



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA SUR  
ÁREA DE CONOCIMIENTO DE CIENCIAS DEL MAR  
DEPARTAMENTO ACADÉMICO BIOLOGÍA MARINA

POSGRADO EN CIENCIAS MARINAS Y COSTERAS  
ORIENTACION EN MANEJO SUSTENTABLE

**TESIS**

VALORACION DE FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COMPOSICIÓN  
GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS MARINOS DEL SISTEMA COSTERO  
GUAYMAS-EMPALME, SONORA

COMO REQUISTO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS MARINAS Y COSTERAS

PRESENTA  
**BAUDILIO ACOSTA VARGAS**

DIRECTORES  
DR. JOBST WURL (UABC)  
DRA. LÍA MÉNDEZ RODRÍGUEZ (CIBNOR)

LA PAZ, Baja California Sur, Agosto de 2015.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA SUR  
Área de Conocimiento de Ciencias del Mar  
Departamento Académico de Biología Marina  
POSGRADO EN CIENCIAS MARINAS Y COSTERAS



SOLICITUD DE LIBERACIÓN DE TESIS

Maestría ( X ) Doctorado ( )

DR. ENRIQUE ALEJANDRO GÓMEZ GALLARDO UNZUETA  
Jefe del Departamento Académico de Biología Marina



Nombre del alumno: Baudilio Acosta Vargas

Fecha: 29 de Julio del 2015

Presenta la tesis terminada, titulada: valoración de factores que influyen en la composición  
Geoquímica de los sedimentos marinos del sistema costero Guaymas-Empalme, Sonora

Contenido de la Tesis<sup>1</sup>:

- I. Portada
- II. Índice
- III. Introducción (identificación y delimitación del problema, antecedentes, justificación)
- IV. Objetivo (s) generales y específico (s)
- V. Hipótesis (cuando así lo amerite)
- VI. Metodología
- VII. Resultados y Discusión
- VIII. Conclusiones
- IX. Literatura Citada

Dr. Jobst Wurl

Vo. Bo. Director de tesis

Baudilio Acosta Vargas

Alumno

<sup>1</sup> De conformidad con lo establecido en el Artículo 66 del Reglamento General de Estudios de Posgrado, que a la letra dice: El formato de la tesis deberá ajustarse a los requisitos expedidos por la Dirección de Servicios Escolares e incluir al menos lo siguiente: portada, índice, introducción (antecedentes, justificación, objetivos, hipótesis), metodología, materiales (cuando así lo amerite), proceso y resultados, conclusiones y literatura citada.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA SUR  
Área de Conocimiento de Ciencias del Mar  
Departamento Académico de Biología Marina  
POSGRADO EN CIENCIAS MARINAS Y COSTERAS



Fecha: 29 de Julio del 2015

**DR. ENRIQUE A. GÓMEZ GALLARDO UNZUETA**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE BIOLOGÍA MARINA**  
**PRESENTE.**

Los abajo firmantes, Miembros del Comité Académico Asesor del trabajo de tesis completamente terminado, titulado:

Presenta la tesis terminada, titulada: valoración de factores que influyen en la composición  
Geoquímica de los sedimentos marinos del sistema costero Guaymas-Empalme, Sonora

que presentó:  
Baudilio Acosta Vargas

Otorgamos nuestro voto **aprobatorio** y consideramos que dicho trabajo está listo para su **defensa**, a fin de obtener el  
**Grado de Maestro** en Ciencias Marinas y Costeras, con Orientación en Manejo Sustentable.

Comité Académico Asesor:

Dr. Jobst Wurl

Nombre del Director

Firma

Dra. Lía Méndez Rodríguez

Nombre del Director (a) Externo

Firma

Dr. Tobias Schwennicke

Nombre del Asesor

Firma

c.c.p Expediente del alumno (CIMACO)



Universidad Autónoma de Baja California Sur • Km. 5.5. Carretera al Sur, La Paz, Baja California Sur • MEXICO • Teléfono: (52) 612 123 88 00, ext. 2020  
• Web: <http://www.uabcs.mx>

## **Dedicatoria**

(†) A mis padres Daniel Acosta y Maurilia Vargas quienes sacrificaron parte de su vida para brindarme su apoyo incondicional espero que un sueño más se haya realizado.

A mi esposa Olivia Arjona López por su paciencia en mis horas de ausencia y ayuda incondicional, en los momentos difíciles para la culminación de este sueño de concluir la maestría.

A Jimena por el gran amor que me otorga y la tolerancia en los momentos de ausencia de mi pequeña princesa quien es el estímulo de mi vida a quienes brindo este trabajo de manera especial como un ejemplo de una continua superación.

## **Agradecimientos**

A la Lía Méndez Rodríguez por proveer los recursos necesarios para la ejecución de este proyecto, por su apoyo como investigador en mi formación académica y por ser una de mis amistades

Antes que nada agradezco a mis maestros del posgrado (CIMACO) y por enseñarme lo que debo y no debo hacer. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por las beca otorgada.

Un agradecimiento en especial a mi comité tutorial por apoyarme y creer en mí. A los doctores Jobst Wurl, Lía Méndez y Tobias Schwennicke por aceptar dirigir esta tesis, ser mis revisores en mi trabajo de tesis y por sus asertivos comentarios, observaciones y por la buena disposición para atenderme.

Agradezco a mis amigos y asesores extraoficiales que colaboraron sin conveniencia alguna en revisar, corregir y/o aportar para desarrollar esta tesis. A Pablo Hernández, Saúl Hernández, Jenny Jaciel Hernández

Al personal de los laboratorios del CIBNOR que apoyaron para realizar los trabajos analíticos y experimentales para la culminación de este trabajo.

A Gustavo Padilla por su asesoría a distancia sobre la bahía de Guaymas y por ayudarme en los cálculos sobre granulometría. A Manuel Trasviña por su tiempo dedicado en las asesorías y por permitir realizar las muestras de granulometría en su súper equipo laser Horiba, por permitir analizar las muestras en su laboratorio. A Joaquín Rivera Rosas por su ayuda incondicional y asesoría en el programa Arcgis y elaboración de mapas. A Griselda Peña por apoyarme en el laboratorio en la logística sobre la preparación de muestras.

En la parte de campo agradezco infinitamente a la Lía Méndez que siempre estuvo apoyando moral e incondicional para los muestreos y colectar de muestras de sedimentos.

**GRACIAS A DIOS POR PONER EN MI CAMINO A LAS PERSONAS Y LOS  
MEDIOS PARA APRENDER A SER FELIZ.**

## RESUMEN

El sistema lagunar de Guaymas-Empalme en Sonora está conformado por la bahía Exterior, el estero El Rancho, la bahía Interior y la laguna de Empalme. Actividades antropogénicas como descargas de aguas tratadas, construcciones en la línea de costa, maricultura, turísticas e industriales, han modificado el aporte y la variabilidad de los sedimentos en el sistema.

Se realizó una caracterización geoquímica de los sedimentos superficiales del complejo lagunar y se evaluó el grado de contaminación por metales, comparando los niveles presentes en el sedimento con el valor de referencia como factor geogénico. Un total de 70 estaciones fueron establecidas tanto en sitios cercanos a efluentes con actividades antropogénicas así como en áreas que aparentemente no presentan problemas de contaminación, el muestreo de los sedimentos superficiales se realizó en julio del 2010.

Con el método Análisis por Activación Neutrónica Instrumental (AANI) se obtuvo las concentraciones de As, Ba, Br, Co, Cr, Cs, Hf, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Th, U y los elementos del grupo de tierras raras La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu en 70 muestras del complejo lagunar de Guaymas-Empalme. Para completar el grupo de los metales estudiados (Al, Cd, Li, Mn, Ni, y Zn), se utilizó el método de espectrometría de absorción atómica.

Se calculó el índice de geo acumulación de Müller para definir contaminación y utilizó el factor de enriquecimiento (FE) como herramienta para reconocer un enriquecimiento con respecto a la corteza terrestre.

De acuerdo a la clasificación del factor de enriquecimiento, los elementos se agruparon en cuatro categorías:

- a) Altamente enriquecidos (Se, Sb y As),
- b) Enriquecidos (U, Br, Zn, Sr, Ba, Ca, Cs, Hf, Dy, Eu, La, Rb, Th, Gd, Ce, Yb y Tb).
- c) Conservativos (Zr, Er, Ho, Sm, Tm, Nd, Pr, Ta, Lu, y Fe).
- d) Diluidos (Co, Cr, Ni y Sc).

La distribución espacial de los metales pesados y trazas en los sedimentos superficiales del complejo lagunar de la bahía de Guaymas se deben básicamente la

descarga municipal de aguas negras sin tratar, a los drenes generados de los residuos un parque industrial y a los drenes de los astilleros. El factor de enriquecimiento del contenido de los elementos en el sistema lagunar permitió identificar a U, Sb y As como altamente enriquecidos en los sedimentos, cuya contribución se relaciona a las rocas ígneas que se caracterizan en la sierra de Santa Úrsula y a las 3 minas abandonadas y una en producción, las cuales se encuentra en la parte este de la sierra de Santa Úrsula y que drenan a la zona costera atreves de la cuenca del río Matape.

La normalización de los elementos de tierras raras permitió identificar tres patrones:

- (i) tipo lutita norteamericana.
- (ii) tipo anomalía negativa de Eu.
- (iii) tipo anomalía positiva de Eu y abundancia de elementos de tierras raras ligeras.

Comparando el sistema lagunar de Guaymas-Empalme con otras áreas y con los niveles de la corteza, se considera al sistema moderadamente contaminado.

Las zonas más susceptibles a la acumulación de elementos fueron la parte central (laguna de Empalme) la zona oeste por donde drena la cuenca del río Matape y la bahía Interior (Puerto) aledaña a la antigua descarga municipal de aguas negras.

Este estudio permite reconocer el estado ambiental del sistema lagunar y sirve para las autoridades como herramienta importante para la toma de decisiones en el manejo del complejo lagunar, por ejemplo con el fin de buscar un mejor lugar para el confinamiento de la remoción de los sedimentos de los dragados de los muelles y del canal de navegación.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Marco teórico.....</b>	<b>16</b>
2.1	Elementos traza.....	18
2.2	Elementos lantánidos.....	20
2.3	Inclusión del Itrio y Escandio .....	20
2.4	Características Físicas y Químicas.....	21
2.5	División de los elementos lantánidos .....	21
2.6	Carácter geoquímico de los elementos lantánidos .....	22
2.7	Tierras raras a nivel mundial.....	23
2.8	Sedimentos.....	24
<b>3</b>	<b>Área de estudio .....</b>	<b>25</b>
3.1	Características del sistema lagunar Guaymas-Empalme. ....	25
3.2	Geomorfología .....	29
3.3	Geología .....	31
3.4	Edafología.....	33
3.5	Hidrología .....	36
3.6	Actividades humanas.....	42
<b>4</b>	<b>Antecedentes.....</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>Justificación .....</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>51</b>
6.1	Objetivo general.....	51
6.2	Objetivos particulares .....	51
<b>7</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>52</b>
7.1	Muestreo de Sedimentos .....	52
7.2	Pre-tratamientos de muestras.....	54
7.3	Análisis Granulométrico .....	54
7.4	Determinación del contenido de materia orgánica oxidable.....	54

7.5 Análisis de metales totales por activación neutrónica.....	55
7.6 Análisis de metales totales por espectrofotometría de absorción atómica.....	56
7.7 Cálculo del Índice de geoacumulación .....	59
7.8 Normalización de los elementos de tierras raras .....	59
7.9 Elaboración de mapas .....	60
<b>8 RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
8.1 Granulometría.....	62
8.2 Porcentajes de materia orgánica, carbón orgánico y carbonatos en sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas.....	67
8.3 Distribución espacial de carbonatos de calcio .....	71
8.4 Distribución espacial de la materia orgánica.....	72
8.5 Concentración en mg kg <sup>-1</sup> de los elementos mayores y elementos traza y lantánidos en los sedimentos de la bahía de Guaymas- Empalme Sonora.....	73
8.6 Factor de enriquecimiento (FE) .....	75
8.8 Normalización elementos de tierras raras (ETR) con lutita norteamericana	102
8.9 Cálculo del Índice de geoacumulación .....	104
<b>9 DISCUSIÓN .....</b>	<b>111</b>
9.1 Granulometría.....	111
9.2 Materia Orgánica .....	112
9.3 Factor de enriquecimiento (FE) .....	113
9.4 Distribución espacial de la concentración del Sr.....	116
9.5 Elementos de tierras raras y su Índice de geoacumulación I <sub>geo</sub> .....	117
9.6 Distribuciones espaciales de rubidio.....	124
9.7 Distribución espacial de lantano .....	124
<b>10 CONCLUSIONES .....</b>	<b>127</b>
<b>11 BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>128</b>
<b>12 ANEXOS .....</b>	<b>139</b>

## **Lista de Figuras**

FIGURA 1. Localización del área de estudio (mapa tomado de Pedrín-Avilés <i>et al.</i> , 2006).....	16
FIGURA 2. Principales usos de tierras raras en EE.UU.....	24
FIGURA 3. Batimetría de la bahía de Guaymas (modificado de Secretaría de Marina, 1980).....	26
FIGURA 4. Geomorfología de la Bahía de Guaymas.....	30
FIGURA 5. Mapa geológico de la bahía de Guaymas (Tomado de INEGI, 1982).....	32
FIGURA 6. Tipos de suelo adyacentes a la bahía de Guaymas (Tomado de INEGI, 1983a).....	35
FIGURA 7. Promedios mensuales de elevación del nivel del mar en la región de Guaymas, Sonora (Tomado de Beier, 1997).....	36
FIGURA 8. Cuenca hidrológica (Modificado de INEGI, 1983b).....	38
FIGURA 9. Mapa geoquímico de la zona norte de Guaymas Sonora (Carta Geoquímica para arsénico H12-11 Sonora octubre 2000).....	40
FIGURA 10. Circulación del agua en la bahía de Guaymas (18.8 cm/s).....	41
FIGURA 11. Circulación del agua en la bahía de Guaymas: (9.7 cm/s).....	42
FIGURA 12. (a) Punta de Lastre y Ardilla; (b) Parque industrial "Rodolfo Sánchez Taboada .....	43
FIGURA 13. Ubicación de astilleros en bahía de Guaymas, Son.....	44
FIGURA 14. Localización de la granja camarónica, ubicada en el estero del Rancho.....	46
FIGURA 15. Ubicación de los sitios y delimitación de las zonas de muestreo de la bahía de Guaymas.....	53
FIGURA 16. Porcentajes de distribución de los sedimentos superficiales del estero del Rancho.....	62
FIGURA 17. Porcentaje de distribución de Sedimentos superficiales de la laguna de Empalme.....	63
FIGURA 18. Porcentajes de distribución de los sedimentos superficiales de la bahía Interior.....	63

FIGURA 19. Porcentajes de distribución de los sedimentos superficiales en la bahía Exterior.....	64
FIGURA 20. Distribución espacial del tamaño de grano en sedimentos del sistema costero Guaymas-Empalme Sonora. ....	66
FIGURA 21. La distribución espacial de carbonatos en los sedimentos en la bahía de Guaymas-Empalme, Sonora.....	71
FIGURA 22. Distribución espacial de materia orgánica en los sedimentos del sistema lagunar de Guaymas Empalme Sonora. ....	72
FIGURA 23. Distribución de los elementos químicos de acuerdo al factor de enriquecimiento de los sedimentos superficiales del estero del Rancho. ....	76
FIGURA 24. Distribución de los elementos químicos de acuerdo al factor de enriquecimiento en los sedimentos superficiales de la laguna de Empalme. ....	77
FIGURA 25. Factor de enriquecimiento de los sedimentos superficiales de la bahía Interior. ....	78
FIGURA 26. Factor de enriquecimiento en los sedimentos superficiales de la bahía Exterior.....	79
FIGURA 27. Distribución espacial de la concentración de Ca en los sedimentos superficiales de sistema lagunar de la bahía de Guaymas. ....	80
FIGURA 28. Distribución espacial de la concentración de Sr en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	81
FIGURA 29. Distribución espacial de la concentración de Rb en sedimentos del sistema lagunar de Guaymas-Empalme. ....	82
FIGURA 30. Distribución espacial de la concentración de Hf en sedimentos superficiales del sistema lagunar de la bahía de Guaymas-Empalme. ....	83
FIGURA 31. Distribución espacial de la concentración de As en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	84
FIGURA 32. Distribución espacial de la concentración de Fe en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	85

FIGURA 33. Distribución espacial de la concentración de Zn en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	86
FIGURA 34. Distribución espacial de la concentración de Ni en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	87
FIGURA 35. Distribución espacial de la concentración de Ba en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	89
FIGURA 36. Distribución espacial de la concentración de Cs en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	90
FIGURA 37. Distribución espacial de la concentración de Sb en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	91
FIGURA 38. Distribución espacial de la concentración de Th en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	92
FIGURA 39. Distribución espacial de la concentración de U en sedimentos del sistema lagunar de Guaymas.....	93
FIGURA 40. Distribución espacial de la concentración de La en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	96
FIGURA 41. Distribución espacial de la concentración de Dy en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	98
FIGURA 42. Distribución espacial de la concentración de Eu en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	99
FIGURA 43. Distribución espacial de la concentración de Gd en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.....	100
FIGURA 44. Comparación de las cuatro zonas de las concentraciones normalizadas de ETR de los sedimentos superficiales del complejo lagunar de la bahía de Guaymas.....	103
FIGURA 45. Índice geoacumulación de los elementos químicos en los sedimentos superficiales en el estero del Rancho.....	106
FIGURA 46. Índice geoacumulación de los elementos químicos en los sedimentos superficiales en la laguna de Empalme.....	107
FIGURA 47. Índice geoacumulación de los elementos químicos en los sedimentos superficiales de la bahía Interior. ....	108

FIGURA 48. Índice de geoacumulación de los elementos químicos en los sedimentos superficiales de la bahía exterior.....109

FIGURA 49.  $I_{geo}$  de los elementos en sedimentos superficiales más comunes en el complejo lagunar de Guaymas.....110

## Lista de Tablas

Tabla 1. Movilidad de elementos químicos en ambientes Supergenos.....	23
Tabla 2. Porcentajes de recuperación de los estándares PACS-1 y 1646 <sup>a</sup> .....	57
Tabla 3. Clasificación de los elementos de acuerdo al factor de enriquecimiento (FE). .....	58
Tabla 4. Caracterización de los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas en base a sus porcentajes de arena, limo y arcilla. ....	65
Tabla 5. Porcentajes de materia orgánica, carbón orgánico y carbonatos en los sedimentos superficiales en la zona del estero del Rancho. ....	67
Tabla 6. Porcentajes de materia orgánica, carbono total y carbonatos en los sedimentos superficiales en la zona de la laguna de Empalme. ....	68
Tabla 7. Porcentajes de materia orgánica, carbono total y carbonatos en los sedimentos superficiales en la bahía Interior. ....	69
Tabla 8. Porcentajes de materia orgánica, carbono total, carbonatos y carbón total en los sedimentos superficiales en la bahía exterior. ....	70
Tabla 9. Medias, desviaciones estándar de los elementos mayores, elementos trazas y lantánidos comparados con la corteza terrestre. ....	74
Tabla 10. Clasificación de los elementos de acuerdo al factor de enriquecimiento promedio en el sedimento de la Bahía de Guaymas-Empalme.....	75
Tabla 11. Concentración de máximos, mínimos y desviación estándar de los sedimentos superficiales de la Bahía de Guaymas-Empalme Sonora. ...	94
Tabla 12. Concentraciones promedio en (mg kg <sup>-1</sup> ) de los lantánidos por zona de estudio en la Bahía de Guaymas-Sonora.....	97
Tabla 13. Valores normalizados de lantánidos de los sedimentos superficiales del sistema lagunar de la bahía de Guaymas-Empalme.....	104
Tabla 14. Índice de geoacumulación (Igeo, Müller, 1979) de los lantánidos en los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas-Empalme Sonora...105	

## **1 INTRODUCCION**

Los elementos mayores y traza son aportados del continente al mar por procesos naturales como resultado del intemperismo de la corteza continental. Los elementos se movilizan tanto en partículas sólidas suspendidas, como en forma disuelta por los ríos, aguas subterráneas, erosión de la costa, fusión de los hielos del Ártico y Antártico y por vía atmosférica (Salomons y Förstner, 1984). La composición química de la materia suspendida particulada (MSP) y de los sedimentos marinos es el resultado de la interacción compleja de los detritos de origen terrígeno y antropogénico con los materiales (disueltos y particulados) de origen biogénico y autogénico marino (Chester, 2003).

El sistema lagunar de Guaymas, conformado por la bahía de exterior, el estero el Rancho, bahía interior y la laguna de Empalme, representa una región con un ambiente semiárido que ha tenido una alta afectación por actividades antropogénicas (descargas de aguas tratadas, construcciones en la línea de costa, maricultura, turísticas e industriales) los cuales han modificado el aporte y la variabilidad de los sedimentos en el sistema (Pedrín-Avilés *et al.*, 2006).

El presente estudio evaluará el grado de contaminación por metales en el sistema costero Guaymas-Empalme, comparando los niveles presentes en el sedimento con el valor de referencia conocido como factor geogénico. El factor geogénico para los sedimentos marinos del sistema costero Guaymas-Empalme, Sonora, (FIGURA 1). Además se analizarán los tipos y la distribución de los sedimentos marinos y su relación con los medios ambientales.

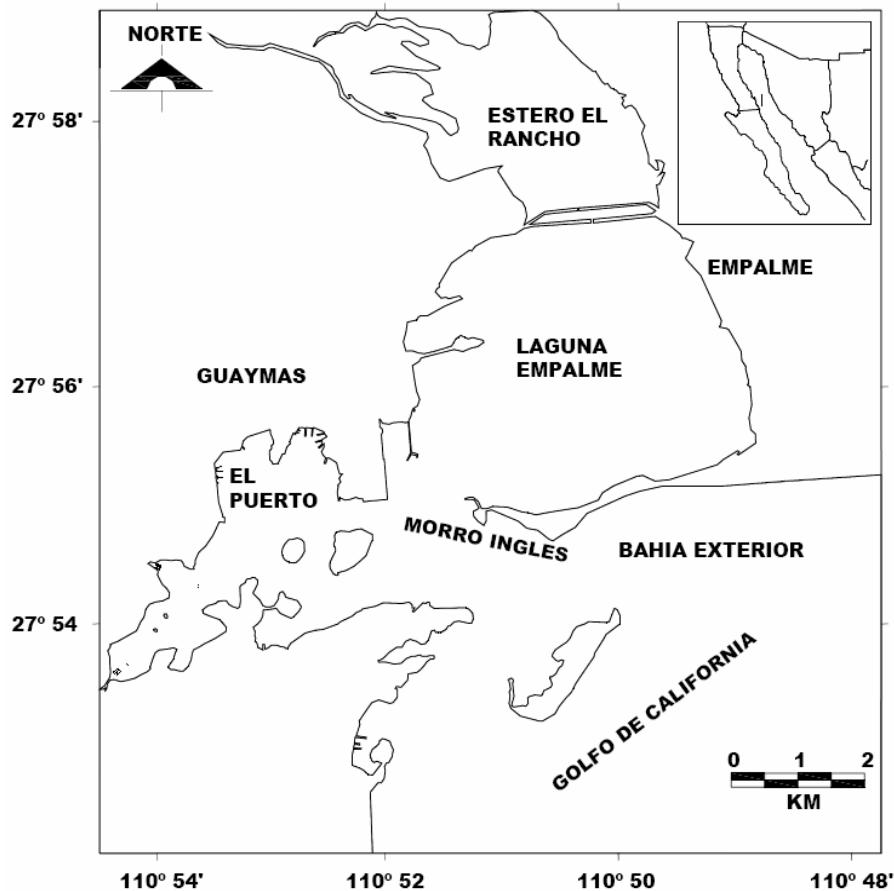


FIGURA 1. Localización del área de estudio (mapa tomado de Pedrín-Avilés *et al.*, 2006).

## 2 Marco teórico

El ambiente marino costero, que incluye lagunas costeras, estuarios, marismas y otros, son ambientes altamente productivos pero susceptibles al aporte de aguas residuales, actividades industriales, portuaria agrícola, y acuícola, principalmente. Entre los desechos que afectan los procesos naturales abarcan los nutrientes en exceso, fertilizantes, metales pesados y clorofenoles (Nebel, 1999).

El estudio de sedimentos da información acerca de las formas químicas de los elementos traza, su concentración y las condiciones fisicoquímicas que prevalecían al momento de ser depositados (Boggs, 2001). En términos de elementos traza, los sedimentos costeros presentan una concentración menor de Mn, Cu, Ni, Co ó Pb, en

los sedimentos profundos, mientras el contenido de Cr, V o Ga es muy similar en ambos casos. De acuerdo con el enriquecimiento relativo de estos elementos, se puede considerar un cierto fraccionamiento entre los sedimentos costeros y profundos (Chester, 2000). Los componentes sedimentarios se pueden clasificar de distintas maneras. Goldberg, (1954), propone considerar las siguientes categorías en función de su origen en la geosfera:

*Litogénicos*: componentes derivados de la erosión continental, de volcanes o de la alteración submarina, que son movilizados y transportados desde los continentes hasta los océanos, mediante descarga fluvial, deposición atmosférica y/o transporte glacial. Cuantitativamente, los minerales de origen terrestre más importantes son los minerales de la arcilla y el cuarzo, junto con pequeñas cantidades de feldespatos. Las fracciones de mayor tamaño se depositan en los sedimentos costeros; las más finas pueden alcanzar áreas de océano abierto.

*Biogénicos*: son los componentes orgánicos e inorgánicos derivados de la biosfera. Los principales componentes inorgánicos son los carbonatos y el ópalo derivado de conchas y esqueletos animales.

*Hidrogénicos*: componentes producidos de forma inorgánica a partir de constituyentes disueltos en el agua marina. Se puede distinguir entre material hidrogénico primario (formado directamente a partir del material disuelto en el agua marina) y secundario (resultado de la alteración submarina de minerales preexistentes) (Chester y Hughes, 1967). Además, se pueden considerar cuatro subcategorías de componentes hidrogénicos de acuerdo con Elderfield (1976):

- i) precipitados volcánicos (resultado de la introducción de elementos en el agua de mar por procesos volcánicos),
- ii) precipitados supergénicos (generados en el agua de mar o agua intersticial),
- iii) litogénicos hamírolisatos (formados por la interacción entre componentes litogénicos y el agua marina)
- iv) hamírolisatos volcánicos (debidos a la reacción entre basaltos y el agua marina).

**Cosmogénicos:** componentes formados en el espacio exterior y que han alcanzado la superficie terrestre a través de la atmósfera. Estos componentes constituyen una parte pequeña de los sedimentos oceánicos.

## 2.1 Elementos traza

Los elementos traza (ET) disueltos en el agua del mar se encuentran típicamente en bajas concentraciones ( $< 1 \text{ mg kg}^{-1}$ ), se integran a la MSP de la columna de agua por diferentes procesos (adsorción y absorción), participan en los ciclos biogeoquímicos marinos y controlan parte de la química del océano. Algunos ET disueltos son utilizados por el fitoplankton como micro-nutrientes como el Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, y el Zn (Dean y Price, 2003). Los ET particulados pueden ser remineralizados o transferidos como parte de los grandes agregados marinos (orgánicos e inorgánicos) denominados “nieve marina” hasta depositarse en los fondos oceánicos. Cerca del fondo los ET interactúan con la interface agua-sedimento y sus formas continúan transformándose dentro de la columna sedimentaria a causa de la diagénesis temprana.

La identificación de los diferentes componentes en los sedimentos y la reactividad de los metales traza, en relación con sus formas fisicoquímicas es el parámetro principal para conocer su biodisponibilidad y movilidad en el sedimentos, siendo que las corrientes fluviales son los principales flujos que transportan los metales de origen antropogénico y natural, desde el continente hacia las aguas costeras (Mason 1960).

Tradicionalmente los elementos químicos se han clasificado en categorías tales como ligeros, pesados, semi-metales o metaloides, tóxicos y oligoelementos, dependiendo de los diversos criterios químicos y físicos tales como la densidad, peso, número atómico y grado de toxicidad. Ciertos metales y metaloides son esenciales para plantas y animales; con respecto a las plantas, los micronutrientes e incluyen al Cu, Fe, Zn, Mn y Mo. Además, el As, Co, Cr, Ni, Se, Sn, y V son esenciales para la nutrición animal (Tolonen, 1995).

Entre los elementos más comúnmente considerados como contaminantes se encuentran los metales pesados, definidos como elementos metálicos y metaloides con densidad mayor a  $5 \text{ mg/cm}^3$ . Estos elementos en cantidades mayores a las normales en los sedimentos, son considerados contaminantes conservativos y

persistentes que en concentraciones elevadas pueden ocasionar efectos adversos sobre el ambiente donde se encuentran (Clark, 2002). Sin embargo, el término abarca elementos que son requeridos por los organismos en bajas concentraciones (Kabata *et al.*, 1995).

Los metales han sido emitidos y distribuidos en ambientes terrestres, acuáticos, y en el aire como material de desperdicio de la manufactura industrial, minera, productos de combustión y pesticidas agrícolas. La industria química inorgánica genera fuentes potenciales de desechos para los ecosistemas acuáticos.

Entre los metales y metaloides considerados de importancia ambiental, por su presencia y concentración asociada con el deterioro de la salud ambiental, se encuentran: As, Ag, B, Be, Ba, Cd, Co, Cr, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, V y Zn. Estos elementos son considerados oligoelementos al estar presentes en concentraciones menores en el (intervalo de 0.05%) en los seres vivos Salomons y Förstner, (1984).

Entre los metales, se encuentran las “Tierras raras”. Son 17 elementos químicos del grupo IIIB (transición) de la tabla periódica e incluyen el Y e Sc además 15 elementos llamados lantánidos (La, Ce, Pr, Nd, Pr, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, y Lu).

Dentro de los Lantánidos el elemento prometio (Pm) no tiene importancia en la naturaleza, debido a su rápida desintegración de sus isótopos, al tener una vida media muy corta (2.5) años. Vargas-Rodríguez, (2007). Estos elementos han tenido una importante aplicación en estudios ambientales, por ejemplo la distribución de las tierras raras (ETR) en los sedimentos marinos se utilizó para identificar un aporte antropogénico por desechos sólidos de la minería (Shumilin *et al.*, 2005).

La normalización geoquímica se basa en emplear un elemento conservativo (Sc, Cs, y Li) para reducir efecto del tamaño del grano en la distribución de los elementos y de componentes diluyentes como carbonatos de calcio Loring (1991).

Aun cuando la materia suspendida particulada de arenas-gravas, naturalmente está ligada a bajas concentraciones de elementos traza y puede generar enriquecimiento en algunos elementos como Ca, Hf, Nb, Ta, Th, U, W y Zr debido a sus flujos altos de las concentración elevada en las zonas costeras. De acuerdo a Fowler y Knauer (1986) la dispersión de los sedimentos gruesos ocurre mediante el transporte lateral

de las corrientes, en donde las partículas gruesas son redistribuidas lejos de la costa y depositadas a mayores profundidades, generando una dilución de elementos traza en el fondo marino.

## 2.2 Elementos lantánidos

Los lantánidos han sido tradicionalmente conocidos como “tierras raras”. El nombre de «tierras», proviene de que antiguamente se denominaban así a las sustancias sólidas (óxidos) a las que ya no se podía descomponer en otras más simples, esto era porque imperaba entonces la noción griega de los cuatro elementos: tierra, fuego, aire y agua. Por otra parte, se les consideraba «raras» en la época en que se descubrieron, cuando Arrhenius en 1787 recolectó un mineral desconocido, posteriormente llamado gadolinita. Otros estudios demostraron que las “tierras raras” son elementos relativamente abundantes en la naturaleza (Rivera, 2007).

Los lantánidos pertenecen al grupo de elementos de transición interna, todos a excepción del lantano presentan el orbital 4f parcial o totalmente lleno. Estos elementos son químicamente bastante parecidos entre sí puesto que los electrones situados en orbitales f son poco importantes en los enlaces que se forman, en comparación con los p y d. También son bastante parecidos a los lantánidos el itrio (Y) y el escandio (Sc); al igual que los lantánidos, su estado de oxidación más importante es el +3. Éste es el estado de oxidación más importante de los lantánidos, pero también presentan el estado de oxidación +2 y +4.

El radio de los lantánidos va disminuyendo conforme aumenta el número atómico; no son variaciones grandes, pero se van acumulando. Esto genera que los elementos del bloque d de la segunda y tercera serie de transición presenten radios similares dentro de un grupo.

## 2.3 Inclusión del Itrio y Escandio

Se incluye al itrio como parte del grupo de “las tierra raras”, debido a que está asociado íntimamente en la naturaleza con los lantánidos y presenta muchas similitudes químicas, el itrio presenta un comportamiento geoquímico similar a la de una tierra rara pesada. Lo hace a temperaturas mayores que el subgrupo del cerio debido a que tiene una semejanza más grande con el calcio en radio iónico ( $\text{Ca} = 0.99 \text{ \AA}$ ,  $\text{Gd} = 1.11$

Å, Lu = 0.99 Å) (Rivera, 2007). Además tanto el escandio y el itrio, poseen potenciales de ionización similares a la de los demás elementos lantánidos que suelen ocupar un lugar en las redes cristalinas de los principales minerales que contienen a dichas “tierras raras”.

## 2.4 Características Físicas y Químicas

Los lantánidos presentan una adición de electrones del tipo  $f$  cuando el número de Protones aumenta, estos electrones se alojan en una órbita ( $4f$ ) muy interna permaneciendo las demás órbitas invariables. Los electrones de la órbita  $4f$  distinguen un elemento de otro en la serie y al estar en una órbita muy interna ejercen poco efecto sobre las propiedades del grupo, gracias a ello, todos los elementos tienden a presentarse juntos (Rankama y Sahama, 1949) y (Rivera, 2007). Sin embargo, las diferencias en sus propiedades son suficientemente significativas, como para tener aplicaciones industriales específicas, las que cada vez son mayores. El escandio y el itrio presenta una relativa semejanza en las estructuras de sus órbitas electrónicas, con respecto a los elementos lantánidos propiamente dichos aunque su radio iónico es sustancialmente menor (Rankama y Sahama, 1949).

El factor que influye principalmente en las propiedades de los lantánidos es el radio iónico. En la Tabla 1 se muestran las principales propiedades físicas y químicas de los elementos lantánidos estudiados.

## 2.5 División de los elementos lantánidos

El criterio para dividir a las “tierras raras” es el número de electrones presentes en el nivel de acuerdo con sus propiedades las “tierras raras” se dividen en tres subgrupos:

1.- Subgrupo de los Lantánidos o tierras raras ligeras (TRL) o del cerio. Está formado por la serie del lantano al samario.

2.- Subgrupo de los lantánidos o tierras raras intermedias (TRI), conformadas por el europio, gadolinio y terbio.

3.- Subgrupo de los lantánidos o tierras raras pesadas (TRP) o del itrio. Lo integra la serie del dispropasio al lutecio.

Estos subgrupos tienden a formar minerales en los que uno predomina sobre el otro, aunque siempre con cierta mezcla entre ambos (Rivera, 2007).

## 2.6 Carácter geoquímico de los elementos lantánidos

Presentan un carácter litófilo, según la clasificación de Goldschmidt, por lo que comúnmente se presentan formando sales oxigenadas principalmente flúor carbonatos y fosfatos en asociación con silicatos; por su escasez en la naturaleza (<0.1%) se clasifican como «elementos traza», Unos tienden a incorporarse a minerales tempranos y otros a minerales tardíos, por lo que se subdividen en compatibles e incompatibles, según sea el caso:

- a) Los compatibles se concentran en los sólidos como son el europio y el iterbio, que se alojan, respectivamente, en las plagioclasas sódicas y en los granates.
- b) Los incompatibles tienden a permanecer en solución en los fluidos magmáticos residuales., Entre ellos tenemos a los de incompatibilidad alta que lo constituyen el subgrupo del cerio, siendo principalmente Ce y La, acompañados comúnmente por Cs, Rb, K, U, Th, Ba, Ta y Nb, de radio grande y cargas menor o igual 2<sup>+</sup>; estos elementos pertenecen a los elementos denominados liófilos de gran radio iónico (LILE). Los de incompatibilidad baja forman el subgrupo del Itrio, acompañados por Ti, Zr, Hf y P (elementos de alta valencia “HFSE”) y son elementos de radio pequeño y carga mayor o igual a 3+. Su coeficiente de reparto es igual o inferior a uno. En resumen, la variación gradual de los radios iónicos hace que a medida que aumenta el radio iónico, los elementos sean cada vez más incompatibles, o sea, los coeficientes de reparto sean cada vez menores.

Una variación regular del radio iónico de las “tierras raras” trivalentes es de enorme importancia en su comportamiento geoquímico. Las “tierras raras” son trivalentes en una mayoría de condiciones geológicas, con la excepción del Eu y Ce que pueden también ocurrir como Eu <sup>+2</sup> (dependiendo de la fugacidad del oxígeno) y el Ce <sup>+4</sup> (en condiciones altamente oxidantes). Los elementos lantánidos representan un claro ejemplo de la regla de Oddo /Harkings, que se enuncia «que los elementos de número atómico par son más abundantes que sus miembros vecinos impares, debido a su mayor estabilidad de sus núcleos atómicos” (Rankama y Sahama, 1949).

En ambientes supérgenos los lantánidos se presentan inmóviles tanto en ambientes oxidantes como en reductores, ver Tabla 1.

Tabla 1. Movilidad de elementos químicos en ambientes Supergenos

Movilidad relativa	Oxidante (pH 5-8)	Oxidante (pH <4)	Reductor
Muy móvil (K>10)	Cl, Br, I, S, Rn, He, C, N, Mo, B,(Se, Te, )	Cl, Br, I, S, Rn, He, C,N,B	Cl, Br, I, Rn, He
Moderadamente Móvil (K=10)	Ca, Na, Mg, Li, F, Zn, Ag, U, V, As, (Sr,Hg,Sb)	Ca, Na, Mg, Li, F, Zn, Cd, Hg, Cu, Ag, Co, Ni, U, V, As, Mn, P	Ca, Na, Mg, Li, Sr, Ba, Ra, F, Mn
Ligeramente Móvil (K=0.1-1)	K, Rb, Ba, Mn, Si, Ge, P, Pb, Cu, Ni, o,(Cd,Be,Rn,In, Wf)	K, Rb, Ba, Si, Ge, Ra	K, Rb, Si, P, Fe
Inmóvil (K<0.1)	Fe, Al, Ga, Sc, Ti, Zr, Hf, Th, Pa, Sn, (Cr,Nb,Ta,Bi,Cs)	Fe, Al, Ga, Sc, Ti, Zr, Hf, Th, Pa, Sn, TR ** gpo Pt, Au, Cu, Ag, Pb, Zn,Cd, Hg ,Ni, Co, As,Sb, Bi, U, V, Se, Te, Mo, In, Cr, (Nb,Ta,Cs)	Fe, Al, Ga, Sc, Ti, Zr, Hf, Th, Pa, Sn, TR ** gpo Pt, Au, As, Mo, Se

(\*) Perelman (1967), modificado por Rose *et al.* (1979), tomado de Sigel (1992)

(\*\*) Tierras raras

## 2.7 Tierras raras a nivel mundial

Las “tierras raras” son relativamente abundantes en la corteza terrestre, pero las concentraciones económicas son menos comunes con respecto a la mayoría de las otras menas. Los recursos a nivel mundial se encuentran principalmente en la bastnasita y monacita. La bastnasita existe en depósitos de China y los Estados Unidos los que constituyen el porcentaje de recursos económicos más grande de “tierras raras” del mundo, mientras que la monacita se halla en Australia, Brasil, China, India, Malasia, Sudáfrica, Sri Lanka, Thailandia, y los Estados Unidos, constituyendo el segundo sector más grande. Apatito, cheralita, eudialita, monacita secundaria, loparita, fosforitas, soluciones de uranio gastadas, y enotima constituyen la mayoría de los recursos restantes (Hedrick, 2005). Bahía

En los Estados Unidos durante el año 2006 no se efectuó minado alguno por “tierras raras”. La bastnasita, es un mineral fluocarbonatado de tierras raras, fue extraído con anterioridad y se procesó como producto primario en Mountain Pass, CA. Basado en los datos reportados al final del año 2005, la estimación de la distribución de “tierras raras” según su uso final es como sigue: conversores catalizadores de automotores, 32%; aditivos metalúrgicos y aleaciones, 21%; pulidores de cerámicas, 14%; encendedores, televisores, monitores de computadoras, radar, y películas intensificadoras de rayos X, 10%; catalizadores en la refinación del petróleo, 8%; imanes permanentes, 2%; y otros, 13% (**FIGURA 2.**).

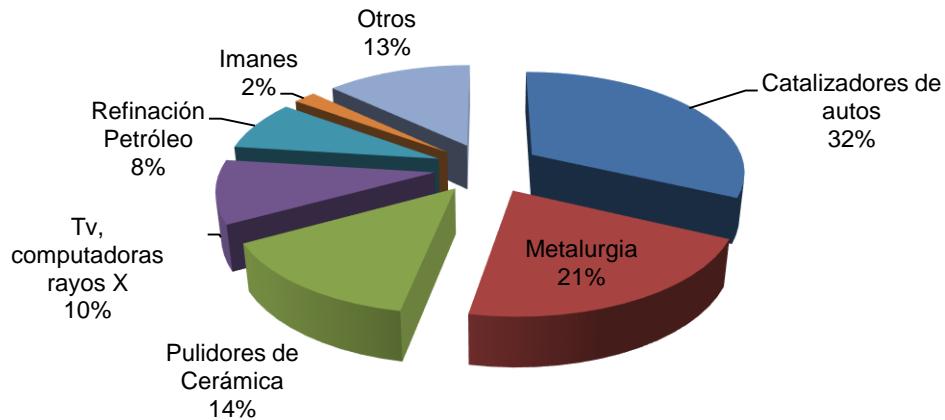


FIGURA 3. Principales usos de tierras raras en EE.UU.

## 2.8 Sedimentos

Uno de los aspectos importantes en la caracterización de los sedimentos es conocer el tamaño de la partícula, el cual está relacionado con el tamaño del área superficial. Las partículas del grano fino tienen mayor razón del área de superficie a su radio. Debido a esto, tienden a formar láminas, con una mayor área y más compacta que los granos gruesos, favoreciendo la acumulación de materia orgánica y elementos químicos (De Groot *et al.*, 1982). Otra variable a considerar de los sedimentos es el contenido de materia orgánica, debido a que los metales como Zn y Cu tienden a formar ligandos orgánicos, además de ser más móviles, dependiendo de los cambios fisicoquímicos (Clozel *et al.*, 2006). Como se ha descrito, la concentración de los elementos traza en los sedimentos marinos depende de: la composición de las

partículas que son introducidas y/o generadas *in situ* (procesos biogénicos o autígenos), de las características granulométricas, de la concentración de materia orgánica, de la tasa de sedimentación, de la distribución de los sedimentos y de su interacción con los procesos biogeoquímicos y físicos de la cuenca de depósito.

### **3 Área de estudio**

El sistema lagunar Guaymas-Empalme se encuentra en el noroeste de México en la costa oriental del Golfo de California ( $27^{\circ} 55' N$  y  $110^{\circ} 53' W$ ) y está conformado por la bahía Interior, bahía exterior, el estero El Rancho, y la laguna de Empalme.

#### **3.1 Características del sistema lagunar Guaymas-Empalme.**

El sistema lagunar de Guaymas-Empalme tiene una superficie de  $33.6 \text{ km}^2$ , una profundidad promedio de 2.5 m y se comunica con el mar adyacente por una boca de 1.2 km de ancho y 8 m de profundidad promedio (FIGURA 3). Las profundidades de los diferentes partes que conforman a este cuerpo de agua son en promedio. Un metro en caso del estero El Rancho, dos 2 metros para la laguna de Empalme y 3.5 metros para la bahía interior; la profundidad máxima se encuentra en la bahía exterior; con 14 metros (Gómez-Valdez *et al.*, 2012).

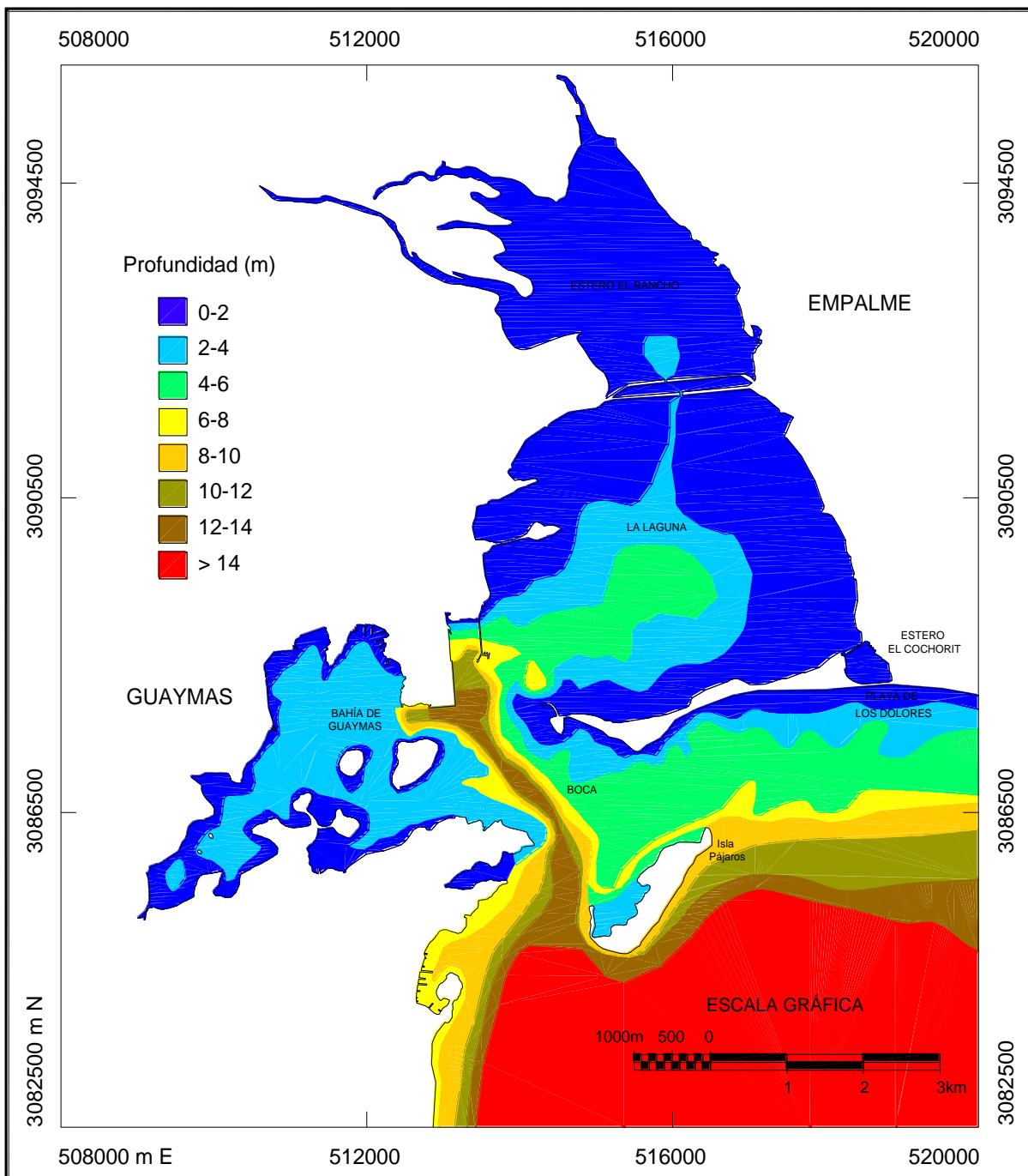


FIGURA 4. Batimetría de la bahía de Guaymas (modificado de Secretaría de Marina, 1980).

En base a las características geomorfológicas y oceanográficas, este sistema costero es considerado del tipo "restringido", caracterizado por la presencia de dos o más

canales de entrada o varias bocas, tiene una circulación por marea bien definida, una fuerte influencia de vientos y generalmente, una buena mezcla vertical de agua (Kjerfve, 1986). En la cabeza del sistema lagunar se localizan dos pequeñas islas llamadas Mellizas. En la parte central se encuentran otras dos islas de mayor tamaño (Almagre Chico y Almagre Grande) (Anónimo, 1988 y 1993).

El clima de la región de acuerdo con la clasificación propuesta por Köppen y modificada por García (1988) es muy seco y semicálido. La temperatura media anual se encuentra entre 18 y 22°C. En el mes más frío hay temperaturas menores a 18°C. La lluvia se presenta en verano y en menor medida en invierno y es extremoso con una oscilación térmica entre 7 y 14°C (Green-Ruiz, 2000). La tasa de evaporación supera diez veces a la precipitación en el promedio anual, por lo cual la bahía se considera como antiestuario.

En la bahía se presenta una marea de tipo mixto-semidiurno. La circulación inducida por la marea se caracteriza por mayores velocidades de corriente en el canal de navegación y en la entrada del Estero El Rancho donde las velocidades varían entre 10 y 50 cm/s (Arreola-Lizarraga *et al.*, 2000). El volumen mareal de la bahía de Guaymas es de  $30 \times 10^6$  m<sup>3</sup> y el volumen total es de  $93 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, con el índice de flujo de 0.32 (Montaño-Ley *et al.*, 2000).

Durante condiciones de verano, el agua del mar adyacente entra a la bahía por la superficie y el agua de la bahía sale por el fondo. Durante esta estación del año, la circulación es inducida por los procesos evaporativos de las cuencas interiores. Durante condiciones de invierno el agua del mar adyacente entra por el fondo y el agua de la bahía sale por los lados del canal de entrada; durante esta estación del año la circulación es inducida por el esfuerzo de los vientos que provienen del norte y noroeste (Arreola *et al.*, 2001).

Los parámetros fisicoquímicos del agua presentan los siguientes intervalos durante el año: temperatura superficial (14-34° C), salinidad (30-37 ‰) y oxígeno disuelto (4-8 mg/l) (SEC-MAR, 1990). La cuenca de drenaje de los alrededores del sistema costero Guaymas-Empalme está constituida por rocas ígneas extrusivas ácidas del terciario. En el área en donde se encuentra la ciudad de Guaymas, existen rocas sedimentarias denominadas conglomerados del Cuaternario (Green-Ruiz, 2000).

### **Bahía de Interior (Puerto)**

La bahía de Guaymas tiene una profundidad media de 3 m se comunica con el golfo por una boca de 1.2 km de ancho ver (FIGURA 3), tiene una superficie total promedio de 3,315 ha referida al nivel de bajamar media inferior (Burrola-Sánchez, 2003). Este sistema recibió hasta junio de 2004, aproximadamente el 80 % de aguas residuales urbanas de la ciudad de Guaymas.

### **Bahía exterior (Paraje)**

El sistema costero El Paraje contiene playas bajas mixtas de composición arenogravosas y playas bajas arenosas que se alternan con acantilados costeros. Tiene una superficie de 0.34 km<sup>2</sup> y una profundidad promedio de 6.7 m (FIGURA 3).

FIGURA 6. Mapa geológico de la bahía de Guaymas (Tomado de INEGI, 1982).

Este sistema es cuerpo receptor de aguas residuales de 7 plantas procesadoras de harina de pescado (sardina) y una planta procesadora de procesamiento de productos pesqueros diversos (calamar, aguamala).

### **Estero El Rancho**

El estero El Rancho se constituye por una franja litoral rocosa en el lado oeste transitioningando a limo-arcillosa hacia el noroeste donde se encuentran, marismas de inundación y el manglar de mayor extensión en el área. Hacia el noreste se puede observar playas limo-arenosas asociadas a dunas estabilizadas. Tiene una superficie de 7.78 km<sup>2</sup> y una profundidad en promedio de 0.5 m. (FIGURA 3)

FIGURA 6. Mapa geológico de la bahía de Guaymas (Tomado de INEGI, 1982).

Se comunica con la laguna de Empalme por dos canales intermareales ambos de 20 m de ancho y 2 m de profundidad. Este sistema es cuerpo receptor de aguas residuales de una granja camaronícola de 44 ha de superficie de estanquería.

## **Laguna de Empalme**

La laguna de Empalme es un cuerpo somero de 2.3 m de profundidad en promedio y un espejo de agua de 16 km<sup>2</sup> ubicada en la cabecera de una planicie aluvial extensa que caracteriza a la costa sur del Estado de Sonora. El flanco este presenta pastos salinos, marismas de inundación y manglares; al suroeste se comunica con la bahía de Guaymas por medio de una boca de 0.9 km que a su vez se comunica a mar abierto mediante una boca de 1.2 km (FIGURA 3)

FIGURA 6. Mapa geológico de la bahía de Guaymas (Tomado de INEGI, 1982).

## **3.2 Geomorfología**

La Región Guaymas-Empalme se caracteriza por presentar macizos montañosos escarpados con pies de montaña inclinados y planicies intermontañas constituidas por material aluvial que son transportados por cauces permanentes e intermitentes de la región; los depósitos más recientes están confinados a las playas de la bahía (FIGURA 4)

- (1) Cerros e Islas que presentan elevaciones entre 60 y más de 200 m sobre el nivel del mar formadas por rocas ígneas extrusivas. Dominan el paisaje de la porción oeste de la Bahía.
- (2) Geoformas de relieve casi plano con material aluvial que constituye los rellenos de las partes bajas, pie de montaña y lechos de arroyos.
- (3) Marismas, depósitos de arena de cuarzo con fragmentos de roca y gravas, que constituyen el litoral de la bahía.

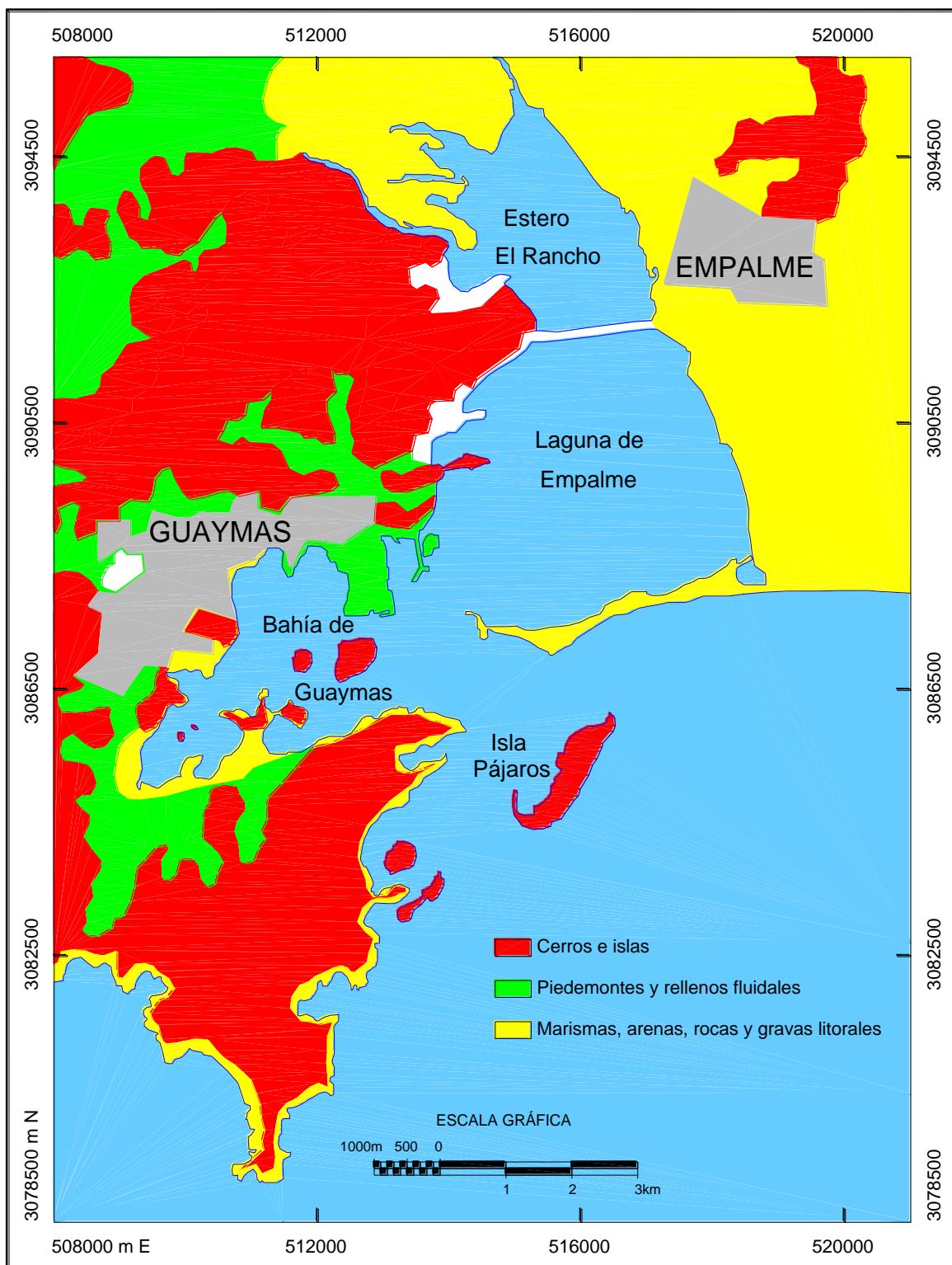


FIGURA 5. Geomorfología de la Bahía de Guaymas.

### 3.3 Geología

#### Descripción litológica del área

La litología de la costa del complejo lagunar de la bahía de Guaymas se constituye por planicies de sedimentos cuaternarios de tipo aluvial y acumulaciones litorales. Adyacente a la bahía se encuentran lomeríos bajos y bloques montañosos, en la cual se distinguen capas gruesas de rocas volcánicas del Terciario, remanentes de la Sierra Madre Occidental. El complejo volcánico Terciario descansa sobre rocas paleozoicas intrusionadas por batolitos del Mesozoico (INEGI, 1982; Gastil *et al.*, 1986). Las unidades se describen en orden cronológico (FIGURA 5).

*Aluvión Cuaternario, Q(al)*. Se compone material de relleno no consolidado, de origen aluvial y acumulaciones litorales. Estos sedimentos llenan los valles y bordean la zona costera de la península y complejo lagunar de Guaymas.

*Basalto Cuaternario, Q(b)*. Es de textura afanítica presentando pequeños cristales de olivino. En el área de Empalme y norte de Guaymas es toleítico.

*Riolita-Toba ácida, T(R-ta)*. Esta unidad del Terciario está constituida por la interdigitación irregular de derrames de ignimbritas de composición riolítica. En el área de Guaymas las tobas son ignimbríticas con huellas de compactación.

*Conglomerado Terciario, T(cg)*. Es un conglomerado polimítico con lentes de arena conglomerática depositados en ambientes continentales. El conglomerado está constituido por fragmentos redondeados de rocas volcánicas riolíticas, dacíticas, y basálticas con diámetro de 10 a 20 cm.

*Basalto Terciario Ti(b)*. Esta unidad se compone de derrames de lava basáltica del Terciario Inferior y se asocia con brechas volcánicas del Cuaternario (FIGURA 5)

*Riodacitas. Ti(Rd)*. Esta unidad se compone de lavas viscosas como la riolita y lavas más fluidales como las andecitas.

Unidad Granito. Está cubierta discordantemente por rocas volcánicas Terciarias y rocas clásticas continentales del Terciario y Cuaternario. Morfológicamente, presenta lomeríos bajos sobresaliendo diques resistentes a la erosión, aflorando en Empalme y en los alrededores del estero Bacochibampo (FIGURA 5).

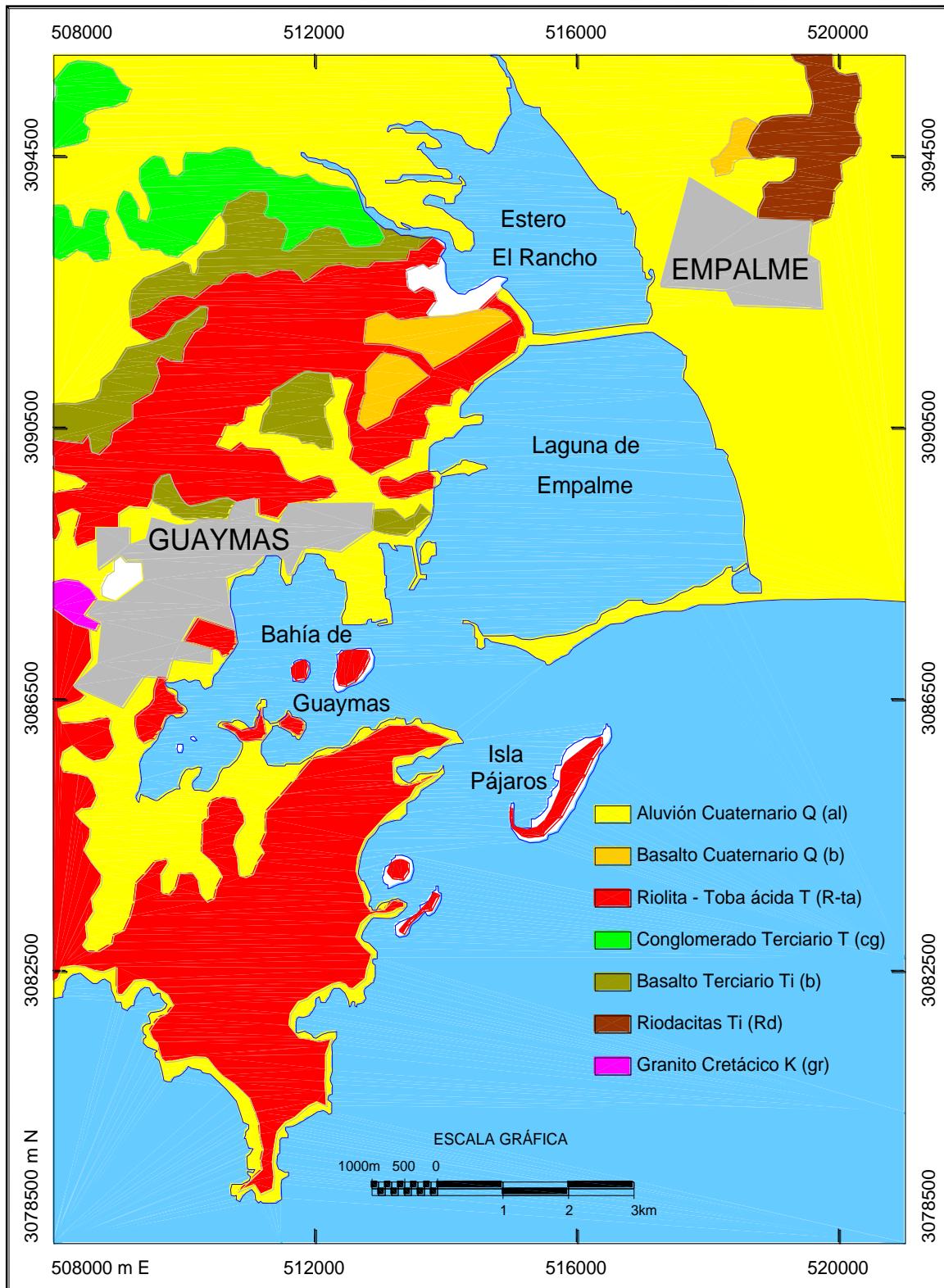


FIGURA 6. Mapa geológico de la bahía de Guaymas (Tomado de INEGI, 1982).

### **3.4 Edafología**

#### **Clasificación**

En los alrededores de la bahía de Guaymas predominan los litosoles y regosoles, los cuales se encuentran asociados a la roca parental presentando únicamente un horizonte de poco espesor, (el sistema FAO/UNESCO considera a la roca desnuda dentro de este grupo). Estos suelos se localizan desde las laderas escarpadas hasta los piedemontes (FIGURA 7).

El área de estudio presento además otros tipos de suelos: La llanura de inundación que se ubica al noroeste del estero El Rancho, presento un suelo clasificado como xerosol cálcico y zolonchak órtico ( $Xk+Zo/2$ ), (INEGI, 1983a). Se caracteriza por ser cálcico predominantemente y órtico de composición secundaria, de tamaño textural medio en los primeros 30 cm y fase química fuertemente sódica, con más del 40% de saturación de sodio intercambiable.

Al este del estero El Rancho se ubica una planicie aluvial clasificada como Vertisol crómico y regosol eútrico ( $Vc+Re/3$ ) cuyas características son: suelo predominantemente de textura fina sin presentar fases química y física.

El valle ubicado en la porción suroeste de la bahía tiene suelo regosol eútrico y vertisol crómico ( $Re+Vc/3$ ). Se caracteriza por no presentar capas distintas, se asemeja a las rocas volcánicas que les dio origen y presenta textura fina.

(L) Litosol. Suelo de distribución amplia. Son suelos sin desarrollo, con profundidad menor de 10 cm, tienen características muy variables según el material que los forma. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona donde se encuentren, pudiendo ser desde moderada a alta. Estos suelos, que son resultado de la erosión intensa y la actividad volcánica, se localizan en las cimas o en las laderas de las montañas, prácticamente están formadas por la roca madre inalterada. Tienen escasa vegetación y de tipo desértica.

Regosol Eútrico (Re). Se caracteriza por no presentar capas distintas, son claros y se parecen a la roca que les dio origen, se pueden presentar en muy diferentes climas y con diversos tipos de vegetación. Su susceptibilidad a la erosión es muy variable y depende del lugar donde se encuentren. Se considera que están formados por

materiales triturados no consolidados, que son transportados por viento; también pueden ser de origen piroclástico resultado de actividades volcánicas recientes.

Yermosol Háplico (Yh). El yermosol tiene una capa superficial de color claro y muy pobre en materia orgánica, más pobre que los xerosoles, debajo puede haber un subsuelo rico en arcillas o carbonatos, muy parecido a la capa superior, presentan cristales de yeso o carbonatos. Son suelos de baja susceptibilidad a la erosión, salvo en pendientes sobre una fase física, donde son muy susceptibles a este problema.

Zolonchak Ortico (Zo). Se caracteriza por presentar un alto contenido en sales, en algunas partes del suelo se presentan en zonas donde se acumulan sales solubles. Son suelos poco susceptibles a la erosión.

Los litosoles y regosoles en los alrededores de la bahía de Guaymas presentaron erosión intensa en las áreas escarpadas de los macizos montañosos, las cuales, evidencian inestabilidad por la vegetación escasa de tipo desértica. El regosol presente en la porción suroeste de la bahía erosión moderada dado que su textura es fina y contiene materiales cohesivos. Al norte del valle de Guaymas los suelos agrícolas están sujetos a la erosión por las actividades intrínsecas durante la preparación del suelo y la irrigación.

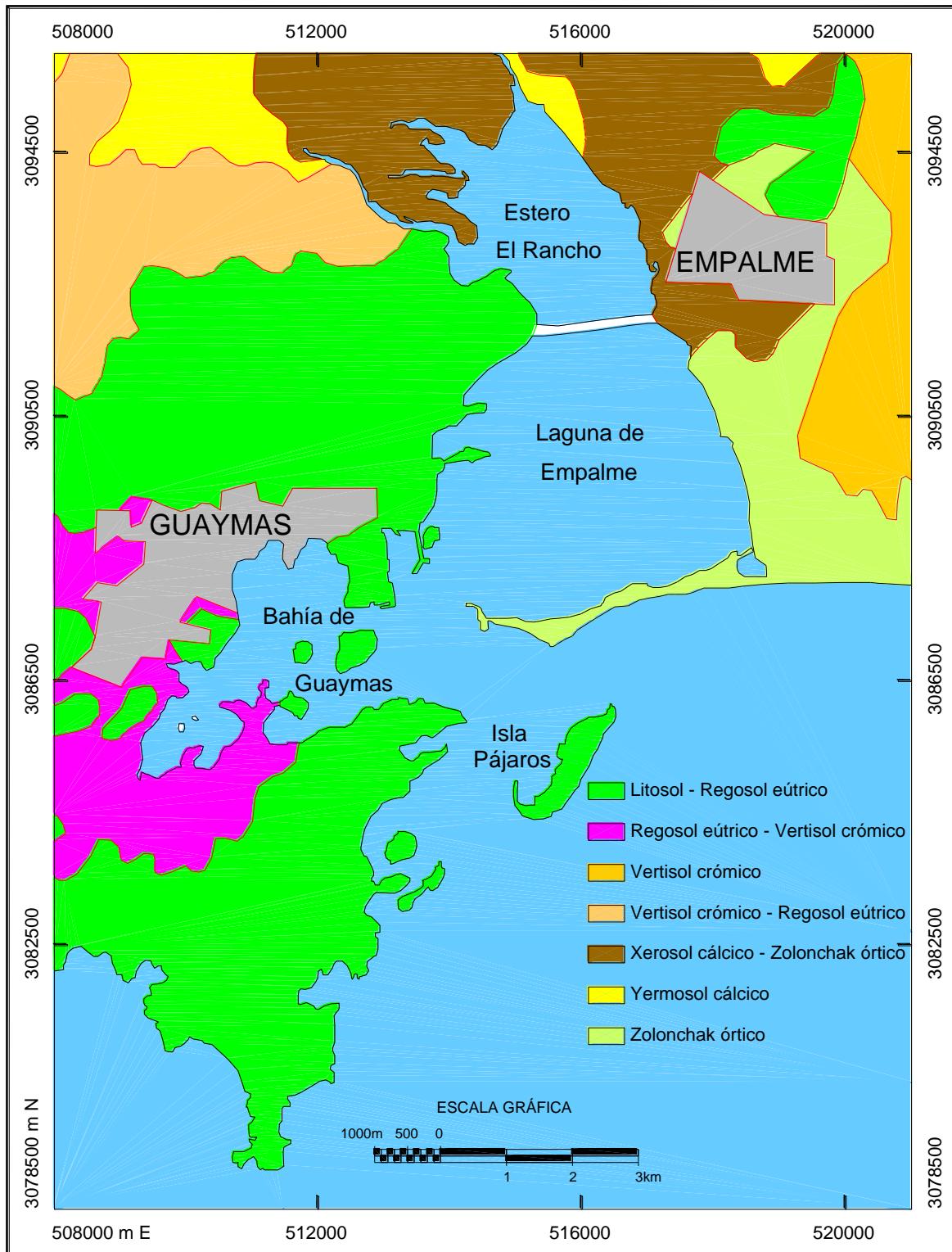


FIGURA 7. Tipos de suelo adyacentes a la bahía de Guaymas (Tomado de INEGI, 1983a).

## 3.5 Hidrología

### 3.5.1 Mareas

En la región donde se ubica la bahía de Guaymas, la marea con mayor efecto de 0.37m es la correspondiente a la luna, conocida como marea principal lunar semidiurna ( $M_2$ ) y tiene un periodo de 12 horas 25 minutos (Marinone y Lavín, 1997). Los componentes semidiurnos tienen un punto anfídrómico virtual a la altura de la línea imaginaria entre Guaymas, Son. y Santa Rosalía, B.C.S., originado por una progresión mareal desde el sur hacia el norte en ambos lados de la cuenca, que genera una predominancia de mareas diurnas la mayor parte del año (Dressler, 1981). En la bahía de Guaymas se presenta una marea de tipo mixto-semidiurno con predominancia del tipo diurno ( $K_1$ ) sobre el semidiurno ( $M_2$ ).

Los promedios mensuales del nivel del mar en el golfo presentan un marcado ciclo estacional, con máxima elevación durante verano y mínima durante invierno (Roden y Groves, 1959; Ripa y Marinone, 1989; Ripa). Lo anterior se manifiesta en la Bahía de Guaymas, donde el nivel máximo se observa en agosto y el mínimo en febrero (FIGURA 8).

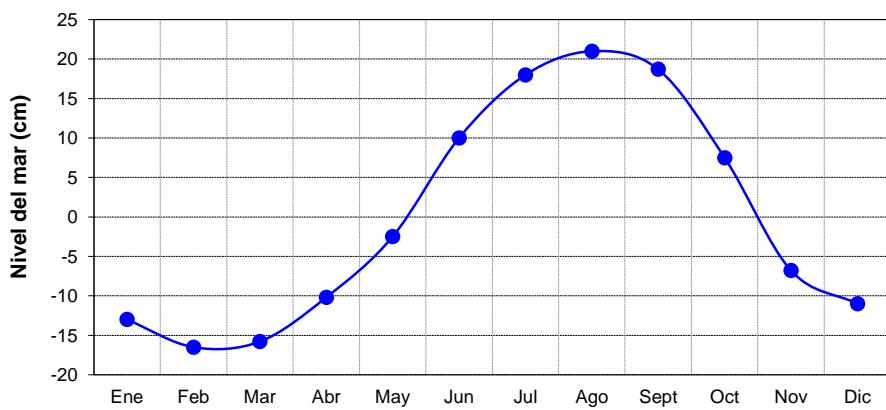


FIGURA 8. Promedios mensuales de elevación del nivel del mar en la región de Guaymas, Sonora (Tomado de Beier, 1997).

### **Cuenca hidrológica.**

Los cuerpos de agua costeros de los municipios de Guaymas y Empalme se ubican en la cuenca del río Mátape-Guaymas (FIGURA 9). Esta cuenca tiene 7,450 km<sup>2</sup> de superficie y presenta las características de un acuífero costero sobreexplotado. Existe una zona de 1,200 ha de riego por gravedad que se abastece del agua de la presa Ignacio L. Alatorre. En la parte baja, la cuenca del río tiene una superficie de 955 km<sup>2</sup> que cubre los municipios de Guaymas y Empalme y de 7 km<sup>2</sup> pertenecientes a la cuenca del Mátape-Empalme (FIGURA 8). En la parte alta de la cuenca se cuenta con poco más de 3,000 km<sup>2</sup> de agostaderos aprovechados en la cría de ganado vacuno. Debido a las condiciones de aridez y al tipo de clima prevaleciente en esta región, se ha estimado un coeficiente de escurrimiento de 0 al 5% para el valle de Guaymas y Empalme. En la parte media del río el coeficiente de escurrimiento es mayor y se estima en un 5 a 10%. Por ese motivo esta corriente es intermitente y el lecho del río está seco gran parte del año. La pendiente de la cuenca se estima en un 2%.



FIGURA 9. Cuenca hidrológica (Modificado de INEGI, 1983b).

En las décadas anteriores del siglo pasado, el drenaje subterráneo del acuífero del valle de Guaymas descargaba sus aguas con pendiente directa al mar. Sin embargo, la sobreexplotación del acuífero ha generado el abatimiento de los niveles estáticos y dinámicos, lo que ha originado una nueva posición de equilibrio de la interfase salina que permite la penetración del agua del mar hacia tierra adentro.

En la parte alta de la cuenca del acuífero se extrae el agua subterránea por medio de pozos poco profundos (de 10 a 20 m de profundidad) para uso pecuario, minero, (FIGURA 10) agricultura en pequeña escala (Vega-Granillo y Castillo-Gurrola, 1998).

En la parte sur se extrae el agua por pozos profundos (de más de 30 m) para desarrollar agricultura intensiva y para abastecer a las ciudades de Empalme, Guaymas y San Carlos. Actualmente se observa un avance del frente salino del sureste al noreste, siendo más intenso hacia el poniente del valle (hasta 3000 ppm Cl). Prácticamente, toda la franja costera está inutilizada por intrusión salina (15 km tierra adentro).

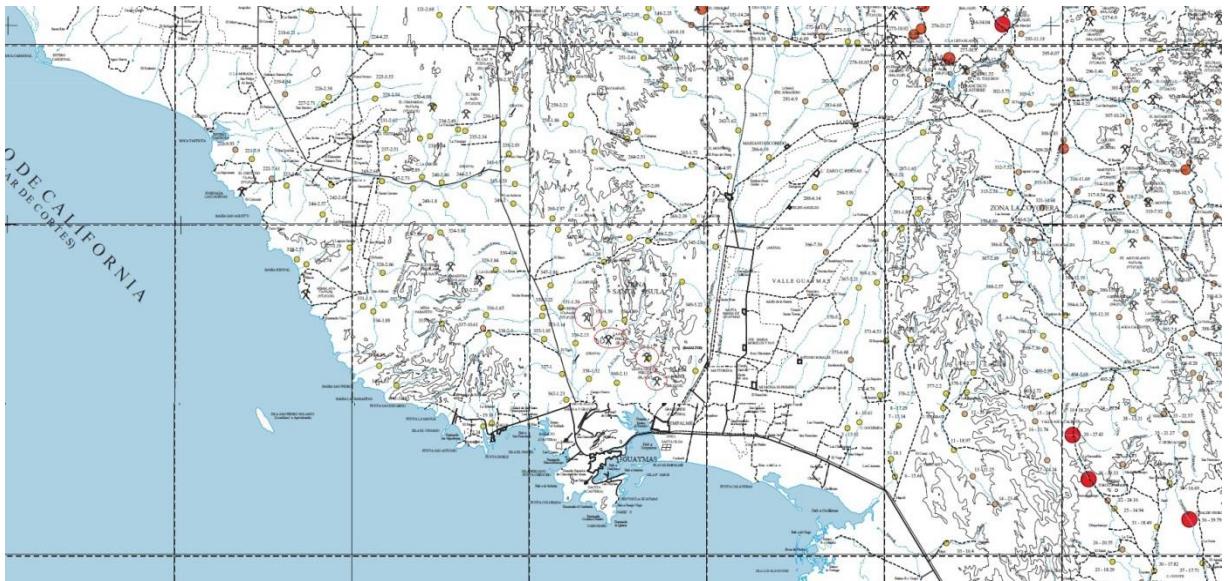


FIGURA 10. Mapa geoquímico de la zona norte de Guaymas Sonora (Carta Geoquímica para arsénico H12-11 Sonora octubre 2000).

### 3.5.2 Corrientes

La circulación del agua en la bahía de Guaymas es originada por el movimiento periódico de la onda de marea. Las velocidades de corriente se comportan de acuerdo al flujo de entrada (FIGURA 11) y reflujo de salida (FIGURA 12) de la marea. De acuerdo a Rosales-Grano (1999), los máximos se presentan en los estrechamientos tales como la entrada al estero El Rancho con velocidades de corriente de hasta 0.53 m/s, seguidas por el canal de navegación con 0.40 m/s. La velocidad promedio de la corriente en la bahía es de 0.10 m/s.

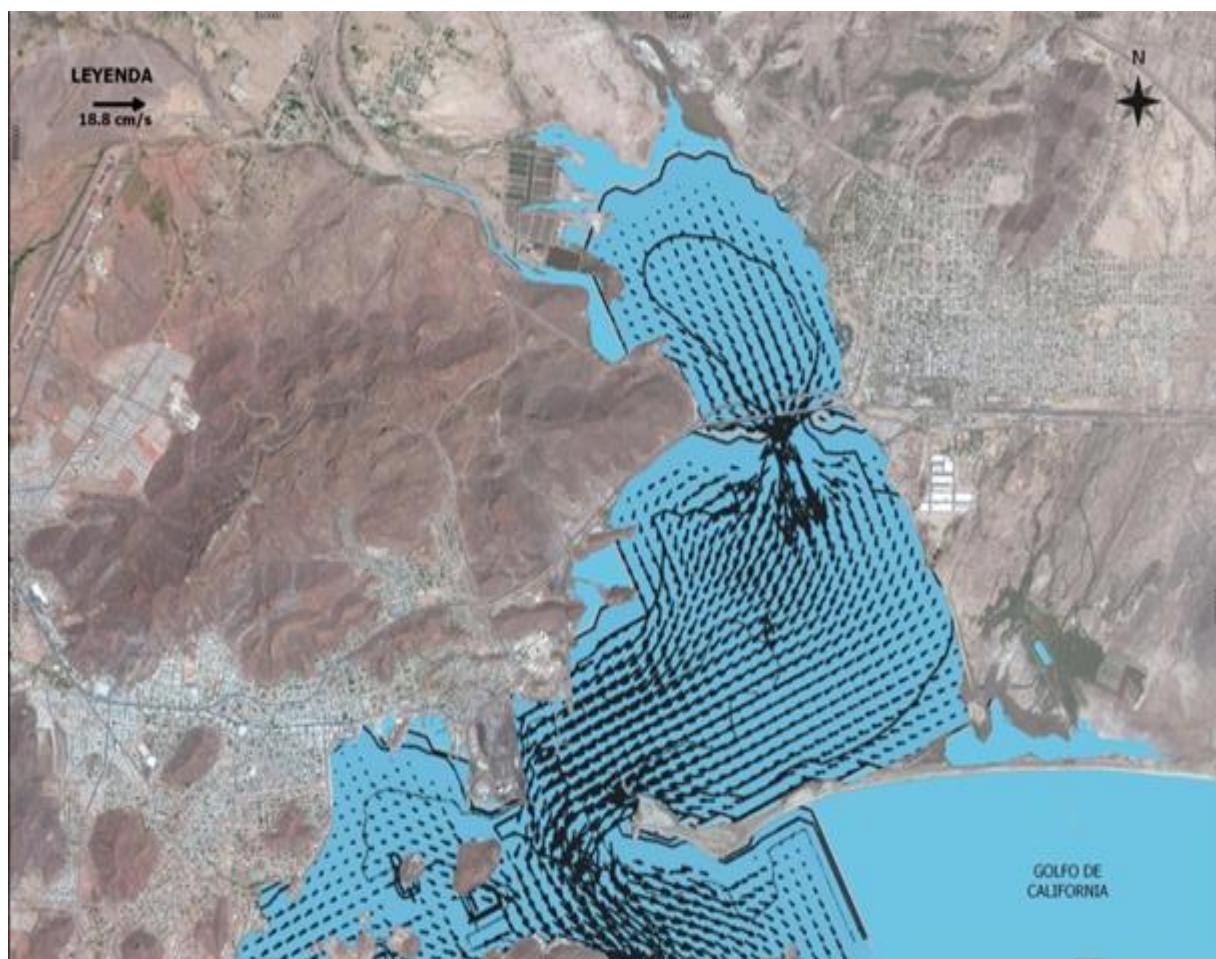


FIGURA 11. Circulación del agua en la bahía de Guaymas (18.8 cm/s)  
Flujo (tomado de Rosales-Grano, 1999).

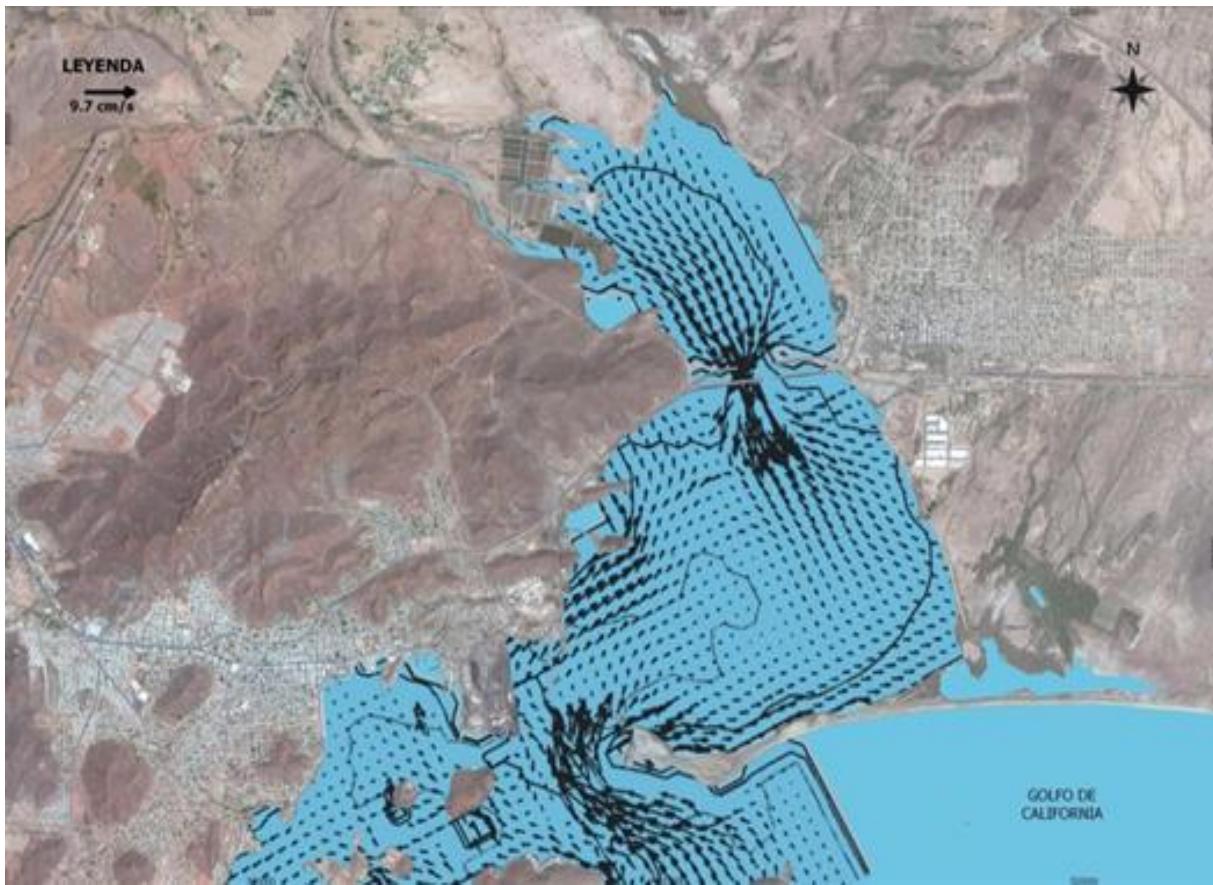


FIGURA 12. Circulación del agua en la bahía de Guaymas: (9.7 cm/s)  
Reflujo (tomado de Rosales-Grano, 1999).

### 3.6 Actividades humanas

Derivado del desarrollo urbano e industrial, la bahía de Guaymas es receptora de diferentes aguas residuales. La mayoría de los problemas de contaminación de la bahía son generados por las aguas residuales que son vertidas sin o con insuficiente tratamiento previo y que corresponden a aguas residuales urbanas y de plantas procesadoras de productos pesqueros, principalmente. La única información disponible es proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1996) donde se reportan, flujos de 27,594 m<sup>3</sup> vertidos por día a la Bahía los cuales provienen de las aguas residuales urbanas de la Ciudad de Empalme y de Guaymas y de la industria. CNA (1997) no tiene información disponible de ninguna descarga respecto a los niveles de elementos traza de importancia ambiental.

El área “El Paraje”, localizada frente al parque industrial Rodolfo Sánchez Taboada (FIGURA 12) presenta condiciones de anoxia en el fondo, imposibilitando la presencia de fauna acuática (Arreola *et al.*, 2001)

## Industria

La industria procesadora de productos pesqueros en el puerto de Guaymas representa el 80% de la producción pesquera en el estado, esto equivale al 26% de la captura nacional. A esta intensa actividad pesquera se encuentra asociado un importante sector industrial orientado a su procesamiento. El parque industrial Rodolfo Sánchez Taboada, que alberga el 85% de las industrias procesadoras de pescado, mientras que el 15 % restante se localiza en las zonas de Punta de Lastre y La Ardilla (FIGURA 13). Estas industrias arrojan considerables cantidades de materia orgánica (CEC-MAR, 1990), con alto porcentaje de grasa y proteínas que contienen azufre en su estructura, favoreciendo la producción de ácido sulfídrico en el fondo de la columna de agua y disminuyendo el pH del sitio. Además la degradación de la materia orgánica genera condiciones anóxicas, que favorecen a la solubilidad y biodisponibilidad de varios elementos traza, como hierro y manganeso (Riley, 1989).



FIGURA 13. (a) Punta de Lastre y Ardilla; (b) Parque industrial "Rodolfo Sánchez Taboada"

## Astilleros

El puerto de Guaymas se ubica una flota aproximada de 350 embarcaciones camaronesas y 50 sardineras, que requieren de servicios de reparación y mantenimiento, los cuales son ofrecidos por catorce astilleros (FIGURA 13) que se concentran en el área del puerto y el parque industrial "Rodolfo Sánchez Taboada". Existen descargas intermitentes que en su conjunto arrojan cantidades considerables de diferentes tipos de óxidos y pintura (Pb y Zn), además de derramamiento de solventes y aceites.

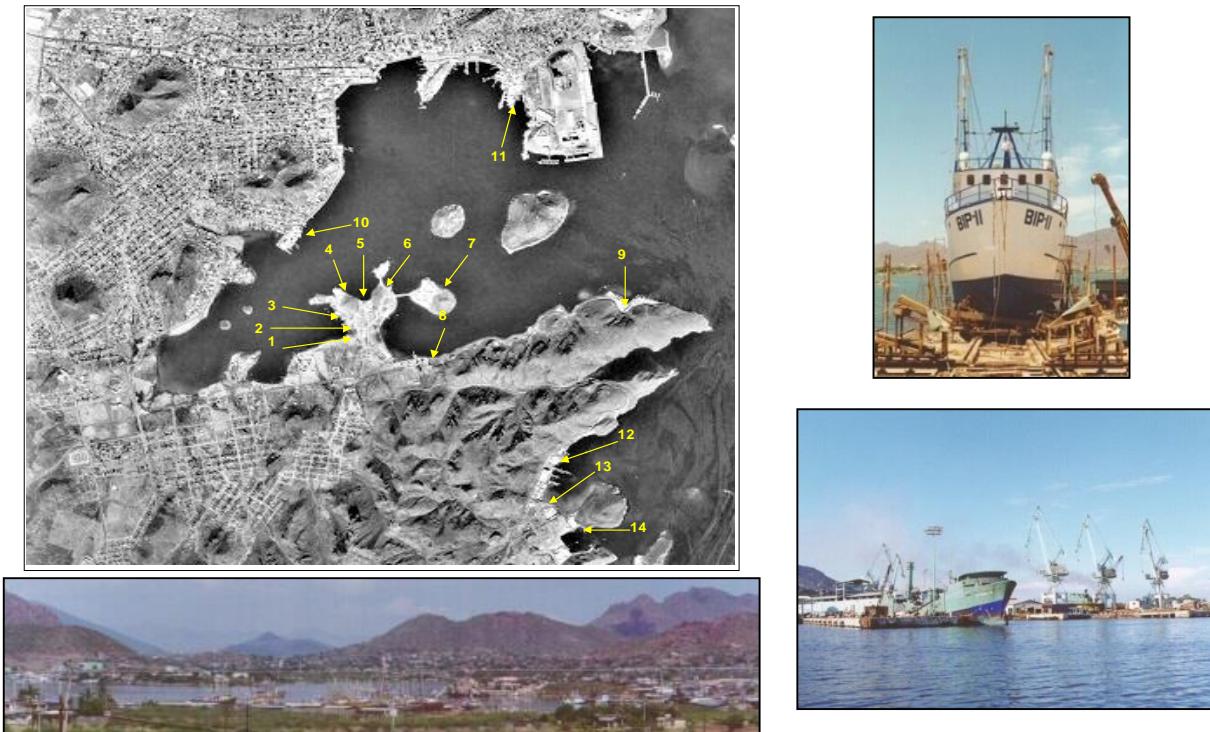


FIGURA 14. Ubicación de astilleros en bahía de Guaymas, Son.

## Plantas generadoras de energía eléctrica

Existen dos plantas termoeléctricas, una con capacidad de 98 MV y otra con capacidad de 484 MV. Ambas toman agua de la bahía para el enfriamiento de turbinas la que posteriormente es vertida de nuevo a la Bahía. Ocasionalmente la descarga puede arrojar hierro, zinc o cobre, cuyas sales son utilizadas para reducir la incrustación de materiales inorgánicos en diferentes partes del sistema.

Adicionalmente la alta temperatura del agua descargada a la bahía con respecto a la del medio marino (entre 7 y 11°C) favorece una mayor disponibilidad de los elementos que se encuentran en la zona que está siendo impactada (Riley, 1989).

### **Movimiento marítimo de carga y muelles.**

Existe una importante actividad comercial en el puerto de Guaymas por su ubicación, que permite numerosas operaciones de importación y exportación con los Estados Unidos y los países de la Cuenca del Pacífico (SIUE, 1999). Actualmente existen 40 muelles concesionados de los cuales en operación hay 32 de uso privado y 8 de uso público, destacando el muelle fiscal y el de PEMEX-CFE. En todos los muelles ocurren pérdidas accidentales al medio marino de sustancias o materiales (combustibles, pesticidas, aditivos) con altos contenidos de metales pesados (Cu, Pb, Ni, Cd, Hg, Mn) que pueden alterar la presentación química de los elementos ya presentes en el medio marino, o afectar debido a su toxicidad (ácido sulfúrico, fenol, cresol), estos son transportados mediante la corriente a diversos puntos de la Bahía. (Mendez *et al.*, 2002)

### **Acuicultura**

Existe una granja camaronícola (Maricultura del Pacifico) adyacente al estero el Rancho. La granja tiene una superficie de 44 ha de estanquería supralitoral en la que se utiliza un sistema de cultivo semi-intensivo. Los efluentes resultantes de estas actividades tienen elevadas concentraciones en nitrógeno, fósforo y materia orgánica con restos de alimentos (FIGURA 14). Esto es muy importante ya que los aminoácidos presentes en la materia orgánica arrojada de los estanques puede formar quelatos con varios elementos como cadmio, plomo y zinc entre otros, aumentando su biodisponibilidad (Méndez, 1999).



FIGURA 15. Localización de la granja camarónica, ubicada en el estero del Rancho.

#### 4 Antecedentes

Una investigación de la alteración de la actividad antropogénica sobre los procesos geoquímicos de algunos metales pesados y su relación con la granulometría, mineralogía y los contenidos de carbonatos y carbono orgánico de los sedimentos de las Bahías de Guaymas, Son., Ohuiria y Topolobampo, Sin., Mazatlán, Sin. y La Paz, B.C.S., analizando muestras de sedimento superficial, así como un núcleo sedimentario, Green (2000) determinó el porcentaje de las fracciones arenosa, limosa y arcillosa; a esta última se le determinó la abundancia relativa de los minerales arcillosos y cuantificó su contenido de carbonatos y carbono orgánico, así como las concentraciones totales de Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Pb y Zn, y el contenido potencialmente disponible para la biota de Cd, Cu, Fe, Pb, y Zn. En la bahía de Guaymas se observaron tres regiones con diferentes comportamiento geoquímico: (1) laguna Interior, (2) zona de transición y (3) boca Oriente. Se mostró una fuerte correlación entre Al, Cr, Fe, Mn, Ni y Zn, y la capacidad de los sedimentos finos y el

material orgánico de adsorber dichos metales. Se detectaron zonas de actividad antropogénica que se asocian con altas concentraciones de algunos metales que posiblemente estén introduciéndolos al cuerpo de agua, como son la zona naval, los astilleros, el muelle de PEMEX y la cementera de CEMEX.

En sedimentos en el Golfo de Cádiz España, se encontraron elevadas concentraciones de elementos asociados a depósitos sulfurosos (As, Cu, Hg, Pb y Zn) esta zona se pone de manifiesto la influencia ejercida por el históricamente contaminado sistema fluvial Tinto-Odiel, esto se debe al suministro de sedimentos en la zona del golfo a través del río Guadiana. En este estudio se aplicó un análisis de conglomerados (cluster analysis) y de componentes principales que evidenciaron las diferencias en la composición geoquímica de esta muestra, que presenta correlaciones positivas muy significativas entre los citados metales y el contenido de fósforo. Sánchez (2007). Todo ello presento un origen común de estos elementos, presumiblemente relacionado con las aguas ácidas provenientes de lavados de explotaciones mineras, como de las corrientes fluviales que drenan de la Franja Pirítica Ibérica y las descargas residuales de las plantas de fertilizantes localizadas en el área industrial de la ciudad de Huelva. Aunque el mayor suministro de sedimentos en el área de estudio corresponde al aporte del río Guadiana.

Hamouda y Wilson (1989). Analizaron los sedimentos superficiales de la bahía de Bengazi, Libia, los resultados muestran que solo la región portuaria presento niveles relativamente altos, particularmente en el caso de cadmio y cobre, los intervalos de concentración fueron 1.03-1.96% del contenido orgánico,  $8.7\text{--}42 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cu  $2.3\text{--}27.3 \text{ mg kg}^{-1}$  de Zn,  $5.7\text{--}19 \text{ mg kg}^{-1}$  de Ni,  $37\text{--}76.7 \text{ mg kg}^{-1}$  de Mn y de  $0.05 \text{ mg kg}^{-1}$  que es muy bajo límite de detección hasta  $1.73 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cd. Los resultados de los sitios analizados indican aportes antropogénicos para Cd y Cu.

Rodríguez-Figeroa (2004) realizo un estudio de sedimentos en el medio marino y en los materiales de los distintos ambientes continentales (arroyo, playa y desechos sólidos) del distrito minero de Santa Rosalía con el objetivo de conocer sus características geoquímicas y el grado de la influencia antropogénica. Existe cierto enriquecimiento natural en Co, Ni, Zn, As, Se, Sb, Ba, U y Hg en los materiales de arroyo que corresponde a la composición litogenética y a los emplazamientos

minerales de ésta región. En los restantes ambientes las concentraciones excedieron los niveles de referencia, generando anomalías de los oligoelementos mencionados, y otras de Cu, Cr, Sr, Cd y Pb relacionadas a la explotación y procesamiento del yacimiento de cobre que causaron el enriquecimiento adicional en los sedimentos de esta área. Para los elementos de las tierras raras (ETR) se obtuvieron los patrones de sus concentraciones normalizadas con la lutita norteamericana que exhiben el enriquecimiento de los ETR intermedios, sobresaliendo la anomalía positiva de Eu generalmente reportada como producto de efluentes hidrotermales lo cual coincide con la hipótesis del origen del yacimiento. Las distribuciones espaciales de la concentración en los sedimentos marinos revelan la existencia de tres zonas de acumulación para la mayoría de los elementos analizados: a) la dársena de Santa Rosalía, b) la desembocadura del arroyo El Boleo y c) la desembocadura del estero San Luciano.

Rodríguez-Meza (2004) reportó una concentración de carbonatos  $415 \text{ mg kg}^{-1}$  y de carbón orgánico 2 %. Los elementos reportados como altamente enriquecidos son Sb, Cd y As. (Factor de enriquecimiento  $> 10$ ). La distribución de los elementos en bahía Concepción destaca en dos zonas, una la de alto contenido de elementos como Rb, Cs, Ba, As, Sb, Th y la zona Central con Cr, Co, Ni, Zn, Cu, Se, U, Br, Zr. Para ambos casos los resultados se asocian a tres componentes:

- a) terrígeno que deriva de la cuenca de drenaje por eventos de precipitaciones pluviales.
- b) orgánico derivado de procesamientos de nutrientes de la actividad biológica planctónica y bentónica.
- c) carbonatos que se derivan de los fragmentos calcáreos (moluscos, plancton y algas coralinas).
- d) (otros) dentro de las actividades humanas que tienen mayor impacto en la zona costera, los cuales influyen con los aportes de concentraciones de metales en la columna de agua y sedimentos por instalación de refinerías, termoeléctricas y consecuentemente por las descargas de agua de desecho.

Adamou *et al.* (2005) y Caplat *et al.* (2005) encontraron en diferentes estudios que las zonas contaminadas con Cd, Cr, Cu, y Zn se localizaron en las áreas de construcción naval o en zonas cercanas a las refinerías y concluyen que los puertos generalmente reciben aportes de aguas residuales, tal es el caso del Puerto Kaohsiung en Taiwán. Ortega (1991), Describe que la distribución de los metales pesados en los sedimentos de la región noroccidental entre México y los Estados Unidos, está influenciada por el tamaño de grano. Esta zona de estudio presenta problemas de contaminación en los sedimentos por metales pesados debido a la problemática de las descargas residuales provenientes de ambas ciudades fronterizas San Diego (California) y Tijuana (B.C.).

Acosta-Leal (2008) considera que uno de los aspectos importantes en la caracterización de los sedimentos es conocer el tamaño de la partícula, el cual está relacionado con la materia orgánica, las partículas de grano fino tienden acumularse en la parte superficial generando la formación de láminas, con una mayor facilidad y más compactas, lo cual facilita la acumulación de contaminantes (De Groot *et al.*, 1982).

Rodríguez-Figueroa, G.M. (2004). Realizo un estudio de los sedimentos recientes del medio marino y los materiales de los distintos ambientes continentales (arroyo, playa y desechos sólidos) del distrito minero de Santa Rosalía. La acumulación de oligoelementos y elementos de las tierras raras (ETR) está representada por la siguiente secuencia: sedimentos de arroyo, arenas de playa, desechos sólidos. Los materiales de los arroyos pueden considerarse sin alteración antropogénica, los sedimentos de playa como enriquecidos y los desechos sólidos como materiales altamente contaminados. Para los elementos de las tierras raras (ETR) se obtuvieron los patrones de sus concentraciones normalizadas con la lutita norteamericana que exhiben el enriquecimiento de los ETR. Las distribuciones espaciales de la concentración en los sedimentos marinos revelan la existencia de tres zonas de acumulación para la mayoría de los elementos analizados: a) la dársena de Santa Rosalía, b) la desembocadura del arroyo El Boleo y c) la desembocadura del estero San Luciano. En estas áreas se mostró tendencia de disminución de la concentración de los elementos en los sedimentos marinos con el aumento de la distancia a la costa.

F. Páez *et al* (1990), realizaron un estudio para investigar la composición geoquímica de los metales pesados en los sedimentos del Golfo de California y colectaron 48 núcleos y 85 muestras superficiales, tomadas en cuatro cruceros oceanográficos (PALEO-1, PALEO-2, BERMEJO-1 y CORTES-2). Se dividieron los núcleos a bordo en secciones de 5 cm y medió el potencial redox y pH. Posteriormente en el laboratorio se analizaron los sedimentos respecto al contenido de metales pesados y carbono orgánico. La concentración de los metales como (Cu, Ni, Co, Cr, Zn, Pb, Cd, Ag, Mn, Fe y Al) mostró una tendencia a aumentar hacia la boca del golfo. Los niveles más elevados de Cd coinciden con los sedimentos que interceptan la capa del mínimo oxígeno.

Ortega (2003) realizó un estudio en las lagunas costeras Lobos, Algodones y Guásimas del estado de Sonora, México para determinar la concentración y distribución de sulfuros y sulfatos en las fases líquida y sólida de núcleos cortos (de 0 a 70 cm.), del sedimento, así como la distribución de pirita. Adicionalmente determinó carbono orgánico oxidable, potencial de hidrógeno (pH), porcentaje de agua y porosidad. Se apreció la existencia de cambios espaciales y temporales para sulfatos, sulfuros y pirita. El del grado de piritización del sedimento indicó que relativamente poco hierro del sedimento ha sido transformado a pirita y que hierro no es un factor limitante en su formación. Además se determinó la velocidad de formación de pirita a partir de la reducción de sulfato y se apreció que la velocidad disminuye a medida que se incrementa la profundidad del núcleo. Las tasas de sedimentación obtenidas a través del modelo diagenético utilizado, expresan que la materia orgánica presente en estos cuerpos costeros es más reactiva y las tasas de descomposición correspondientes son más altas, debido a que las condiciones anóxicas en los primeros centímetros de profundidad del sedimento son muy frecuentes.

Acosta-Vargas (2002), describe en un su estudio de sedimentos de la Bahía de Guaymas altas concentraciones Pb, Cd y Zn asociados a las antiguas descargas municipales y cerca de los astilleros. Las concentraciones más altas de manganeso y de hierro fueron encontrados en un costado del muelle fiscal y las más altas concentraciones de níquel en el paraje, y cerca de las instalaciones de la CFE.

## **5 Justificación**

Los ciclos biogeoquímicos de los elementos son controlados por la interacción de procesos químicos, físicos, biológicos y geológicos de los océanos con los de la corteza y la atmósfera. Estos ciclos globales controlan los flujos de materia (particulada y disuelta) y energía entre éstos compartimentos mayores. En el ambiente marino, los sedimentos son el reservorio final de los elementos, sus patrones sedimentarios registran la variabilidad en espacio y tiempo de los procesos biogeoquímicos actuales y pasados, que controlan su composición, su acumulación y sus transformaciones así como la preservación de los elementos terrígenos (ET) en el sedimento o su intercambio con el sistema. Además, los sedimentos permiten inferir el impacto antropogénico, considerado como un factor importante de alteración de los ciclos biogeoquímicos naturales. En éste contexto, el estudio de la composición, distribución y concentración de elementos terrígenos (ET) de ambientes sedimentarios costeros con influencia antropogénica como el de la bahía de Guaymas es importante para distinguir entre zonas con características biogeoquímicas naturales del sedimento, de las modificadas debidas a procesos de contaminación.

## **6 Objetivos**

### **6.1 Objetivo general**

Caracterización geoquímica de los sedimentos superficiales del complejo lagunar de la Bahía de Guaymas (estero del Rancho, laguna de Empalme, bahías Interior y bahía Exterior) y la evaluación antropogénica causada por las descargas al ambiente marino.

### **6.2 Objetivos particulares**

- a. Determinar la concentración de los elementos traza y elementos de tierras raras en los sedimentos del sistema lagunar de Guaymas Empalme, Sonora.
- b. Caracterizar el tamaño de grano en base al análisis de textura de los sedimentos y elaborar su mapa de distribución del complejo lagunar de Guaymas Empalme Sonora.

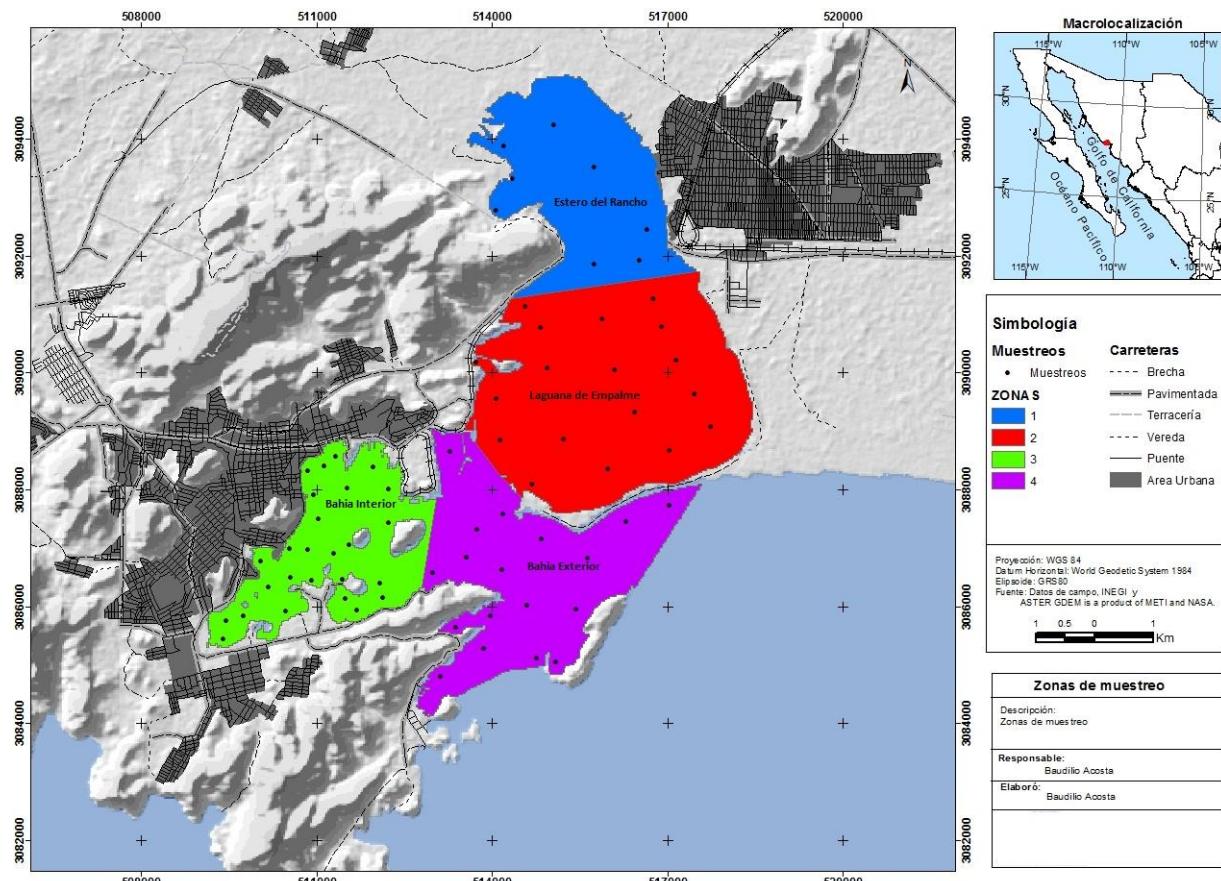
- c. Determinar el contenido de carbonatos de calcio y de materia orgánica en sedimentos del sistema lagunar, identificando los sitios de mayor acumulación a través de un mapa de distribución.
- d. Identificar las zonas impactadas antrópicamente por los elementos trazas y elementos de tierras raras a través de la elaboración de los mapas de distribución utilizando las concentraciones de los elementos que se encuentren enriquecidos en el sistema lagunar de la bahía de Guaymas.
- e. Normalizar los lantánidos y calcular los Índices de geoacumulación ( $I_{geo}$ ) en los sedimentos superficiales tomando de referencia la composición química de la Lutita Norteamericana.

## 7 Metodología

### 7.1 Muestreo de Sedimentos

En el sistema lagunar Guaymas-Empalme se definieron con la ayuda de la Secretaría de Marina (SEMAR) 70 estaciones con un geoposicionador Magellan 315. Las estaciones fueron establecidas tanto en sitios cercanos a efluentes con actividades antropogénicas como en áreas que aparentemente no presentan problemas de contaminación, el muestreo de los sedimentos superficiales se realizó en julio del 2010.

Para este estudio se dividió la bahía de Guaymas en 4 zonas de acuerdo a un estudio realizado por Pedrín Avilés et al., (2006) donde separan las zonas en base a la clasificación textural y las denomina como el estero del Rancho parte norte de la bahía, laguna de Empalme, bahía Interior (lugar donde drena la Ciudad de Guaymas en épocas de lluvias) y la parte de la entrada a la bahía de Guaymas (bahía exterior)



Los sitios de muestreo fueron distribuidos de manera aleatoria, además incluyeron algunos sitios que según SEMAR representaron sitios de posibles contaminaciones. Las muestras de sedimentos se tomaran con una draga manual de acero inoxidable (tipo Petit Ponar, marca Wildco), cubierta de pintura epóxica para evitar la contaminación de la muestra. Se tomó un kilogramo del centro de la draga lo cual se partió y almacenó en dos bolsas de plástico etiquetadas y congeladas hasta su análisis.

La FIGURA 15 muestra la localización de los 70 sitios de sedimentos marinos superficiales en el Sistema Costero Guaymas Empalme, Sonora.

## **7.2 Pre-tratamientos de muestras**

En el laboratorio se deshidrato una bolsa de las muestras a 60°C por 36 horas posteriormente el material fue tamizado para estandarizar a un mismo tamaño de grano (100 mesh). Se homogenizo y se fracciono el material, utilizando la técnica de cuarteo y se seleccionaron los cuartos opuestos para su análisis (Álvarez *et al.*, 2002). Posteriormente se guardaron las muestras en bolsas de polietileno, para realizar los siguientes análisis. Carbón orgánico, carbonatos, elementos mayores y menores y elementos trazas.

## **7.3 Análisis Granulométrico**

Se realizó el siguiente procedimiento de análisis de tamaño de partícula con el auto analizador *laser Horiba*.

Para eliminar la materia orgánica presente en las muestras se colocan 5 a 10 gramos de muestra seca en un matraz Erlenmeyer de 250 ml adicionado posteriormente 30 ml de peróxido de hidrogeno al 30 % si después de 15 minutos la muestra presentó burbujeo se le adicionan otros 30 ml de peróxido de hidrogeno, posteriormente se re-suspendió en hexametafosfato de sodio al 0.2 % y se analizó en el auto analizador *laser Horiba*.

## **7.4 Determinación del contenido de materia orgánica oxidable.**

Para la determinación del contenido de materia orgánica oxidable (MOox) se empleó el método de oxidación parcial de las muestras con  $K_2Cr_2O_7$  1M en medio ácido. Se calculó el contenido de C orgánico valorando el exceso de  $K_2Cr_2O_7$  con  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$  0,5M (sal de Mohr) utilizando difenilamina como reactivo indicador

(Walkley y Black, 1934). Para ello, se introdujo un gramo de muestra en un matraz Erlenmeyer de 500 ml, se añadieron 10 ml de una solución de  $K_2Cr_2O_7$  1M con agitación y 20 ml de  $H_2SO_4$  concentrado. Se dejó en reposo durante 30 minutos y después se añadieron 200 ml de  $H_2O$ , permitiendo que la mezcla de reacción alcanzara temperatura ambiente. Tras añadir 10 ml de  $H_3PO_4$  y 1 ml de difenilamina, se procedió a la valoración del exceso de dicromato no reducido mediante la solución de sal de Mohr ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) 0,5M. Paralelamente, se analizaron blancos y el porcentaje de C-orgánico se calculó mediante la fórmula:

$$C (\%) = [(V_b - V_m) \times 3,90] / V_{bt}$$

Donde  $V_b$  y  $V_m$  son el volumen en ml de sal de Mohr añadido al blanco y a la muestra de suelo, respectivamente y  $V_{bt}$  el volumen del blanco teórico (20 ml). El C-orgánico se puede expresar como MOox multiplicando su valor por el factor 1,724 propuesto por Walkley (1947).

## 7.5 Análisis de metales totales por activación neutrónica

El análisis por activación neutrónica instrumental (AANI) es una técnica nuclear que permite la determinación cuantitativa de un gran número de elementos: Las ventajas que tiene con respecto a otros métodos analíticos, son:

- a) es una técnica instrumental no destructiva,
- b) entrega en forma simultánea información multielemental,
- c) para varios elementos se obtienen límites de detección que van desde las partes por millón hasta las partes por billón.
- d) es un método basado en procesos que tienen lugar en el núcleo atómico.
- e) el estado físico y químico de los elementos no influye en el resultado final.
- f) la ausencia de pre-tratamiento de la muestra la hace adecuada para el análisis de trazas.

El empleo de AANI ha permitido usarla ampliamente en diversas investigaciones cuya calidad en el análisis es alta, tanto para sedimentos como otras matrices (biota). La técnica aplicada consistió en secar el material a 60°C tamizar y homogenizarlo para trabajar con la fracción menor a 200  $\mu m$ . Las muestras y los materiales de referencia estándar fueron empaquetados en papel de aluminio e irradiados con neutrones

termales (flujo  $2.8 \times 10^{13}$  n/s cm<sup>2</sup>). La radiactividad inducida de cada muestra, posteriormente fue medida 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 fueron usadas para la calibración instrumental (<sup>152</sup>Eu). Con este método fue posible obtener el contenido de As, Ba, Br, Co, Cr, Cs, Hf, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Th, U y los elementos del grupo de tierras raras La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu en los sedimentos. El análisis de las muestras se realizó en el Instituto de Geoquímica y Química Analítica de V.I. Vernadski de la Academia de Ciencias de Rusia (Moscú, Rusia). Para verificar la calidad del análisis se usaron los conceptos de la exactitud o recuperación, que se obtuvo analizando los materiales de referencia estándar del NIST E.U.A. 1646a para sedimento estuarino. Para la exactitud del análisis del elemento se determinó error, obtenido al analizar el material de referencia estándar:

## **7.6 Análisis de metales totales por espectrofotometría de absorción atómica**

No todos metales pesados y elementos traza se determinaron por la técnica AANI, ya que varios elementos no forman isótopos radioactivos al capturar el neutrón, permaneciendo como isótopos estables. Además algunos isótopos inducidos no emiten la radiación gamma, que fácilmente se miden con la gamma-espectrómetro. De igual forma, otros isótopos también presentan dificultad para ser medidos debido que tienen vida media muy corta y durante el periodo de transportación, o con cierto tiempo de “enfriamiento” de las muestras irradiadas bajan su radioactividad inicial. En particular, no pueden medirse con este método metales pesados muy importantes en geoquímica ambiental, tales como Cd, Ni, y Zn, así como el Al y Li que son indicadores de la procedencia natural continental de los materiales sedimentarios.

Para completar el grupo de los metales estudiados se utilizó el método de espectrometría de absorción atómica una vez que los sedimentos fueron digeridos totalmente con ácidos fuertes en un horno de microondas Mars 5x utilizando el método de EPA 3052 utilizando 8 ml de HNO<sub>3</sub> grado traza. El sedimento fue homogenizado

en un mortero de porcelana y se pesó una fracción de 0.5000 mg en una balanza analítica. La digestión se realizó de acuerdo al método descrito por EPA 3052.

Para comprobar la eficiencia de los análisis realizados por los métodos de Análisis por Activación Neutrónica Instrumental (AANI) y espectrofotometría de absorción atómica (EAA) se analizaron junto con el lote de 70 muestras del complejo Lagunar de Guaymas 2 estándares de referencia certificados.

Los estándares certificados fueron los siguientes (Tabla 2): PACS-1 (sedimento marino, Consejo Nacional de Investigación, Canadá), 1646a (sedimento estuarino, Departamento de Comercio, E.U.A., Instituto Nacional de Estándar y Tecnología. Gaithersburg, M. D. 20899).

Tabla 2. Porcentajes de recuperación de los estándares PACS-1 y 1646<sup>a</sup>.

Elemento	PACS-1	NIST 1646a	método
As	107	108	AANI
Ca	101	97	AANI
Fe	104	99	AANI
Ti	111	108	AANI
Sb	107	106	AANI
Ba	-	99	AANI
Ce	-	102	AANI
La	-	105	AANI
Mo	98	106	AANI
Rb	99	103	AANI
Sc	-	101	AANI
Sr	104	101	AANI
Th	-	106	AANI
U	-	104	AANI
Cd	96	97	EAA
Cr	99	96	EAA
Mn	95	92	EAA
Zn	109	104	EAA
Co	100	98	EAA
Nd	-	103	AANI

## **Factor de enriquecimiento (FE)**

El factor de enriquecimiento (FE) ha sido utilizado en estudios de ecotoxicología y química ambiental como marco de referencia para reconocer las variaciones naturales de un elemento. Se considera los elementos más abundantes de la corteza terrestre tales como Sc, Al, Si y Fe (Lawson y Winchester, 1979; Poissant *et al.*, 1994; Stiotyk *et al.*, 2002). El modelo del factor de enriquecimiento se representa para el Escandio como:

(M)<sub>i</sub>=concentración del metal en la muestra de sedimento;

(E)<sub>i</sub>=concentración Sc en la muestra de sedimento;

(M)<sub>r</sub>=contenido promedio del metal en la corteza;

(E)<sub>r</sub>=concentración de Sc en la corteza terrestre.

Tabla 3. Clasificación de los elementos de acuerdo al factor de enriquecimiento (FE).

Valor	Intensidad de enriquecimiento
$\geq 2$	Elementos conservativo
$2 < \text{FE} \leq 10$	Elementos enriquecido
$> 10$	Elementos Altamente enriquecido

Para determinar el factor de enriquecimiento se utilizó los datos reportados por Taylor (1964) para la corteza continental.

$$\text{FE} = [\text{EL sedimento}/\text{Sc sedimento}]: [\text{EL corteza}/\text{Sc corteza}]$$

FE = factor de enriquecimiento

EL sedimento = concentración de los elementos en los sedimentos

Sc sedimento = concentración del escandio en los sedimentos

EL corteza = concentración del elemento en la corteza continental superior

Sc corteza = concentración de escandio en la corteza continental superior

## 7.7 Cálculo del Índice de geoacumulación

Se calculó el índice de geo acumulación de Müller (1979) con la siguiente fórmula

$$I_{geo} = I_{geo2} \left( \frac{Cn}{1.5 * Bn} \right)$$

Donde Cn es la concentración del elemento, Bn es el promedio de las concentraciones menores del valor promedio propuesto por Wedepholt (1995) este promedio se multiplica para eliminar las variaciones con la granulometría con la siguiente escala de valores. Loska *et al.* (1997).

Igeo<0	No contaminado
<0 Igeo<2	No contaminado o moderadamente contaminado
2< Igeo <3	Moderadamente a fuertemente contaminado
3< Igeo<4	Fuertemente contaminado
4< Igeo<5	Fuertemente a muy fuertemente contaminado
5< Igeo<6	Muy fuertemente contaminado
Igeo>6	Extremadamente contaminado

## 7.8 Normalización de los elementos de tierras raras

La normalización de los elementos de tierras raras fue realizada con valores para lutita norteamericana dados por Taylor y McLennan (1985). Este procedimiento es útil para conocer si existe algún enriquecimiento de estos elementos por encima de los valores normales de la corteza, la ecuación que permite calcular este valor es la siguiente:

Donde:

$$N = \frac{El_{sedimento}}{El_{lutita}}$$

N= valor normalizado de elemento;

El <sub>sedimento</sub> = concentración del elemento en los sedimentos;

El <sub>lutita</sub> = concentración del elemento en la lutita  
norteamericana.

El Ce y el Eu pueden cambiar sus estados de oxidación en procesos naturales y separarse de otros elementos de tierras raras (ETR). El Ce se comporta en su

oxidación en una manera similar a la del Mn (+2) a Mn (+4). Por lo tanto es fácilmente oxidado al estado de oxidación (+4) en ríos y agua de mar saturados con oxígeno y reducido como el Mn en condiciones anaeróbicas (Bau y Dulski, 1999). Por otro lado el Eu, en condiciones anaeróbicas todavía no se demuestra una evidencia clara a la reducción de Eu (+3) a Eu (+2). El estado de oxidación +2 es común para el Eu en los procesos magmáticos, metamórficos e hidrotermales como se ha observado en la Península de Baja California (Shumilin *et al.*, 2005).

### Lutitas

La lutita es una roca sedimentaria compuesta por partículas del tamaño de la arcilla y del limo. Estas rocas detríticas de grano fino constituyen más de la mitad de todas las rocas sedimentarias. Las partículas de estas rocas son tan pequeñas que no pueden identificarse con facilidad sin grandes aumentos y por esta razón, resulta más difícil estudiar y analizar las lutitas que la mayoría de las otras rocas sedimentarias.

La lutita norteamericana es un tipo de patrón que muestra un comportamiento lineal en los sedimentos, ya que se calcula con la razón ( $EI_{muestra}/EI_{corteza}$ ) e indica una procedencia continental (Rodríguez-Meza, 2005). Además este comportamiento presenta un abundancia similar al de los ETR en la lutita norteamericana (Dubinin, 2004).

### 7.9 Elaboración de mapas

Los mapas de distribución espacial de la concentración de los elementos mayores y trazas, se elaboraron con el programa Arcgis 10.1 utilizando IDW (Inverse Distance Weighted (ponderación por distancia)) es un método que se fundamenta en asignar pesos a los datos muestreados que van a ser interpolados para determinar el dato central en función inversa a la distancia que los separa (Giraldo-Henao, 2003; Álvarez-Osorio *et al.*, 2011). La fórmula es:

$$\hat{Z}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot z_i \quad (1)$$

Donde  $\hat{Z}_j$  ^es el valor estimado para el punto j,n el número de puntos necesarios para interpolación,  $z_i$  el valor en el punto i-esimo y j. Los pesos k varían entre 0 y 1 para cada dato y la suma total de ellos es la unidad.

La función de proporcionalidad entre peso y distancia se muestra en la siguiente formula

$$\hat{Z}_j = \frac{\sum_i \frac{z_i}{d_{ij}^B}}{\sum_i \frac{1}{d_{ij}^B}} \quad (2)$$

La fórmula del peso  $k_{ij}=1/d_{ij}^B$  y un exponente de ponderación que controla la forma en la que el peso asignado al dato disminuye con la distancia, es decir que si el exponente o la potencia disminuyen los pesos asignados serán menores, por el contrario, si la potencia aumenta la diferencia en los pesos será mayor (Drojo, 2008; Álvarez-Osorio *et al.*, 2011).

## 8 RESULTADOS

### 8.1 Granulometría

Se analizó la textura de 70 muestras de los sedimentos del sistema costero Guaymas-Empalme. El tamaño de grano abarco desde arenas medias a muy finas. Los limos predominaron con (72.67 %) en la laguna de Empalme en la zona del Estero del Rancho y (71.24 %); la zona con menor porcentaje de limos fueron la Bahía Interior (puerto) (2.11 %) y la boca de la entrada a la Bahía Exterior (0.36 %); ver FIGURAS 16-19

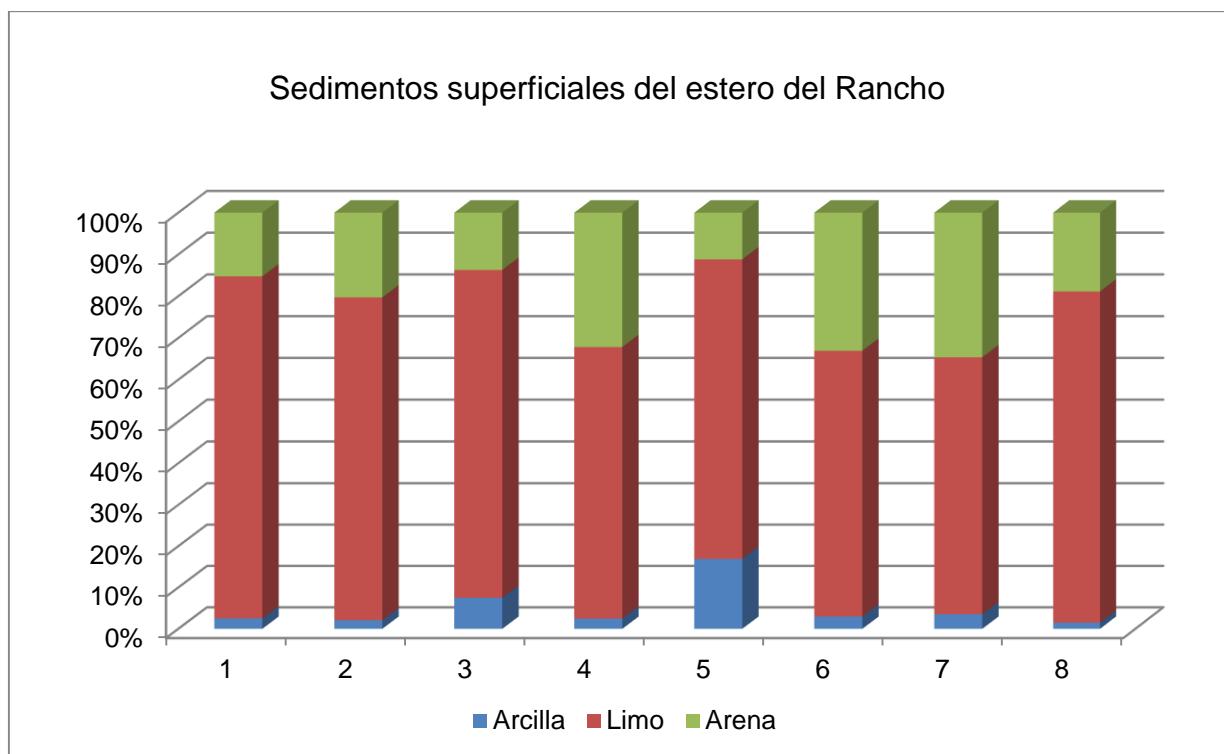


FIGURA 17. Porcentajes de distribución de los sedimentos superficiales del estero del Rancho.

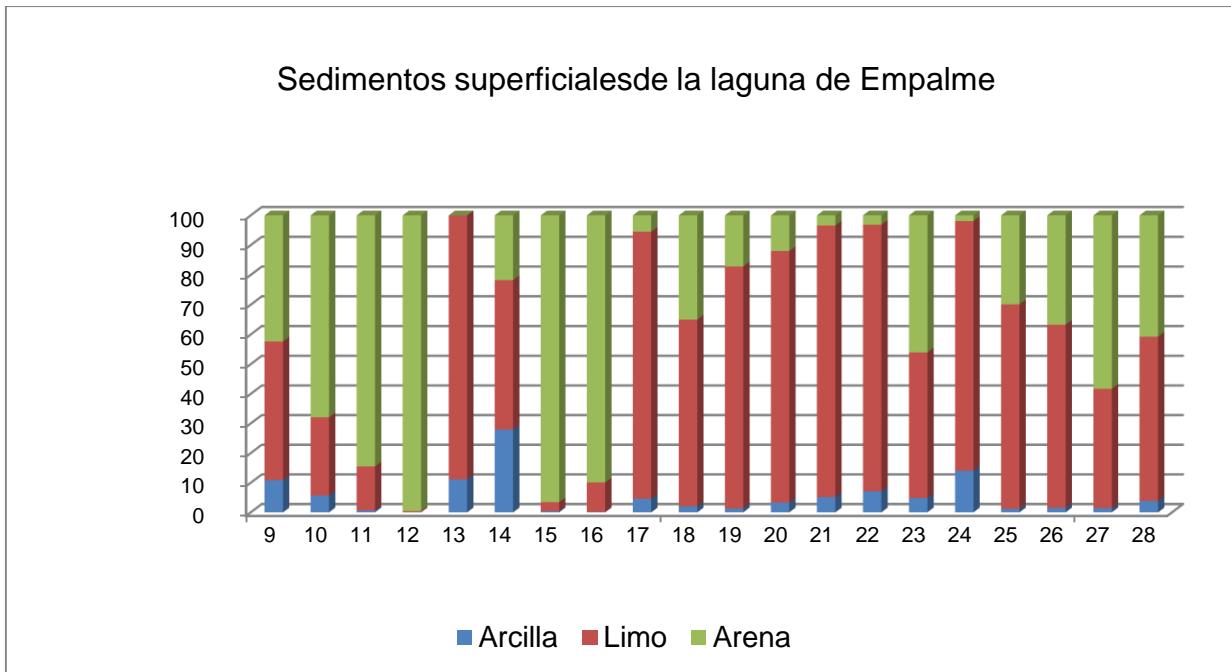


FIGURA 18. Porcentaje de distribución de Sedimentos superficiales de la laguna de Empalme.

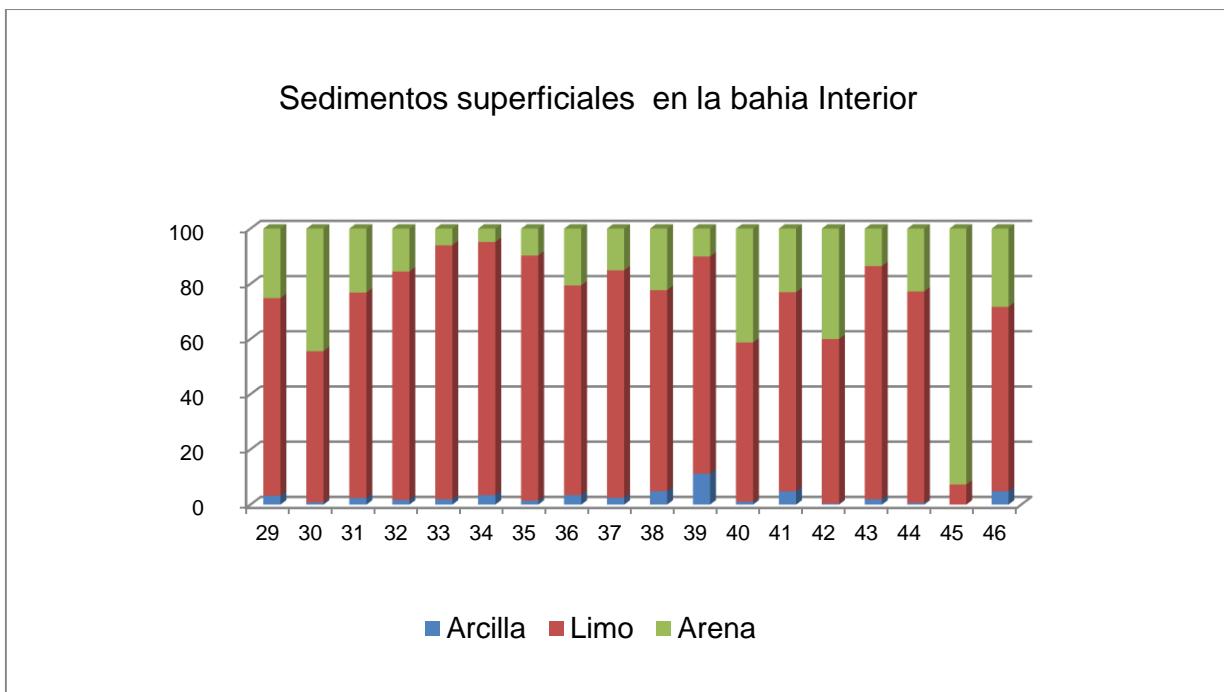


FIGURA 19. Porcentajes de distribución de los sedimentos superficiales de la bahía Interior.

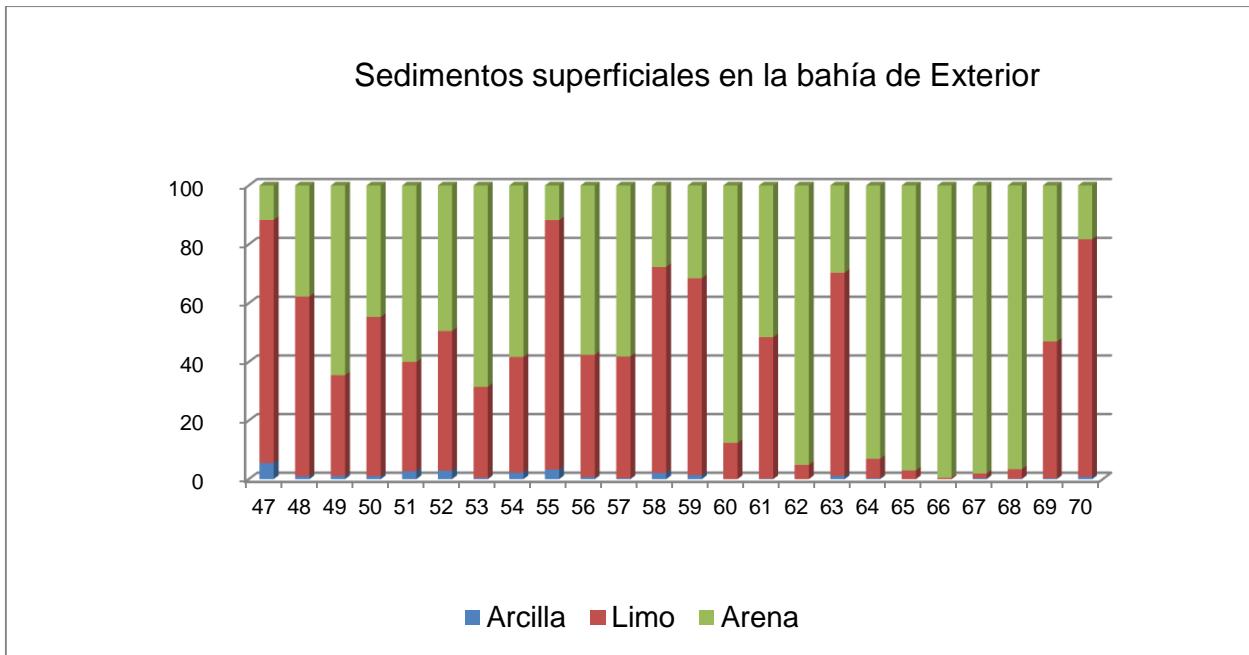


FIGURA 20. Porcentajes de distribución de los sedimentos superficiales en la bahía Exterior.

En el interior del sistema lagunar se obtuvo un predominio de los limos (54.73 %), con respecto a las arenas (42.22 %) y las arcillas (3.06 %) (Figuras 16 a 19). En la zona del estero del rancho predominan los limos (Tabla 4).

### Valores de limos arenas y arcillas de los sitios del complejo lagunar de la bahía de Guaymas

Los datos granulométricos obtenidos se representan gráficamente para cada una de las 70 muestras de los sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas obteniéndose los siguientes resultados de textura (Tabla 4). Abarcando el tamaño de sedimento desde arcillas, limos y arcillas.

Tabla 4. Caracterización de los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas en base a sus porcentajes de arena, limo y arcilla.

sitio	% arcilla	% limo	% arena	muestra	% arcilla	% limo	% arena
1	2.52	82.24	15.25	36	3.47	75.97	20.57
2	2.06	77.65	20.30	37	2.52	82.40	15.08
3	7.51	78.79	13.71	38	4.87	72.87	22.27
4	2.48	65.35	32.18	39	11.23	78.67	10.10
5	16.92	71.90	11.18	40	1.04	57.72	41.25
6	2.97	63.96	33.08	41	4.82	72.14	23.04
7	3.51	61.86	34.63	42	0.35	59.63	40.03
8	1.49	79.66	18.86	43	1.94	84.50	13.57
9	10.86	46.75	42.39	44	0.64	76.58	22.79
10	5.67	26.42	67.91	45	0.00	7.27	92.73
11	0.67	14.82	84.52	46	4.83	66.83	28.35
12	0.00	0.43	99.58	47	5.49	82.78	11.73
13	11.10	88.91	0.00	48	1.02	61.25	37.74
14	27.94	50.33	21.73	49	1.11	34.36	64.53
15	0.42	3.02	96.56	50	1.07	54.27	44.66
16	0.13	9.98	89.89	51	2.69	37.30	60.01
17	4.57	89.94	5.49	52	2.89	47.66	49.45
18	2.06	62.89	35.05	53	0.42	31.09	68.50
19	1.31	81.52	17.17	54	2.21	39.48	58.32
20	3.28	84.73	11.99	55	3.25	84.98	11.76
21	5.17	91.41	3.43	56	0.69	41.73	57.58
22	7.09	89.77	3.14	57	0.32	41.55	58.13
23	4.83	49.13	46.04	58	2.11	70.20	27.70
24	14.07	83.99	1.94	59	1.39	67.08	31.54
25	1.21	68.90	29.90	60	0.00	12.36	87.65
26	1.51	61.75	36.74	61	0.15	48.29	51.56
27	1.42	40.26	58.32	62	0.00	4.87	95.14
28	3.85	55.40	40.76	63	1.10	69.24	29.66
29	3.26	71.57	25.18	64	0.28	6.66	93.06
30	0.81	54.78	44.41	65	0.00	2.98	97.02
31	2.43	74.42	23.16	66	0.00	0.44	99.57
32	1.71	82.74	15.55	67	0.31	1.62	98.07
33	1.95	92.02	6.04	68	0.15	3.24	96.62
34	3.46	91.71	4.83	69	0.28	46.69	53.03
35	1.47	88.79	9.74	70	0.76	80.96	18.29

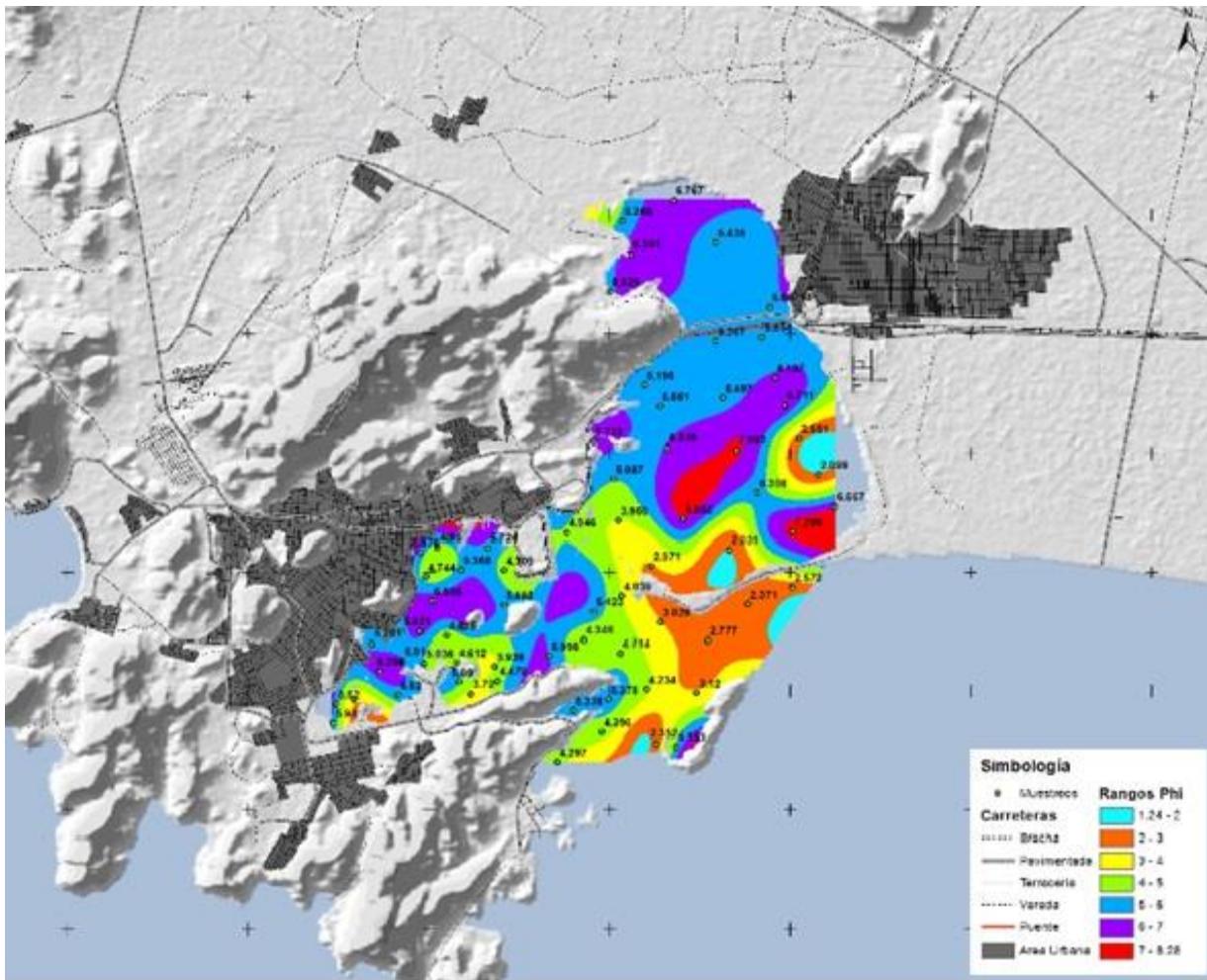


FIGURA 21. Distribución espacial del tamaño de grano en sedimentos del sistema costero Guaymas-Empalme Sonora.

Por otro lado, las arenas gruesas a muy gruesas se detectaron en la porción central de la Bahía Ohuira, probablemente por el aporte continental como producto del intemperismo en la cuenca de drenaje, (por escorrentimientos en época de lluvia y por la intensidad de las corrientes). En la zona del canal se presentan las mayores profundidades lo cual probablemente favorece la acumulación de material calcáreo y sedimento grueso (Secretaría de Marina, 1991).

El intervalo del tamaño medio de los sedimentos de la bahía de Guaymas presentan 2.03 - 7.1 phi (FIGURA 20). El valor promedio (5.02 phi) corresponde a limos gruesos (el promedio general de las muestras, 55.96 %, corresponde a limos gruesos). El valor más común de phi es cercano al promedio general (alrededor de 5.37 phi) y

corresponde a limos finos (42.91% de los casos corresponde a limos finos). Las concentraciones de materiales finos (limos y arcillas) se encuentran en la zona media de la laguna de Empalme y en el estero del Rancho, y también en la parte central de la zona de la bahía interior. Las zonas con mayores porcentajes de arenas se encuentran en la zona sur de la bahía Guaymas.

El porcentaje de los tamaños de las arenas en los sedimentos es un parámetro muy significativo en la bahía de Guaymas,

En la bahía de Guaymas los porcentajes de arcilla varían entre 0% y 2.98%. En la ( Tabla 5) se observa que en la laguna de Empalme y en el estero del Rancho se encuentran el mayor porcentaje promedio de los distintos tamaños de arcillas. Con valores de 4.93 % a 5.36 %

## **8.2 Porcentajes de materia orgánica, carbón orgánico y carbonatos en sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas**

En el estero del Rancho la media de m.o. es de 2.42 % con un máximo de 3.64% y el mínimo de 0.95 % (tabla 5). El C-total presento una media de (3.40%), con un máximo y mínimo 5.20 % y 1.36 % respectivamente la media para carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) fue 3.41 % con máximo de 7.33 % y un mínimo de 0.63 %.

Tabla 5. Porcentajes de materia orgánica, carbón orgánico y carbonatos en los sedimentos superficiales en la zona del estero del Rancho.

sitio	m.o	C-total	$\text{CO}_3$
1	0.95	1.36	0.67
2	2.98	4.27	2.08
3	2.49	3.56	1.5
4	1.89	2.70	6.83
5	2.4	3.43	4.33
6	2.91	4.15	1.92
7	3.64	5.20	2.58
8	2.11	3.02	7.33
9	1.91	2.73	24.5

En (Tabla 6) se muestran los valores de la laguna de Empalme con los porcentajes promedio de carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) de 9.29 % con un máximo registrado en el sitio 9 (24. 50%) que se encuentra a un costado del puente Douglas; el porcentaje mínimo fue de (0.67 %). En la m.o. el valor promedio es de 3.17% con un máximo de 4.63 % y un mínimo de 0.16 %. El carbono total presenta una media de 3.30 % un máximo de 6.61 % y un mínimo de 0.23%.

Tabla 6. Porcentajes de materia orgánica, carbono total y carbonatos en los sedimentos superficiales en la zona de la laguna de Empalme.

sitio	m.o.	C-total	$\text{CO}_3^{2-}$
11	0.87	1.25	18.42
12	0.16	0.23	1.00
13	1.46	2.09	8.58
14	0.7	1.00	2.33
15	0.38	0.55	0.67
16	0.51	0.72	3.00
17	3.37	4.82	4.17
18	2.96	4.23	3.67
19	3.46	4.94	5.58
20	4.63	6.61	3.92
21	2.63	3.76	14.25
22	3.04	4.34	5.83
23	2.36	3.38	17.33
24	2.75	3.93	5.83
25	2.98	4.26	7.5
26	3.67	5.25	11.67
27	3.3	4.72	8.00

En la (Tabla 7) se muestra los valores de bahía Interior, la m.o. Presento una media de 4.61 % con un máximo de 9.78 % y un mínimo de (1.66 %). El carbono total presenta una media de 6.60%, con un máximo de 14.0% y un el mínimo de 2.4 %, la media de los carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) fue 1.98%, con un máximo de 58.42 % y un mínimo de 0.25 %.

Tabla 7. Porcentajes de materia orgánica, carbono total y carbonatos en los sedimentos superficiales en la bahía Interior.

sitio	m.o.	C-total	$\text{CO}_3^{2-}$
29	3.04	4.34	6.42
30	6.60	9.43	10.75
31	5.47	7.81	6.08
32	9.78	13.98	8.83
33	5.16	7.37	20.92
34	4.48	6.40	3.08
35	4.26	6.09	23.58
36	5.49	7.84	0.92
37	3.79	5.42	0.67
38	5.47	7.82	1.33
39	6.26	8.95	1.67
40	5.23	7.47	1.25
41	6.21	8.87	1.58
42	7.38	10.55	3.00
43	5.62	8.03	1.83
44	3.30	4.72	39.58
45	1.68	2.40	58.42
46	6.14	8.77	0.92
47	4.88	6.97	0.25
48	2.37	3.39	7.25
49	1.66	2.37	33.67
50	3.35	4.79	26.42
51	4.91	7.02	19.67
52	3.03	4.33	29.33
53	2.33	3.33	49.17
54	1.99	2.80	50.83

En la bahía Exterior (Tabla 8) presentan valores de la m.o. con una media de 1.59%, un máximo de 4.54 % y un mínimo de 0.26 %. El carbono total presenta una media de 2.67% un máximo de 11.673% y un mínimo de 0.38 %. La media de los carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) fue de 21.30 % siendo el máximo 58.33 % el mínimo 0.58 %.

Tabla 8. Porcentajes de materia orgánica, carbono total, carbonatos y carbón total en los sedimentos superficiales en la bahía exterior.

sitio	m.o.	C-total	$\text{CO}_3^{2-}$
10	1.02	1.46	22.92
28	3.63	5.19	15.67
55	4.54	6.50	2.17
56	1.87	2.67	31.33
57	1.24	1.77	20.17
58	3.18	4.54	29.92
59	2.40	3.43	37.33
60	0.63	0.90	44.00
61	1.38	1.97	41.83
62	0.61	0.88	53.33
63	3.24	11.67	7.08
64	0.72	1.03	3.83
65	0.40	0.57	15.25
66	0.34	0.49	2.17
67	0.26	0.38	1.42
68	0.29	0.41	0.58
69	1.30	1.86	23.33
70	1.62	2.31	31.00

### 8.3 Distribución espacial de carbonatos de calcio

La distribución del contenido de carbonato en los sedimentos se presenta en la (FIGURA 22) los valores más altos fueron los de la zona de la bahía interior, (27.07 %) seguidos por la bahía exterior (10.58 %), la laguna de Empalme (9.29 %) y el estero del Rancho (3.41 %).

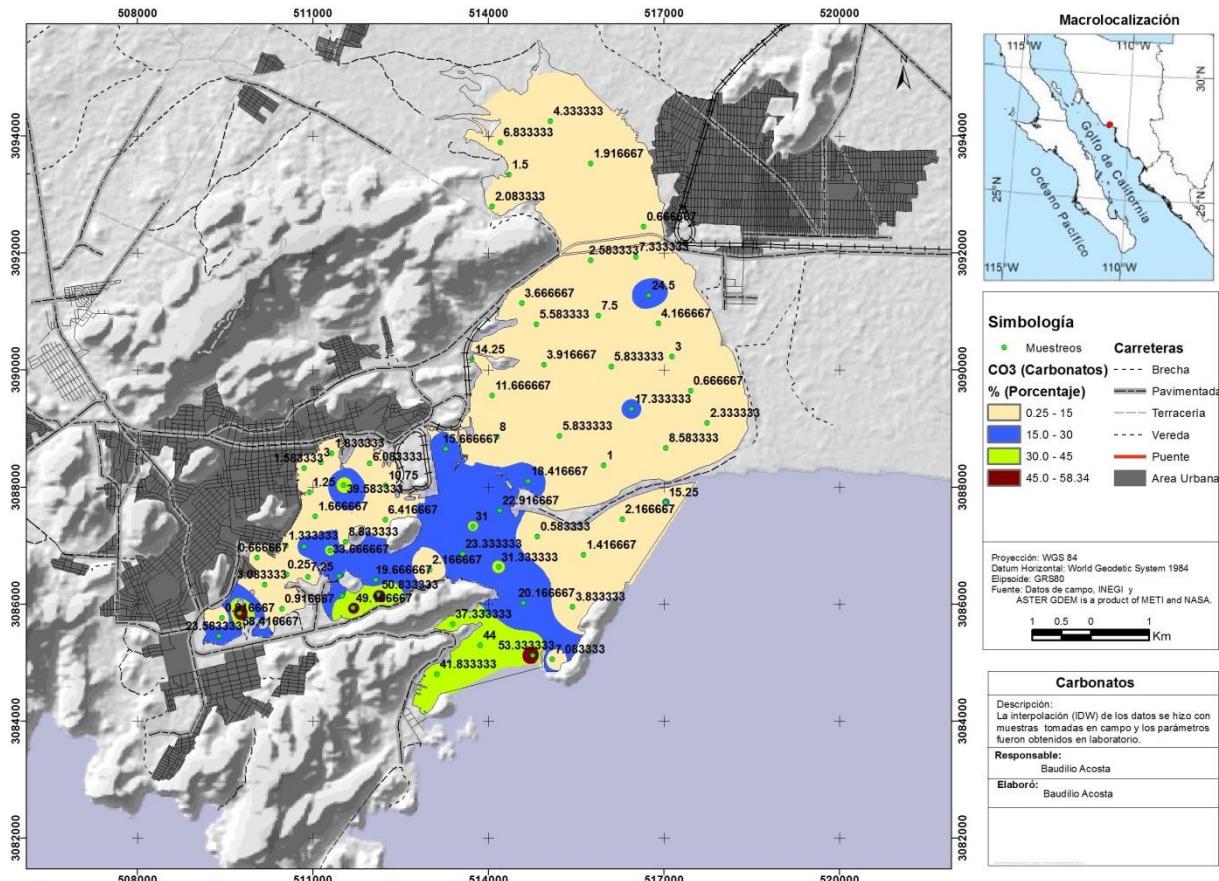


FIGURA 22. La distribución espacial de carbonatos en los sedimentos en la bahía de Guaymas-Empalme, Sonora.

## 8.4 Distribución espacial de la materia orgánica

El promedio general de materia orgánica para el complejo lagunar de la bahía de Guaymas Empale Sonora es de 2.99%; El valor más alto de materia orgánica se ubica en el sitio 32 (9.78 %) mientras el valor más bajo se ubica en el sitio 12 (0.16 %); el valor promedio de materia orgánica para el estero del rancho corresponde a 2.42%, la laguna de Empalme presenta un promedio de 3.17 % la Bahía interior con un promedio de materia orgánica de 3.06 %. Y el promedio para la Bahía exterior es 1.59 (FIGURA 23).

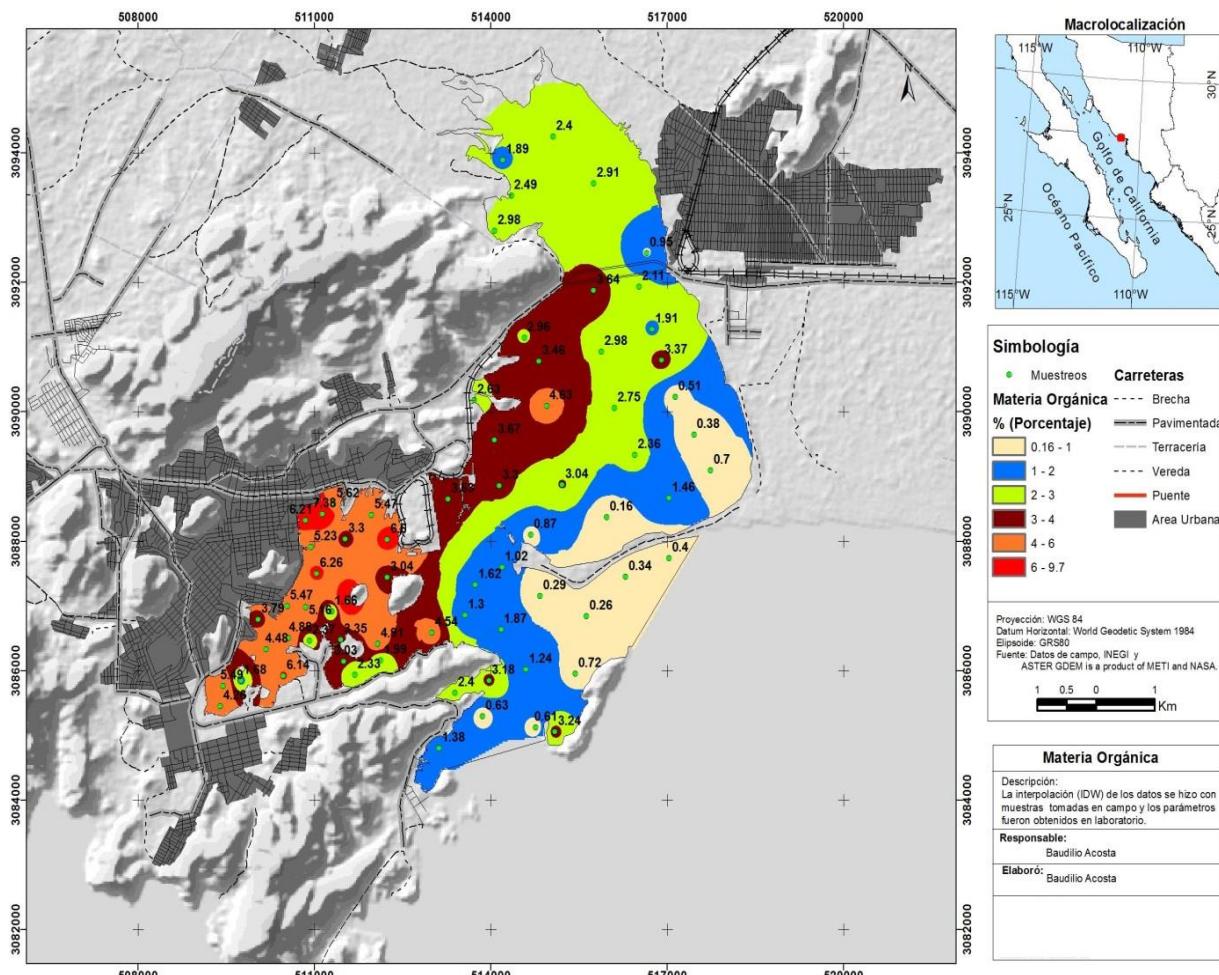


FIGURA 23. Distribución espacial de materia orgánica en los sedimentos del sistema lagunar de Guaymas Empalme Sonora.

## **8.5 Concentración en mg kg<sup>-1</sup> de los elementos mayores y elementos traza y lantánidos en los sedimentos de la bahía de Guaymas-Empalme Sonora.**

En la Tabla 9 se presentan las medias y desviación estándar de las concentraciones de los elementos mayores, traza y lantánidos de los sedimentos superficiales del complejo lagunar de la bahía de Guaymas así como los datos de referencia de la corteza terrestre (Taylor, 1964).

Al realizar la comparación de las concentraciones de los elementos se observan valores que se encuentra arriba de los valores de referencia como es el caso de Eu, Sr, Ba, Zn, Se, AS; Sb, Th U, Br y Hf los incrementos de los valores de estos elementos se describen más adelante (Tabla 10) con el factor de enriquecimiento (FE) de los elementos.

El orden de concentración de los de elementos mayores y elementos traza en base a los concentraciones de las medias fue el siguiente:

Lu>Tm>Ta>Tb>Ho>Eu>Sb>Se>Yb>K>Er>Fe>Na>U>Hf>Dy>Sm>Cs>Gd>Pr>Ca>Ni  
>Co>Th>Br>Sc>As>Nd>La>Cr>Ce>Rb>Zr>Zn>Ba>Sr

Tabla 9. Medias, desviaciones estándar de los elementos mayores, elementos trazas y lantánidos comparados con la corteza terrestre.

elemento	media	S.D.	corteza terrestre	elemento	media	S.D.	corteza terrestre
La	29.42	18.44	30	Sr	649.63	473.25	375
Ce	50.80	23.44	60	Ba	601.93	214.97	370
Pr	5.27	1.91	8	Sc	9.87	3.70	22
Nd	18.80	5.67	28	Cr	31.49	12.49	100
Sm	4.37	1.17	6	Fe	2.83	1.05	5.6
Eu	1.06	0.31	1	Co	8.42	3.23	25
Gd	5.07	1.21	5.4	Ni	6.60	11.70	75
Tb	0.74	0.18	0.9	Zn	220.80	205.81	70
Dy	4.21	1.0	3	Se	1.68	1.44	0.05
Ho	0.90	0.22	1.2	As	11.77	5.31	1.8
Er	2.38	0.58	3	Sb	1.47	0.79	0.2
Tm	0.34	0.08	0.5	Th	9.06	3.52	96
Yb	1.70	0.41	2	U	3.40	1.42	0.9
Lu	0.28	0.07	0.5	Br	9.24	6.32	2.5
Na	2.89	0.77	-	Hf	3.94	1.15	3
K	2.17	1.40	-	Ta	0.65	0.41	1
Rb	83.62	23.03	90	Zr	117.83	87.48	165
Cs	4.65	1.87	3	Ca	5.47	4.27	4.5

## 8.6 Factor de enriquecimiento (FE)

En base a la referencias de los datos de la corteza terrestre tomados de Taylor (1964) y utilizando como elemento normalizador al Sc, se calculó el factor de enriquecimiento para cada uno de los elementos de los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas, se presentan los siguientes resultados del factor de enriquecimiento (FE) de la bahía de Guaymas- Empalme en la (Tabla 10). Y se observan elementos como As, Sb y Se cómo altamente enriquecidos.

Tabla 10. Clasificación de los elementos de acuerdo al factor de enriquecimiento promedio en el sedimento de la Bahía de Guaymas-Empalme.

elemento	FE	clasificación	elemento	FE	clasificación
Sc	0.45	D	Gd	2.36	E
Cr	0.72	D	Th	2.44	E
Co	0.76	D	Rb	2.49	E
Ni	0.22	D	La	2.61	E
Fe	1.13	C	Eu	2.75	E
Lu	1.41	C	Dy	3.52	E
Ta	1.61	C	Hf	3.52	E
Pr	1.68	C	Cs	3.56	E
Nd	1.68	C	Ca	4.13	E
Tm	1.72	C	Ba	4.60	E
Sm	1.81	C	Sr	6.18	E
Ho	1.88	C	Zn	6.74	E
Er	1.99	C	Br	8.50	E
Zr	2.00	C	U	9.58	E
Tb	2.07	E	As	15.19	AE
Yb	2.17	E	Sb	18.15	AE
Ce	2.20	E	Se	82.99	AE

D: Diluidos, E: Enriquecidos, C: Conservativo, AE: Altamente Enriquecidos

De acuerdo a la clasificación en la tabla 10 los elementos químicos se clasifican de la siguiente manera.

- < 1 Elementos diluidos
- 1-2 Elementos conservativos
- 2-10 Elementos enriquecidos
- > 10 Elementos altamente enriquecidos

## Factor de enriquecimiento de los sedimentos superficiales de las cuatro zonas de la Bahía de Guaymas-Empalme Sonora

### Estero del Rancho

Los elementos altamente enriquecidos ( $FE > 10$ ) fueron As y Sb mientras que los elementos considerados enriquecidos (con  $2 > FE \leq 10$ ) La, Gd, Th, Sr, Rb, Eu, Ni, Hf, Zn, Dy, Ba, Cs, Br y U (ver FIGURA 23). Los 14 elementos en el rango de conservativos (con  $FE \leq 2$ ) son Fe, Ta, Lu, Ca, Pr, Nd, Tm, Sm, Zr, Ho, Er, Ce, Tb, Yb mientras los tres Ni, Co y Cr se encuentran diluidos ( $FE < 1$ ).

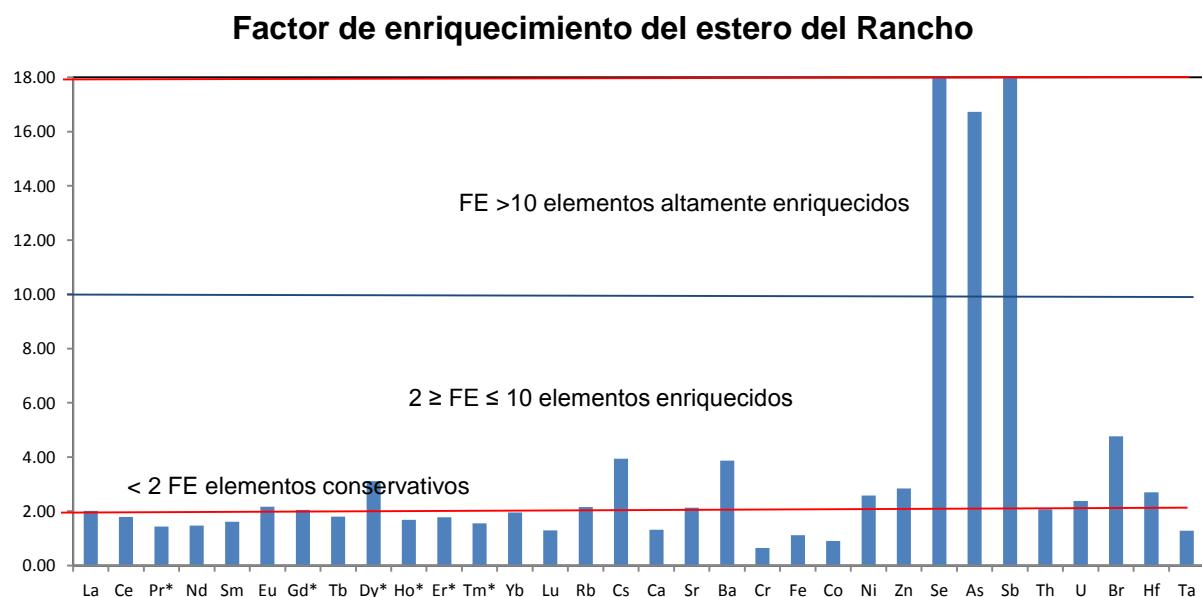


FIGURA 24. Distribución de los elementos químicos de acuerdo al factor de enriquecimiento de los sedimentos superficiales del estero del Rancho.

## Laguna de Empalme

En la gráfica de la (FIGURA 25) se presenta los elementos As, Sb que se encuentra en el rango ( $FE > 10$ ) estos elementos por encontrarse en este rango se consideran altamente enriquecidos. Los elementos en el rango de  $2 > FE \leq 10$ , se considerados enriquecidos y son Hf, Ba, Dy, Zn, Cs, Br y U mientras que en el rango  $FE \leq 2$  se consideran conservativos los son los elementos Lu, Fe, Zr, Tm, Pr, Nd, Ho, Sm, Er, Yb, Tb, Ta, Ca, Ce, Rb, Eu, Sr, Gd y Th. En el rango  $FE < 1$  se encuentran los elementos que se consideran diluidos y son Cr, Co y Ni.

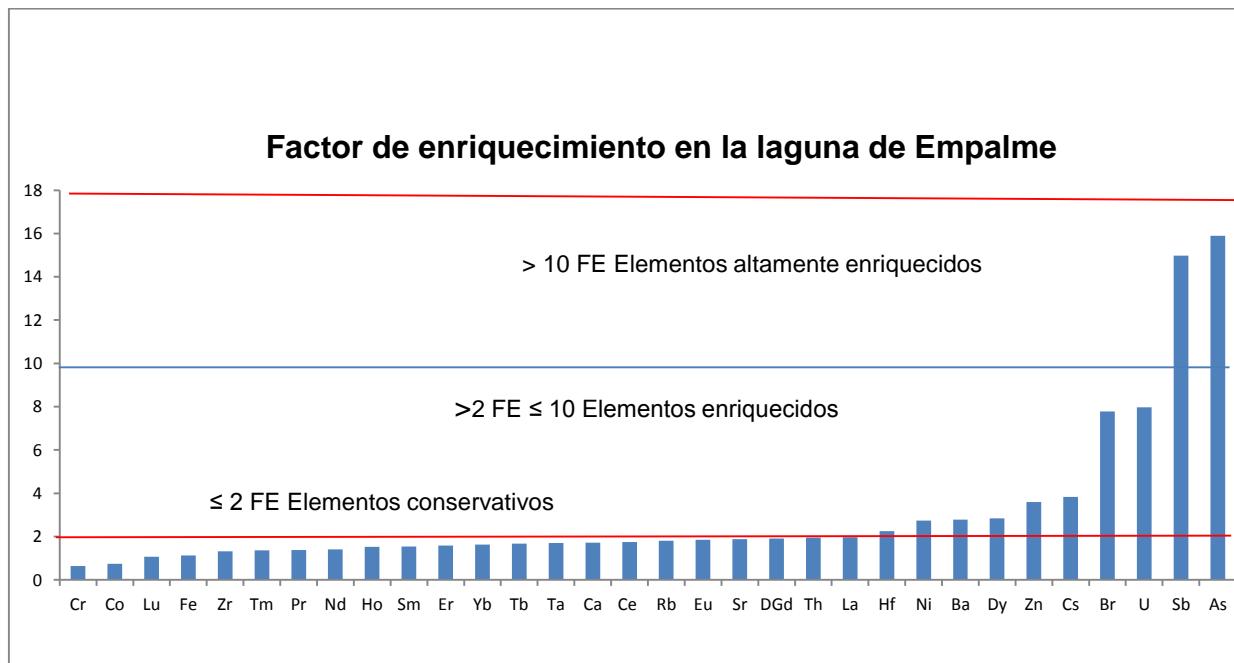


FIGURA 25. Distribución de los elementos químicos de acuerdo al factor de enriquecimiento en los sedimentos superficiales de la laguna de Empalme.

### Bahía Interior

La gráfica de la (FIGURA 26) presenta elementos que sobre pasan el FE >10 que son As, Br, Sr y Sb que se encuentra en el rango de elementos altamente enriquecidos. Por lo tanto los elementos de  $2 > \text{FE} \leq 10$  se consideran elementos enriquecidos son Sr, Br, Zn, U, Ca, Ba, Dy, y Eu. En el rango de conservativos  $\text{FE} \leq 2$  se encuentran los elementos Fe, Lu, Zr, Pr, Ta, Nd, Tm, Sm, Rb, Ho, Er, Ce, Tb y Th los elementos que se encuentran diluidos en el rango de  $\text{FE} < 1$  son él Ni, Co y Cr

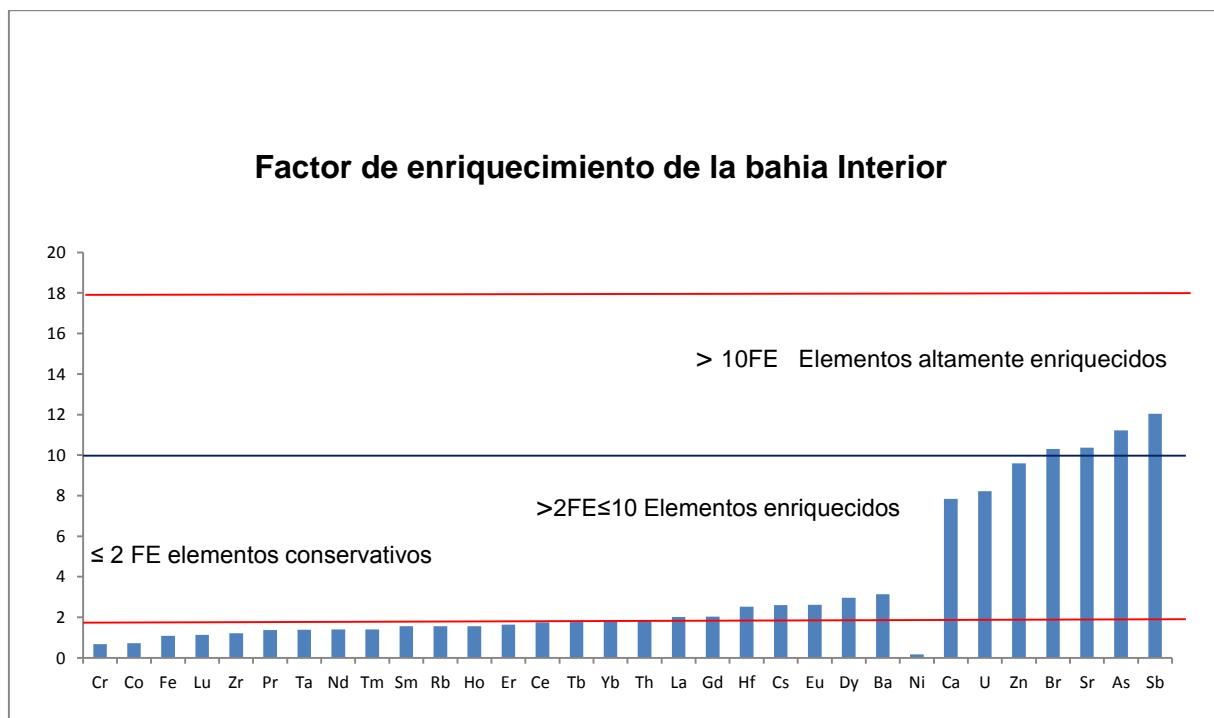


FIGURA 26. Factor de enriquecimiento de los sedimentos superficiales de la bahía Interior.

## Bahía Exterior

En la gráfica se presenta elementos que sobre pasan el FE >10 Sb, As y U que se encuentra por el rango de elementos altamente enriquecidos. Los elementos que se consideran en el rango de  $2 > \text{FE} \leq 10$  se encuentran enriquecidos y son Sr, Ba, Hf, Br, Ca, Zr, Dy, Zn Eu, Cs, Rb, La, Gd, Th, Yb, Tb, Ce, Er, Ho, Sm y Tm. Los elementos que se encuentran en el rango de conservativos  $\text{FE} \leq 2$  Tm, Nd, Pr, Ta, Lu y Fe. Los elementos Ni, Co y Cr se encuentran diluidos en el rango de  $\text{FE} < 1$  como se muestra en la FIGURA 27

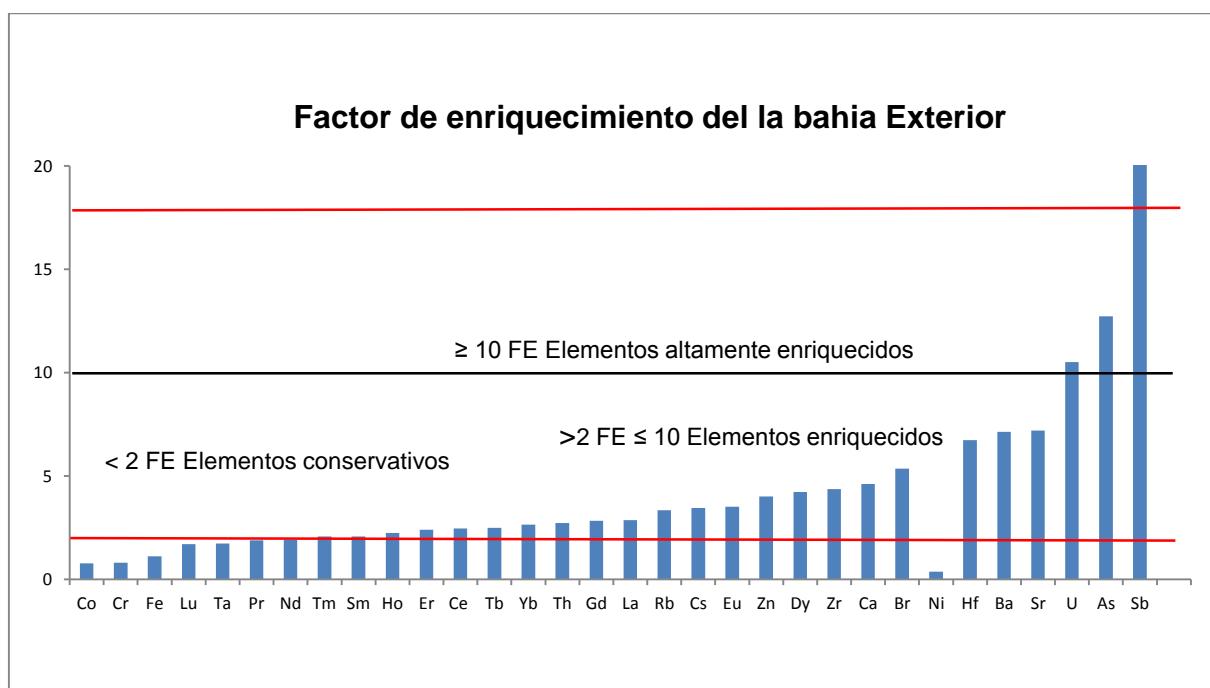


FIGURA 27. Factor de enriquecimiento en los sedimentos superficiales de la bahía Exterior.

## 8.7 Distribución espacial de elementos químicos en los sedimentos del sistema lagunar de la bahía de Guaymas – Empalme

### Distribución espacial de calcio

La concentración de Ca en los sedimentos osciló entre 1.46% al 21.9% con un contenido promedio de 5.47% (FIGURA 28). La distribución espacial de la concentración de este elemento mostró los valores mayores en la parte central de la Bahía Exterior en las estaciones 56, 57, 58, 59, 60, 61 y 62 entre los 7.29% a 14.6% de concentración que puede deberse a los abundantes depósitos calcáreos (Figura 24). En contraste, los sedimentos con bajo contenido de Ca se localizaron cerca de la laguna de Empalme, en el canal de desagüe de la planta termoeléctrica de CFE (estaciones 20, 21 y 26).

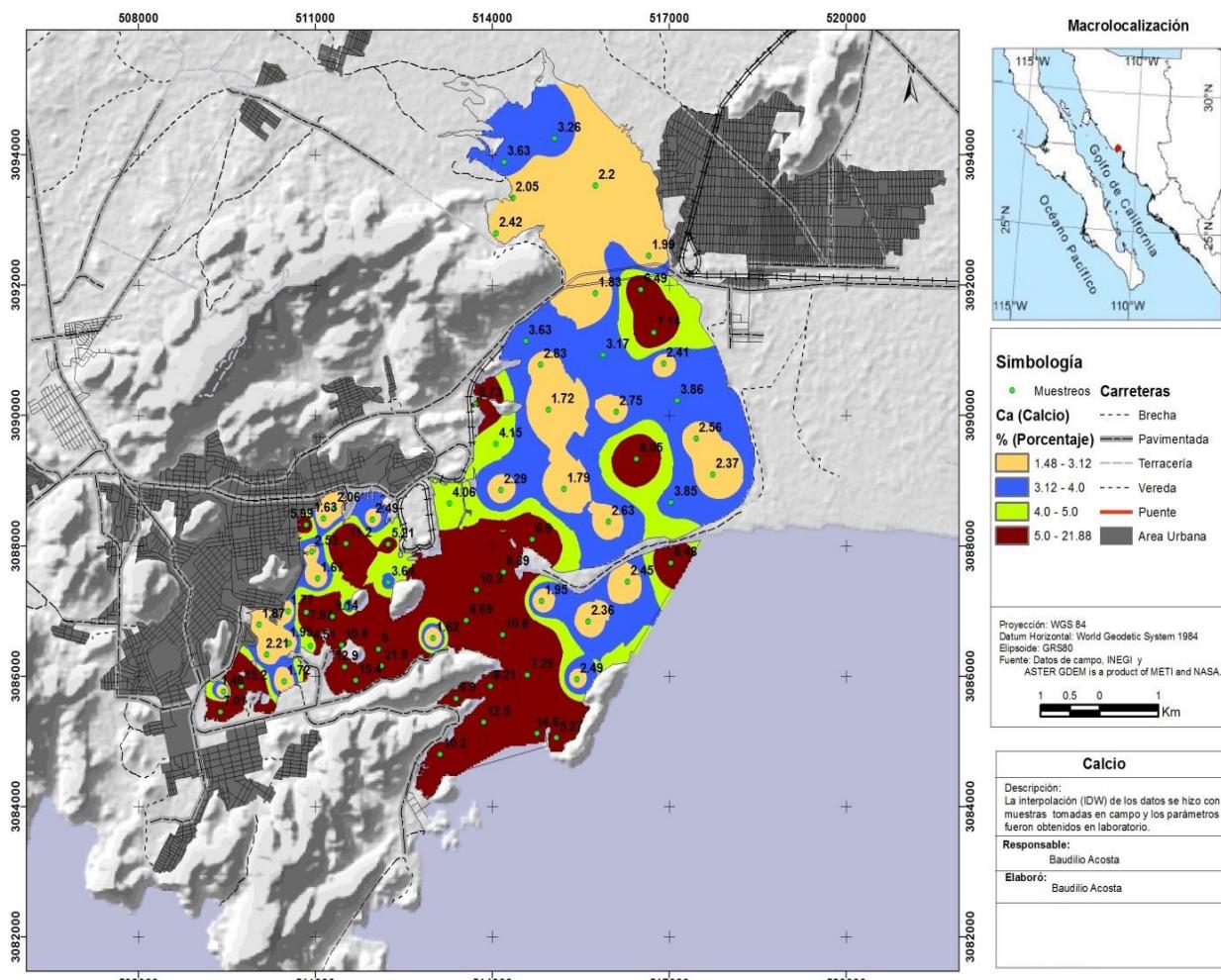


FIGURA 28. Distribución espacial de la concentración de Ca en los sedimentos superficiales de sistema lagunar de la bahía de Guaymas.

## Distribución espacial de Estroncio

La distribución espacial de la concentración de estroncio en los sedimentos de la bahía de Guaymas nos permitió conocer las áreas con mayores concentraciones (FIGURA 29). Las zonas que presentaron concentraciones mayores fueron las siguientes: estaciones 54, 62 y 52 que corresponde al punto ubicado de las concentraciones más altas como es en la isla pájaros.

Tomando en cuenta la contracción promedio del Sr en los sedimentos de la bahía de Guaymas- Empalme ( $649.63 \text{ mg kg}^{-1}$ ) con respecto al valor de referencia de la corteza terrestre se observa un incremento del Sr con un contenido de 6.18 veces más.

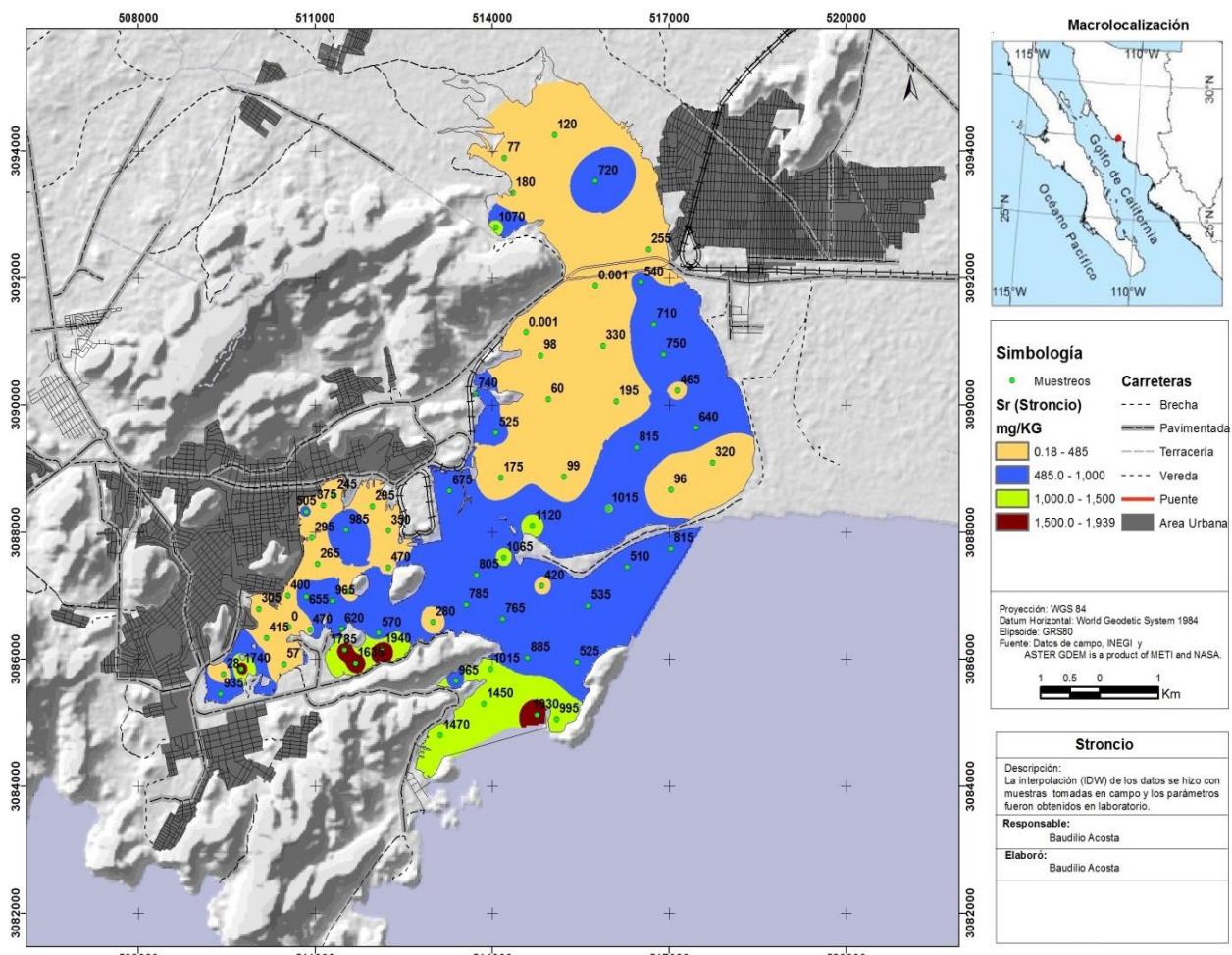


FIGURA 29. Distribución espacial de la concentración de Sr en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial de Rubidio

La media de la concentración de Rb dentro del sistema lagunar es  $83.62 \text{ mg kg}^{-1}$  y con un valor máximo de  $137.70 \text{ mg kg}^{-1}$ . La mayor anomalía de Rb coincide con la laguna de Empalme donde están las descargas de la cuenca del río Matape con  $137.7 \text{ mg kg}^{-1}$  que a su vez es la que presenta el mayor enriquecimiento con 4.09 dentro del cuerpo laguna. Otro sitio con un valor anómalo ( $132.77 \text{ mg kg}^{-1}$ ) está cerca de la descarga de la granja Maricultura de Sonora en la FIGURA 30 se observa que ambos valores anómalos fueron puntuales y se encuentran al norte del Estero del Rancho. El promedio del factor de enriquecimiento de Rb en la bahía de Guaymas-Empalme es de 2.49.

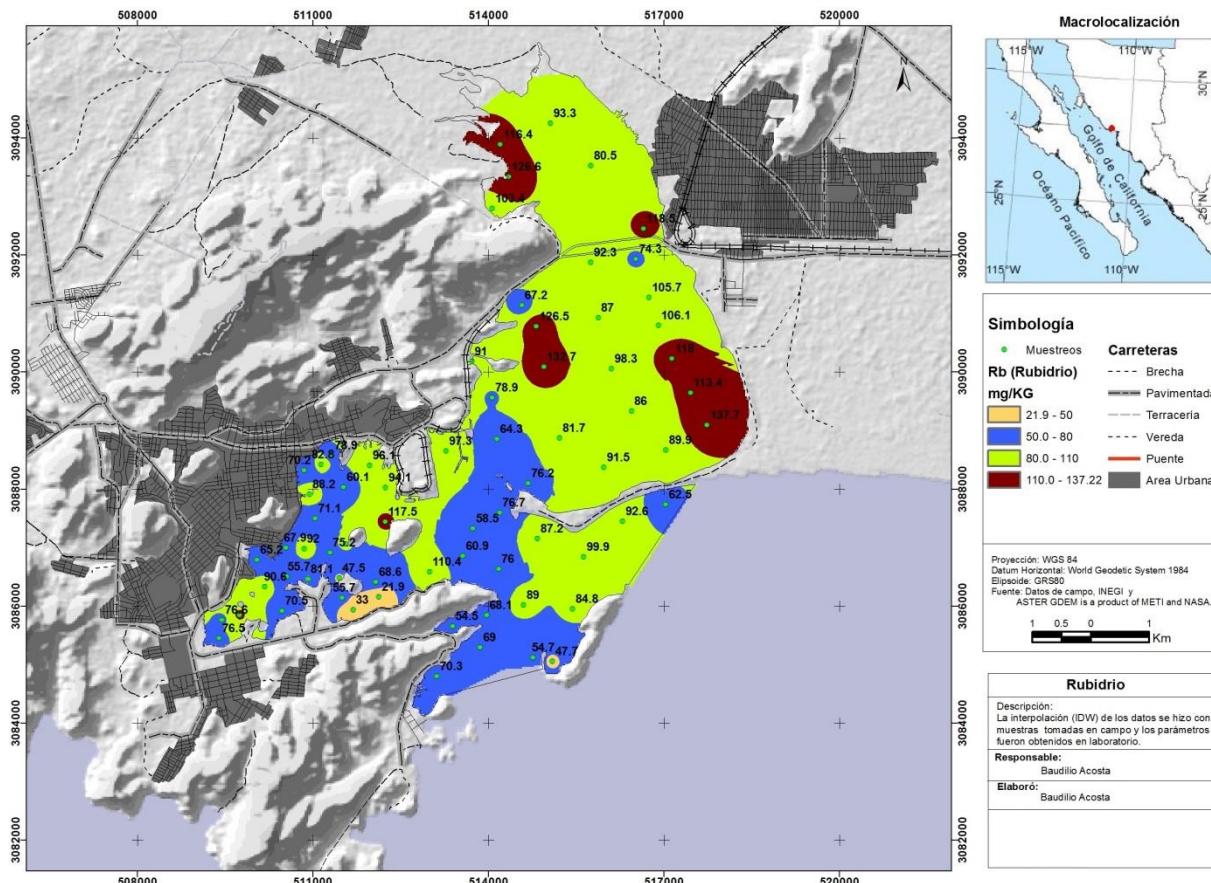


FIGURA 30. Distribución espacial de la concentración de Rb en sedimentos del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial de Hafnio

En el complejo lagunar de la bahía de Guaymas, el promedio general de la concentración de Hf en los sedimentos superficiales es  $3.94 \text{ mg kg}^{-1}$  que la ubica por arriba de los valores de los que marca la corteza terrestre de  $3 \text{ mg kg}^{-1}$  (FIGURA 31). Los sitios 61, 65, 66, 67 y 70 ubicados en la Bahía Exterior presentan las concentraciones más altas de Hafnio con valores de  $6.04$  a  $7.02 \text{ mg kg}^{-1}$ . Para la bahía interior el valor más alto es  $5.93 \text{ mg kg}^{-1}$  ubicado en el sitio 38; mientras que para la laguna de Empalme las concentraciones más altas corresponden al sitio 19 con  $5.19 \text{ mg kg}^{-1}$  ubicado cerca a los muelles de Pemex y CFE; En el estero del Rancho la media de Hf es de  $3.97 \text{ mg Kg}^{-1}$ .

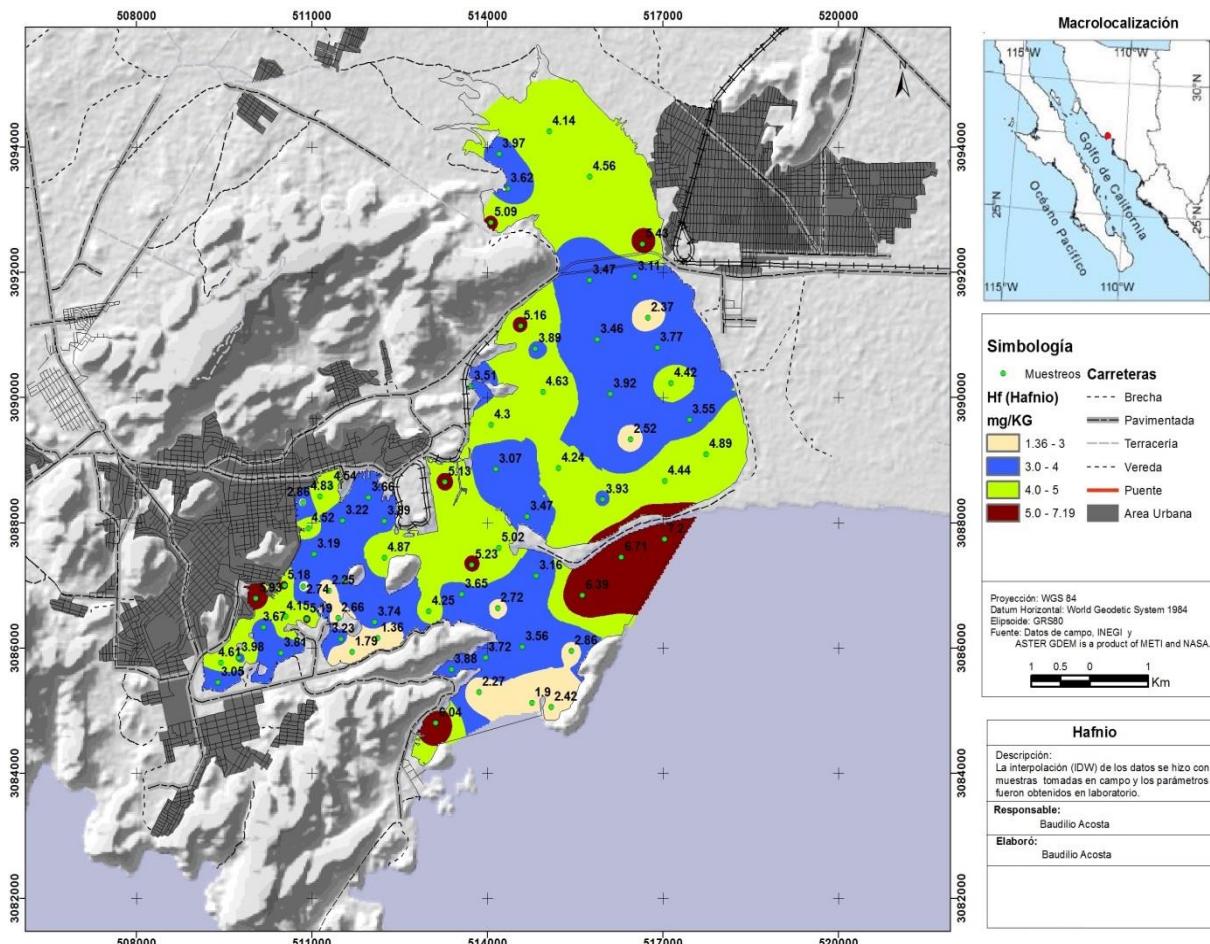


FIGURA 31. Distribución espacial de la concentración de Hf en sedimentos superficiales del sistema lagunar de la bahía de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial de Arsénico

El máximo valor de concentración de As en los sedimentos ( $20.4 \text{ mg kg}^{-1}$ ) corresponde al punto de muestreo 14 que se ubica al sur de la desembocadura de la descarga de la zona industrial de Empalme y frente al astillero de la Secretaría de Marina (FIGURA 32).

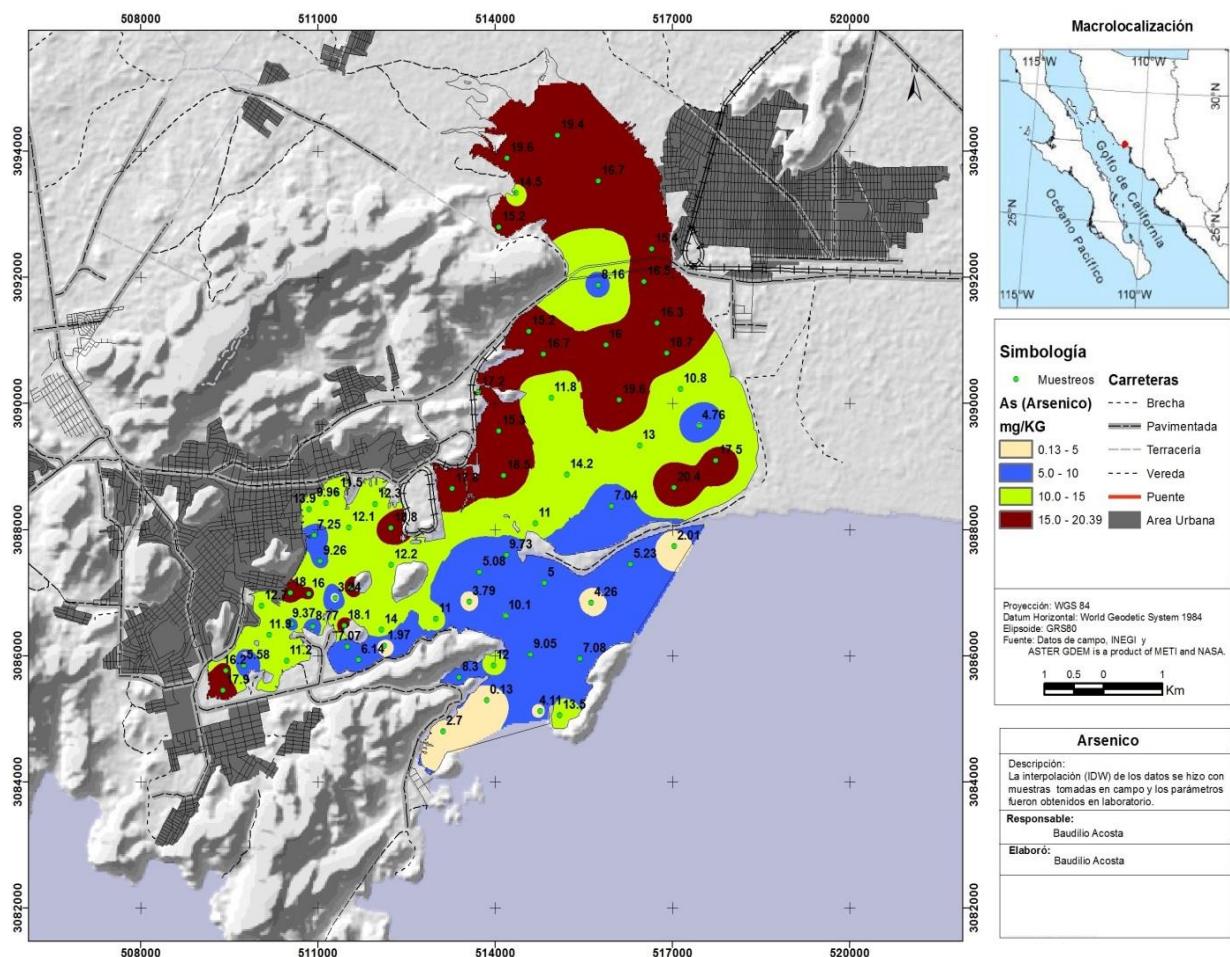


FIGURA 32. Distribución espacial de la concentración de As en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial de hierro

Los porcentajes de mayor rango de Fe se localizan en la parte norte del Estero del Rancho, frente a las descargas de la granja camaronera Maricultura de Sonora y a un costado del arroyo del desagüe de la sierra de Santa Úrsula. En los drenes de la Ciudad de Empalme presenta una concentración de (4.0 %) mientras que a un costado de la descarga de CFE (4.11 %). Las concentraciones altas en la bahía Interior de Fe se encuentran frente a la antigua descarga de aguas negras de la Ciudad de Guaymas (4.26%), la segunda concentración más alta se ubica a un costado de la descarga de la unidad deportiva (4.18%), seguido (4.16%) en el muelle de Lubbert,

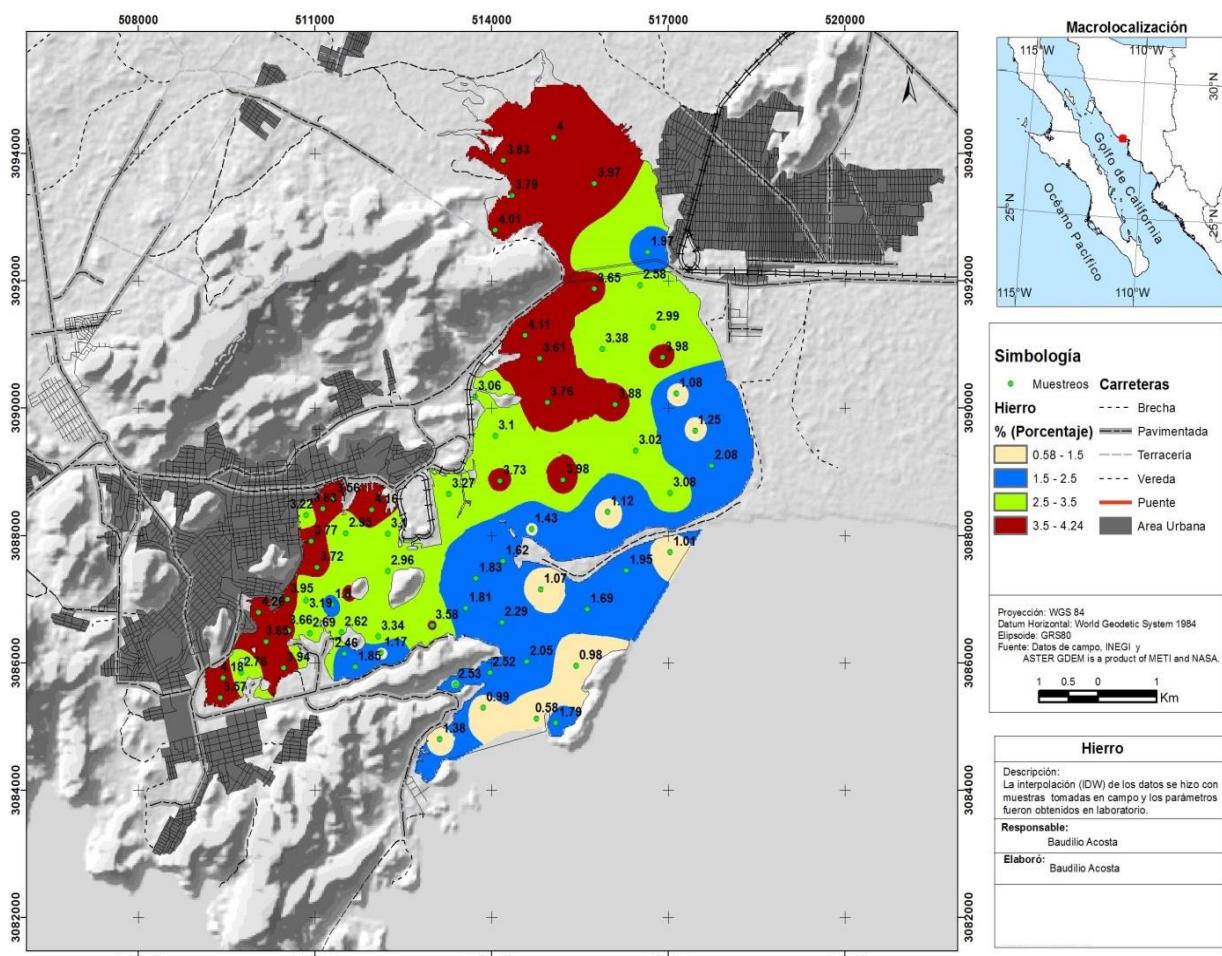


FIGURA 33. Distribución espacial de la concentración de Fe en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial de Zinc

Las mayores concentraciones de este elemento se encontraron en las estaciones 39, 40, 41, 42 y 43 que van de 465, 715, 490, 565, y 565 mg kg<sup>-1</sup> que están cerca de la antigua descarga de aguas negras de la Ciudad de Guaymas, en la zona industrial en el parque Rodolfo Sánchez Taboada se ubica la estación 63 con 543 mg kg<sup>-1</sup> de Zn. Esto puede significar que son áreas con aportes comunes de este elemento químico. De acuerdo con el Índice de Müller (1979), estas estaciones 39, 40, 41, 42, 43, 46 y 63 se encuentran con una concentración altamente enriquecida de zinc (FIGURA 34).

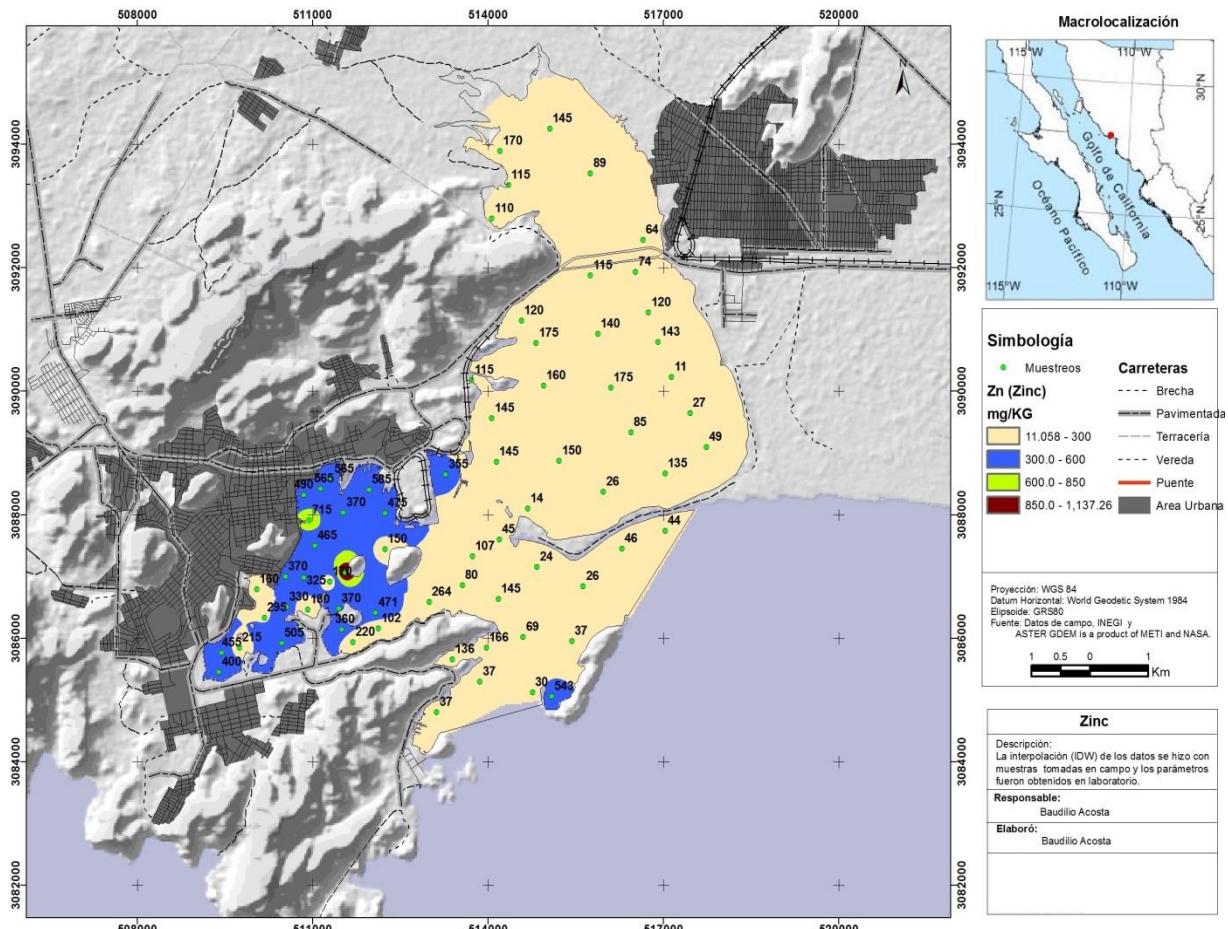


FIGURA 34. Distribución espacial de la concentración de Zn en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial de níquel

Las máximas concentraciones de níquel se registraron en el sitio 48 con ( $52.83 \text{ mg kg}^{-1}$ ). A un costado del astillero EDESA, en el sitio 20 que se ubica cerca del muelle de Pemex y a un costado de CFE. Presento una concentración de con ( $39.33 \text{ mg kg}^{-1}$ )

<sup>1</sup>) En el sitio 6 que está cerca de la desembocadura del arroyo del dren de la Ciudad de Empalme presento una concentración de ( $42.83 \text{ mg kg}^{-1}$ ), mientras que para el sitio 22 con ( $31.17 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ubicado en el canal de navegación y que se encuentra cerca de Morro inglés.

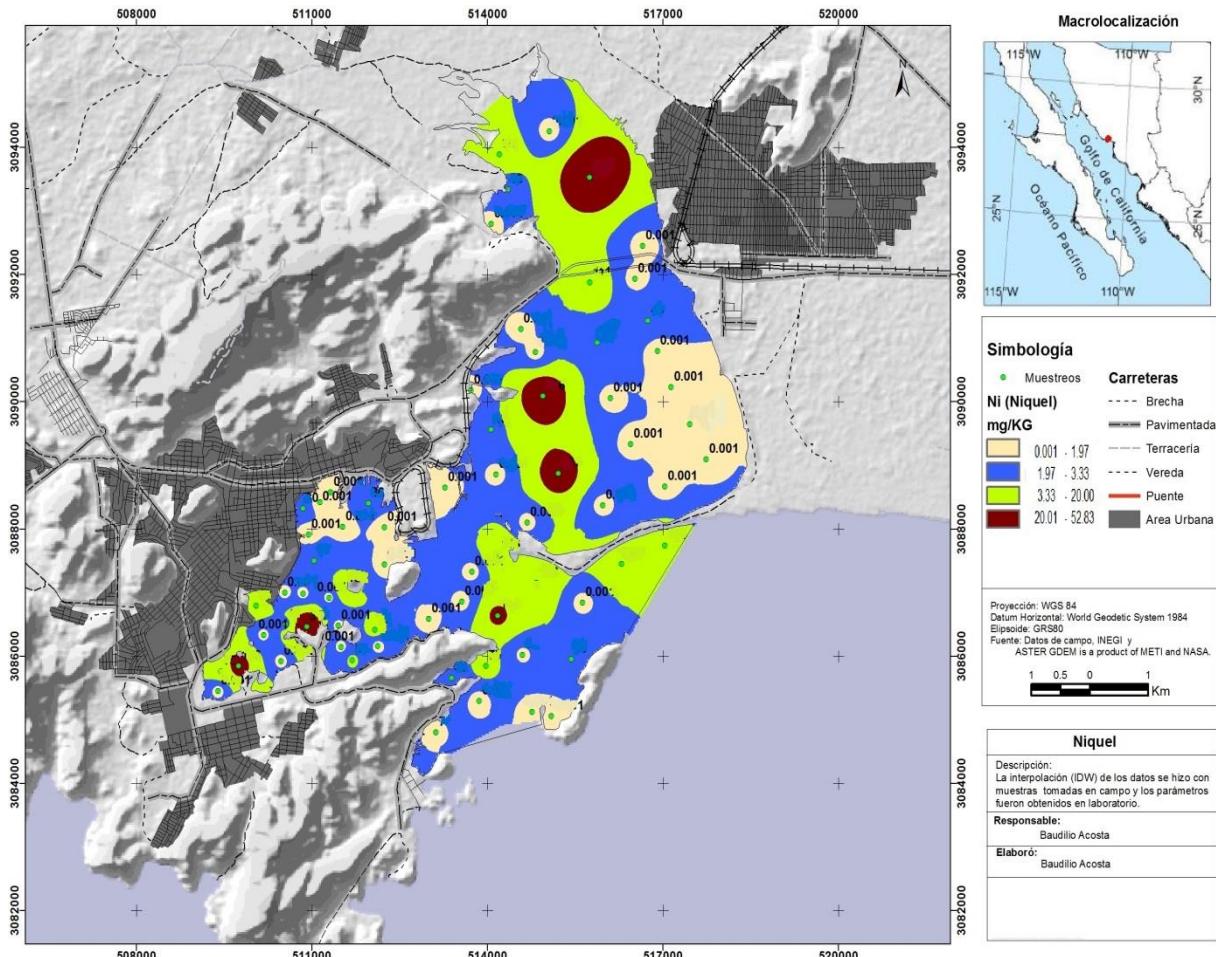


FIGURA 35. Distribución espacial de la concentración de Ni en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

### **Distribución espacial de cromo**

La mayor concentración de cromo se encontró en la laguna de Empalme en el sitio 15 con ( $59.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ), que se ubicó frente a la desembocadura del dren de la zona de la Maquilas Teta Kawi S.A. de C.V. en el parque industrial de Empalme.

La segunda concentración más alta ( $59.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) es la del sitio 40 que se ubica frente a la antigua descarga municipal de aguas negras de la ciudad de Guaymas, la tercer concentración más altas ( $53.9 \text{ mg kg}^{-1}$ ) se registró en el sitio 18 que se encuentra a cerca de un tiradero de escombro (basurero) llamado Batuecas.

## Distribución espacial de bario

La distribución más alta de bario se encontró en el sitio 45 ( $1315 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ubicada en la zona de manglar en la bahía interior donde drena al desagüe maquiladoras de productos del mar y asentamientos humanos que no cuentan con drenaje

El sitio uno presento una concentración de ( $1085 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ubicado en el estero del Rancho cerca de la áreas del manglar a un costado de un campo pesquero frente a la Ciudad de Empalme, donde existe una descarga de aguas negras de las colonias de la parte norte de la ciudad de Empalme.

Los factores de enriquecimiento para el sitio 45 es de 11.25 mientras que para el sitio 11 es de 9.28 que los ubica a estos sitios como altamente enriquecido de acuerdo a Wedephel (1995).

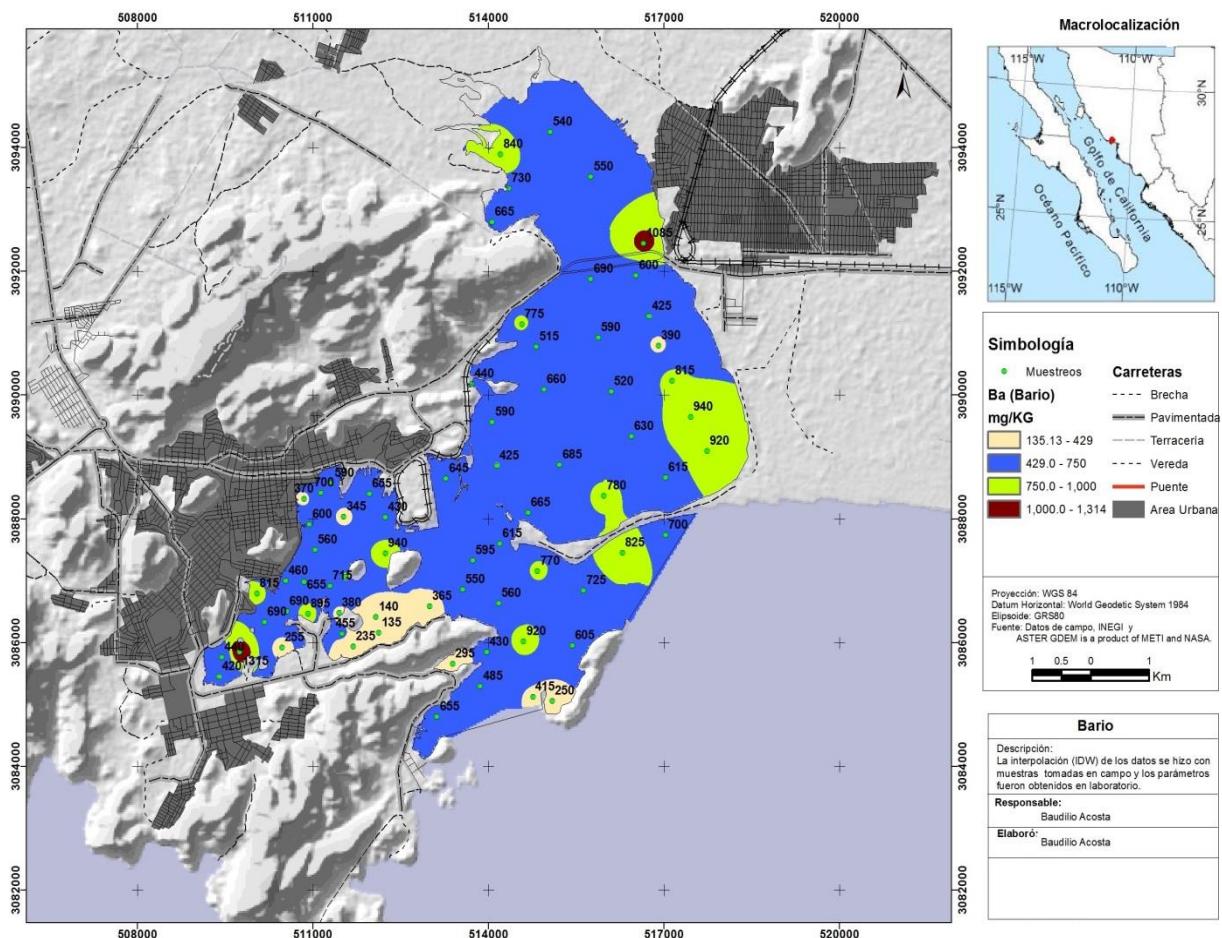


FIGURA 36. Distribución espacial de la concentración de Ba en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial de cesio

El valor promedio de los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas es de  $4.65 \text{ mg kg}^{-1}$ . La concentración máxima de Cs se ubica en el estero del Rancho en el sitio 4 ( $9.42 \text{ mg kg}^{-1}$ ) frente a la descarga de la granja camaronera Maricultura de Sonora. La segunda concentración más alta está en el sitio 20 con ( $7.29 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ubicado en zona de la laguna de Empalme frente al desagüe de la central termoeléctrica de CFE. El sitio 34 ( $7.05 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ubicado en la bahía interior está cerca de la desembocadura del arroyo de la deportiva, ubicada en la zona de manglar donde drena al desagüe maquiladoras de productos del mar, colonias y asentamientos humanos que no cuentan con drenaje.

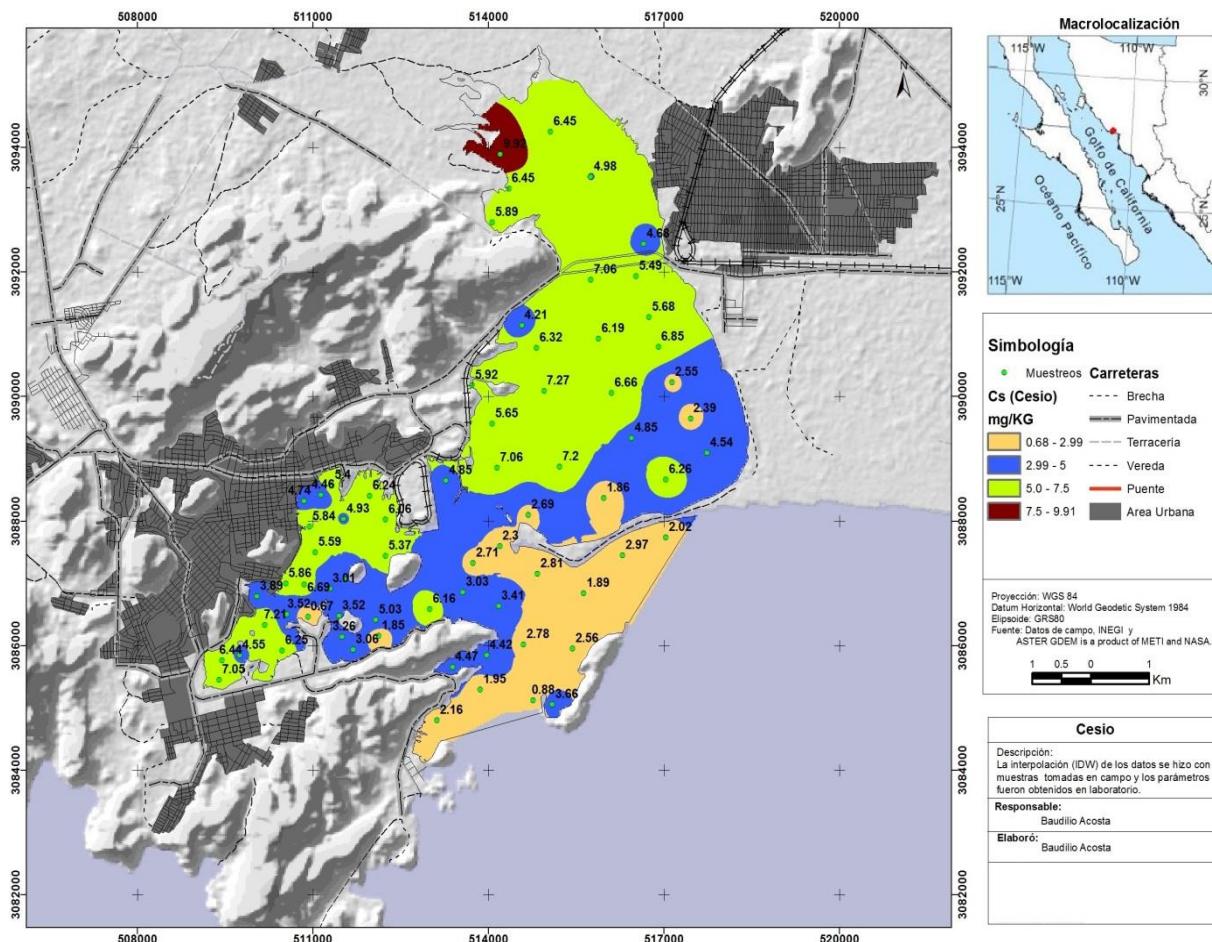


FIGURA 37. Distribución espacial de la concentración de Cs en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial de antimonio

Las máximas concentraciones de Sb se registraron en la zona del estero e Rancho en el sitio 4 con ( $3.68 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y 5 con ( $3.51 \text{ mg kg}^{-1}$ ) estos sitios están frente a la descarga de la granja camaronera Maricultura de Sonora, comparando estos valores obtenidos con respecto a la corteza terrestre se encuentran altamente enriquecidos con un factor de FE de 30.44 y 27.58 acuerdo a Taylor (1964).

Los sitios con las segundas concentraciones más altas están ubicados uno en la bahía interior sitio 42 con ( $2.62 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y el otro sitio 28 ubicado en la bahía exterior con ( $2.61 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

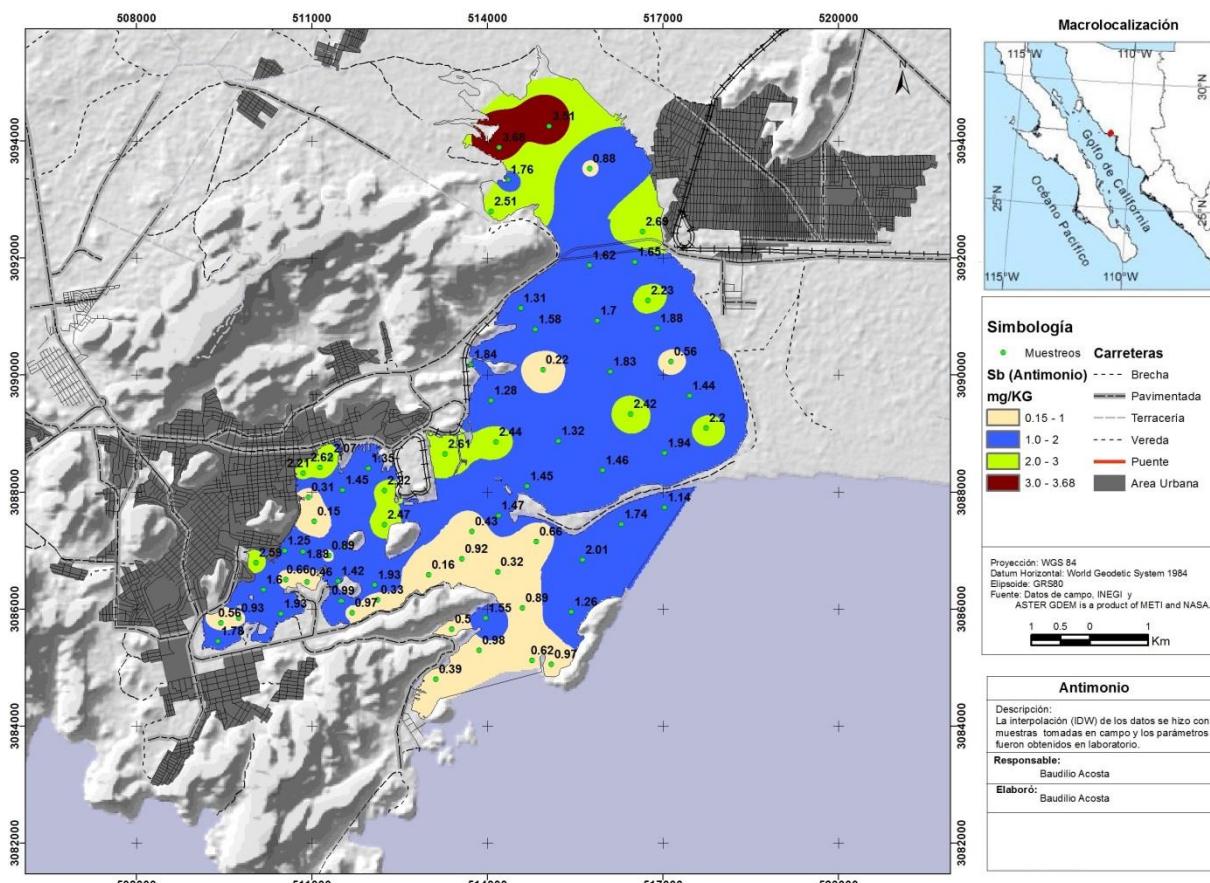


FIGURA 38. Distribución espacial de la concentración de Sb en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial de torio

La mayor distribución de torio en el sistema lagunar se encuentra en la parte sur oeste de la laguna de Empalme específicamente frente al dren de la cuenca del río Matape. Los valores más altos de torio están ubicados en frente de astillero de la Secretaría de Marina y a un costado de la descarga de la zona industrial de Empalme. Los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas presentan un promedio de 9.06 mg kg<sup>-1</sup> con un valor máximo de 31.9 mg kg<sup>-1</sup> que corresponde al sitio 15, frente a la desembocada la cuenca del Río Matape.

El factor de enriquecimiento promedio 2.44 de los sedimentos de la bahía de Guaymas se considera enriquecido de acuerdo a Taylor (1964)

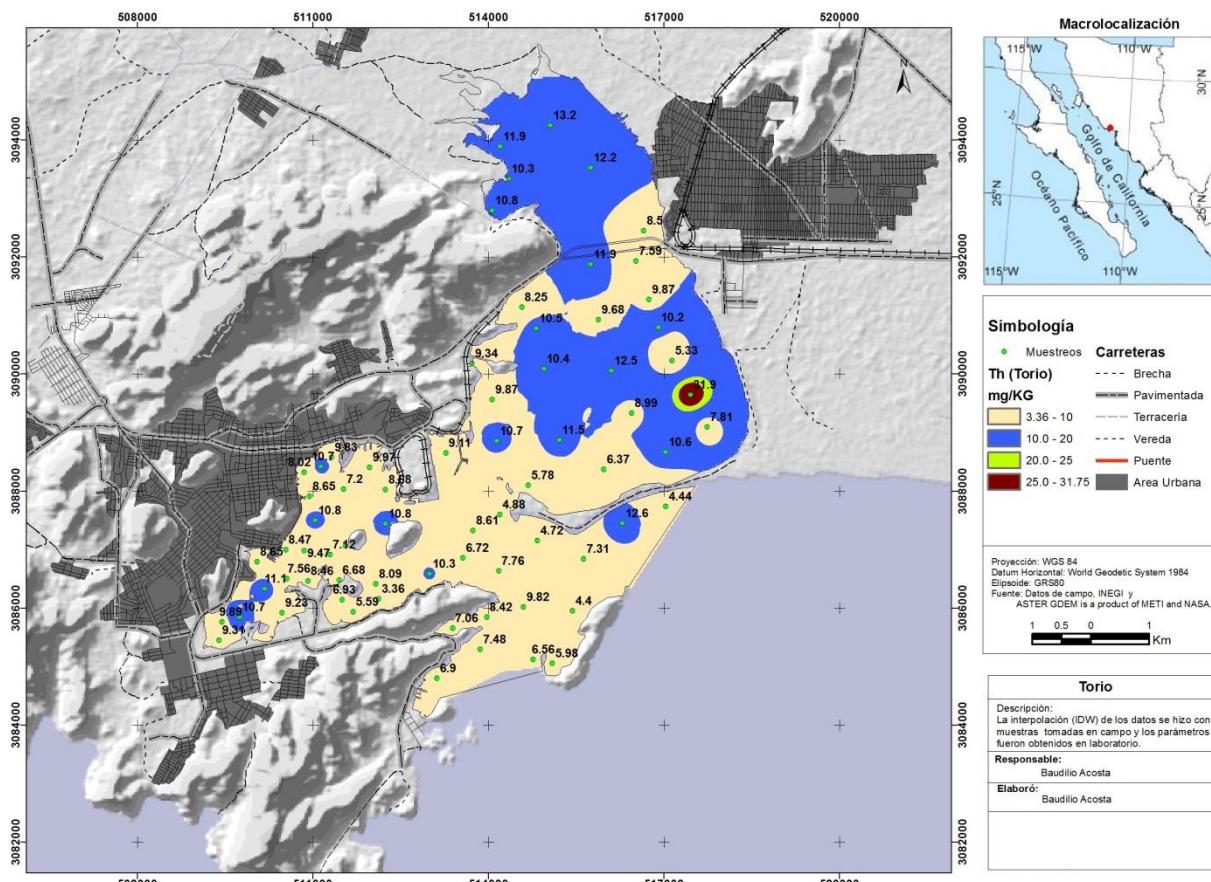


FIGURA 39. Distribución espacial de la concentración de Th en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial de uranio

Para el complejo lagunar de la bahía de Guaymas el promedio general de la concentración de uranio es  $3.40 \text{ mg kg}^{-1}$ . La distribución de las concentraciones de uranio en los sedimentos superficiales se muestra en la (FIGURA 40). En el sitio 63 de la bahía exterior se presentó la concentración más alta  $6.58 \text{ mg kg}^{-1}$  mientras que para la bahía interior registro en el sitio 42 la concentración de  $6.25 \text{ mg kg}^{-1}$ . Para el estero del Rancho el sitio 8 registra  $5.24 \text{ mg kg}^{-1}$ . Por lo tanto la laguna de Empalme en el sitio 23 registro  $5.81 \text{ mg kg}^{-1}$  y para el estero del Rancho en el sitios 8 se registró  $5.24 \text{ mg kg}^{-1}$ . Cabe mencionar que para los valores de uranio en la corteza terrestre es de  $0.9 \text{ mg kg}^{-1}$  según Taylor (1964).

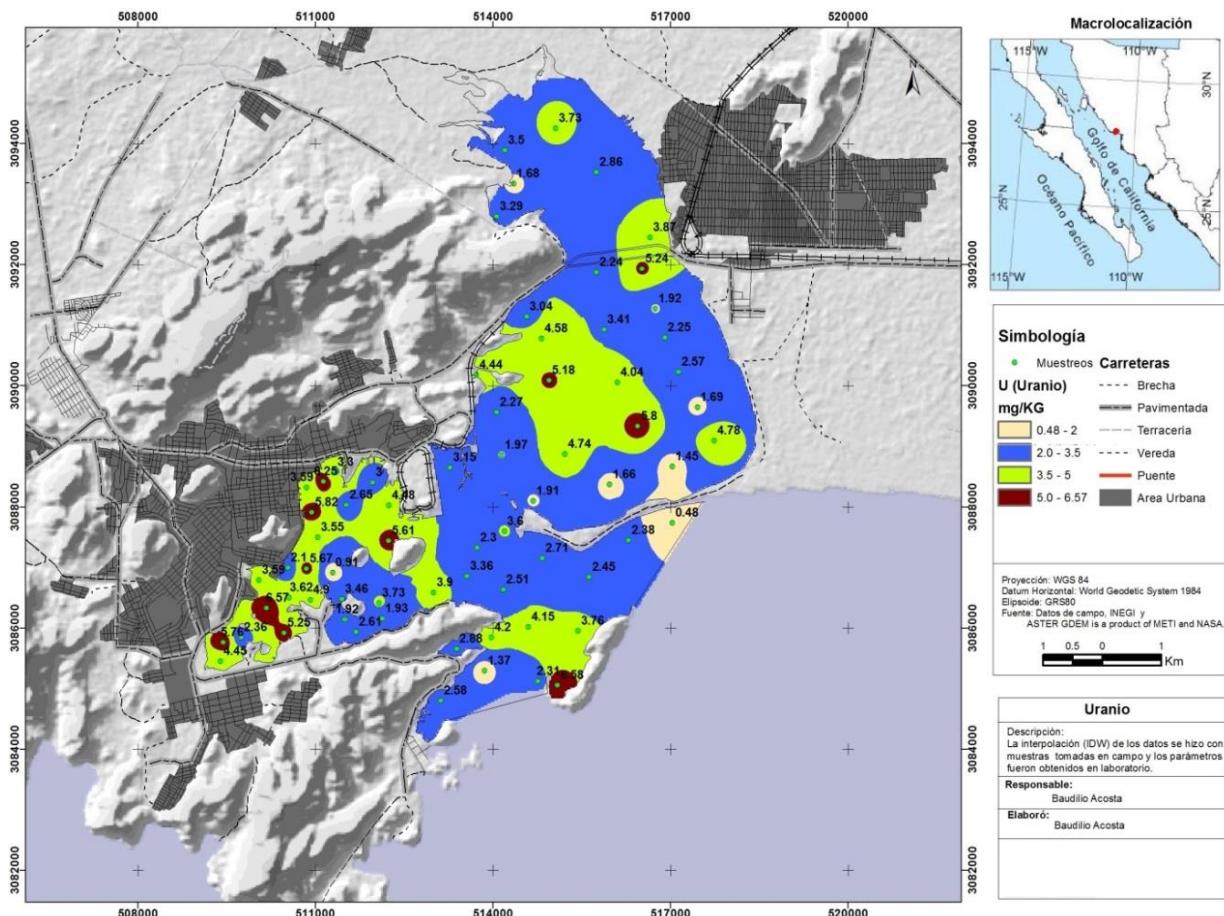


FIGURA 40. Distribución espacial de la concentración de U en sedimentos del sistema lagunar de Guaymas.

## Elementos de tierras raras

Las concentraciones máximas y mínimas de los lantánidos de los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas Sonora (Tabla 10). Se presentan de acuerdo al orden de abundancia de estos elementos en la corteza (Taylor y McLennan, 1985): Gd> La> Tb> Ho> Eu> Sm> Dy> Er> Tm> Ce> Pr> Nd> Yb. Los resultados indican abundancia de elementos de tierras raras ligeras con respecto a los elementos de tierras raras medias y pesadas.

A continuación se presentan las concentraciones de los valores máximos y mínimos de los lantánidos obtenidos de los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas.

Tabla 11. Concentración de máximos, mínimos y desviación estándar de los sedimentos superficiales de la Bahía de Guaymas-Empalme Sonora.

(mg kg <sup>-1</sup> )	max	min	± δ	Corteza *
La	174.00	13.70	18.30	32.00
Ce	222.00	23.90	23.27	73.00
Pr	17.60	2.45	1.90	7.90
Nd	47.80	8.13	5.63	33.00
Sm	8.25	1.87	1.16	5.70
Eu	1.99	0.15	0.31	1.24
Gd	9.03	2.26	1.20	5.20
Tb	1.28	0.34	0.18	0.85
Dy	7.04	1.87	0.99	5.80
Ho	1.44	0.39	0.22	1.04
Er	3.78	1.00	0.58	3.40
Tm	0.51	0.14	0.08	0.50
Yb	2.62	0.71	0.41	3.10
Lu	0.43	0.11	0.07	0.48

Las concentraciones obtenidas de los lantánidos no sobrepasan los valores de referencia de la corteza\* terrestre. Taylor (1964)

### **Distribución espacial de la concentración de lantánidos**

Las distribuciones espaciales de las concentraciones de los lantánidos en los sedimentos del sistema lagunar en las zonas, los lantánidos ligeros tales como La, Ce, Pr y Nd. Los elementos como La y Ce presentaron concentraciones mayores en la laguna de Empalme, sobre todo en los sedimentos de la zona de manglar y en las desembocaduras de los drenes de la cuenca del río Matape (FIGURA 8). Las menores concentraciones se presentaron en la parte de la bahía Exterior y en el canal de comunicación con el Golfo de California, la cual es una zona dinámica que genera la re suspensión del sedimento y un menor aporte de material terrígeno.

## Distribución del lantano

Lantano presenta una concentración promedio ( $29.42 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que no sobre pasa el valor de la corteza terrestre. De los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas, el valor más alto se encontró en el sitio 15 ( $174 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ubicado en la laguna de Empalme frente a la desembocadura del cuenca del río Matape ver (FIGURA 41).

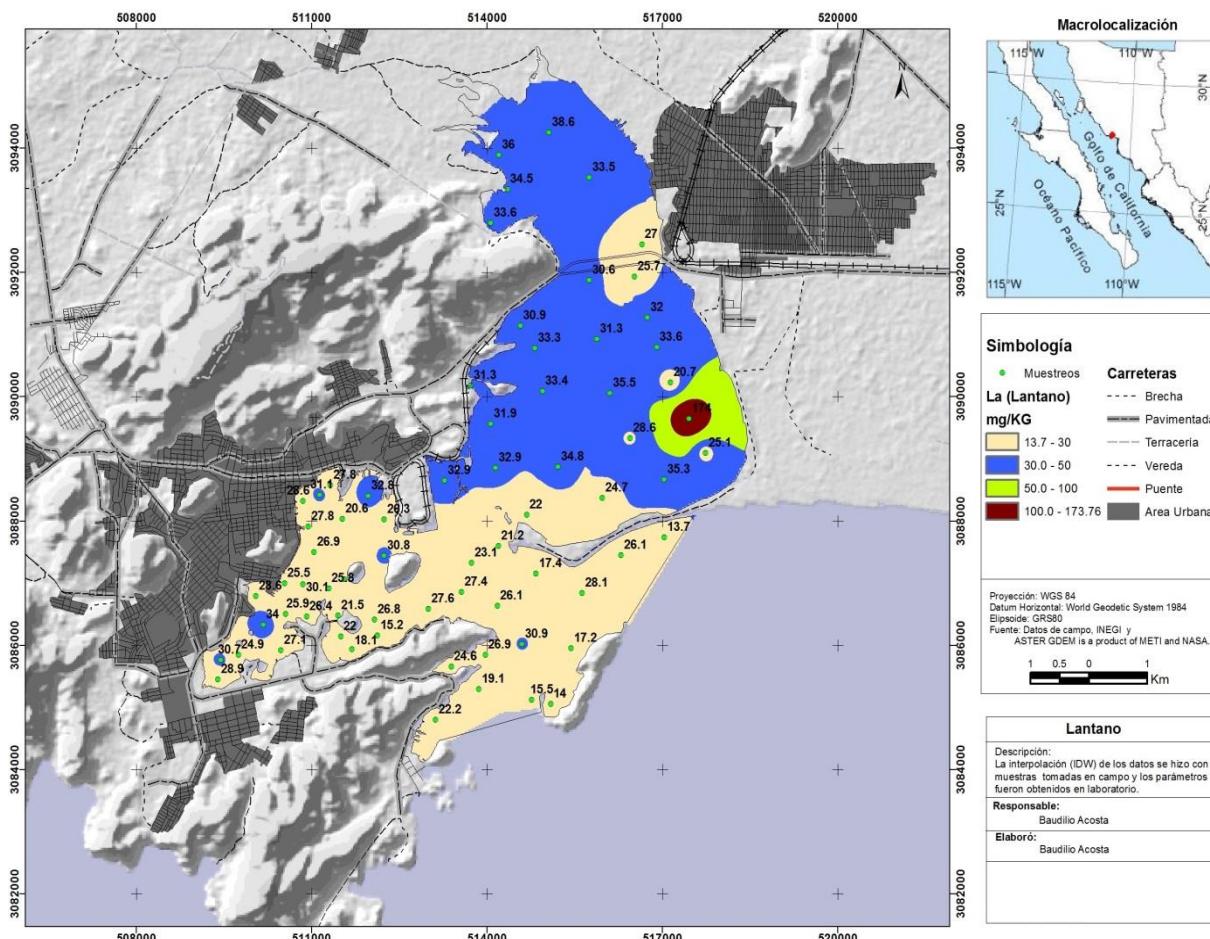


FIGURA 41. Distribución espacial de la concentración de La en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

Los lantánidos medios representados por Sm, Eu, Gd, Tb y Dy tuvieron una distribución similar entre sí. La mayoría de estos elementos presentaron concentraciones promedio menores a los valores de referencia dados por Taylor y McLennan (1985), no obstante los valores máximos de Eu y Gd se observaron por arriba del valor de referencia, ver (Tabla 12)

Tabla 12. Concentraciones promedio en (mg kg<sup>-1</sup>) de los lantánidos por zona de estudio en la Bahía de Guaymas-Sonora.

(mg kg <sup>-1</sup> )	Estero del Rancho	Laguna de Empalme	Bahía Interior	Bahía Exterior	Corteza
La	29.42	38.41	26.70	23.00	30
Ce	58.04	63.29	47.75	39.48	60
Pr	6.21	6.34	5.09	4.06	7.9
Nd	22.30	21.97	18.58	14.38	28
Sm	5.26	4.97	4.40	3.33	6
Eu	1.17	1.10	1.07	0.96	1
Gd	5.97	5.66	5.10	4.03	5.4
Tb	0.87	0.83	0.75	0.59	0.9
Dy	4.98	4.68	4.24	3.35	3
Ho	1.08	1.00	0.92	0.71	1.2
Er	2.84	2.61	2.41	1.90	3
Tm	0.41	0.37	0.35	0.28	0.5
Yb	2.03	1.82	1.73	1.40	2
Lu	0.34	0.30	0.28	0.23	0.5

La concentración promedio de Pr en la bahía de Guaymas presento (5.27 mg kg<sup>-1</sup>). En el estero del Rancho la concentración promedio (6.2 mg kg<sup>-1</sup>) la laguna de Empalme (6.34 mg kg<sup>-1</sup>), bahía Interior (6.34 mg kg<sup>-1</sup>) y bahía exterior (4.06 mg kg<sup>-1</sup>) el Pr no sobre pasa la concentración de la corteza terrestre (6.7 mg kg<sup>-1</sup>) salvo el sitio 16 (17.6 mg kg<sup>-1</sup>). Que se ubica en la laguna de Empalme.

## Distribución espacial del dispropio

El Dy tuvo el patrón de la distribución espacial de sus concentraciones semejante a Eu, el Dy aparece en el sitio 3 y 5 con  $5.41 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $5.73 \text{ mg kg}^{-1}$  respectivamente el valor más alto se ubica en el sitio 15 con ( $7.04 \text{ mg kg}^{-1}$ )

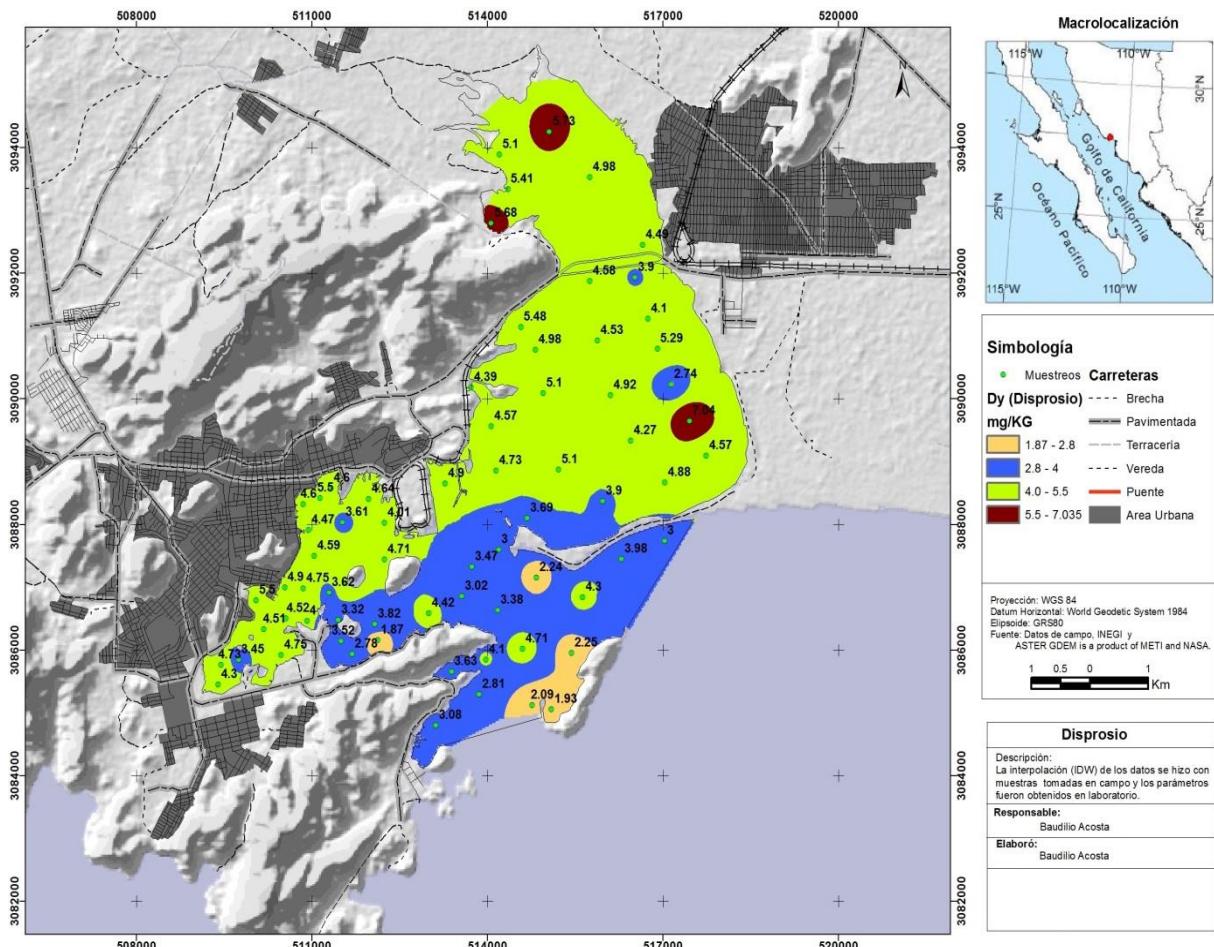


FIGURA 42. Distribución espacial de la concentración de Dy en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial del europio

El europio es un elemento que se distingue entre los lantánidos debido a los cambios que puede presentar en su valencia bajo condiciones oxido-reducción. La distribución espacial de este elemento en el complejo lagunar se presenta en la (FIGURA 42) y se observó que las zonas señaladas para las tierras raras ligeras fueron de la misma manera, los puntos importantes de concentración para Eu en donde se sobrepasó para las zonas del estero de Rancho, laguna de Empalme y bahía Interior el valor promedio en la lutita norteamericana que señalan Taylor y McLennan (1985). La concentración promedio de Eu dentro del complejo Lagunar de Guaymas es  $1.06 \text{ mg kg}^{-1}$ . Los sitios 6, 15 y 45 con concentraciones de  $1.62$ ,  $1.99$  y  $1.64 \text{ mg kg}^{-1}$ . Son los sitios que muestran mayor concentración en la bahía de Guaymas (FIGURA 43).

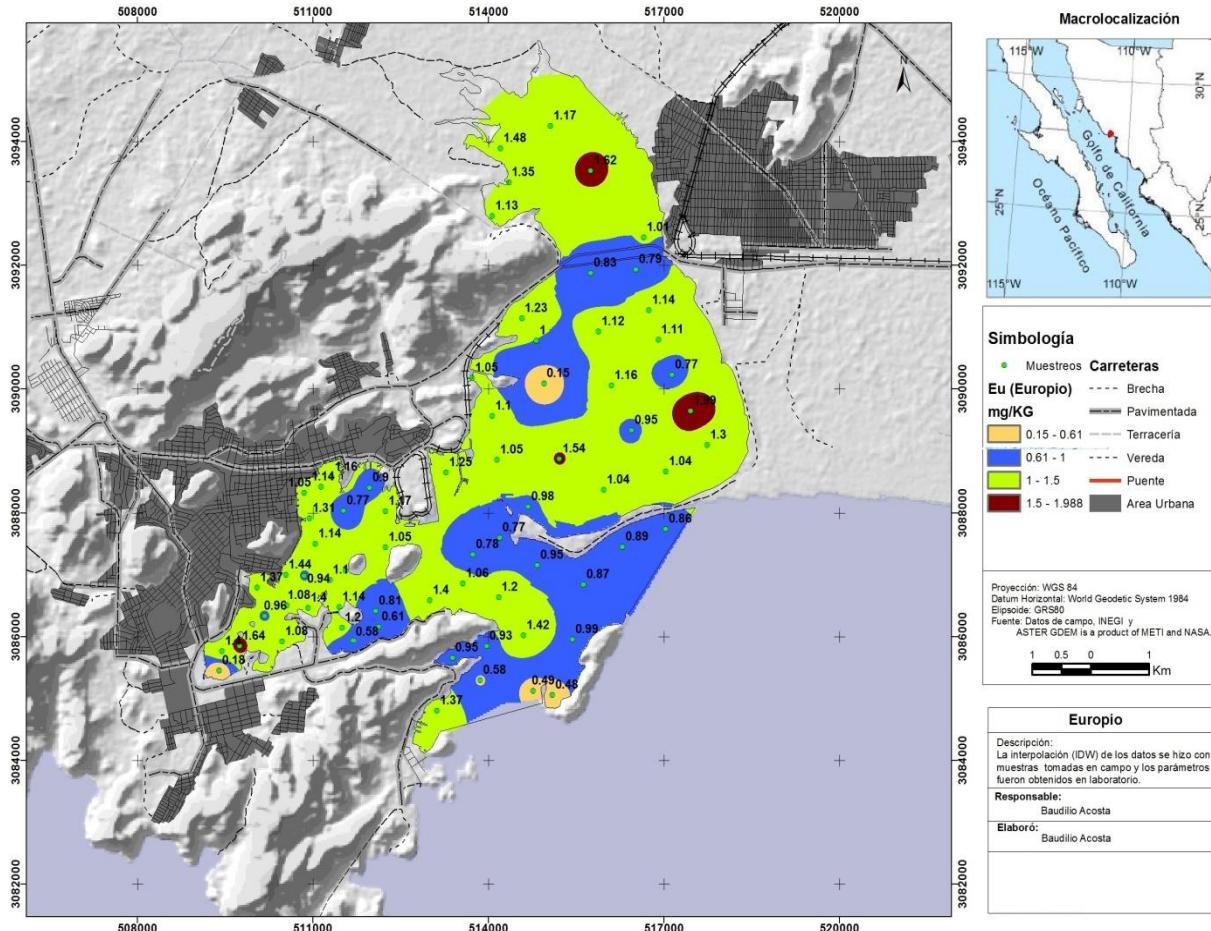


FIGURA 43. Distribución espacial de la concentración de Eu en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

## Distribución espacial del gadolinio

En cuanto al gadolinio el sitio 5 con una concentración de  $6.99 \text{ mg kg}^{-1}$  se ubica frente al astillero de la SEMAR y cerca de donde desemboca la cuenca del río Matape. El sitio 15 donde se encuentra la mayor concentración del complejo lagunar está ubicado a un costado donde drena la granja camaronera Maricultura de Sonora ver (FIGURA 43) la concentración que presento es de  $9.03 \text{ mg kg}^{-1}$ . Las concentraciones de estos sitios exceden los valores registrados por Taylor (1964).

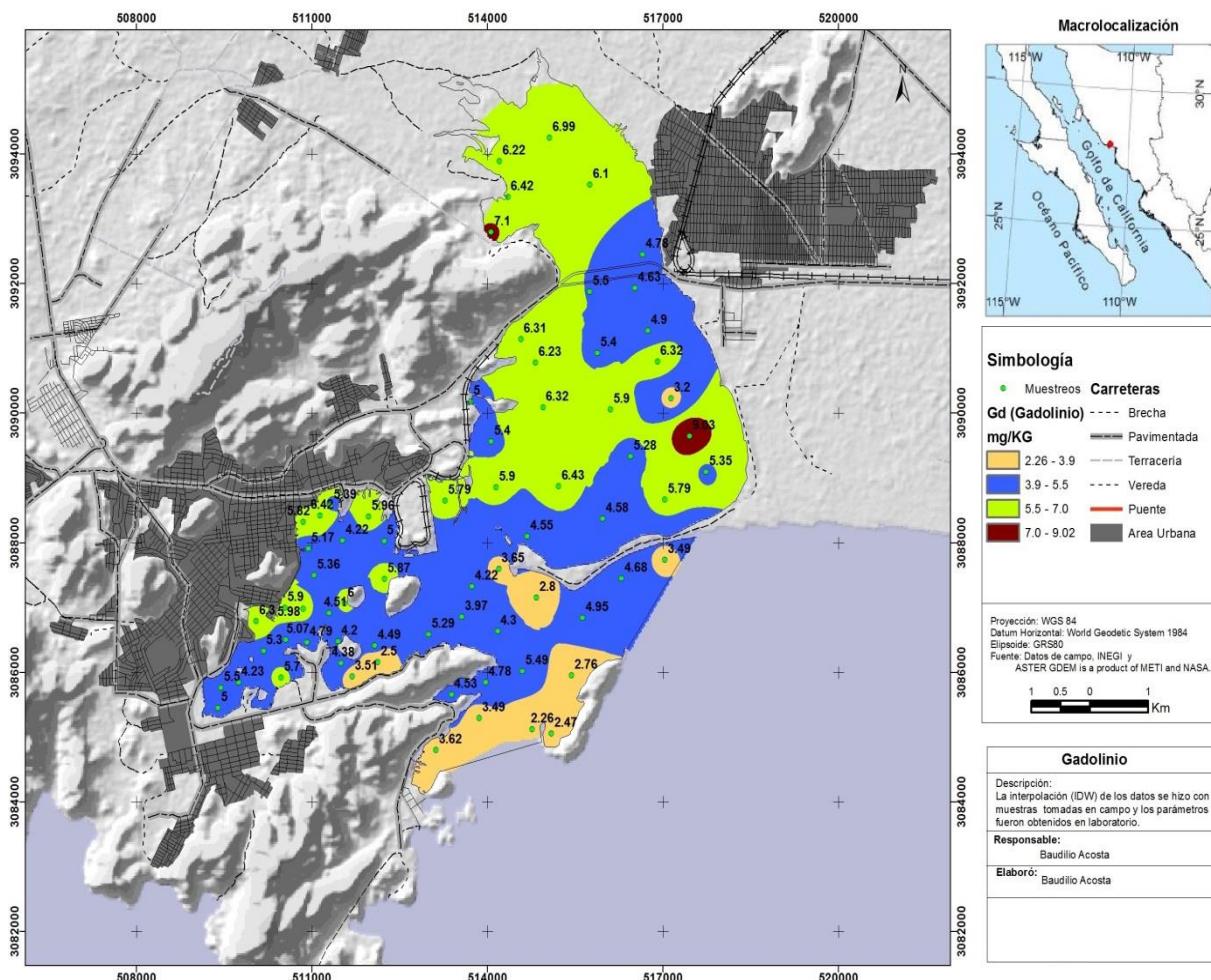


FIGURA 44. Distribución espacial de la concentración de Gd en sedimentos superficiales del sistema lagunar de Guaymas-Empalme.

La concentración promedio de Tb ( $0.74 \text{ mg kg}^{-1}$ ) fue menor con respecto a la de la corteza terrestre ( $0.9 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en los sedimentos del sistema lagunar de la bahía de Guaymas el valor más alto ( $0.87 \text{ mg kg}^{-1}$ ) corresponde al estero del Rancho, la concentración más baja ( $0.59 \text{ mg kg}^{-1}$ ) se registró en la bahía exterior (Tabla 12). Ninguno de los valores promedio sobre pasa al valor reportado por la corteza terrestre Taylor (1964).

Los lantánidos pesados Er, Tm, Yb y Lu obtuvieron concentraciones promedio menores a los datos registrados por Taylor (1964) y al igual que sus valores máximos, por lo que se consideró como diluidos.

El Ho fue el único de este grupo que no presentó dicho patrón (Tabla 12). Las concentraciones promedio de Ho en ambas zonas fueron casi iguales o menores ( $1.08 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $0.92 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $0.71 \text{ mg kg}^{-1}$ , con respecto al valor de referencia de la corteza terrestre ( $1.04 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

El Er y Tm presentaron concentraciones similares que no sobrepasaron al valor de referencia, sus valores de concentración promedio Er fueron  $2.84 \text{ mg kg}^{-1}$  en el (estero del Rancho),  $2.61 \text{ mg kg}^{-1}$  en la laguna de Empalme,  $2.41 \text{ mg kg}^{-1}$  en la bahía Interior y  $1.9 \text{ mg kg}^{-1}$  en la bahía Exterior. Para el caso de Tm  $0.41 \text{ mg kg}^{-1}$  en el estero del Rancho,  $0.37 \text{ mg kg}^{-1}$  en la laguna de Empalme,  $0.35 \text{ mg kg}^{-1}$  en la bahía interior y  $0.28 \text{ mg kg}^{-1}$  en la bahía exterior. La distribución espacial de las concentraciones de estos elementos fue similar a la de Ho, con las mismas zonas de acumulación y con bajos valores en zonas con alto contenido de carbonatos de calcio. Con respecto a los lantánidos pesados (Yb y Lu), las concentraciones máximas de Yb registradas en los sedimentos fueron en el estero del Rancho (Tabla 12) que superaron a las de lutita americana ( $3.1 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Este resultados también se presentó con Lu cuyos valores obtenidos fue para Yb comparado con el contenido de lutita  $3.1 \text{ mg kg}^{-1}$ . Mismo resultado que se observó con Lu, cuyos valores obtenidos (Tabla 12) fueron semejantes al valor de referencia  $0.5 \text{ mg kg}^{-1}$ . La distribución espacial de la

concentración de ambos elementos en los sedimentos del complejo lagunar fue similar al resto de los lantánidos pesados.

## **8.8 Normalización elementos de tierras raras (ETR) con lutita norteamericana**

Las tierras raras (ETR) como indicadores del origen de los sedimentos superficiales se presentan por varios factores como la fuerte partición química de los ETR en la fase particulada, su comportamiento durante el desgaste por acción atmosférica, la erosión, transportación fluvial y su alta resistencia a la movilización química (Taylor, 1964). La normalización de los lantánidos es una técnica que permite identificar variaciones en la composición de los ETR, normalizando el tamaño de grano del sedimento y excluyendo la influencia de diferentes abundancias (Grajeda Muñoz, 2005).

Se observaron diferencias particulares en el comportamiento de los valores normalizados por zona de e algunos elementos en muestras de sedimentos. Es por ello, que en este complejo lagunar (FIGURA 44) se identificaron cuatro tipos de patrón en los valores normalizados de los lantánidos, según McArthur y Walsh (1984).

- a) Tipo agua de mar, cuya característica principal es el incremento en ETRP y la disminución en el valor de Ce en la bahía Interior y bahía Exterior. La procedencia de estos elementos se asocia principalmente al agua de mar.
- b) Tipo anomalía de Eu negativa que está representado por la disminución en el valor normalizado de Eu, quizás resultado de la dilución por minerales, ejemplo de este patrón se encontró en la zona de la laguna de Empalme.
- c) Tipo anomalía de Eu positiva cuya tendencia está caracterizada por el incremento en el valor de Eu debido a la adsorción de minerales concentradores de ETR, representado para el sitio 15 con 1.61.
- d) Patrones que son parecidos o ninguno de los anteriores este comportamiento, se considerarse dentro del patrón agua de mar como resultado del incremento observado en ETRP y a la disminución de Ce, como se observó en la bahía Interior y bahía Exterior

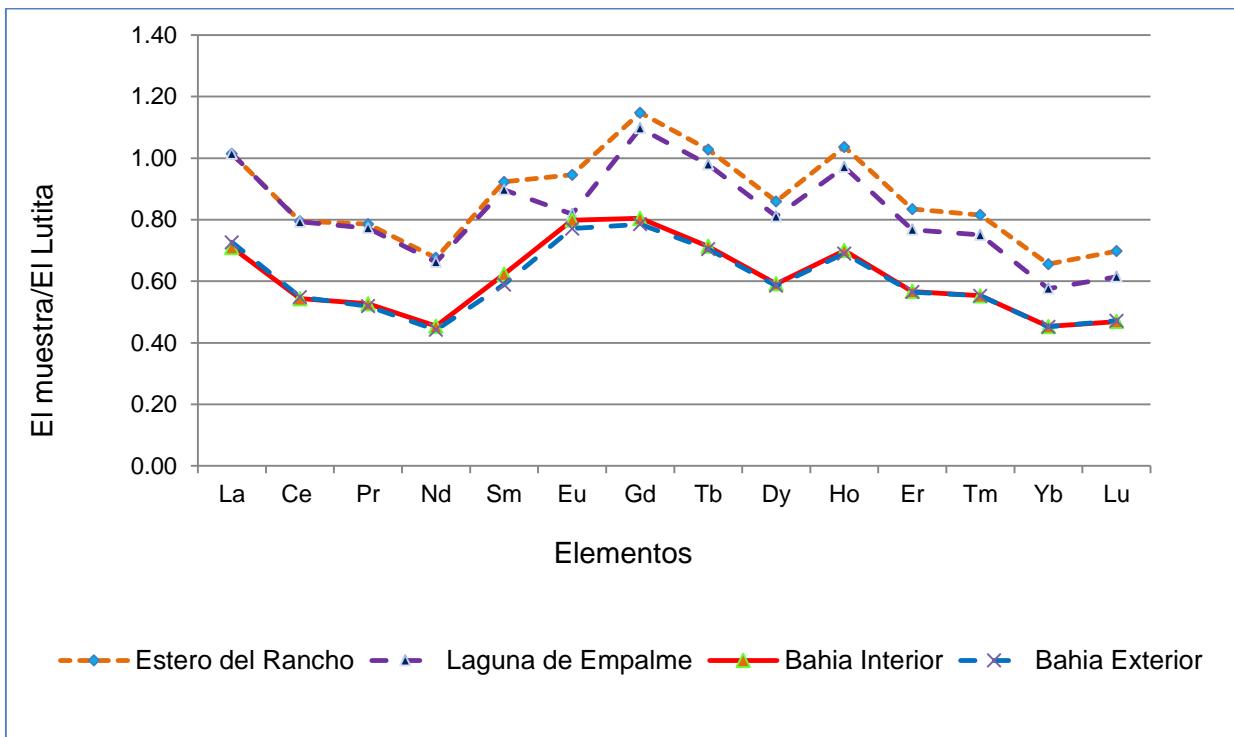


FIGURA 45. Comparación de las cuatro zonas de las concentraciones normalizadas de ETR de los sedimentos superficiales del complejo lagunar de la bahía de Guaymas.

La distribución de los valores normalizados para sedimentos del complejo lagunar de Guaymas Sonora presenta un patrón de anomalías negativas de Eu en sedimentos del complejo lagunar de Guaymas Sonora (Tabla 13).

Las concentraciones normalizadas corresponden a las zonas de estudio, de acuerdo a los valores normalizados de los sedimentos se observan distribuciones típicas definidas (Figura 44). De los valores normalizados se extrajeron algunos parámetros para demostrar el valor promedio de la anomalía de Eu en los sedimentos fue de 0.83 el cual se denomina como una anomalía negativa.

Tabla 13. Valores normalizados de lantánidos de los sedimentos superficiales del sistema lagunar de la bahía de Guaymas-Empalme.

Elemento	Esteros del Rancho	Laguna de Empalme	Bahía Interior	Bahía Exterior
La	1.014	1.014	0.710	0.726
Ce	0.795	0.793	0.543	0.549
Pr	0.785	0.773	0.526	0.519
Nd	0.676	0.662	0.454	0.442
Sm	0.923	0.897	0.623	0.589
Eu	0.946	0.819	0.798	0.771
Gd	1.148	1.097	0.804	0.785
Tb	1.028	0.979	0.713	0.704
Dy	0.859	0.811	0.592	0.585
Ho	1.036	0.971	0.700	0.690
Er	0.835	0.767	0.567	0.564
Tm	0.815	0.750	0.553	0.553
Yb	0.656	0.576	0.453	0.452
Lu	0.698	0.615	0.469	0.471

## 8.9 Cálculo del Índice de geoacumulación

En los sedimentos del sistema lagunar se observa la geoacumulación (Müller, 1979) de varios elementos. Con respecto al Se los sedimentos se encuentran fuertemente contaminados a muy fuertemente contaminado para las 4 zonas, mientras que los elementos As y Sb se encuentran moderadamente a fuertemente contaminados.

Los elementos que resultan estar en niveles no contaminados son el U para las 4 zonas, el Br para el estero del Rancho y la laguna de Empalme.

Tabla 14. Índice de geoacumulación (Igeo, Müller, 1979) de los lantánidos en los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas-Empalme Sonora.

Elemento	bahía exterior	bahía interior	laguna de Empalme	estero del Rancho
La	-0.44	-0.49	-0.73	-1.01
Ce	-0.60	-0.70	-0.89	-1.24
Pr	-0.92	-1.06	-1.22	-1.62
Nd	-0.89	-1.04	-1.16	-1.60
Sm	-0.74	-0.95	-1.02	-1.49
Eu	-0.32	-0.63	-0.54	-0.73
Gd	-0.41	-0.59	-0.65	-1.07
Tb	-0.59	-0.78	-0.83	-1.26
Dy	0.19	-0.01	-0.07	-0.50
Ho	-0.69	-0.92	-0.96	-1.42
Er	-0.62	-0.85	-0.88	-1.33
Tm	-0.83	-1.07	-1.09	-1.54
Yb	-0.52	-0.77	-0.78	-1.19
Lu	-1.12	-1.39	-1.39	-1.84
Rb	-0.39	-0.52	-0.85	-0.97
Cs	0.49	0.02	0.02	-0.62
Ca	-1.49	-0.86	-0.72	-0.18
Sr	-1.10	-0.59	-0.37	0.44
Ba	0.35	0.20	-0.07	-0.18
Sc	-1.41	-1.89	-1.55	-2.48
Cr	-1.99	-2.41	-2.10	-3.00
Fe	-1.26	-1.73	-1.37	-2.31
Co	-1.54	-2.30	-2.01	-2.95
Ni	-1.53	-2.92	-3.10	-3.81
Zn	0.08	-0.48	1.81	-0.42
Se	3.73	3.97	4.06	3.71
As	2.48	2.31	2.07	0.94
Sb	2.85	2.21	2.06	1.44
Th	-0.37	-0.65	-0.72	-1.01
U	1.11	1.24	1.39	0.90
Br	0.73	0.54	1.73	0.33
Hf	-0.07	-0.19	-0.27	-0.37
Ta	-1.21	-1.21	-1.58	-1.84
Zr	-0.79	-1.40	-1.89	-1.34

## 8.10 Contaminación de los elementos en estero del Rancho en base al índice de geoacumulación de Müller

Para la zona del estero del Rancho de acuerdo al Índice de geoacumulación de Müller del selenio está en el intervalo  $3 < I_{geo} < 4$  y por lo tanto es considerado como fuertemente contaminado. Los elementos As y Sb están en el intervalo de  $2 < I_{geo} < 3$  es decir moderadamente contaminados. El Br, Zn, U, Ba, Cs y Dy se ubican en el intervalo de  $< 0 < I_{geo} < 2$  es decir corresponde a no contaminado o moderadamente contaminado

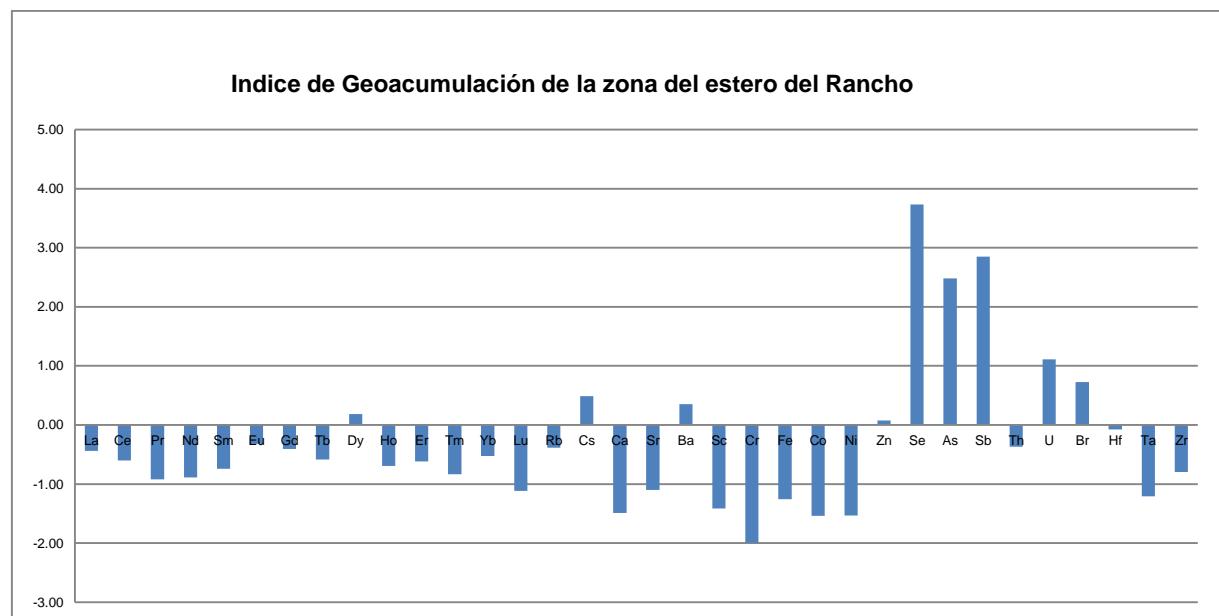


FIGURA 46. Índice geoacumulación de los elementos químicos en los sedimentos superficiales en el estero del Rancho.

## Contaminación de los elementos en laguna de Empalme en base al índice de geoacumulación de Müller

De acuerdo al índice de geoacumulación para selenio la zona de la Laguna de Empalme está fuertemente contaminado ( $3 < I_{geo} < 4$ ), mientras los elementos As y Sb se encuentran en el intervalo de  $2 < I_{geo} < 3$ , lo cual significa que están moderadamente contaminados. Con respecto al Br, U, Ba y Cs la zona se encuentra entre no contaminado a moderadamente contaminado ( $< 0 I_{geo} < 2$ ).

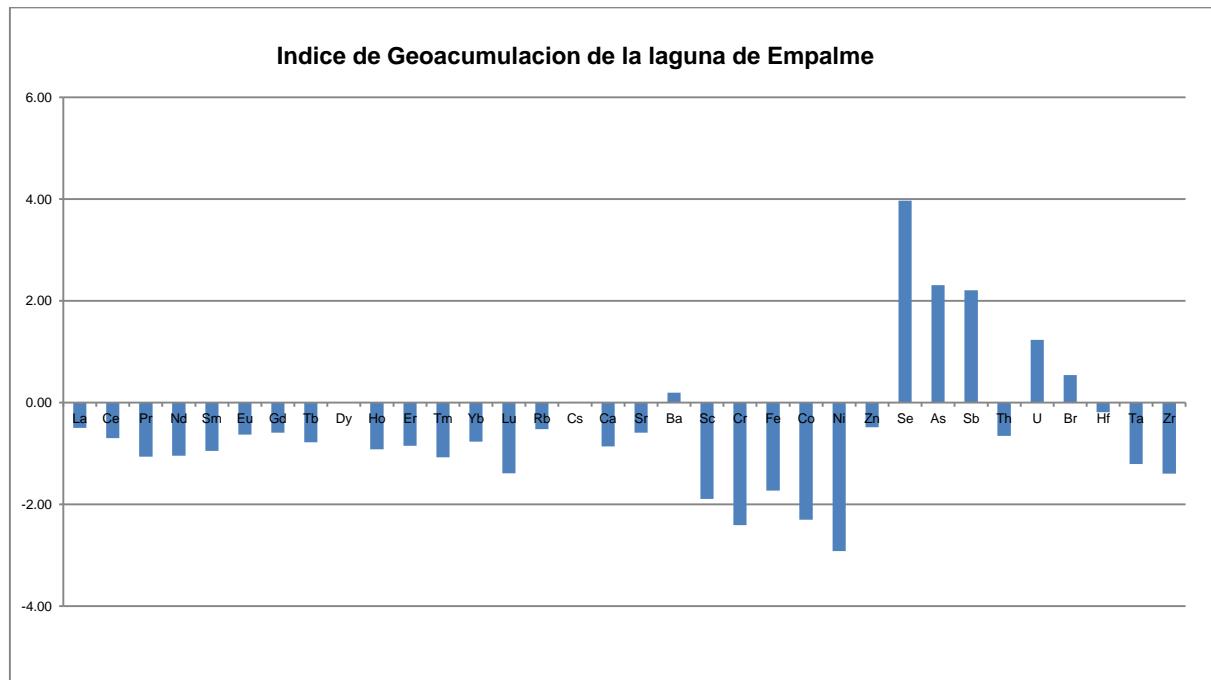


FIGURA 47. Índice geoacumulación de los elementos químicos en los sedimentos superficiales en la laguna de Empalme.

## Contaminación de los elementos en la bahía Interior en base al índice de geoacumulación de Müller

Para la bahía Interior el Índice de geoacumulación de Müller. Para Se está entre fuertemente a muy fuertemente contaminado  $4 < I_{geo} < 5$ , los elementos As y Sb están en el rango  $3 < I_{geo} < 4$ , es decir moderadamente contaminados. En el caso del Cs, Zn Br y U se ubican en el rango de  $< 0 < I_{geo} < 2$  que significa no contaminado o moderadamente contaminado.

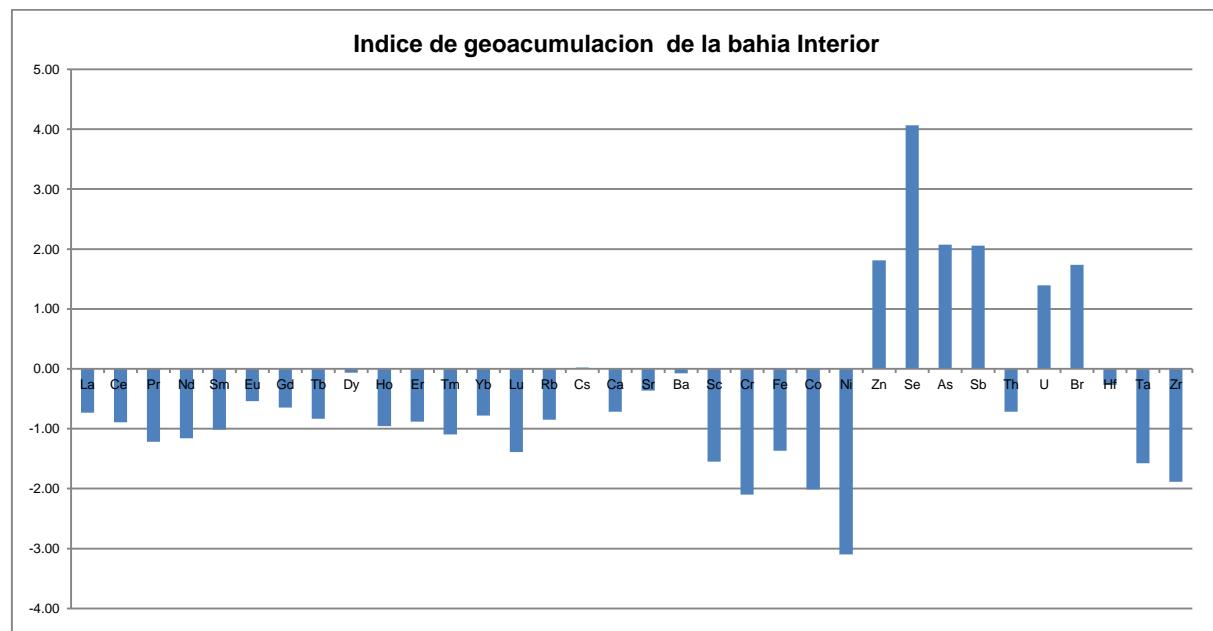


FIGURA 48. Índice geoacumulación de los elementos químicos en los sedimentos superficiales de la bahía Interior.

## Contaminación de los elementos en bahía Exterior en base al índice de geoacumulación de Müller

Para la zona de la bahía Exterior el Índice de geoacumulación de Müller para el selenio presenta muy fuertemente contaminado dado que está en el intervalo de  $3 < I_{geo} > 4$ . Los elementos que se consideran que no están en niveles contaminados o moderadamente contaminados son As, Sb, Sr, U, Br ( $< 0 I_{geo} < 2$ ).

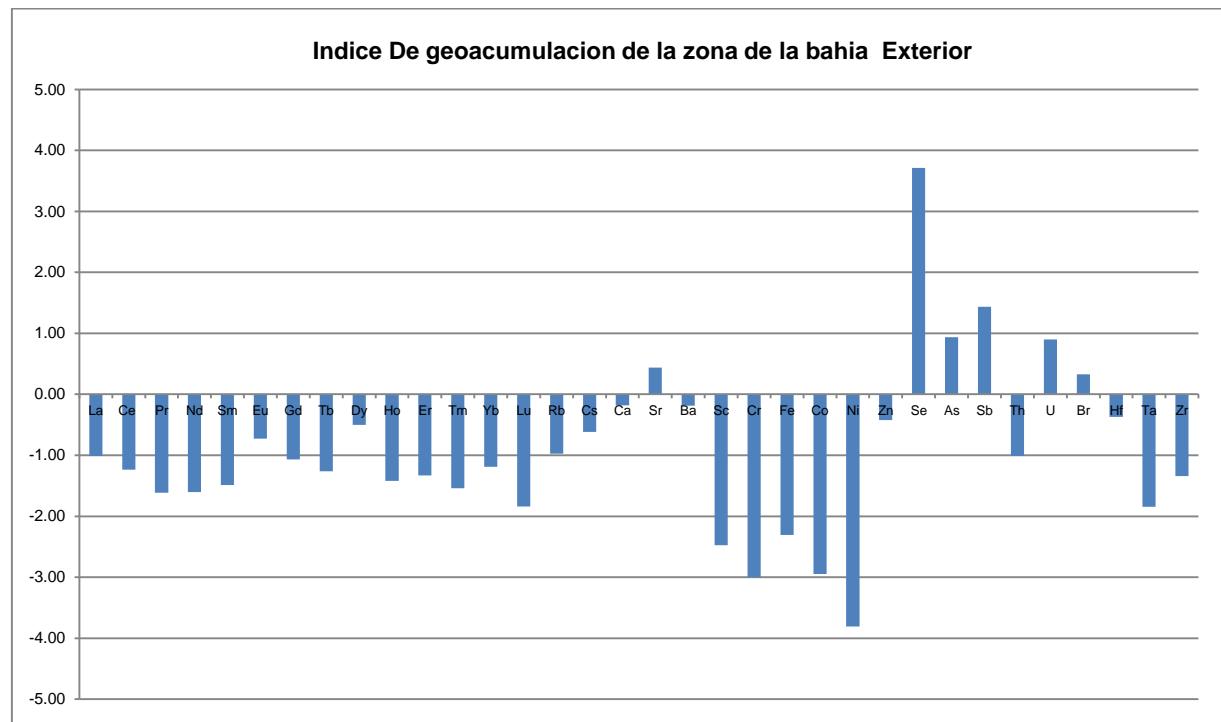


FIGURA 49. Índice de geoacumulación de los elementos químicos en los sedimentos superficiales de la bahía exterior.

Para el complejo lagunar de la bahía de Guaymas (FIGUAR 49) se presenta por zona el resumen de los elementos químicos que se encuentra desde no contaminados como Br, U, para las cuatro zonas, Cs para las 3 zonas excepto bahía exterior, los elementos que se encuentran no contaminados para bahía Exterior son As, Sb y Sr. Los elementos que se encuentra fuerte mente contaminados para las cuatro zonas es el Se mientras que para el estero de Rancho y la laguna de Empalme el As y Sb se encuentra moderadamente contaminados.

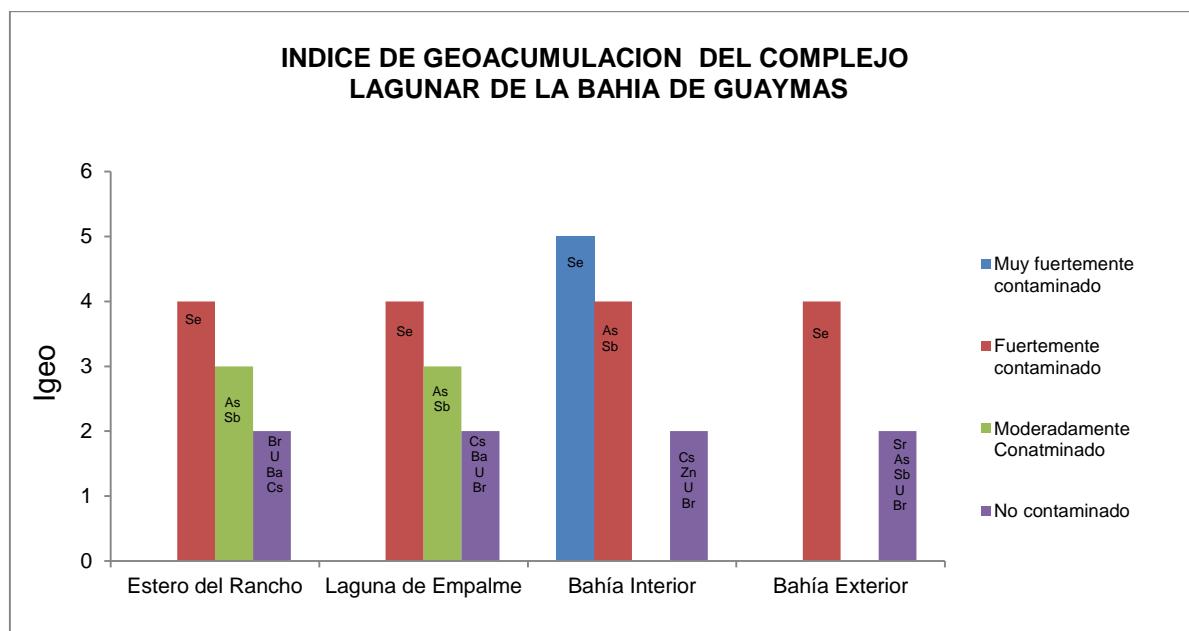


FIGURA 50.  $I_{geo}$  de los elementos en sedimentos superficiales más comunes en el complejo lagunar de Guaymas.

## **9 DISCUSIÓN**

### **9.1 Granulometría**

El tamaño de grano de los sedimentos del complejo lagunar de la bahía de Guaymas está influenciada por la presencia de limos que contribuyen en la acumulación de partículas finas. Su distribución en el puerto marítimo se asocia a la dinámica de las corrientes y a la profundidad del relieve batimétrico, que varía entre 1 m (estero el Rancho), 2 m (laguna de Empalme), 3.5 m (bahía Interior) y hasta 14 m que es la máxima profundidad (bahía Exterior) (Pedrín-Avilés *et al.*, 2006). Se observa una acumulación de sedimentos finos en las descargas de las granjas camaroneras en el área del estero del Rancho. Esta se asocia a la materia orgánica particulada en exceso que es descargada y acumulada en las áreas de manglar (Páez-Osuna *et al.*, 1999). Las arenas gruesas a muy gruesas se detectaron en la zona de la laguna de Empalme y en la bahía Exterior que es donde se presentan las mayores profundidades favoreciendo la acumulación de material calcáreo y sedimento grueso (Secretaría de Marina, 1991, Arreola *et al.*, 2001).

El comportamiento anterior obedece a la hidrodinámica del lugar encontrándose sedimentos finos en zonas de baja energía a diferencia de las áreas de alta energía donde ocurre principalmente el flujo y reflujo (entrada y salida de la marea) y que es donde se presentan los sedimentos más gruesos. (Rosales-Grano, 1999, Green-Ruiz, 2000).

El rango del tamaño medio de los sedimentos de la bahía de Guaymas (FIGURA 17) varía de 2.03 phi a 7.3 phi (0.24mm a 0.0068mm). Estos valores, corresponden los sedimentos clasificados entre gravas muy finas y arcillas medianas (Julien, 1995). El valor promedio de esta fracción es de 5.02 phi, siendo el promedio general de 55.96 %. El valor más común de phi cercano al promedio está alrededor de 5.37 phi (limos finos) el cual se presenta en el 42.91 % de los casos. Las concentraciones de materiales finos (limos y arcillas) se encuentran en la zona media de la laguna de Empalme, en el estero del Rancho y en la parte central de la bahía Interior., Estos valores coinciden con los reportados por Pedrín-Avilés *et al.*, (2006). Donde registran valores de 6 a 7 phi que corresponde a limos finos a muy finos. Para el caso del complejo lagunar, Green-Ruiz (2000), reporta porcentaje de material fino del 81.2 %.

Debido a la influencia de corrientes y olas en la cercanía de la boca de la bahía de Guaymas, se manifiesta la formación de canales y en la denostación de sedimentos gruesos. Los patrones de mareas y la influencia del litoral hacen que el sur de la bahía Exterior ha ocasionado que se hayan formado pequeñas barras de material de más alta energía Green-Ruiz, (2000) y Pedrín-Avilés *et al.*, (2006).

El porcentaje de los tamaños de distribución de las arenas es un parámetro muy significativo en la dispersión de sedimentos. Varía de 18.34 % de arenas gruesas hasta 61.08 % en arenas finas, pasando por un 19.79 % de arenas medias como puede observarse en la tabla (Tabla 3).

En la bahía de Interior los porcentajes de arcilla varían entre 0% y 2.98%. En la Tabla 3 se observa que la laguna de Empalme y estero del Rancho son las zona con mayores porcentaje de arcillas (4.93 % a 5.36 %). Estas zonas son de baja energía a diferencia de las áreas de alta energía que presentan sedimentos más gruesos.

## 9.2 Materia Orgánica

La bahía de Guaymas fue cuerpo receptor de aguas residuales urbanas sin tratamiento previo, (Bahía interior) que es el área con mayor contenido de materia orgánica en los sedimentos que se tienen registros ya que antiguamente en el año del 2005 se dejó de verter las aguas del drenaje municipal a la Bahía de Guaymas (Elizalde Servín, 2009).

Los sitios de descarga se localizaban hacia la porción oeste de la bahía Interior, tres sitios ubicados en la costa, 40, 41 y 42 con gastos anuales de 5'045,760 m<sup>3</sup>, 966,301 m<sup>3</sup> y 267,425 m<sup>3</sup>, respectivamente (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2004).

El sitio 41 ubicado frente a la desembocadura de los drenes de la antigua descarga municipal de la ciudad de Guaymas mostró una porcentaje del 9.78 % de materia orgánica en los sedimentos, mientras que, Green-Ruiz (2000) reporto para este sitio 6.9 % de m.o.

Otro de los puntos donde se registra materia orgánica en los sedimentos superficiales es a un costado del muelle fiscal (7.38 %). Esta acumulación ha sido producto de las maniobras de cargas y descargas de los barcos que transportan granos como trigo,

garbanzo y maíz. En dichas operaciones existen perdidas vertidas al mar por reparaciones de las bandas de carga o en el cambio de llenado de las bodegas. El promedio anual de cargas de granos es de 4 millones de toneladas anuales (Programa Maestro de desarrollo puerto de Guaymas Sonora 2011-2016). Otro sitio ubicado en la parte norte de la isla Pájaros coinciden con las zonas del de descargas de aguas residuales de la industria de procesamiento de productos del mar (Rodolfo Sánchez Taboada) la acumulación de materia orgánica en este sitio es debido al reflujo de las corrientes (Rosales-Grano, 1999).

### **9.3 Factor de enriquecimiento (FE)**

El Factor de enriquecimiento es una herramienta útil que sirve para identificar si existe enriquecimiento con respecto a la corteza. El elemento normalizador es Sc, por ser análogo de aluminio. Este procedimiento disminuye el efecto del tamaño de grano y de componentes diluyentes como carbonatos de calcio (Chester, 2003).

De acuerdo a la clasificación del factor de enriquecimiento los elementos se agruparon en cuatro categorías y que coinciden con lo reportado por Shumulin *et al.* (2002): a) altamente enriquecidos (Se, Sb y As), b) enriquecidos (U, Br, Zn, Sr, Ba, Ca, Cs, Hf, Dy, Eu, La, Rb, Th, Gd, Ce, Yb y Tb), c) conservativos (Zr, Er, Ho, Sm, Tm, Nd, Pr, Ta, Lu, y Fe) y d) diluidos (Co, Cr, Ni y Sc).

### **Distribución de los elementos Se, As y Sb que se encuentran altamente enriquecidos**

Los elementos altamente enriquecidos ( $FE \geq 10$ ) como As y Sb, pueden ser asociados al aporte continental desde las cuencas de drenaje o por la erosión de la costa y las rocas volcánicas sobre todo en las zonas de la laguna de Empalme (FIGURA 5).

En el primer grupo se encontraron algunos elementos de importancia ambiental como Sb y As. Estos elementos presentaron el mayor factor de enriquecimiento (FE) con 18.15 y 15.19 por lo que se considera altamente enriquecidos. Las mayores concentraciones las tienen As ( $19.6 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y Sb ( $3.68 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que fueron registradas en el estero del Rancho.

Debido a las desembocaduras de los arroyos por donde drena de la sierra de Santa Úrsula en épocas de lluvia, los sedimentos arrasados están constituidos de arenas de grano fino con limo y arcilla que proceden de la erosión de las montañas de la sierra de Santa Úrsula. En cambio, los drenes de la ciudad de Empalme contribuyen con un alto porcentaje de carbono orgánico que proviene de las aguas residuales que transportan material terrígeno rico en Fe hacia la costa (Varsanyi y Kovács, 2006). El uso más común de elementos As y Sb se da en pesticidas, en la manufactura de vidrio y esmaltes, en aleaciones y equipo electrónico (Clark, 2002), por esta razón no se descarta la posibilidad de que el alto enriquecimiento de As puede ser antropogénico. Debido a que aguas arriba de la cuenca hacia la sierra de Santa Úrsula en los arroyos el servicio geológico mexicano realizó un muestreo donde encontró concentraciones de As 6.19 a 18.13mg kg<sup>-1</sup> (SGM carta geoquímica por arsénico, octubre 2000)

### **Distribución de los elementos que se encuentran enriquecidos**

Los elementos que se encontraron enriquecidos ( $2 \geq FE < 10$ ) corresponden (U, Br, Zn, Ba, Ca, Cs, Hf, Dy, Eu, La, Rb, Th, Gd, Ce, Yb y Tb). El principal aporte de estos elementos puede estar dado por la erosión de las montañas de la zona volcánica de la Sierra de Santa Úrsula (Vidal-Solano *et al.* 2007).

Otro elemento que presentó enriquecimiento fue el Zn. Este elemento puede estar asociado a la antigua descarga municipal de la ciudad, y a las escorrentías de la ciudad de Guaymas durante las lluvias así como a los aportes de los astilleros Selecta y Luebbert, lo que haría que su enriquecimiento fuera su origen antrópico., La distribución espacial se observa en la (FIGURA 4). Donde se destacan altos valores frente al CET de Mar.

Las actividades antropogénicas que influyen en la concentración de Zn en el ambiente pueden ser cuando se extrae este elemento de la corteza (Taylor, 1964) al ser un proceso relativamente fácil mediante la formación de ligandos orgánicos (Chiu-Wen *et al.*, 2007). Un factor que influyó en el enriquecimiento de Zn en la cuenca marina es que fue cuerpo receptor de aguas residuales urbanas sin tratamiento previo (Elizalde-Servín 2009). Adicionalmente se observó una afinidad con el tamaño de grano fino en la bahía Interior ya que la distribución espacial de ambos fue similar., La excepción

fueron las estaciones 31, 32 y 40 que registraron las mayores concentraciones (585, 1140 y 715 mg kg<sup>-1</sup>), el resto de las estaciones presentan concentraciones cercanas a las reportadas para MESS-2 y BCSS-1 (172 y 119 mg kg<sup>-1</sup> MacLaren, 1999). Sin embargo, el estándar PACS-1 reporta valores de 824 mg kg<sup>-1</sup>. Sin embargo Green-Ruiz (2000) reportó altas concentraciones para los mismos sitios.

## **Distribución de los elementos que presentaron un comportamiento conservativo**

En lo referente a los elementos que presentaron un comportamiento conservativo como son: Zr, Er, Ho, Sm, Tm, Nd, Pr, Ta, Lu, Sr, Ni y Fe por lo general parte de la litología de las rocas de algunos minerales como montmorillonita, illita y caolinita Green-Ruiz (2000). Reportó alta correlación de Fe a la montmorillonita ( $r^2= 0.41$ ). La presencia de posibles contaminantes en el ambiente se da debido a las dos minas abandonas y otras dos en operación de las cuales se extraen Co, Cu, estas minas se encuentran aguas arriba de las subcuenca, que en épocas de lluvias drena en el estero de Rancho generando una acumulación de elementos químicos de forma antropica. (<http://www.sgm.gob.mx/>).

### **Hierro**

De acuerdo con el factor de enriquecimiento el promedio general es de un FE 1.13 por lo tanto en este elemento dentro del complejo lagunar se considera conservativo (Tabla 10). Las concentraciones en el complejo lagunar de Guaymas no sobrepasa las concentraciones reportadas como moderada (BCSS-1) que es 3.28% de hierro. Sin embargo no sobre pasan los valores de referencia más altos, MESS-2 de 4.36% y PACS-1 de 4.9% de hierro MacLaren, (1999). Y 4.5% dado por Taylor (1964). El promedio general de la bahía de Guaymas fue de 2.94 %., Este valor encontrado para bahía de Guaymas está por debajo de la concentración encontrada por Green-Ruiz, (2000) de 3.01% y Acosta-Vargas (2002) reportó valores de 4.26 para la bahía de Guaymas.

## **9.4 Distribución espacial de la concentración del Sr**

El Sr es un elemento relativamente disperso que se encuentra especialmente en la aragonita aunque raramente forma minerales propios. El Sr es el principal catión en estroncianita  $\text{SrCO}_3$  y Celestita  $\text{SrSO}_4$  los cuales se presentan en ciertos depósitos hidrotermales y rocas carboníticas (Romero-Ordoñez *et al.*, 2000; Rodríguez-Meza, 2004).

La concentración promedio en la corteza terrestre de estroncio es de  $375 \text{ mg kg}^{-1}$ . Este valor es superado en varios sitios en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme. Altos niveles de este elemento están asociados con aportes de material calcáreo por lo que se le relaciona a sitios con bancos de almejas (Arámbula-Pujol 2006)

El aumento de la concentración de Sr se asocia al abundante material calcáreo en los sedimentos debido a la relación que mantiene con esta fracción biogénica. La distribución espacial del Sr en los sedimentos superficiales con mayor contenido son ( $1785, 1940$  y  $1930 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en los sitios de muestro 52, 54 y 62 los cuales representan un FE de  $11.39, 61.19$  y  $28.37$  respectivamente.

La concentración promedio del Sr en los sedimentos de la bahía de Guaymas ( $649.63 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y con respecto al valor de referencia de la corteza terrestre presento un enriquecimiento de  $6.18$  veces.

## **Calcio**

La distribución del Ca presenta la mayor concentración (7.29% a 14.6%) en la parte central de la bahía Exterior del complejo lagunar de la bahía de Guaymas. La distribución espacial de carbonatos en los sitios 56, 57, 58, 59, 60, 61 y 62 que puede deberse a abundantes depósitos calcáreos Green-Ruiz (2000).

Esto coincide con la distribución espacial de carbonatos, lo que indica la formación de carbonato de calcio de forma natural. El resto del sistema mostró menor concentración de calcio en los sedimentos superficiales entre 1.46% al 21.9% con un contenido promedio en el complejo lagunar de Guaymas de 5.47%, siendo 4.15% el valor promedio de la corteza dado por Taylor (1964).

## **Elementos con factor de enriquecimiento FE < 1 (Diluidos)**

Los elementos que se clasificaron como diluidos con FE <1 en las cuatro zonas del complejo lagunar fueron Ni, Co, Cr, y Sc. Los elementos que se encontraron diluidos (Ni, Co, Cr y Cs), son los que presentan enriquecimiento en zonas de yacimientos mineros en Santa Rosalía, B.C.S. reportados por (Rodríguez Figueroa, 2004). Dado que el sistema lagunar no se encuentra cercano a algún distrito minero, ni recibe descargas de algún río, probablemente eso explica su baja concentración en los sedimentos.

Con respecto a las concentraciones de Ni, Co, Cr, Cs que se encuentran diluidos en la bahía de Guaymas con respecto a la corteza terrestre, pero cabe mencionar que los valores están por arriba de otros estudios realizados en diferentes lugares como.

Lugar	Cr	Ni	Co	Observación
Corteza terrestre	100	75	28	
Bahía de Guaymas	31.70	15.32	8.47	estudio actual
Coatzacoalcos Veracruz		9.9		Ortiz y Carranza (1997)
Bahía de Todos Santos		11.9		Romero-Vargas (1995)
Laguna de Altata	15.7	14.7		Green y Páez (1997)
Rio Papaloapan	30.6		22.8	Rosales et al. (1986)
Topolobampo Sinaloa	31.9		8.7	Leal-Acosta 2008
Puerto de Mazatlán	7.6		7.6	Páez-Osuna 1997

## **9.5 Elementos de tierras raras y su Índice de geoacumulación $I_{geo}$**

Las denominadas “tierras raras” son consideradas como inmóviles durante el metamorfismo y generalmente proporcionan excelente información acerca de los materiales pre-metamórfico. Sin embargo, la removilización de las “tierras raras” ha sido observada en algunos casos, donde hay una proporción elevada fluido/roca, tales como el metasomatismo de alta temperatura. (Vidal-Solano et al 2007). El metamorfismo de bajo grado y meteorización. Los elementos lantánidos han sido usados como monitores de los cambios químicos involucrados en los depósitos minerales hidrotermales (Rivera, 2007).

Los elementos de tierras raras son químicamente similares (Evensen *et al.*, 1978) con excepción de Eu, que es más sensible a las condiciones de oxígeno, los elementos asociados a la textura son (As, Cs, Co, Br y Sc). Su distribución es controlada por la presencia de materia orgánica y material terrígeno, sin embargo la composición litológica de los sedimentos está compuesta por elementos de tierras raras cuya distribución de estos elementos depende de la presencia de coloides y el pH (Sholkovitz, 1995).

### **Arsénico**

El contenido promedio de arsénico en los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas oscila de 0.13 a 20.4 mg kg<sup>-1</sup>. Los niveles más altos de arsénico en los sedimentos se detectaron en el estero del Rancho, en áreas cercanas a las instalaciones de CFE-PEMEX, en el sitio del antiguo drenaje municipal, alrededor del muelle fiscal y cerca del parque industrial “Sánchez-Toboadá”. Las concentraciones promedio de arsénico 11.77 mg kg<sup>-1</sup> sobrepasan más de 6 veces el valor promedio de 1.8 mg kg<sup>-1</sup> de la corteza continental (Taylor, 1965). Este valor se encuentra sobrepasado en casi todas las estaciones hasta alcanzar un valor de FE de 11.33. La concentración del sitio 13 localizada en la laguna de Empalme, puede provenir de la erosión de las montañas de la zona volcánica de la sierra de Santa Úrsula y de material continental intemperizado que drena en la subcuenca (Vidal-Solano *et al.*, 2007).

Las concentraciones encontradas en la Bahía de Guaymas están por abajo de lo reportado en un estudio realizado en la Ensenada de Paz, B.C.S. Con 30 mg kg<sup>-1</sup> Shumilin *et al.* (2001) donde ya se han reportado altos niveles de arsénico en agua y sedimentos cuyo origen es consecuencia de la litología de la zona.

### **Selenio**

La concentración promedio de selenio en la corteza terrestre es de 0.05 mg kg<sup>-1</sup> Y de arsénico 1.8 mg kg<sup>-1</sup>. Todas las estaciones muestreadas sobrepasan estos valores de arsénico y selenio. Aparentemente de acuerdo con el índice de geoacumulación de Müller, toda este sistema costero se encuentre de moderadamente hasta muy fuertemente contaminado por estos elementos. Este mismo fenómeno está reportado

para la bahía y en la Ensenada de la Paz (Rodríguez-Meza, 1999), siendo en ambos casos los elementos más enriquecidos de todos los analizados. En la bahía de la Paz, no existen fuentes antropogénicas de estos elementos por lo que se sugiere el origen vulcanosedimentario (Rodríguez-Castañeda, 2001). Con base a esto es posible que el origen de los altos niveles de estos elementos en el sistema costero Guaymas-Empalme sea resultado de la composición geológica del área, ya que también presenta áreas clasificadas como volcano sedimentarias que forman parte del sistema estudiado (<http://www.sgm.gob.mx/>). Cabe mencionar que altos niveles de un elemento no significan que sean tóxicos ya que hay que considerar su biodisponibilidad es decir, la fracción de ese sedimento que tiene la composición química que es asimilable por los organismos y que es muy baja cuando se encuentran en forma de sulfuros.

### **Antimonio**

Las concentraciones de antimonio en los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas van de 0.15 a 3.68 mg kg<sup>-1</sup>. En los sedimentos marinos la distribución espacial de las concentraciones de antimonio presenta como particularidad un marcado incremento en las sitios localizados en el estero del Rancho. Los sitios 1, 2, 4, 5 y frente a la descarga municipal, el muelle fiscal y frente a las instalaciones de CFE-PEMEX. También se le encuentra en el mismo rango de concentración en la línea de costa a partir del sitio en que se encuentran los astilleros hasta la entrada del parque industrial “Sánchez-Toboada”.

Este elemento está asociado a descargas de material terrígeno y puede estar asociado a la formación geológica de esta área. El nivel promedio de antimonio en la corteza terrestre es de 0.2 mg kg<sup>-1</sup>. Este valor es sobrepasado por prácticamente en todas las estaciones. Esto mismo se reporta en la bahía de la Paz. 0.9 mg kg<sup>-1</sup> (Rodríguez- Castañeda, 2001) y (Rodríguez-Meza, 1999) reporta valores en la laguna de Paz de 1.0 mg kg<sup>-1</sup> todos estos valores están por debajo de los reportado (Greig *et al.*, 1977).

Esto puede vincularse con los resultados obtenidos en este sistema costero Guaymas-Empalme ya que este elemento está asociado a actividades mineras que se ha realizado en la zona o a la litología específica de las rocas.

## **Cobalto**

La concentración de cobalto en los sedimentos de Guaymas va de 3.08 a 15 mg kg<sup>-1</sup>. Las concentraciones más altas se encuentran a lo largo de una delgada franja intermareal que inicia en el malecón en la zona en que se ubica la descarga municipal hasta las instalaciones de CFE-PEMEX, concentrándose principalmente a un costado del muelle fiscal.

La mayor parte de la bahía presenta concentraciones entre 7 y 12 mg kg<sup>-1</sup> de Co en los sedimentos. Este intervalo coincide con el reportado por Álvarez-Arellano (1995) y Rodríguez-Meza (1999) y que los consideran bajos.

Valores de hasta 17 mg kg<sup>-1</sup> de Co en sedimentos de laguna Altata y Mazatlán en Sinaloa (Green-Ruiz y Páez-Osuna, 2001; Soto-Jiménez y Páez-Osuna, 2001) ya son considerados altos son reportados en ambientes propensos a la acumulación de desechos a causa de una alta actividad antropogénica.

La concentración promedio de cobalto en la corteza terrestre es de 25 mg kg<sup>-1</sup>. Este elemento es poco abundante en el sistema costero de Guaymas. De acuerdo con el índice de geoacumulación de Müller ninguna estación se encuentra contaminada por este elemento.

## **Cromo**

En general el complejo lagunar de la bahía de Guaymas presenta un FE 0.77 considerándolo como un elemento diluido según (Taylor, 1964). Sin embargo la actividad industrial del curtido de cueros, la industria textil, también la manufactura de colorantes y pigmentos, pueden descargar cromo (III) y cromo (VI) a los cuerpos de agua. Este tipo no se desarrolla en la costa de Guaymas, se podría pensar que la presencia de cromo en los sedimentos se debe a procesos naturales como escurrimiento y vulcanismo (ATSDR, 2000).

La precipitación por lluvias de compuestos de cromo que se encuentran en el aire formando parte de pequeñas partículas de polvo producto de la incineración del carbón y derivados del petróleo los autores relaciona altos contenidos de Cr (EPA 1986)

El sitio 15 que se encuentran Enriquecido con un FE de 2.64 se ubica en la desembocadura del río Matape, astillero de la SEMAR y al norte la industria Maquilas

Teta Kawi S.A. de C.V. En esta zona destaca el muelle fiscal y PEMEX-CFE., que ocasionalmente ocurren pérdidas accidentales al medio marino adyacente de sustancias o materiales (combustibles, pesticidas, aditivos) con altos contenidos de metales pesados (Cr, Cu, Pb, Ni, Cd, Hg, Mn) o que pueden alterar la presentación química de los elementos ya presentes en el medio marino y son transportados mediante la corriente a diversos puntos de la bahía (Acosta-Vargas, 2002).

### **Níquel**

Los sitios con mayor presencia de níquel fueron la estación ubicada cerca de la descarga municipal y del muelle CFE/PEMEX, entre otras. Altos niveles de níquel están relacionados con presencia de descargas residuales y por lo tanto ayuda a identificar sitios influenciados por actividades antropogénicas. De acuerdo con el índice de geoacumulación de Müller las estaciones 6, 20 y 48 presentan una contaminación moderada por este elemento.

Las concentraciones de níquel fueron mayores en la bahía interior en el sitio 48 con  $52.83 \text{ mg kg}^{-1}$  seguido de la laguna de Empalme en el sitio 20 con  $39.33 \text{ mg kg}^{-1}$  y el estero del Rancho con  $42.83 \text{ mg kg}^{-1}$  dichos resultados concuerdan con los datos reportados.  $58.5 \text{ mg kg}^{-1}$  por (Acosta-Vargas, 2002) y  $47.3 \text{ mg kg}^{-1}$  por Green-Ruiz (2000) dado que el níquel tiende a acumularse en la fracción fina del sedimento, y por tanto los sitios donde el porcentaje de arcilla fue mayor.

Asimismo, la presencia de níquel en los sedimentos estudiados puede deberse al ingreso al cauce de desechos no ordinarios, como electrodomésticos y baterías, que emplean aleaciones de níquel en su fabricación, y a productos líquidos usados en la industria metalmecánica, como aceites, pinturas y lubricantes procedentes del lavado de calles por la lluvia o que ingresan en forma directa al cauce (Marrugo *et al.*, 2006).

### **Escandio**

Las concentraciones de escandio en los sedimentos superficiales va de  $1.85$  a  $15.7 \text{ mg kg}^{-1}$ . Los niveles de escandio (Sc) se encuentran por debajo de los niveles promedio reportados para la corteza terrestre que es de  $22 \text{ mg kg}^{-1}$  (Taylor, 1964). Por lo que es poco abundante en este sistema costero. El escandio se encuentra distribuido principalmente enfrente del malecón y en un área que presenta varias

descargas intermitentes con una profundidad promedio de 2 m. La concentración de Sc en los sedimentos superficiales presento una distribución uniforme con un promedio de  $9.87 \text{ mg kg}^{-1}$ . Esta concentración fue ligeramente mayor que el promedio de los sedimentos superficiales de la bahía de la Paz con un valor  $7.9 \text{ mg kg}^{-1}$  (Rodríguez- Castañeda, 2001) y de la laguna de la paz  $6 \text{ mg kg}^{-1}$  reportados por Rodríguez-Meza (2004). En general los niveles de Sc en la bahía de Guaymas como en la laguna y bahía de la Paz indican contenidos bajos de este elemento.

El escandio es un elemento indicador del aporte terrestre en el sistema marino y está asociado a la corriente litoral de la bahía, el aporte terrígeno por descargas de arroyos y el transporte eólico de material. Este elemento está asociado a minerales como piroxenos, anfíboles y biotita. De acuerdo con el índice de geoacumulación, ninguna estación se encuentra contaminada por este elemento.

### **Zinc**

La concentración de zinc en los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas va de 11 a  $1140 \text{ mg kg}^{-1}$ . La concentración más alta está ampliamente distribuida en la zona con actividades náuticas, donde hay un gran número de embarcaciones ancladas en un estado muy deteriorado y varios astilleros.

Los valores altos de zinc encontrados se detectan cerca de la isla de Almagre grande y Almagre Chico. En la zona de los astilleros este elemento se asocia tanto con materiales que entran al medio marino mediante la erosión de rocas, así como por actividad hidrotermal y la descarga de aguas residuales.

De acuerdo con el índice de geoacumulación de Müller, las estaciones 28, 33, 34, 35, 38, 44, 45, 47 50, 52, 53, 55 presentaron una contaminación moderada por este elemento; las estaciones 30, 31, 36, 39, 40, 41, 42, 43, 46, 51 y 63 presentaron una contaminación de moderada a fuertemente contaminada, por consiguiente el sitio 32 está fuertemente contaminada por zinc (Acosta-Vargas, 2002).

La concentración promedio de zinc en la corteza terrestre es de  $70 \text{ mg kg}^{-1}$ . Este valor es superado en la mayoría de los sitios.

En relación al reportado de ambientes impactados por actividades industriales y asentamientos humanos, como es la bahía Cuerno Dorado en el Mar de Japón que presenta concentraciones de  $362 \text{ mg kg}^{-1}$  (Tkalin *et al.*, 1996). Y que es superada

por el estuario Restronguet Creek de la Gran Bretaña que presenta valores de hasta  $2821 \text{ mg kg}^{-1}$  (Bryan y Langston, 1992).

### **Bario**

El bario presento una concentración promedio en el complejo lagunar de Guaymas de  $602 \text{ mg kg}^{-1}$  por debajo de los  $853 \text{ mg kg}^{-1}$  reportado Rodríguez-Figueroa, (2004). El enriquecimiento se presenta en las cuatro zonas, en estero del Rancho, laguna de Empalme, bahía Interior y bahía Exterior su FE fue de 3.86, 4.87, 3.08, y 6.59 respectivamente por lo tanto estas zonas se encuentran enriquecidas de acuerdo a Taylor (1964). La presencia de este metal parece deberse principalmente a procesos erosivos y depósitos minerales en el fondo de los ríos. Aunque debe considerarse el aporte antropogénico por aguas residuales domésticas y de talleres mecánicos, cargadas de aceites, combustibles o pinturas, con aditivos de bario. Igualmente, cauces contaminados con desechos sólidos como llantas y botellas de vidrio pueden poner en circulación en la masa de agua cantidades pequeñas de bario, las que, dependiendo del pH, precipitarán como sulfatos y carbonatos, incorporándose a los sedimentos (ATSDR<sup>1</sup>, 2007).

La concentración de bario en la corteza terrestre es de  $370 \text{ mg kg}^{-1}$ . Esta concentración es sobrepasada en una gran cantidad de sitios.

### **Europio**

El europio es indicador de aportes terrígenos y de fuentes hidrotermales, El valor promedio se estima para la corteza continental de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  (Taylor, 1964). Las concentraciones de este elemento en los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas van de 0.3 a  $1.06 \mu\text{g/g}$ . La concentración más alta ( $1.99 \text{ mg kg}^{-1}$ ) se encuentran en la zona de la laguna de Empalme ubicada en el sitio 15. En zona de la laguna de Empalme donde están las descargas de la termoeléctrica y los muelles de CFE-PEMEX que es donde principalmente está distribuido europio. Ahí se tienen temperaturas cercanas a los  $40^\circ\text{C}$  y por lo tanto una baja solubilidad de oxígeno. Esto origina condiciones reductoras que favorecen la reducción de europio y por lo tanto su enriquecimiento en los sedimentos superficiales.

El europio se distribuye alrededor de las islas gemelas y en las inmediaciones de la entrada a la zona industrial Rodolfo Sánchez Toboada. Las concentraciones obtenidas en este estudio son comparables a las obtenidas por Rodríguez-Meza (1999) en la bahía de la Paz, en donde las mayores concentraciones están en áreas donde existen descargas de aguas residuales y de material continental

El sitio 15 es el que presenta mayor factor de enriquecimiento (8.81) de acuerdo a la corteza terrestre (Taylor 1964). En lo relacionado con el índice de geoacumulación de Müller (1979). Únicamente la estación 15 presenta una contaminación moderada con un FE de (1.61).

## **9.6 Distribuciones espaciales de rubidio**

Las concentraciones en la corteza terrestre son de  $90 \text{ mg kg}^{-1}$  respectivamente. Este elemento está relacionado con la mineralogía del sitio y al transporte eólico. Los sitios que principalmente sobrepasan este valore son las estaciones ubicadas en La bahía Exterior ( $110.16 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y en varias estaciones de la laguna de Empalme.

Estos sitios tienen en común, áreas arenosas no pobladas y por lo tanto no pavimentadas, por lo que el viento favorece la depositación de estos materiales terrígenos en el sistema marino. Esto no sucede en la mayoría de la estación ubicada en la laguna de Empalme en donde se detectan los niveles más bajos de rubidio, a excepción del muelle fiscal cuyos sedimentos pueden estar afectados por los dragados o por los sitios despoblados ubicados frente a él, y que por ello tienen concentraciones altas ( $87.08 \text{ mg kg}^{-1}$ ) de rubidio. Sin embargo ningún sitio presenta un índice de geoacumulación de Müller que lo clasifique como contaminado por rubidio. Con respecto al FE la zona con mayor enriquecimiento tiene 3.44 que es la bahía Exterior. La que presenta valores conservativos es la bahía Interior con un FE de 1.66 (Faure *et al.*, 1967).

## **9.7 Distribución espacial de lantano**

Este elemento es indicador de áreas propensas a acumular material terrígeno o continental. La concentración de lantano en los sedimentos superficiales de la bahía de Guaymas va de 13.7 a  $174. \text{ mg kg}^{-1}$ . Los niveles más altos se encuentran a lo

largo de la zona intermareal en la bahía de Guaymas, que va de la descarga municipal a un punto del muelle fiscal y de un costado de este hasta las instalaciones de CFE-PEMEX. La profundidad en marea alta es inferior a los 2 metros de ahí que este elemento sea introducido al ambiente marino y gradualmente se disperse hasta profundidades de 4 metros de profundidad, el área con mayor radio de distribución de lantano corresponde a una profundidad de más de 14 metros y que está localizada en la boca de la bahía a un costado de una barrera de arena que presenta una importante elevación Arreola-Lizárraga *et al.*, (2001).

La concentración promedio de lantano para la bahía de Guaymas es de ( $29.42 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que es comparable a los valores de otros estudios reportados por Rodríguez-Meza (1999). Que van de 12 hasta  $\text{mg kg}^{-1}$  en ambientes con muy escasa actividad antropogénica.

En la laguna de Empalme se ubica en el sitio 15 que presento  $174 \text{ mg kg}^{-1}$  una de las concentración más altas de la bahía de la Guaymas este sitio es uno de puntos altamente enriquecidos (Taylor 1964).

### **Cerio**

El cerio forma parte de las tierras raras ligeras, el promedio general de la bahía de Guaymas es de  $60.59 \text{ mg kg}^{-1}$  ligeramente inferior al de la corteza terrestre  $75 \text{ mg kg}^{-1}$ . (Taylor 1964). El Incremento de cerio indican aportes por impacto antropogénico. Solo la estación 15 presento el valor más alto de  $175 \text{ mg kg}^{-1}$  que corresponde a cuatro veces el valor reportado para la corteza terrestre (Taylor, 1964). Con respecto al índice de geoacumulación de Müller la ubica como moderadamente contaminada.

### **Uranio**

Las concentraciones de uranio en sedimentos superficiales en el complejo lagunar de Guaymas presento valores extremos de  $9.87 \text{ mg kg}^{-1}$  con una media de  $3.4 \text{ mg kg}^{-1}$  este valor está ligeramente más bajo de lo que reporto Rodríguez Meza (2004).

El uranio ha sido asociado con concentraciones de Ca que está asociado al fosfato sedimentario (Alvares-Arellano et al 1995). Y que puede ser substituido por Sr y U, es posible que uranio haya sido removido durante algún antiguo proceso de intemperismo ocurridos en los abanicos delta que se formaron al sur de la Sierra de

Santa Úrsula que drenan a través de las sub cuencas en la parte norte de estero del Rancho y al oeste de la laguna de Empalme (Vidal-Solano 2007). Este elemento también puede ser introducido al ambiente por actividades antropogénicas y después ser depositado al medio marino a través de procesos naturales, tales como lluvias de entrada, transporte eólico, y la erosión costera (Shumilin *et al.*, 2000; Choumiline *et al.*, 2006; Ackyil y Alias, 2007).

El uranio en el complejo lagunar de Guaymas se encuentra altamente enriquecido con FE 10.51 para la bahía Exterior, para la bahía Interior, laguna de Empalme y estero del Rancho se encuentra enriquecidos con FE 8.22, 7.97 y 2.38 la zona que presento los sitios con mayor concentración son 34, 40 y 42 aledaños a la antigua descarga municipal.

## **10 CONCLUSIONES**

La distribución espacial de los metales pesados y trazas en los sedimentos superficiales del complejo lagunar de la bahía de Guaymas se deben básicamente a la descarga municipal de aguas negras sin tratar, a los drenes generados de los residuos del parque industrial Rodolfo Sánchez Taboada, los drenes de los astilleros en la sierra de Santa Úrsula y a las 2 minas abandonadas como son San Isidro, Santa Úrsula y 2 minas activas Perlita y las Avispas, la que se encuentra en producción, La Pasi Perlita, esta mina se encuentra en la parte este de la Sierra de Santa Úrsula y que drenan a la zona costera atreves de la cuenca del río Matape.

El factor de enriquecimiento del contenido de los elementos en el sistema lagunar permitió identificar a U, Sb y As como altamente enriquecidos en los sedimentos, cuya contribución se relaciona a las rocas ígneas que se caracterizan en la sierra de Santa Úrsula.

La normalización de los elementos de tierras raras permitió identificar 3 patrones: (i) tipo lutita norteamericana; (ii) tipo anomalía negativa de Eu; (iii) tipo anomalía positiva de Eu y abundancia de elementos de tierras raras ligeras.

Este estudio permitió identificar algunas fuentes de aporte de los elementos como: (i) descargas de aguas residuales acuícolas, agrícolas, urbanas e industriales; (ii) sedimento terrígeno aportado por los drenes; (iii) aporte atmosférico de cenizas como resultado de la combustión de productos fósiles.

Las zonas más susceptibles a la acumulación fueron la parte central (laguna de Empalme) la zona oeste por donde drena la cuenca del Río Matape y la bahía Interior (Puerto) aledaña a la antigua descarga municipal de aguas negras.

Comparando el sistema lagunar de Guaymas con otras áreas y con los niveles de la corteza, se considera al sistema moderadamente contaminado.

Este tipo de estudio es importante para las autoridades ambientales para contar con herramientas necesarias para la toma de decisiones en cuanto a la ubicación de construcciones de granjas acuícolas en el complejo lagunar, o bien para la remoción del sedimento azolvados de los muelles y el dragado de los canales de navegación, esto con el fin de buscar un mejor lugar para el confinamiento de la remoción de los sedimentos.

## 11 BIBLIOGRAFÍA

- Ackermann, F. (1980). A procedure for correcting the grain size effect in heavy metal analyses of estuarine and coastal sediments. *Environmental Technology* 1(11): 518–527.
- Acosta-Vargas, B. (2002). Valoración del grado de contaminación por metales pesados en el sistema costero de Guaymas Sonora. Tesis Profesional (Ingeniero Bioquímico), Instituto Tecnológico de La Paz, B.C.S., México. 61 p.
- Adamo, P., Arienzo, M., Imperato, M., Naimo, D., Nardi, G., y Stanzione, D. (2005). Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port. *Chemosphere* 61(6): 800–809.
- Akyil S, Alias MY (2007) the distribution of uranium and thorium in samples taken from different polluted marine environment. J Hazard Mater 144:564–569.
- Álvarez-Arellano, A. 1995. Estudio geoquímico y de procedencia de arenas fosfáticas. Tesis Doctoral. UNAM. México. D. F. 159 p.
- Álvarez-Osorio, D.S., Cárdenas-Contreras, A. y Matiz-León, J.C. (2011). Modelos digitales batimétricos generados por Métodos de interpolación idw, kriging, shepard y b-spline en el archipiélago de islas del Rosario. *UD y la GEOMÁTICA* 5: 3–14.
- Anónimo. 1988. Atlas Nacional del Medio Físico. Instituto Nacional de Estadística, geografía e Informática. 224pp. Carta Geológica 1:1 000 000.
- Anónimo. 1993. Estudio hidrológico del Estado de Sonora. Gobierno del Estado de Oceanografía Naval. Estación Oceanográfica Topolobampo. México. 60pp.
- Arreola-Lizárraga, J.A., G. Padilla-Arredondo, M.S. Burrola-Sánchez, D. Urias-Laborín, F. Dorado-Villanueva, A. Hernández-Ibarra, M.R.
- Arámbula Pujol Edna María (2006). Ciclo reproductivo de la almeja de sifón *Panopea Globosa* en la playa de Sol, Empalme Sonora México. Tesis de Maestría. Centro de investigaciones biológicas del noroeste S.C. 68 pag.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances & Disease Registry). (2000). Reseña toxicológica del cromo. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública, 10 p.

- ATSDR1 (Agency for Toxic Substances & Disease Registry). (2007). Reseña toxicológica del Bario y compuestos de Bario. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública, 14 p.
- Bau, M. and P. Dulski. 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater. *Chemical Geology*, 155: 77–90.
- Beier, E. J. (1997) a numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 27, (No.5) pp 615-632 p. (PA: CEOFA9709).
- Boggs, S. Jr. 2001. Principles of sedimentology and stratigraphy. Ed. Prentice Hall. 3era edición. 726pp.
- Bryan, G. W. and D. H. 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.
- Burrola-Sánchez, M.S. (2003). Hidrodinámica de la Bahía de Guaymas, Sonora, México y su aplicación en casos de manejo costero. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico del Mar, Guaymas, Sonora, México. 92 p.
- Caplat, C., Texier, H., Barillier, D., y Lelievre, C. (2005). Heavy metals mobility in harbour contaminated sediments: the case of Port-en-Bessin. *Marine Pollution Bulletin* 50(5): 504–511.
- Chen, C.W., Kao, C.M., Chen, C.F., y Dong, C.D. (2007). Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere* 66(8): 1431–1440.
- Chester, R. (1990). Marine Geochemistry. Chapman & Hall, London. XVIII + 698 p.
- Chester, R. y Hughes, M.J. (1967). A chemical technique for the separation of ferromanganese minerals, carbonate minerals and adsorbed trace elements from pelagic sediments. *Chemical Geology* 2: 249–262.
- Chester, R., (2000). Marine Geochemistry. 2a Edition, Blackwell Science, London. 506 p.

- Choumiline E. Méndez Rodríguez L, Morton Bermea O, Rodríguez Meza G, Rodríguez Figueroa G, Sánchez Rodríguez I et al (2006) Biogeochemical evaluation of heavy metals in the marine environment of the Santa Rosalía mining district (B.C.S.). Final technical report of the SEMARNAT-CONACYT project C01-1425.
- Clark, R. B. 1984. Mineralogy of the rare earth elements. In: Henderson, P. Rare earth element geochemistry. Elsevier. Amsterdam. 510 p.
- Clozel B., Ruban V., Durand C. and Conil P. (2006). Origin and mobility of heavy metals in contaminated sediments from retention and infiltration ponds. *Applied Geochemistry*, 21 1781-1789.
- De Groot, A. J., K. H. Zschuppe and W. Salomons. 1982. Standardization of methods of analysis for heavy metals in sediments. *Hydrobiologia*. 92: 689 - 695.
- Dean, W., C. Price and R. Thunell. 2004. Geochemical cycles in sediments deposited on the slopes of the Guaymas and Carmen Basin of the Gulf of California over the last 180 years *Quaternary Science Reviews*, 23: 1817-1833.
- Donoghue, J.F., Ragland, P.C., Chen, Z.Q., y Trimble, C.A. (1998). Standardization of metal concentrations in sediments using regression residuals: an example from a large lake in Florida, USA. *Environmental Geology* 36(1-2): 65–76.
- Dressler, R. 1981. Preliminary knowledge of hydro -static summer conditions within Bahía Concepción, Baja California. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 3 p.
- Droj, G. (2008). Improving the Accuracy of Digital Terrain Models. *Studia Universitatis Babes-Bolyai: Series Informatica* LIII (1): 65–72.
- Dubinin, A.V. (2004). Geochemistry of rare earth elements in the ocean. *Lithology and Mineral Resources* 39(4): 289–307.
- Elderfield, H. (1976): Hydrogenous materials in marine sediments; excluding manganese nodules. p. 137–215. In Chemical Oceanography, Vol. 5, ed. by J. P. Riley and R. Chester, Academic Press, London.
- Elizalde Servín Carlos Ismael (2009) evaluación de la calidad del agua de la bahía de Guaymas, sonora: con y sin aportes de aguas residuales (tesis de maestría) instituto tecnológico de Guaymas sonora México. 43p

- EPA (1986). Quality Criteria for Water. United State Environmental Protection Agency, Washington D.C., EPA 440/5-86-001. 477 p.
- Evensen, N.M., Hamilton, P.J., O'Mions, R.K., 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42, 1199–1212.
- Faure, G. (1986). Principles of Isotope Geology. 2a Edición, John Wiley & Sons, New York, 589 p.
- FAURE, G.; CROCKET, J. & HURLEY, P. (1967): Some aspects of the geochemistry of strontium and calcium in the Hudson Bay and the Great Lakes. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31, pp. 451-461.
- Fowler S.W. Knauer G.A (1986) Role of large particle in the transport of elements and organic compounds through the oceanic water column. *Prog. Oceanogr.* 16: 147-194.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Offset Larios. México, 219 pp.
- Giraldo-Henao, R. (2003) Introducción a la Geoestadística: Teoría y Aplicación. Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Goldberg, E.D., (1954). Marine geochemistry 1. Chemical scavengers of the sea. *The Journal of Geology* 62(3): 249–265.
- Goldberg, E.D., Koide, M., Schmitt, R.A. y Smith R.H. (1963). Rare-earth distributions in the marine environment. *Journal of Geophysical Research* 68(14): 4209–4217.
- Gómez-Valdés, J., Dworak, J.A., Vázquez, H.J., y Paz, M. (2012). Vertical structure of tidal flows at the entrance to Guaymas Bay, Mexico. *Geofísica internacional* 51(3): 271–279.
- Green-Ruiz, C and F. Páez-Osuna. 2001. Heavy metal anomalies in lagoon sediments related to intensive agriculture in Altata-Ensenada del Pabellón coastal system (SE Gulf of California). *Environment International* 26: 265-273
- Green-Ruiz, C.R. (2000) Geoquímica de metales pesados y mineralogía de la fracción arcillosa de los sedimentos de cuatro puertos del Golfo de California. Tesis de Doctorado (Oceanografía Geología) UNAM. Mazatlán, Sinaloa 329 p.

- Hedrick, J. (2007). U.S Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2007.
- INEGI 1983a. Guaymas G12-2, Carta Edafológica, escala 1:250,000. Secretaría de Programación y Presupuesto. Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e informática. Dirección General de Geografía. México, D.F.
- INEGI. 1982. Guaymas G12-2, Carta Geológica, escala 1:250,000. Secretaría de Programación y Presupuesto. Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e informática. Dirección General de Geografía. México, D.F.
- INEGI1983b. Guaymas G12-2, Carta Hidrológica y de Aguas Superficiales, escala 1:250,000. Secretaría de Programación y Presupuesto. Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e informática. Dirección General de Geografía. México, D.F.
- Kabata-Pendias, A. and Adriano, D.C. 1995. Trace metals. En: Soil amendments and environmental quality. Rechcigl, J. E. (Ed.). CRC press. Boca Raton. USA. pp. 139-167.
- Kjerfve B. 1986. Comparative oceanography of coastal lagoons 63–81. En: D. A. Wolfe (Ed.). Estuarine variability. Academic Press. E.U.A. 560 pp.
- Laura Sánchez García (2007) Caracterización Geoquímica de los Sedimentos marinos del golfo de Cádiz e implicaciones ambientales. Distribución y composición molecular de lípidos y formas refractarias de la materia orgánica. Tesis Doctoral. Universidad autónoma de Madrid., España 245 pp.
- Lawson, D.R. y Winchester J.W. (1979). A. Estandar Crustal Aerosol as a reference for elemental enrichment factors, atmospheric environment. 10:925-930.
- Leal-Acosta, M.L (2008). Caracterización Geoquímica de los sedimentos del sistema lagunar Ohuira-Topolobampo-Santa María. Tesis de Maestría (Recursos naturales y Medio ambiente), Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa, Guasave, Sinaloa, México. 91 p.

- Loring, D. H. (1990). Lithium—a new approach for the granulometric normalization of trace metal data. *Marine Chemistry* 29: 155–168.
- Loring, D. H. (1991). Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil* 48(1): 101–115.
- MacLaren J.W (1999). National Research Council Canada, Institute for National Measurement Standards. Montreal Road, Ottawa, Ontario, Canada. 4 p.
- Marinone, S.G. y Lavín, M.F., 1997. Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California, en: M.F. Lavín, editor contribuciones a la Oceanografía física en México, monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana, p. 113-139
- Marrugo, J., Lans, E., Doria, G., Bello, L., Castillo, M., Cortes, F. &Pinedo, J. (2006). Impacto ambiental por contaminación con níquel, mercurio y cadmio en aguas, peces y sedimentos en la cuenca del Río San Jorge, en el Departamento de Córdoba. Universidad de Córdoba, Centro de Investigaciones –CIUC. Monteira, Colombia
- Mason, B. 1960. Principios de geoquímica. Omega. Barcelona. 333 p.
- McArthur, J. M. and J. N. Walsh. 1984. Rare-earth geochemistry of phosphorites. *Chem. Geol.* 47: 191220.
- Méndez, L., Acosta, B., Arreola-Lizarraga, A., y Padilla, G. (2004). Anomalous levels of heavy metals in sediments from Guaymas Bay, Mexico. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 72(6): 1101–1106.
- Méndez, L., Salas-Flores, L.M., Arreola-Lizarraga, A., Alvarez-Castañeda, S.T., y Acosta, B. (2002). Heavy metals in clams from Guaymas Bay, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 68(2): 217–223.
- Montaño-Ley, Y., F. Paez-Ozuna, F., y R. Peraza-Vizcarra. 2000 Suspended and bed load sediment transport through a coastal lagoon entrance in Mazatlán, Sinaloa, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.*
- Morton Bermea O, Lounejeva Baturina E, Hernández E, Durga Rodríguez Meza G (2000) Anomalous trace element composition of coastal sediments near the copper mining district of Santa Rosalía, Peninsula of Baja California, Mexico. *Bull Environ Contam Toxicol* 65:261–268.

- Muller, G. 1979. Schwermetalle in den sediment des Rheins-Veranderungen seit 1971. Umschau 79(24):778-783.
- Nebel, B. J. 1999. Ciencias ambientales. Ecología y desarrollo sostenible 6<sup>a</sup>. Ed. PRENTICE HALL, México.
- Ortega Romero, Pedro (2003) Geoquímica de compuestos de azufre en los sedimentos de lagunas costeras de Sonora. Tesis de Doctorado en Ciencias del Mar (Oceanografía Química), Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica Mazatlán, UNAM. 226 p.
- Páez-Osuna, F., y Osuna-López, J.I. (1990). Aspectos genéticos de los sedimentos marinos de la boca del gofo de California evidencias por la geoquímica de sus metales pesados. *Geofísica Internacional* 29: 47–58.
- Pedrín-Avilés, S., Aguayo-Camargo, E.J., y Avendaño-Esparza, F.G. (2006). Condiciones sedimentológicas del Sistema Lagunar de la Bahía de Guaymas, Sonora, México. Memoria en extenso del V Congreso Internacional de Ciencias Ambientales y XI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales del 7 al 9 de Junio del 2006 en Centro Vacacional IMSS Oaxtepec “Lic. Adolfo López Mateos”, Morelos, México.
- Poissant L., Schmitt J.P., Beron P. (1994) trace Inorganic elements in rainfall in the Montreal Island, Pergamon Press. Inglaterra.
- Rankama, K. & Sahama, Th.G. (1949). Geoquímica. Ediciones Madrid. 862 p.
- Riley J.P. 1989. Los elementos más abundantes y menores en el agua de mar. p.61-104. Introducción a la química marina. Riley J.P., and R. Chester (Eds.). AGT Editor, S.A. México. 459p
- Ripa, P. 1990. Seasonal circulation in the Gulf of California. *Annales Geophysicae*, 8, 559-564.
- Ripa, P. y Marinone S.G. 1989. Seasonal variability of temperature, salinity, velocity, vorticity and sea level in the central Gulf of California, as inferred from historical data. *Quaternary Journal Research Meteorology Society*, 115,887-913.
- Rivera, H. (2007). Introducción a la geoquímica general y aplicada. 2<sup>a</sup> edición, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. 475 p.

- Roden, G.I. y G.W. Groves. 1959. Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. *Journal of Marine Research*, 118: 10-35.
- Rodríguez-Figueroa, G.M. (2004). Geoquímica de los oligoelementos mayores y elementos de las tierras raras, en sedimentos marinos del distrito minero de Santa Rosalía, B.C.S. México. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. 137pp.
- Rodríguez-Meza, G. 1999. Elementos mayores y traza en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz, B. C. S., México. Tesis Maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, B. C. S. México. 170 p.
- Rodríguez-Meza, G.D. (2004). Caracterización Geoquímica por componentes mayores y elementos traza de sedimentos de los ambientes marinos costeros adyacentes a la península de Baja California. Tesis de Doctor en ciencias Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. 262pp
- Romero-Ordoñez, F.H., Schultz-Güttler, R.A., y Kogi, K. (2000). Geoquímica del rubidio-estroncio y edad de las esmeraldas colombianas. *Geología Colombiana* 25: 221–239.
- Rosales-Grano, P. (1999). Estudios hidrodinámicos de la Bahía de Guaymas, Sonora. Consejo Nacional de Educación Tecnológica, Clave 214.95, marzo de 1999.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S., 1979. *Geochemistry in mineral Exploration* academic Press, New York, N.Y. pp. 490-517.
- Salminen, R., y Gregoriuskien, V. (2000). Considerations regarding the definition of a geochemical baseline of elements in the surficial materials in areas differing in basic geology. *Applied Geochemistry* 15(5): 647–653.
- Salomons, W., y Förstner, U. (1984). *Metals in the Hydrocycle*. Springer Science & Business Media, 348 p.
- Schropp, S.J., Lewis, F.G., Windom, H.L., Ryan, J.D., Calder, F.D., y Burney, L.C. (1990). Interpretation of metal concentrations in estuarine sediments of Florida using aluminum as a reference element. *Estuaries* 13(3): 227–235.
- Schropp, S.J., Windom, H.L. (Eds.). (1988). *A guide to the interpretation of metal concentrations in estuarine sediments*. Florida Department of Environmental

Regulation, Coastal Zone Management Section. 44 p. (Disponible en [http://www.floridadep.org/waste/quick\\_topics/publications/documents/sediment/estuarine.pdf](http://www.floridadep.org/waste/quick_topics/publications/documents/sediment/estuarine.pdf))

SEC-MAR. 1991. Estudio de calidad de agua del Puerto de Guaymas y Proximidades.

Dirección General de Oceanografía Naval, Reporte Interno DGON/DPCM/GUAY/87., 108p

Servicio geológico mexicano (<http://www.sgm.gob.mx/>) carta geología por arsénico sierra libre H12-11 Sonora primera edición octubre 2000.

Sholkovitz, E.R. 1995. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. Aquatic Geochemistry. 1: 1-34

Shumilin E., Rodríguez Figueroa G, Morton Bermea O, Lounejeva Baturina E, Hernández E, Durga Rodríguez Meza G (2000) Anomalous trace element composition of coastal sediments near the copper mining district of Santa Rosalía, Peninsula of Baja California, Mexico. Bull Environ Contam Toxicol 65:261–268.

Shumilin E., Rodríguez Figueroa G, Sapozhnikov, D. (2005): Lanthanide contamination and strong europium positive anomaly in the surface sediments of the Santa Rosalía copper mining region, Baja California península, México, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 75, 308-315. doi: 10.1007/s00128-005-0754-4.

Siegel, F. (1992): Geoquímica Aplicada. Washington: Secretaria general de la OEA programa regional de desarrollo científico y tecnológico. 170pp.

SIUE. 1999. Programa de desarrollo urbano zona conurbada Guaymas-Empalme-San Carlos. Secretaría de Infraestructura Urbana y Ecología, Comisión Intermunicipal de Conurbación Guaymas-Empalme-San Carlos, Hermosillo, Son., 310 p.

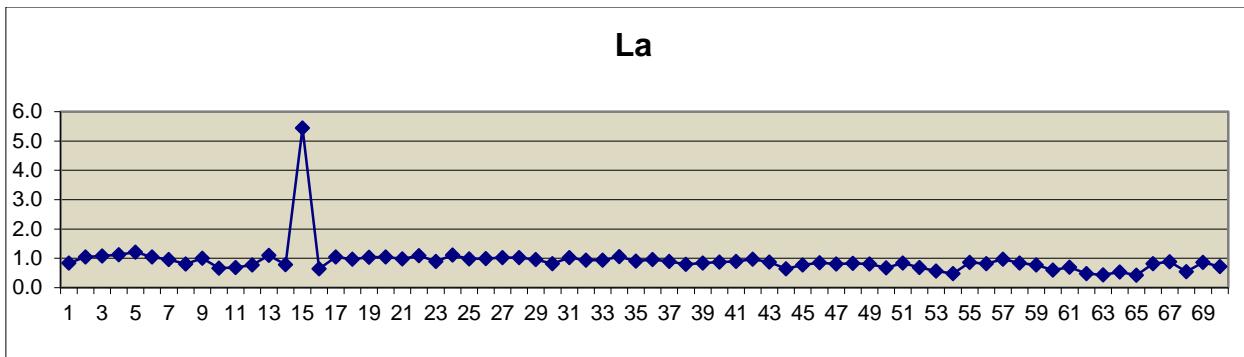
Soto-Jiménez, M.F. and F. Páez-Osuna 2001. Distribution and normalization of Heavy Metal Concentrations in Mangrove and Lagoonal Sediments from Mazatlán Harbor (SE Gulf of California). Estuarine Coastal and Shelf Science, 53: 259-274

- StatSoft, Inc. (2011). Electronic Statistics Textbook. Tulsa, OK: StatSoft. WEB: <http://www.statsoft.com/textbook/>. (Printed Version): Hill, T. & Lewicki, P. (2007). STATISTICS: Methods and Applications. StatSoft, Tulsa, OK.
- Stiptyk, W., D. Weis y M. Hesterkamp (2002). Nerecord of atmospheric lead Pollution in Switzerland: Pb concentrations enrichment factors, isotopic composition, and Organolead Species, environmental Science and technology 36: 3893-3900
- Taylor, S. R. 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 28: 1273-1285.
- Taylor, S. R., T. S. and S. McLennan. 1985. The continental crust: its composition and evolution: An examination the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Geoscience Texts. Blackwell Scientific Publications. Oxford. 312 p.
- Tkalin, A. V., B. J. Presley and 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. Torres
- Tolonen, M. (1995). Minerales y oligoelementos. En: Vitaminas y minerales en la salud y la nutrición. Acribia Zaragoza. 278 p.
- USEPA (<http://www.epa.gov/waterscience/criteria/goldbook.pdf>).
- Vargas Rodríguez, L.E. (2007). Dispersión geoquímica secundaria de los principales elementos lantánidos en la cuenca de los ríos Chancay-Lambayeque. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. 169 p.
- Vega-Granillo, C. y J. Castillo-Gurrola. 1998. La contaminación por intrusión salina del acuífero del Valle de Guaymas, Sonora, México. Mem. II Seminario de acuíferos costeros de Sonora, octubre 15 de 1998, Hermosillo, Sonora, México.
- Vidal-Solano, J.R., Paz-Moreno, F.A., Demant, A., y López-Martínez, M. (2007). Ignimbritas hiperálcalinas del Mioceno medio en Sonora Central: revaluación de la estratigrafía y significado del volcanismo terciario. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24(1): 47–67.
- Walkley, A. 1947. A critical examination of rapid method for determination of organic carbon in soils – effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63: 251-257.

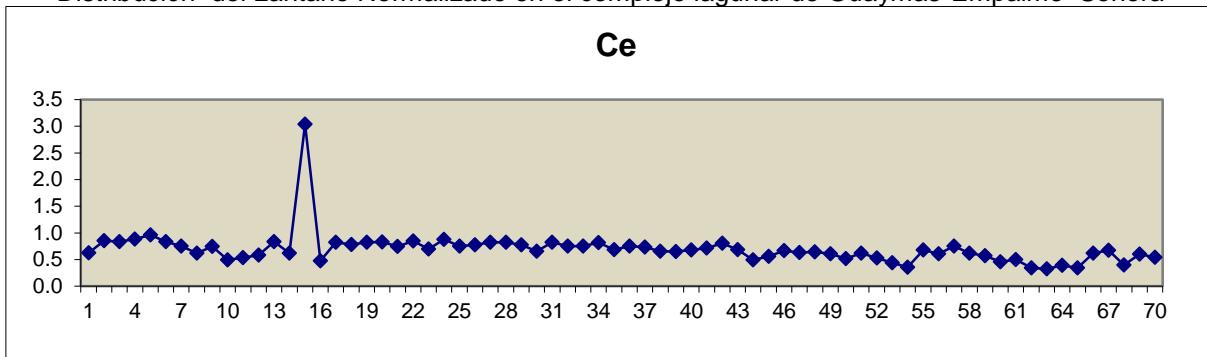
Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid filtration method. *Soil Science*. 27: 29-38.

Wedepohl KH (1995) the composition of the continental crust. *Geochim Cosmochim Acta* 59:1217–1232

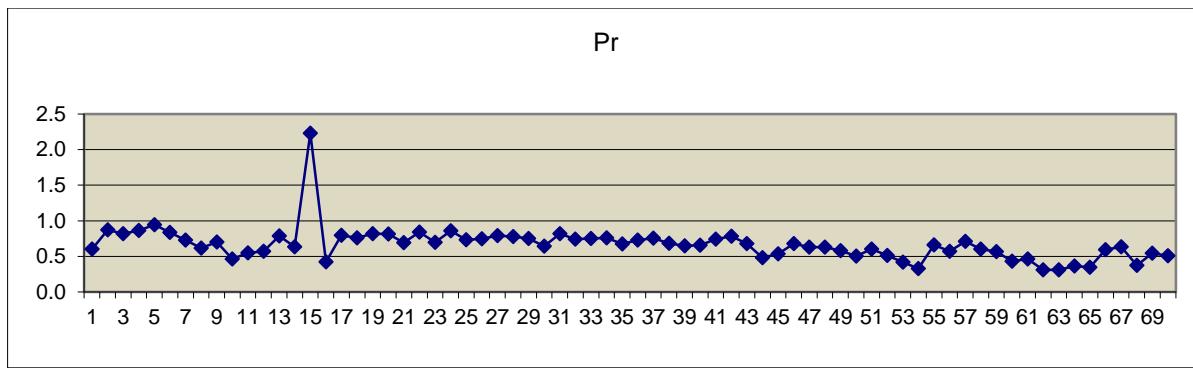
## 12 ANEXOS



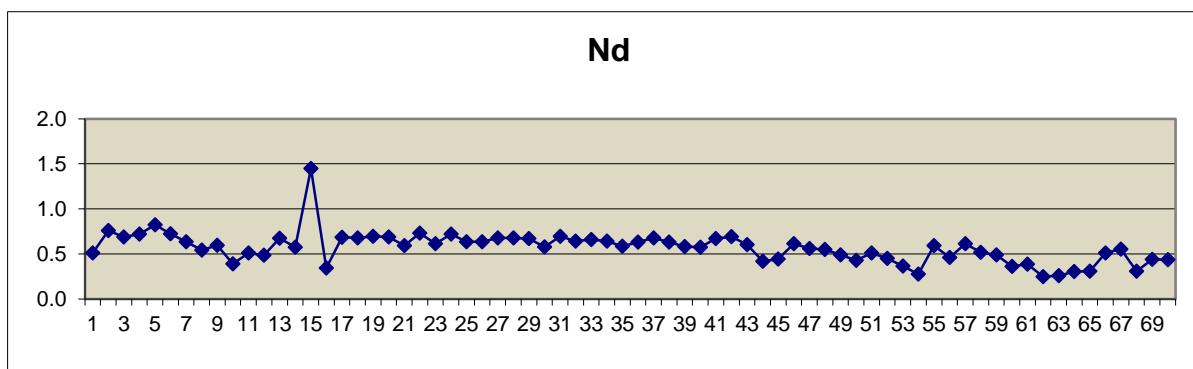
Distribución del Lantano Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



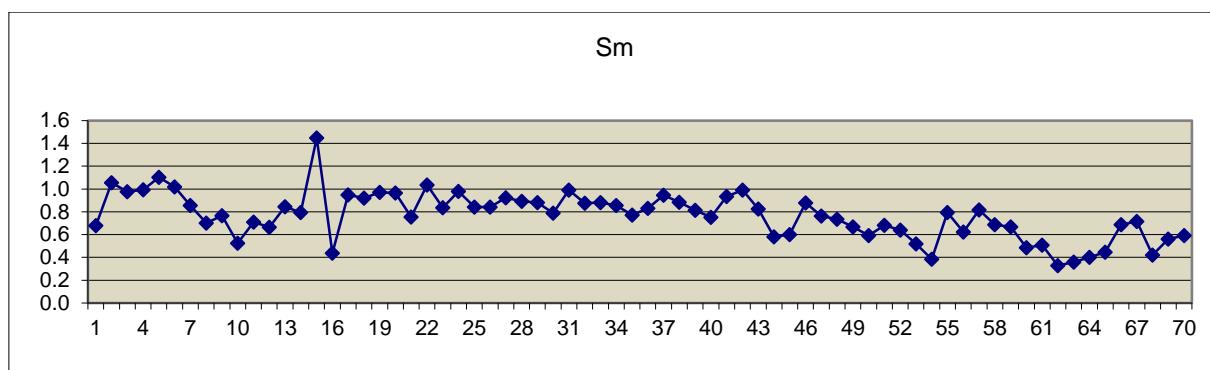
Distribución del Cerio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



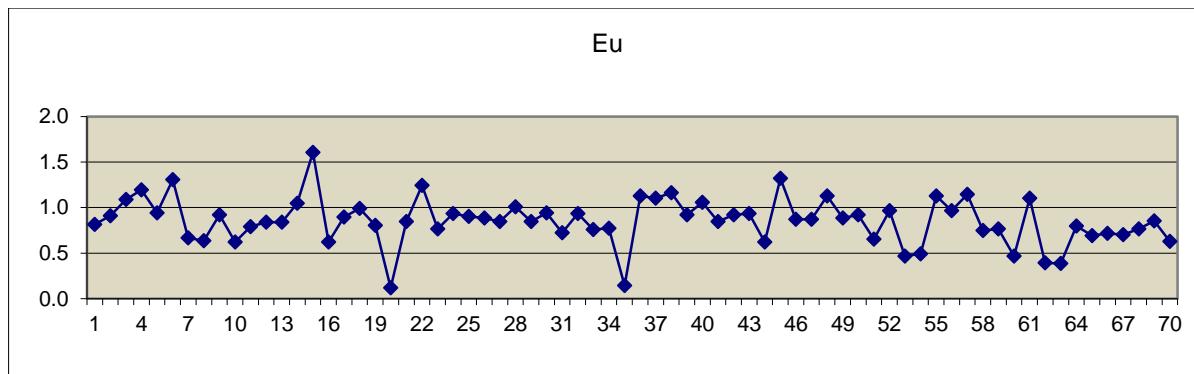
Distribución del Praseodimio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



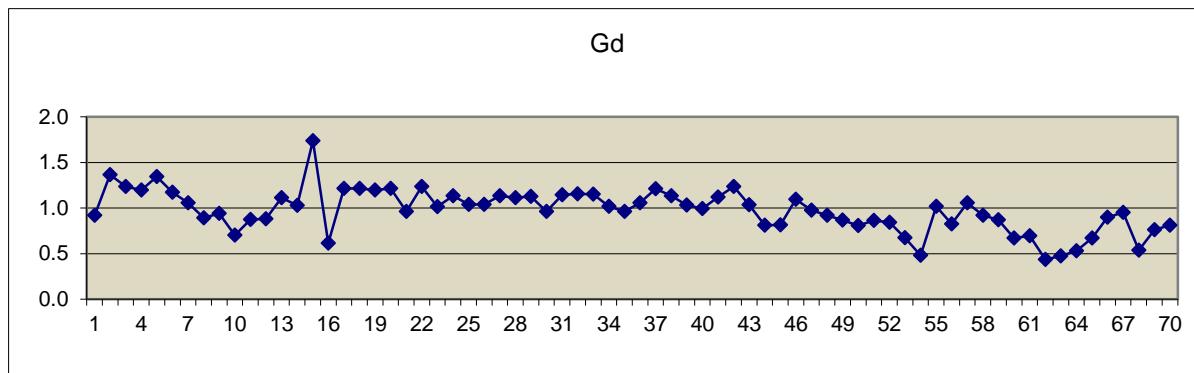
Distribución del Neodimio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



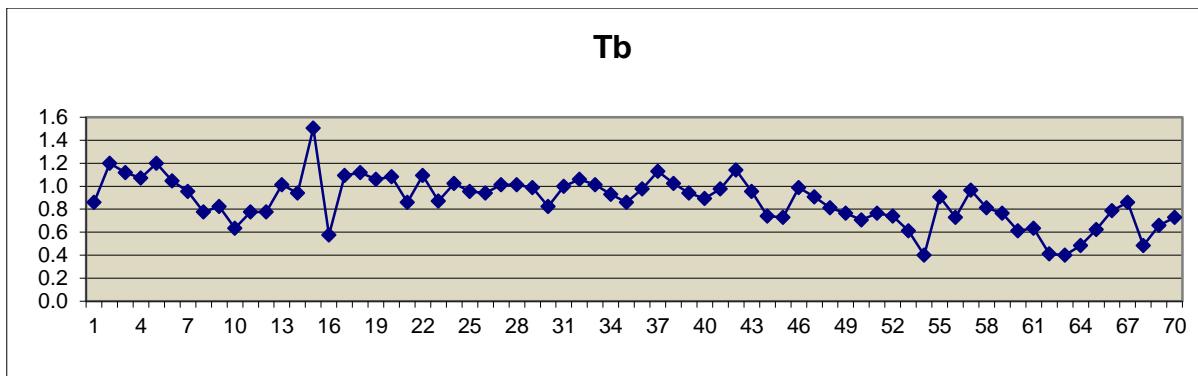
Distribución del Samario Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



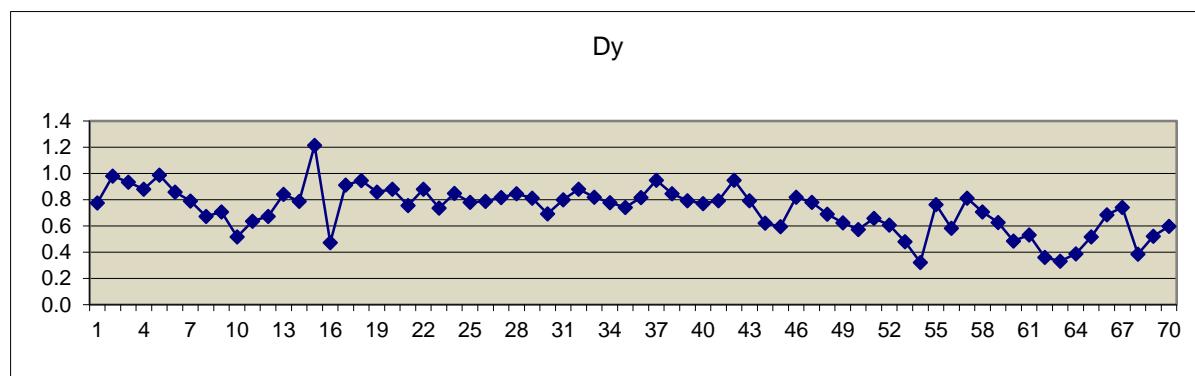
Distribución del Europio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



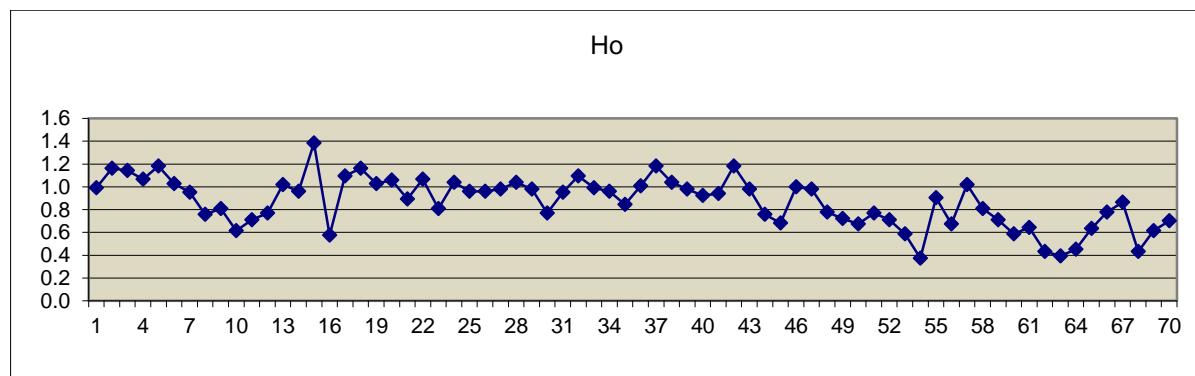
Distribución del Gadolinio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



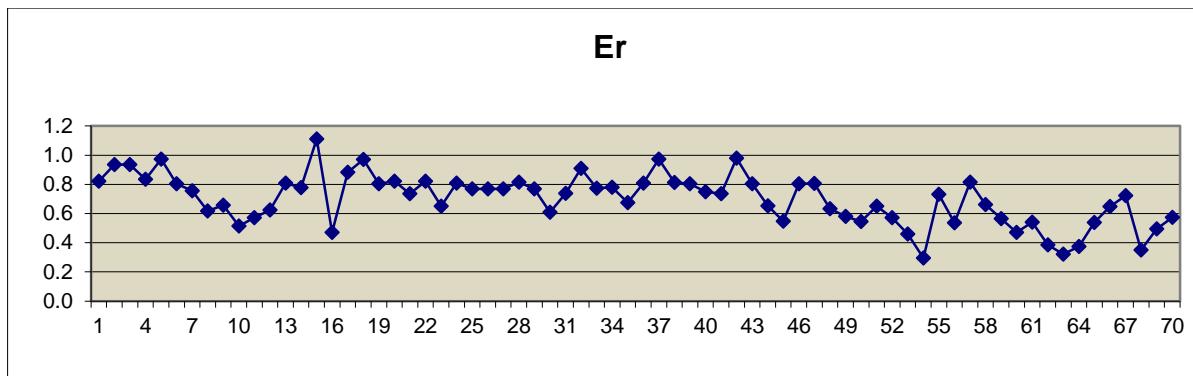
Distribución del Terbio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



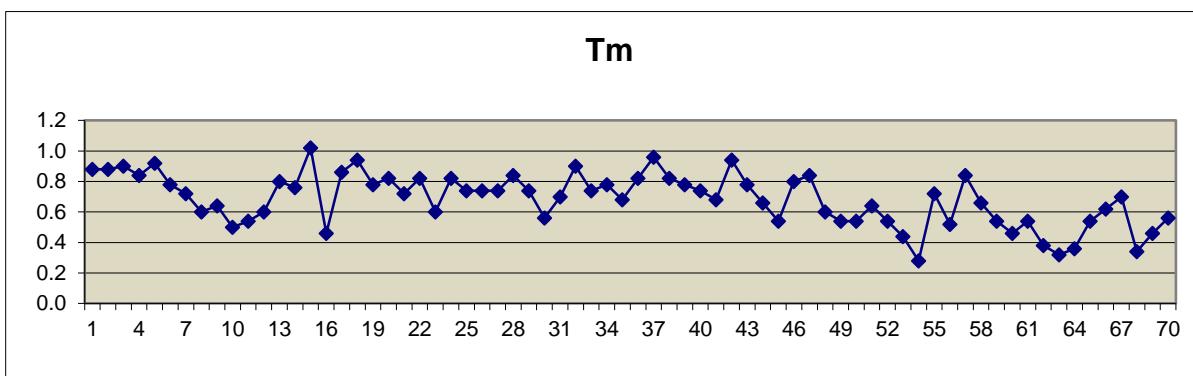
Distribución del Disprosio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



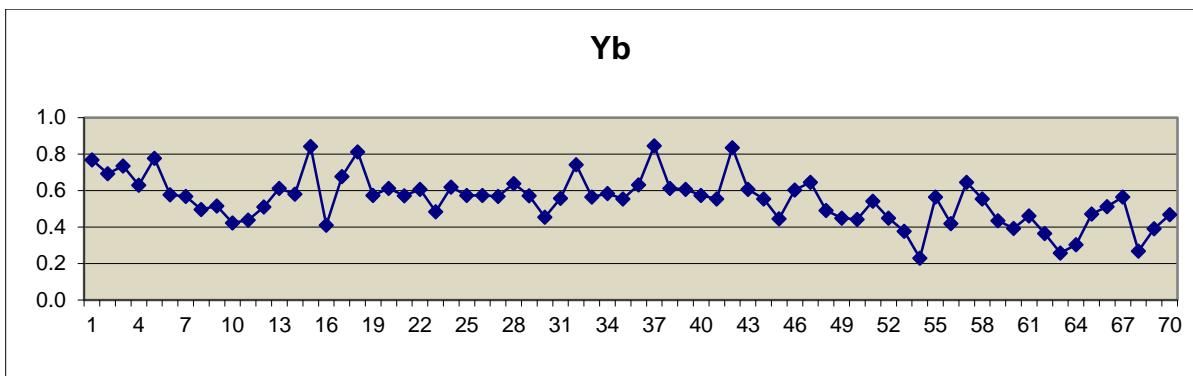
Distribución del Holmio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



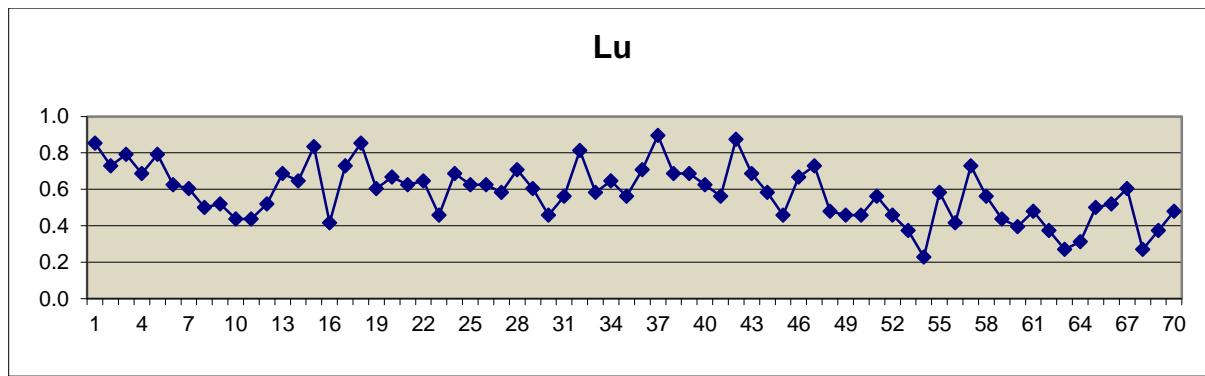
Distribución del Erbio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



Distribución del Tulio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



Distribución del Iterbio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora



Distribución del Lutecio Normalizado en el complejo lagunar de Guaymas-Empalme Sonora