu*. Este elemento en la laguna presenta un valor máximo normalizado de 0.8 que corresponde a los sedimentos del Estero Zacatecas, el cual representa una anomalía de tipo positiva considerando los patrones de distribución que McArthur y Walsh (1984) describen para los ETR. Comportamiento semejante siguen los datos del sedimento continental y de los sedimentos lagunares, pero este último en menor proporción (Fig. 33).

Las referencias de la normalización de ETR en sedimentos son de Bahía Vizcaíno, donde Daesslé-Heuser (1993) indica para *Eu* una anomalía de tipo negativa, que hace diferenciarla de la Laguna de La Paz. Esta desigualdad entre ambas áreas, muestra que aunque se encuentran ubicadas en la Península de Baja California el tipo de roca o la proporción de aporte de material puede ser distinta, además que las condiciones ambientales en cada localidad es otro factor que influye en los resultados.

Para sedimentos de otras áreas como es el Océano Pacífico (Shen, 1991; Liu, 1992; Liu *et al.*, 1994), Río Manso de Argentina (Román *et al.*, 1995), Cordillera de San Juan de Fuca (German *et al.*, 1997) y el Lago Campestre (Salitre, Brasil) (Sondag *et al.*, 1997), se reportan anomalías de tipo positivo para el Eu como sucede en esta laguna. La manifestación de este tipo de anomalía, se basa en las concentraciones elevadas en que se encuentra este elemento en particular en algunos minerales, como la arcilla zeolita, apatita, monazita, plagioclasas, feldespatos y biotita (Clark, 1984; Ross *et al.*, 1995), que provienen de fuentes autógenas, terrestres y biogénicas. Por otro lado, McArthur y Walsh (1984) mencionan que la anomalía de tipo positiva de Eu en fosforitas puede deberse a la incorporación de los ETR en ambientes bajo condiciones reductoras, mientras que en ambientes con condiciones óxicas se presenta anomalía de Ce.

Los valores de la anomalía de Eu en la laguna se calcularon como lo describen Jafri *et al.* (1993) y Daesslé-Heuser (1995) con la formula: $\frac{Eu}{Eu^*} = \frac{Eu_{muestra}}{Eu_{lutita}}$, donde Eu^* se deriva de la interpolación lineal entre los valores de Sm y Gd normalizados con respecto de la lutita. La anomalía de Eu en la Laguna de La Paz oscila entre 1.1 y 1.2, que representa homogeneidad, tanto en los sedimentos lagunares como los continentales.

Las referencias de este tipo de anomalía reportan, para los sedimentos de Bahía Vizcaíno, con variaciones de 0.18 a 0.67 (Daesslé-Heuser, 1995); en depósitos de las islas Andaman-Nicobar, con oscilación entre 1.02 a 1.13 (Jafri *et al.*, 1993); y para el Río Negro en Argentina el valor de Eu_{anom} es de 1.03 en los sedimentos y de 1.5 en rocas basálticas (Román *et al.*, 1995). De estas áreas, se observa que la Laguna de La Paz presenta semejanza con las islas Andaman-Nicobar y el Río Negro cuya anomalía en estas zonas es de ~ 1 , mientras que el resultado en la Bahía Vizcaíno es menor respecto a los reportados, debido a que presenta una anomalía de tipo negativa que la diferencia de las áreas anteriores.

El comportamiento que presenta el Eu tanto en los sedimentos lagunares como en los continentales se atribuye a la intemperización de las rocas y de la actividad de los ETR con minerales bajo ciertas condiciones ambientales (pH, material orgánico, detritus, O₂ disuelto). La anomalía positiva de Eu que se define como abundancia elevada (enriquecimiento) de este elemento, Clark (1984), Daesslé-Heuser (1993), Jafri *et al.* (1993) y Román *et al.* (1995), la describen a través de la relación con los feldespatos, minerales que pueden concentrar el Eu durante procesos magmáticos o bien por un cambio del estado de valencia asociado a factores fisicoquímicos del agua, donde el Eu³⁺ (condición normal) pasa a Eu²⁺ (condición reducida), forma que permite su incorporación en este mineral y que motiva un exceso de este elemento en el feldespato.

Tomando en cuenta los resultados de Eu_{anom} que se obtienen en los sedimentos lagunares y continentales (Tabla XII), se observa que en estos últimos es donde se obtiene la mayor anomalía que probablemente se produce por una alta abundancia de feldespatos, debido al aporte de material intemperizado y erosionado de las sierras cercanas, a través de las descargas de los arroyos. Esta influencia continental también debe actuar en los sedimentos lagunares, tomando en cuenta la semejanza de los datos en la Tabla XII. Además que Elderfield (1988) señala que la presencia de una anomalía de Eu, es una respuesta a la entrada de tipo eólico e hidrotermal de material en el ambiente. Con base en lo anterior, probablemente el aporte eólico de material enriquecido en Eu también es importante en la caracterización de los ETR en los sedimentos de esta laguna costera.

III. 4. 4. 2. Anomalía de Ce

No sólo se observa anomalía de Eu en los sedimentos continentales y lagunares, sino también de Ce, como lo señalan McArthur y Walsh (1984), De Baar *et al.* (1985), Pattan y Banakar (1993) y Watkins *et al.* (1995), para otros lugares; y que pueden ser negativas o

positivas dependiendo de las condiciones en que se capturan los ETR del medio (estado de oxidación). La forma de estimar esta anomalía puede ser de dos formas: la primera es similar a la de Eu en donde se emplean los valores de La y Pr normalizados; y la segunda, con la ecuación de Watkins *et al.* (1995), donde $Ce_{anom} = \text{Log} \left[\frac{3 Ce^*}{(2 La + Nd)} \right]$.

En la Laguna de La Paz el valor de Ce_{anom} , tanto para los sedimentos lagunares como en los continentales, oscila de 0.8 a 0.9 (calculado con la ecuación de Jafri *et al.*, 1995) y que muestra semejanza con lo que se encuentra en las islas Andaman-Nicobar (0.91 a 1.01 y 0.63 a 0.72, respectivamente) donde se observa que el material presenta anomalías que varían ligeramente de positivas a negativas de Ce. De acuerdo a estos valores, la anomalía de Ce más notoria ocurre en los sedimentos lagunares (Tabla XII), ya que obtiene el dato mas bajo (0.8), mientras que en el material del Estero Zacatecas y en los sedimentos continentales la anomalía es ligeramente mas positiva (0.9).

Las estimaciones de la anomalía de Ce respecto a la ecuación de Watkins *et al.* (1995) en la Laguna de La Paz, varían de -0.02 a -0.03, valores pequeños considerando que en Namibia (Africa) oscilan de -0.11 en fango diatomáceo a -0.23 en rocas fosfatadas donde la anomalía de Ce es marcadamente negativa. Esto muestra que los sedimentos de la Laguna de La Paz presentan anomalía de Ce ligeramente negativa, así como los del Estero Zacatecas y los continentales. Estas zonas (Laguna de La Paz y el sur de Namibia) con Ce_{anom} negativa, contrastan con lo que se señala en los sedimentos de la India, cuya anomalía positiva ocurre con un valor de 0.24 (Pattan y Banakar, 1993).

La forma de estimar la anomalía de Ce puede variar. Sin embargo, ambas formas que se aplican para los sedimentos de la Laguna de La Paz muestran que en esta área se presenta una anomalía de Ce ligeramente negativa. Este tipo de comportamiento del elemento Ce se atribuye a un aporte de tipo continental como se observa en las costas de Africa, las islas Andaman-Nicobar y Océano Pacífico, donde la descarga de material desde las costas al

ambiente marino es muy significativo. Además que en el Pacífico también la influencia hidrotermal motiva una anomalía negativa fuerte para este elemento (0.29) (Jafri *et al.*, 1993).

III. 4. 4. 3. Patrón de distribución

Con base en los anterior, los sedimentos de la Laguna de La Paz se caracterizan por la presencia de anomalía positiva para Eu y del tipo negativa para Ce (ligeramente evidente), además de la diferencia que se aprecia entre los elementos ETRL y ETRP. De acuerdo a esta información es posible establecer el tipo de patrón de distribución que presentan los ETR en los sedimentos de esta laguna, tomando como referencia la descripción que realizan McArthur y Walsh (1984) para cada uno: (1) patrón lutita, (2) patrón agua de mar, (3) patrón intemperizado y (4) ninguno de los anteriores.

Por las características que se indican, posiblemente la Laguna de La Paz cae en el patrón de agua de mar por la anomalía negativa de Ce y el enriquecimiento de ETRP que se observa. Sin embargo, estos no son muy claros dado que la anomalía que se observa no es tan evidente como se aprecia en el Desierto Sechura, Banco Agulhas y Marruecos; además que ninguna de las áreas que presentan este patrón exhiben anomalía positiva para Eu. Las diferencias que se observan en la distribución de los ETR de la Laguna de La Paz permite clasificarla dentro del último patrón, que se refiere a que no presenta algo peculiar de los patrones, como también se clasifica el estado norte de la Península de Baja California con la Formación Monterrey (McArthur y Walsh, 1984) (actualmente llamada Formación San Gregorio).

Tomando en cuenta que son muy pocos los trabajos que describen el patrón normalizado de ETR en el ambiente, se emplearon los datos de concentración de algunas áreas de la Península de Baja California, Pacífico ecuatorial, sur de Africa, Perú y datos de la corteza de Australia (Nance y Taylor, 1977). Los resultados muestran diferentes

comportamientos de ETR con respecto a la Laguna de La Paz, aunque se observa similitud respecto a los datos de rocas fosfatadas del sur de Africa (Watkins *et al.*, 1995) y con la corteza de Australia. Esta semejanza se aprecia en el Eu, donde presenta un máximo que se define como anomalía positiva y que lo diferencia de los restantes elementos (Fig. 34).

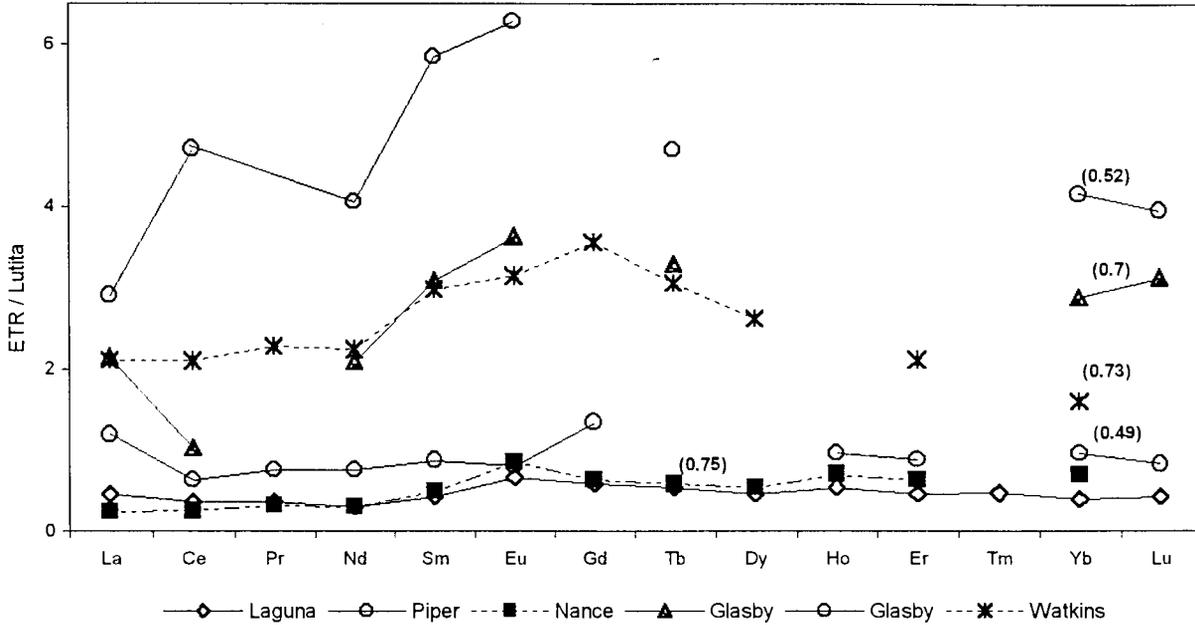


Fig. 34. Normalización de los datos de concentración de ETR en la corteza continental (Taylor, 1964; Nance y Taylor, 1977); sedimento y nódulo en el Océano Pacífico (Glasby *et al.*, 1987), nódulo fosfatado del sur de Africa (Watkins *et al.*, 1995), sedimentos de San Juan de la Costa (Piper, 1991) y en la presente área de estudio (r, coeficiente de correlación).

Se obtienen resultados del coeficiente de correlación entre los diferentes datos normalizados y la Laguna de La Paz (Fig. 34), donde dos casos son los mas significativos con 0.75 para Nance y Taylor (1977) del contenido en la corteza de Australia y 0.73 de Watkins *et al.* (1995) para la fosforita en el Africa, valores que muestran relación con este ambiente lagunar aunque las diferencias pueden darse por las variaciones en las concentraciones de los

elementos ETR y en la significancia de las anomalías de Eu y Ce, como se observa para el sur de Africa.

La anomalía positiva de Eu en la corteza continental de Australia se atribuye a un efecto local producido por el intemperismo y depositación de materiales provenientes de rocas sedimentarias que producen una acumulación selectiva con alta abundancia de feldespatos y plagioclasas. Dichos minerales, incluyendo micas, ortopiroxeno, biotita y gránate, son algunos de los más importantes concentradores de ETR que intervienen en el enriquecimiento de Eu en los depósitos sedimentarios (Clark, 1984; Fleet, 1984; Román *et al.*, 1995), como posiblemente sucede en la Laguna de La Paz. Mientras que la ausencia de anomalías, que no se aprecian en esta laguna, se relaciona a la carencia de las plagioclasas o que las rocas ricas en K no son una fuente importante de materiales para los sedimentos (Nance y Taylor, 1977).

El comportamiento de los ETR normalizados en San Juan de la Costa (anomalía de Eu negativa), es diferente al que se obtiene en la Laguna de la Paz, a pesar de que este ambiente lagunar recibe influencia de San Juan de La Costa a través del aporte de materiales continentales transportados desde la Bahía de La Paz y favorecido por el efecto de los factores medioambientales. La diferencia entre ambas zonas quizás es producto de aspectos como son: (1) la capacidad de almacenamiento de las partículas continentales y de los elementos traza, donde la laguna destaca por ser un cuerpo de agua somero y semicerrado cuya capacidad de retención es mayor; (2) la complejidad del ambiente, refiriéndose a la diversidad de procesos o factores que influyen en el ambiente, donde este ambiente lagunar sobresale debido que recibe aportes de material granítico de las sierras en la porción sur de la cuenca de drenaje, del tipo volcánico de la Formación Comondú y contribución de las dunas inactivas de la barrera arenosa El Mogote. Probablemente la relación de estos aspectos. es lo que propicia las diferencias entre las áreas, debido a que Ross *et al.* (1995) señala para el Río Mason un patrón semejante al de la Laguna de La Paz en donde se encuentra un fuerte enriquecimiento de

ETRP y a Eu con anomalía positiva, y considera que es causado por la geología de las cuencas de drenaje en la localidad.

Las investigaciones referidas al análisis de ETR en los ambientes marinos coinciden en señalar que aunque algunos minerales son importantes concentradores de elementos hay otros que presentan poca abundancia, en este caso son cuarzo y carbonatos, precipitados autógenos (Fleet, 1984; Windom *et al.*, 1989; Román *et al.*, 1995) que actúan como diluyentes de la concentración del elemento en los sedimentos, como se observa en el Banco Agulhas y el margen Marroquí (McArthur y Walsh, 1984). Empobrecimiento similar de los contenidos de ETR se aprecian en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz, en la zona de Palmira donde la distribución espacial de estos elementos indica abundancia baja dado que la concentración de los carbonatos es elevada.

III. 4. 4. 4. Distribución espacial

La distribución espacial de los valores normalizados de la concentración del Eu de los sedimentos de la Laguna de La Paz (Fig. 35) muestra que los valores mas altos ocurren frente al Estero Zacatecas y la barrera arenosa El Mogote. Tomando en cuenta que la anomalía indica abundancia (positiva) o empobrecimiento (negativa), se obtiene que en la Laguna de La Paz hay abundancia elevada de Eu, en zonas que se ubican al norte, posiblemente a través del aporte de materiales como las masas fosfáticas, minerales y otras partículas características de las Formaciones San Gregorio y Comondú.

Es principalmente en la parte norte de la laguna donde se produce la acumulación de Eu, debido a que la corriente marina en la Bahía de La Paz presenta dirección sur a lo largo de la costa occidental (Jiménez-Illescas, 1996; Jiménez-Illescas *et al.*, 1997), lo que permite el transporte de partículas desde otras áreas hasta la barrera arenosa El Mogote donde se deposita. Este comportamiento, como describe Nava-Sánchez y Cruz-Orozco (1989), ha

permitido el desarrollo y crecimiento de la barrera arenosa El Mogote. De esta forma, se considera que posiblemente parte del material que se procesa en San Juan de la Costa y se incorpora a la Bahía de la Paz, llega a la laguna del mismo nombre, el cual se caracteriza por presentar contenidos altos de ETR.

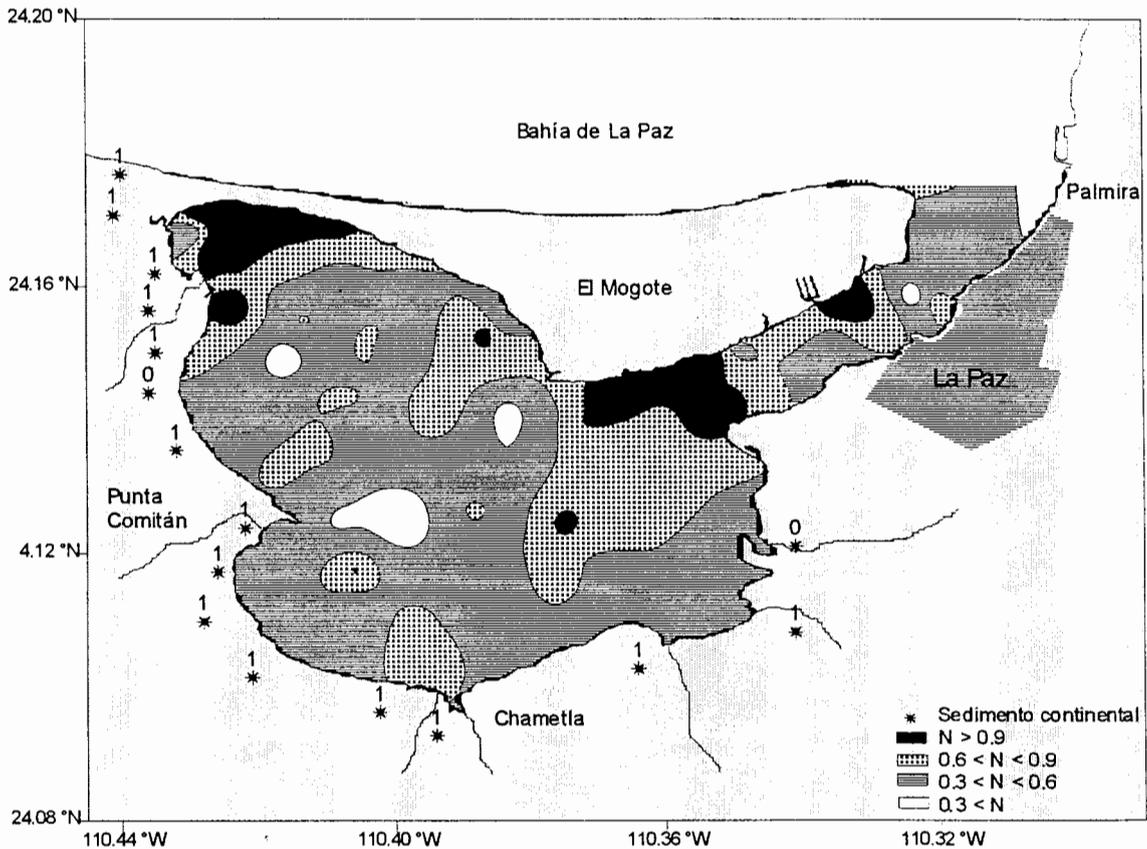


Fig. 35. Distribución de los valores normalizados de Eu en los sedimentos lagunares y sedimentos continentales.

Otra de las estimaciones que se obtienen de las concentraciones de ETR en los sedimentos de la Laguna de La Paz es la relación La_n/Yb_n (Tabla XII), para representar el empobrecimiento o enriquecimiento de los ETRL con respecto a los ETRP. Los resultados en la Laguna de La Paz oscilan de 0.85 a 1.25, de los cuales el valor menor corresponde al material

del cauce de los arroyos y el mayor a los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz. Resultados semejantes a los que obtienen Daesslé-Heuser (1993) y Jafri *et al.* (1993), se registran tanto los sedimentos lagunares como del Estero Zacatecas de la presente laguna costera, que son enriquecidos en ETRL, mientras que el valor de 0.8 que resulta en el sedimento continental representa el enriquecimiento de ETRP. El incremento que presentan estos elementos en los sedimentos, Ross *et al.* (1995) lo atribuyen a sistemas con un pH-alto o con la presencia de fases accesorias, que muestran una clara dependencia sobre la fuente de las rocas.

Los resultados de esta relación cercanos a la unidad en la Bahía Vizcaíno indican que no existe un enriquecimiento de ETRP, salvo algunas excepciones; mientras que en las islas Andaman-Nicobar los valores normalizados oscilan de 0.5 a 1.93. Estos valores respecto de la Laguna de La Paz muestran que a pesar de que los sedimentos obtienen un valor alto, este no representa un enriquecimiento marcado de ETRL como sucede en las islas Andaman-Nicobar que revelan hasta 1.9. Aunque este resultado oscila entre ~1 y ~1.3, representa la influencia de tipo terrígeno en la laguna, además de la presencia de un componente con abundante ETRP (Jafri *et al.*, 1993). En el caso del valor menor que se obtiene en la laguna se considera es producto de un factor con contenido bajo de ETRL o quizás al efecto de dilución por minerales de cuarzo y componentes biogénicos (Gódinez *et al.*, 1997).

La representación gráfica de los valores normalizados (Fig. 33) no muestra este tipo de enriquecimiento en ETRL tanto para los sedimentos lagunares como del Estero Zacatecas, que puede atribuirse a la proximidad que se presenta con la unidad de la razón normalizada de La/Yb, lo que impide obtener una observación mas clara de esta relación. No obstante, en los sedimentos continentales del cauce de los arroyos se aprecia claramente que los ETRP sobresalen de los ETRL.

IV. DISCUSION

IV. 1 FACTORES QUE CONTROLAN LA DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LA PAZ

El comprender en más detalle las características geoquímicas de los sedimentos de la Laguna de La Paz (concentración de elementos, patrones de distribución espacial), lleva a diferenciar los factores principales que influyen en el aporte de material, ya sean de tipo natural y antropogénico. Tomando en cuenta que los sedimentos de las lagunas son mezclas derivadas de fuentes diferentes, algunas externas como los arroyos o el mar, y otras internas dentro del sistema (Maynard y Boon, 1994), se considera que los aspectos que caracterizan a la Laguna de La Paz, son: a) la litología de la cuenca de drenaje, b) el transporte litoral y de corrientes, c) el transporte eólico y d) la precipitación pluvial. De éstas, las particularidades de la litología de la cuenca se describen en el capítulo IV. 2.

IV. 1. 1. Transporte litoral y corrientes

Este tipo de transporte se describe como un flujo de agua sobre la línea de costa que acarrea partículas terrígenas y las distribuye a áreas circundantes. Maynard y Boon (1994) describen este tipo de influencia en las lagunas costeras, como una fuente constante y dominante en el aporte de material marino. Es importante señalar este aspecto en la Laguna de La Paz para tratar de entender la procedencia del material, la dirección del movimiento y las zonas de depositación.

Tomando como referencia los trabajos realizados en la laguna y en la barrera arenosa El Mogote, estos coinciden en señalar a la Bahía de La Paz como una fuente de material terrígeno importante, debido al volumen que se transporta (122, 400 m³ durante 1988) (Álvarez-Arellano *et al.*, 1997) y que llega a influenciar la porción sur de la bahía, donde se

ubica la barrera arenosa El Mogote y, posiblemente, el interior de la laguna. La presencia de esta barrera toma importancia debido a que interviene como un cuerpo que protege a la laguna de eventos como los regímenes de marea, oleaje y viento (Álvarez-Arellano *et al.*, 1997); mientras que el cuerpo lagunar, actúa como zona de acumulación de las partículas debido a las profundidades bajas que la caracterizan (Cruz-Orozco *et al.*, 1996).

De acuerdo con la litología de la cuenca y el patrón de circulación del agua que Jiménez-Illescas (1996) describe en la Bahía de La Paz, el tipo de material que llega a acumularse en El Mogote proviene de las costas de la parte oeste de la bahía donde se encuentran rocas fosfatadas (Formación San Gregorio) y volcánicas sedimentarias (Formación Comondú), además que el aporte continuo ha contribuido al crecimiento de la barrera (Jiménez-Illescas, 1989; Nava-Sánchez y Cruz-Orozco, 1989). La influencia de las corrientes litorales en El Mogote se ha registrado a través de la concentración y distribución de fósforo-fosfatos, la identificación de partículas o minerales en los sedimentos (Green-Ruiz y Larrinaga-Cunningham, 1986; Mendoza-Maravillas, 1990; Prieto-Mendoza, 1991) y con la dispersión de sedimentos por el alga *Sargassum sinicola* (Galli-Olivier y García-Domínguez, 1982).

Morales (1982), Gómez *et al.* (1984) y Obeso-Nieblas *et al.* (1993), describen un esquema de circulación en la Bahía de La Paz y la Laguna de La Paz que sugiere la entrada del agua en la laguna a través del canal, donde se registran las mayores velocidades de la corriente que se estiman entre 50 cm/seg a 70 cm/seg. Esto se produce por lo estrecho del canal y ocasiona un flujo mayor hacia el interior, la corriente diverge a través de la bifurcación frente a Comitán y provoca la dispersión y el asentamiento de los materiales en las zonas someras donde la velocidad es menor (~5cm/seg), tanto en la porción norte como sur del interior de la laguna.

El tiempo estimado para el recambio del agua en este ambiente lagunar es alrededor de 2 días (Jiménez-Illescas, 1983), tiempo que se señala como suficiente para que se haya

generado el saneamiento de este cuerpo agua durante el período que se descargaron las aguas residuales. Por esta razón, se considera que las concentraciones que se han registrado de elementos mayores y traza en los sedimentos de esta laguna son característicos de ambientes con escasa influencia antropogénica y, que principalmente, reflejan las condiciones naturales del área (litología característica).

Es importante mencionar, que de acuerdo al modelo hidrodinámico numérico de Jiménez-Illescas (1983) y al patrón del recambio de agua de Gómez *et al.* (1984), se infiere que los sedimentos de la zona del canal no acumulan elementos traza, debido a las altas velocidades que puede alcanzar el flujo y el reflujo de agua. Aunque las zonas cercanas a la barrera arenosa, quizás presentan depositación y acumulación del material sedimentario por la disminución en la velocidad del flujo, la presencia de mangles que facilitan la depositación de material fino, además de añadir, la remoción y desplazamiento de material acumulado por efecto del viento (dunas) (transporte eólico) y, a través, de los escurrimiento durante la precipitación pluvial (estacional).

Es necesario describir la trayectoria del flujo de agua, donde se aprecia que la bifurcación que se presenta frente a Punta Comitán en el interior del cuerpo lagunar, permite influenciar las porciones noroeste y sureste con el asentamiento de materiales o partículas finas suspendidas, debido la disminución en la velocidad de las corrientes por la fricción con el fondo marino. De estas, en la porción noroeste es donde se registra la mayor ocurrencia de los elementos mayores y traza, que se asocian a: (1) la presencia de abundante material limo-arcilloso, cuya capacidad de absorción de elementos es alta asociado al alto contenido de carbono orgánico (Salomons y Förstner, 1984) que se registra, (2) la depresión (profundidades ~7m) en una zona principalmente somera con velocidades bajas de flujo, que permite la acumulación de materiales terrígenos y de metales asociados, (3) el material descargado por influencia eólica y pluvial desde El Mogote y de las subcuencas de drenaje de La Paz (capítulos IV. 1. 2 y IV. 1. 3).

Esto sugiere que tanto la bifurcación del flujo de agua y la disminución en su velocidad, las profundidades someras, la depositación de sedimento limo-arcilla y el contenido de carbono orgánico, son algunos de los factores que colaboran en el incremento del contenido de los elementos en sedimentos de esta laguna. Similar comportamiento reporta Martínez-Magaña (1995) para la Bahía San Quintín, quien manifiesta que los elementos se acumulan en mayor proporción en los sectores de baja energía de esta bahía, como son marismas y biodepósitos o ambos, mientras que las menores acumulaciones ocurren en los sectores de alta energía como es el canal principal.

Es importante mencionar que la parte sureste de la Laguna de La Paz no es un área de acumulación de elementos, aunque en ésta se hayan descargado aguas residuales, posiblemente se atribuye: (a) al saneamiento que se produjo y hasta el momento se produce, a través del recambio de agua con la Bahía de La Paz; (b) a la importante influencia continental (material terrígeno) en esta zona somera y que contribuye a la dilución de las concentraciones de elementos, o bien, (c) a la capacidad de los sedimentos para absorber o inmovilizar los nutrientes o ligandos necesarios para las asociaciones entre elementos.

IV. 1. 2. Precipitación pluvial

La precipitación pluvial es un tipo de influencia clasificada por Maynard y Boon (1994), como una fuente interna importante en áreas áridas y semiáridas, debido a las grandes descargas de agua en terreno escarpado, la alta producción de sedimento y la velocidad de las descargas.

La Península de Baja California se localiza en una zona semidesértica donde las precipitaciones pluviales son escasas y estacionales. La precipitación en la Bahía de La Paz oscila entre 43 mm en Agosto a 60 mm en el mes de Septiembre (Jiménez-Illescas *et al.*, 1997), aunque se puede estimar hasta en 200 mm (Cruz-Orozco *et al.*, 1996). Sin embargo,

se presentan lluvias torrenciales en el verano, con huracanes y tormentas tropicales generadas en el Golfo de Tehuantepec, provocan abundante precipitación pluvial y fuertes corrientes que acarrear material desde los alrededores hacia el cuerpo lagunar.

Tal situación también se manifiesta en la Bahía Chesapeake en E.U.A., donde el paso del huracán Agnes produjo lluvias torrenciales que incrementaron el flujo del río Susquehannah hasta en 25 veces de lo normal (Postma, 1980). Esto ocasiono que en una semana, el abastecimiento de sedimento fuera mayor de lo que se observó en las 2 o 3 décadas precedentes. Similar comportamiento se registró en la Bahía Atchafalaya (E.U.A.), donde puede recibir cerca de $4,500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ de agua dulce anualmente y $89 \times 10^6 \text{ ton}\cdot\text{año}^{-1}$ de sedimentos (Maynard y Boon, 1994).

Estas influencias permiten generar perturbaciones en la batimetría, granulometría y en los parámetros fisicoquímicos, sobretodo en los ambientes costeros, a través del desplazamiento, resuspensión, dispersión del fondo sedimentario, incorporación de cuerpos extraños y modificaciones en el entorno. Se cuentan con reportes de disturbios, donde se encuentran variaciones estacionales de la concentración de elementos por algún fenómeno meteorológico, como sucede en la Bahía de San Francisco (Kuwabara *et al.*, 1989), el estuario Severn Aust Cliff (French, 1993) y en Guanajuato, México (Ramos *et al.*, 1997), además que contribuye en las variaciones físicas y geomorfológicas en el entorno del ambiente. Hay que añadir las variaciones químicas, debido a la entrada de agua dulce que afecta la salinidad y, esto a su vez, en la adsorción y liberación de metales en los sedimentos; la degradación de la materia orgánica, que puede desprender elementos en tiempos específicos del año y en la dilución de la concentración de elementos, por el aporte agua de arroyos (Shumilin *et al.*, 1993).

La variación estacional en la concentración de los elementos se registra en el Mar Liguria, con el incremento en Cr y Ni en los sedimentos (Cosma *et al.*, 1979) y en la Laguna

de Sontecomapan con los elementos Co, Cr, Cu y Zn (González *et al.*, 1994). Es posible que esto se produzca como resultado de eventos erosivos en las rocas que permite movilizar minerales que contienen metales y por los arrastres que causan la contaminación por metales pesados de cuerpos de agua (Ramos *et al.*, 1997). Para el caso de la Laguna de La Paz, algunos de los factores que contribuyen a modificar las concentraciones de los elementos en los sedimentos son probablemente: (1) la configuración de la cuenca lagunar de La Paz, (2) el tipo de material terrígeno descargado (volcanosedimentario, ígneo, fosfático) y (3) el volumen de agua fluvial.

Hasta el momento, en esta laguna costera no se cuentan con registros de variaciones estacionales en la concentración de elementos, pero se observa que el aporte continental por la descarga pluvial genera diferencias, en las porciones norte y sur. La mayor influencia de la descarga se registra en la porción sur, en Chametla, donde Pimentel-Hernández *et al.* (1991) la describen como una planicie o valle de intensa erosión asociada a la descarga de material por arroyos, que generar un transporte intenso de sedimentos dentro de la misma laguna y fuera de este ambiente, y que posiblemente llegan a modificar la batimetría de la laguna (Jiménez-Illescas, 1983; Osuna-López, 1986).

Tomando en cuenta las subcuencas de drenaje que desembocan en este cuerpo de agua, se considera que anualmente es vulnerable por los volúmenes grandes de agua pluvial y de materiales vertidos, los trastornos en la geomorfología ante la presencia de fenómenos meteorológicos (efecto estacional), además de contribuir al transporte de materiales por el viento, oleaje, corrientes de marea (efecto continuo) desde la Bahía de La Paz y los alrededores.

IV. 1. 3. Transporte eólico

El transporte eólico se produce por el acarreo de arenas y polvos suspendidos por el

viento, que llegan a acumularse en la superficie al caer o ser arrastrados. La influencia de este tipo de aporte en las concentraciones de los elementos traza en los sedimentos de la laguna no ha sido estimado, pero se considera importante debido que eventos estacionales (huracanes y tormentas tropicales) en la zona contribuyen a la presencia de tormentas de polvo. Cruz-Orozco *et al.* (1994), señalan que en la región de la Bahía de La Paz hay un dominio de las fuerzas marinas y eólicas que contribuyen a definir la batimetría y el tipo de sedimento. Se reporta que la depositación atmosférica de materiales interviene en todo el ciclo hidrológico (ej. suelos, ríos, lagos, estuarios y en el océano), donde los elementos o metales se caracterizan por presentar un tiempo de residencia corto, que se estima en días a semanas (Salomons y Förstner, 1984), aspecto que favorece a la dispersión de los materiales en distancias grandes en poco tiempo.

Referencias sobre el transporte eólico en ambientes lagunares son escasas, quizás debido a la problemática de realizar algunas estimaciones o mediciones como son: (1) el área de influencia, (2) el tipo de material que se encuentra en suspensión, (3) fuentes de aporte, (4) origen y velocidad de flujo, entre otros. Sin embargo, es importante señalar que las partículas juegan un papel importante en la distribución de los metales, entre las fases disuelta y particulada, porque ofrecen sitios para la adsorción de los elementos en las superficies.

Tomando en cuenta la litología de la laguna, las fuentes probables de material que llegan vía atmosférica proceden tanto de la barrera arenosa como del material intemperizado en las serranías de los alrededores. El Mogote se considera como un contribuidor importante de material, debido a que comprende una barrera arenosa con acumulación importante de material marino que llega por las corrientes litorales, además del generado por la presencia de escarpes de erosión, dunas activas, y el depositado en los mangles y pantanos, que describe Mendoza-Maravillas (1990).

Por otra parte, es probable que las bajas profundidades en las cercanías de la barrera en el lado de la bahía y la eventual influencia de la marea, favorezcan a que el material acumulado sea fácilmente removido por la acción de vientos del norte y llegue a depositarse en el interior de la laguna (principalmente partículas finas). Considerando el tipo de elemento, la concentración y las características geoquímicas, es probable que su acumulación en los sedimentos de El Mogote se asocien a minerales enriquecidos en elementos traza (feldespatos; apatita, fragmentos de roca) y a las rocas fosfatadas (ooideos, coprolitos, peloides, calcita).

Por otra parte, es posible que la influencia del viento en la laguna tenga otro tipo de efecto, como describen Maynard y Boon (1994) en la Bahía Corpus Christi, donde el viento es más importante en la regulación del transporte de material que las mareas. Esto es porque los vientos llegan a causar tormentas de marea de más de 1 m de amplitud, que dirigen agua desde bahías adyacentes, incrementan la resuspensión de sedimento por la promoción de ondas intensas y elevan la eficiencia del intercambio de agua. Ello permite en la Laguna de La Paz, turbidez e incremento de flujo de sedimento tanto en las zonas someras (porción oeste y sur) como profundas en el canal.

IV. 1. 4 Corrientes de marea

La influencia que puede generar la marea en la Laguna de La Paz es importante, debido a que Jiménez-Illescas *et al.* (1997) lo describen como un mecanismo de forzamiento que impulsa la dinámica de la Bahía de La Paz, y por lo tanto, llega a influenciar además el ambiente lagunar de la porción sur, considerando la comunicación que se presenta a través del canal.

Este factor, además de permitir el recambio de agua, colabora en la remoción de metales traza desde el agua y en la resuspensión de los sedimentos del fondo, que proveen

una área superficial amplia para la adsorción (Salomons y Förstner, 1984). Por otra parte, es un mecanismo distribuidor de los sedimentos dentro de las lagunas, y por lo tanto, juegan un papel importante en la distribución y retención de los sedimentos (Concha, 1992). Algunas variaciones temporales en la localización y concentración de los elementos se registran en la Bahía San Francisco en asociación con la velocidad de la marea, debido que influye en la distribución de los tamaños de grano y el contenido de la materia orgánica en los sedimentos (Morrisey *et al.*, 1994) †

De acuerdo a los resultados de Obeso *et al.* (1993) y Sandoval y Gómez (1997), los cambios de la marea superficial (flujo-reflujo) en la Laguna de La Paz son mas notorios en la entrada (canal) o frontera abierta con la Bahía de La Paz y en la zona de canales, con valores de 70 cm s^{-1} , y se atribuyen a la fricción con el fondo y a la configuración de la cuenca. Mientras, que las velocidades mínimas se encuentran en las parte someras, por el retraso del máximo o mínimo de la curva de marea, debido al tiempo que tardan en llenarse o vaciarse las zonas someras por el efecto de fricción.

Esta situación posiblemente favorece que la zona del canal sea una ambiente muy dinámico y poco estable, sobretodo por el recambio de agua, la actividad del fondo, las velocidades de la corriente y la resuspensión del material, entre otros; y que da como resultado que se hayan obtenido concentraciones bajas de elementos en esta zona.

Por la descripción que se realiza de los *factores ambientales* que contribuyen en las geomorfología de la Laguna de La Paz, estos se diferencian en *dos tipos*: (1) estacionales (precipitación pluvial) y (2) continuos (corrientes de marea, oleaje, corrientes litorales). De esta forma en la figura 36, se sugieren los factores y su influencia en la distribución espacial de los sedimentos y elementos en la laguna, los cuales se describen de la siguiente manera:

- I. El transporte litoral de material terrígeno desde la Bahía de La Paz hacia la parte sur, contribuye al crecimiento y acumulación de partículas y minerales en la barrera arenosa El Mogote.

- II. El aporte de material transportado y depositado en la parte mas delgada de El Mogote, donde se localiza un campo de dunas.
- III. Contribución de material terrígeno por erosión del escarpe sur de la porción delgada de El Mogote, el cual es importante y se refleja en los valores de concentración de los ETR en el sitio.

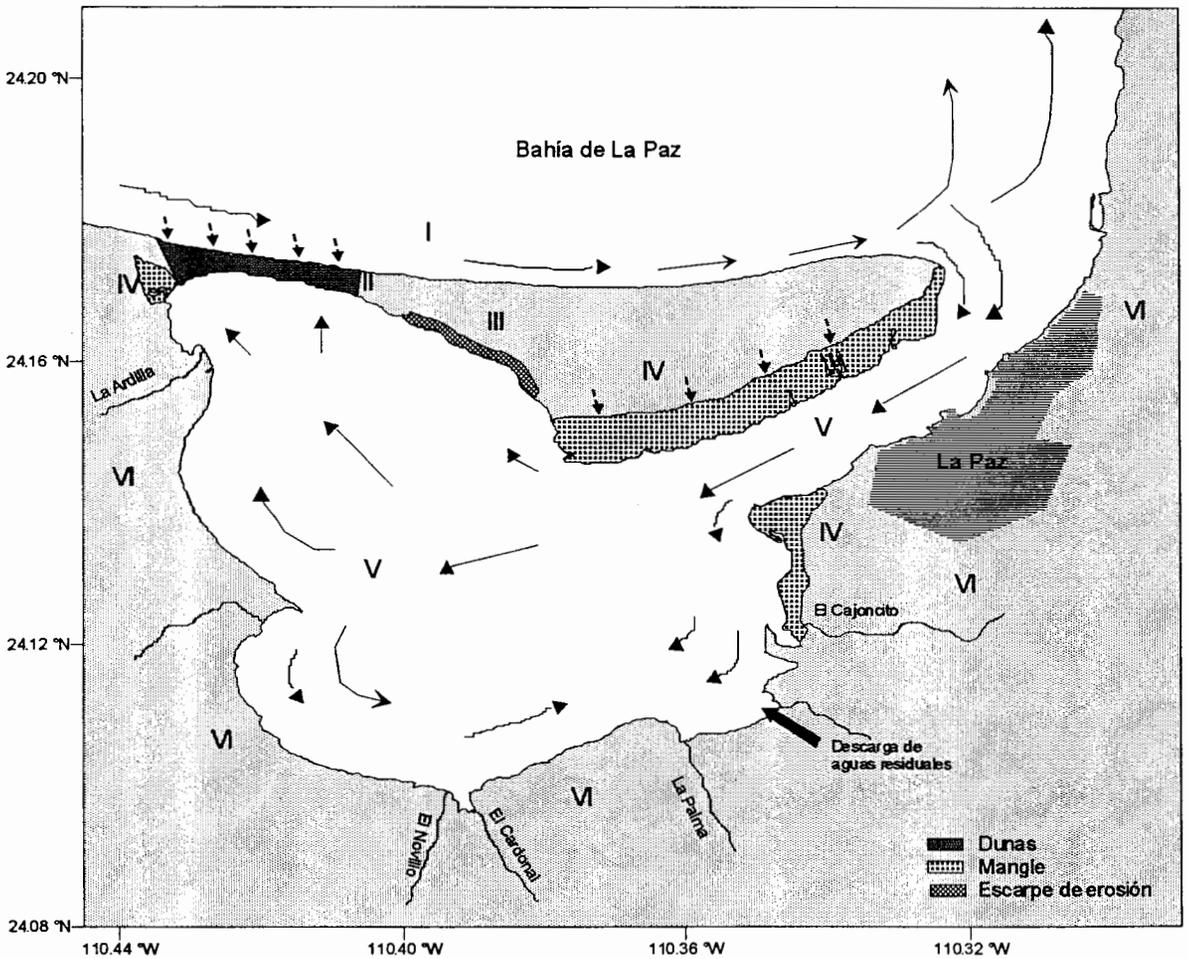


Fig. 36. Factores que influyen en la distribución y acumulación de sedimentos en la Laguna de La Paz (I. corrientes litorales, II. aporte eólico de El Mogote, III. Influencia por el escarpe de erosión, IV. aporte y acumulación de partículas en la zona de manglar, V. patrón de circulación y corrientes de marea, VI. descarga por subcuencas de drenaje).

- IV. Influencia por el material acumulado en la zona de mangles para los sedimentos lagunares, inferida por la abundancia de algunos de los elementos traza.
- V. Aporte por el flujo del agua a través de las corrientes litorales y de marea desde la Bahía de La Paz hasta el interior del cuerpo lagunar.
- VI. Escurrimientos de material terrígeno o sedimento continental durante el verano, asociado a al efecto de fenómenos meteorológicos, e influyen en las características de la laguna. 7

IV. 2. INFLUENCIA CONTINENTAL Y ZONAS DE ACUMULACIÓN DE LOS ELEMENTOS EN SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LA PAZ

Una de las particularidades que sobresalen de la península de Baja California y sobretodo de la porción sur es la presencia de rocas fosfatadas o fosforita, que representan una de las fuentes más importantes de fósforo para uso industrial y agrícola (Álvarez-Arellano, 1989). El interés geoquímico radica, en el hecho que incluye diversos elementos traza, como lo señala Goldberg *et al.* (1963), McArthur y Walsh (1984) y Watkins *et al.* (1995), derivados directa o indirectamente del agua de mar por varios procesos (removilización de material absorbido, clástico, óxido de ferromanganeso, restos biológicos).

Esta característica en la zona posiblemente contribuye a que en los ambientes costeros, como son San Juan de la Costa (Piper, 1991, 1994) y Bahía Magdalena (Álvarez-Arellano, 1995), se registren concentraciones altas de ciertos elementos mayores y traza. La concentración de elementos en la fosforita se asocia a factores como: (1) la abundante contribución de la materia orgánica, (2) la presencia de diversos minerales mayores y accesorios (clinopiroxenos, feldespatos, pigeonita, mica, ortopiroxenos, anfíboles, minerales arcillosos) y (3) la disponibilidad del elemento con radio iónico conveniente, fuerza de unión, carga y radio óptimo (Goldberg *et al.*, 1963; Clark, 1984; Fleet, 1984; Windom *et al.*, 1989, Piper, 1994). Esto favorece la asociación de Sr, Pb, As, Mo, ETR, entre otros elementos, en posición estructural dentro del material (Manso, 1960).

En la porción sur de la península, la roca fosfórica se extrae de la Formación San Gregorio, que comprende 8 capas de fosforita con un espesor de entre 0.15 a 2.9 m (Álvarez-Arellano *et al.*, 1997) y se explota en San Juan de la Costa por la empresa ROFOMEX. La posible influencia de este material en los sedimentos de la Laguna de La Paz se infiere de la distribución y el contenido alto de fósforo (calculado como pentóxido de fósforo P_2O_5) en la barrera arenosa El Mogote, además de la identificación de partículas muy peculiares (capítulo

IV. 1. 1).

Otro material que probablemente contribuye en la concentración de elementos en los sedimentos superficiales de la bahía y la laguna, es el material volcanosedimentario de la Formación Comondú, la cual se encuentra ampliamente en la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz. La influencia de este tipo de material en las características geoquímicas se reporta en la Cordillera Kolbeinsey, donde Lackschewitz *et al.* (1994) encuentra abundancia alta de Co, Ni, V, Cu, Fe y Sr en sedimentos con arena volcánica (vidrios volcánicos y fragmentos de roca volcánica).

Por otro lado, en el trabajo mineralógico que realizan Derkachev *et al.* (en prensa) para los sedimentos de la Laguna de Paz, se observa que las zonas de acumulación de algunos de los minerales mayores y accesorios de las formaciones geológicas San Gregorio y Comondú, son semejantes con las de mayor concentración en elementos mayores y traza, lo que probablemente apunta que sean estos componentes los portadores de elementos al medio, a través de los factores ambientales antes señalados (corrientes litorales, de marea, precipitación pluvial, transporte eólico). Situación semejante reporta Román *et al.* (1995) en el lago Mascardi, donde observan que la distribución y concentración de los elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR) es controlado principalmente por la mineralogía de los sedimentos que se transportan.

Tal situación también se manifiesta en los sedimentos del sur de California (Goldberg y Arrhenius, 1958), Océano Pacífico y costas (Goldschmidt, 1958; Kunzendorf *et al.*, 1993; Álvarez-Arellano, 1995), Golfo de California (Liu, 1992; Liu *et al.*, 1994) y sur de Africa (Watkins *et al.*, 1995). En dichos trabajos se señala que muy posiblemente la concentración de los elementos mayores y traza tienen su origen en el material (minerales) acarreado por la acción del intemperismo y la erosión de rocas de los alrededores, mientras que su distribución se explica por la acción de los factores oceanográficos (corriente, oleaje, batimetría, hidrodinámica) que ahí prevalecen.

IV. 2. 1 Variabilidad espacial

Tomando en cuenta los patrones de distribución de la concentración de los elementos, los puntos de acumulación principales, los valores del factor de enriquecimiento (FE) de los elementos traza y de la normalización-lutita norteamericana de las Tierras Raras (ETR) en los sedimentos superficiales, la Laguna de La Paz se diferencia en dos porciones: norte y sur.

IV. 2. 1. 1 Porción norte

La porción norte del cuerpo lagunar se caracteriza con una abundancia mayor de elementos mayores y traza, como As, Ca, Co, Cs, Fe, Ni, Sc, Sr y ETR; y probablemente se asocian, al continuo aporte de material marino desde la Bahía de La Paz por corrientes litorales y de marea, al alto contenido de carbono orgánico y a la presencia de sedimentos finos (limo-arcilla) en la depresión (profundidades ~ 7m); aspectos que intervienen como ligandos para la retención de metales en el ambiente sedimentario (Williams *et al.*, 1978; Ortega-Lara, 1991; Manahan, 1993; Posada-Ramos *et al.*, 1994 y Mohan, 1997).

Es importante mencionar que aunque la mayor parte de los elementos se acumulan en la depresión norte de la laguna, algunos enriquecimientos se registran tanto en los sedimentos frente al Estero Zacatecas y la barrera arenosa El Mogote. Este comportamiento se observa con las Tierras Raras (ETR), que parecen asociarse con las rocas fosfatadas que fueron depositadas en la barrera arenosa (Elderfield *et al.*, 1981; Strekopytov, 1996); además de los elementos Ca y Sr, que se relacionan con la fracción biogénica de los sedimentos (fragmentos de conchas). Las asociaciones entre elemento y material continental o biogénico en la laguna, coinciden con lo reportado en áreas como la Cordillera Kolbeinsey (Lackschewitz *et al.*, 1994), el Golfo de México (Méndez *et al.*, 1994), Bahía Magdalena (Álvarez-Arellano, 1995) y en el sistema hidrológico Telléz-Tizayuca (Mayol *et al.*, 1997).

La acumulación de rocas fosfatadas en la barrera arenosa El Mogote y en los

sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz, es posiblemente uno de los factores que explica la diferencia entre la porción norte y sur, debido a que en la primera es donde ocurre la mayor concentración de elementos mayores y traza, además que el aporte también influencia los sedimentos del Estero Zacatecas, la parte más angosta de El Mogote y la depresión norte de la laguna.

De acuerdo a la descripción que realiza Mendoza-Maravillas (1990) de la concentración y distribución de pentóxido de fósforo ($P_2 O_5$) en El Mogote, se aprecia que la abundancia mayor se encuentra en los sedimentos que reciben influencia litoral de la Bahía de La Paz (porción norte) y en aquellos adyacentes al canal de la laguna, donde los valores se encuentran por arriba de 5%, sobrepasando el promedio en los sedimentos continentales que oscilan entre 0.08% a 0.17% (Álvarez-Arellano, 1995). La diferencia con la concentración de referencia (incremento mayor de 29 a 62) hace considerar a la barrera El Mogote como una zona, importante y de particular interés geoquímico.

Los elementos que más se asocian a las rocas fosfatadas y a los puntos con concentración alta de fósforo, son los ETR debido a los coeficientes de correlación significativos ($r > 0.8$) y por las concentraciones sobresalientes que reportan Goldberg *et al.* (1963), Fleet (1984), McArthur y Walsh (1984), Watkins *et al.* (1995) y Strekopytov (1996), en los sedimentos de diferentes ambientes marinos. Esta relación se atribuye al proceso de concentración de los elementos por precipitación directa desde el agua de mar a través de la removilización del material absorbido y clástico, relación con el óxido de ferromanganeso, desechos biológicos y al incremento en el área superficial/masa, que intervienen en la variabilidad de los ETR en el ambiente (fases litogénicas, biogénicas e hidrogénicas).

IV. 2. 1. 2 *Porción sur*

Por otro lado, los sedimentos de la porción sur de la laguna se han caracterizado por

la influencia de la descarga de aguas residuales hasta 1988 y los aportes estacionales de volúmenes grandes de material terrígeno, quizás la relación de estos aspectos contribuirían a registrar concentraciones mayores de algunos elementos; sin embargo, los resultados muestran lo contrario. Es posible que esto se produzca por la dilución de las concentraciones de los elementos con el abundante sedimento continental que se vierte, tomando en cuenta que Herut *et al.* (1993) señalan para las costas de Israel, que los sedimentos no necesariamente reflejan concentraciones son naturales, ya que pueden representar una mezcla de cantidades pequeñas de partículas contaminadas diluidas por una gran cantidad de sedimento natural con un contenido de metal pesado bajo.

Las concentraciones bajas en la Laguna de La Paz, también pueden atribuirse a la escasa depositación de material vulcanosedimentario y de rocas fosfatadas, debido a que este último material procede del oeste de la Bahía de La Paz; además de la remoción del sedimento durante el dragado que se realizó para la construcción del canal y la marina en 1982 del Hotel Crown Plaza. Con respecto a lo anterior, Lechuga *et al.* (1986) señalaron que las condiciones de baja profundidad existentes en la porción sur de la Laguna de La Paz, obligaron a los constructores a efectuar un dragado de gran extensión que provocó un cambio importante en la batimetría y corrientes de la laguna, además de un aumento, en ese momento, de turbidez y en la circulación general de la laguna.

Para esta situación, Meyerson *et al.* (1981) señalan que la influencia del dragado sobre la concentración de los elementos en el Puerto Elizabeth en la Bahía Newark, produjo una reducción en la cantidad acumulada de elementos en los sedimentos ocasionando que se obtengan valores de concentración bajos. Para el caso de la Laguna de La Paz, tal vez este sea un factor que haya intervenido en la remoción del material antropogénico que se acumuló durante las descargas de aguas residuales y que con el abundante material descargado durante las precipitaciones en una zona somera, con velocidades bajas de las corrientes y alto grado de evaporación, han contribuido a la disminución de las concentración.

De acuerdo al mapa geológico de la localidad (Fig. 2), se aprecia que la porción sur es afectada por material intemperizado de la Formación Comondú y por aluvión, ambos posiblemente no contribuyen significativamente en el enriquecimiento con elementos en los sedimentos. Otro de los factores que quizás influyen en estos resultados, es la oxidación del material orgánico descargado por las aguas residuales y por la zona de manglar, que han contribuido a que la zona de Chametla se caracterice por el material predominantemente fangoso con carbono orgánico abundante, elevadas concentraciones de sales, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, y bajo contenido de oxígeno (Jiménez-Quiroz, 1991).

IV. 2. 2. Zonas de acumulación de los elementos

Por otro lado, en los sedimentos de la Laguna de La Paz se identifican siete zonas de acumulación de los elementos mayores y traza que coincide con la descripción que realizan Green-Ruiz y Larrinaga-Cunningham (1986) de subambientes sedimentarios del área de estudio y con la distribución espacial de minerales que encuentra Derkachev *et al.* (en prensa) en el mismo cuerpo lagunar. Estas zonas son influenciadas por el aporte de material terrígeno del cauce de los arroyos (cuenca de drenaje), la hidrodinámica, el transporte eólico y la geomorfología del área; aspectos que como se ha señalado, posiblemente contribuyen para el incremento de la concentración de los elementos en los sedimentos.

De las siete zonas definidas, seis son las que ocurren en el interior de la laguna y comprenden el (1) Estero Zacatecas, (2) el canal (barrera arenosa El Mogote), (3) Punta Comitán, (4) depresión norte-Chametla, (5) zona de descarga de aguas residuales y (6) depresión sur. Palmira es la última zona (7) que se ubica en la parte más externa, sin embargo su importancia radica en las concentraciones que llega a presentar de Ca, Sr y carbonatos, además de intervenir como punto de acumulación y aporte de material terrígeno hacia el interior de la laguna.

Por otra parte, de acuerdo a la concentración de los elementos, las características de cada área, el tipo de material que se descarga y al análisis de factores, se identifican tres tipos de componentes que caracterizan a este ambiente lagunar (Fig. 37): 1) **componente terrígeno o continental**, que comprende el material continental intemperizado y erosionado de las rocas vulcanosedimentarias de los alrededores, en éste abunda el sedimento fino (limo-arcilla), carbono orgánico y los elementos *Br, Co, Cr, Cs, Fe, Hg, Sc y Zn*. 2) **Componente biogénico**, abarca los fragmentos de conchas y de coral, donde los carbonatos son abundantes y se asocian con *Ca y Sr*. 3) **Componente fosfático**, que es aportado a los sedimentos de la laguna por la alteración y erosión de las rocas fosfatadas de la Formación San Gregorio; los elementos asociados son los del grupo de las Tierras Raras (*Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, Nd, La, Lu, Pr, Sm, Tb, Tm, Yb*) y el *U*, debido a la abundancia que presenta en la capa de Humboldt (50 gr de U_3O_8 por tonelada métrica de fosforita, Galli-Olivier, 1993)

En la figura 37 se encuentran localizados los tres factores que caracterizan los sedimentos de la laguna, en donde se observa que el (I) componente terrígeno o continental tiene una influencia mayor, debido a que la descarga de material por las subcuencas de drenaje durante el verano (precipitación pluvial) y por la constante redistribución marina (corrientes litorales); en el caso del (II) componente biogénico, este solamente se encuentra en el área de Palmira y el Estero Zacatecas, donde abundan los fragmentos carbonatados; y por otra parte, (III) el componente fosfático, se ubica en la parte norte de la laguna adyacente a la barrera arenosa El Mogote, tomando en cuenta que los aportes desde la Bahía de La Paz por corrientes litorales concentran minerales y fósforo en los sedimentos de la barrera arenosa El Mogote.

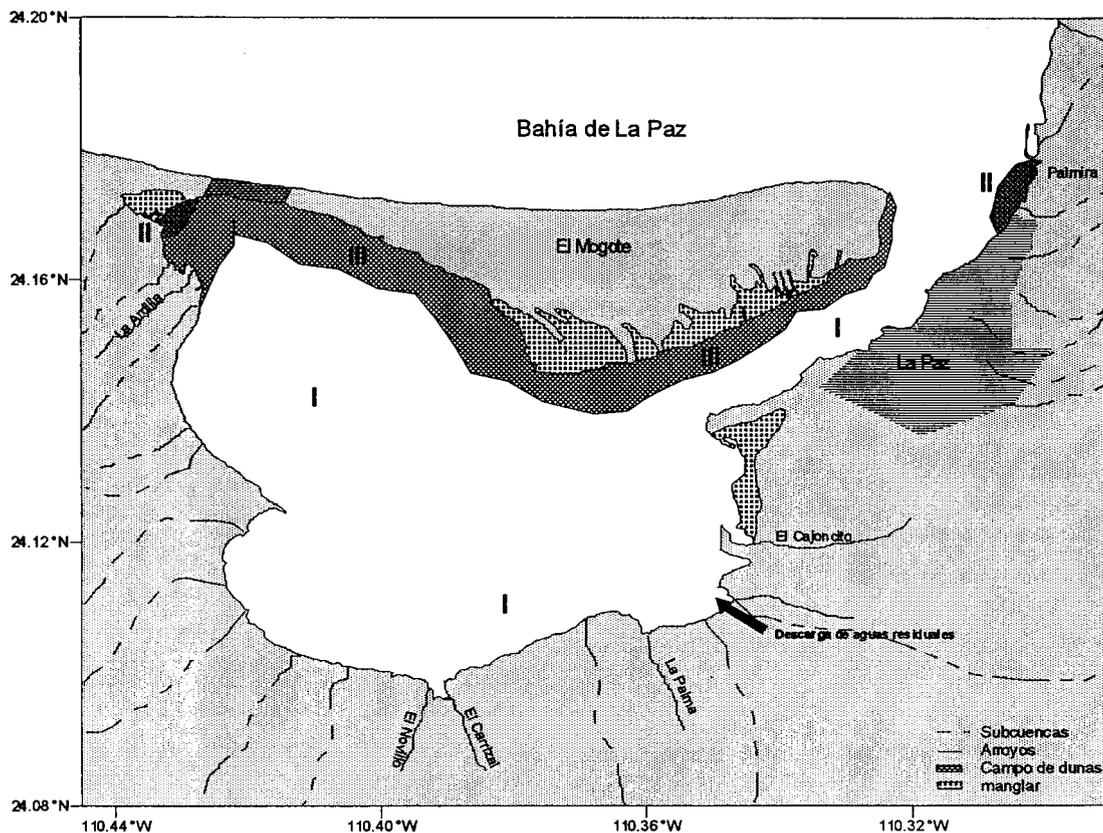


Fig. 37. Localización de los tres tipos de componentes que caracterizan a los sedimentos de la Laguna de La Paz (I. Componente terrígeno o continental, II. Componente biogénico, III. Componente fosfático).

IV. 3. CALIDAD GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA DE LA PAZ

Los datos de concentración y patrones de distribución espacial que se obtienen de los elementos mayores y traza en los sedimentos de la Laguna de La Paz, representan los primeros datos que detallan el comportamiento de 36 elementos (mayores y traza), además de los registros que Méndez *et al.* (1998) tienen para este ambiente lagunar. Este tipo de enfoque en México se ha desarrollado poco, pero se cuenta con la recopilación de información que Villanueva y Botello (1998) realizan en el litoral mexicano, en donde contemplan aspectos de la concentración de metales pesados en zonas naturales y con actividad antropogénica, localidades mineras, cuencas profundas, ventilas hidrotermales, corteza continental, entre otros, pero principalmente en el Golfo de México.

IV. 3. 1. Tipo de influencia

La evaluación de la calidad geoquímica de los sedimentos de la Laguna de La Paz, lleva a tratar de establecer la fuente u origen de los elementos, tomando en cuenta los aspectos que sobresalen de este ambiente. En este caso, se consideran principalmente dos posibles tipos de impacto: la descarga de aguas residuales provenientes de la ciudad de La Paz vertidas hasta el año de 1988 (antropogénica); y por otro lado, la influencia de tipo continental (natural) que ocurre a través del intemperismo y del aporte de material sedimentario a través del cauce de los arroyos y del viento.

IV. 3. 1. 1. *Actividad antropogénica*

El primer aspecto se refiere al efecto que pudo ocasionar el *aporte de aguas residuales* en la incorporación y concentración de los elementos traza en sedimentos de la

laguna, debido a que hasta la fecha no se ha evaluado. Es importante mencionar que posiblemente el tipo de desechos producidos durante este tiempo pudo modificar las condiciones geoquímicas naturales de la Laguna de La Paz, no sólo por las descargas sino por el material que se depositó en esta laguna, que se distingue como un cuerpo de agua semicerrado y somero (profundidad máxima 7 m) que permite el almacenamiento fácil de materiales introducidos.

Los pocos trabajos que se realizaron durante 1988 en la Laguna de La Paz, muestran que solamente se encontraron problemas de tipo bacteriológico en organismos filtradores como los moluscos, que reflejaron un incremento del número de bacterias coliformes que sobrepasó el límite permisible (Gómez, 1978; Trejo y Mayoral, 1984). Por otra parte, se reporta que la concentración de Pb en tejido de *Chione californiensis* durante este tiempo (1988-1989) osciló entre 0.04 µg/g y 6.7 µg/g, niveles que son mayores al límite permisible de 1 µg/g Pb establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Pérez *et al.*, 1993). Aunque ambos trabajos no indican daños severos por las aguas residuales vertidas en la Laguna de La Paz, se observa que la biota marina es sensible a las modificaciones ó alteraciones que se producen por la acción del hombre y que se observa en este caso, con un incremento de organismos nocivos y de elementos tóxicos.

El contenido promedio y patrón de distribución espacial que se obtiene de los elementos (mayores y traza) en sedimentos de la Laguna de La Paz, no muestran que la zona sureste donde se produjeron las descargas de aguas residuales haya sido influenciada por los materiales vertidos, debido a que los datos de concentración en toda el área de la laguna son semejantes entre sí y parecidos al promedio que Taylor (1964) señala para la corteza continental. La similaridad en las concentraciones de los elementos en los sedimentos del área posiblemente indica que el tipo de aguas vertidas no representaron una fuente importante de elementos, ya sea por las concentraciones bajas en que se encuentran

en los sedimentos del sureste de la laguna, o bien, porque el recambio de agua que se produce con la Bahía de La Paz es eficiente y suficiente para diluir las aguas residuales (capítulo IV. 1. 1).

Actualmente se cuenta con las concentraciones de algunos elementos de importancia ambiental (Pb, Fe, Cu, Mn, Cd), registrados por Méndez *et al.* (1998) en 12 muestras de sedimentos, donde señalan que la concentración de Pb varía entre 6 $\mu\text{g/g}$ a 23 $\mu\text{g/g}$ aproximadamente (12.5 $\mu\text{g Cd/g}$ corteza continental, Taylor, 1964). De acuerdo a la ubicación de cada punto se destaca que las concentraciones altas se asocian a los sedimentos adyacentes a áreas con influencia antropogénica, probablemente por la descarga de aceites y combustibles en la zona de yates, además de los derrames de aguas residuales de la ciudad de La Paz. Por otra parte, Kot *et al.* (1999) reportan la concentración promedio de Hg en 0.02 $\mu\text{g/g}$ para los sedimentos superficiales (0.08 $\mu\text{g Hg/g}$ corteza continental, Taylor, 1964) y encuentran en la distribución espacial los niveles altos cerca de la antigua zona de descarga de aguas residuales y de Chametla. Ambos registros permiten considerar al cuerpo lagunar como un ambiente vulnerable a modificaciones por los asentamientos humanos (influencia antropogénica), pero que hasta el momento mantiene características geoquímicas que representan la litología característica.

Por otra parte, Maynard y Boon (1994) señalan que en las lagunas costeras hay otro tipo de fuente ("nueva") en los sedimentos y comprende partículas de carbón, cenizas en suspensión, fragmentos de construcciones, que también pueden contribuir a modificar las características y el entorno del cuerpo lagunar.

IV. 3. 1. 2. *Aporte de material continental*

El segundo aspecto que caracteriza a la Laguna de La Paz es la *influencia de tipo continental* que se produce en el verano, a través de las descargas torrenciales de agua

pluvial que introduce una gran cantidad de material terrígeno, así como del tipo eólico por la dispersión de partículas por la acción del viento. De acuerdo a las características geológicas del área, el material que se vierte en este cuerpo de agua forma parte de las formaciones geológicas que caracterizan la Península de Baja California Sur denominadas: San Gregorio, San Isidro y Comondú, constituidas de material volcanosedimentario y fosfático.

La influencia del material continental en la definición de las características geoquímicas de los ambientes marinos se observa en diferentes partes del mundo, sobretodo en áreas con escasa actividad antropogénica donde son mas notorias y da como resultado contenidos de elementos mayores y traza similares a los reportados por Taylor (1964), Nance y Taylor (1977) y Ross y McLennan (1985) para la corteza continental; aunque con algunas excepciones donde las zonas llegan a sobrepasar los valores de referencia. Este incremento en los niveles de los elementos en sedimentos se atribuyen a una condición normal o natural, característico del material de la corteza en el área, junto con una abundancia elevada de diversos componentes (minerales, material orgánico) y a las condiciones ambientales. Aspectos que posiblemente favorecen en la incorporación y acumulación de diversos elementos (mayores y traza).

Los contenidos de los elementos en los sedimentos de la Laguna de La Paz, hacen considerarla dentro de las zonas que presentan similitud con el promedio de la corteza e indica que posiblemente estos valores se originan del material que se incorpora a la laguna de los alrededores a través de los arroyos y la influencia atmosférica. Los valores promedio que se obtienen de los sedimentos continentales adyacentes a la laguna (arroyos: La Palma, El Cajoncito, La Ardilla y El Novillo), muestran a estos puntos como posibles fuentes de aporte de diversos elementos dado que obtienen un aumento en las concentraciones respecto a los sedimentos lagunares e indican que son fuentes importantes de aporte de materiales que definen la calidad de los sedimentos lagunares de esta zona.

IV. 3. 2. Concentración anómala de elementos

No todas las concentraciones de los elementos en la laguna son cercanos al promedio de la corteza continental. Esto se aprecia con As, Nd, Sb, Se, Yb y Zr, que sobresalen por la diferencia que guardan con el contenido de referencia tanto en los sedimentos lagunares como los continentales. El incremento en la concentración de elementos de importancia ambiental también se observa en áreas del Océano Pacífico (Goldschmidt, 1958), costas de Gran Bretaña (Bryan y Langston, 1992), acuíferos (Armienta *et al.*, 1994), y en costas de la península de Baja California (Carrillo y Drever, 1998; Martínez-Flores, 1998). Estas áreas corresponden principalmente a ambientes con escasa actividad antropogénica, donde se señala que el contenido de As en los sedimentos se produce por el aporte de material erosionado de rocas ígneas y de la presencia de minerales (calcopirita, esmaltita, arsenopirita), que llegan a favorecer la acumulación de As y posiblemente de algunos otros elementos en los sedimentos de cada ambiente.

IV. 3. 2. 1. Arsénico

Un aumento en la abundancia de As en la península no sólo se presenta en la Laguna de La Paz sino también en los pozos de agua subterránea de San Antonio. La concentración de este elemento se ha determinado por arriba de 0.5 mg/l de As, aunque es posible encontrar hasta de 1.2 mg/l (Martínez-Flores, 1998). Estos valores elevados sobrepasan en 10 veces aproximadamente, o hasta más, el límite permisible de 0.05 mg/l de O.M.S. (Organización Mundial de la Salud). Esta diferencia señala a San Antonio (B.C.S.) como una zona anómala de importancia ambiental, por los niveles de As que puede alcanzar en agua, como también debe considerarse a los sedimentos de la Laguna de La Paz por sus concentraciones promedio en los sedimentos.

Esta situación también se manifiesta en el acuífero de Zimapan en Durango (México),

donde se asocia a tres posibles fuentes de contaminación, dos de estas de tipo antropogénico (desechos mineros) y una natural (Armienta *et al.*, 1994), como también se observa en San Antonio. La anomalía en esta última zona se asocia al tipo de yacimiento mineralógico (vetas hidrotermales, depósitos asociados a cuarzo-diorita-tonalita), desechos mineros producidos durante la extracción de minerales (jales oxidados, pilas de cianuro, plantas de procesamiento, vetas de sulfuro metálico).

Por otra parte, hay que señalar que en el ambiente marino el As es controlado por el transporte físico/biológico, asociaciones con Fe, Mn y materia orgánica, incluyendo las actividades antropogénicas (Chaloupka y Aller, 1995); aspectos que en cada zona deben contribuir de manera significativa pero diferente, para la presencia y distribución de este elemento en el ambiente. Aunque la Laguna de La Paz no es una zona minera, es posible que reciba la influencia del material que compone los yacimientos que caracterizan a San Antonio, tomando en cuenta la localización y la litología del área por la que abarcan las subcuencas de drenaje que descargan en la laguna. Además de considerar las condiciones fisicoquímicas del ambiente que llegan a influenciar la movilización de As, como sucede en San Antonio, a través de las reacciones abióticas como la oxidación, reducción, precipitación, disolución; y las reacciones bióticas donde destacan la transformación microbiana del arsénico y los substratos de los sedimentos (Martínez-Flores, 1998).

Otro material que posiblemente influye en la presencia de As en los sedimentos de la Laguna de La Paz es el aporte de sedimentos fosfatados, ya que Windom *et al.* (1989) los señala como fuente probable de aporte del As en los ambientes. Las rocas fosfóricas son abundantes en la península y su explotación tiene lugar en San Juan de la Costa, es importante señalar que en este componente marino se encuentran asociados una amplia variedad de elementos, tales como: Ca, Cu, Cr, Si, Ti, U, Zn y ETR (Álvarez-Arellano, 1989, 1995; Galli-Olivier, 1993), que como se ha hecho notar están siendo aportados hacia este cuerpo lagunar.

Este incremento en la abundancia de los elementos en San Juan de la Costa se atribuye a la fracción detrital que Piper (1991, 1994) describe como una acumulación de desechos biogénicos, material orgánico, precipitación y/o adsorción de elementos menores desde el agua de mar, además de la posible actividad hidrotermal antigua. Las concentraciones que se encuentran de fósforo en los sedimentos de El Mogote ($P_2 O_5 > 5\%$), destacan la importancia de las rocas fosfatadas de la Formación San Gregorio por el aporte de material sedimentario, considerando que puede contribuir con el enriquecimiento de elementos mayores y traza, dada su asociación y sobretodo en un ambiente lagunar que tiende a almacenar sedimentos. Esta formación geológica en la zona se caracteriza como una serie compleja de compuestos de hierro, núcleos poligenéticos, erosión y recrecimiento de las envolturas, materia orgánica y compactación, colonias microbianas, que son algunas de las particularidades que posiblemente intervienen para la presencia de elementos (Álvarez-Arellano, 1989) en áreas de la localidad.

IV. 3. 2. 2. *Antimonio y Selenio*

En los sedimentos otros elementos que sobrepasan el valor de referencia en la corteza continental, son Se y Sb, los cuales son considerados por Manahan (1993) como contaminantes atmosféricos producidos por la combustión de aceites, carbón y desperdicios. Esto probablemente apunta a que la laguna presenta aporte vía atmósfera, debido a los gases que se producen por los aportes terrestres y aéreos (aeropuerto), además de la termoeléctrica de PEMEX en Punta Prieta. Sin embargo, no se cuenta con datos que indiquen que los gases producidos contribuyan en el incremento de las concentraciones.

Por otra parte, tomando en cuenta la litología que presenta la península de Baja California y la Laguna de La Paz, posiblemente Sb y Se junto con los otros elementos que difieren su contenido respecto al de la corteza, se encuentran asociados con los

componentes minerales de las rocas que conforman las formaciones geológicas y que llegan al ambiente sedimentario de la laguna a través de la acción de los factores ambientales y del transporte litoral (capítulo IV. 1). Esto permite señalar que las concentraciones de diferentes elementos en los sedimentos de la Laguna de La Paz, Bahía Magdalena y San Juan de la Costa en la península de Baja California y el Mar Pechora (Rusia), entre otras localidades, posiblemente se originen del aporte de material continental, el cual está enriquecido en algunos elementos sin que esto indique necesariamente influencia antropogénica en la zona.

Estos aumentos de Sb y Se en los sedimentos de la Laguna de La Paz no sólo se muestran por la diferencia estadística sino también en el factor de enriquecimiento (FE) donde As, Sb y Se destacan por su contenido alto, tanto en los sedimentos lagunares como en los continentales, además de Ba, Cs, Hf, K, Ni, Sr, U y Zn, entre otros. Este comportamiento de los elementos en sedimentos costeros es también observado por Martínez-Magaña (1995), Shumilin *et al.* (1996) y Rodríguez-Figueroa *et al.* (1998), aunque el primero de estos autores se refiere solamente a 4 de los 21 elementos que se analizan. Los otros dos trabajos presentan similar incremento de los contenidos de As, Sb y Se que corresponden a Bahía Concepción y cuatro abanicos-delta de la costa oriental de Baja California Sur.

El resultado en el FE de los elementos se atribuye a que se ubican en zona de actividad tectónica con evidencias de volcanismo antiguo. La relación de estos elementos con la actividad volcánica del área se debe a que comúnmente en los gases que se producen con las temperaturas muy altas, se registran concentraciones altas de elementos traza como son B, As, Se, Cd, Sb, Pr, Zn, Mo, Cu, Cr, V, entre otros (Taran *et al.*, 1998); los cuales a partir de los precipitados minerales y su dispersión a otras áreas posiblemente ocasionan el incremento en la concentración que se observa en estas áreas y que se ve reflejado en el factor de enriquecimiento (FE).

IV. 3. 2. 3. *Elementos del grupo de las Tierras Raras (ETR)*

Por otra parte, no sólo los elementos traza son los que presentan diferencia en los sedimentos de la Laguna de La Paz respecto a la corteza continental en la laguna, sino también los del grupo de las Tierras Raras (ETR) que se normalizan con la lutita Norteamericana. En esta caso, este grupo en los sedimentos de la Laguna de La Paz muestra un patrón diferente del que se obtiene en San Juan de la Costa (Piper, 1991) y Bahía Vizcaíno (Daesslé-Heuser, 1993), ambos casos presentan anomalía de Eu negativa, mientras que en los sedimentos de la Laguna de La Paz la anomalía de Eu es positiva que también reportan Rodríguez-Figueroa *et al.* (1998) para el abanico-delta de Santa Rosalía y San Luciano.

La presencia de anomalía positiva de Eu en los ambientes se describe por Clark (1984), Román *et al.* (1995) y Watkins *et al.* (1995), como una relación que guarda este elemento con la abundancia de minerales como los feldespatos, baritas, apatita, pigeonita, mica, ortopiroxenos. Esto sugiere que el constante aporte de material terrígeno hacia la Laguna de La Paz por la descarga de arroyos durante la precipitación pluvial y el transporte eólico puede explicar la concentración elevada de Eu y que se ve reflejada en el tipo de anomalía que se obtiene. Aunque en este ambiente no se ha estimado aún la importancia que toma el aporte eólico en el contenido de los elementos en el área, McArthur y Walsh (1984) y Watkins *et al.* (1995) señalan que el intemperismo de las rocas quizás remueven tierras raras ligeras (LETR), además que probablemente, contribuyen en una parte significativa del detritus en los sedimentos y en la incorporación de ETR en el ambiente.

No sólo la influencia continental puede contribuir en la anomalía positiva del Eu sino también la actividad hidrotermal actual o antigua en el Pacífico mexicano y/o la actividad química del agua de mar de un ambiente marino de productividad alta (Piper, 1994). Esta última condición es la que caracteriza el agua del Pacífico que presenta mayores

concentraciones de ETR que las del Atlántico, debido a la presencia de nitratos y fosfatos en mayor abundancia (especies biolimitantes) (Fleet, 1984) y que contribuyen a un mayor enriquecimiento de estos elementos en los ambientes, salvo algunas excepciones como San Juan de la Costa y Bahía Vizcaíno. En estas localidades, probablemente anomalía de Eu negativa se origina de la relación de factores como: (1) la removilización del material a otras partes del área, (2) la alteración por agua subterránea de Eu que se deriva de feldespatos destruidos (Watkins *et al.*, 1995) o (3) quizás por cambios en las condiciones químicas del agua (Eh-pH) que originen movilización de ETR, sobretodo en Ce y Eu por la habilidad de presentarse en diferentes estados de oxidación (Fleet, 1984).

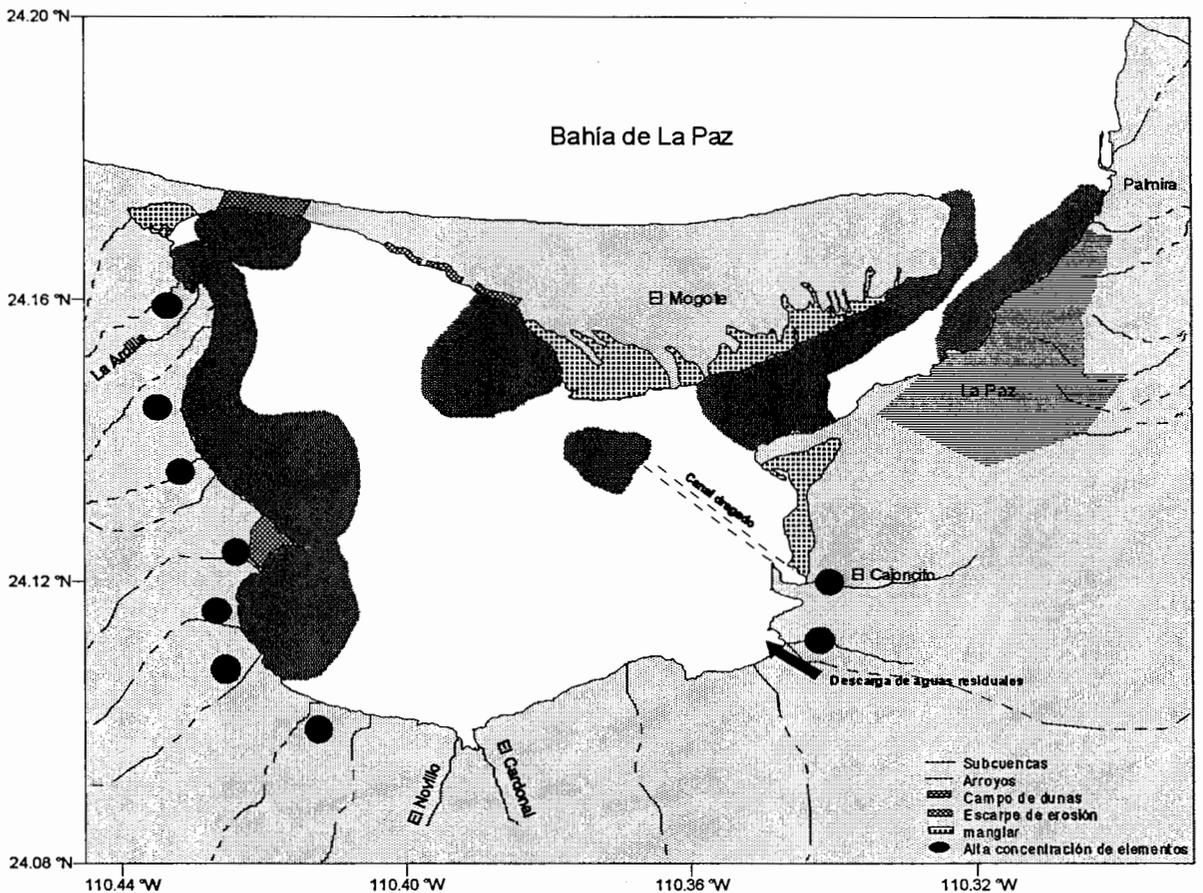


Fig. 38. Localización de las zonas con concentraciones anómalas de elementos, tanto en los sedimentos lagunares como continentales.

Tomando en cuenta las zonas de mayor concentración de los elementos (Fig. 38), las de valores altos en el factor de enriquecimiento (FE) y de la normalización (Nm), los factores que controlan la distribución (capítulo IV. 1) y la influencia continental (capítulo IV. 2), se establece que los sedimentos con anomalías (concentraciones altas) se ubican principalmente en: (1) la porción norte, frente a la barrera arenosa El Mogote; (2) en el oeste destacando el Estero Zacatecas, CIB, Comitán y El Centenario; además (3) en el canal, asociado a los asentamientos humanos y las descargas por las subcuencas de drenaje.

El incremento en las concentraciones de los elementos en las porciones norte y oeste de la laguna, se considera que provienen del aporte de material terrígeno o continental, a partir de las subcuencas de drenaje (precipitación pluvial), corrientes litorales y transporte eólico. Mientras que en el canal, se asocian tanto al material terrígeno que se descarga como a la actividad antropogénica, ya que Méndez *et al.* (1998) encuentran concentraciones altas de Pb que se asocian a la zona de yates, derrames de combustibles y aceites (asentamientos humanos).

Por ello queda de manifiesto que la Laguna de La Paz se distingue como un ambiente costero de gran influencia por material terrígeno, que determina la calidad geoquímica de los sedimentos, sobretodo en el enriquecimiento por elementos como son As, Sb y Se que son de importancia ambiental, además de Ca, K, Hf, Ni, U, Sr, Eu y las tierras raras pesadas (HETR). Aunque no hay que olvidar el desarrollo de la actividad antropogénica, que puede influir en las características naturales del área.

V. CONCLUSIONES

1. Los patrones de distribución espacial característicos en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz definen 7 zonas principales de acumulación de elementos: a) *canal* (Ba, Ca, Sb, Sr, Th, U y ETR), b) *zona de descarga de aguas residuales* (Ba y Hg), c) *depresión norte* (Ba, Co, Cs, Fe, Hg, Ni, Rb, Sc, Se, Zn), d) *Estero Zacatecas* (As, Ca, Cr, K, Sc, Sr, Th, Zn, Zr y ETR), e) *Punta Comitán*, f) *depresión sur* (Br, Co, Cs, Fe, Rb, Sc y Zn) y g) *Palmira* (Ca, K, Sr).
2. Las concentraciones promedio de los elementos en los sedimentos de la Laguna de La Paz son semejantes al contenido de la corteza continental con la excepción de As, Nd, Sb, Se, Yb y Zr. De estos As, Sb, y Se son elementos de importancia ambiental que posiblemente se deben eventos antiguos de la actividad hidrotermal y volcánica en la localidad que contribuyeron en la abundancia de diversos elementos en las rocas fosfatadas, volcanosedimentarias y minerales accesorios.
3. El análisis de componentes principales y de factores, así como el coeficiente de correlación y patrón de distribución espacial de los elementos en la Laguna de La Paz, permite distinguir 3 agrupaciones: a) *Co, Cr, Cs, Fe, Sc*; b) *Ca, Sr, carbonatos*; y c) *ETR (Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm y Yb)*.
4. El factor de enriquecimiento de las concentraciones de los elementos traza revela que As, Sb y Se, son los que principalmente presentan concentraciones elevadas respecto a la composición de la corteza terrestre, y el enriquecimiento se encuentra tanto en los sedimentos lagunares como en los sedimentos continentales. Por otra parte, los elementos que presentan concentraciones bajas (empobrecimiento) son Co, Cr, Fe y Ta, asociados a la dilución con componentes biogénicos (carbonatos) e inorgánicos (cuarzo).
5. La distribución espacial del factor de enriquecimiento (FE) en los sedimentos del interior de la Laguna de La Paz, evidencia que los sedimentos con las concentraciones mas

altas de elementos se encuentran en: 1) *el Estero Zacatecas y la barrera arenosa El Mogote (parte norte)*, a través de la depositación de partículas fosfáticas y minerales probablemente enriquecidas en elementos; 2) *Comitán (parte oeste) y Chametla (parte sur)* por la acumulación de material terrígeno de las serranías transportado en las subcuencas de drenaje. Los valores relativamente bajos de FE en los sedimentos son característicos de Palmira y el Estero Zacatecas, debido a la presencia de carbonatos que actúan como diluyentes de la concentración.

6. La normalización con lutita Norteamericana de las concentraciones de ETR de los sedimentos del interior de la Laguna de La Paz, muestra la existencia de dos grupos de ETR: Tierras Raras ligeras (LREE) y Tierras Raras pesadas (HREE), diferenciados a partir del Eu. Para este elemento se encuentra una anomalía de tipo positiva, que se atribuye a concentraciones altas asociadas al aporte importante de minerales (feldespatos, barita, apatita, micas, piroxenos) denominados como concentradores de ETR, mientras que Ce presenta anomalía negativa.
7. La distribución de los valores normalizados de ETR señalan empobrecimiento de los sedimentos en la zona de Palmira debido a los abundantes fragmentos calcáreos que actúan como diluyentes de la concentración, mientras que la mayor abundancia en el Estero Zacatecas, probablemente por el aporte de rocas fosfatadas y minerales que provienen del oeste de la Bahía de La Paz donde afloran las formaciones geológicas San Gregorio y Comondú.
8. Las concentraciones, áreas de acumulación y zonas de enriquecimiento de los elementos traza y del grupo de las Tierras Raras (ETR) en los sedimentos de la Laguna de La Paz, indican la importancia del aporte de material por intemperismo, erosión, influencia atmosférica, transporte eólico, precipitación pluvial, entre otros factores para la caracterización de este ambiente.

VI. LITERATURA CITADA

- Abu Hilal, A. 1993. Observations on heavy metal geochemical associations in sediments of the Jordan Gulf of Aqaba. *Mar. Poll. Bull.* 26: 85-90.
- Aguayo, E. 1984. Estudio de los sedimentos terrigenos de la cuenca de Guaymas, Golfo de California, Noroeste de México. *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo.* XVI: 5-24.
- Álvarez, R. V., L. Rosales y A. Carranza. 1986. Heavy metals in Blanco River sediments, Veracruz, México. *An. Inst. Cienc. Mar y Limnol.* UNAM. México. 13: 1-10.
- Álvarez-Arellano, A. 1989. La roca fosfórica en Baja California Sur. Origen, evolución y usos. *Geomimet.* 157: 38-46.
- Álvarez-Arellano, A. 1995. *Estudio geoquímico y de procedencia de arenas fosfáticas.* Tesis Doctoral. UNAM. México, D.F. 159 p.
- 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 y J. J. Prieto. 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 editores. UABCS-CICIMAR-SCRIPPS. 13-29.
- Armienta, M. A., R. Rodríguez, A. Aguayo, N. Ceniceros, F. Juárez y G. Villaseñor. 1994. Arsénico en el acuífero de Zimapan. Distribución y origen. *Actas INAGEQ.* 4: 83-89.
- Astakhov, A. S. 1996. The geochemical differentiation of recent sediments during deposition in east-Asian marginal seas. *Abstracts of papers presented at the 30th International Geological Congress.* 2: 219.
- Aston, S. R. 1980. *Nutrients, dissolved gases and general biogeochemistry in estuaries.* *En: Olausson E. y I. Cato, editores. Chemistry and biogeochemistry of estuaries.* John Wiley & Sons. E.U.A. 452 p.
- Bopp, F. y R. B. Biggs. 1981. Metals in estuarine sediments: Factor Analysis and its environmental significance. *Science.* 214: 441-443.

- Bryan, G. W. y W. J. Langston. 1992. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. *Environ. Pollut.* 76: 89-131.
- Campbell, J. A. y D. H. Loring. 1980. Baseline levels of heavy metals in the waters and sediments of Baffin Bay. *Mar. Poll. Bull.* 11: 257-261.
- Canseco, A. A., M. G. Villaseñor, V. M. Islas, A. Victoria, A. Gómez, R. Rivera y E. Enriquez. 1997. Estudio geoquímico de la Veta Regina, Tayoltita Durango. *Actas INAGEQ.* 39-48.
- Carrillo, A. y J. I. Drever. 1998. Environmental assessment of the potential for arsenic leaching into groundwater from mine waste in Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional.* 37: 35-39.
- Chaloupka, K. A. y R. C. Aller. 1995. Arsenic in central Long Island Sound sediments: natural levels and cycling patterns. *En: McElroy A. y J. Zeidner. Stony Book. N. Y. U.S.A.* 74p.
- Clark, M. A. 1984. Mineralogy of the rare earth elements. *En: Henderson, P. editor. Rare earth element geochemistry.* Elsevier. Amsterdam. 33-61.
- Concha, F. J. 1992. *Balance de nitritos, nitratos, amonio, nitrógeno orgánico disuelto y nitrógeno particulado durante el intercambio de las mareas entre el Golfo de México y Celestun, Yucatan.* Tesis de Maestría. CINVESTAV. Mérida, México. 116 p.
- Cosma, B., M. Dragon, M. Piccazzo, G. Scarponi y S. Tucci. 1979. Heavy metals in Ligurian Sea sediments: distribution of Cr, Cu, Ni and Mn in superficial sediments. *Mar. Chem.* 8: 125-142.
- Cosma, B., M. Maran, W. Martinotti y G. Queirazza. 1992. Geochemical cycling of heavy metals in a marine coastal area: benthic flux determination from pore water profiles and situ measurements using benthic chambers. *Hydrobiologia.* 235/236: 501-517.
- Cruz-Marin, A. 1997. *Un fósil de odontoceto del miembro San Juan (Oligoceno) de la Formación El Cien de San Juan de la Costa, B. C. S., México.* Tesis Licenciatura. U.A.B.C.S. La Paz, B. C. S. 58 p.
- Cruz-Orozco, R., P. Rojo, L. Godínez y E. Nava. 1989. Topografía, hidrología y sedimentos de las márgenes de la Laguna de La Paz, B. C. S. México. *Rev. de Inv. Cient. U. A. B. C. S. La Paz, B. C. S, México.* 1: 3-15.

- Cruz, O., C. Martínez y A. Mendoza. 1996. Batimetría y sedimentos de la Bahía de La Paz, B. C. S. México. *Oceánides*. 11: 21-27.
- Cutter, G. A. 1989. The estuarine behavior of Selenium in San Francisco Bay. *Estuar. Cstl. Shelf Sci.* 28: 13-34.
- Daesslé-Heuser, L. W. 1993. *Geoquímica y sedimentología de elementos de Tierras Raras en fosforitas marinas de Bahía Vizcaíno, Baja California México*. Tesis licenciatura. U.A.B.C. Ensenada, B. C. México. 87.
- Daskalakis, K. D. y T. P. O'connor. 1995. Normalization and elemental sediment contamination in the coastal United State. *Environ. Sci. Technol.* 29:470-477.
- De Baar, H. J., M. Bacon, P. Brewer y K. Bruland. 1985. Rare earth elements in the Pacific and Atlantic Oceans. *Geochim. Cosmoch. Acta.* 49: 1943-1959.
- De-Carlo, E. H., X. Y. Wen, J. P. Cowen y N. Exon. 1996. Fractionation of rare earth element in Fe-Mn crusts: the influence of surface complexation and carbonate speciation in seawater. *Abstract of papers presented at the 30 th International. Geological-Congress.* 2: 238.
- DelValls, T. A., J. M. Forja y A. Gómez. 1997. El uso del análisis multivariante en la unión de datos de toxicidad y contaminación para establecer guías de calidad de sedimentos: un ejemplo de la Bahía de Cádiz (España). *Ciencias Marinas.* 24: 127-154.
- Derkachev, A. N., L. Godínez, N. Nikolayeva, E. Shumilin y S. Sólis. *Minerales pesados en sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz. En prensa.*
- Dossi, P. y L. J. Warren. 1980. Distribution of heavy metals between the minerals and organic debris in a contaminated marine sediment. *En: Baker, R. A., editor. Contaminants and sediments. Fate and transport, case studies, modeling, toxicity.* Ann Arbor Science. USA. 119-139.
- Drude De Lacerda, L. 1994. Biogeochemistry of heavy metals in coastal lagoons. *En: Kjerfve, B. Editor. Coastal lagoon processes.* Elsevier Science Publishers. 221-241.
- Dumarey, A., Van Ryckeghem M. y Dams R. 1987. Comparison of wet-digestion methods for the determination of total mercury in plant samples by cold vapour atomic absorption spectrometry (CVAAS). *J. Trace and Microbe Techniques.* 5: 229-242.

- Elderfield, H., C. J. Hawkesworth, M. J. Greaves y S. E. Calvert. 1981. Rare earth element zonation in Pacific ferromanganese nodules. *Geochim. Cosmoch. Acta.* 45:1231-1234.
- Elderfield H. 1988. The oceanic chemistry of the rare - earth elements. *Tracers in the oceans.* 325: 105-126.
- Espitia-Cabrera, I., J. Serrano, M. Contreras y J. Reyes. 1997. Obtención de zirconia a partir de arenas zirconíferas. *Actas INAGEQ.* 3:353 .
- Fleet, A. J. 1984. Aqueous and sedimentary geochemistry of the rare earth elements. *En:* Henderson, P., editor. *Rare earth element geochemistry.* Elsevier. Amsterdam. 343-373.
- Fonseca-Rivera, C. 1991. *Variaciones petrológicas en las fosforitas de la capa Humboldt con respecto a su espesor, Formación San Gregorio, San Juan de la Costa, Baja California Sur, México.* Tesis de licenciatura. U.A.B.C.S. La Paz, B. C. S. México. 126 p.
- Förstner, U. 1980. Inorganic pollutants, particularly heavy metals in estuaries. *En:* Olausson E. y I. Cato, editores. *Chemistry and biogeochemistry of estuaries.* John Wiley y Sons. E.U.A. 452 p.
- French, P. W. 1993. Seasonal and inter-annual variation of selected pollutants in modern intertidal sediments, Aust Cliff, Severn Estuary. *Estuar. Cstl. Shelf Sci.* 37: 213-219.
- Galli-Oliver, C. y F. García. 1982. Dispersión de sedimentos por *Sargassum sinicola*, barra El Mogote, La Paz, Baja California Sur, México: CICIMAR. *Serie Didáctica.* p 16 .
- Galli-Oliver, C. 1993. Fósforita de San Juan de La Costa (Bahía de La Paz), Baja California Sur, México: 17 años de investigaciones. *Rev. Inv. Cient.* 4: 115-135.
- Gamiño, M. A. 1987. *Petrología sedimentaria y estatigrafía de las litofacies de fangolita fosfática de la Formación San Gregorio, San Juan de La Costa, Baja California Sur, México.* Tesis.Licenciatura. U.A.B.C.S. La Paz, B. C. S. México. 101 p.
- Garduño-Hernández, G. 1987. *Petrología sedimentaria y estatigráfica de las litofacies de fosforita y areniscas feldespática fosfática de la Formación San Gregorio, San Juan de la Costa, B. C. S. México.* Tesis licenciatura. U.A.B.C.S. La Paz, B. C. S. México.
- German, C. R., D. L. Bourles, E. T. Brown, J. Hergt, S. Colley, N. C. Higgs, E. M. Ludford, T. A. Nelsen, R. A. Feeley, G. Raisbeck y F. Yiou. 1997. Hydrothermal scavenging on the

Juan de Fuca Ridge:²³⁰Th, ¹⁰Be and REE in ridge-flank sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 61: 4067-4078.

Glasby, G. P., R. Gwozdz, H. Kunzendorf, G. Friedrich y T. Thijssen. 1987. The distribution of the rare earth and minor elements in manganese nodules and sediments from the equatorial and S. W. Pacific. *Lithos.* 20: 97-113.

Godínez-Orta, L., E. Shumilin, D. Sapozhnikov y D. Rodríguez-Meza. 1997. Características litológicas geoquímicas de los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz, B. C. S. *Actas INAGEQ.* 3: 225-233.

Goldberg, E. D. y G. O. Arrhenius. 1958. Chemistry of Pacific pelagic sediments. *Geochim. Cosmoch. Acta.* 13: 153-212.

Goldberg, E. D., M. Koide, R. A. Schmitt y R. H. Smith. 1963. Rare-earth distributions in the marine environment. *Journal of Geophysical Research.* 68: 4209-4217.

Goldschmidt, V. M. 1958. *Geochemistry.* Oxford. University Press. 730 p.

Gómez, A. M. 1978. *Estudio de la contaminación por materia orgánica en la Ensenada de La Paz, B. C. S.* Tesis profesional. U.A.B.C. 26 p.

Gómez, J., H. Cabrera y S. Farrera. 1984. Estudio hidrográfico de la Ensenada de La Paz, Baja California Sur. *En: Presente y Futuro de la Ensenada de La Paz.* U.A.B.C.S. La Paz, B. C. S. México. 7-13.

González, F. A., A. Vazquez, S. Villanueva y G. Ponce. 1994. Presencia de metales en sedimentos recientes y organismos de la laguna de Sontecomapan, Veracruz. México. *Hidrobiología.* 4: 35-43.

Graybeal, A. L. y G. Ross. 1984. Remobilization of transition metals in surficial pelagic sediments from the eastern Pacific. *Geochim. Cosmoch. Acta.* 48: 965-975.

Green-Ruíz, C. y H. Larrinaga-Cunningham. 1986. *Sedimentología y geoquímica de la Laguna de La Paz, B. C. S.* Tesis de Licenciatura. U.A.B.C.S. 83 p.

Green-Ruíz, C. 1996. *Geoquímica de sedimentos de la laguna costera subtropical Altata-Ensenada del Pabellón Sinaloa, México.* Maestría. U.N.A.M. Mazatlán, Sinaloa. México. 183 p.

- Green-Ruíz, C. y F. Páez-Osuna. 1997. Factor de enriquecimiento e índice de geoacumulación de metales pesados en sedimentos de la laguna subtropical Altata-Ensenada del Pabellón, Sinaloa México. *Actas INAGEQ*. 3: 326.
- Greig, A. R., R. N. Reid y D. Wenzloff. 1977. Trace metal concentrations in sediments from Long Island Sound. *Mar. Poll. Bull.* 8: 183-188.
- Gutiérrez-Galindo, E., G. Flores Muñoz, G. Olguín Espinoza y J. Villaescusa Celaya. 1990. Biodisponibilidad de metales traza en almejas y mejillón del valle agrícola de Mexicali y alto Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 16: 1-28.
- Gutiérrez-Galindo, E., G. Flores, R. Pro, J. Villaescusa y J. A. González. 1991. Metales pesados en tejidos y en biodepósitos sedimentarios del ostion *Crassostrea gigas* de la zona de cultivo de Bahía San Quintín, Baja California, México. *Inv. Mar. CICIMAR*. 6: 175-186.
- Helz, G. R. y S. Sinex. 1986. Influence of infrequent floods on the trace metal composition of estuarine sediments. *Mar. Chem.* 20: 1-11.
- Hernández, S. G., G. Solorio, L. Vasallo, L. Flores, M. Maples, D. Hernández y R. Alcalá. 1997. Distribución de Ni y Cr en suelos y sedimentos superficiales derivados de rocas del basamento de una parte de la sierra de Guanajuato. *Actas INAGEQ*. 173-186.
- Herut, B., H. Hornung, M. D. Krom, N. Kress y Y. Cohen. 1993. Trace metals in shallow sediments from Mediterranean coastal region of Israel. *Mar. Poll. Bull.* 26: 675-682.
- Holmes, C. W. 1986. Trace metal seasonal variations in Texas marine sediments. *Mar. Chem.* 20: 13-27.
- Howard, A., S. Apte, S. Comber y R. J. Morris. 1988. Biogeochemical control of the summert distribution and speciation of arsenic in the Tamar Estuary. *Estuar.Cstl. Shelf Sci.* 27: 427-443.
- Jafri, S. H., V. Balaram y P. K. Govil. 1993. Depositional environments of Cretaceous radiolarian cherts from Andaman-Nicobar Islands, northeastern Indian Ocean. *Mar. Geol.* 112: 291-301.
- Jiménez-Illescas, A. 1983. *Aplicación de un modelo hidrodinámico numérico a la Ensenada de La Paz, B. C. S.* Tesis Maestría. CICIMAR-IPN. 109 p.

- Jiménez-Illescas, A. 1996. *Análisis de procesos barotrópicos y baroclínicos en la Bahía de La Paz, B. C. S. México*. Tesis Doctoral. UNAM. México, D. F. 193 p.
- Jiménez-Illescas, A., M. Obeso y D. A. Salas de León. 1997. Oceanografía física de la Bahía de La Paz, B. C. S. *En: Urban R. J. y M. Ramírez, editores. La Bahía de La Paz, investigación y conservación*. UABCS-CICIMAR-SCRIPPS. La Paz, B. C. S. México. 31-41.
- Jiménez-Quiroz. M. 1991. *Contribución al conocimiento de los productores primarios de la Ensenada de La Paz. Análisis de la comunidad de manglar*. Tesis Maestría. CICIMAR-IPN. 223 p.
- Johns, C., S. Louma y V. Elrod. 1988. Selenium accumulation in benthic bivalves and fine sediment of San Francisco Bay, the Sacramento-San Joaquin Delta, and selected tributaries. *Estuar. Cstl. Shelf Sci.* 27: 381-396.
- Katz, A. y I. R. Kaplan. 1981. Heavy metals behavior in coastal sediments of Southern California: a critical review and synthesis. *Mar. Chem.* 10: 261-299.
- Klaver, G. Th. y C. E. van Weering. 1993. Rare earth element fractionation by selective sediment dispersal in surface sediments: the Skagerrak. *En: Liebezet, G., T. C. van Weering y J. Rumohr, editores Holocene sedimentation in the Skagerrak*. *Mar. Geol.* 111: 345-359.
- Kot, F. S., C. Green-Ruíz, F. Páez-Osuna, E. N. Shumilin, D. Rodríguez-Meza. 1999. Distribution of mercury in sediments from La Paz Lagoon, Peninsula of Baja California, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 63: 45-51.
- Kunzendorf, H. G., P. Glasby, P. Stoffers y W. L. Plüger. 1993. The distribution of rare earth and minor elements in manganese nodules, micronodules and sediments along an east-west transect in the southern Pacific. *Lithos.* 30: 45-56.
- Kuwabara, J. S., C. C. Chang, J. E. Cloern, T. L. Fries, J. A. Davis y S. N. Louma. 1989. Trace metals associations in the water column of south San Francisco Bay, California. *Estuar. Cstl. Shelf Sci.* 28: 307-325.
- Lacerda, L. D., C. E. Carvalho, C. E. Rezende y C. W. Pfeiffer. 1993. Mercury in sediments from the Paraíba do Sul River Continental shelf, S. E. Brazil. *Mar. Poll. Bull.* 26: 220-222.

- Lackschewitz, K. S., H. J. Wallrabe-Adams y D. Garbe-Schönberg. 1994. Geochemistry of surface sediments from the mid-oceanic Kolbeinsey Ridge, north of Iceland. *Mar. Geol.* 121: 105-119.
- Lechuga-Deveze, C. H., J. García-Pamanes y J. J. Bustillos. 1986. Condiciones ecológicas de una laguna costera de la costa oeste del Golfo de California, turbiedad y clorofila a. *Ciencias Marinas.* 12: 19-31.
- Liu, J. 1992. Geochemistry of REE of deep sea sediments in the East Pacific Ocean. *Mar. Geol. Quatern. Geol.* 12: 33-42.
- Liu, J., L. Zhang y H. Liang. 1994. The REE geochemistry of sediments in core CC48 from The East Pacific Ocean. *Oceanol. Limnol. Sin.* 25: 15 - 22.
- Loring, D. H. y R. T. Rantala. 1977. Geochemical analysis of marine sediments and suspended particulate matter. Fisheries and Marine Service. *Technical Report 700.* 44 p.
- Loring, D. H. 1991. Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments. *ICES J. Mar. Sci.* 48: 101-115.
- Loring, D. H., K. N. æs, S. Dahle, G. G. Matishou y G. Illin. 1995. Arsenic, trace metals, and organic micro contaminants in sediments from the Pechora Sea, Russia. *Mar. Geol.* 128: 153-167.
- Machorro, J. M. 1991. *Comparación petrográfica de algunas capas de fosforita de la Formación San Gregorio en San Juan de La Costa, El Guajito, San Hilario y Tembabichi, Baja California Sur, México.* Tesis Licenciatura. U.A.B.C.S. La Paz, B. C. S. México.
- Maynard, M. N. y J. D. Boon. 1994. Sediment transport processes in coastal lagoons. *En:* Kjerfve, B. editor. *Coastal lagoon processes.* Elsevier Oceanography Series. 60. Amsterdam. 157-219.
- Manahan, S. E. 1993. *Fundamentals of Environmental Chemistry.* Lewis Publishers. U. S. A. 844 p.
- Martínez-Camacho, J. 1988. *Geología de la mesa del Tesoro, estudio preliminar sobre la explotación de fosforita a cielo abierto en San Juan de la Costa, B. C. S. México.* Tesis licenciatura. U.A.B.C.S. 68 p.

- Martínez-Flores, A. 1998. *Contenido de arsénico en el agua subterránea de la zona minera de San Antonio, B. C. S. México: relación de los yacimientos minerales y obras mineras*. Tesis Licenciatura. U.A.B.C.S. La Paz, B.C.S. México. 63 p.
- Martínez-Magaña, H. 1995. *Distribución de metales pesados en sedimentos de Bahía San Quintín, Baja California México*. Tesis Maestría. Ensenada, B. C. 60 p.
- Mason, B. 1960. *Principios de Geoquímica*. Omega. Barcelona. 333 p.
- Mayol, C. M., R. Téllez y S. Milán. 1997. Hidrogeoquímica del sistema hidrológico Telléz-Tizayuca, Hidalgo. *Actas INAGEQ*. 3: 13-24.
- McArthur, J. M. y J. N. Walsh. 1984. Rare-earth geochemistry of phosphorites. *Chem. Geol.* 47: 191-220.
- Méndez, J. C., I. Rosales y R. Salas. 1994. Análisis de sedimentos en el sureste del Golfo de México. *Actas INAGEQ*. 135-140.
- Méndez, L., B. Acosta, S. T. Alvarez-Castañeda y C. H. Lechuga-Deveze. 1998. Trace metals distribution along the southern coast of Bahia de La Paz (Gulf of California), México. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 61: 616-622.
- Mendoza-Maravillas, A. 1990. *Rasgos geomorfológicos, sedimentología y geoquímica de los sedimentos de la barrera arenosa El Mogote de la Laguna de La Paz, B. C. S. México*. Tesis licenciatura. U.A.B.C.S. La Paz, B. C. S. México. 86 p.
- Meyerson, A. L., G. Luther, J. Krajewski y R. I. Hires. 1981. Heavy metal distribution in Newark Bay sediments. *Mar. Poll. Bull.* 12: 244-250.
- Mohan, P. M. 1997. Trace element geochemistry of modern sediments of the Vellar River and its surrounding environments. *Indian J. Mar. Sci.* 26: 150-157.
- Morales, E. R. 1982. *Mareas y corrientes en la Ensenada de La Paz, B.C.S.* Tesis de Maestría. CICESE. U.A.B.C. Ensenada, B. C. México. 73 p.
- Morrisey, D. J., A. J. Underwood, J. S. Stark y L. Howitt. 1994. Temporal variations in concentrations of heavy metals in marine sediments. *Estuar. Cstl. Shelf Sci.* 38: 271-282.
- Nance, W. B. y S. R. Taylor. 1977. Rare earth element patterns and crustal evolution-II. Archean sedimentary rocks from Kalgoorlie, Australia. *Geochim. Cosmoch. Acta.* 41: 225-231.

- Nava-Sánchez, E. y R. Cruz-Orozco. 1989. Origen y evolución geomorfológica de la Laguna de La Paz, Baja California Sur, México. *Inv. Mar. CICIMAR*. 4: 49-58.
- Obeso-Nieblas, M. 1986. *Propagación de la constituyente de la marea en la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México, mediante un modelo bidimensional hidrodinámico numérico*. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN. 123 p.
- Obeso-Nieblas, M. 1993. Modelación hidrodinámica de la marea en la Ensenada de La Paz, B.C.S. *Inv. Mar. CICIMAR*. 8: 1-11.
- Olmez, I., E. Sholkovitz, D. Hermann y R. Eganhouse. 1991. Rare earth elements in sediments off southern California: A new anthropogenic indicator. *Environ. Sci. Technol.* 25: 310-316.
- Ortega-Osorio, A. 1988. *Estudio geoquímico metalúrgico de depósitos hidrotermales de las regiones dorsal del Pacífico Mexicano (21°N) y Cuenca de Guaymas*. Tesis de Maestría. U.N.A.M. Mazatlán. México. 97 p.
- Ortega-Lara, V. 1991. *Metales traza en sedimentos superficiales marinos de la región noroccidental fronteriza México - E.U.A.* Tesis Licenciatura. U.A.B.C. Ensenada. 75 p.
- Ortiz, G. A. y A. Carranza. 1997. Los sedimentos como receptores potenciales de metales: estudio de aplicación en el río Coatzacoalcos, Veracruz. *Actas INAGEQ*. 3:337.
- Osuna-López, J. I. 1981. *Geoquímica de algunos oligoelementos presentes en las aguas hipersalinas y sedimentos de la Bahía Ceuta, Sinaloa*. Tesis Maestría. U.N.A.M. México, D.F. 101 p.
- Osuna, V. I. 1986. *Evolución Holocénica de la Laguna de La Paz, B. C. S. México*. Tesis Licenciatura. U.A.B.C.S. 57 p.
- Osuna, J., H. Zazueta, A. Rodríguez, F. Páez. 1990. Trace metal concentrations oyster (*Crassostrea corteziensis*) from tropical lagoon environments, Mexico. *Mar. Poll. Bull.* 21:486-488.
- Páez-Osuna, F y J. I. Osuna-López. 1990. Heavy metals distribution in geochemical fractions of surface sediments from the lower Gulf of California. *An. Inst. Cienc. Mar y Limnol.* UNAM. México. 17: 287-298.

- Páez-Osuna, F y J. I. Osuna-López. 1990. Aspectos genéticos de los sedimentos marinos de la boca del Golfo de California evidenciados por la geoquímica de sus metales pesados. *Geofísica Internacional*. 29: 47-58.
- Pamplona-Salazar, M., I. Pérez-Cervantes y L. E. Aguilar-Rosas. 1992. Biocenosis de comunidades sujetas al impacto de contaminación orgánica en la Bahía de Todos Santos. *Mem. IX. Simp. Int. Biol. Mar.* UABCS. La Paz, B. C. S. México. 37-42.
- Pattan, J. N. y V. K. Banakar. 1993. Rare earth element distribution and behavior in buried manganese nodules from the Central Indian Basin. *Mar. Geol.* 112: 303-312.
- Pérez, Z. A., P. V. Levy, B. M. Vega, H. Uribe y B. Aguilar. 1993. *Evaluación del Pb en la almeja Chione californiensis de la Ensenada de La Paz, B. C. S. muestras de 1988 a 1989.* Resumen V Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar. p. 60.
- Pérez-Nevarez, V. 1995. *Zonación y estructura de la comunidad de moluscos bivalvos en la Ensenada de La Paz, B. C. S. México.* Tesis de Maestría. CICIMAR - IPN. La Paz, B. C. S. México. 91 p.
- Pimentel-Hernández, R., E. Flores, J. A. Pérez y H. García. 1991. El relieve del Valle de La Paz-El Carrizal Baja California Sur, México y su relación con la recarga de los sistemas acuíferos. *Rev. Inv. Cient.* 2: 3-17.
- Piper, D. Z. 1991. Geochemistry of a tertiary sedimentary phosphate deposit: Baja California Sur, México. *Chem. Geol.* 92: 283-316.
- Piper, D. Z. 1994. Seawater as the source of minor elements in black shales, phosphorites and the other sedimentary rocks. *Chem. Geol.* 114: 95-114.
- Posada-Ramos, M. E., A. Hansen y V. Ortega. 1994. Enriquecimiento de metales en sedimentos de la cuenca Lerma-Chapala. *Actas INAGEQ.* 3: 151-156.
- Postma, H. 1980. Sediment transport and sedimentation. 154-186 p. *En: Olausson E. y I. Cato, editores. Chemistry and biogeochemistry of estuaries.* John Wiley & Sons. E.U.A. 452 p.
- Prieto-Mendoza, J. 1991. *Características petrográficas de las masas fosfáticas de la Formación San Gregorio (Oligoceno superior-Mioceno inferior) y de los sedimentos modernos, Baja California Sur, México.* Tesis de Licenciatura. U. A. B. C. S. La Paz, B. C. S. México. 68p.

- Quintanilla, M. A. y F. Suárez. 1996. Cerro Prieto y su correlación con los centros de dispersión del Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 22: 91-110.
- Rauter, G., R. Rubio, J. F. López-Sánchez y E. Casassas. 1987. Determination and speciation of copper of a river Mediterranean (River Tenes, Catalonian Spain). *Wat. Res.* 22: 449-455.
- Rodríguez-Figueroa, G., E. Shoumilin, F. Páez-Osuna, E. Nava y D. Sapozhnikov. 1998. Ocurrencia de metales y metaloides en sedimentos superficiales de cuatro abanicos-deltas de la costa oriental de Baja California Sur. *Actas INAGEQ*. 4: 43-50.
- Román, G. R., S. G. Ribeiro y M. A. Arribére. 1995. Rare earth geochemistry of the upper Manso River basin, Río Negro, Argentina. *Earth and Planetary Science Letters*. 133: 47-57.
- Romero-Vargas, I. P. 1995. *Metales pesados y su fracción química en sedimentos de la Bahía de Todos Santos Baja California, México*. Tesis Maestría. U. A. B. C. 86 p.
- Rosales-Hoz, L., A. Carranza y V. Álvarez. 1986. Sedimentological and chemical studies in sediments from Papaloapan River México. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM*. 13: 263-272.
- Rosales H., L., A. Carranza, S. Arias y S. Santiago. 1992. Distribución de metales en sedimentos recientes del sureste del Golfo de México. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM*. México. 19: 123-130.
- Ross, R. S. y S. McLennan. 1985. *The Continental Crust: its composition and evolution: An examination the Geochemical record preserved in sedimentary rocks*. Geoscience Texts. Blackwell Scientific Publications. London. 277 p.
- Ross G. R., S. R. Guevara, M. A. Arribere. 1995. Rare earth geochemistry in sediments of the upper Manson River basin, Rio Negro, Argentina. *Earth Planet. Sci. Letter*. 133: 47-57.
- Sadiq, M. 1989. Nickel sorption and speciation in a marine environment. *Hydrobiologia*. 176/177: 225-232.
- Salomons W. y U. Förstner. 1984. *Metals in the hydrocycle*. Springer - Verlag. 349 p.
- Shen, H. 1991. Rare earth elements in deep sea sediments. *Geochimica Diqui Huaxue*. 4: 340-348.

- Shumilin, N. E., V. V. Anikiev, N. A. Goryachev, A. P. Kassatkina, S. M. Fazlullin. 1993. Estimation of the role of biogeochemical barriers in trace metals migratiosn in the river-sea system. *Marine Chemistry*. 43: 217-224.
- Shumilin, N. E., L. Godínez-Orta, R. Cruz-Orozco, D. Sapozhnikov, S. Sólis-Nuñez y Y. Sapozhnikov. 1996. Características litólogo-geoquímicas de los sedimentos superficiales de Bahía Concepción. *Actas INAGEQ*. 2: 79-84.
- Shumilin, N. E., C. Green, D. Sapozhnikov, D. Rodríguez 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, B. C. S. *Actas INAGEQ*. 4: 23-32.
- Sondag, F., F. Soubies, J. P. Fortune, B. Dupre, P. Magat y A. Melfi. 1997. Hydrogeochemistry in soils and sediments in the area of the Lagoo Campestre lake (Salitre, MG, Brasil): Chemical balances of major and trace elements and dynamics of Rare Earth elements. *En: Tardy Y. y M. J. Wilson, editores. Selected papers from the 6th international meeting of eurolaton-Laterite palaeoweathering and palaeosurfaces, Belfast*. 12: 155-162.
- Soto-Jiménez, M. y F. Páez. 1997. Normalización de la concentración de metales pesados en sedimentos del puerto de Mazatlán y áreas adyacentes. *Actas INAGEQ*. 3: 338.
- S.P.P. 1981. Carta hidrológica. Aguas superficiales. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. INAGEQ. México.
- S.P.P. 1984. Carta geológica de La Paz. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. INAGEQ. México.
- Strekopytov, S. 1996. On the relationship between phosphorus and REE in pelagic sediments. *Abstract 30 International Geological Congress*. 2: 147.
- Sturgeon, R. y Sh. S. Berman. 1987. Sampling and storage of natural water for trace metals. *C. R. C. Crit. Rev. Anal. Chem*. 18: 209-244.
- Taran, Y. A., A. Bernard, J. C. Gavilanes, E. Lounejeva, A. Cortes y M. A. Armienta. 1998. Trace elements chemistry and mineralogy of high temperature gas discharge from Colima volcano, Mexico. *Actas INAGEQ*. 4: 127-138
- Taylor, S. R. 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochim. Cosmoch. Acta*. 28: 1273-1285.

- Tkalin, A. V., B. J. Presley y P. N. Boothe. 1996. Spatial and temporal variations of trace metals in bottom sediments of Peter the Great Bay, the Sea of Japan. *Environ. Pollut.* 92: 73-78.
- Trejo, S. D. y E. Mayoral. 1984. Estudio de la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua y almeja catarina *Argopecten circularis* en la Ensenada de La Paz, B. C. S. *En: Presente y futuro de la Ensenada de La Paz*. U.A.B.C.S. Gobierno del estado de Baja California Sur. Memoria. La Paz, B. C. S. p. 123.
- Villanueva S. y A. 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. y A. Botello. 1998. Metal pollution in coastal areas of Mexico. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 157: 53-94.
- Walkley, A. e I. A. Black. 1934. An examination of the Degthareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid filtration method. *Soil Science.* 27: 29-38.
- Watkins, R. T., Y. Nathan y J. M. Bremner. 1995. Rare earth in phosphorite and associated sediments from the Namibian and South African continental shelves. *Mar. Geol.* 129: 111-128.
- Williams S., H. Simpson, R. Olsen y R. Bopp. 1978. Sources of heavy metals in sediments of the Hudson River estuary. *Mar. Chem.* 6: 195-213.
- Williams, T. M., J. G. Rees, A. Ferguson, R. A. Herd, K. K. Kairu y A. C. Yobe. 1997. Metal, petroleum hydrocarbons and organochlorines in shore sediments and waters of Mombasa, Kenya. *Mar. Poll. Bull.* 34: 570-577.
- Windom, H. L., S. J. Schropp, F. D. Calder, J. D. Ryan, R. G. Smith, L. C. Burney, F. S. Lewis y C. H. Rawlinson. 1989. Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments of the southeastern United State. *Environ. Sci. Technol.* 23: 314-320.
- Yuan-Hui, L., T. Hisayuki, Y. Tsuo-Sheng y Ch. Jing-Sheng. 1984. The elemental composition of suspended particles from the Yellow and Yangtze Rivers. *Geochim. Cosmoch. Acta.* 48: 1561-1564.

Estación	Longitud	Latitud	K (%)	Ca (%)	Fe (%)	Carbonatos (%)	C. orgánico (%)	Hg (µg/g)	Rb (µg/g)	Cs (µg/g)
1	-110.3841	24.1549	0.5	11.8	0.51	24.70	0.75		24.6	1.01
2	-110.403	24.165	1.01	3.55	1.34	14.64	0.13		39.6	1.82
3	-110.4093	24.1687	0.55	2.98	1.14	11.47	0.23	0.01	27.7	1.92
4	-110.4213	24.1715		4.82	2.72	8.21	0.28		41.5	1.77
5	-110.4213	24.1715		6.8	2.05				32.7	1.82
6	-110.4296	24.168	0.4	17.8	0.66	74.64	1.36	0.01	13.9	0.95
7	-110.427	24.1654	0.83	5.15	2	12.34	0.74	0.01	25.2	2.86
8	-110.4247	24.1611	0.67	3.35	1.56	11.93	0.65	0.03	44.6	4.09
9	-110.423	24.1564	0.67	4.14	1.49	9.88	0.40	0.03	58.1	3.11
10	-110.4276	24.1431		3.67	1.03	11.04	0.74	0.03	71.6	2.34
11	-110.4229	24.1363		4.09	1.1	45.42	0.51	0.01	61.6	2.89
12	-110.4173	24.1324	3.16	2.99	1.09	29.27	0.69	0.03	50.5	4.3
13	-110.4136	24.1281		3.71	1.02	7.36	0.67	0.03	56.1	3.48
14	-110.4211	24.1244		2.48	0.91	5.10	0.53	0.03	60.8	5.33
15	-110.421	24.1191	0.6	4.77	0.9	22.57	0.87	0.03	53.7	3.54
16	-110.4179	24.1114		1.98	0.63	6.52	0.22	0.03	60.3	4.37
17	-110.4118	24.1105		2.51	0.73	1.54	0.60	0.03	36.4	2.23
18	-110.4058	24.1116	1.11	2.71	0.99	2.82	0.58	0.03	41.7	2.41
19	-110.3926	24.1106		2.69	0.94	3.60	0.35	0.03	30.8	2.9
20	-110.3813	24.1132		1.97	3.32		1.93	0.03	75.1	11.2
21	-110.3717	24.1156		2.53	1.77	5.43		0.04	39.2	4.13
22	-110.3717	24.1176		1.87	1.44	11.61	1.15	0.02	46.2	2.96
23	-110.3619	24.1176	0.37	2.83	1.9	15.58	0.67	0.03	57	3.36
24	-110.3513	24.126		3.82	1.83	29.44	2.28	0.01	42.7	4.52
25	-110.351	24.1312		2.56	0.83	4.61	1.75	0.03	31.6	1.72
26	-110.3043	24.1874		17	0.34	64.16	1.97	0.01	5	0.79
27	-110.3043	24.18	0.35	14	0.97	53.46	2.48	0.01	20.9	1.14
28	-110.4083	24.1665	1.21	3.93	1.24			0.01	30.1	1.8
29	-110.4085	24.158		12.7	1.48	62.08	1.63	0.03	35.8	4.17
30	-110.4083	24.1598	1.09	1.44	2.52	4.65	2.34	0.03	54.2	7.95
31	-110.4083	24.146		1.83	2.89	5.86	2.61	0.04	66.6	8.54
32	-110.4078	24.141		2.73	2.73	5.98	2.34	0.03	49.8	8.12
33	-110.4083	24.1326		4.73	2.39	25.66	1.45	0.03	54.5	8.5

Estación	Longitud	Latitud	K (%)	Ca (%)	Fe (%)	Carbonatos (%)	C. orgánico (%)	Hg (µg/g)	Rb (µg/g)	Cs (µg/g)
34	-110.4083	24.1245	0.78	7.27	2.04	30.12	2.27	0.03	45	7.72
35	-110.3998	24.1168		1.98	3.28	4.02	1.93		61.8	11.4
36	-110.3995	24.1251		6	0.4	39.00	0.32	0.02	36	1.79
37	-110.3998	24.1338		3.07	2.81	6.61	2.05	0.03	80	8.15
38	-110.3992	24.1413		3.79	1.27	8.19	0.51	0.01	38.4	3.31
39	-110.4	24.15		3.55	2.49	36.96	2.53	0.03	43.2	7.8
40	-110.4042	24.1498		2.8	2.25	7.47	1.38	0.05	61.3	7.47
41	-110.4165	24.1496	1	1.6	2.28	6.36	2.11	0.03	47.5	6.89
42	-110.4167	24.1578	1.09	2.06	2.69	7.46	2.81	0.04	58	8.68
43	-110.3998	24.1582	2.27	11.6	0.68	58.67	0.13	0.01	29.4	1.68
44	-110.3829	24.1501		2.94	1.08	4.80	0.06	0.01	43.3	2.08
45	-110.3833	24.1413	2.8	9.02	1.07	25.98	0.14	0.01	35.3	2.79
46	-110.3833	24.133		4.65	0.43	35.64	0.17	0.01	18.2	0.42
47	-110.3829	24.1245		6.72	2.24	20.59	1.76	0.03	76.6	5.14
48	-110.3835	24.1165	2.43	5.22	2.48	27.35	1.64	0.03	44.4	5.88
49	-110.3753	24.1248		5.58	1.85	39.86	0.96	0.03	53.1	3.79
50	-110.3752	24.1413	1.13	3.11	1.32	24.00		0.01	82.8	1.65
51	-110.3495	24.1504		1.87	1.18	10.15	0.33	0.01	33	1.73
52	-110.3066	24.1766		20.2	0.16	90.00	0.76	0.01	1.33	0.047
53	-110.3108	24.1748	2.5	14.6	0.86	69.04	0.62	0.01	37.3	1.02
54	-110.3196	24.1654		5.02	0.82	43.82	0.58	0.01	34.3	1.28
55	-110.3201	24.1618		4.56	1.02	41.33	0.43	0.01	43.2	1.41
56	-110.3216	24.1637		7.63	1.12	68.71	0.52		68.7	2.35
57	-110.3246	24.1659		3.78	1.14	7.57	0.28	0.01	52.2	2.23
58	-110.3238	24.1585	2.03	7.41	1	91.87	0.90		58.3	2.05
59	-110.3266	24.1566		5.65	1.05	41.60	0.44		22.1	1.72
60	-110.3354	24.1528	2.54	2.86	0.85	10.18	0.52	0.01	33.6	0.83
61	-110.336	24.1548		2.83	1.6	10.47	0.47	0.01	57.6	2.08
62	-110.3386	24.158	2.31	4.3	1.5	11.69	0.29	0.01	59.6	1.14
63	-110.3522	24.152		3.76	1.23	47.16	2.68		40.7	1.7
64	-110.3512	24.149		2.18	1.35	8.06	2.75		40.4	1.83
65	-110.3505	24.1455		3.72	1.4	27.90	3.05	0.03	41.9	1.73
66	-110.3194	24.1614		2.28	0.8	12.01		0.03	44	0.95

Estación	Longitud	Latitud	K (%)	Ca (%)	Fe (%)	Carbonatos (%)	C. orgánico (%)	Hg (µg/g)	Rb (µg/g)	Cs (µg/g)
67	-110.3206	24.1578		4.4	1.99	1.27		0.01	36.9	1.96
68	-110.3277	24.1578		8.65	1.03	10.28		0.01	21.6	2.22
69	-110.3345	24.1518		4.99	0.97	4.83		0.01	49.9	2.5
70	-110.3512	24.1432		3.29	1.12	13.81		0.01	34.2	1.75
71	-110.429	24.1708		7.78	1.53	6.62	0.32	0.01	5.72	3.55
72	-110.3568	24.1287		18.4	0.41	68.82		0.01	19.4	1.64
73	-110.3675	24.137		3.77	1.8	25.34		0.01	56.3	4.36
74	-110.3722	24.1398		3.57	1.07	9.17		0.01	38.3	2.24
75	-110.36	24.1403		2.82	1.92	28.55		0.01	35.1	3.11
76	-110.3102	24.1775		4.23	1.23	13.57		0.01	42.8	2.11
77	-110.321	24.1818		5	2.11				24.6	4.16
78	-110.3098	24.173		7.35	2.02				24.9	3.73
79	-110.3325	24.1575		3.52	1.66				83.2	2.11
80	-110.3425	24.1575		1.42	3.87			0.01	68.9	9.67
81	-110.3691	24.1441		2.77	4.24				67.8	11.5
82	-110.3863	24.1533		1.76	3.63				57	8.04
83	-110.3938	24.1416		7.88	2.44				44.2	5.28
84	-110.4133	24.1643		2.47	4.36				86.9	9.59
85	-110.4276	24.1725		2.61	1.39			0.01	0.23	2.35
86	-110.4133	24.155		5.46	0.94				36.4	1.7
87	-110.4033	24.1533		3.39	2.67				28.8	5.06
88	-110.4083	24.1433		3.91	0.79				39.5	1.8
89	-110.4108	24.1375		6.47	1.29		0.64		49	2.54
90	-110.4058	24.1175		3.07	2.11			0.03	72.3	2.63
91	-110.3961	24.1088		3.95	1.36		2.32		35.5	2.29
92	-110.3883	24.1264	3.64	2.24	1.03		0.40	0.01	35.1	1.53
93	-110.3738	24.1175		3.83	1.62		0.17	0.03	42.9	3.37
94	-110.3616	24.1241		2.08	1.46			0.01	13.8	2.53

Anexo I. Datos de concentración de los componentes mayores y elementos traza por estación en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

Estación	Sr ($\mu\text{g/g}$)	Ba ($\mu\text{g/g}$)	Cr ($\mu\text{g/g}$)	Co ($\mu\text{g/g}$)	As ($\mu\text{g/g}$)	Sb ($\mu\text{g/g}$)	Sc ($\mu\text{g/g}$)	Hf ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	U ($\mu\text{g/g}$)
1	900	280	7.11	2.22	9.66	0.5	2.83	0.49	0.8	1.14
2	530	545	32.7	4.48	22	0.078	7.81	1.18	3.52	4
3	450	330	19.9	3.49	17.3	0.93	5.36	1.28	2.42	0.97
4	485	425	76.3	10.4	44.4	0.88	18.5	1.15	3.21	5.53
5	895	355	57.2	7.4	0.9	0.05	13	1.24	4.42	2.44
6	2140	195	19.9	1.82	6.83	0.46	3.36	4.44	1.38	2.19
7	410	225	89.1	4.96	30.1	1.43	8.99	7.43	4.3	3.91
8	495	420	28.3	4.5	22.5	0.93	7.08	4.55	3.69	2.31
9	550	440	38.9	3.82	21.5	0.84	7.99	7.45	4.19	3.8
10	455	500	26.9	2.64	16.8	0.71	4.92	2.75	3.47	2.53
11	590	580	11.9	2.88	10.4	0.43	3.88	4.61	2.42	0.32
12	450	440	18.7	2.66	11.9	0.37	4.75	2.87	2.78	1.6
13	585	380	20.1	2.64	14.6	0.68	4.49	2.13	3.58	1.75
14	570	380	12.9	2.17	10.7	1.37	3.43	3.07	3.69	2.05
15	585	270	16.1	2.33	10.4	0.89	4.1	3.85	2.44	1.13
16	240	385	6.31	2.19	9.03	0.85	2.71	5.7	2.69	0.52
17	330	330	9.08	4.04	0.83	0.81	3.71	1.03	3.42	1.25
18	350	355	7.39	5	7.58	0.51	4.63	1.35	2.19	1.33
19	500	390	11.3	5.6	7.22	1.05	4.18	1.32	1.92	0.36
20	320	175	29.3	10.7	3.39	0.49	12.8	1.65	4.37	2.35
21	515	250	17.2	7.64	9.33	0.19	7.78	1.67	2.58	1.25
22	330	440	15.2	7.29	7.43	0.54	6.8	1.13	1.94	0.66
23	340	450	12.9	8.07	8.03	0.75	8.86	3.23	3.6	0.66
24	590	635	28.7	7.5	3.33	0.22	7.93	3.02	2.28	0.54
25	585	340	10.2	6.13	8.75	0.7	3.77	4.21	1.63	0.45
26	3510	165	7.71	1.14	1.05	0.12	1.32	0.75	1.01	1.47
27	2495	145	7.19	2.33	5.18	0.42	3.11	2	2.42	3.38
28	450	440	35.3	4.29	11.5	0.94	6.24	1.52	2.88	1.98
29	560	125	17.8	4.53	12.3	0.42	5.58	0.97	2.46	1.55
30	355	165	20.7	7.05	5.46	0.62	9.82	2.09	3.03	0.21
31	510	140	31.6	9.3	9.76	0.9	11	1.67	3.83	2.13
32	395	260	48.6	8.08	4.55	0.41	10.8	2.07	3.87	2.9
33	385	320	27.7	8.09	16.2	1.1	9.34	1.64	4.09	1.3

Estación	Sr (µg/g)	Ba (µg/g)	Cr (µg/g)	Co (µg/g)	As (µg/g)	Sb (µg/g)	Sc (µg/g)	Hf (µg/g)	Th (µg/g)	U (µg/g)
34	1525	62	20.7	7.18	10.4	0.25	8.27	1.46	2.75	1.12
35	285	305	33.6	10.2	8.44	0.72	12.7	2.14	4.09	1.08
36	705	440	9.58	2.15	3.55	0.24	1.56	0.51	0.91	0.47
37	140	81	32.5	8.83	5.17	1.13	10.8	2.39	3.71	0.44
38	410	550	14.7	3.92	7.66	0.11	4.78	2.47	3.39	4.72
39	570	250	27.1	7.58	4.81	1.78	9.78	1.55	3.7	4.37
40	710	410	28	7.33	3.74	0.56	8.74	3.26	4.39	6.11
41	425	88	24.1	6.22	3.64	0.14	8.44	1.74	2.7	4.14
42	470	64	38.3	7.44	8.92	0.56	9.93	1.81	3.89	2.14
43	845	330	46.6	2.69	13.7	0.18	3.43	1.31	2.12	3.22
44	445	535	24.7	3.76	20.9	0.61	5.98	3.04	2.59	9.5
45	920	250	6.71	4.45	14.8	0.26	2.51	1.88	2.77	9.52
46	510	430	5.53	1.25	4.1	0.9	1.44	0.44	1.53	3.87
47	265	370	21.1	8.16	3.89	0.35	8.98	1.61	3.58	3.33
48	675	260	18.7	9.65	2.21	0.86	9.48	2.16	3.64	7
49	505	170	14.3	6.74	11	0.7	7.12	1.8	2.56	1
50	400	440	10.1	3.93	13.2	0.44	4.74	1.83	3.67	6.94
51	245	330	12.3	3.66	13.6	0.14	3.68	1.39	2.3	0.91
52	1955	50	3.84	0.37	1.16	0.15	1.05	0.27	0.76	5.45
53	1225	210	7.84	2.27	7.26	0.48	2.71	0.71	1.19	0.8
54	420	235	9.98	2.04	16.2	1.62	2.47	1.76	1.94	8.7
55	685	265	8.03	2.2	3.12	0.44	3.25	0.94	3.93	2.38
56	455	500	9.53	2.25	4.85	0.37	4.07	1.52	3.77	1.22
57	275	860	13.6	2.22	11.8	0.16	3.21	2.02	3.46	5.55
58	555	335	7.29	11.2	14	0.35	2.91	1.79	2.86	14.5
59	750	535	29.5	3.26	1.65	1.72	3.2	2.36	2.05	4.59
60	575	430	5.28	2.25	2.48	0.022	2.39	1.01	1.08	1.28
61	265	585	11.9	3.65	0.89	0.92	4.8	5.74	4.27	1.63
62	255	455	8.22	3.2	14.5	0.27	4.22	2.46	3.82	2.17
63	285	465	9.08	3.56	20.9	0.8	4.97	2.21	3.4	1.71
64	245	555	15.3	3.61	12.4	0.62	4.21	1.94	3.58	4.13
65	380	330	18.1	3.67	6.12	0.34	5.21	2.95	2.86	2.29
66	465	530	17.2	2.71	9.05	1.47	3.32	1.41	1.82	2.3

Estación	Sr (µg/g)	Ba (µg/g)	Cr (µg/g)	Co (µg/g)	As (µg/g)	Sb (µg/g)	Sc (µg/g)	Hf (µg/g)	Th (µg/g)	U (µg/g)
67	385	535	47.9	7.03	29.4	0.62	12.2	4.37	5.04	6.7
68	435	250	11	3.47	2.84	0.85	3.85	0.98	1.72	2.9
69	350	615	12.9	3.63	8.88	2.02	4.13	1.3	3.07	3.22
70	535	395	20.2	3.15	3.86	1.03	4.66	1.62	3.25	2.7
71	725	515	12.9	4.24	0.5	1.42	5.09	2.93	3.2	1.9
72	3225	320	6.32	1.5	3.8	1.35	1.82	1.75	1.57	1.31
73	345	670	27.9	4.79	25.1	2.81	8.02	4.25	5.16	0.43
74	380	790	11.1	2.7	4.32	0.06	5.36	2.06	3.58	2.22
75	465	655	20.5	5.18	3.49	0.42	5.72	2.81	4.16	1.99
76	325	450	32.7	4.07	10.6	0.84	6.71	1.9	4.64	0.77
77	985	725	30.7	7.49	4.03	1.31	7.62	2.81	4.63	1.54
78	595	300	29.2	6.61	10.1	0.57	8.98	2.19	3.43	0.99
79	290	475	47.4	4.58	7.47	0.51	9.63	1.32	7.03	3.02
80	525	355	33.6	11.6	12.3	0.82	14.3	2.49	5.19	3.56
81	515	110	32.7	13.5	12.8	0.37	15.7	2.67	6.22	2.75
82	240	320	36	12.2	7.44	1.62	13.7	2.1	5.96	1.18
83	435	305	39.3	8.13	2.87	0.6	9.31	2.36	4.9	3.61
84	91	430	41.3	14	12.3	1.1	16.5	2.41	5.55	8.12
85	440	240	22	7.06	7.09	0.5	7.09	2.93	2.25	1.1
86	610	210	14.6	3.66	7.17	0.2	4.74	1.07	1.89	5.86
87	365	535	22.9	10.7	6.18	0.5	11.4	2.94	3.78	1.39
88	495	580	14	2.6	11	0.22	3.36	1.12	1.92	2.61
89	770	400	17	2.81	10.5	0.16	4.49	1.95	3.94	2.02
90	335	630	15.4	6.2	20.2	4.7	6.43	3.35	5.81	1.35
91	860	645	14.9	4	5.72	1.9	4.62	3.67	1.88	3.32
92	510	535	9.47	2.85	6.24	0.32	3.85	2.36	0.92	2.02
93	425	345	17.5	5.39	10	4.96	5.9	2.09	2.77	1.61
94	440	550	10.4	4.04	5.28	0.21	4.85	1.17	1.63	2.9

Anexo I. Datos de concentración de los componentes mayores y elementos traza por estación en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

Estación	Br ($\mu\text{g/g}$)	Ta ($\mu\text{g/g}$)	Zr ($\mu\text{g/g}$)	Ni ($\mu\text{g/g}$)	Se ($\mu\text{g/g}$)	Zn ($\mu\text{g/g}$)	La ($\mu\text{g/g}$)	Ce ($\mu\text{g/g}$)	Pr ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)
1	3.27	0.05	10	20	1.24		7.76	13.9	1.48	5.1
2	2.43	0.27	71		1.5	3	22.6	37	3.9	14.1
3	5.28	0.2	40		0.2	29	16.7	30.2	3.2	11.8
4	1.91	0.3	56	80	0.54	42	36.4	63.7	7	26.2
5	0.53	0.41	20	50	0.58		4.19	9.45	1.2	5.1
6	2.84	0.58	10	110	0.28	42	8.51	15.7	1.63	5.94
7	0.78	1.12	33		1.24	27	34.5	60	6.7	25
8	0.84	0.78	215	60	0.3	10	24.6	41.2	4.65	17.5
9	0.47	0.44	88		1.78		23.1	41	4.7	17.1
10	1.19	0.84	41		1.26	20	15.9	30.4	3.45	12.9
11	1.09	0.66	62	20	1.39		11.9	20.1	2.2	7.5
12	1.39		34		0.65	27	17.2	30	3.03	10.7
13	1.55	0.091	22		0.59		17	30.5	3.3	11.9
14	1.26	0.57	27	40	0.94	22	14.2	26	2.73	9.7
15	2.13	0.11	17	40	0.93	15	12.6	22.3	2.41	8.6
16	0.58	0.5	110	20	0.58	16	11	18.9	2.08	7.21
17	1.39	0.68	15	40	1.08		10.7	18.2	2.1	7.43
18	1.84	0.19	37	10	1.14	13	8.49	16	1.75	6.6
19	1.48		4	40	0.55	20	10.2	20	2.3	8.9
20	6.45	0.13	42		1.66	73	13.8	25.6	2.79	10.4
21	2.66		10		0.37	25	11.3	21.4	2.41	9.1
22	2.39		17	90	0.6	11	8.36	17.2	2.22	9
23	1.14	0.87	47	40	1.48	24	12.4	24.4	2.78	11
24	1.8	0.045	10	40	0.77	3	11.4	20	2.24	7.96
25	1.42	0.095	14	70	0.72	22	7.22	14.9	1.7	6.9
26	1.11	0.21	12		0.35	15	5.07	9.7	1.01	3.7
27	1.75	0.55	34		0.24	34	9.15	16.8	1.8	6.66
28	1.6	0.16	18		0.56	24	15.1	27.5	2.98	10.8
29	4.69	0.1	24		0.92	38	11.3	18.9	2.02	7.01
30	6.18	0.046	20	30	1.07	62	10.2	18.5	2.07	7.4
31	8.76	0.19	140	70	0.46	71	13.1	23.7	2.5	9.2
32	8.56	0.26			0.74	88	13.3	25	2.75	10.2
33	4.82	0.3	29	100	1.84	53	17.3	29.9	3.1	11.1

Estación	Br (µg/g)	Ta (µg/g)	Zr (µg/g)	Ni (µg/g)	Se (µg/g)	Zn (µg/g)	La (µg/g)	Ce (µg/g)	Pr (µg/g)	Nd (µg/g)
34	15.5		41		0.93		9.33		1.8	6.65
35	5.93		62	70	1.34	72	12.5		2.41	9
36	1.17	0.04	11		0.33		4.92		0.82	2.95
37	6.98	0.57	71	10	0.4	62	11.6		2.3	8.3
38	0.18		13	70	0.32	35	13.8		2.96	11.2
39	0.96	0.84	76	50	0.52	53	9.98		2.12	7.82
40	0.63	0.55	8	90	1.71	7	19.3		3.22	11.1
41	0.83		87	220	0.97	67	6.63		1.55	5.68
42	1.23		17	10	0.79	73	13.1		2.26	7.75
43	0.17		27		2.04	20	11.3		2.22	7.7
44	0.13		26		0.25	17	18.9		3	10.1
45	0.32	0.087	11		0.28	33	11.1		2.2	7.7
46	0.2		44		0.61	20	1.1		0.39	1.98
47	0.8	0.45	165	40		60	12.9		2.27	7.98
48	1.91	0.51	67	60	0.87	40	10		1.8	6.2
49	1.03	0.3	175	20	2.94	40	11.6		1.97	6.9
50	0.11	0.25	16	10	0.74	20	14.4		2.47	8.6
51	0.16	0.22	120	30	1.35	30	16.8		2.71	9
52	0.28		120		0.36	10	6.02		0.99	3.33
53	0.26		54		0.31	20	9.3		2.02	7.54
54	0.14	0.22	115	20	1.31	10	9.89		1.8	6.6
55	0.37	0.049	175	50	0.86	30	21.1		3.7	13.2
56	0.33		430	40	1.18	20	14.7		2.25	7.4
57	0.043	0.25	320	50	1.24	5	10.5		1.98	6.99
58	0.32	0.2	33		1.15	20	11		2	7
59	0.063	0.028	275	60	0.77		10.4		1.98	7
60	0.22	0.042	40	40	0.63	30	8.97		1.42	4.53
61	0.2	0.15	110	30	0.67	20	14.3		2.5	8.97
62	0.12	0.35	120	20	0.32	50	21.6		3.75	13.2
63	0.32		34		2.79	10	14.8		2.53	9
64	0.078		33		1.03	30	19.4		3.71	13.9
65	0.1	0.45	170	50	3.07	20	18.7		2.91	9.7
66	0.38	0.98	56	30	1.43	10	12.6		4.25	20.8

Anexo I. Datos de concentración de los componentes mayores y elementos traza por estación en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

Estación	Br ($\mu\text{g/g}$)	Ta ($\mu\text{g/g}$)	Zr ($\mu\text{g/g}$)	Ni ($\mu\text{g/g}$)	Se ($\mu\text{g/g}$)	Zn ($\mu\text{g/g}$)	La ($\mu\text{g/g}$)	Ce ($\mu\text{g/g}$)	Pr ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)
67	0.16	0.36	155	40	2.44	30	33.5	60	6.3	22.8
68	1.01	0.26	120	20	0.55		12.9	27.3	3.35	14.2
69	0.42	0.059	79		0.7	20	31	50.1	4.7	14.6
70	0.52	0.43	48	60	1.01	30	14.8	28.8	3.2	12.3
71	0.37	0.74	195		1.09	20	11.1	22	2.52	10.1
72	1.21		140	20	0.48	10	8.45	14.4	1.43	4.7
73	0.42	0.87	195	20	1.96	20	38.2	62	6.6	23.3
74	0.15	0.52	86	20	1.57	10	18.7	33	3.4	11.9
75	0.54	0.43	220	90	0.49	30	16.5	30.4	3.3	11.9
76	0.38	0.5	26	50	0.68	20	16.3	30.5	3.22	11.7
77	1.01	0.69	215		0.78	50	19.8	35	3.8	14
78	2.51	0.82	325	70	0.47	10	12	22.8	2.6	10.1
79	0.5		15	60	1.1	30	53.3	90.1	8.1	27.2
80	3.93	0.87	64	60	3.13	90	16.9	30	3.1	11.1
81	4.22	0.54	62		6.42	80	15.1	29.5	3.31	12.9
82	2.93	0.28	160		1.22	100	22.4	38.8	4.1	15
83	2.71	0.78		30	8.16	70	15.7	28.2	3	11
84	2.91	0.3		10	1.75	130	22	37	3.72	13.8
85	1.22	0.66	150		1.59	10	12.5	23	2.6	10
86	1.27	0.37	125	20	0.51	30	13.6	25.3	2.78	10.3
87	1.67	0.94	82	110	1.25	40	16.8	33	3.8	15.1
88	0.65		83	20	0.42	10	9.2	16.8	1.8	6.6
89	0.69	0.87	30	110	0.35	10	18.4	34.9	3.9	14.9
90	0.24	0.33	49	80	3.63	30	17.8	33.3	3.78	14.8
91	0.5	0.35	100		1.27	90	8.99	18.5	2.27	9.5
92	0.019	0.4	94	10	0.095	10	6.07	13.1	1.64	7.02
93	0.57	0.14	79		1.13	50	15.9	29	3.1	11.5
94	0.45	0.32	87	10	1.83	30	12.4	20.8	2.18	7.35

Anexo I. Datos de concentración de los componentes mayores y elementos traza por estación en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

Estación	Sm (µg/g)	Eu (µg/g)	Gd (µg/g)	Tb (µg/g)	Dy (µg/g)	Ho (µg/g)	Er (µg/g)	Tm (µg/g)	Yb (µg/g)	Lu (µg/g)
1	1.19	0.44	1.33	0.19	1.09	0.22	0.59	0.08	0.42	0.063
2	3.4	1	4.2	0.63	3.7	0.79	2.21	0.33	1.73	0.28
3	2.87	1.18	3.4	0.5	2.76	0.58	1.52	0.22	1.19	0.18
4	6.62	1.35	6.8	1	5.8	1.26	3.5	0.49	2.64	0.42
5	1.45	1.27	1.34	0.16	0.76	0.14	0.28	0.035	0.15	0.02
6	1.36	0.39	1.9	0.31	1.86	0.43	1.25	0.19	1.11	0.18
7	6.08	1.5	6	0.89	5.2	1.19	3.31	0.48	2.7	0.44
8	4.1	1.03	5.3	0.8	4.7	1.3	2.77	0.42	2.08	0.36
9	4.29	1.33	5.5	0.83	4.82	1.09	2.92	0.44	2.27	0.39
10	3.29	0.74	4.3	0.63	3.7	0.77	2.08	0.29	1.57	0.25
11	1.79	0.63	2.4	0.36	2.09	0.45	1.24	0.19	0.98	0.16
12	2.49	0.9	3.4	0.52	3	0.68	1.87	0.28	1.58	0.27
13	2.93	0.66	3.7	0.57	3.32	0.73	2.09	0.32	1.73	0.29
14	2.33	0.74	2.73	0.39	2.2	0.44	1.17	0.16	0.82	0.13
15	2.14	0.62	2.6	0.39	2.38	0.51	1.43	0.22	1.18	0.19
16	1.76	0.6	2.2	0.34	1.98	0.44	1.24	0.19	1.02	0.17
17	1.83	0.77	2.2	0.32	1.8	0.39	1.02	0.15	0.77	0.12
18	1.62	0.5	1.9	0.27	1.5	0.32	0.81	0.12	0.59	0.09
19	2.36	0.68	2.74	0.4	2.25	0.47	1.25	0.18	0.91	0.14
20	2.53	0.73	3.2	0.48	2.71	0.57	1.51	0.22	1.16	0.18
21	2.31	0.69	2.8	0.41	2.29	0.48	1.28	0.18	0.92	0.14
22	2.48	0.64	2.82	0.4	2.21	0.43	1.1	0.15	0.72	0.11
23	2.89	0.77	3.5	0.52	2.82	0.62	1.65	0.24	1.27	0.2
24	2.02	0.65	2.6	0.39	2.3	0.5	1.41	0.22	1.18	0.19
25	1.85	0.87	2.5	0.38	2.29	0.5	1.41	0.22	1.18	0.19
26	0.89	0.3	1.06	0.16	0.94	0.21	0.57	0.083	0.45	0.072
27	1.56	0.37	2	0.31	1.83	0.41	1.15	0.17	0.94	0.16
28	2.6	1.09	3.5	0.54	3	0.67	1.84	0.27	1.45	0.24
29	1.68	0.45	2.3	0.35	2.13	0.47	1.33	0.2	1.13	0.18
30	1.85	0.41	2.48	0.37	2.17	0.46	1.28	0.19	1	0.17
31	2.25	0.57	2.74	0.42	2.5	0.53	1.48	0.22	1.19	0.19
32	2.51	0.6	3.13	0.47	2.71	0.57	1.52	0.22	1.16	0.18
33	2.72	0.77	3.4	0.51	2.8	0.61	1.68	0.25	1.3	0.21

Estación	Sm (µg/g)	Eu (µg/g)	Gd (µg/g)	Tb (µg/g)	Dy (µg/g)	Ho (µg/g)	Er (µg/g)	Tm (µg/g)	Yb (µg/g)	Lu (µg/g)
34	1.59	0.35	2	0.3	1.7	0.38	1	0.15	0.78	0.13
35	2.25	0.64	2.8	0.44	2.57	0.55	1.5	0.22	1.18	0.19
36	0.65	0.1	0.8	0.12	0.7	0.15	0.41	0.059	0.32	0.052
37	2.11	0.68	2.2	0.32	1.78	0.38	1.01	0.15	0.75	0.12
38	2.84	0.74	3.7	0.58	3.46	0.77	2.22	0.34	1.8	0.35
39	2.03	0.47	2.6	0.38	2.22	0.47	1.29	0.19	0.98	0.19
40	2.55	0.88	3.35	0.55	3.4	0.79	2.4	0.39	2.2	0.41
41	1.43	0.22	1.8	0.27	1.59	0.35	0.93	0.14	0.73	0.12
42	1.84	0.6	1.9	0.27	1.51	0.32	0.81	0.12	0.58	0.089
43	1.92	0.61	2.2	0.33	1.88	0.41	1.12	0.16	0.88	0.14
44	2.34	1.06	2.96	0.47	2.75	0.61	1.72	0.26	1.44	0.24
45	1.94	0.29	2.7	0.41	2.5	0.54	1.51	0.23	1.26	0.21
46	0.63	0.44	0.97	0.16	0.96	0.22	0.65	0.1	0.59	0.099
47	1.97	0.65	2.7	0.43	2.72	0.63	1.86	0.3	1.73	0.31
48	1.37	0.64	2.1	0.36	2.4	0.58	1.79	0.29	1.74	0.33
49	1.53	1.2	1.98	0.31	1.82	0.42	1.15	0.18	0.96	0.16
50	2.03	0.84	2.4	0.36	2.2	0.48	1.38	0.21	1.16	0.19
51	2.08	0.69	2.73	0.43	2.62	0.59	1.68	0.26	1.41	0.24
52	0.71	0.25	0.92	0.14	0.85	0.19	0.55	0.082	0.46	0.077
53	2	0.58	2	0.29	1.72	0.34	0.87	0.12	0.62	0.094
54	1.53	0.54	1.9	0.28	1.76	0.36	0.98	0.15	0.78	0.13
55	3.07	0.83	3.45	0.47	2.5	0.48	1.2	0.16	0.77	0.11
56	1.67	0.74	2.25	0.35	2.22	0.49	1.41	0.22	1.26	0.22
57	1.67	0.41	2.1	0.32	1.9	0.43	1.18	0.18	0.96	0.16
58	1.63	0.13	1.98	0.29	1.7	0.37	0.98	0.14	0.74	0.12
59	1.6	0.86	2.23	0.35	2.1	0.46	1.32	0.2	1.13	0.18
60	0.97	0.66	1.3	0.19	1.16	0.26	0.71	0.11	0.59	0.096
61	2.18	1.06	2.72	0.41	2.48	0.53	1.49	0.22	1.23	0.2
62	3.07	1.08	3.8	0.57	3.22	0.7	1.97	0.29	1.59	0.26
63	2.14	1.19	2.97	0.5	3	0.71	2.11	0.35	1.88	0.36
64	3.29	1.13	4.5	0.72	4.7	1.12	3.3	0.52	3.1	0.54
65	2.19	1.08	2.74	0.41	2.42	0.51	1.4	0.21	1.13	0.18
66	6.61	1.42	5.4	0.74	4.1	0.81	2.07	0.28	1.36	0.2

Estación	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Eu ($\mu\text{g/g}$)	Gd ($\mu\text{g/g}$)	Tb ($\mu\text{g/g}$)	Dy ($\mu\text{g/g}$)	Ho ($\mu\text{g/g}$)	Er ($\mu\text{g/g}$)	Tm ($\mu\text{g/g}$)	Yb ($\mu\text{g/g}$)	Lu ($\mu\text{g/g}$)
67	5.47	1.43	5.9	0.87	4.97	1.11	2.95	0.44	2.22	0.37
68	3.9	0.94	4.62	0.64	3.5	0.7	1.8	0.24	1.22	0.18
69	3.02	1.13	3.65	0.52	2.77	0.57	1.46	0.2	1.01	0.16
70	3.13	1.04	4.3	0.63	3.72	0.79	2.21	0.33	1.71	0.28
71	2.73	0.64	3.6	0.53	2.9	0.62	1.62	0.23	1.23	0.19
72	1.03	0.51	1.32	0.2	1.19	0.27	0.73	0.11	0.6	0.098
73	5.42	1.52	5.9	0.84	4.7	1.02	2.65	0.38	1.8	0.3
74	2.82	1.34	3.15	0.43	2.4	0.47	1.22	0.17	0.83	0.13
75	2.97	1.26	3.7	0.55	3.1	0.67	1.85	0.27	1.45	0.24
76	2.88	1.22	3.23	0.45	2.5	0.48	1.23	0.17	0.82	0.13
77	3.37	1.05	3.9	0.57	3.13	0.67	1.82	0.26	1.37	0.22
78	2.62	1.01	3.5	0.55	3.32	0.76	2.24	0.36	1.9	0.35
79	5.74	1.33	5.9	0.85	4.8	1.15	2.25	0.4	1.91	0.32
80	2.68	0.87	3.1	0.46	2.62	0.53	1.4	0.2	1.05	0.17
81	3.29	0.88	4	0.61	3.6	0.8	2.28	0.35	1.85	0.33
82	3.74	1.15	4.6	0.67	4.02	0.86	2.37	0.36	1.78	0.31
83	2.64	0.87	3.4	0.5	2.77	0.6	1.68	0.23	1.22	0.19
84	3.16	1.18	3.7	0.52	2.8	0.59	1.5	0.21	1.08	0.17
85	2.51	1.06	3.31	0.49	2.75	0.59	1.57	0.23	1.21	0.19
86	2.54	0.89	3.3	0.47	2.7	0.54	1.42	0.2	1.05	0.17
87	4.04	1.13	4.7	0.67	3.9	0.8	2.17	0.3	1.6	0.25
88	1.57	0.87	2.1	0.33	1.96	0.44	1.28	0.19	1.09	0.18
89	3.83	1.03	4.5	0.65	3.72	0.77	2.02	0.29	1.49	0.23
90	3.8	1.27	4.2	0.61	3.4	0.7	1.84	0.26	1.37	0.21
91	2.25	0.62	2.9	0.46	2.73	0.61	1.72	0.26	1.44	0.24
92	2.05	0.94	2.6	0.41	2.62	0.6	1.79	0.28	1.61	0.28
93	2.81	1	3.9	0.58	3.3	0.72	1.98	0.29	1.6	0.26
94	1.75	0.63	2.2	0.32	1.8	0.39	1.03	0.15	0.79	0.13

Sedimentos superficiales del Estero Zacatecas

Estación	Longitudud	Latitud	Fe (%)	Ca (%)	K (%)	C. orgánico (%)	Carbonatos (%)	Rb (µg/g)	Cs (µg/g)	Sr (µg/g)	Ba (µg/g)
1	-110.4301	24.1703	1.35	2.82		0.23	6.52	49.7	3.36	260	495
2	-110.43	24.1707	1.46	2.57		0.19	8.33	58.7	1.88	310	310
3	-110.43	24.1705	1.47	4.21		0.57	29.41	52.6	1.84	855	250
4	-110.43	24.171	1.19	3.34		0.18	8.43	52.1	3.02	455	530
5	-110.4322	24.1706	0.72	2.01		1.09	7.87	53.7	3.08	335	450
6	-110.4333	24.171	1.47	4.08	0.99	1.29	20.78	47.6	3.42	350	385
7	-110.4329	24.1714	2.19	5.06	3.43	0.66	31.37	35.7	2.73	465	305
8	-110.4339	24.1707	2.03	4.11		1.24	38.34	15.8	2.13	110	355

Sedimento continental adyacente a la Laguna de La Paz

Estación	Longitudud	Latitud	Fe (%)	Ca (%)	K (%)	C. orgánico (%)	Carbonatos (%)	Rb (µg/g)	Cs (µg/g)	Sr (µg/g)	Ba (µg/g)
1	-110.4396	24.1792	4.82	5.46	1.43	3.38	5.86	40.5	2.11	195	285
2	-110.443	24.1779	2.82	5.34	4.54	2.70	4.40	48.7	2.3	385	500
3	-110.4321	24.162	2.02	4.4		1.23	3.47	49.7	3	510	640
4	-110.4318	24.1598	2.41	2.78	1.56	1.18	1.77	71.3	3.52	60	605
5	-110.4315	24.1496	1.2	1.83		3.27	1.77	42.6	2.6	210	345
6	-110.4308	24.1449	1.11	3.05	3.53	2.78	0.35	25.3	3.05	190	660
7	-110.4299	24.1414	1.45	4.77	1.91	3.03	4.76	57.4	2.7	290	560
8	-110.4248	24.1212	3.23	1.67	3.73	2.03	0.67	58.8	3.09	560	1020
9	-110.4237	24.1172	1.09	1.27	1.77	0.90	3.70	47	5.82	205	560
10	-110.4212	24.1133	1.29	2.07	0.98		1.77	70.3	4.47	100	740
11	-110.4187	24.1073	1.41	1.87	2.88	0.07	1.36	38.6	4.34	290	310
12	-110.4024	24.0963	1.86	3.65	2.25	1.53	9.39	84.7	12.9	300	925
13	-110.396	24.0972	2.41	4.16		1.38	4.84	57.1	5.58	575	415
14	-110.3622	24.1095	2.87	2.6	1.45	1.69	9.48	41.3	4.98	340	245
15	-110.3518	24.1131	3.93	3.29		0.84	9.23	37.3	4.17	450	790
16	-110.343	24.121	0.45	1.97		0.41	1.86	31.6	1.94	500	460

Sedimentos superficiales del Estero Zacatecas

Estación	Cr (µg/g)	Co (µg/g)	As (µg/g)	Sb (µg/g)	Sc (µg/g)	Hf (µg/g)	Th (µg/g)	U (µg/g)	Br (µg/g)	Ta (µg/g)	Zr (µg/g)
1	18.8	4.04	21.3	1.41	7.2	3.45	4.12	3.04	1.55	0.56	56
2	29.1	5.71	18.2	0.52	9.12	1.56	2.72	1.33	1.52	0.52	15
3	40.7	4.49	17.3	0.88	9.48	1.81	4.5	2.7	0.97	0.43	32
4	23	9.11	18.7	0.88	5.76	2.01	3.95	0.9	0.88	0.46	39
5	16.3	1.95	12.7	0.29	3.78	2.23	2.54	1.1	2.03	0.59	41
6	46.3	4.39	24	0.28	8.3	5.1	8.8	3.49	2.87	0.33	41
7	65.6	8.16	22	0.84	13.9	4.47	3.99	3.74	2.9	0.33	185
8	68.8	9.01	13.8	0.57	11.4	3.44	3.11	1.49	2.67	0.14	56

Sedimento continental adyacente a la Laguna de La Paz

Estación	Cr (µg/g)	Co (µg/g)	As (µg/g)	Sb (µg/g)	Sc (µg/g)	Hf (µg/g)	Th (µg/g)	U (µg/g)	Br (µg/g)	Ta (µg/g)	Zr (µg/g)
1	165	185	26.4	0.86	23	3.38	3.5	15.6	0.027	1.06	255
2	60.8	8.26	25.3	1.68	9.98	6.52	3.74	4.68	0.25	0.13	105
3	27.7	5.3	11.6	2.31	9.03	2.86	5.37	9.04	0.12	0.17	380
4	28.7	5.57	28.4	2.11	8.02	3.12	4.65	6.61	0.056	0.78	130
5	27	3.81	7.08	0.34	4.78	2.09	3.78	1.03	0.21	0.4	38
6	32.1	2.49	3.72	1.68	3.73	2.99	3.11	8.1	0.038	0.39	210
7	29.4	3.4	19.6	0.76	5.67	2.51	3.35	10.6	0.1	1.05	11
8	18	3.53	17.4	2.03	5.19	4.64	4.9	3.19	0.013	0.56	61
9	5.32	3.12	2.65	5.82	3.83	2.7	3.77	3.58	0.009	0.64	250
10	6.07	1.7	4.92	3.96	3.23	2.43	3.39	1.13	0.008	0.64	71
11	3.13	3.7	27.4	1.66	2.79	1.5	3.09	4.1	0.017	0.38	110
12	27.1	5.65	2.11	1.62	6.29	3.28	4.19	5.12	0.26	0.14	235
13	18.7	7.5	5.42	0.32	9.45	4.55	3.02	5.15	0.027	0.26	130
14	18.2	10.5	2.35	0.33	11.2	2.98	3.26	4.43	0.84	0.14	68
15	40.6	15.7	14.4	0.53	15	3.09	4.35	0.58	0.051	0.14	120
16	6.35	1.77	1.7	0.87	1.62	1.97	1.74	1.01	0.029	0.14	120

Sedimentos superficiales del Estero Zacatecas

Estación	Ni ($\mu\text{g/g}$)	Se ($\mu\text{g/g}$)	Zn ($\mu\text{g/g}$)	Hg ($\mu\text{g/g}$)	La ($\mu\text{g/g}$)	Ce ($\mu\text{g/g}$)	Pr ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Eu ($\mu\text{g/g}$)	Gd ($\mu\text{g/g}$)
1		0.96			24.1	40	4.02	14.1	3.21	1.04	4.3
2		0.56	33		18.8	35	3.8	14.1	3.44	1.15	4.2
3	280	1.86	35	0.01	19.6	34.4	3.5	12.2	2.97	0.88	3.8
4	40	1.21	16	0.01	20.2	35	3.7	13	3.1	0.89	3.7
5	110	0.55	20	0.03	11.6	20	2.2	7.55	1.86	0.66	2
6	70	0.99	39	0.03	24.4	42	4.7	17.9	4.16	0.94	4.9
7		3.09	42	0.03	26.1	47.7	5.22	19.9	4.84	1.27	5.8
8		1.11	30	0.03	18.1	33	3.55	13	3.18	1.1	4

Sedimento continental adyacente a la Laguna de La Paz

Estación	Ni ($\mu\text{g/g}$)	Se ($\mu\text{g/g}$)	Zn ($\mu\text{g/g}$)	Hg ($\mu\text{g/g}$)	La ($\mu\text{g/g}$)	Ce ($\mu\text{g/g}$)	Pr ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Eu ($\mu\text{g/g}$)	Gd ($\mu\text{g/g}$)
1	50	0.75	90		26.7	49.2	5.4	20.2	4.96	1.37	5.8
2	20	0.27			13.1	27.7	3.35	14.1	3.89	1.12	5.5
3	60	0.49	30	0.01	23.9	40	4.3	15.2	3.72	1.48	5.4
4	50	2.13	40		25.1	48	5.22	20.3	3.71	1.31	5.3
5	50	0.43	10		25.2	44.5	4.5	16.3	2.51	0.71	3.52
6	20	2.65	20		16.5	31.2	3.42	12.5	2.29	0.3	2.91
7	20	2.38	20		20.9	39.1	4.3	16.6	3	0.85	4
8	90	2.27	60		24.1	45.1	5	19.2	3.56	1.26	4.7
9		0.77	20	0.01	15.1	27.7	2.9	10.4	1.87	0.67	2.5
10	10	0.34	40	0.01	16.9	29.1	2.8	9.7	1.56	0.81	2.1
11	80	0.55	20		15.3	28	2.99	10.9	1.96	0.8	2.4
12	50	0.35	20	0.03	15.7	30	3.3	12.6	2.4	0.86	3.2
13	10	1.1	30	0.02	17	30.9	3.38	12.5	2.31	0.96	3.3
14		0.65	50	0.01	8.45	18	2.24	9.5	2.26	0.74	3
15	70	2.95	110	0.03	18.1	35.2	3.91	15.9	3	1.13	3.7
16		1.87	20	0.01	2.06	4.7	0.65	3.1	0.85	0.61	1.27

Anexo II. Concentraciones de los componente mayores y elementos traza en los sedimentos del Estero Zacatecas y continentales adyacentes a la Laguna de La Paz.

Sedimentos superficiales del Estero Zacatecas

Estación	Tb ($\mu\text{g/g}$)	Dy ($\mu\text{g/g}$)	Ho ($\mu\text{g/g}$)	Er ($\mu\text{g/g}$)	Tm ($\mu\text{g/g}$)	Yb ($\mu\text{g/g}$)	Lu ($\mu\text{g/g}$)
1	0.64	3.9	0.83	2.37	0.35	1.78	0.31
2	0.61	3.4	0.7	1.86	0.27	1.34	0.22
3	0.58	3.32	0.72	2	0.29	1.6	0.26
4	0.54	2.9	0.62	1.65	0.23	1.23	0.19
5	0.3	1.7	0.37	0.96	0.14	0.71	0.11
6	0.73	4.45	0.97	2.64	0.39	1.93	0.34
7	0.89	5.21	1.19	3.32	0.49	2.73	0.45
8	0.59	3.45	0.74	2.02	0.3	1.66	0.27

Sedimento continental adyacente a la Laguna de La Paz

Estación	Tb ($\mu\text{g/g}$)	Dy ($\mu\text{g/g}$)	Ho ($\mu\text{g/g}$)	Er ($\mu\text{g/g}$)	Tm ($\mu\text{g/g}$)	Yb ($\mu\text{g/g}$)	Lu ($\mu\text{g/g}$)
1	0.88	5.1	1.17	3.22	0.47	2.59	0.43
2	0.9	5.8	1.38	4.2	0.64	4	0.66
3	0.87	5.35	1.28	3.8	0.58	3.38	0.57
4	0.86	5.3	1.3	3.8	0.57	3.38	0.57
5	0.57	3.4	0.77	2.27	0.35	1.87	0.34
6	0.47	2.85	0.66	1.91	0.3	1.72	0.29
7	0.59	3.35	0.73	2	0.29	1.62	0.27
8	0.77	4.8	1.17	3.5	0.54	3.23	0.55
9	0.38	2.37	0.52	1.5	0.23	1.27	0.22
10	0.34	2.12	0.47	1.39	0.22	1.21	0.21
11	0.37	2.2	0.47	1.23	0.2	1.1	0.18
12	0.52	3.1	0.7	2.04	0.33	1.75	0.31
13	0.52	3.1	0.7	2	0.31	1.72	0.29
14	0.5	2.91	0.66	1.9	0.29	1.69	0.28
15	0.52	2.76	0.57	1.47	0.2	1.03	0.16
16	0.2	1.28	0.3	0.86	0.13	0.79	0.14

Anexo III. Matriz de correlación de las concentraciones de elementos mayores y traza en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz

Elemento	Carbn	Rb	Hg	Cs	Ca	Sr	Ba	Cr	Fe	Co	As	Sb	Sc	Hf	Th	U
C.org	0.13	0.06	0.42	0.54	0	0.12	-0.39	0.69	0.62	0.62	-0.32	0.17	0.66	-0.1	0.06	-0.05
Carbn.	1	-0.57	-0.34	-0.24	0.83	0.71	-0.28	0.06	-0.16	-0.16	-0.05	0.12	-0.11	-0.06	-0.2	0.2
Rb		1	0.47	0.61	-0.54	-0.6	-0.02	0.31	0.55	0.38	-0.02	0.36	0.49	0.06	0.7	-0.2
Hg			1	0.69	-0.31	-0.12	-0.38	0.46	0.49	0.58	0	0.36	0.59	0.1	0.4	-0.02
Cs				1	-0.29	-0.17	-0.35	0.77	0.83	0.74	-0.07	0.48	0.85	-0.1	0.5	0
Ca					1	0.89	-0.19	0.05	-0.25	-0.25	-0.01	-0.07	-0.02	0.2	-0.3	0.1
Sr						1	-0.22	0.12	-0.24	-0.17	-0.17	-0.08	-0.14	0.2	-0.3	0.1
Ba							1	-0.24	-0.3	-0.3	0.02	-0.41	-0.34	0.2	0.1	0.09
Cr								1	0.76	0.67	0.03	0.29	0.81	-0.02	0.4	0.04
Fe									1	0.89	-0.17	0.27	0.96	-0.3	0.6	0.04
Co										1	-0.2	0.23	0.93	-0.2	0.4	-0.04
As											1	0.19	-0.15	0.01	0.01	0.06
Sb												1	0.3	0.1	0.3	0.3
Sc													1	-0.2	0.5	-0.03
Hf														1	0.03	-0.2
Th															1	0.2
U																1

Anexo III (continuación). Matriz de correlación de las concentraciones de elementos mayores y traza de los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz.

Elemento	Br	Ta	Zr	Ni	Se	Zn	La	Ce	Pr	Nd
C.org	0.6	0.07	-0.2	0.3	0.2	0.4	-0.15	-0.1	-0.1	-0.1
Carbn	-0.1	-0.35	0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.31	-0.3	-0.4	-0.4
Rb	0.4	0.2	0.1	-0.3	0.01	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3
Hg	0.4	0.4	-0.3	0.2	0.2	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cs	0.7	0.3	-0.3	0.2	-0.04	0.5	0	0.03	0.1	0.1
Ca	-0.02	0.2	-0.1	0.5	-0.1	0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
Sr	0.03	0.5	-0.3	0.7	-0.2	0.05	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
Ba	-0.5	-0.1	0.3	-0.02	-0.03	-0.65	0.1	0.1	0.1	0.1
Cr	0.6	0.3	-0.1	0.4	-0.06	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3
Fe	0.6	0.2	-0.07	0.1	0.05	0.6	0.1	0.1	0.1	0.2
Co	0.6	0.2	-0.3	0.2	0.1	0.5	-0.1	-0.1	-0.03	0.01
As	-0.04	0.2	0.4	0.02	0.05	-0.1	0.4	0.4	0.4	0.5
Sb	0.2	0.4	-0.2	-0.02	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	-0.01	0.05
Sc	0.7	0.3	-0.2	0.2	0.05	0.6	0.04	0.1	0.1	0.2
Hf	-0.2	0.2	-0.1	0.1	-0.2	-0.4	0.04	0.1	0.1	0.1
Th	0.2	0.4	0.3	0.1	0	0.2	0.6	0.6	0.6	0.6
U	-0.3	0.2	0.3	0.2	0.1	-0.2	0.01	-0.03	-0.05	-0.1
Br	1	-0.1	-0.3	0.2	-0.2	0.7	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1
Ta		1	0.03	0.2	-0.04	0.06	0.2	0.2	0.3	0.3
Zr			1	-0.2	0.2	-0.1	0.4	0.3	0.3	0.3
Ni				1	-0.02	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
Se					1	-0.2	0.1	0.1	0	-0.05
Zn						1	-0.1	-0.05	-0.05	-0.06
La							1	1	0.96	0.92
Ce								1	1	0.95
Pr									1	1
Nd										1

Anexo III (continuación). Matriz de correlación de las concentraciones de elementos mayores y traza de los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz

Elemento	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
C.org	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.08	-0.1	-0.03	0	-0.02	0.05
Carbn	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3
Rb	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Hg	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
Cs	0.1	-0.2	0.1	0.2	0.2	-0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
Ca	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.04	-0.1	-0.1	-0.01	-0.02
Sr	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	0.1	-0.01	0.01	0.07	0.1
Ba	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1
Cr	0.3	-0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4
Fe	0.2	0.03	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
Co	0.1	0.01	0.1	0.2	0.2	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3
As	0.5	0.2	0.5	0.5	0.5	0.03	0.4	0.3	0.2	0.2
Sb	0.1	-0.1	0.07	0.05	0.05	0.3	-0.02	-0.04	-0.1	-0.03
Sc	0.2	-0.02	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
Hf	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.3
Th	0.6	0.3	0.6	0.6	0.6	0.1	0.5	0.5	0.4	0.4
U	-0.1	-0.2	-0.1	-0.03	0.05	-0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
Br	-0.02	-0.3	-0.1	-0.07	-0.1	0.4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
Ta	0.3	0.1	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4
Zr	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.02	0
Ni	0.1	-0.1	0.2	0.3	0.3	-0.1	0.4	0.4	0.4	0.4
Se	-0.1	0.4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.05	-0.02	-0.1	-0.01
Zn	-0.04	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.7	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
La	0.9	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5
Ce	0.9	0.6	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5
Pr	0.96	0.6	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5
Nd	1	0.5	1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5
Sm		0.5	1	0.9	0.9	0.5	0.7	0.6	0.5	0.5
Eu		1	0.5	1	0.5	0.9	0.44	0.4	0.4	0.3
Gd			1	1	0.95	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6
Tb				1	1	1	0.9	0.9	0.8	0.7
Dy					1	1	0.96	0.9	0.9	0.8
Ho							0.95	0.9	0.9	0.8
Er							1	1	1	0.9
Tm								1	1	1
Yb									1	1
Lu										1