



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



**GEOQUÍMICA DE LA MATERIA PARTICULADA
EN HUNDIMIENTO Y DE LOS SEDIMENTOS
RECIENTES DE CUENCA ALFONSO, BAHÍA
DE LA PAZ**

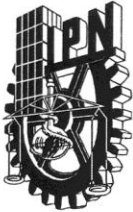
TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN
MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

PRESENTA

KONSTANTIN CHOUMILINE

LA PAZ, B.C.S., NOVIEMBRE DE 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 24 del mes de Noviembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

**“GEOQUÍMICA DE LA MATERIA PARTICULADA EN HUNDIMIENTO
Y DE LOS SEDIMENTOS RECIENTES DE CUENCA ALFONSO, BAHÍA DE LA PAZ”**

Presentada por el alumno:

CHOUMILINE
Apellido paterno

materno

KONSTANTIN
nombre(s)

Con registro:

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

Aspirante de:

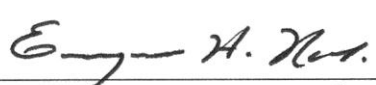
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

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

LA COMISION REVISORA

Director(a) de Tesis


DR. FERNANDO AGUIRRE BAHENA



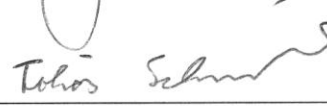
DR. ENRIQUE HIPARCO NAVA SÁNCHEZ



DRA. CHRISTINE JOHANNA BAND SCHMIDT



DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE



DR. TOBIÁS SCHWENNICKE

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


DRA. MARÍA MARGARITA CASAS VALDEZ



IPN
CICIMAR
DIRECCION



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 30 del mes Noviembre del año 2011
el (la) que suscribe GEÓL. KONSTANTIN CHOUMILINE alumno(a) del
Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS
con número de registro A100073 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS
manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. FERNANDO AGUIRRE BAHENA

y cede los derechos del trabajo titulado:

"GEOQUÍMICA DE LA MATERIA PARTICULADA EN HUNDIMIENTO,

Y DE LOS SEDIMENTOS RECIENTES DE CUENCA ALFONSO, BAHÍA DE LA PAZ"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

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

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

GEÓL. KONSTANTIN CHOUMILINE

nombre y firma

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, al Instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que hicieron posible la realización de esta tesis y los proyectos que la sustentaron.

Un especial agradecimiento a mi director de tesis y a los miembros de la Comisión Revisora por sus valiosas observaciones que ayudaron a mejorar este trabajo, al igual que a los profesores de los cursos.

Agradezco en particular a los miembros del grupo de trabajo de la trampa de Cuenca Alfonso, a los compañeros que han participado voluntariamente con nosotros en los cruceros oceanográficos y salidas de campo, así como a la tripulación del B/O Francisco de Ulloa (CICESE) y del BIP XII (CIBNOR) por su irremplazable ayuda.

Muchísimas gracias al personal administrativo por la confianza prestada durante los apoyos económicos y reconocimientos recibidos.

A mi familia y en especial a mi padre de quien aprendí muchas cosas, no solo en el aspecto académico, sino también de sabiduría de la vida.

Les doy por ultimo las gracias a mis amigos. No ocupo mencionarlos, ya que ellos saben perfectamente quienes son. Les agradezco por estar siempre allí, apoyándome en las buenas y en las malas.

INDICE

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE ANEXOS.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES	2
2.1. Antecedentes generales	2
2.1.1. Estudios de materia particulada en hundimiento y flujos de elementos.....	5
2.2. Antecedentes regionales.....	7
2.2.1. Golfo de California	7
2.2.2. Bahía de La Paz	11
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	14
3.1. Hidrología y características de los sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz.....	16
3.2. Marco geológico.....	17
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y/O HIPÓTESIS	19
4.1. Justificación	19
4.2. Hipótesis	19
5. OBJETIVOS	21
5.1. Objetivo general	21
5.2. Objetivos particulares.....	21
6. MATERIALES Y MÉTODOS	22
6.1. Muestreo y observaciones en el campo.....	22
6.2. Procesamiento preliminar de las muestras	26
6.3. Análisis de las muestras	26
6.4. Tratamiento de los datos.....	27
6.4.1. Flujos de elementos particulados	27

6.4.2. Estimación de fracción litogénica y biogénica de los elementos	28
6.4.3. Cálculo de factores de enriquecimiento de los elementos.....	28
6.4.4. Utilización de los lantánidos	28
6.4.5. Tratamiento estadístico	29
6.4.6. Utilización de software.....	30
7. RESULTADOS	31
7.1. Composición del material terrígeno de la cuenca de drenaje	31
7.1.1. Composición de las rocas de la cuenca de drenaje.....	31
7.1.1.1. Elementos mayores	34
7.1.1.2. Elementos traza.....	34
7.1.2. Composición de los sedimentos terrígenos de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz	41
7.1.2.1. Elementos mayores	41
7.1.2.2. Elementos traza.....	43
7.1.3. Relación entre tipo de rocas y material de arroyo y duna.....	44
7.1.3.1. Indicadores de aporte terrígeno (Sc, Fe)	44
7.1.3.2. Rocas marinas como fuente de aporte (As, U, Ca, P)	44
7.1.3.3. Influencia del tipo de roca en la composición de los sedimentos.....	45
7.1.4. Fuentes potenciales de aporte a la bahía.....	46
7.2. Composición de la materia particulada en hundimiento.....	46
7.2.1. Flujo de masa total	47
7.2.2. Elementos mayores en la MPH de Cuenca Alfonso	48
7.2.3. Elementos traza en la MPH de Cuenca Alfonso	50
7.3 Flujos de elementos particulados.....	58
7.3.1. Flujos de elementos mayores particulados.....	59
7.3.2. Flujos de elementos traza particulados	60
7.4. Composición de la parte superficial de los sedimentos de Cuenca Alfonso	64
7.4.1. Estratigrafía y fechado del núcleo C44	64
7.4.2. Contenidos de elementos en la parte superficial de los sedimentos de Cuenca Alfonso	66
7.4.2.1. Elementos mayores en la capa superior del núcleo C44.....	67

7.4.2.2. Elementos traza en la capa superior del núcleo C44.....	68
7.5. Comparación de todas las partes del sistema	74
8. DISCUSIÓN.....	76
8.1. Composición de la materia particulada en hundimiento de la serie de tiempo 2002-2008	76
8.1.1. Variabilidad del flujo de masa total	76
8.1.2. Variabilidad de los contenidos en la MPH de los elementos-indicadores de aporte litogénico (resolución semanal-mensual)	77
8.1.3. Variabilidad de los contenidos en la MPH de los elementos indicadores de aporte biogénico (resolución semanal-mensual)	78
8.1.4. Variabilidad de los contenidos en la MPH de los elementos formados autigenamente en la columna de agua (resolución semanal-mensual)	80
8.1.5. Variabilidad de los contenidos en la MPH de los elementos con aportes mixtos (resolución semanal-mensual)	82
8.1.6. Variabilidad de lantánidos (resolución semanal-mensual).....	85
8.1.7. Aspectos generales de la variabilidad de la composición de materia particulada en hundimiento.....	90
8.1.8. Impacto de ciclones tropicales en la composición y flujos de elementos particulados	92
8.1.9. Efecto de tormentas de polvo e aporte eólico en la variabilidad de la composición de partículas en hundimiento y flujos de elementos particulados	94
8.1.10. Florecimientos planctónicos	96
8.1.11. Influencia de sismos	97
8.1.11. Reflexiones finales acerca de la variabilidad de la composición de la materia particulada en hundimiento.....	98
8.2. Variabilidad vertical de la composición de la columna sedimentaria (resolución decadal)	98
8.2.1. Aspectos generales de la variabilidad de contenidos en perfiles verticales sedimentarios	98
8.2.2. Efecto de variabilidad climática.....	101
8.2.3. Efecto de eventos episódicos de menor escala.....	103

8.2.4. Efecto de diagénesis	104
8.2.5. Cambio de condiciones redox del pasado	105
8.2.6. Efecto antropogénico	105
8.3. Principales asociaciones de elementos establecidos mediante análisis estadísticos multivariados	106
8.3.1. Asociaciones de elementos en la materia particulada en hundimiento de la serie de tiempo 2002-2008 (resolución semanal-mensual)	106
8.3.2. Asociaciones de elementos en la parte superficial de los sedimentos de Cuenca Alfonso del núcleo C44 (resolución decadal)	108
9. CONCLUSIONES	111
10. BIBLIOGRAFÍA	113
11. ANEXOS	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo generalizado de sedimentación marina	3
Figura 2. Batimetría y cuencas más importantes del Golfo de California (modificado de Lavin y Marinone, 2003)	8
Figura 3. Perfil batimétrico con tipos de masas de agua del Golfo de California (modificado de Lavin y Marinone, 2003)	9
Figura 4. Comparación de las razones [EI]/[AI] entre sedimentos silíceos del Golfo de California y lutita norteamericana (modificado de Brumsack, 1989)	10
Figura 5. Localización y batimetría de la Bahía de La Paz y de la Cuenca Alfonso	14
Figura 6. Direcciones de vientos predominantes en el área de estudio (datos de la Estación Meteorológica del CIBNOR)	15
Figura 7. Localización de las estaciones de muestreo	22
Figura 8. Esquema de anclaje de la trampa sedimentaria en la Cuenca Alfonso	23
Figura 9. Posición de las muestras de roca analizadas y la geología de los alrededores de la Bahía de La Paz	24
Figura 10. Posición de las muestras de sedimento de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz.	25
Figura 11. Diagramas ternarios de los componentes: a) Ca, Na y K; b) Ca, As y U en rocas de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz	33
Figura 12. Contenido de calcio (%) en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz	36
Figura 13. Contenido de fósforo (%) en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz	37
Figura 14. Contenido de arsénico (mg kg^{-1}) en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz	38
Figura 15. Contenido de escandio (mg kg^{-1}) en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz	39
Figura 16. Contenido de uranio (mg kg^{-1}) en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz	40

Figura 17. Flujo de masa total de la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	48
Figura 18. Contenido de Ca en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	49
Figura 19. Contenido de Ca _{biog} en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	50
Figura 20. Contenido de As en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	51
Figura 21. Contenido de Sc en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	52
Figura 22. Contenido de Fe en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	53
Figura 23. Contenido de U en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	54
Figura 24. Concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua de la Bahía de La Paz, cercana a la posición de la trampa sedimentaria en marzo, septiembre y octubre de 2010	55
Figura 25. Razones La/Yb normalizadas con lutita norteamericana (NASC) en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	57
Figura 26. Anomalías de Eu normalizado con lutita norteamericana (NASC) en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	58
Figura 27. Flujo de Ca particulado a la Cuenca Alfonso	59
Figura 28. Flujo de Ca _{biog} particulado a la Cuenca Alfonso	60
Figura 29. Flujo de As particulado a la Cuenca Alfonso	61
Figura 30. Flujo de Sc particulado a la Cuenca Alfonso	62
Figura 31. Flujo de Fe particulado a la Cuenca Alfonso	63
Figura 32. Flujo de U particulado a la Cuenca Alfonso	64
Figura 33. Estratigrafía del núcleo C44 (Modificado de Álvarez Gómez, 2010)	65
Figura 34. Fechado del núcleo C44 con el método de ²¹⁰ Pb: a) actividad de ²¹⁰ Pb	

total contra el horizonte del núcleo; b) logaritmo natural de la actividad de ^{210}Pb no soportado contra el horizonte del núcleo	66
Figura 35. Contenido de las formas de calcio en la capa superficial de sedimentos del núcleo C44: a) calcio total y b) calcio biogénico	70
Figura 36. Contenido de los elementos traza terrígenos en la capa superficial de sedimentos del núcleo C44: a) escandio y b) fierro	71
Figura 37. Contenido de dos elementos en la capa superficial de sedimentos del núcleo C44: a) arsénico y b) uranio	72
Figura 38. Valores de: a) razones La/Yb y b) anomalías de Eu, ambas normalizadas con lutita norteamericana (NASC) en la capa superficial de sedimentos del núcleo C44	73
Figura 39. Flujo de masa total de la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Aguirre Bahena (2007)	76
Figura 40. Contenido de Sc en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008)	78
Figura 41. Contenido de Ca_{biog} en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008)	79
Figura 42. Contenido de U en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008)	80
Figura 43. Contenido de uranio en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje, así como en sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz (datos de Rodríguez Castañeda, 2002)	81
Figura 44. Contenido de As en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008)	83
Figura 45. Contenido de arsénico en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la	

cuenca de drenaje, así como en sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz (datos de Rodríguez Castañeda, 2002)	84
Figura 46. Patrones de lantánidos normalizados con lutita norteamericana para eventos extraordinarios desde 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008)	85
Figura 47. Razones La/Yb normalizadas con lutita norteamericana (NASC) en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008)	86
Figura 48. Razones La/Yb normalizadas con lutita norteamericana (NASC) en sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz (datos de Rodríguez Castañeda, 2002)	87
Figura 49. Anomalías de Eu normalizado con lutita norteamericana (NASC) en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008)	88
Figura 50. Anomalías de Eu normalizado con lutita norteamericana (NASC) en sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz (datos de Rodríguez Castañeda, 2002)	89
Figura 51. Trayectorias de los ciclones tropicales más importantes que han pasado cerca del área de estudio durante el periodo 2002-2008. Su numeración corresponde con la de la Tabla 7	93
Figura 52. Contenido de calcio en la capa superficial de sedimentos del núcleo C44 comparado con la anomalía anual de temperatura superficial ERSST.v3b de la NOAA	102
Figura 53. Cargas del modo R del análisis de factores, aplicado a la composición elemental de la materia particulada en hundimiento Cuenca Alfonso, graficadas en 2 planos: a) Factor 1 vs Factor 2, b) Factor 1 vs Factor 3	107
Figura 54. Cargas del modo R del análisis de factores, aplicado a la composición elemental de los horizontes del núcleo C44, graficadas en 2 planos: a) Factor 1 vs Factor 2, b) Factor 1 vs Factor 3	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Contenidos de elementos en las rocas de la cuenca de drenaje	32
Tabla 2. Contenidos de elementos en las muestras de sedimento de arroyo y duna, colectados en la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz	42
Tabla 3. Información generalizada sobre los contenidos de elementos en las muestras de la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	47
Tabla 4. Flujos de elementos particulados a la Cuenca Alfonso	58
Tabla 5. Contenidos de elementos en los horizontes del núcleo C44, colectado en Cuenca Alfonso	67
Tabla 6. Contenidos de elementos en diferentes tipos de material sedimentario de la Bahía de La Paz	75
Tabla 7. Ciclones tropicales importantes que han pasado cerca del área de estudio durante el periodo 2002-2008	92
Tabla 8. Resultados del modo R del análisis de factores, aplicado a la composición elemental de la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	106
Tabla 9. Resultados del modo R del análisis de factores, aplicado a la composición elemental de los horizontes del núcleo C44 de Cuenca Alfonso	108

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Contenidos de elementos en las muestras de sedimento de arroyo y duna, colectados en la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz	128
Anexo 2. Flujo de masa total de las partículas en hundimiento de Cuenca Alfonso ...	129
Anexo 3. Contenidos de elementos en las muestras de materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	132
Anexo 4. Contenidos de elementos de la serie de los lantanidos en las muestras de materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso	135
Anexo 5. Contenidos de elementos en los horizontes del núcleo C44, colectado en Cuenca Alfonso	138
Anexo 6. Contenidos de elementos de la serie de los lantánidos en los horizontes del núcleo C44, colectado en Cuenca Alfonso	140

RESUMEN

La caracterización geoquímica de elementos traza en los materiales sedimentarios de las regiones de climas áridos es relativamente menor que en las zonas templadas y tropicales con mayor precipitación y escorrentía. La influencia de la composición de las rocas de la cuenca de drenaje en el material sedimentario marino (materia particulada en hundimiento - MPH y capa sedimentaria superficial) es estudiada en una de estas áreas climáticas con poca precipitación, como es el caso de la Bahía de La Paz, Golfo de California, donde los principales aportes ocurren por el paso de ciclones tropicales, lluvias esporádicas y tormentas de polvo. Se colectaron 10 muestras de roca, 15 de sedimentos aluviales y 15 de dunas en la cuenca de drenaje de la bahía. Entre los años 2005 y 2008 se obtuvieron 64 muestras de MPH con una trampa sedimentaria, así como de submuestras de un núcleo (110 mm de largo, fechado con ^{210}Pb , obteniéndose una tasa de sedimentación de 0.61 mm/año) en la parte más profunda de este cuerpo de agua (Cuenca Alfonso). En los sedimentos aluviales se observa que los elementos como As, U y P son aportados de productos de erosión de rocas marinas que presentan elevado contenido de fósforo, como las fosforitas y areniscas fosfáticas de la Formación El Cien. Esto debido a que dichas rocas fueron formadas en condiciones de surgencias con elevada productividad primaria, así como en cuencas suboxicas, lo mismo que ocurre actualmente en Cuenca Alfonso. Lo anterior es registrado en la composición de MPH mediante eventos de enriquecimiento de As (47.5 mg/kg) y U (42.8 mg/kg), concordando en algunos casos con elevados valores de Ca biogénico asociados a florecimientos planctónicos. Por otro lado, el registro histórico (núcleo sedimentario) indica algunos eventos de variación de estos elementos, especialmente el U que presenta un pico con un valor elevado (19 mg/kg) a la profundidad de núcleo de 35 mm que corresponde al año 1950. El calcio probablemente sea aportado a la cuenca mediante florecimientos planctónicos y productividad primaria, lo cual hace que concuerde con eventos reportados por otros autores durante la serie de tiempo de la trampa sedimentaria. En el núcleo, este elemento presenta un aumento gradual a partir de 1950 y su comportamiento es casi idéntico a la reconstrucción de temperatura superficial del mar (ERSST.v3b de la NOAA).

Esto probablemente se deba a la preferencia de organismos calcáreos por condiciones más cálidas. El aporte terrígeno, estimado por medio del Sc en la materia particulada, muestra una relación positiva con ciclones tropicales, así como con rachas persistentes de viento (> 4.5 m/s) provenientes del NW. En el núcleo sedimentario se observan cambios de régimen fluvial, destacando un periodo que abarca desde 1890 hasta 1980 con elevados contenidos de este elemento.

ABSTRACT

The trace element geochemistry in the sedimentary material of arid climatic regions with prevailing sporadic currents is still not as fully characterized as that of the temperate and tropical zones with higher precipitation and runoff. The drainage basin rock composition influence on the marine sedimentary material (settling particulate matter - SPM and superficial sedimentary layer) is being studied in one of these climatic areas with low precipitation, as is the case of La Paz Bay, Gulf of California, where the main contributions occur due to the the passage of tropical cyclones, sporadic rains and dust storms. Ten rocks, 15 alluvial sediments and 15 dune samples were collected in the bay drainage basin. Moreover, 64 SPM samples between 2005 and 2008 with sediment trap, as well as sediment core subsamples (110 mm, ^{210}Pb -dated, giving the sedimentation rate of 0.61 mm/year) were obtained in the deepest part of this water body, called Alfonso Basin. It can be observed from the alluvial sediments that As, U and P elements are being supplied as erosion products of marine rocks, which present elevated phosphorous content, such as phosphorites and phosphatic sandstones of El Cien Formation. This fact is due to these rocks being formed in upwelling conditions with high primary productivity, as well as in suboxic basins, which is in the present time occurring in Alfonso Basin. The latter is registered by As (47.5 mg/kg) and U (42.8 mg/kg) enrichment events in SPM composition, sometimes relating to bloom-associated elevated biogenic Ca values. On the other hand, the historical registry (sediment core) indicates some of these element variation events, especially U that presents a high value peak (19 mg/kg) in the core depth of 35 mm that corresponds to the year 1950. Calcium, instead, seems to be supplied to the basin by planktonic blooms and primary productivity, which makes it possible to correlate with events already reported by other authors during the trap time series. In the sediment core case, this element presents a gradual increase after 1950 and its behavior is almost identical to the sea surface temperature reconstruction (NOAA's ERSST.v3b). This is probably due to the preference of calcareous organisms for warm conditions. On the other hand, the terrigenous supply, estimated by Sc, shows in the particulate matter a relation with tropical cyclones, as well as with strong wind and gust events. In the sediment core

some changes in the fluvial regime are observed, where a high content of this element period from 1890 to 1980 stands out.

1. INTRODUCCIÓN

Para entender el sistema terrestre es necesario estudiar sus esferas (atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera) y establecer las relaciones entre cada una de éstas. La geoquímica moderna incluye no solo el estudio de contenidos de elementos en los compartimientos y materiales del sistema terrestre, sino que también es enfocada en la caracterización de ciclos biogeoquímicos de los elementos (Vernadsky et al., 1998; Chester, 2003; GEOTRACES, 2006). Estos ciclos biogeoquímicos tienen un papel clave en el funcionamiento de los ecosistemas (Schlesinger, 1997). A su vez, la creación de tales ciclos requiere de la cuantificación de flujos entre los compartimientos de los ecosistemas. En el caso de los ecosistemas marinos una parte importante son los flujos verticales de la materia particulada en hundimiento (MPH) y los elementos así transportados desde la capa superior de la columna del agua hacia los sedimentos, donde finalmente son sepultados y empiezan a formar parte del ciclo geológico, dirigido por procesos tectónicos globales de nuestro planeta (Kennett, 1982).

El interés de este trabajo es estudiar la composición química de la MPH y de los sedimentos de fondo, así como cuantificar los flujos de elementos particulados en la Bahía de La Paz. Esto con el fin de conocer la composición del material sedimentario y deducir su relación con las fuentes de aporte de la parte continental adyacente, con especial atención a la geoquímica de las formaciones geológicas regionales, así como estimar la influencia de fuentes distantes.

2. ANTECEDENTES

2.1. Antecedentes generales

La distribución de los principales tipos de sedimentos marinos en el océano global (Davies y Gorsline, 1976; Kennett, 1982; Lisitzin, 1996) es controlada principalmente por su origen, que puede ser terrígeno (sedimentos terrígenos, depósitos de plataforma continental, arcillas rojas y depósitos glaciares) o biogénico (sedimentos silíceos y sedimentos calcáreos). La dominancia de alguno de estos componentes depende de la distancia del continente, lo que explica los grandes espesores de la capa sedimentaria del fondo cerca de las costas y las mayores tasas de sedimentación de dichas zonas, así como del clima que hará que domine la depositación silícea o calcárea (Chester, 2003).

Los estudios de sedimentos marinos crearon muchas incógnitas acerca de los procesos por los que pasa el material en hundimiento desde que es traído a la (o formado en la) capa superficial hasta que es preservado en el fondo. La composición de MPH en el mar es un resultado integral de la interacción de varias fuentes (terrígenas tanto fluviales como eólicas, biogénicas marinas y autógenas) y procesos (físicos, químicos y biológicos) en la columna del agua (Chester, 2003; Nameroff, 1996; Otsuka y Noriki, 2000) (Figura 1). La influencia terrígena es principalmente controlada por el clima que define tanto la tasa e intensidad del intemperismo como las descargas fluviales, por la mineralogía de las rocas de las cuencas de drenaje, la distancia desde el continente hasta la cuenca de depositación y el aporte eólico (Duce y Tindale, 1991; Jickells et al., 1998, 2005; Kremling y Streu, 1993; Prospero, 1999; Trapp et al., 2010). Estos efectos son revelados en mayor grado durante eventos episódicos tales como precipitaciones torrenciales, huracanes y tormentas de polvo en zonas desérticas. Las fuentes marinas a su vez son definidas por la tasa de productividad biológica que se observa en la capa fótica del océano. Esto dará origen a la formación de partículas biogénicas marinas calcáreas y silíceas, que en su mayoría son fitoplancton (diatomeas y cocolitofóridos) y zooplancton (radiolarios y foraminíferos) vivos y muertos (Kennett, 1982). Los florecimientos planctónicos pueden contribuir con una gran cantidad de partículas biogénicas marinas (Gupta et al., 2002; Ittekkot, 1991; Kuss y Kremling, 1999, Pohl et al., 2004; Rodríguez Castañeda, 2008). Todas las fuentes en conjunto forman lo que se conoce como agregados de nieve marina,

que incluye pelotillas fecales, partículas exopoliméricas transparentes (TEP), partículas terrígenas finas y minerales autógenos, que por el aumento de su densidad van a desplazarse verticalmente hacia el fondo (Gupta et al., 2002; Huang y Conte, 2009; Ittekkot, 1991; Noriki et al., 1985; Pohl et al., 2004). En la columna de agua los agregados pueden ser transformados mediante los procesos de remineralización (consumo de oxígeno por oxidación de materia orgánica o por actividad bacteriana), adsorción y desorción fisicoquímica de algunos elementos y formación de minerales autógenos de otros elementos, en su mayoría redox-sensibles (Kennett, 1982; Lisitzin, 1996). Las partículas autógenas pueden formarse a causa de diferentes procesos fisicoquímicos, tales como la disminución del potencial redox (Eh) del agua en zonas subóxicas y especialmente anóxicas (Ku et al., 1977; Anderson et al., 1989; Klinkhammer y Palmer, 1991; McManus et al., 2006; Böning et al., 2004, 2009). Finalmente las partículas llegando al fondo oceánico, son compactadas y transformadas durante la diagénesis temprana. Los minerales autógenos también pueden formarse en el sedimento durante dicho proceso.

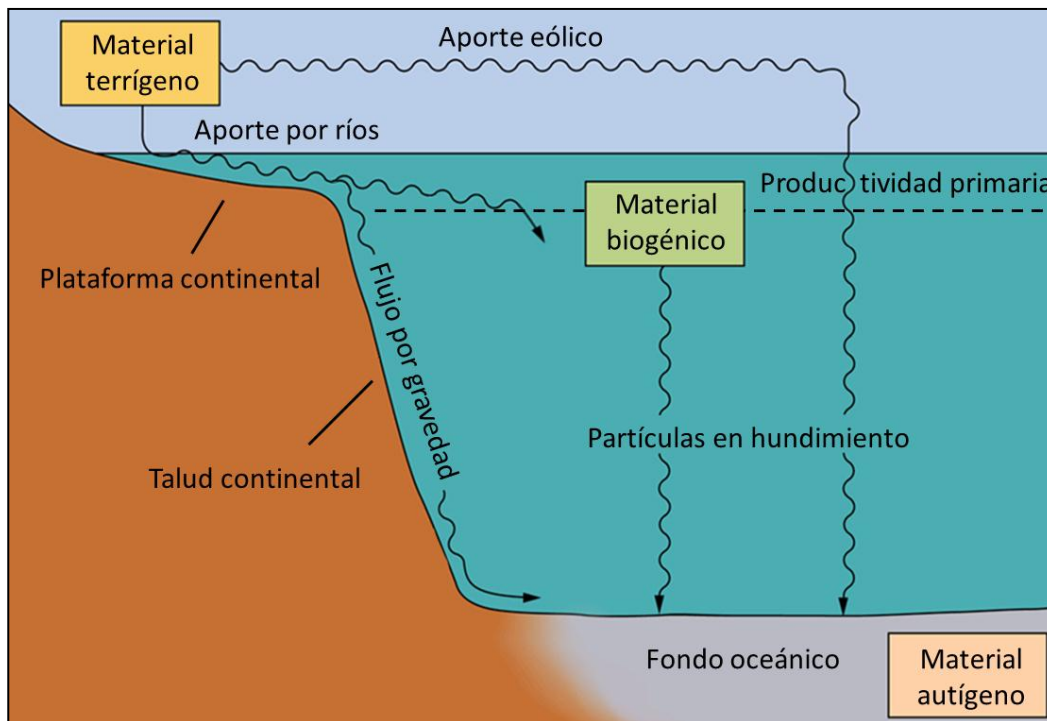


Figura 1. Modelo generalizado de sedimentación marina.

La composición elemental tiene su propia variabilidad espacio-temporal dependiendo de la influencia de las fuentes antes mencionadas, de las variaciones de las condiciones climáticas y de la dinámica propia de los ecosistemas. Los cambios del aporte de los componentes biológicos, terrígenos y autógenos se estudian mediante diferentes métodos de muestreo de sedimento marino y materia en hundimiento. La utilización de diversas técnicas depende de la escala espacial y vertical a la que se desea trabajar y del rango de tiempo que corresponde a la capa sedimentaria muestreada. La capa sedimentaria profunda, con un espesor máximo de exploración de 1700 m, es muestreada por medio de núcleos que se obtienen por los buques de perforación (inicialmente “Glomar Challenger” y actualmente “JOIDES Resolution”). La resolución que se obtiene por medio de este muestreo va desde miles a cientos de miles de años. La capa sedimentaria superior del fondo marino se muestrea por medio de la obtención de núcleos por nucleadores (de gravedad, de caja, de piston, múltiples, entre otros), alcanzando una profundidad de penetración dentro la capa sedimentaria desde decenas de centímetros hasta los 65 m. La descripción de dichos núcleos de sedimentos finos permite obtener información de la variabilidad de eventos que presentan cierta ciclicidad de baja frecuencia (decenas - cientos de años), sin embargo es imposible utilizar este método en eventos estacionales o anuales, especialmente cuando la tasa de sedimentación es baja (Chester, 2003; Kennett, 1982). Para coleccionar la materia particulada en hundimiento se utilizan las trampas sedimentarias, propuestas por Honjo a finales de los 70s (Honjo, 1978; Honjo et al., 1988, 1999), las cuales a su vez permiten la obtención de registros de mayor resolución (días - semanas) y relativamente continuos. Esto es muy útil en la descripción de procesos cíclicos de menor escala (El Niño o La Niña), así como de eventos episódicos (huracanes, tormentas de polvo o flujos de gravedad activados por sismicidad). Otra ventaja de utilizar trampas de sedimentos es la mayor cantidad de material sedimentario colectado, a diferencia de la materia suspendida particulada marina obtenida por filtración. Esto permite realizar análisis mineralógicos, químicos y biológicos de las partículas (Honjo, 1982; Spencer et al., 1978).

Los procesos mencionados forman parte del estudio integral del cambio climático global en el programa IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme), creado en

1987, que incluyó los proyectos JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study) y LOICZ (Land-Ocean Interaction in the Coastal Zone), entre otros. Estos subprogramas se enfocaron en la caracterización de la interacción de procesos biológicos, químicos y físicos en los océanos, aplicando ampliamente la metodología de las trampas sedimentarias. Por este medio fue posible encontrar el papel de los elementos traza dentro de los ciclos biogeoquímicos, en particular en el ciclo del carbono y en muchos procesos naturales (Chester, 2003). Otros programas internacionales especialmente enfocados a la problemática de los elementos traza en ciclos biogeoquímicos marinos globales fueron SOLAS y LOICZ II, creados posteriormente como parte del programa IGBP. Y solo recientemente surgió el programa internacional GEOTRACES, el objetivo del cual es estudiar los ciclos biogeoquímicos de elementos traza y sus isotopos en el océano, identificar procesos y cuantificar flujos, los cuales pudieran tener implicaciones en el cambio climático natural (GEOTRACES, 2006).

2.1.1. Estudios de materia particulada en hundimiento y flujos de elementos

Después de la implementación de la herramienta de trampa sedimentaria aparecieron varios sitios de monitoreo de material particulado a través del tiempo. A pesar de ello, debido a dificultades metodológicas de diversos tipos y el enfoque de los trabajos, sólo se cuenta con series de tiempo de meses y pocos años de material colectado, caracterizado en la mayoría de los casos por sus componentes principales (carbonato de calcio, sílice biogénico y carbono orgánico) o por presencia de restos de organismos planctónicos. Solo existen pocos estudios que incluyan la variación en el contenido de metales traza en el MPH hasta el momento, lo cual crea un espacio vacío de conocimiento, impidiendo reconstruir las fuentes y destinos de dichos elementos en el ambiente marino en toda su plenitud. De los trabajos existentes, los cuales sólo incluyen un pequeño número de metales traza particulados (Fisher et al., 1986; Fowler y Knauer, 1986; Huang y Conte, 2009; Jickells et al., 1984; Kremling y Streu, 1993; Kuss y Kremling, 1999; Roy-Barman et al., 2005; Schüßler et al., 1997) se puede destacar lo siguiente: la variabilidad de la composición de las partículas en hundimiento y de los flujos de elementos particulados es un efecto combinado de factores físicos, químicos, biológicos y

sedimentológicos. La composición y flujos de estas partículas es extremadamente variable por diversas razones (Pohl et al., 2004). El efecto de eventos episódicos como un factor de dicha variabilidad en mares marginales se ha vuelto un emergente enfoque en experimentos de trampas sedimentarias (Silverberg et al., 2007, 2008). A través de la obtención de datos de elementos traza y radionúclidos en el mar, se pudieron identificar diferentes fenómenos importantes como fuertes inundaciones en zonas costeras; resuspensión de sedimentos calcáreos cerca de islas de coral (antiguos atolones) durante el paso de huracanes, seguido del rápido transporte de estos por corrientes marinas (Conte, 2005; Huang y Conte, 2009); impacto de sismos en los sedimentos finos de la plataforma y talud continental, desplazando las partículas resuspendidas a mayores profundidades del océano (Hsu et al., 2004); corrientes de turbidez, moviendo sedimentos a canales de cañones submarinos; tormentas de polvo en áreas desérticas de África, Asia y América, transportando sedimentos terrígenos al océano por largas distancias; erupciones volcánicas en los continentes y fondo marino; florecimientos planctónicos incluyendo “mareas rojas”, accidentes de buques de carga en el mar; o finalmente accidentes en plantas nucleares como Chernobyl, el cual pudo ser registrado casi inmediatamente por la presencia de algunos radionúclidos en las partículas en hundimiento del Mar Negro (Buesseler et al., 1987), en conjunto con el impacto aún desconocido del incidente de la planta nuclear de Fukushima en el Océano Pacífico. Una importante variable que pudo finalmente ser tomada en cuenta para estudiar de manera adecuada estos fenómenos fue el “tiempo”, debido que las trampas sedimentarias pueden ser configuradas para coleccionar muestras en momentos específicos.

En la MPH, los contenidos de elementos por si solos no son parámetros ideales para caracterizar la geoquímica de las partículas debido al diferente origen y variabilidad de los constituyentes, siendo estos terrígenos, biogénicos marinos o autógenos, así como del hecho de que la composición depende de muchos procesos, dificultando las interpretaciones (Pohl et al., 2004). Por ello se han utilizado herramientas adicionales como factores de enriquecimiento (FEs), razones de elementos como indicadores de fuentes de aporte, así como análisis estadísticos (componentes principales, cluster y factorización positiva de matrices o “positive matrix factorization”, la cual es una variante

del análisis de factores). El enfoque de factores de enriquecimiento en el estudio de la MPH de diferentes partes del Océano Atlántico (Kuss y Kremling, 1999), así como de la Cuenca de Gotland, Mar Báltico (Pohlt et al., 2004) fue demostrado como una herramienta útil en la interpretación de la variabilidad de elementos traza en relación con sus niveles promedio de corteza. Por otro lado, el uso de razones de elementos es útil para discernir el origen de las partículas, de las cuales destacan las razones Mn/Al, Th/Sc, La/Yb, lo cual fue aplicado para partículas del Pacífico Noroccidental (Otosaka y Noriki, 2000; Otosaka et al., 2004a, 2004b, 2005; Maeda et al., 2007) encontrando diferentes fuentes del material terrígeno. Los análisis estadísticos han permitido obtener asociaciones de elementos afines a su origen y procesos, como es el caso del análisis de factores en la MPH de Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz (Rodríguez Castañeda, 2008), así como el análisis de factorización positiva de matrices aplicado al material particulado en hundimiento del Mar de Los Sargazos, obteniendo agrupaciones de elementos y componentes mayoritarios de MPH a través del tiempo y definiendo relaciones entre elementos afines (Huang y Conte, 2009).

2.2. Antecedentes regionales

2.2.1. Golfo de California

Diversos autores han estudiado el tamaño de grano, los componentes biogénicos y terrígenos, mineralogía (minerales pesados y ligeros) y algunos aspectos de geoquímica de los sedimentos del Golfo de California. Este cuerpo de agua principalmente se caracteriza por tener las menores profundidades en su parte norte y mayores profundidades a partir del Archipiélago de San Lorenzo, donde se encuentran las islas Tiburón y Ángel de la Guarda (Figura 2). Esto se debe al elevado aporte de sedimentos terrígenos por el río Colorado (Carriquiry y Sánchez, 1999; Carriquiry et al., 2001; Daesslé et al., 2002, 2004; Shumilin et al., 2002). Las mayores profundidades son alcanzadas en cuencas de origen tectónico de las cuales destacan las cuencas Farallón y Guaymas. Esta morfología del fondo del Golfo de California ocasiona que a partir del Archipiélago de San Lorenzo exista entrada de aguas más cálidas (Agua Superficial Tropical, Agua Subsuperficial Subtropical) y aguas más frías (Agua Intermedia del Pacífico y Agua

Profunda del Pacífico), a diferencia de únicamente Agua del Golfo de California, como es el caso del Norte Golfo de California (Lavin y Marinone, 2003) (Figura 3).

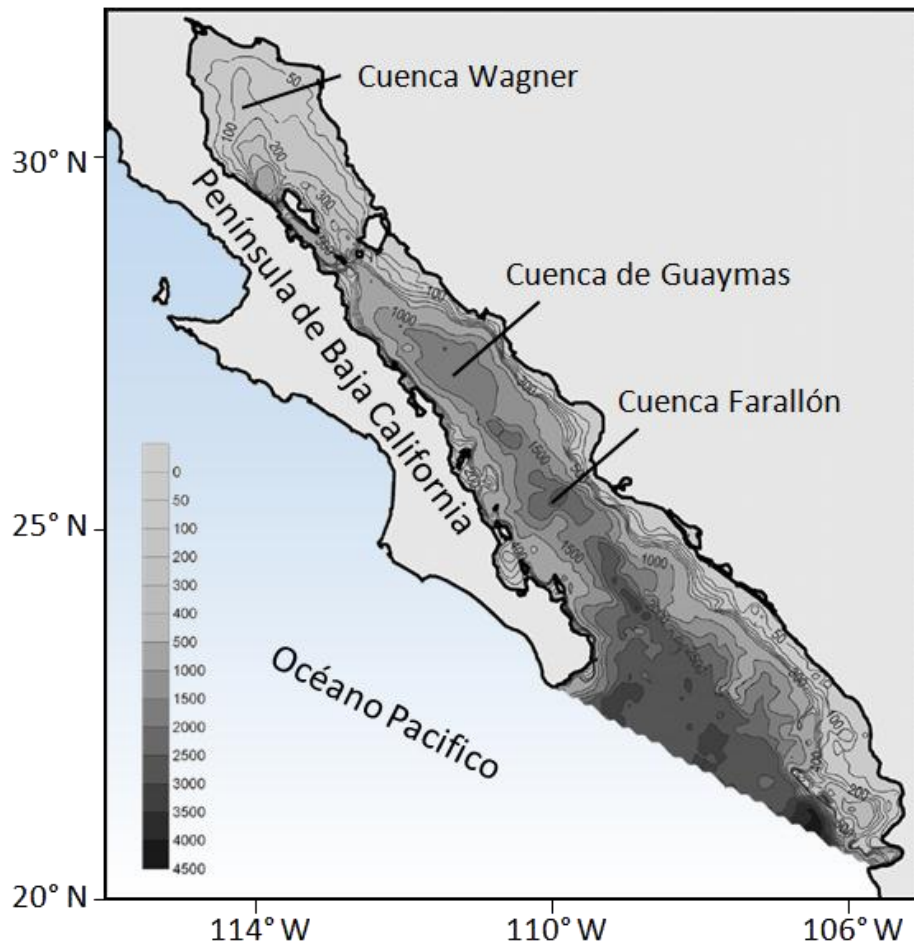


Figura 2. Batimetría y cuencas más importantes del Golfo de California (modificado de Lavin y Marinone, 2003).

La mineralogía de los sedimentos superficiales del Golfo de California permitió establecer las principales provincias sedimentarias, basándose en minerales pesados, y a su vez definir los patrones de dispersión de sedimentos terrígenos (Van Andel, 1964; Baba et al. 1991a, 1991b). La distribución de minerales y su asociación con rocas de las partes continentales adyacentes aporta evidencias de las principales fuentes terrígenas a la parte sur del golfo: una relacionada a la parte continental de México (aporte por los ríos Yaqui,

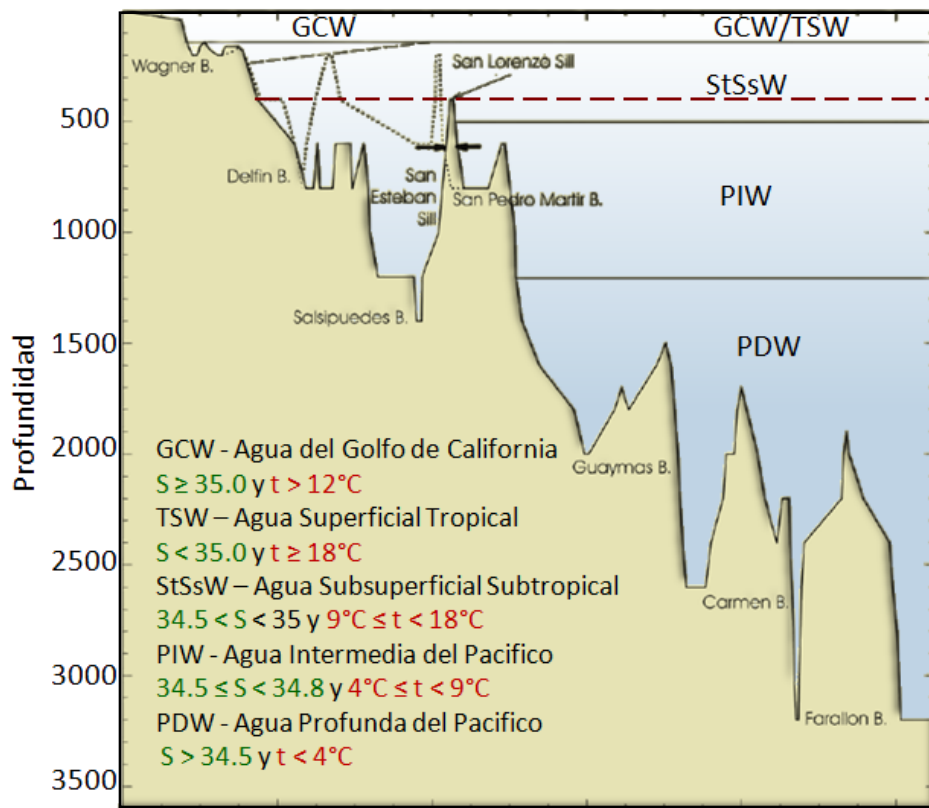


Figura 3. Perfil batimétrico con tipos de masas de agua del Golfo de California (modificado de Lavin y Marinone, 2003).

Fuerte y Culiacán) y otra asociada a las rocas de la Península de Baja California. Los estudios mineralógicos son de gran utilidad para interpretaciones de aporte sedimentario, pero se requiere de suficiente material, lo cual difícilmente se obtiene mediante muestreo con trampas sedimentarias, como en el caso de este estudio.

La distribución de componentes mayores en los sedimentos superficiales del Golfo de California permitieron establecer la importancia del aporte biogénico (Douglas et al., 2007; Baba et al., 1991a, 1991b). El sílice biogénico presenta su mayor abundancia en la parte central del golfo (20%), y disminuye tanto en los márgenes norte como sur del cuerpo de agua. El CaCO_3 biogénico a su vez es más abundante en el margen oeste del Golfo de California (15%), adyacente a la península y disminuye gradualmente hacia las costas orientales cercanas a la parte continental de México (Douglas et al., 2007). La abundancia de C_{org} es mayor en la parte suroccidental del golfo, cerca de la Bahía de La

Paz. Esto indica que la entrada de diferentes tipos de agua al Golfo de California, al igual que los patrones de circulación y giros controlan el aporte biogénico (Douglas et al., 2007).

El estudio de la geoquímica de núcleos sedimentarios colectados en la parte central del Golfo de California, cerca de la Cuenca de Guaymas, permitió obtener una clasificación de las principales asociaciones de elementos relacionados a tres fuentes principales (Brumsack, 1989). Esto se realizó graficando los logaritmos de las razones de concentraciones de cada elemento estudiado contra la concentración de aluminio y así comparando en el eje de las abscisas dichas razones para sedimentos silíceos del Golfo de California contra las razones para lutita norteamericana también denominada "North American Shale Composite" en el eje de las ordenadas (Figura 4). La primera asociación corresponde a elementos detríticos terrígenos, que son graficados muy cerca de la línea de 45°. La segunda agrupación es relacionada a elementos de origen biogénico y autógeno que se presentan más alejados de la línea en la gráfica.

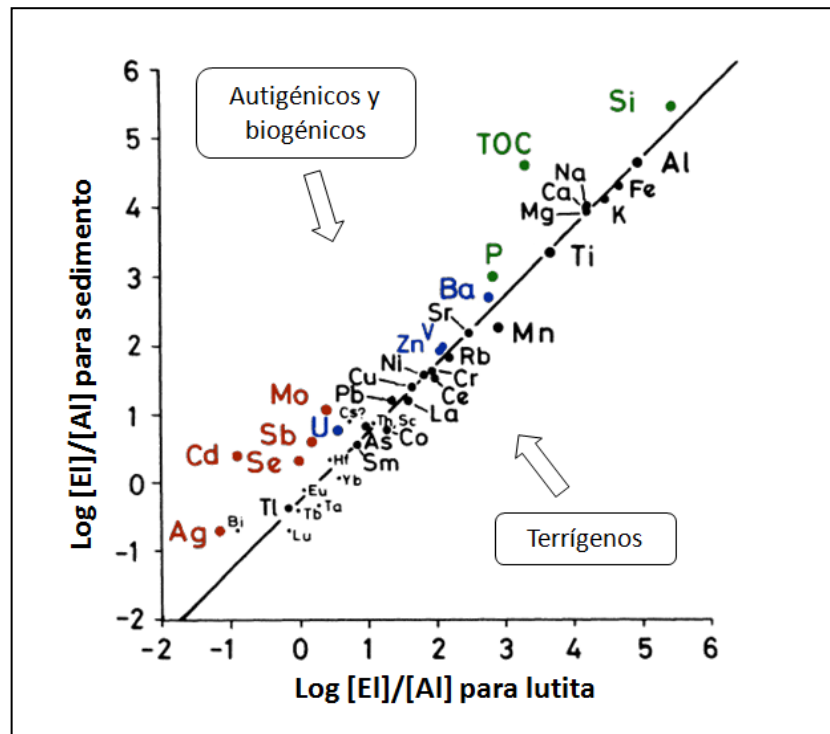


Figura 4. Comparación de las razones [EI]/[Al] entre sedimentos silíceos del Golfo de California y lutita norteamericana (modificado de Brumsack, 1989).

Para algunos elementos mayores y traza en dos núcleos colectados en los márgenes norte y sur de la Cuenca Guaymas, aplicando el modo R del análisis de factores a los contenidos de los elementos en los sedimentos correspondientes, se dedujo la existencia de cuatro principales aportes: biogénico, autógeno y dos asociados a fuentes detríticas (Dean et al., 2004). De las fuentes terrígenas una está relacionada a detritos clásticos de rocas volcánicas-máficas de la Sierra Madre y otra se asocia al aporte de detritos de rocas más félsicas por el río Colorado. La posibilidad de haber establecido dos fuentes terrígenas por medio de este método lo hace muy valioso para el presente estudio.

Un estudio puntual de corta duración y limitado con un enfoque de prospección, sin embargo muy importante, fue realizado por Nameroff (1996) en el talud continental frente a Mazatlán, mostrando la importancia de la zona mínima de oxígeno para el secuestro de elementos redox-sensibles (uranio y molibdeno) por partículas en hundimiento y sedimentos superficiales del fondo marino. Para el presente trabajo son de interés las distribuciones verticales de Cd y Fe disueltos, Mn disuelto y particulado en la columna del agua de varias partes del Golfo de California, así como de flujos atmosféricos de Fe medidos en la costa oriental del golfo (Delgadillo-Hinojosa et al., 2001, 2006; Segovia-Zavala et al., 2009, 2010).

Los resultados más importantes sobre la MPH en el Golfo de California fueron obtenidos por Thunell (1998) con sus colaboradores y el grupo de trabajo de Silverberg (Silverberg et al., 2006, 2007, 2008; Aguirre Bahena, 2007; Rodríguez Castañeda, 2008). También existen datos sobre la MPH colectada en 1991 y 1992 en la Cuenca Guaymas, misma en la que trabajaron Dean et al. (2004) (Dean, datos no publicados).

2.2.2. Bahía de La Paz

La batimetría y circulación de masas de agua de la Bahía de La Paz, parte sur del Golfo de California, fue estudiada por Cruz-Orozco et al. (1996), Salinas González (2000), Salinas-González et al. (2003), Nava-Sánchez et al. (2001), Obeso-Nieblas et al. (2004, 2007, 2008), Zaytsev et al. (2010), entre otros. Por medio del estudio de núcleos en la Bahía de La Paz y muy cerca de ésta se reconocieron algunos rasgos de las características sedimentológicas del fondo marino de este cuerpo del agua, uno de los

cuales es el aporte por flujos de turbiditas al fondo de la parte profunda de la bahía (González-Yajimovich et al., 2004, 2005, 2007; Nava-Sánchez, 1997; Pérez Cruz, 2000; Pérez-Cruz, 2006). La composición elemental de los sedimentos superficiales de la bahía y el procesamiento de datos de esta por diversos métodos estadísticos multivariados permitieron mostrar la existencia de asociaciones elementales de diferente naturaleza: terrígena, biogénica marina o antropogénica (Rodríguez Castañeda, 2002; Rodríguez Meza, 1999). Estos resultados son de utilidad para el presente estudio con el fin de interpretar las tendencias de distribución espacial de algunos elementos y así establecer su fuente.

Similar a lo obtenido por Dean et al. (2004) para Cuenca Guaymas, Rodríguez Castañeda (2008) mediante un análisis de componentes principales de la composición química de la MPH de la serie de tiempo 2002-2005 en Cuenca Alfonso (Bahía de La Paz) pudo asociar algunos elementos por su origen y procesos dominantes. La autora concluyó que existen tres patrones principales de variabilidad temporal. Uno de ellos asocia los elementos Al, Sc, Fe, Cs, Mn, V, La, Ce, Nd, Sm y Tb, que son agrupados como elementos de origen terrígeno (Figura 6). Éstos reciben una importante influencia durante el paso de ciclones tropicales y otros eventos episódicos no muy claros, probablemente por tormentas de polvo (Aguirre Bahena, 2007). El segundo grupo de elementos, que incluyen C_{inorg} , C_{org} , Ca, Ni, Sr y Cu, están relacionados al aporte calcáreo de origen biogénico marino. Un patrón similar al anterior fue encontrado para el tercer grupo que probablemente está asociado a micronutrientes en proceso de remineralización e incluye los elementos Cd, Co y Se. Sin embargo, a pesar de las conclusiones del trabajo de Rodríguez Castañeda (2008) la sedimentación en Cuenca Alfonso debe ser estudiada con mayor énfasis en las características de las rocas que constituyen las cuencas de drenaje, tanto cercanas a la bahía, así como de zonas desérticas (por ejemplo del Gran Desierto Altar de Sonora o Desierto de Vizcaíno). El trabajo de Rodríguez Castañeda (2008) es de suma importancia, debido a que en el presente estudio (esta tesis) se utiliza parcialmente la base de datos publicada y disponible de composición de la materia particulada en hundimiento de la serie de tiempo 2002-2005.

Además de lo anterior existe información sobre contenidos de Al, Cd, Cu, Fe, Mn en la materia suspendida particulada, colectada en la capa superficial de la Laguna y Bahía de La Paz, mediante filtración (Romero Bañuelos, 2003), lo cual puede ayudar a algunas interpretaciones adicionales.

Es de interés para este estudio la caracterización geoquímica de los lantánidos, porque sus patrones normalizados con lutita en algunos casos difieren para varios ambientes sedimentarios y fuentes de aporte que contribuyen en la formación de MPH y de los sedimentos de fondo (Otosaka y Noriki, 2000).

3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de La Paz se localiza en la parte sureste de la Península de Baja California y es un cuerpo de agua adyacente al Golfo de California (Figura 5). La batimetría se caracteriza por presentar profundidades menores a 200 m en su porción sur y llega a un máximo registrado de 420 m en la depresión tectónica llamada Cuenca Alfonso (Nava-Sánchez et al., 2001). La bahía es un cuerpo de agua semicerrado que tiene

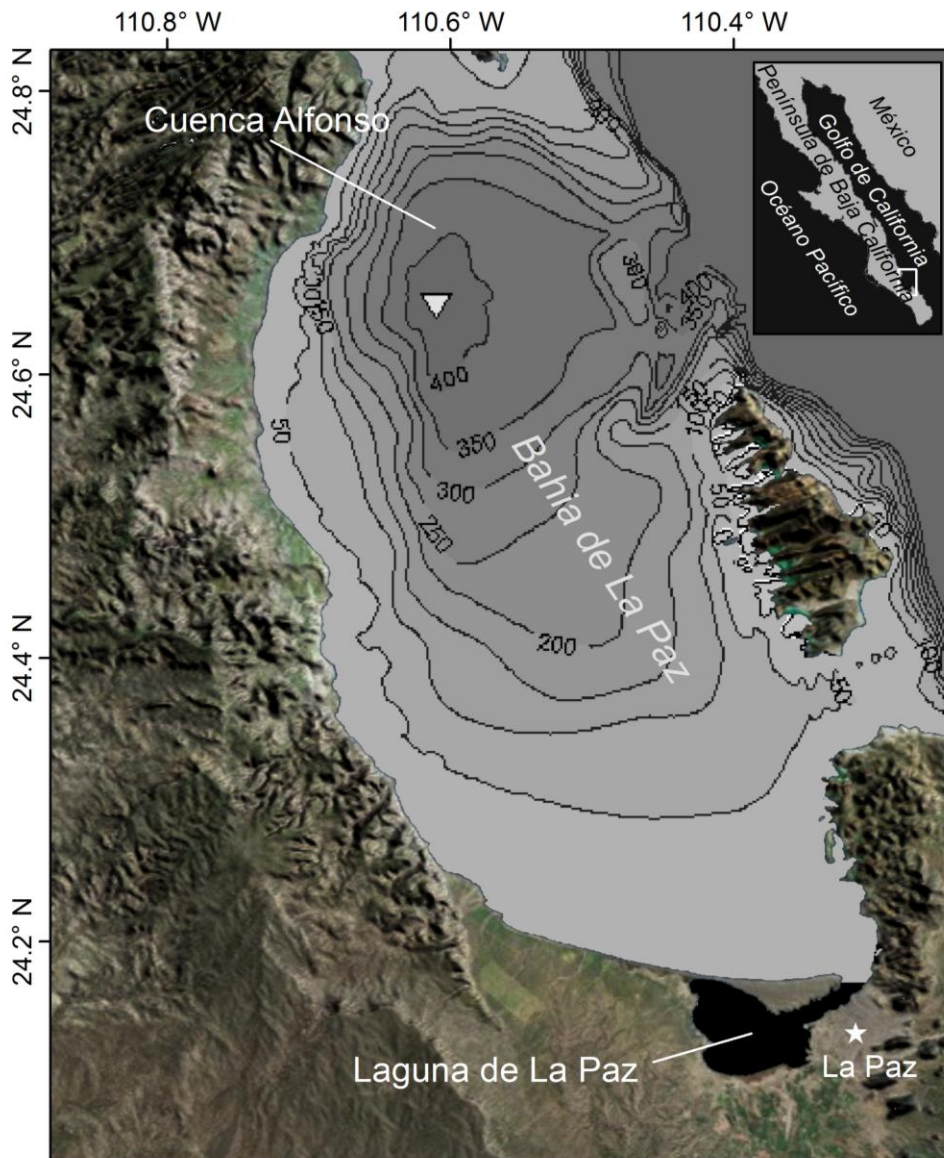


Figura 5. Localización y batimetría de la Bahía de La Paz y de la Cuenca Alfonso.

comunicación con el Golfo de California por medio de dos canales: uno somero y otro profundo y ancho. El área de estudio se encuentra en una región con un clima árido desértico. La precipitación es escasa (menor a 200 mm año⁻¹) por lo que el aporte fluvial es casi ausente y sólo aparece durante el paso de ciclones tropicales. La presencia de tormentas de polvo es frecuente en ciertas épocas del año y la influencia del viento parece ser un factor importante en la zona. Mientras que no está cuantificado el aporte eólico, Aguirre Bahena (2007) mostró que hay alta correlación entre el flujo de la fracción litogénica con el número anual de rachas de viento más fuertes que 4.5 m/s (supuesta

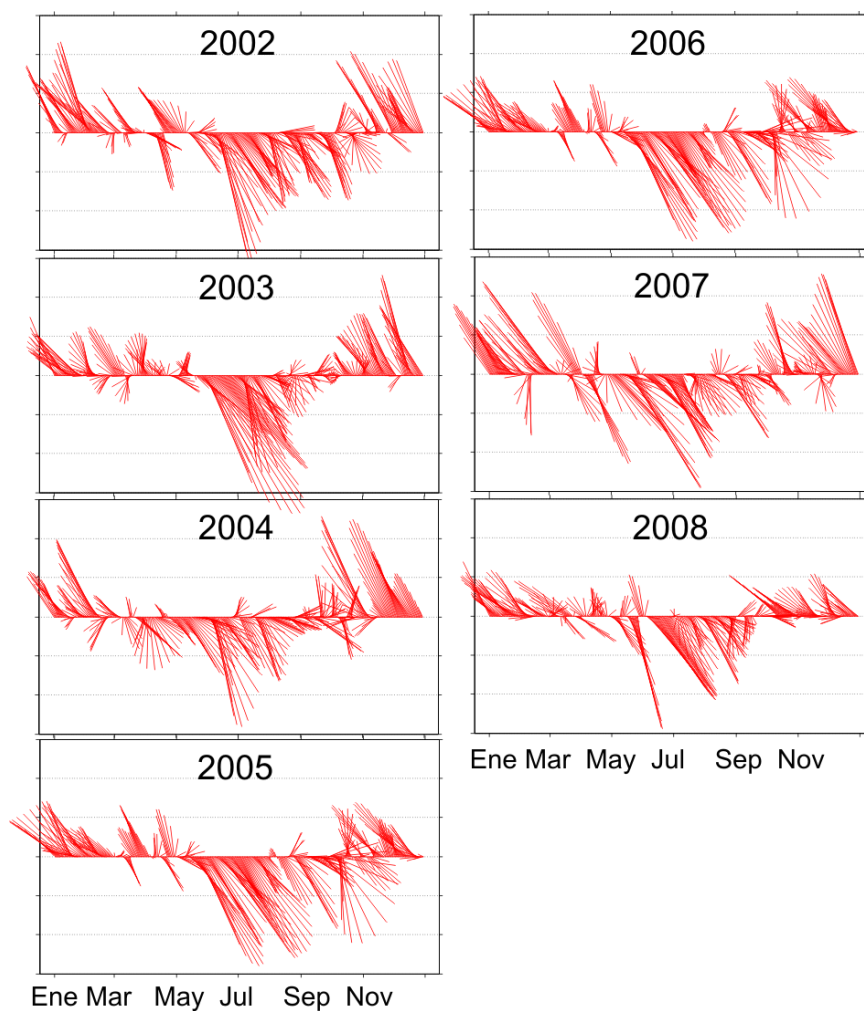


Figura 6. Direcciones de vientos predominantes en el área de estudio (datos de la Estación Meteorológica del CIBNOR).

velocidad a la que las partículas empiezan a ser transportadas) provenientes del noroeste. Las corrientes atmosféricas no son aun modeladas para los alrededores de la Bahía de La Paz. Sin embargo, existe un patrón estacional tipo monzón: vientos del noroeste, que son los más fuertes, predominan en invierno y los vientos del sur que son más débiles, actúan en verano principalmente (Figura 6, datos de la estación meteorológica del CIBNOR). El sistema de brisas a su vez, es importante en los veranos.

3.1. Hidrología y características de los sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz

Los procesos hidrológicos, hidroquímicos e hidrobiológicos se encuentran afectados por regímenes de vientos estacionales, corrientes residuales y de marea, así como por eventos episódicos (ciclones tropicales, fenómenos de “El Niño” y “La Niña”). La modelación de la circulación en la bahía, acompañados de datos in-situ (con perfiladores acústicos ADCP) señalan que en su capa superficial el agua entra por la boca principal y por el canal de San Lorenzo con mayor velocidad, la cual disminuye con la profundidad (Obeso-Nieblas et al., 2004, 2007, 2008; Salinas González, 2000; Salinas-González et al., 2003; Zaytsev et al., 2010). La productividad biológica de las aguas de la Bahía de La Paz es moderada - alta, con mayores florecimientos planctónicos entre otoño y primavera. En algunos trabajos se reporta la existencia de giros en la bahía que pueden afectar la concentración de nutrientes y por lo tanto la productividad junto con la dinámica en general de este ecosistema (Obeso-Nieblas et al., 2004, 2007, 2008; Salinas González, 2000; Salinas-González et al., 2003; Sánchez-Velasco, 2006; Zaytsev et al., 2010).

La parte sur de la bahía es una plataforma con predominio de sedimento arenoso con profundidades menores de 50 m. La parte norte de la bahía, al contrario, es dominada por profundidades mayores a 400 m, en su mayoría representada por la Cuenca Alfonso con sedimentos finos. El fondo de la bahía está constituido por sedimentos de los cuales predomina el tamaño de grano grueso (arenas) en zonas someras, enriquecido por materiales terrígenos al oeste, mientras que al este cerca de las islas Espíritu Santo y La Partida, el componente predominante son los carbonatos biogénicos (Cruz-Orozco et al, 1996; Rodríguez Castañeda, 2002). En la parte profunda se encuentran los sedimentos

finos (limo – arcilla) con mayor contenido de materia orgánica y algunos elementos autógenos como uranio (Rodríguez Castañeda, 2002; González-Yajimovich, 2004). El fondo de la Cuenca Alfonso está constituido por sedimentos laminados, lo que la hace propicia para estudios paleoceanográficos (Pérez-Cruz, 2006; Douglas et al., 2007). Esta laminación es probablemente causada por la deficiencia de oxígeno, lo cual impide la abundancia de organismos bentónicos, que pudieran perturbar el sedimento. Cabe reconocer que la naturaleza de estas laminaciones todavía se encuentra en discusión y exige estudios adicionales, para interpretar las periodicidades de su depósito.

3.2. Marco geológico

La Bahía de La Paz está rodeada por las subprovincias geológicas Faja Volcánica de La Giganta y Complejo Plutónico de La Paz (Ortega-Gutiérrez et al., 1991), cada una con sus propias características geológicas y diferente composición litológica con rocas de origen sedimentario, volcánico e intrusivo respectivamente (Hausback, 1984; Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1988; Fischer et al., 1995; CRM, 1999; Alvarado-Gastelum, 2007; Drake, 2005; García-Figueroa y Schwennicke, 2008; Cota Castro, 2011).

La región estudiada y sus alrededores presentan una serie de formaciones geológicas de diferentes ambientes de depósito y edades. El basamento comprende una serie de rocas graníticas, tonalíticas, intermedias y metamórficas, descritas como el Complejo Cristalino de La Paz y que afloran al sureste de la Bahía de La Paz (Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1988). La Formación El Salto corresponde a una serie de rocas terrestres como conglomerados, areniscas, areniscas conglomerádicas, fangolitas y tobas, que afloran al este de la Bahía de La Paz, en la localidad de Punta Coyote (Alvarado-Gastelum, 2007). La Formación El Cien está definida por rocas sedimentarias marinas como fangolitas silicificadas, fangolitas, tobas, calizas, fosforitas y conglomerados, que se encuentran en la costa oeste de la bahía (Fischer et al., 1995). La Formación Comondú se compone de rocas terrestres de origen volcánico y volcanoclástico como areniscas tobáceas, tobas, brechas volcánicas basálticas-andesíticas, ignimbritas y conglomerados, que afloran en la costa sur y suroeste de la Bahía de La Paz (Hausback, 1984; Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1988; Umhoefer et al., 2001; Drake, 2005). La Formación Lomas

de la Virgen comprende rocas terrestres como areniscas, fangolitas, conglomerados y muy escasas tobas retrabajadas, que se encuentran en las costas sur y suroeste de la Bahía de La Paz (Hausback, 1984; Drake, 2005; García-Figueroa y Schwennicke, 2008; Cota Castro, 2011). Esta unidad fue considerada por Hausback (1984) como parte de la Formación Comondú, sin embargo recientemente se propone definirla como otra unidad, debido a que no se presenta influencia volcánica directa en esta unidad, sino únicamente productos del retrabajamiento de rocas volcánicas más antiguas de la Formación Comondú.

Tectónicamente la parte sur de la península de Baja California representa una zona relativamente activa por la existencia de un sistema de fallas principalmente normales y de rumbo asociadas a centros de expansión de fondo oceánico en el Golfo de California. Estos sistemas forman los pilares tectónicos Sierra La Giganta, Sierra de las Cruces y Sierra de la Laguna, que están separados de las fosas Cuenca de La Paz, Cuenca de San José del Cabo y Cuenca El Carrizal por la fallas El Carrizal, San Juan de los Planes y San José del Cabo (Busch et al., 2011., Fletcher et al., 2003).

La composición química de algunas de las rocas de la parte sur de la península de Baja California, incluyendo la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz, ha sido descrita de manera general por Gastil et al. (1979), Hausback (1984) y Piper (1991, 1994). Estos autores encontraron considerables diferencias en el contenido de algunos elementos mayores, lo cual se debe al diferente origen de las rocas de la región. El contenido de elementos traza a su vez, no fue reportado detalladamente, con algunas excepciones como el As (Piper, 1991, 1994).

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y/O HIPÓTESIS

4.1. Justificación

Los estudios precedentes mostraron la distribución espacial y vertical de los elementos en sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz y establecieron su ocurrencia en diversas asociaciones. La interpretación estaba basada en la dominancia de materia biogénica o litogénica, e involucraba en menor grado la descripción de reactividad química de los elementos en la columna del agua.

Dentro de la serie de tiempo de MPH de Cuenca Alfonso analizada por Rodríguez Castañeda (2008), la composición general de las partículas sigue un patrón regular. Sin embargo había variaciones claras en las razones entre los elementos a través del tiempo, indicativa de cambios en la fuente del componente terrígeno. Lo que faltaba era extender la serie de tiempo de las observaciones con la trampa instalada en Cuenca Alfonso y definir las asociaciones de elementos no solo en la MPH, sino también en las rocas de la cuenca de drenaje, así como ampliar el muestreo de sedimentos aluviales, tomando en cuenta la correspondencia del aporte en las series de tiempo. Esto pudo ser útil para entender la dirección del transporte de material sedimentario hasta la Cuenca Alfonso. Fue necesario considerar en el trabajo la existencia de casos de recurrencias estacionales, variaciones interanuales, cambios de contribución eólica o fluvial y tratar de ver, si ocurre un retraso entre el instante de la introducción de material terrígeno fino a la capa superficial del mar y el momento, cuando los procesos de agregación biológicas (nieve marina y excreción de pelotillas fecales) aseguran su hundimiento rápido hacia las profundidades.

Por otro lado para poder establecer variaciones y ciclicidad de la composición elemental en Cuenca Alfonso a una mayor escala (decadal) que la de la trampa sedimentaria (diaria - semanal) fue eminente la necesidad del estudio más a detalle de un núcleo sedimentario, incluyendo más submuestras que en trabajos previos.

4.2. Hipótesis

La composición de la materia particulada en hundimiento en Cuenca Alfonso (Bahía de La Paz) depende de la interacción de diversas fuentes de aporte terrígeno, biogénico y

autígeno, las cuales pueden ser diferenciadas durante eventos extraordinarios como pasaje de ciclones tropicales, vientos intensos (tormentas de polvo), florecimientos planctónicos y cambios en la concentración de oxígeno en la columna de agua, lo cual a su vez deja huella geoquímica en los sedimentos laminados holocénicos.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Analizar la variación temporal de la composición elemental de la materia particulada en hundimiento y de los sedimentos marinos recientes de Cuenca Alfonso (Bahía de La Paz), con énfasis en las escalas temporales (interanual, estacional o decadal) y en eventos episódicos (ciclones tropicales, eventos de vientos intensos y florecimientos planctónicos).

5.2. Objetivos particulares

- 1) Estudiar la composición elemental y flujos de la materia particulada en hundimiento en Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, así como establecer la existencia de algunos patrones de su variación temporal y ciclicidad tanto en el periodo muestreado correspondiente a 2005-2008 como en el disponible en trabajos previos (2002-2005).
- 2) Analizar la composición de la capa superficial de sedimentos (horizontes del núcleo sedimentario) para caracterizar la variabilidad elemental a una escala de tiempo mayor.
- 3) Establecer las principales asociaciones de los elementos mayores y trazas, tanto en la materia particulada en hundimiento y sedimento laminado del núcleo, como en las muestras de rocas y sedimentos de arroyo en la cuenca de drenaje.
- 4) Definir la importancia de las fuentes de aporte terrígenas (fluviales y eólicas) en la sedimentación de Cuenca Alfonso, fundamentándose en la composición elemental de sedimentos aluviales y de las rocas que afloran alrededor de la Bahía de La Paz, así como elucidar el papel de los eventos episódicos en la sedimentación de elementos particulados al fondo de esta cuenca.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Muestreo y observaciones en el campo

La localización del lugar de instalación de la trampa sedimentaria, así como del sitio de colecta del núcleo sedimentario y de los puntos en los que se obtuvieron muestras de arroyos, dunas y rocas se presenta en la Figura 6.

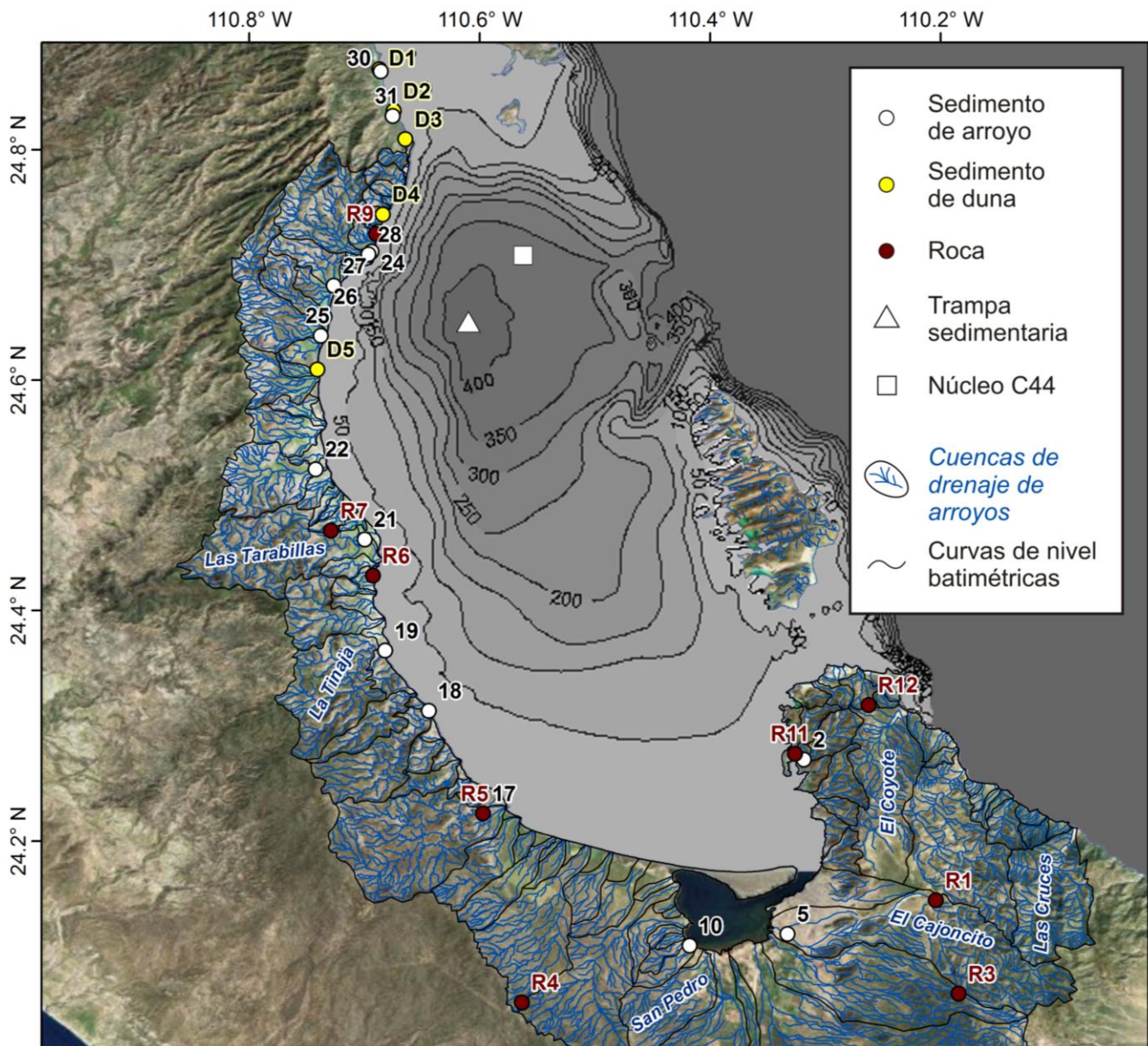


Figura 7. Localización de las estaciones de muestreo.

El material principal de la investigación son 64 muestras de MPH colectadas desde el 2 de diciembre de 2005 (muestra XII-2) hasta el 28 de mayo de 2008 (muestra XVIII-12) por una trampa de sedimentos Technicap PPS 3/3 con una apertura de 0.125 m², instalada en la Cuenca Alfonso (Figura 7). Esta herramienta cuenta con un carrusel de 12 botellas, las cuales se han configurado a una resolución que ha variado de 7 a 15 días por frasco. El posicionamiento y la recuperación de la trampa se realizan en cruceros oceanográficos a la Bahía de La Paz, como se muestra en la Figura 8. En su mayoría las campañas oceanográficas fueron efectuadas a bordo del B/O “Francisco de Ulloa”, sin embargo algunas veces fueron a bordo de los buques oceanográficos “BIP-II”, “BIP-XII” y “Puerto Chale V”. Se cuenta con un registro continuo de material sedimentario colectado desde enero de 2002 hasta septiembre de 2011. Detalles adicionales de la metodología de instalación y procesamiento preliminar de las muestras son presentadas en varias

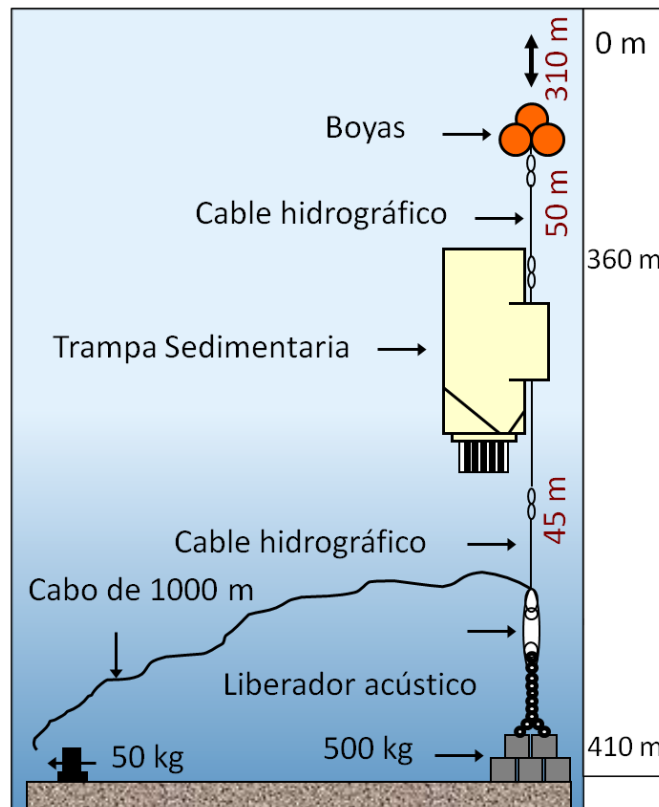


Figura 8. Esquema de anclaje de la trampa sedimentaria en la Cuenca Alfonso.

publicaciones del grupo de trabajo de Silverberg (Aguirre Bahena, 2007; Silverberg et al., 2006, 2007, 2008). Los datos de geoquímica de la MPH, colectada con la misma trampa sedimentaria desde 18 de enero de 2002 (muestra I-1) hasta 29 de noviembre de 2005 (muestra XI-12), fueron presentados por Rodríguez Castañeda (2008) y serán utilizadas para algunas interpretaciones del presente estudio.

Se cuenta con 34 submuestras de un núcleo de sedimentos, colectado mediante un nucleador de caja Reinek en la Cuenca Alfonso en agosto de 2008 (Figura 7) a bordo del buque oceanográfico “El Puma”. Para este estudio fue proporcionada la parte superior de este núcleo, correspondiente a los primeros 110 mm desde la superficie, de un largo total de 398 mm. El núcleo es resguardado en la Nucleoteca II del Programa Universitario de Perforaciones en Océanos y Continentes del Instituto de Geofísica y Paleomagnetismo

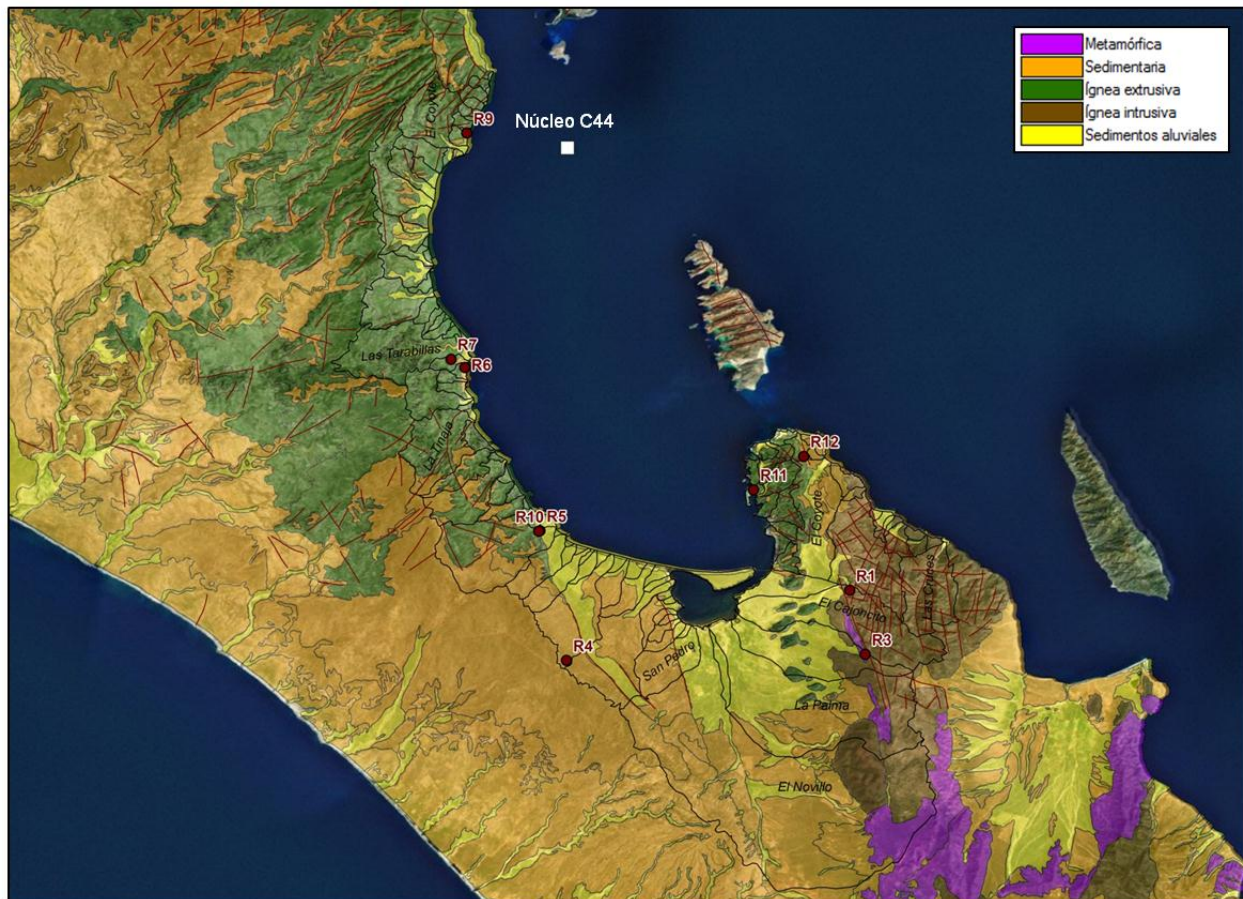


Figura 9. Posición de las muestras de roca analizadas y la geología de los alrededores de la Bahía de La Paz.

(UNAM), codificado como C44. El estudio de este núcleo permitió establecer variaciones en el ambiente y fuentes de aporte a una escala mayor que la registrada por la trampa sedimentaria. Las características macroscópicas de este núcleo fueron descritas anteriormente en Álvarez Gómez (2010).

Para poder identificar las fuentes de aporte de sedimentos y correlacionarlas con la materia particulada hundimiento y de la capa de sedimentos superficiales se realizó un muestreo en la cuenca de drenaje de los arroyos que son las corrientes efímeras que desembocan a la Bahía de La Paz. Se colectaron 15 muestras de sedimentos de arroyo y 5 de dunas, así como 10 muestras representativas de las principales formaciones geológicas o de algunos estratos en particular en enero de 2011 (Figuras 9 y 10).



Figura 10. Posición de las muestras de sedimento de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz.

6.2. Procesamiento preliminar de las muestras

El procedimiento para el tratamiento de las muestras antes de ser enviadas a los diversos laboratorios para su análisis se describe a continuación. Los sedimentos de arroyo y duna fueron secados a temperatura ambiente y posteriormente se seleccionó una parte representativa de cada una de las muestras mediante cuarteo. De cada submuestra se separó la fracción < 2 mm por medio de un tamiz no metálico, así como se realizó el homogenizado de estas con morteros de ágata. Las muestras de roca, a su vez, se secaron a temperatura ambiente, después de lo cual se trituraron y homogenizaron. Para el núcleo sedimentario se prepararon las submuestras cortando a cada 3 mm paralelamente a las varvas y se procedió a secar en un horno a 60°C y a homogenizar cada submuestra. Para cada una de las muestras de materia particulada en hundimiento primeramente se procede a remover los nadadores mayores a 500 µm, después de lo que se separa en submuestras, una de las cuales es utilizada para análisis químicos del presente estudio y las demás son proporcionadas a otros colaboradores del grupo de trabajo. Al obtener las submuestras se centrifugan, se secan y por último se homogenizan.

6.3. Análisis de las muestras

Para determinar el contenido de elementos en las muestras de roca, sedimentos marinos y de materia en hundimiento se usaron diferentes métodos de análisis: a) análisis de activación neutrónica instrumental (INAA); b) espectroscopia de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES); c) espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS). La necesidad de usar el conjunto de diferentes métodos es causada por la distinta efectividad para medir diferentes elementos. El INAA es el método principal de este trabajo porque permite determinar el As, Ba, Br, Ca, Co, Cr, Cs, Fe, Rb, Sc, Sb, Se, Sr, U, Zr y ocho elementos del grupo de las tierras raras (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb y Lu). El ICP-OES es útil para cuantificar el contenido de Al, Mn y Zn. El método de ICP-MS es una técnica adecuada para la determinación de elementos Cd, Cu, Ni, Pb y V. Mientras que para el INAA se usan muestras secas, los otros dos métodos requieren digestión completa de la matriz sedimentaria por medio de mezcla de ácidos fuertes. La precisión y exactitud de los análisis fue comprobada aplicando estándares

internos de cada aparato y material de referencia certificado de sedimentos estuarinos y marinos NIST-1646a, MESS-3, PACS-2, IAEA-356 y SD-N-1/2.

El núcleo C44 colectado en Cuenca Alfonso fue fechado con el método de ^{210}Pb en el laboratorio Flett Research Ltd. (Canadá) y se obtuvo la tasa de sedimentación. Este método se basa principalmente en el decaimiento del radionúclido primordial ^{238}U hasta llegar por su cadena de desintegración natural al ^{210}Pb . Todo material terrígeno (rocas o sedimentos) contiene ^{210}Pb que es soportado naturalmente por esta cadena de decaimiento, siendo producto de ^{214}Po . Sin embargo en zonas tectónicamente activas, fisuras o fallas en la corteza el ^{222}Rn puede escapar a la atmosfera, decayendo gradualmente a ^{210}Pb no soportado. El fechamiento consiste de la idea de que al ser sepultado el sedimento en el fondo del mar sin acceso a los isotopos padre provenientes de la atmosfera, el ^{214}Po atmosférico, producto de ^{222}Rn se agota después de las desintegraciones de los radioisótopos de una serie de vidas medias cortas y así sucesivamente los isotopos ^{210}Pb hijo. Cuando el valor de ^{210}Pb no soportado disminuye de tal forma que solo quede el ^{210}Pb soportado, se dice que el sistema llegó a un equilibrio. Lo que realmente se mide son las emisiones alfa del ^{210}Po debido a la mayor facilidad de medición (sensibilidad del instrumento). Conociendo la vida media de ^{210}Pb que es 22.3 años, se calcula la tasa de sedimentación, usando el modelo de extrapolación de los valores de la radioactividad específica de ^{210}Pb no soportado.

6.4. Tratamiento de los datos

Para interpretar los datos obtenidos se efectuaron una serie de cálculos.

6.4.1. Flujos de elementos particulados

Los flujos de los elementos particulados fueron calculados mediante la siguiente formula: $\text{flujo}_{[\text{E}]} = [\text{E}]_{\text{MPH}} \times \text{fmt}$, donde $[\text{E}]_{\text{MPH}}$ es el contenido del elemento en la materia particulada en hundimiento y fmt es el flujo de masa total ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

6.4.2. Estimación de fracción litogénica y biogénica de los elementos

La fracción litogénica de los elementos fue calculada mediante: $[EI]_{\text{litogénico}} = [EI]_{\text{corteza}}/[Sc]_{\text{corteza}} \times [Sc]_{\text{muestra}}$ y la fracción biogénica de los elementos fue estimada mediante la diferencia de $[Ca]_{\text{biogénico}} = [Ca]_{\text{total}} - [Ca]_{\text{litogénico}}$, donde $[EI]_{\text{corteza}}$ y $[Sc]_{\text{corteza}}$ son el contenido del elemento y de Sc respectivamente en la corteza continental, mientras que el $[EI]_{\text{muestra}}$ es el contenido del elemento en el material analizado.

6.4.3. Cálculo de factores de enriquecimiento de los elementos

Se calcularon factores de enriquecimiento de los elementos y el elemento normalizador que se utilizó en este estudio fue el Sc, el cual se usará para calcular las razones de elemento/normalizador en las muestras para eliminar el efecto de dilución. Los factores de enriquecimiento se calcularon mediante la fórmula $FE = ([EI]/[Sc])_{\text{muestra}} / ([EI]/[Sc])_{\text{corteza}}$, donde $[EI]_{\text{muestra}}$ es el contenido del elemento y $[Sc]_{\text{muestra}}$ del Sc en el material bajo estudio, mientras que $[EI]_{\text{corteza}}$ es el contenido del elemento en la corteza continental y $[Sc]_{\text{corteza}}$ es el contenido de Sc en la corteza continental (Chester, 2003; Taylor, 1964; Wedepohl, 1995).

6.4.4. Utilización de los lantánidos

El uso de los elementos que pertenecen a la serie de los lantánidos es útil para distinguir el origen del material terrígeno. Cada uno de estos elementos tiene un comportamiento químicamente similar, sin embargo en algunos casos ocurre una diferenciación de algunos elementos como Eu. Se normaliza con condrita o más útilmente para material sedimentario marino con lutita norteamericana también denominada "North American Shale Composite" (NASC) para poder comparar visualmente algunos enriquecimientos (Taylor y McLennan, 1985). Esto debido a que el contenido de lantánidos por ser tan similar en la corteza y en muchas muestras de material sedimentario, que es controlado por la regla de las abundancias de elementos con número atómico pares y nones en el sistema solar. Se encontró que los elementos pares son más abundantes que los nones desde la creación del universo con el Big Bang, lo cual es expresado mediante

el Principio de Exclusión de Pauli que explica la mayor estabilidad de los núcleos pares contra la menor estabilidad de núcleos nones.

En este trabajo los contenidos fueron normalizados con lutita norteamericana (Taylor y McLennan, 1985) y se utilizaron las razones La/Yb, así como la anomalía de Eu como herramienta.

La razón La/Yb permite distinguir enriquecimientos de lantánidos ligeros y pesados, lo cual se ha considerado útil para trazar el origen de partículas litogénicas (Otosaka et al., 2000, 2004a, 2004b, 2005; Maeda et al., 2007). El enriquecimiento de ligeros, representados por La, es común en rocas graníticas. De lo contrario, un enriquecimiento de lantánidos pesados, en este caso La, es común para la firma del agua de mar.

La anomalía de Eu, normalizado con lutita NASC es, al igual que la razón La/Yb, utilizada para establecer el origen del material terrígeno. En este trabajo fue calculada mediante la siguiente fórmula: $Anomalía\ Eu = 2Eu_{norm}/(Sm_{norm} + Tb_{norm})$. Se utilizó el Tb en lugar del Gd, debido a que es un elemento que analíticamente es detectado con mayor exactitud y precisión en el método de análisis por activación neutrónica instrumental. Anomalías positivas de Eu son comúnmente asociadas al aporte hidrotermal o a material erosionado de rocas con elevado porcentaje de material volcánico.

6.4.5. Tratamiento estadístico

Los datos de composición de los materiales estudiados se trataron estadísticamente. Primeramente se utilizaron métodos de estadística descriptiva, que son media, mínimos y máximos, graficado de histogramas de distribución y desviación estándar. Posteriormente los datos se analizaron con métodos estadísticos multivariados (análisis de componentes principales, análisis de factores, análisis de clúster), los resultados de los cuales se compararon entre sí. Estos métodos (en sus modos Q y R) permitieron establecer las asociaciones de elementos tanto por las series de tiempo, como por elementos. Para dichos análisis multivariados no se aplicó una estandarización previa de los datos. En el caso del análisis de factores el método de extracción fue por componentes principales y se aplicó una rotación Varimax.

6.4.6. Utilización de software

Los software STATISTICA 7 de StatSoft, Surfer 9 de Golden Software, MatLab R2009 de MathWorks, Arcview 3.2 de ESRI, ArcGIS 10 de ESRI, Global Mapper 12 de Global Mapper Software LLC, Watershed Modeling System 7.1 de Aquaveo y Corel Draw X3 de Corel Corporation se usaron para procesar datos y presentarlos de forma grafica.

7. RESULTADOS

El material sedimentario desde que es formado por erosión de rocas de la parte peninsular adyacente a la Bahía de La Paz, es transportado tanto por las cuencas de drenaje de corrientes efímeras (arroyos) de manera puntual por eventos extraordinarios de lluvias, como vía eólica por eventos de fuertes vientos, hacia la bahía. Otra fuente es el material transportado por vientos desde grandes distancias. Al llegar al agua las partículas forman aglomerados junto con el material biogénico formado en la parte superficial de la bahía y autógeno, generado en la columna de agua. Este material particulado por gravedad se sedimenta, hasta llegar al fondo y se preserva como sedimento marino. Con el fin de evaluar dicho camino fue necesario estudiar la composición del material de cada una de las partes del sistema, así como los flujos de elementos, para poder inferir que fuentes controlan la sedimentación de los elementos en la bahía.

Las características del material sedimentario perteneciente a este trabajo y colectado en el transcurso de tal se presentan a continuación.

7.1. Composición del material terrígeno de la cuenca de drenaje

En este rubro se describe la composición del material de rocas, arroyos y dunas, colectadas en las cuencas de drenaje de arroyos que desembocan en la Bahía de La Paz.

7.1.1. Composición de las rocas de la cuenca de drenaje

En el área de estudio afloran rocas de diferente tipo y origen. Las posiciones exactas de las muestras de estratos más representativos de cada una de las formaciones, así como su composición elemental se presentan en la Tabla 1 y la Figura 9.

La composición elemental de las rocas que afloran en los alrededores del área de estudio (Tabla 1 y Figura 9) presenta abundancias diferentes de elementos mayores y trazas. Los diagramas ternarios tanto de mineralogía como de composición elemental son comúnmente utilizados en geología y geoquímica para clasificar rocas o sedimentos, así como denotar algún enriquecimiento (Brumsack, 1989; Rachold y Brumsack, 2001; Böning et al., 2004). La utilidad yace en que se usan las proporciones entre cada uno de los componentes, para así disminuir el efecto de valores extremos y sucesivamente poder

Tabla 1. Contenidos de elementos en las rocas de la cuenca de drenaje.

Clave muestra	Roca Unidad	Contenido									
		As (mg kg ⁻¹)	Ba (mg kg ⁻¹)	Ca (%)	Co (mg kg ⁻¹)	Cr (mg kg ⁻¹)	Cs (mg kg ⁻¹)	Fe (%)	P (%)	Sc (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹)
R1	Granito (Granito Sierra de Las Cruces)	0.6	1410	1.58	2.7	8.4	1.1	0.99	0.022	3.0	0.6
R3	Esquisto-Gneiss	0.1	507	4.85	24.8	30.9	1.2	4.79	0.065	18.0	0.6
R4	Arenisca (Fm. Lomas de la Virgen)	45.9	656	4.76	7.1	47.9	14	1.99	1.070	5.0	7
R5	Arenisca gravosa (Fm. Comondú)	3.6	416	4.63	17.4	9.6	5.6	4.66	0.067	17.0	1.4
R6	Fangolita (Fm. El Cien)	5.1	159	4.19	1.7	49.9	3.7	0.98	0.159	4.0	1.9
R7	Fosforita (Fm. El Cien)	8.9	353	24.8	2.2	264	1.5	1.28	7.260	8.0	87
R9	Arenisca verde (Fm. El Cien)	6	655	2.36	8.5	25.5	2.4	2.51	0.159	9.0	1.9
R10	Toba rosa (Fm. Comondú)	10.9	429	2.1	3.6	7.8	20	1.52	0.053	10.0	1.9
R11	Brecha volcánica (Fm. Comondú)	3.9	441	5.56	23.2	20.2	3.1	4.81	0.079	19.0	1.3
R12	Arenisca eólica (Fm. El Salto)	13.4	872	2.38	1.3	23	5.95	0.76	0.399	4.0	3.2
	Promedio de corteza superior (Wedepohl, 1995)	2.0	668	2.90	11.6	35.0	5.8	3.09	0.067	7.0	2.5

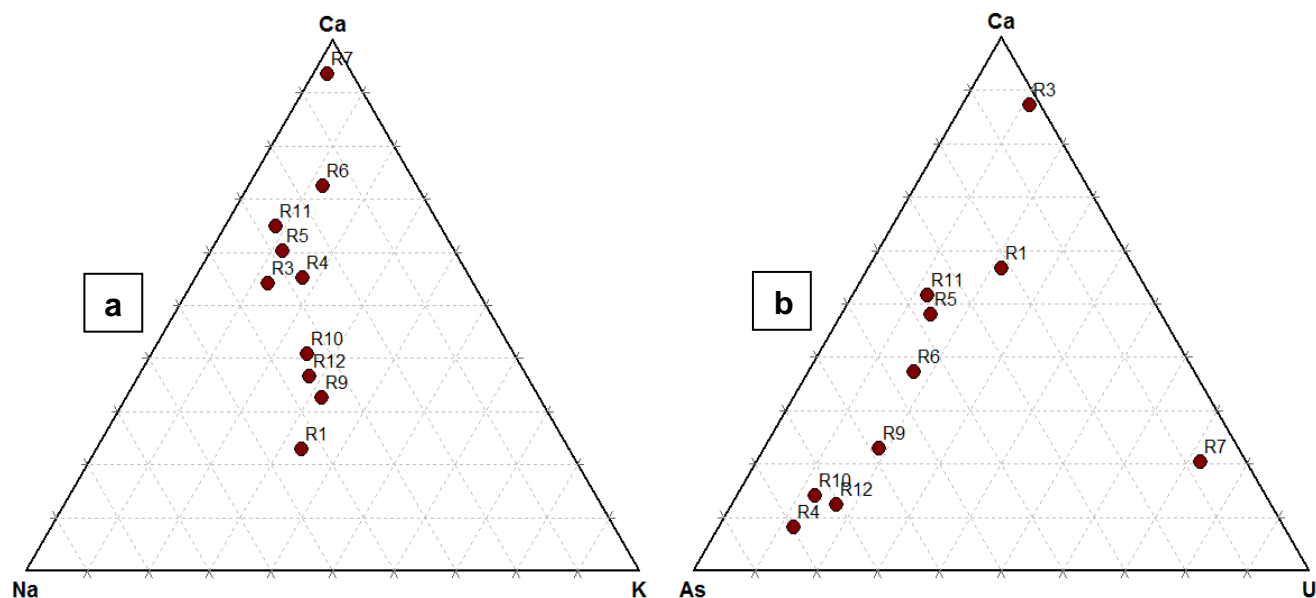


Figura 11. Diagramas ternarios de los componentes: a) Ca, Na y K; b) Ca, As y U en rocas de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz.

graficarlos de manera visual. Esto debido a que para denotar ciertos procesos, por ejemplo alguna diferenciación magmática o erosión diferencial, es más importante conocer las razones de elementos. El diagrama ternario de Ca, Na y K fue usado para clasificar las rocas y ubicar cada una el contexto de estos 3 componentes y se presenta en la Figura 11a. Se observa un fuerte enriquecimiento de Ca en las rocas marinas de la Formación El Cien (Muestras R6 y R7), especialmente en la muestra de fosforita (R7), colectada en el interior de la mina El Monje. Este enriquecimiento disminuye en las rocas extrusivas de la Formación Comondú y presenta los menores valores en la roca granítica (Muestra R1). La proporción entre Na y K en casi todas las rocas es muy similar, con una ligera tendencia hacia el Na. La similitud de componentes mayores puede indicar que casi todas las rocas tuvieron presentes componentes del basamento granítico. El diagrama ternario de Ca, As y U, que se presenta a su vez en la Figura 11b, fue utilizado en este trabajo para definir enriquecimientos de estos elementos de mayor interés. Se puede denotar que la fosforita de la Formación El Cien (Muestra R7) presenta una tendencia hacia elevados valores de U, a diferencia de un agrupamiento de rocas de las formaciones Lomas de La Virgen

(Muestra R4), Comondú (Muestra R10) y El Salto (Muestra R12) que tienen un enriquecimiento en As notable. La única roca con un valor elevado de Ca en este diagrama fue la roca metamórfica (Muestra R3) que originalmente era una secuencia sedimentaria que fue alterada por la intrusión del Granito Sierra Las Cruces.

7.1.1.1. Elementos mayores

Calcio

El contenido de Ca en muestras de las principales formaciones geológicas de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz se muestra en la Tabla 1 y Figura 12. A grandes rasgos se observa que en las rocas los contenidos de calcio son muy similares a diferencia del valor extremo correspondiente a la fosforita de la Formación El Cien (24.7 %). Esto es lógico debido a que contiene gran cantidad de granos fosfáticos, que son minerales ricos en Ca y P.

Fosforo

El contenido de P en rocas de la cuenca de drenaje de la bahía se presenta en la Tabla 1 y Figura 13. Los mayores valores de fosforo en las rocas fueron encontrados en la capa de fosforita (7.260 %) de la Formación El Cien y era de esperarse que se encontraran valores elevados en la fangolita (0.159 %), roca más dominante de la misma formación, sin embargo no fue así. Valores elevados fueron encontrados en las areniscas de origen terrestre fluvial de la Formación Lomas de la Virgen (1.070 %). Esto es debido a que, como fue mencionado arriba, se encontraron abundantes granos fosfáticos que fueron originados por retrabajamiento de rocas marinas antiguas. El menor contenido de fosforo fue encontrado en las rocas del granito Sierra de Las Cruces (0.022 %).

7.1.1.2. Elementos traza

Arsénico

El contenido de As en muestras de las principales formaciones geológicas se presenta en la Tabla 1 y Figura 14. De las rocas de la cuenca de drenaje las que tienen mayor contenido de arsénico son las que pertenecen a la Formación Lomas de la Virgen (45.9

mg kg⁻¹), aunque era de esperarse que la fosforita de la Formación El Cien tuviera el valor máximo, lo cual no ocurrió. Los menores valores corresponden a las rocas del complejo metamórfico adyacente (0.1 mg kg⁻¹) al Granito Sierra de Las Cruces y a dichos granitos (0.6 mg kg⁻¹). En las rocas terrestres fluviales de la Formación Lomas de la Virgen el arsénico puede ser elevado debido a que contiene abundante material fosfático, originado por erosión de rocas marinas que afloran o afloraban hacia la costa oeste de la Península de Baja California, adyacente al Océano Pacífico.

Escandio

El contenido de Sc en rocas de la cuenca de drenaje se presenta en la Tabla 1 y Figura 15. Se observa que las rocas tienen diferente contenido de Sc. Los mayores valores fueron encontrados en las brechas volcánicas de la Formación Comondú (19 mg kg⁻¹) en contraste con los menores que correspondieron a las rocas del basamento granítico-tonalítico del Complejo Cristalino de La Paz, parte de Sierra de Las Cruces (3 mg kg⁻¹).

Uranio

El contenido de U en rocas de la cuenca hidrológica se presenta en la Tabla 1 y Figura 16. En las rocas el contenido de uranio es relativamente bajo a excepción de un fuerte enriquecimiento en la fosforita de la Formación El Cien (87.0 mg kg⁻¹) y ligeramente elevados valores presentes en la Formación Lomas de la Virgen (7.0 mg kg⁻¹). Los enriquecimientos de uranio son asociados a la presencia de abundantes granos fosfáticos en estas rocas, especialmente en la fosforita y al origen de estas rocas asociadas con alta productividad y zonas de surgencia durante su formación en condiciones marinas del pasado geológico.

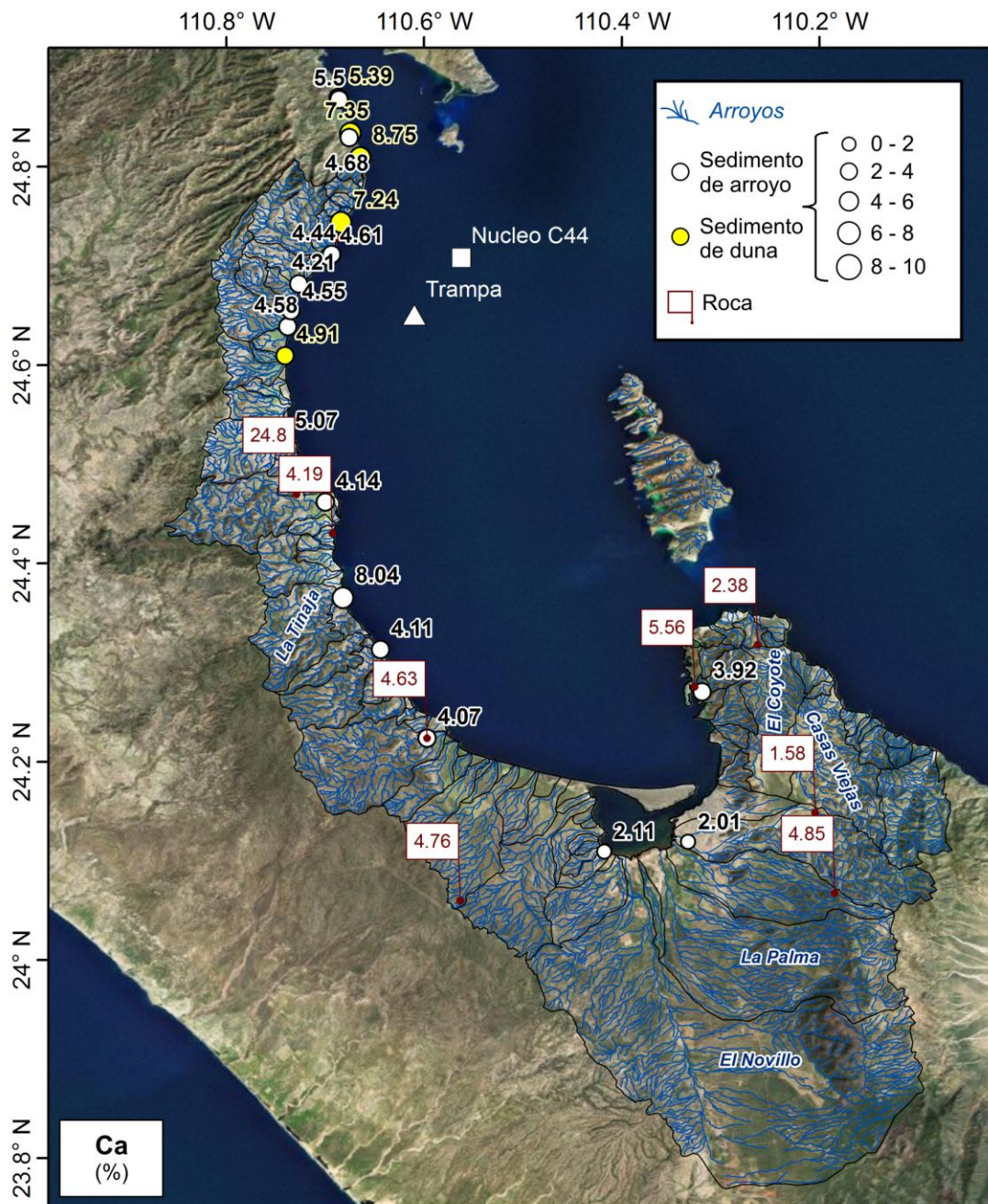


Figura 12. Contenido de calcio (%) en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz.

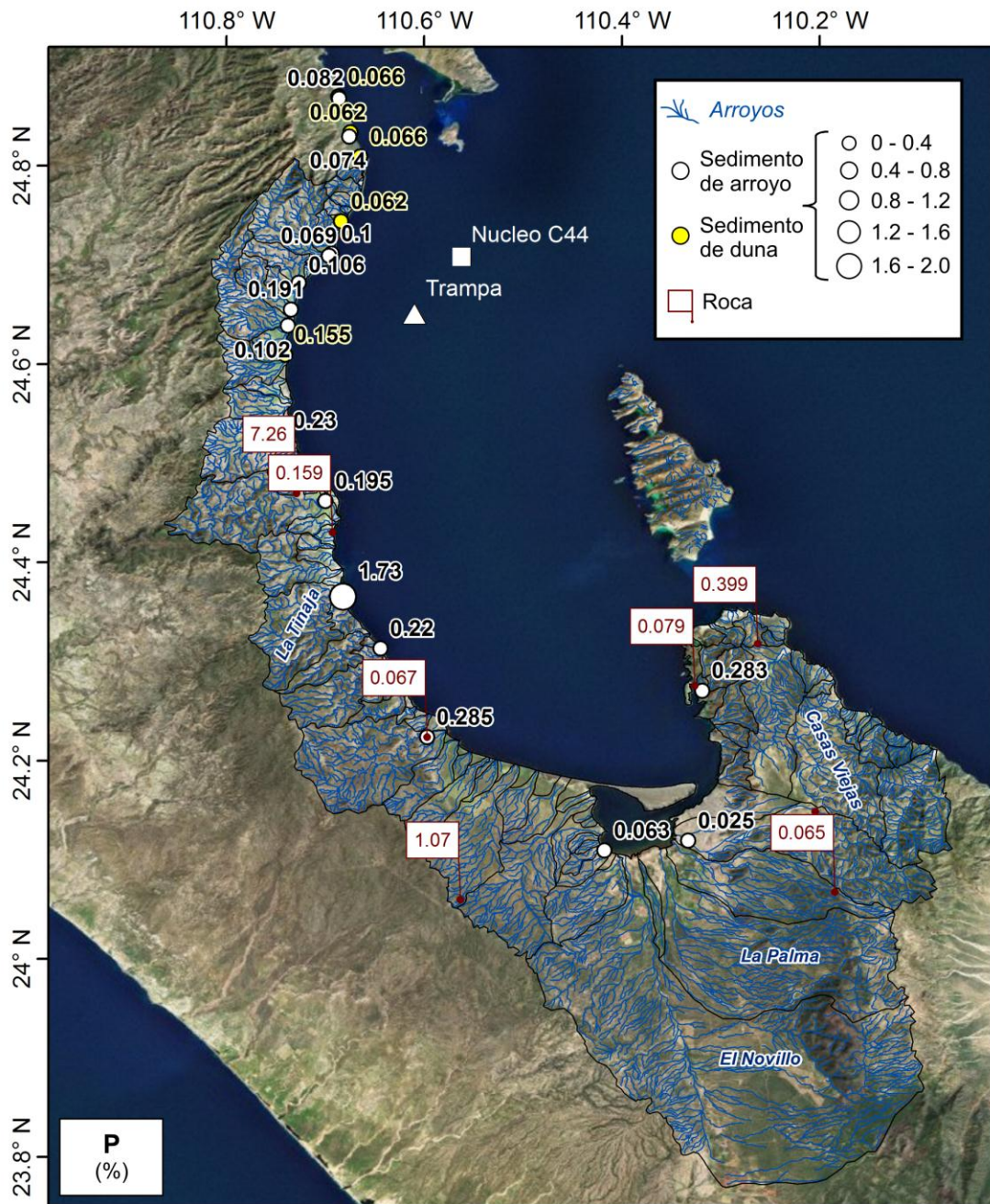


Figura 13. Contenido de fósforo (%) en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz.

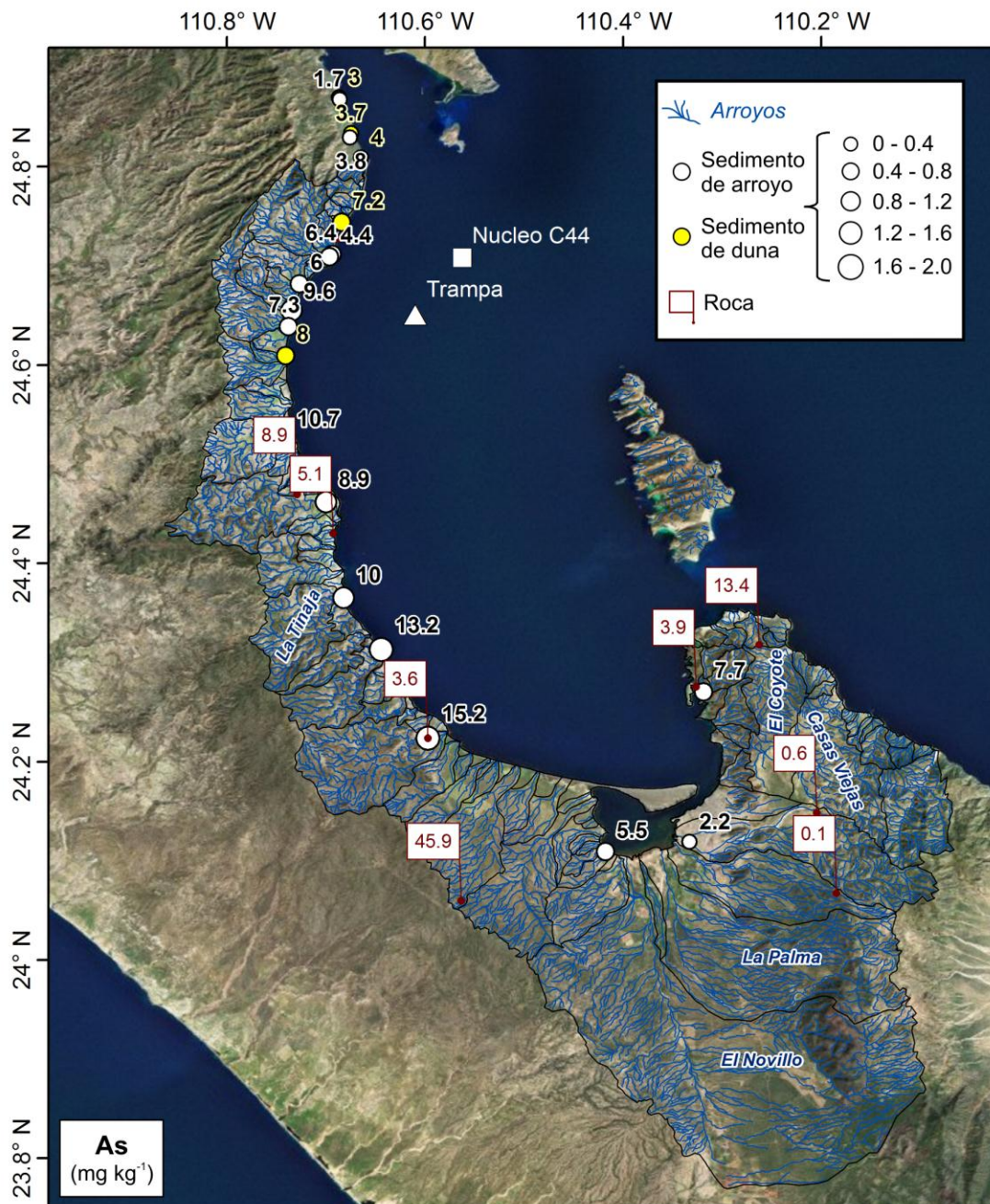


Figura 14. Contenido de arsénico (mg kg^{-1}) en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz.

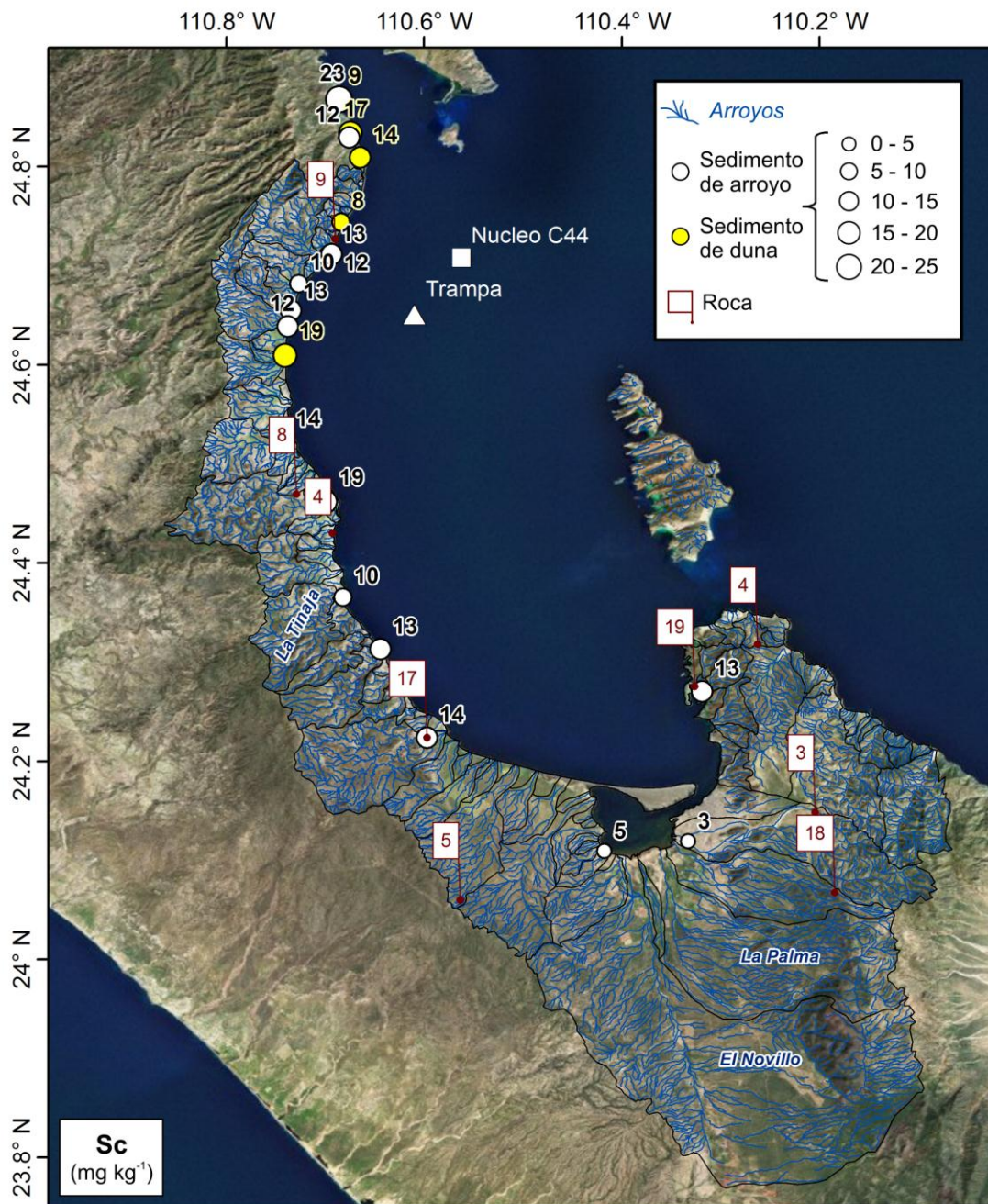


Figura 15. Contenido de escandio (mg kg^{-1}) en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz.

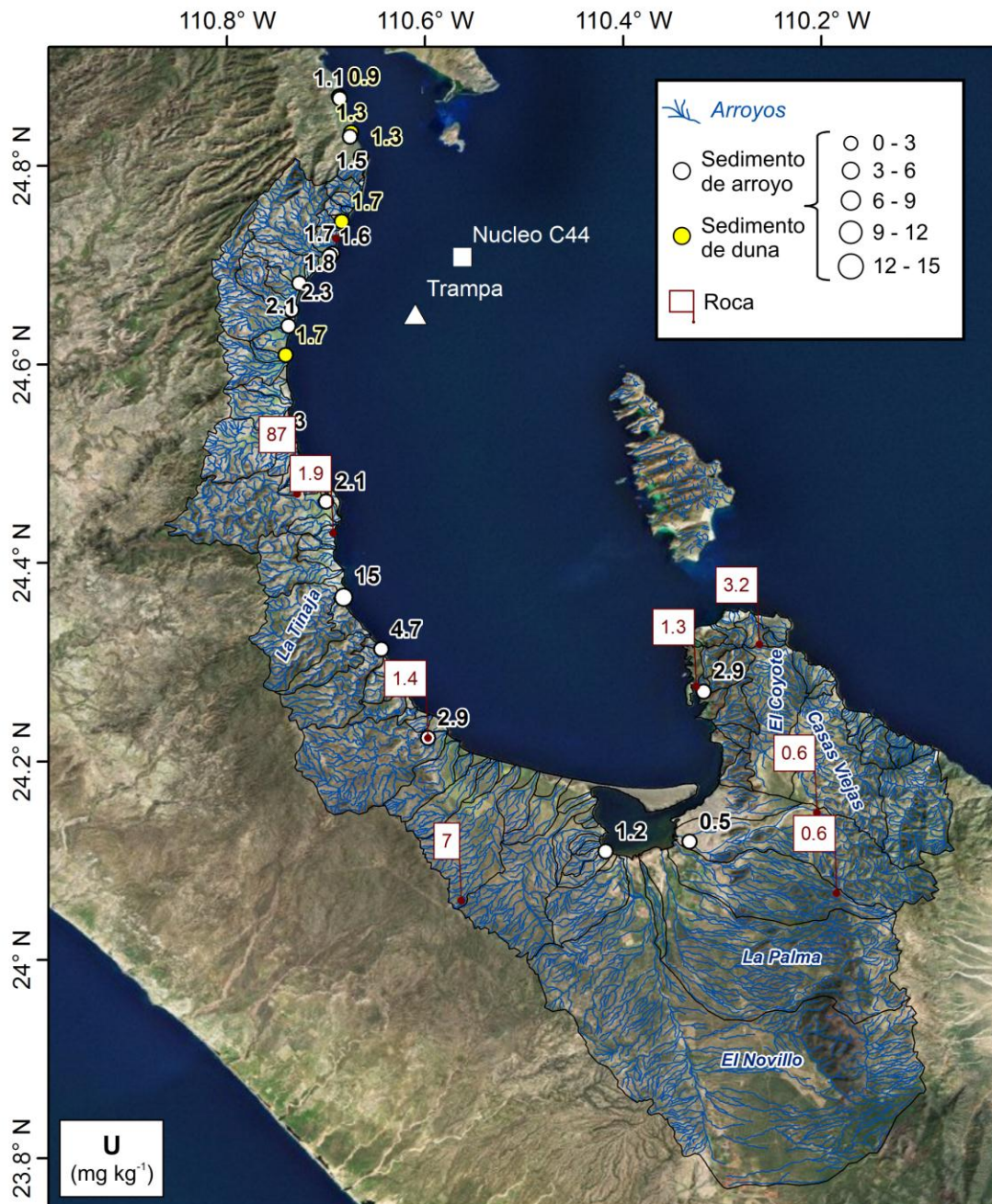


Figura 16. Contenido de uranio ($mg\ kg^{-1}$) en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz.

7.1.2. Composición de los sedimentos terrígenos de la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz

Los valores mínimos, máximos, media y desviación estándar de los tipos de sedimento colectado en la parte terrestre adyacente a la bahía se presentan en la Tabla 2. La base de datos completa de composición de sedimentos terrígenos se presenta en el Anexo 1.

A grandes rasgos se puede observar que los sedimentos de arroyo en promedio muestran mayores valores de As, Ba, Cs, P y U que en las dunas. Los menores valores fueron para Ca y Cr en comparación a los sedimentos de dunas, así como valores muy similares para Co, Fe y Sc en ambos tipos de material sedimentario. Esto se debe a que cada uno de los diferentes arroyos es alimentado de fragmentos de rocas y minerales de las formaciones de roca que afloran a lo largo de su cuenca de drenaje. Es por eso que la composición química de los arroyos del área de estudio difiere, especialmente cuando se componen de una mezcla de rocas volcanosedimentarias de la Formación Comondú, rocas terrestres como Formación Lomas de la Virgen y Formación El Salto, así como rocas del basamento granítico-tonalítico y rocas metamórficas, a diferencia de las dunas que fueron colectadas en la parte noreste únicamente, donde se encuentran bajo la influencia de la composición de las playas cercanas a estas, compuestas de productos de erosión de la Formación Comondú, así como de material eólico transportado durante eventos de fuertes vientos.

7.1.2.1. Elementos mayores

Calcio

Los valores de Ca en los arroyos y dunas (Figura 12 y Tabla 2) son muy similares para toda la zona. Los mayores valores de calcio en sedimentos aluviales (8.04 %) corresponden al arroyo La Tinaja. Al igual que con el escandio en la parte sur de la bahía, cerca de la laguna de La Paz, el arroyo Cajoncito presenta el menor contenido de Ca (2.01 %).

Tabla 2. Contenidos de elementos en las muestras de sedimento de arroyo y duna, colectados en la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz.

Tipo	Numero de muestras	Contenido min-max $\bar{x} \pm \sigma$									
		As (mg kg ⁻¹)	Ba (mg kg ⁻¹)	Ca (%)	Co (mg kg ⁻¹)	Cr (mg kg ⁻¹)	Cs (mg kg ⁻¹)	Fe (%)	P (%)	Sc (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹)
Arroyo	15	$\frac{1.7-15.2}{7.5 \pm 3.8}$	$\frac{634-1130}{834 \pm 145}$	$\frac{2.01-8.04}{4.40 \pm 1.38}$	$\frac{3.0-22.9}{11.4 \pm 5.5}$	$\frac{8.9-76.0}{36.2 \pm 16.5}$	$\frac{1.2-6.6}{3.5 \pm 1.7}$	$\frac{0.95-7.22}{3.30 \pm 1.54}$	$\frac{0.025-1.730}{0.250 \pm 0.418}$	$\frac{3.0-23.0}{12.4 \pm 4.8}$	$\frac{0.5-15.0}{3.0 \pm 3.5}$
Duna	5	$\frac{3.0-8.0}{5.2 \pm 2.3}$	$\frac{573-803}{681 \pm 87}$	$\frac{4.91-8.75}{6.73 \pm 1.57}$	$\frac{6.0-14.5}{11.5 \pm 3.3}$	$\frac{15.0-53.5}{43.1 \pm 15.8}$	$\frac{1.0-2.3}{1.6 \pm 0.6}$	$\frac{2.20-4.17}{3.34 \pm 0.75}$	$\frac{0.062-0.155}{0.082 \pm 0.041}$	$\frac{8.0-19.0}{13.4 \pm 4.8}$	$\frac{0.9-1.7}{1.4 \pm 0.3}$
Presas de jales antigua	1	8.4	323	13.50	3.5	559.0	4.2	1.33	3.880	10.0	39.0
Sedimento húmedo en arroyo con agua residual	1	11.2	837	8.00	12.1	58.5	6.7	2.69	1.410	11.0	15.0

7.1.2.2. Elementos traza

Arsénico

En los sedimentos aluviales y dunas (Figura 13 y Tabla 2) los valores de As son relativamente altos en la costa occidental de la bahía, especialmente cerca de las rocas marinas de la Formación El Cien. El mayor valor de As en sedimentos (15.2 mg kg^{-1}) se presentó en el arroyo El Sauzoso, cercano al Cañón de Los Reyes.

Escandio

Los valores de escandio (Figura 14 y Tabla 2) tanto en arroyos como en dunas son similares, lo cual era de esperarse ya que este elemento es un indicador de aporte terrígeno por ser común en minerales de diversas rocas de la corteza. El mayor valor en sedimentos aluviales (19 mg kg^{-1}) corresponde al arroyo Las Tarabillas y valores del mismo orden de magnitud son encontrados en toda la costa oeste de la bahía. Los menores valores de este elemento (3 mg kg^{-1}) fueron encontrados en la parte sur de la bahía, especialmente en el arroyo El Cajoncito.

Fosforo

En cuanto al contenido de fosforo en los sedimentos de arroyo y duna (Figura 15 y Tabla 2) el mayor valor (1.73 %) se encontró en la cuenca del arroyo La Tinaja. Los demás valores son mucho menores, destacando el mínimo (0.025 %) nuevamente en el arroyo El Cajoncito.

Uranio

En los sedimentos de arroyo y duna (Figura 16 y Tabla 2), el mayor valor de uranio (15.0 mg kg^{-1}) corresponde al arroyo La Tinaja. Por otro lado, el menor contenido fue encontrado en el arroyo El Cajoncito. Otra de las fuentes de aporte que podría influenciar es la descarga de aguas residuales de la empresa ROFOMEX, la presa de jales antigua de la cual contiene elevados valores de U (39.0 mg kg^{-1}). Esto debido a que en el proceso

de obtención de fosforita se retrabajan las rocas marinas mencionadas arriba, enriquecidas con este elemento.

7.1.3. Relación entre tipo de rocas y material de arroyo y duna

7.1.3.1. Indicadores de aporte terrígeno (Sc, Fe)

A pesar de que en las rocas los valores de Sc y Fe fueron diferentes, lo cual cuestionaría el hecho de utilizar el Sc como indicador de aporte terrígeno para la zona, sin embargo en los sedimentos de arroyo y dunas el contenido fue bastante homogéneo. Esto podría ser ocasionado por erosión diferencial de las rocas y disolución o alteración de minerales en el medio acuoso. Los mayores valores de escandio en sedimentos de la costa oeste de la bahía son ocasionados por la distribución de rocas extrusivas ácidas de la Formación Comondú, especialmente la brecha volcánica y la arenisca gravosa. Por otro lado, los sedimentos aluviales cercanos a rocas graníticas, bajas en Sc, presentan a su vez un empobrecimiento en este elemento.

El hierro presentó un comportamiento similar al escandio, lo cual es común, por lo que en ocasiones es utilizado como indicador de aporte terrígeno. Sin embargo en la zona no es recomendable, ya que en el ambiente marino puede ser consumido por organismos, siendo este un micronutriente o puede participar en procesos de oxidación y reducción, cambiando su movilidad geoquímica.

7.1.3.2. Rocas marinas como fuente de aporte (As, U, Ca, P)

En las rocas marinas como Formación El Cien, así como en rocas fluviales con material detrítico de rocas marinas antiguas (Formación Lomas de la Virgen), el contenido de fosforo fue el máximo para la zona. Por otro lado, dichas rocas también son enriquecidas en arsénico y uranio, así como calcio (en el caso de la fosforita, llegando a 24.8 %). Estas rocas hacen que los mayores valores de Ca, P, U, así como elevados valores de As sean encontradas en el arroyo La Tinaja. Por otro lado, el efecto de las rocas de la Formación Lomas de la Virgen, con el valor máximo de As y elevado U y P, en el contenido de estos elementos es encontrado en el arroyo El Sauzoso.

Por lo tanto las rocas de la Formación El Cien, específicamente las fosforitas y areniscas fosfáticas, así como las de la Formación Lomas de la Virgen en la costa oeste y suroeste de la bahía aportan As, P, U y a veces Ca a los sedimentos aluviales adyacentes.

Las rocas marinas con elevados valores de P fueron formadas en zonas de surgencia con alta productividad biológica. El enriquecimiento de fósforo ocurrió durante la formación de ooides fosfáticos, por la depositación de restos de huesos de organismos o finalmente por procesos biogénicos, o sea reemplazamiento de carbonatos por fosfatos (Baturin, 2004). Comúnmente el P se encuentra en minerales del grupo de la apatita $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH})$. Sin embargo se encontró que este elemento es asociado a su vez con As, Mo, U y otros elementos redox-sensibles (Brumsack, 2006; Böning et al., 2004, 2009). Esto debido a que la depositación de estos elementos ocurre en ambientes muy similares a la formación granos fosfáticos, como ocurrió para las rocas de la Formación El Cien durante el Mioceno Tardío (Piper, 1991, 1994).

Las rocas y los sedimentos con elevados valores de P presentaron a su vez enriquecimientos de As, Ca y U. Elevados valores de arsénico en rocas marinas, al igual que en el caso del uranio, son asociados al ambiente de formación de granos fosfáticos en zonas de surgencia y elevada productividad primaria. Debido a que el As es redox-sensible, puede ser en condiciones subóxicas o anóxicas adsorbido a óxidos metálicos y otras partículas, enriqueciéndose en los sedimentos (Brumsack, 1989; Piper, 1991, 1994; Böning et al., 2004, 2009; McManus et al., 2006). En el caso del U, este puede pasar de su forma comúnmente disuelta (+6) en el agua de mar oxigenada a su forma menos soluble (+4) en condiciones subóxicas o anóxicas, la cual tiende a formar partículas y acumularse en sedimentos (Ku et al., 197; Klinkhammer y Palmer, 1991; McManus et al., 2006). La asociación con Ca se da por la composición de los minerales del grupo de la apatita, mencionado arriba.

7.1.3.3. Influencia del tipo de roca en la composición de los sedimentos

Las rocas de la Formación Comondú se componen de una gran variedad de litologías y por lo tanto un patrón claro es difícil de establecer sin un muestreo extenso de rocas. Sin embargo en los arroyos en los que predominaron estas rocas

volcanosedimentarias para muchos elementos la composición se encontró en el mismo orden de magnitud. Por otro lado, las rocas ácidas graníticas, que presentan los menores valores de As, Ca, P, Sc y U, a su vez ocasionan que el arroyo Cajoncito tenga los menores valores de estos elementos. Otras rocas que tienen una influencia, son las de origen marino de la Formación El Cien que afectan directamente los arroyos La Tinaja y otros cercanos. Esta roca aporta As, P y U a los sedimentos aluviales y dunas.

7.1.4. Fuentes potenciales de aporte a la bahía

La parte oeste y suroeste de la bahía podría aportar mayor cantidad de As, Ca, P y U tanto vía fluvial durante eventos de esporádicas lluvias ocasionadas en muchos casos por el paso de ciclones tropicales, como vía eólica por deflación en lechos de arroyos, suelos y dunas. No se puede excluir por el tipo de clima, el proceso de abrasión, mediante el cual por partículas ya llevadas por el viento la roca es erosionada directamente. Por otro lado la parte sureste vendría empobrecida en su aporte fluvial a la bahía en Ca, P, U y a veces As. Sin embargo estos elementos podrían ser traídos vía eólica o por flujo de agua subterránea del acuífero de La Paz.

Otra fuente que no puede ser excluida es la antropogénica, ya que el arroyo La Tinaja actualmente cuenta con descargas de aguas residuales de la empresa ROFOMEX. Sin embargo por el momento es difícil separar el aporte natural del antropogénico en este arroyo.

7.2. Composición de la materia particulada en hundimiento

La composición de la materia particulada en hundimiento (MPH) de Cuenca Alfonso que corresponde a la serie de tiempo del 2 de diciembre de 2005 (muestra XII-2) hasta el 28 de mayo de 2008 (muestra XVIII-12) se presenta en los Anexos 2, 3 y 4. Los valores mínimos, máximos, media y desviación estándar de los contenidos de elementos en la MPH se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Información generalizada sobre los contenidos de elementos en las muestras de la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso.

	Contenido de elemento								
	As (mg kg ⁻¹)	Ba (mg kg ⁻¹)	Ca (%)	Co (mg kg ⁻¹)	Cr (mg kg ⁻¹)	Cs (mg kg ⁻¹)	Fe (%)	Sc (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹)
Mínimo	0.4	32	0.84	0.6	2.8	0.3	0.44	2.3	0.6
Máximo	25.5	1575	9.91	31.4	50.6	17.9	2.84	10.3	40.3
Media	6.2	322	5.76	10.0	23.0	3.8	1.57	6.2	6.1
Desviación Estándar	4.6	289	2.03	6.48	10.6	3.0	0.62	2.2	6.8

7.2.1. Flujo de masa total

El flujo total de partículas que componen la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso, que es expresado por el flujo de masa total ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$), se muestra en el Anexo 2 y la Figura 17. Este flujo de masa presenta para la serie de tiempo de este estudio una media y desviación estándar de $0.76 \pm 0.71 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, tiene alta variabilidad y no muestra un patrón estacional. Sin embargo fue posible captar una serie de eventos extraordinarios, durante los cuales el flujo de masa total fue elevado con referencia al promedio de toda la serie de tiempo o fue anómalamente pequeño (Figura 17). En la Figura 17 se presentan los eventos de huracanes (base de datos del Centro Nacional de Huracanes de la NOAA) que han pasado cerca del área de estudio y que pudieran haber aportado agua y material sedimentario a la zona, así como algunos florecimientos planctónicos ya reportados anteriormente por otros autores. A grandes rasgos se observa que el mayor valor de flujo total de partículas ($4.54 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) corresponde a finales de diciembre de 2007, concordando con el inicio del invierno. Asimismo, elevados flujos ocurrieron a inicios de diciembre y mediados de enero de 2006, así como a inicios de septiembre de 2007. El menor flujo de masa ($0.062 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) ocurrió a mitad de mayo de 2008.

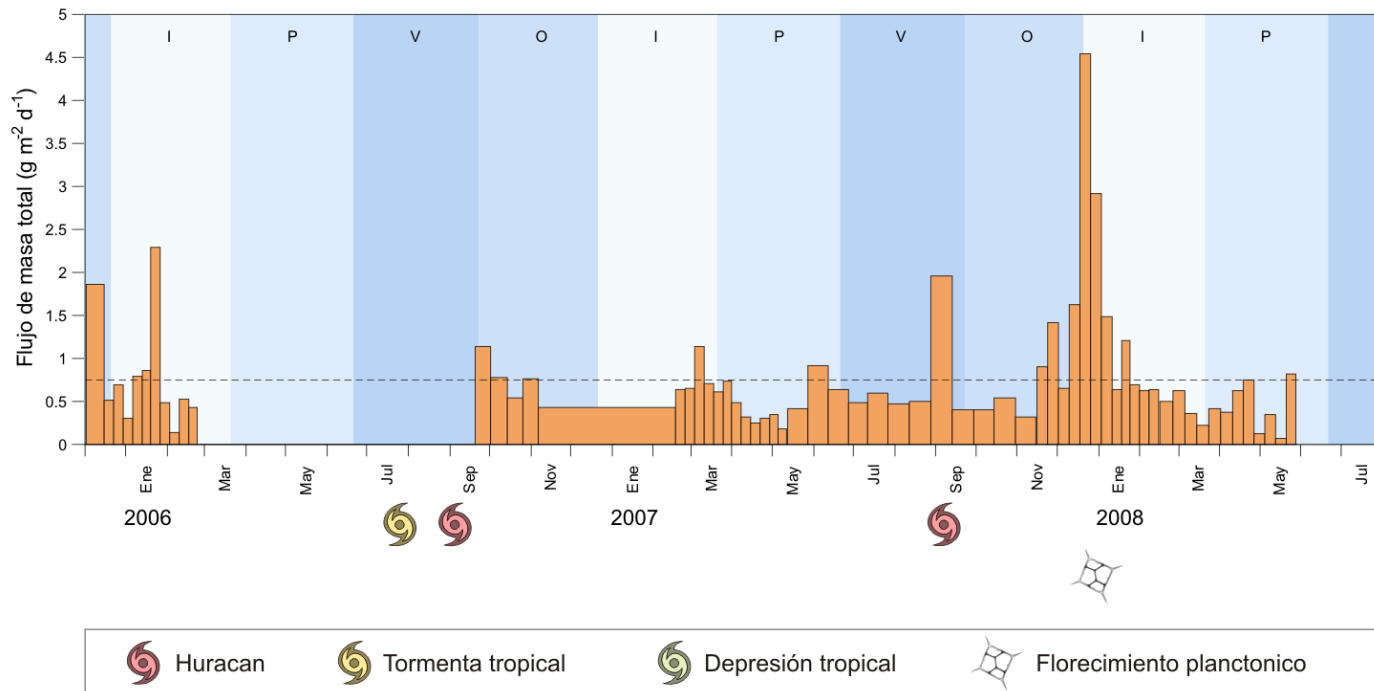


Figura 17. Flujo de masa total de la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso.

7.2.2. Elementos mayores en la MPH de Cuenca Alfonso

Calcio

Las variaciones temporales del contenido de calcio en la MPH de Cuenca Alfonso se presentan en la Figura 18 con la línea horizontal correspondiendo al valor promedio de 5.8 %. El mayor contenido de Ca (9.9 %) pertenece a las partículas colectadas a finales de noviembre de 2007, sin embargo valores muy similares ocurrieron a mediados de marzo y finales de abril de 2007, así como en inicios de febrero y mediados de mayo de 2008.

Probablemente uno de los factores que controle la ocurrencia de este elemento sean los florecimientos planctónicos de organismos calcáreos, así como los aportes del material terrígeno correspondiente a productos de erosión de rocas.

Calcio biogénico

Debido a que el bio-calcio es una depuración de los valores totales de calcio, dejando el estimado aporte de calcio por organismos. Los contenidos de Ca biogénico en la MPH se muestran en la Figura 19, donde el valor promedio (3.2 %) es presentado como línea horizontal. El mayor contenido (7.25 %) corresponde a las fechas de mediados de mayo de 2008. Valores elevados, muy cercanos al máximo, se presentaron a finales de marzo/inicios de abril, inicios de mayo y finales de noviembre de 2007. El menor valor (0.04 %) correspondió a fechas de mediados de abril de 2007.

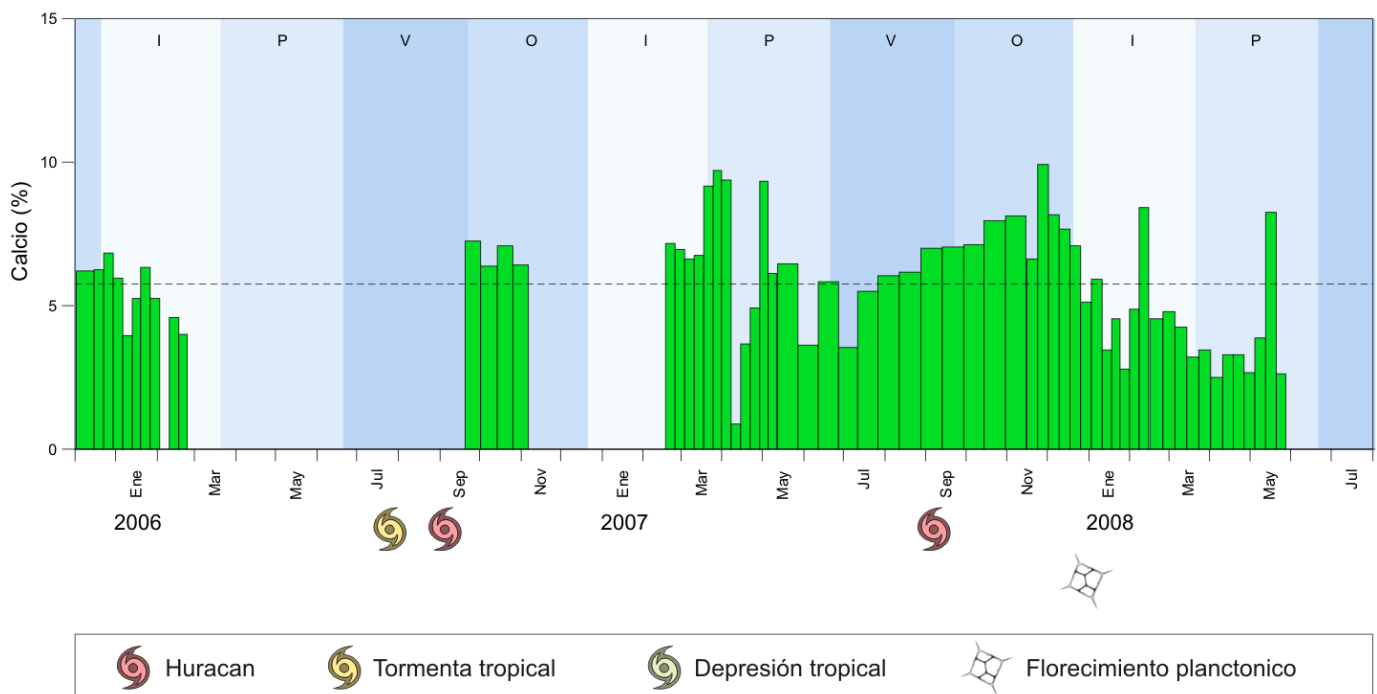


Figura 18. Contenido de Ca en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso.

La variabilidad del contenido del calcio biogénico depende de abundancias de organismos calcáreos, los cuales a su vez responden a varios factores ambientales, uno de los cuales es la temperatura. Las variaciones temporales de Ca biogénico entre 2006 y 2008 casi no coinciden con los cambios en los regímenes de aumento y disminución de la temperatura superficial en la Bahía de La Paz, lo cual ocurre anualmente. Se trató de relacionar con el Índice Oceánico del Niño (ONI), encontrando poca correlación, ya que las

tendencias de cambios de temperaturas globales parecen no afectar a la bahía, por ser un sistema separado con un umbral batimétrico. Al parecer los florecimientos de organismos calcáreos dependen de otros factores más complejos, sin embargo realizar tal correlación es difícil debido a la ausencia de datos de conteos de organismos calcáreos en la materia particulada en hundimiento o en la columna de agua para este periodo.

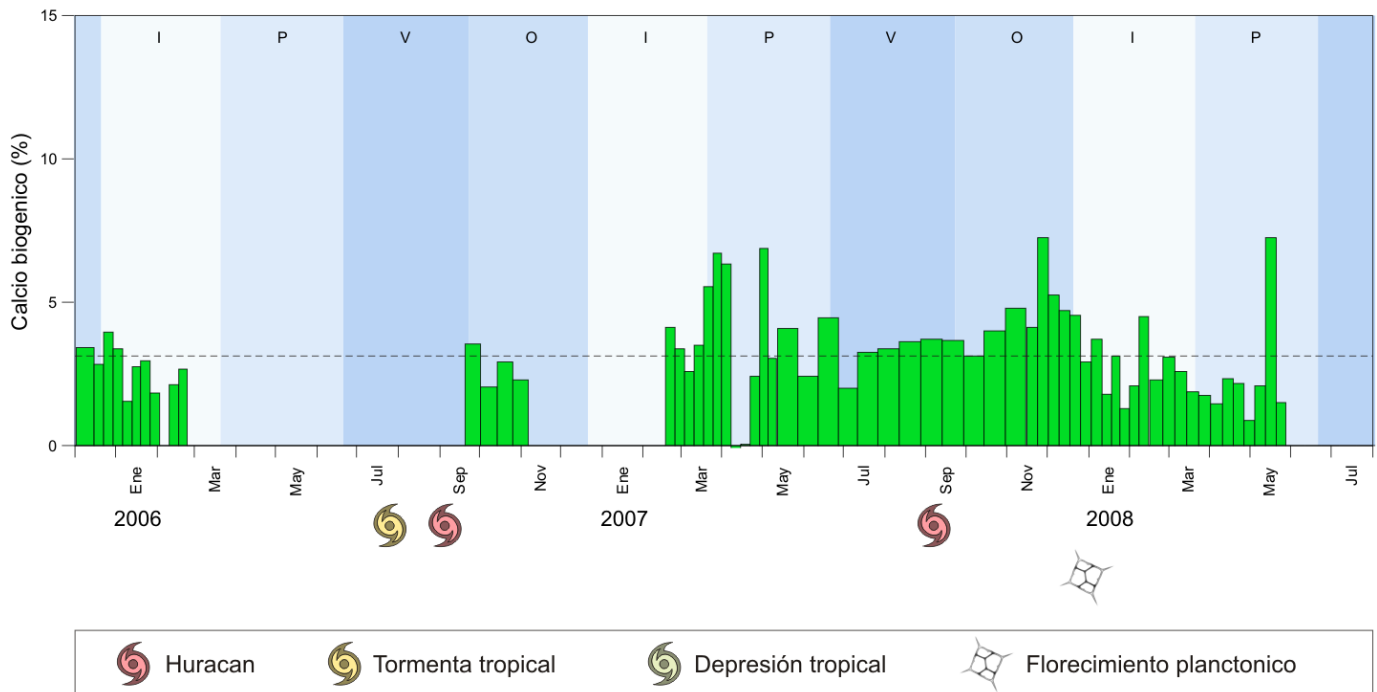


Figura 19. Contenido de Ca_{biog} en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso.

7.2.3. Elementos traza en la MPH de Cuenca Alfonso

Arsénico

La variabilidad en el tiempo del contenido del arsénico en la materia particulada de Cuenca Alfonso se expone en la Figura 20, donde el valor promedio (6.2 mg kg⁻¹) es presentado por una línea horizontal. Los mayores contenidos de As en la MPH (25.5 mg kg⁻¹) corresponden con muestras de mediados de mayo de 2007, donde se encontraron los mayores valores de Ca biogénico.

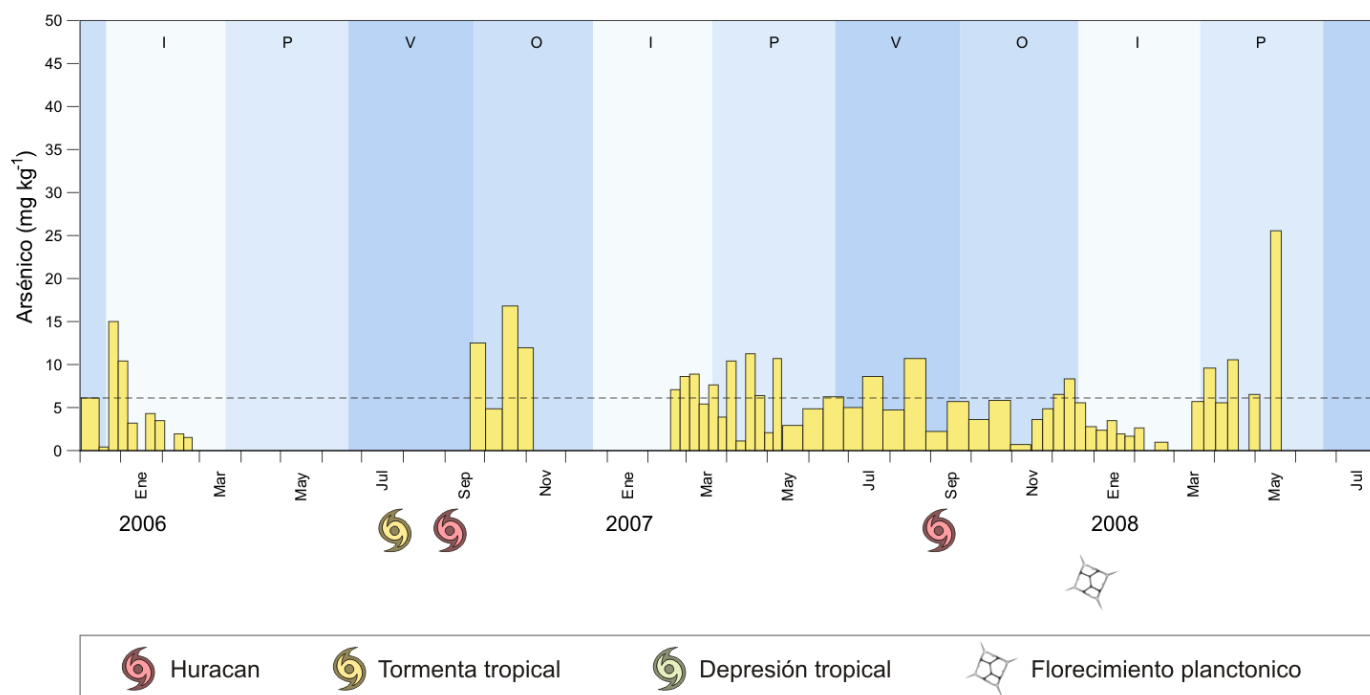


Figura 20. Contenido de As en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso.

El arsénico es un elemento redox-sensible, al igual que el uranio, presentándose en forma de (hidr)oxoaniones en condiciones óxicas y puede ser absorbido a óxidos metálicos y otras partículas en condiciones subóxicas y anóxicas. Comúnmente enriquecimientos de este elemento son asociados a aglomerados de materia orgánica, lo cual parece coincidir con los elevados valores de calcio y calcio biogénico a mediados de mayo de 2008. Por otro lado en la Bahía de La Paz este elemento parece ser principalmente aportado vía terrígena, siendo un componente abundante en rocas marinas de la Formación El Cien y rocas terrestres de la Formación Lomas de la Virgen con elevado contenido fosfático, así como en rocas intrusivas graníticas y metamórficas. Otra fuente de alto contenido de arsénico puede ser ocasionada por el consumo de As disuelto por el fitoplancton, siendo este elemento un análogo de P y algunas especies incapaces de distinguir entre ambos elementos. Esto es la razón por la que comúnmente el As es asociado a materia orgánica. Sin embargo es difícil establecer una fuente exacta para este

suficiente cantidad de lluvia, como otros ciclones tropicales que han pasado anteriormente como Ignacio (24-26 de agosto de 2003) y Marty (21-23 de septiembre de 2003). Sin embargo elevados contenidos de este elemento fueron registrados durante el muestreo de 2006-2008 principalmente en otoño de estos dos años, sin alguna influencia fluvial registrada. Por lo tanto los elevados valores probablemente se deban al aporte eólico que se da durante los fuertes vientos del noroeste, que actúan en otoño-invierno en la zona de estudio.

El escandio es principalmente aportado vía fluvial durante eventos de lluvias, así como vía eólica por fuertes vientos del noroeste y eventos de enérgicas rachas de viento, que llevan polvo a la Cuenca Alfonso.

Fierro

La variabilidad del contenido de fierro en la MPH de Cuenca Alfonso se presenta en la Figura 22, donde la línea punteada corresponde a la media del periodo estudiado (1.57 %). De la variabilidad destaca el máximo valor (2.8 %) que ocurrió a inicios de octubre

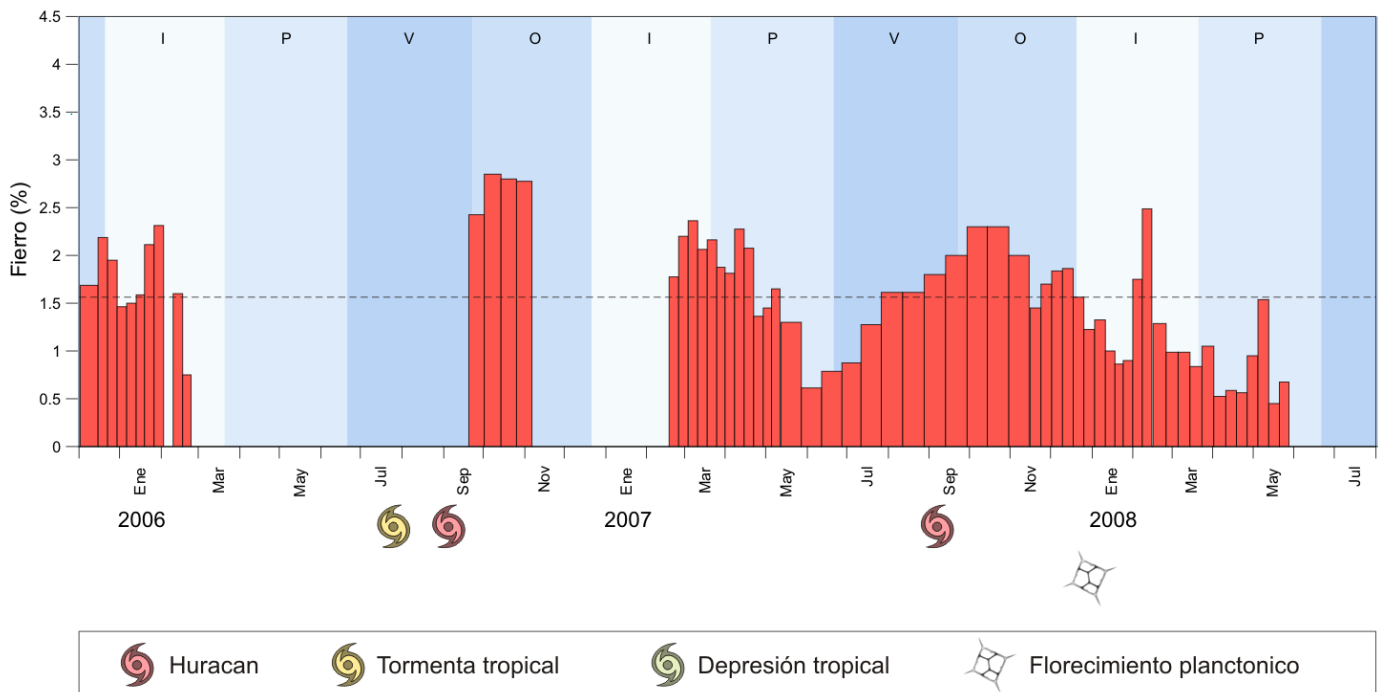


Figura 22. Contenido de Fe en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso.

de 2006 y elevados valores en inicios de marzo y octubre de 2007, así como a inicios de febrero de 2008. El patrón de variabilidad de este elemento concuerda casi perfectamente con el escandio, lo cual era de esperarse ya que ambos se consideran indicadores de aporte terrígeno.

El Fe, al igual que el Sc es aportado a la cuenca por el flujo de arroyos después de eventos de lluvia, así como por contribución eólica.

Uranio

Los valores de uranio en la MPH se presentan en la Figura 23, siendo la línea horizontal el promedio de 6.1 mg kg^{-1} . El mayor contenido (40.3 mg kg^{-1}) corresponde con mediados de mayo de 2008, misma muestra con elevado valor de As y Ca biogénico. Elevados valores se registraron a inicios de marzo e inicios de mayo de 2007.

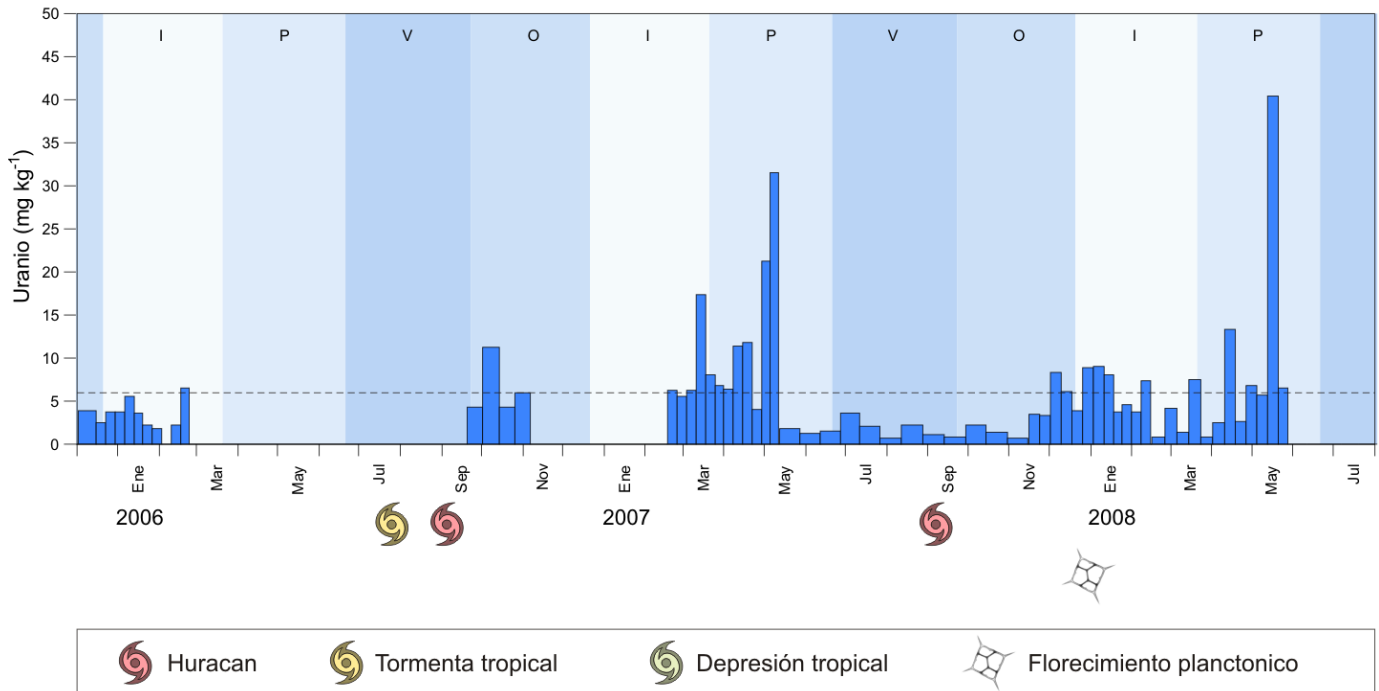


Figura 23. Contenido de U en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso.

Al igual que el As, el uranio es un elemento que comúnmente se asocia a aglomerados de materia orgánica. Elevados valores de dicho elemento durante la serie de

tiempo 2006-2008 concuerdan con elevados valores de calcio y calcio biogénico. Por otro lado U es un elemento redox-sensible, por lo que otra causa de su enriquecimiento puede ser la formación de partículas autógenas debido a un déficit de oxígeno disuelto en la columna de agua, ocasionado por remineralización de materia orgánica en hundimiento. Esta ausencia de oxígeno ocasiona que el uranio se reduzca de su forma típicamente disuelta (anión uranil-tricarbonato $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$) con un estado de oxidación +6 a su forma menos soluble con un estado de oxidación de +4, la cual tiende asociarse o adherirse a

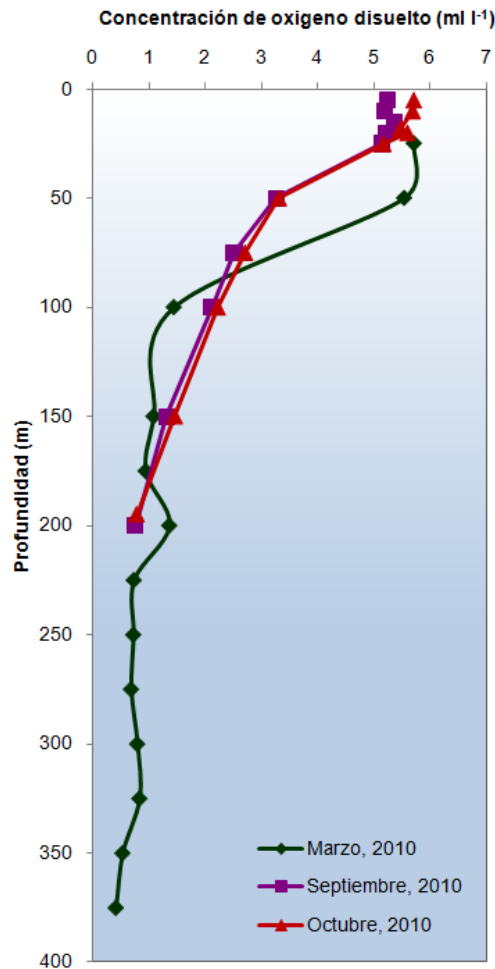


Figura 24. Concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua de la Bahía de La Paz, cercana a la posición de la trampa sedimentaria en marzo, septiembre y octubre de 2010.

partículas en depositación y finalmente acumularse en sedimentos. Los valores de oxígeno disuelto en la columna de agua en marzo, septiembre y octubre de 2010 (Figura 23), determinados con el clásico método de Winkler, muestran una disminución de alrededor de 6 ml l⁻¹ en superficie a 1-2 ml l⁻¹ a partir de los 100-200 m. Se detectó variación en los perfiles de oxígeno disuelto y ligeros cambios de la profundidad de la capa de mínimo oxígeno (< 1 ml l⁻¹), lo cual podría causar enriquecimientos de uranio particulado. Sin embargo durante la serie de tiempo de colecta de la MPH no se realizaba un monitoreo continuo de concentraciones de oxígeno disuelto en la columna de agua del área de estudio, por lo cual no hay suficiente fundamento a favor de este mecanismo de enriquecimiento de MPH con uranio.

Lantánidos

Las razones La/Yb, que permiten trazar el origen de partículas litogénicas, normalizadas con lutita norteamericana para la MPH de Cuenca Alfonso, se presentan en la Figura 25 con el valor promedio de 1.26 en línea horizontal punteada. Se puede distinguir que el patrón se parece en algunos casos a las variaciones del contenido de Sc en la MPH (Figura 21). Valores elevados (3.9) coinciden en el tiempo en algunos casos con los eventos de huracanes, como fue con el huracán Henriette (4-5 de septiembre de 2007). Elevados valores de la razón La/Yb correlacionan con los eventos de vientos intensos. Esto puede indicar una diferenciación entre aporte local, tanto eólico como fluvial, y el aporte eólico de mayor distancia (desiertos de Sonora, México y el desierto de Mojave, Estados Unidos). La composición de las partículas terrígenas de fuentes cercanas debería de reflejar la mineralogía de las rocas que afloran alrededor, a diferencia de las partículas traídas desde lejos, que a su vez representarían rocas o desiertos de las regiones, desde las cuales fueron movidas.

La anomalía del contenido de Eu normalizado con lutita NASC que es, al igual que la razón La/Yb, utilizada para establecer el origen del material terrígeno, calculada para las partículas en hundimiento de Cuenca Alfonso se presenta en la Figura 26, donde la media (0.9) se muestra con línea punteada. Al parecer existen ciertas variaciones de estos

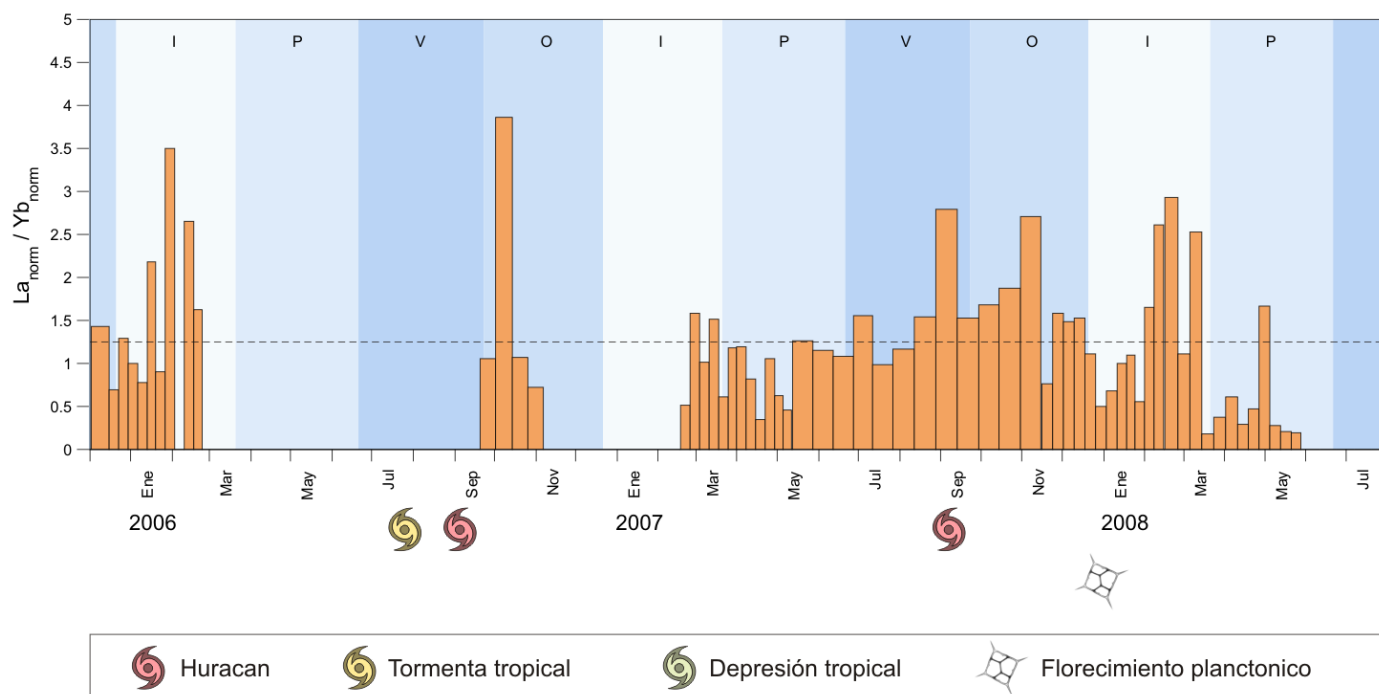


Figura 25. Razones La/Yb normalizadas con lutita norteamericana (NASC) en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso.

valores, los cuales no revelan un patrón muy claro, sin embargo a veces las anomalías ligeramente positivas coinciden con alto contenido de Sc, reportado para supuestos eventos de aporte eólico, concordando con fuertes vientos del noroeste (otoño de 2007). Por otro lado, la mayor anomalía positiva (9.9) ocurrió a finales de abril - inicios de mayo de 2009, lo cual correspondió a un periodo en el cual los contenidos de As y U fueron elevados. Este evento podría indicar un aporte hidrotermal o geotermal que pudo haber influenciado el material particulado. Sin embargo este fenómeno puede ser causado por algún evento extraordinario de tormenta de polvo que pudo traer material particulado con diferente composición a la cuenca.

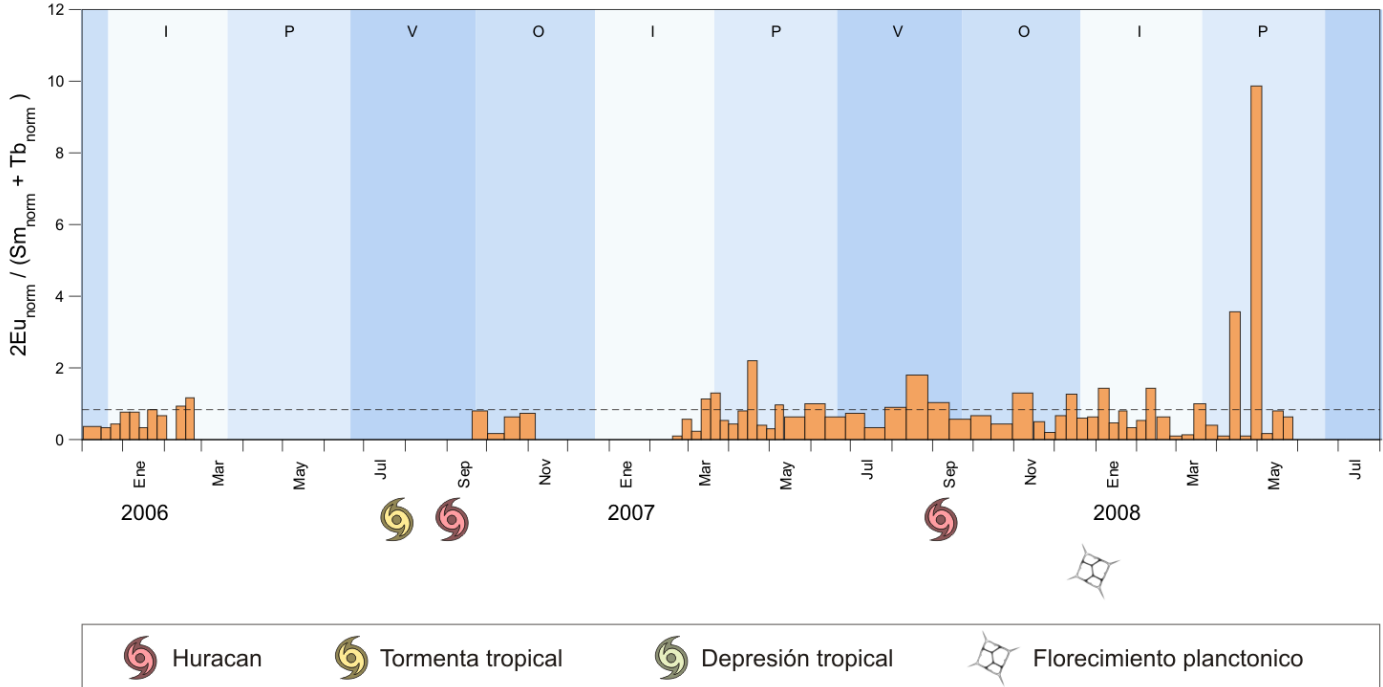


Figura 26. Anomalías de Eu normalizado con lutita norteamericana (NASC) en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso.

7.3. Flujos de elementos particulados

Los flujos de elementos particulados que corresponden a la serie de tiempo desde 2 de diciembre de 2005 (muestra XII-2) hasta 28 de mayo de 2008 (muestra XVIII-12) se presentan en forma generalizada en la Tabla 4.

Tabla 4. Flujos de elementos particulados a la Cuenca Alfonso.

	Flujo de elemento								
	As ($\mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Ba ($\mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Ca ($\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Co ($\mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Cr ($\mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Cs ($\mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Fe ($\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Sc ($\mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	U ($\mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$)
Mínimo	0.20	17	2.59	0.19	0.3	0.1	0.27	0.1	0.2
Máximo	25.1	1658	321.28	34.93	72.9	10.8	70.84	27.6	25.6
Media	4.4	255	47.14	7.30	16.8	2.6	12.54	4.9	4.0
Desviación Estándar	4.4	254	50.26	7.15	13.5	2.2	12.22	4.8	4.4

Al igual que para la composición elemental de la MPH en Cuenca Alfonso, se observa una alta variabilidad de los flujos en la serie de tiempo. Sin embargo algunos patrones en los cambios de flujos se pudieron establecer, los cuales se describen a continuación.

7.3.1. Flujos de elementos mayores particulados

Flujo de calcio particulado

Los flujos de calcio a la Cuenca Alfonso se presentan en la Figura 27, con su valor promedio de $47.14 \text{ mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$ graficado con línea horizontal. Los mayores aportes de Ca fueron encontrados a finales de diciembre de 2007 y corresponden con un florecimiento de silicoflagelados reportado anteriormente. Este periodo a su vez, concuerda con elevados flujos de SiO_2 biogénico y C_{org} de datos de nuestro grupo de trabajo. El evento podría representar un florecimiento de diversos organismos planctónicos tanto silíceos como calcáreos, por lo cual el flujo de calcio fue elevado.

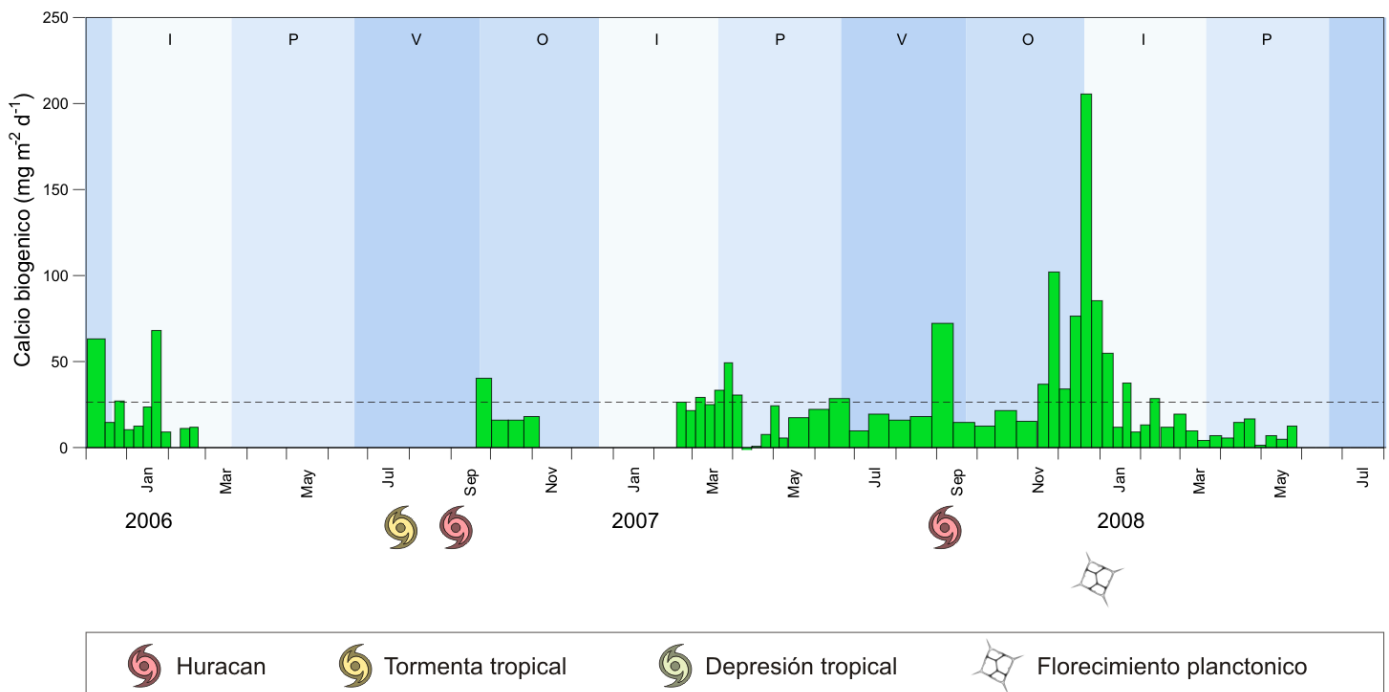


Figura 27. Flujo de Ca particulado a la Cuenca Alfonso.

Flujo de calcio biogénico particulado

Las variaciones en los flujos de calcio biogénico particulado se muestran en la Figura 28 con su valor promedio de $26.5 \text{ mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$. La variabilidad de los flujos de Ca_{biog} corresponde casi perfectamente con los flujos de calcio total. El mayor valor ($205.3 \text{ mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$) ocurrió durante un florecimiento de organismos planctónicos, reportado para silicoflagelados en el área de estudio en esta fecha.

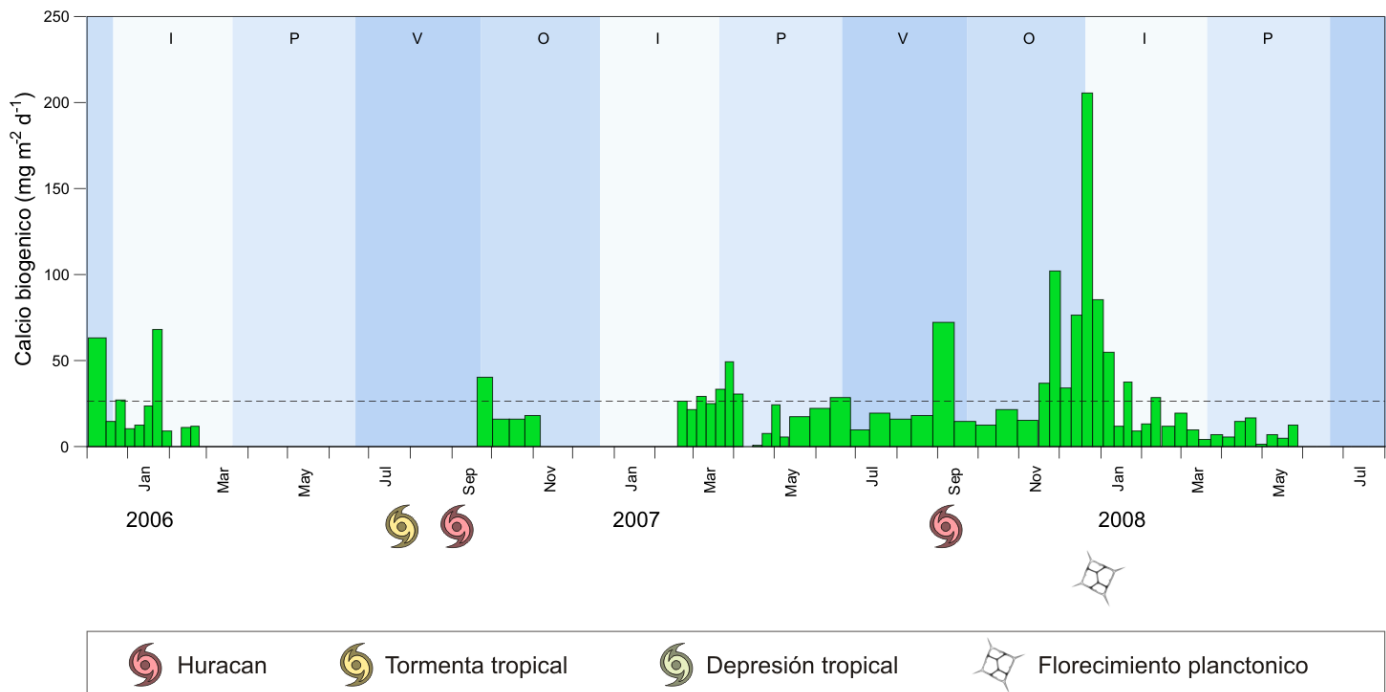


Figura 28. Flujo de Ca_{biog} particulado a la Cuenca Alfonso.

7.3.2. Flujos de elementos traza particulados

Flujo de arsénico particulado

Los flujos de As particulado se presentan en la Figura 29 y el valor promedio ($4.4 \mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$) como línea. Se registraron una serie de flujos, que para la serie de tiempo se parecen a los flujos de calcio y calcio biogénico. El mayor flujo de As ($25.1 \mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$) ocurrió en diciembre de 2007, correspondiente al florecimiento planctónico mencionado arriba, concordando con elevado flujo de Ca y Ca_{biog} .

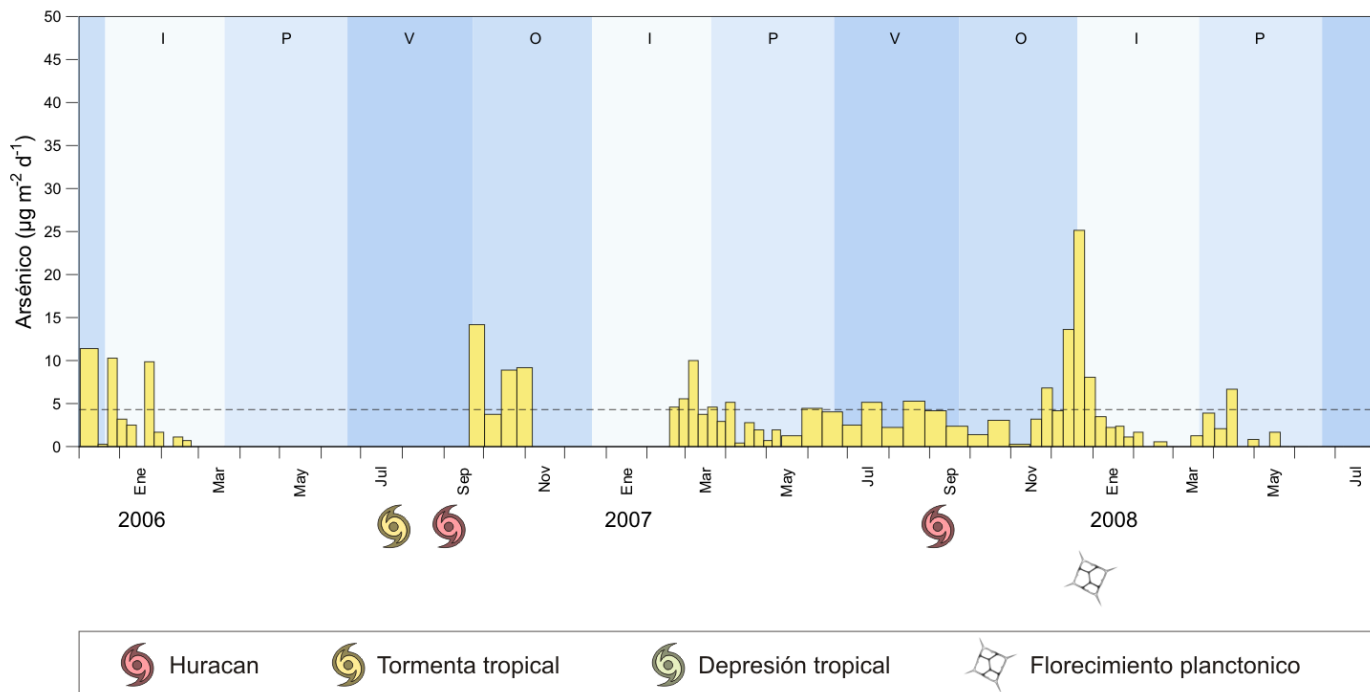


Figura 29. Flujo de As particulado a la Cuenca Alfonso.

En consecuencia el origen del arsénico particulado en la Cuenca Alfonso podría ser el conjunto de procesos o aportes, tanto terrígenos (alternancia entre aporte fluvial y eólico), autógeno (debido a que es un elemento redox-sensible), como biogénico (asimilación por el fitoplancton).

Flujo de escandio particulado

Los flujos de Sc particulado a la Cuenca Alfonso se presentan en la Figura 30 y el valor promedio ($4.9 \mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$) se muestra con una línea horizontal. El escandio es un elemento indicador de aporte terrígeno. El mayor flujo ($27.6 \mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$) ocurrió a finales de diciembre de 2007. Elevado flujo de escandio particulado corresponde a finales de agosto - inicios de septiembre de 2007 al pasar el huracán Henriette (4-5 Septiembre de 2007). Otros pulsos de Sc particulado probablemente se deban a aporte eólico, como el caso de mediados de enero de 2006.

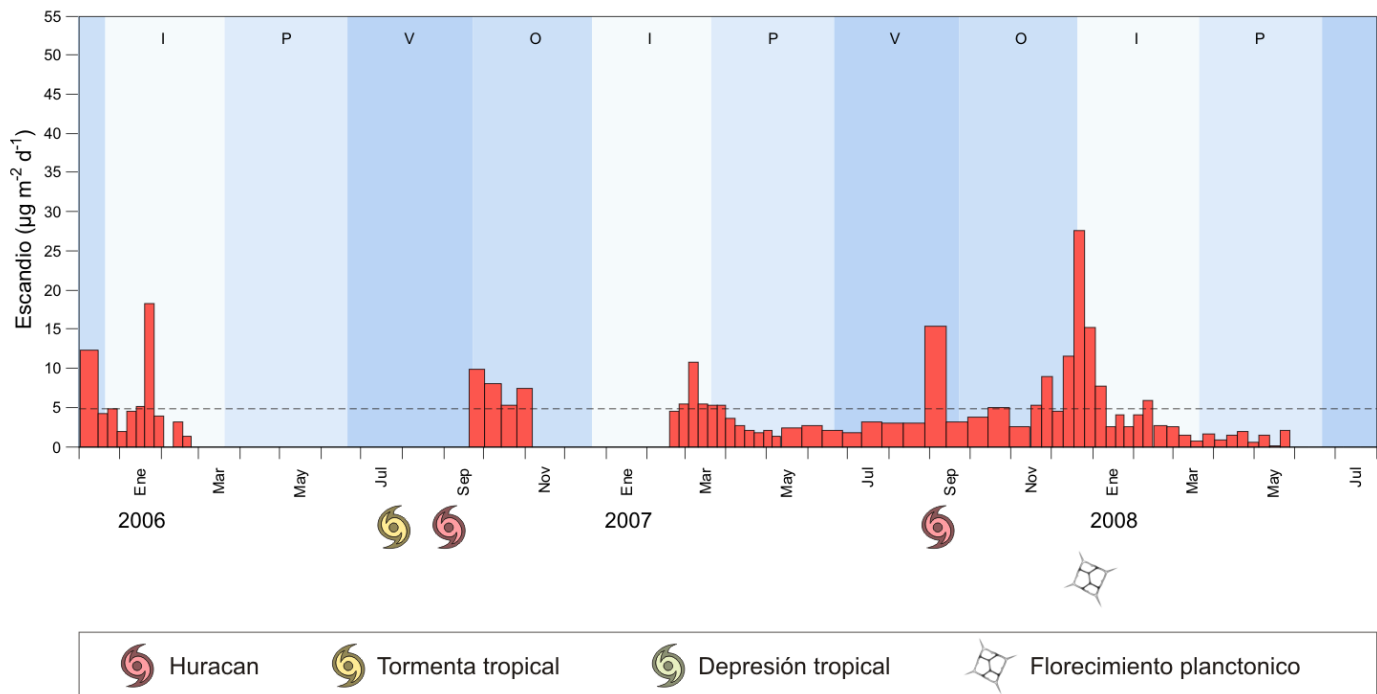


Figura 30. Flujo de Sc particulado a la Cuenca Alfonso.

El escandio fue aportado a la Cuenca Alfonso principalmente durante ciclones tropicales así como por vía eólica. Otra causa de elevados flujos, como el reportado durante el florecimiento planctónico, podría ser la agregación de partículas biogénicas junto con material detrítico, que ocasionó su elevado flujo hacia el fondo por gravedad.

Flujo de hierro particulado

Los flujos de Fe particulado se muestran en la Figura 31, con su valor promedio ($12.5 \mu\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) representado por una línea. Se encontraron flujos casi idénticos a los del caso del Sc (Figura X), presentando el mayor valor ($70.8 \mu\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) en diciembre de 2007 y elevados flujos a mediados de enero de 2006 y finales de agosto - inicios de septiembre de 2007.

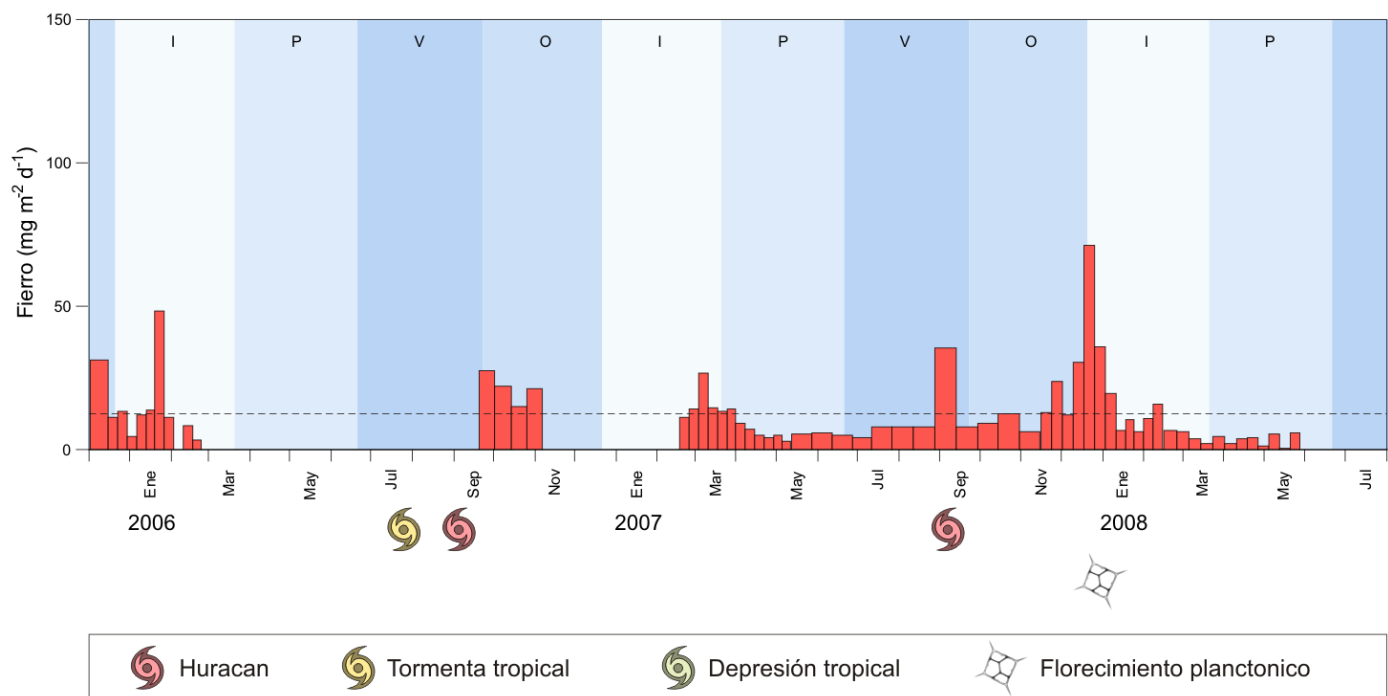


Figura 31. Flujo de Fe particulado a la Cuenca Alfonso.

El hierro es traído a la Cuenca principalmente durante eventos de aporte fluvial, cambios de régimen de viento o posibles tormentas de polvo.

Flujo de uranio particulado

Los flujos de U particulado a la Cuenca Alfonso se muestran en la Figura 32, con la media ($4.0 \mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$) presentada como línea punteada. Se observaron los mayores flujos de toda la serie de tiempo en diciembre de 2007, con el máximo valor de $25.6 \mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$. Estos flujos también corresponden con el florecimiento planctónico mencionado arriba, reportado también para arsénico y calcio.

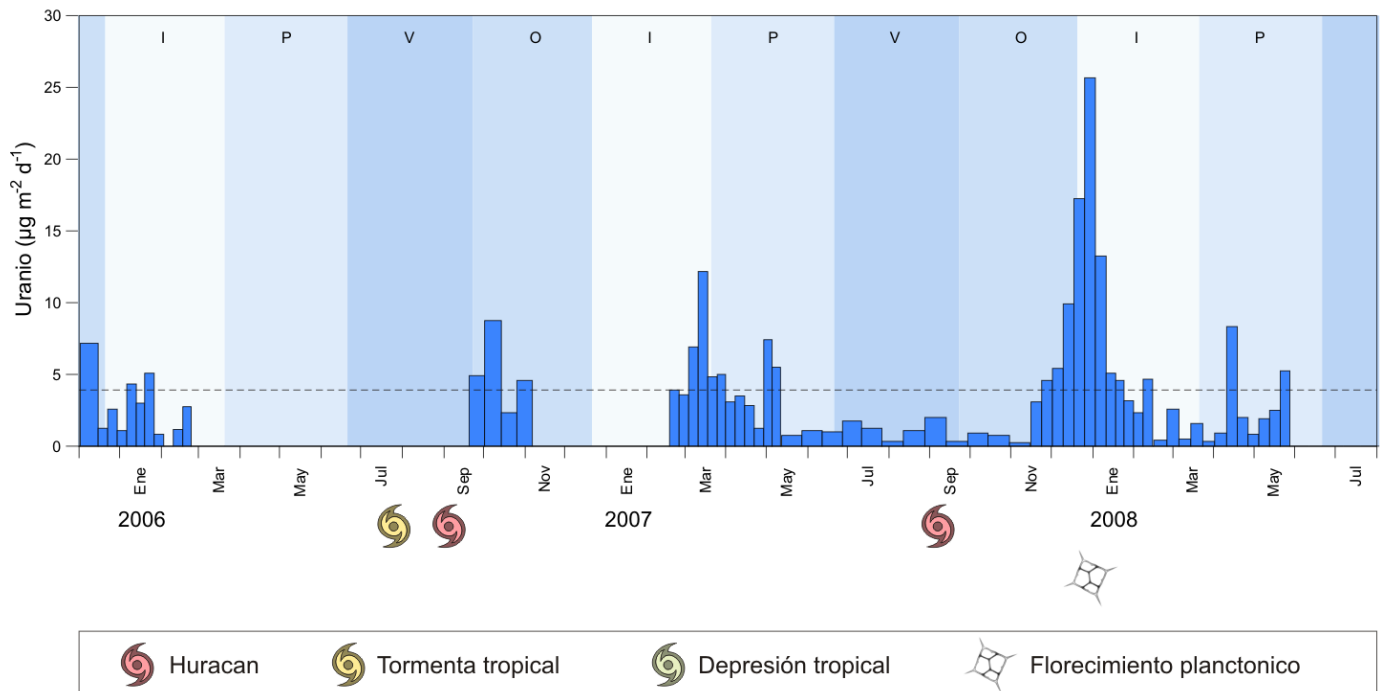


Figura 32. Flujo de U particulado a la Cuenca Alfonso.

El uranio tuvo sus flujos máximos durante el evento de florecimiento planctónico de diciembre de 2007. Este elemento es comúnmente asociado a aglomerados de materia orgánica. Otro mecanismo de enriquecimiento de uranio particulado que consiste en reducirse de su forma U(+6) a U(+4) por déficit de oxígeno disuelto fue discutido arriba.

7.4. Composición de la parte superficial de los sedimentos de Cuenca Alfonso

La composición de las muestras de los primeros 110 mm de la columna sedimentaria de Cuenca Alfonso del núcleo C44 se presenta a continuación.

7.4.1. Estratigrafía y fechado del núcleo C44

La estratigrafía del núcleo C44 y de la parte superficial que fue de interés para este estudio se muestra en la Figura 33. La parte sombreada de la figura representa la parte del núcleo no utilizada en este trabajo. La parte superficial sedimentaria se caracteriza por

una serie de varvas o láminas, las cuales son una alternancia entre láminas oscuras y laminas claras de material limoso-arcilloso. Estas tienen espesores diferentes y el origen de esta laminación aún se encuentra bajo estudio.

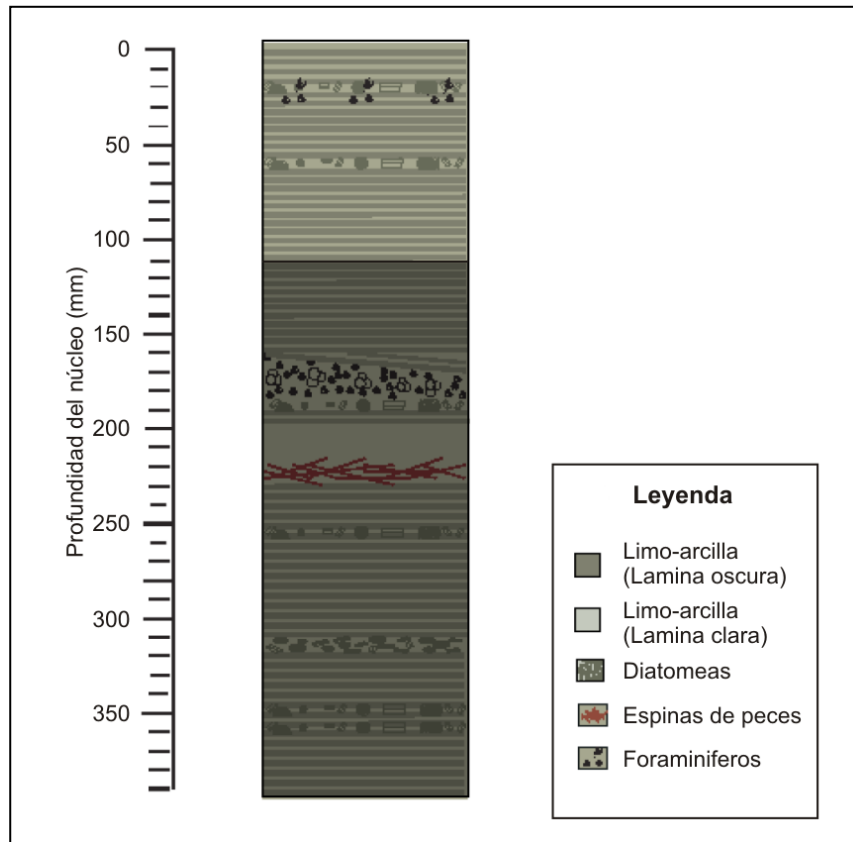


Figura 33. Estratigrafía del núcleo C44 (modificado de Álvarez Gómez, 2010).

En la Figura 34 se presenta el decremento de la actividad de ^{210}Pb con la profundidad del núcleo, donde este deja de ser soportado por el ^{210}Pb atmosférico y es lentamente decaído a ^{210}Bi y ^{210}Po sucesivamente. La vida media del ^{210}Pb es de 22.3 años, conociendo lo cual fue posible encontrar la tasa de sedimentación. Al ser fechado el núcleo mediante el método de ^{210}Pb no soportado, se obtuvo una tasa de sedimentación lineal de 0.61 mm año^{-1} , lo cual va muy acorde a lo calculado por el grupo de trabajo para el material particulado colectado en Cuenca Alfonso del periodo 2002-2005, siendo la tasa 0.4 mm año^{-1} .

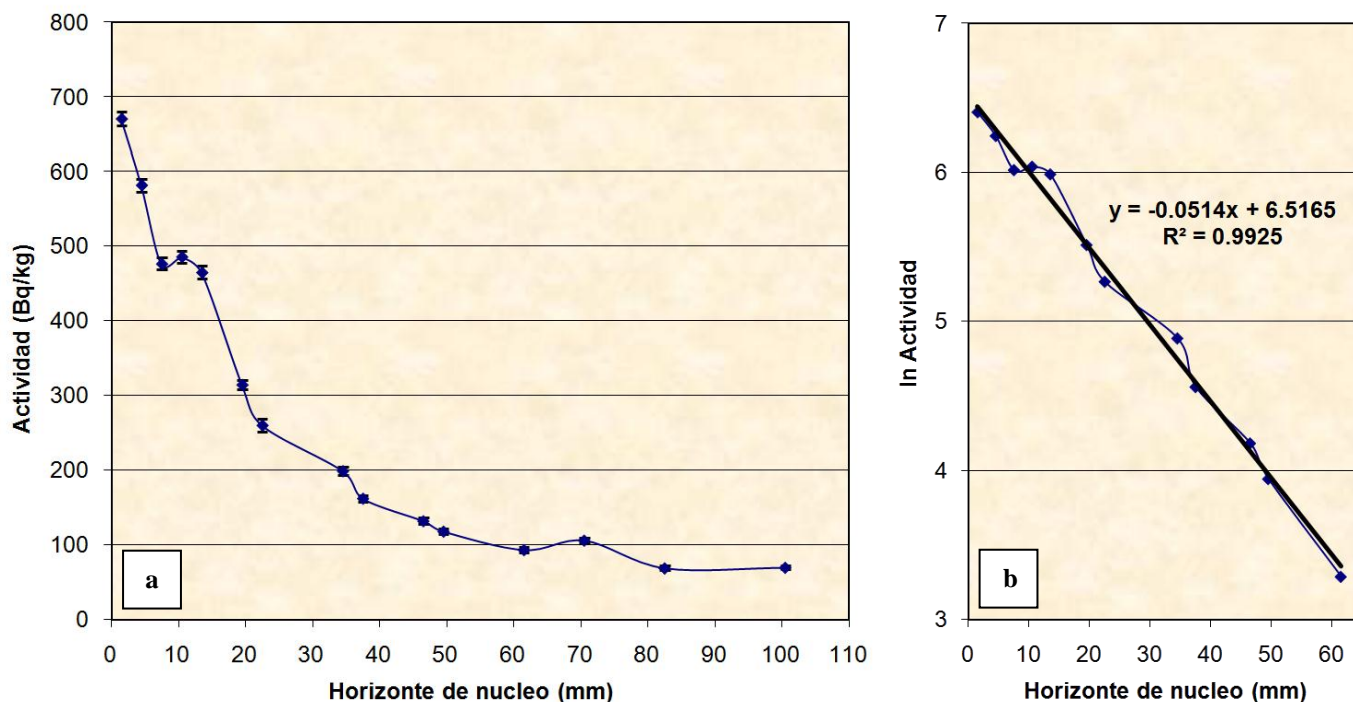


Figura 34. Fechado del núcleo C44 con el método de ^{210}Pb : a) actividad de ^{210}Pb total contra el horizonte del núcleo; b) logaritmo natural de la actividad de ^{210}Pb no soportado contra el horizonte del núcleo.

7.4.2. Contenidos de elementos en la parte superficial de los sedimentos de Cuenca Alfonso

Los contenidos de algunos elementos en diversos horizontes del núcleo de sedimentos C44 se exhiben en los Anexos 5 y 6. Los valores de mínimos, máximos, media y desviación estándar se presentan en la Tabla 5. El estudio de elementos mayores y traza en el núcleo permitió establecer tendencias de variabilidad decadal, a una escala mayor que con la trampa sedimentaria, cubriendo el rango de tiempo desde 1839 a 2008 y teniendo una resolución de 4.31 años aproximadamente por horizonte de núcleo.

Tabla 5. Contenidos de elementos en los horizontes del núcleo C44, colectado en Cuenca Alfonso.

	Contenido de elemento								
	As (mg kg ⁻¹)	Ba (mg kg ⁻¹)	Ca (%)	Co (mg kg ⁻¹)	Cr (mg kg ⁻¹)	Cs (mg kg ⁻¹)	Fe (%)	Sc (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹)
Mínimo	0.35	50	0.29	0.90	2.3	0.5	2.06	9.5	0.7
Máximo	9.66	885	7.20	10.60	89.3	16.3	3.31	14.4	19.1
Media	4.42	349	4.07	6.59	53.9	6.6	2.63	11.8	6.2
Desviación Estándar	3.00	238	1.83	2.76	21.0	5.0	0.28	1.2	4.6

7.4.2.1. Elementos mayores en la capa superior del núcleo C44

Calcio

El contenido de calcio en la capa sedimentaria superficial del núcleo C44 se presenta en la Figura 35a. Se puede observar un periodo con los menores valores de este elemento aproximadamente entre los años 1890 y 1950. Esto pudo haber sido ocasionado por un aumento de precipitación y un clima más frío, lo cual se vio para los elementos indicadores de aporte terrígeno escandio (Figura 36a) y fierro (Figura 36b). A partir de 1950 se registró un gradual aumento de calcio en los horizontes del núcleo hasta el 2008. Esto concuerda con una tendencia de crecimiento de productividad que ha sido encontrada en los últimos años para el Golfo de California. Esto también es acorde con un aumento en la razón de $\text{CaCO}_3/\text{SiO}_2$ biogénico obtenido por Aguirre Bahena (información personal) para las muestras de materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso, colectada con la misma trampa sedimentaria que la del presente estudio. Otro fenómeno que se encontró a partir de 1950 fue una aparente ciclicidad de valores altos y bajos de Ca, pero siguiendo la misma tendencia de aumento hasta 2008. Se comparó con tendencias globales de temperatura y fue encontrada buena correlación con el modelo de temperatura reconstruida de la superficie del mar de la NOAA (ERSST 3b).

Las variaciones de calcio a gran escala parecen responder a cambios de temperatura globales, lo cual podría indicar una mayor abundancia de organismos calcáreos en épocas más cálidas.

Calcio biogénico

La variabilidad del Ca en los horizontes del núcleo C44 se presenta en la Figura 35b. A grandes rasgos se observa que el calcio biogénico muestra una tendencia muy similar a la del calcio. Esto indica que la gran mayoría del calcio aportado a la cuenca no es terrígeno, sino que es originado por aporte de organismos calcáreos y restos de su vida.

7.4.2.2. Elementos traza en la capa superior del núcleo C44

Arsénico

Las variaciones temporales del contenido de As en los sedimentos superficiales recientes del núcleo C44 se presentan en la Figura 37a. Se observa un patrón poco claro y difícilmente explicable. Los mayores valores fueron registrados desde 1840 a 1915. Esto concuerda con una anomalía positiva de Eu (Figura 38b).

Escandio

El contenido de escandio en los horizontes superficiales del núcleo C44 se presenta en la Figura 36a. Se observa un régimen de elevados valores de Sc, el cual fue aproximadamente desde el año 1890 hasta el 1980. Debido a que el Sc es un indicador de aporte terrígeno, este rango de tiempo probablemente haya correspondido con un aumento de aporte fluvial o eólico a la Cuenca Alfonso. Esto a su vez pudo haber sido ocasionado por un aumento en la incidencia de ciclones tropicales o a un periodo de mayor precipitación. A partir de 1940 aproximadamente ocurre un decremento de los valores de Sc, probablemente indicando una transición a un clima más seco. Algunos eventos de elevados valores de escandio concuerdan con el paso de fuertes ciclones tropicales, como es el caso del huracán Liza, que ocurrió el 30 de septiembre de 1976 y fue conocido por su cantidad de lluvia y gran daño ocasionado a la ciudad de La Paz.

Fierro

El contenido de fierro en el núcleo C44 se presenta en la Figura 36b. El patrón que sigue este elemento es casi idéntico al del escandio (Figura 36a). Este elemento, al igual que el Sc, también es un indicador de aporte de minerales del continente. Por el perfil de Fe se puede denotar que los procesos de diagénesis al parecer no alteraron de manera significativa el material sedimentario al ser sepultado y compactado. Parece ser que las variaciones entre los valores de Sc y Fe puedan deberse al consumo del Fe por el fitoplancton en la columna de agua durante la depositación o una ligera transformación diagenética puntal.

Uranio

El contenido de uranio en el núcleo C44 se muestra en la Figura 37b. En el núcleo los valores de uranio son relativamente bajos hasta 1925, después de lo cual comienza un gradual incremento llegando a un máximo alrededor de 1950. Dicho contenido elevado concuerda con un incremento de taxones de silicoflagelados reportado anteriormente para las muestras del mismo núcleo del presente estudio. El mismo evento concuerda con un evento de “La Niña” sin embargo como se ha visto recientemente los eventos de “El Niño” y “La Niña” al parecer no son de gran influencia en la temperatura y condiciones oceanográficas de la Bahía de La Paz, por lo menos para los últimos 10 años. Posteriormente desde 1950 hasta 2008 ocurre un decremento de los valores de U, lo cual corresponde a un aumento de valores de calcio (Figura 35a).

Lantánidos

La razón La/Yb normalizada con lutita norteamericana para el núcleo C44 se presenta en la Figura 38a y tiene una media de 1.22. Se observa cierta variación sin un patrón muy claro. Los enriquecimientos de lantánidos pesados más notables fueron encontrados alrededor de 1860, 1910, 1945, 1960 y 1990.

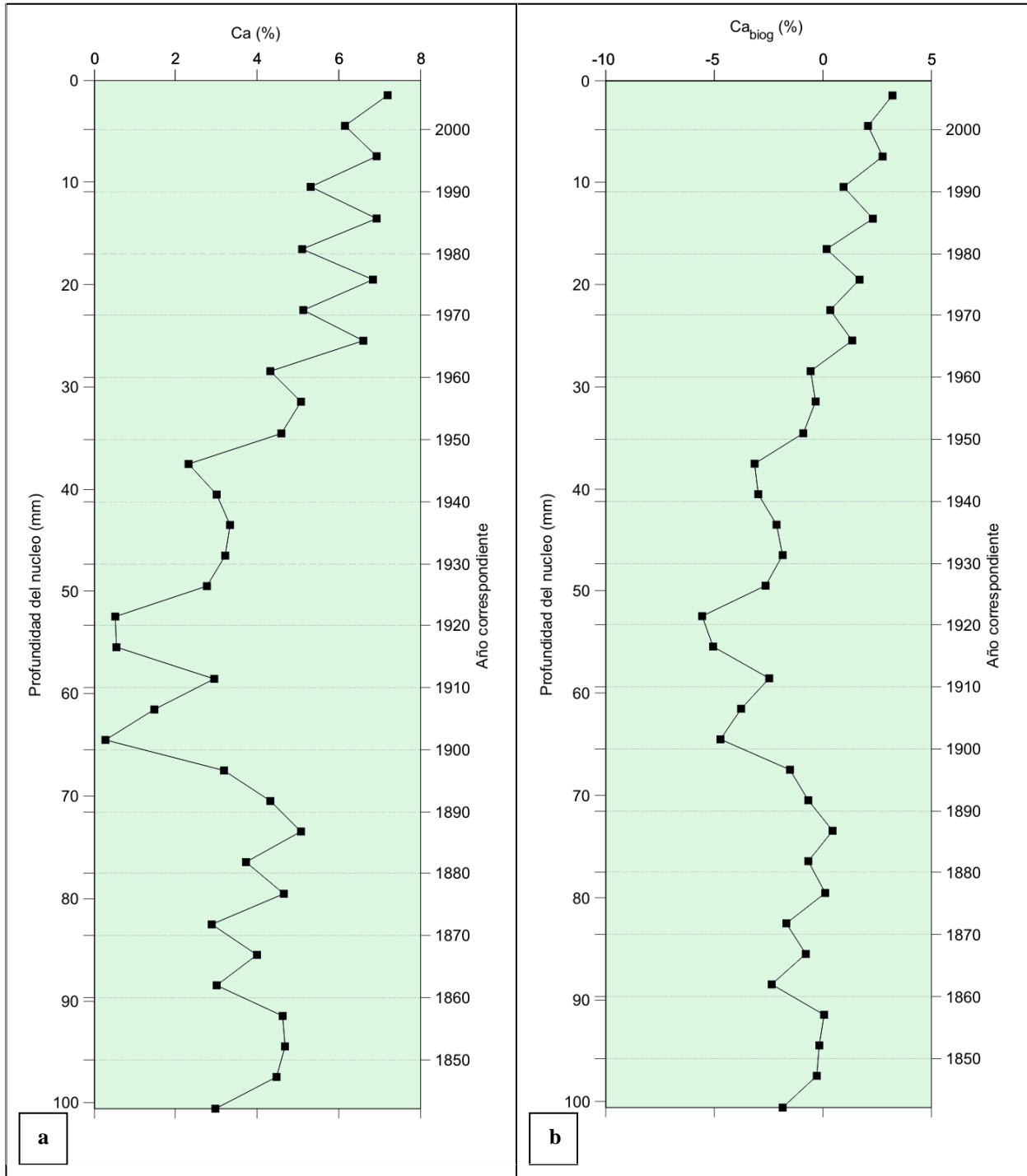


Figura 35. Contenido de las formas de calcio en la capa superficial de sedimentos del núcleo C44: a) calcio total y b) calcio biogénico.

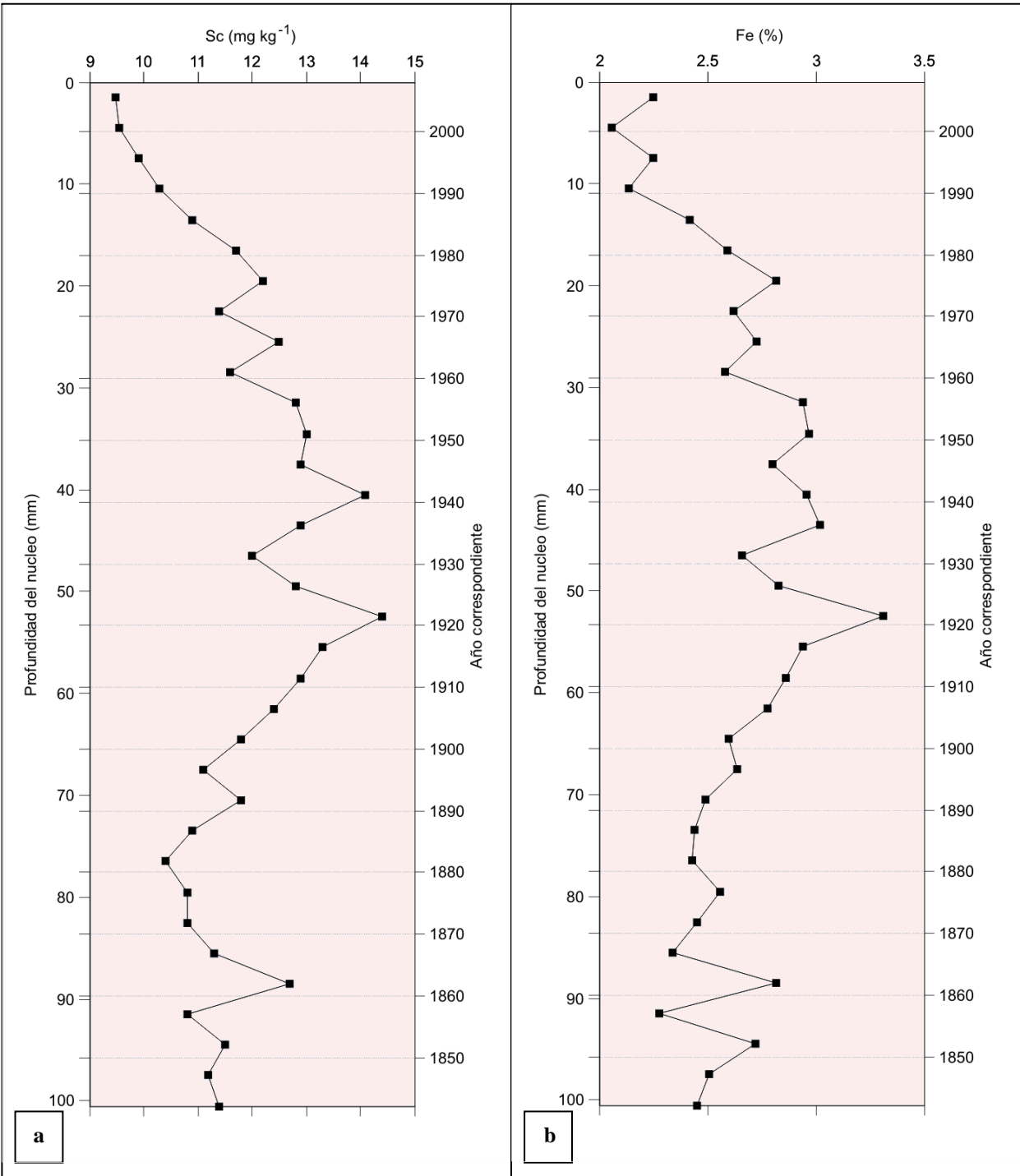


Figura 36. Contenido de los elementos traza terrígenos en la capa superficial de sedimentos del núcleo C44: a) escandio y b) hierro.

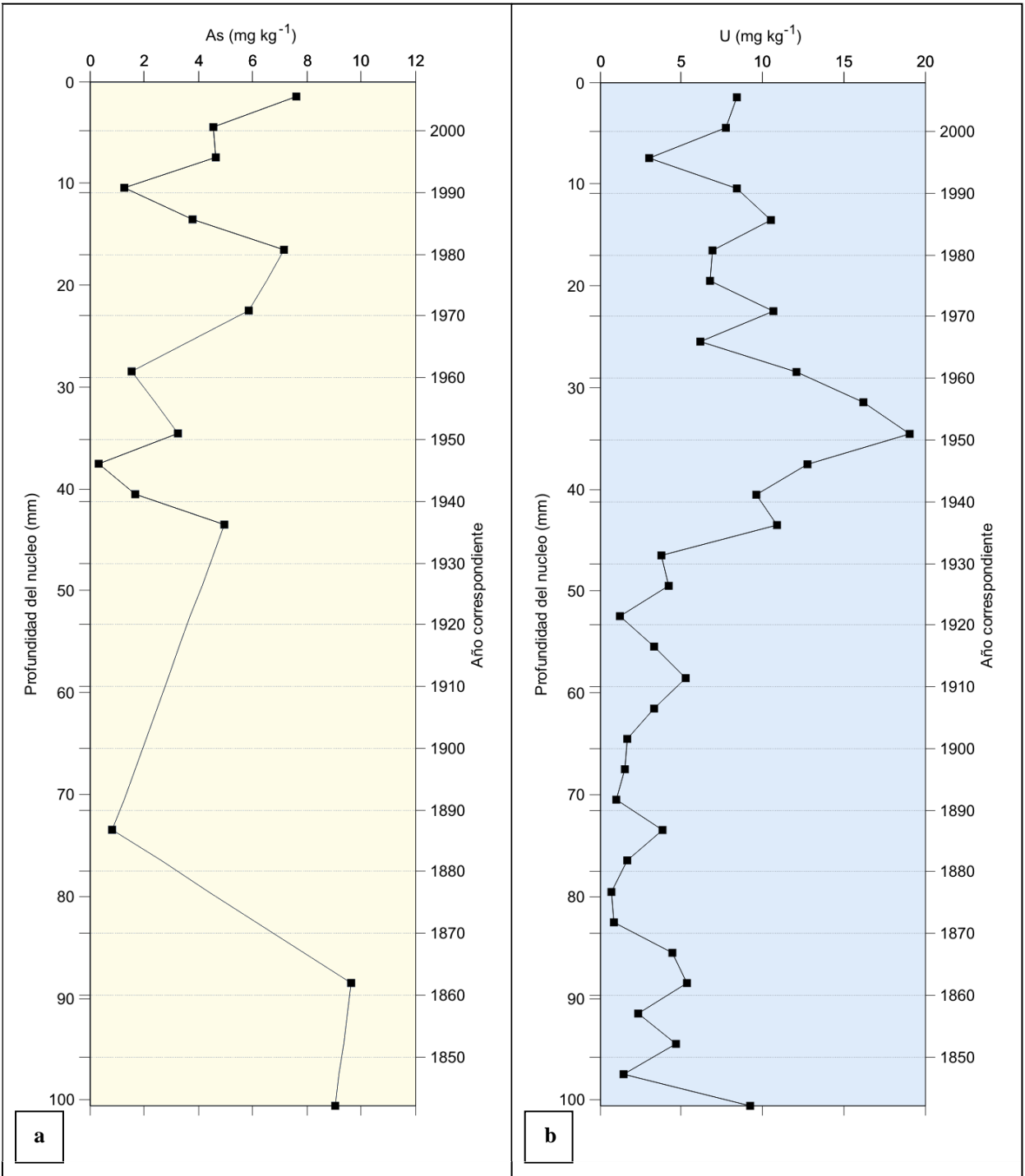


Figura 37. Contenido de dos elementos en la capa superficial de sedimentos del núcleo C44: a) arsénico y b) uranio

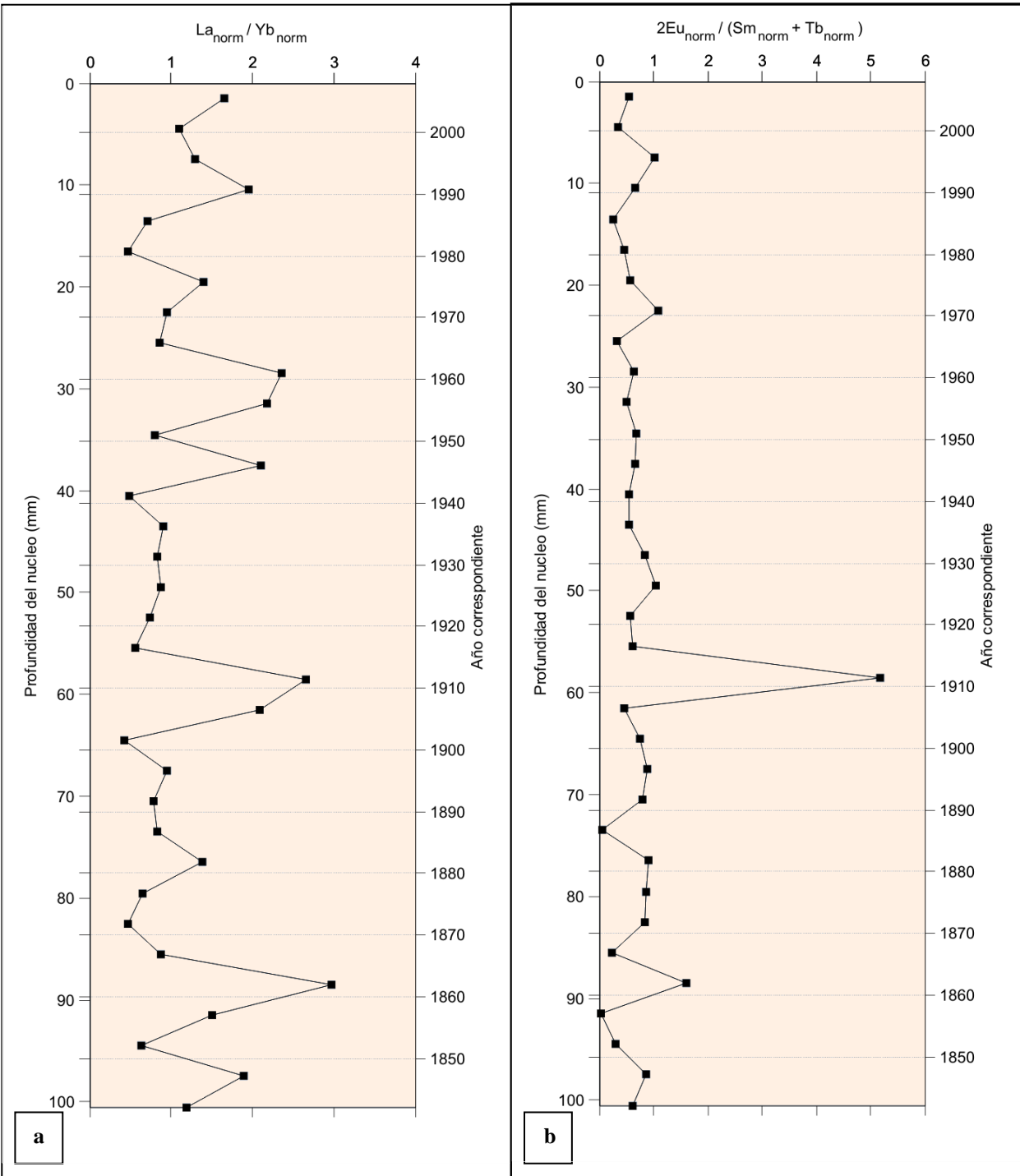


Figura 38. Valores de: a) razones La/Yb y b) anomalías de Eu, ambas normalizadas con lutita norteamericana (NASC) en la capa superficial de sedimentos del núcleo C44.

Las anomalías de Eu se presentan en la Figura 38b y su valor promedio es 0.77. Se distingue una alta variabilidad, sin embargo predominan las anomalías negativas (valor menor a 1). Algunos horizontes presentaron una anomalía ligeramente positiva (valor mayor a 1) o neutra (valor alrededor de 1), como fue el caso de los años cercanos a 1915, 1925, 1970 y 1995. Sin embargo un horizonte de núcleo, correspondiente a 1910 aproximadamente, presenta una considerablemente grande anomalía positiva de Eu. Esto puede ser explicado mediante un evento de aporte hidrotermal o geotermal. Esto a su vez concuerda con una mancha de anomalía positiva en sedimentos marinos superficiales (Figura 30), la cual se encuentra cerca de la posición de la trampa sedimentaria.

7.5. Comparación de todas las partes del sistema

Al parecer el material sedimentario en Cuenca Alfonso viene influenciado principalmente por 3 tipos de procesos. El escandio, fierro y en algunos casos arsénico de la materia particulada en hundimiento son aportados vía fluvial por los arroyos de la cuenca de drenaje y eólica por eventos de fuertes vientos, mientras que el calcio es producido en la columna de agua por productividad de organismos calcáreos. El arsénico y uranio son aportados de forma autógena, relacionada a eventos de florecimientos planctónicos con abundante materia orgánica, así como por anoxia en la columna de agua.

La composición promedio, desviación estándar, mínimos y máximos en la materia particulada en hundimiento, sedimentos de arroyo, sedimentos de duna, rocas de la cuenca de drenaje, así como valores promedio para la corteza superior se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Contenidos de elementos en diferentes tipos de material sedimentario de la Bahía de La Paz.

Material Sedimentario	Numero de Muestras	Contenido min-max $\bar{x} \pm \sigma$						
		As (mg kg ⁻¹)	Ba (mg kg ⁻¹)	Ca (%)	Fe (%)	P (%)	Sc (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹)
Materia particulada en hundimiento	64	<u>0.4-25.5</u> <u>6.2±4.6</u>	<u>32-1575</u> 322±289	<u>0.84-9.91</u> <u>5.76±2.03</u>	<u>0.44-2.84</u> <u>1.57±0.62</u>	-	<u>2.3-10.3</u> <u>6.2±2.2</u>	<u>0.6-40.3</u> <u>6.1±6.8</u>
Sedimentos de arroyo	15	<u>1.7-15.2</u> <u>7.5±3.8</u>	<u>634.0-1130.0</u> 834.3±144.6	<u>2.0-8.0</u> 4.4±1.4	<u>1.0-7.2</u> 3.3±1.5	<u>0.0-1.7</u> 0.3±0.4	<u>3.0-23.0</u> 12.4±4.8	<u>0.5-15.0</u> 3.0±3.5
Sedimentos de duna	5	<u>3.0-8.0</u> <u>5.2±2.3</u>	<u>573.0-803.0</u> 681.2±87.0	<u>4.9-8.8</u> 6.7±1.6	<u>2.2-4.2</u> <u>3.3±0.8</u>	<u>0.1-0.2</u> 0.1±0.0	<u>8.0-19.0</u> 13.4±4.8	<u>0.9-1.7</u> <u>1.4±0.3</u>
Rocas de la cuenca de drenaje	10	<u>0.6-45.9</u> <u>10.9±13.7</u>	<u>159.0-1410.0</u> <u>589.8±347.6</u>	<u>1.6-24.8</u> <u>5.7±6.8</u>	<u>0.8-4.8</u> <u>2.4±1.7</u>	<u>0.0-7.3</u> <u>0.9±2.2</u>	<u>3.0-19.0</u> <u>9.7±6.2</u>	<u>0.6-87.0</u> <u>10.7±26.9</u>
Promedio de corteza superior (Wedepohl, 1995)	-	2.0	668	2.9	7.0	3.089	2.5	0.0665

8. DISCUSIÓN

8.1. Composición de la materia particulada en hundimiento de la serie de tiempo 2002-2008

La variabilidad del flujo de masa total y de los contenidos elementales de toda la serie de tiempo, incluyendo el periodo 2002-2005, anteriormente descrita por Rodríguez Castañeda (2008), Aguirre Bahena (2007) y Silverberg et al. (2007, 2008) se presenta a continuación. Es necesario utilizar toda la serie de tiempo existente para ampliar el registro y aportar más evidencias de la importancia de algunos eventos específicos y/o ciclicidad encontrada a lo largo de los años y no solo en un periodo corto.

8.1.1. Variabilidad del flujo de masa total

El flujo de masa total de partículas en hundimiento a la Cuenca Alfonso para toda la serie de tiempo de 2002-2008 se presenta en la Figura 39.

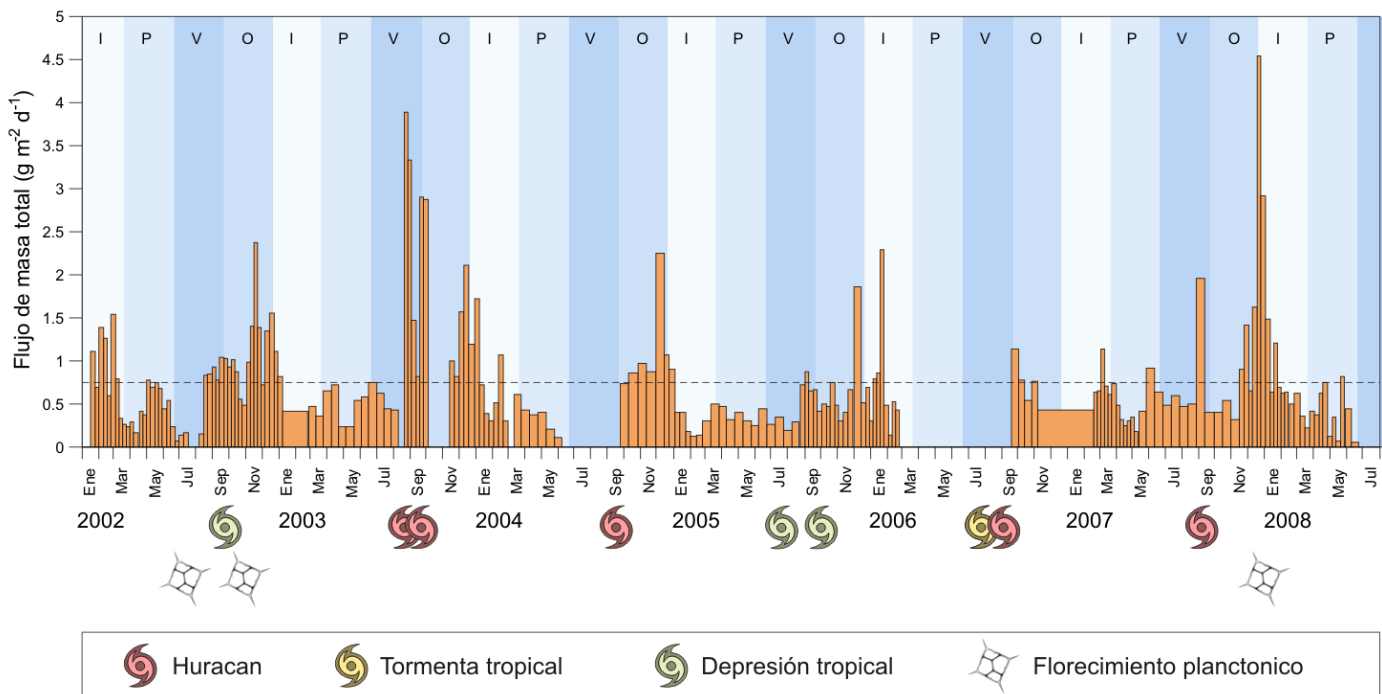


Figura 39. Flujo de masa total de la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Aguirre Bahena (2007).

A grandes rasgos se observa una alta variabilidad de los flujos de materia particulada hacia el fondo y eventos específicos de alto flujo de masa total (Figura 39). Algunos de estos fueron relacionados a los huracanes Ignacio (24-26 de agosto de 2003) y Marty (21-23 septiembre de 2003), así como otro de menor importancia que fue el huracán Henriette (4-5 de septiembre de 2007). Es de esperarse que los huracanes fueran los eventos que mayor flujo de masa aporten al material en hundimiento de la Bahía de La Paz, sin embargo no fue así, ya que los flujos más elevados de todo el periodo 2002-2008 corresponden a un florecimiento de silicoflagelados (diciembre de 2007) reportado por Álvarez Gómez (2010) para el material particulado en hundimiento de la misma trampa sedimentaria que la usada en este estudio. Otro evento de florecimiento planctónico (junio y julio de 2002) de destacarse es el reportado por Aguirre Bahena (2007), quien encontró una alta cantidad de materia orgánica en forma de restos de organismos muertos tanto silíceos como calcáreos y muy pocas partículas terrígenas (Figura 39). El autor reporta valores de sílice biogénico de hasta 99%, siendo el valor promedio de 28% (periodo enero de 2002 - mayo de 2008). Elevados flujos de nanoplancton calcáreo (cocolitofóridos) fueron encontrados en la MPH durante el paso de los huracanes Ignacio y Marty, mencionados arriba (Urcádiz Cázares, 2005). Otros eventos no fueron aun reportados debido a ausencia de estudios de componentes de materia particulada en hundimiento o columna de agua. Algunos resultados preliminares indican un importante cambio en la abundancia de especies de cocolitofóridos encontrados en otoño de 2007 (Sidón Ceseña, información personal).

8.1.2. Variabilidad de los contenidos en la MPH de los elementos-indicadores de aporte litogénico (resolución semanal-mensual)

Escandio

La serie de tiempo de 2002-2008 del contenido de escandio en la MPH de Cuenca Alfonso se presenta en la Figura 40. Los mayores contenidos se registraron al pasar los huracanes Ignacio (24-26 de agosto de 2003) y Marty (21-23 de septiembre de 2003), así como elevados valores corresponden al periodo del paso del huracán Henriette (4-5 de

septiembre de 2007). Los eventos de energicos huracanes indudablemente afectaron la composición de la MPH. Sin embargo elevados contenidos de este elemento prevalecieron durante todo el periodo muestreado y fueron especialmente elevados en otoño de cada año, sin alguna influencia fluvial o de precipitación registrada. Por lo tanto los elevados valores probablemente se deban al aporte eólico que se da durante los fuertes vientos del noroeste, que actúan en otoño-invierno.

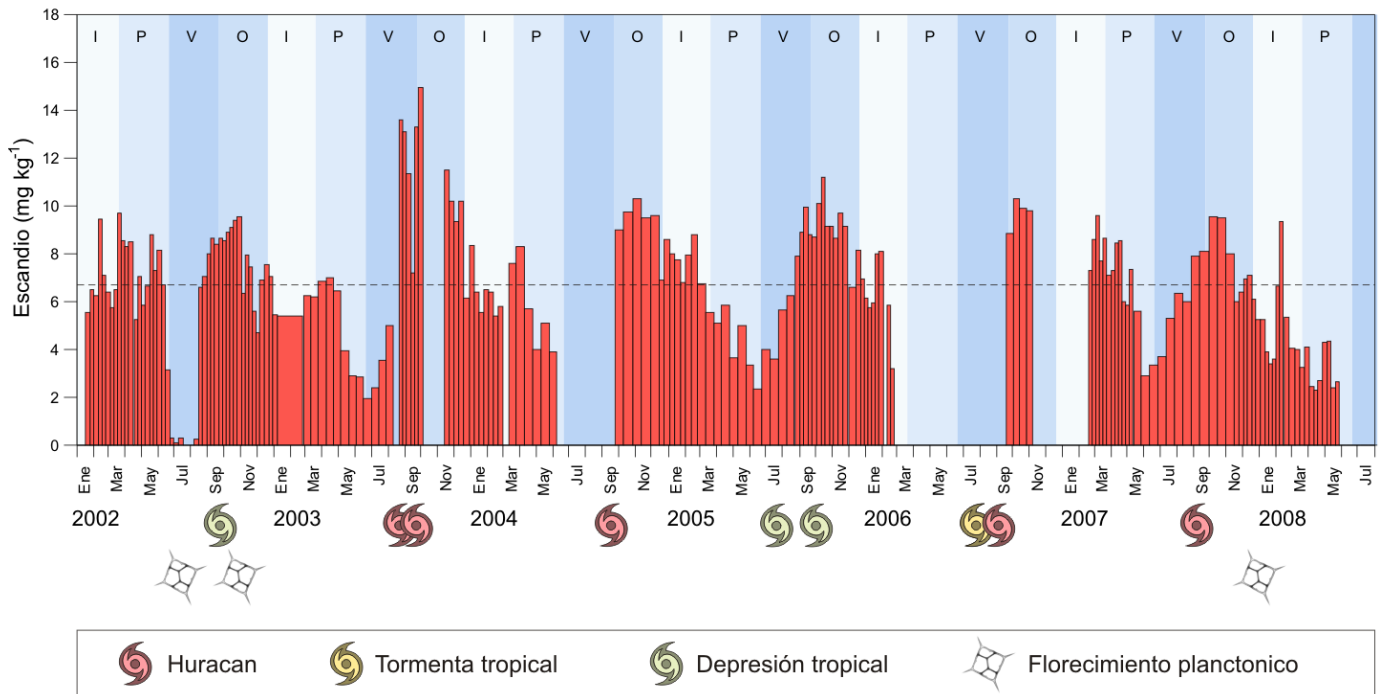


Figura 40. Contenido de Sc en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008).

8.1.3. Variabilidad de los contenidos en la MPH de los elementos indicadores de aporte biogénico (resolución semanal-mensual)

Calcio biogénico

Los contenidos de Ca biogénico para la serie de tiempo 2002-2008 en la MPH se presentan en la Figura 41. El cálculo de calcio biogénico permite refinar los valores de Ca

total, reduciendo la posible contribución de silicato de calcio terrígeno y dejando solo el calcio originado por organismos. Los mayores contenidos corresponden con el florecimiento planctónico reportado por Aguirre Bahena (2007) para el periodo de junio-julio de 2002. A su vez se presentan una serie de picos de altos valores en primavera de 2003 y verano-otoño de 2005. Las variaciones temporales del contenido de Ca biogénico en la MPH a veces corresponden a los cambios en los regímenes de aumento y disminución de temperatura superficial en la Bahía de La Paz, lo cual ocurre anualmente (Aguirre Bahena, 2007). Se trató de correlacionar con el Índice Oceánico del Niño (ONI), encontrando poca correlación, ya que las tendencias de cambios de temperaturas globales parecen no afectar a la bahía debido a que es separada por un umbral batimétrico del Golfo de California.

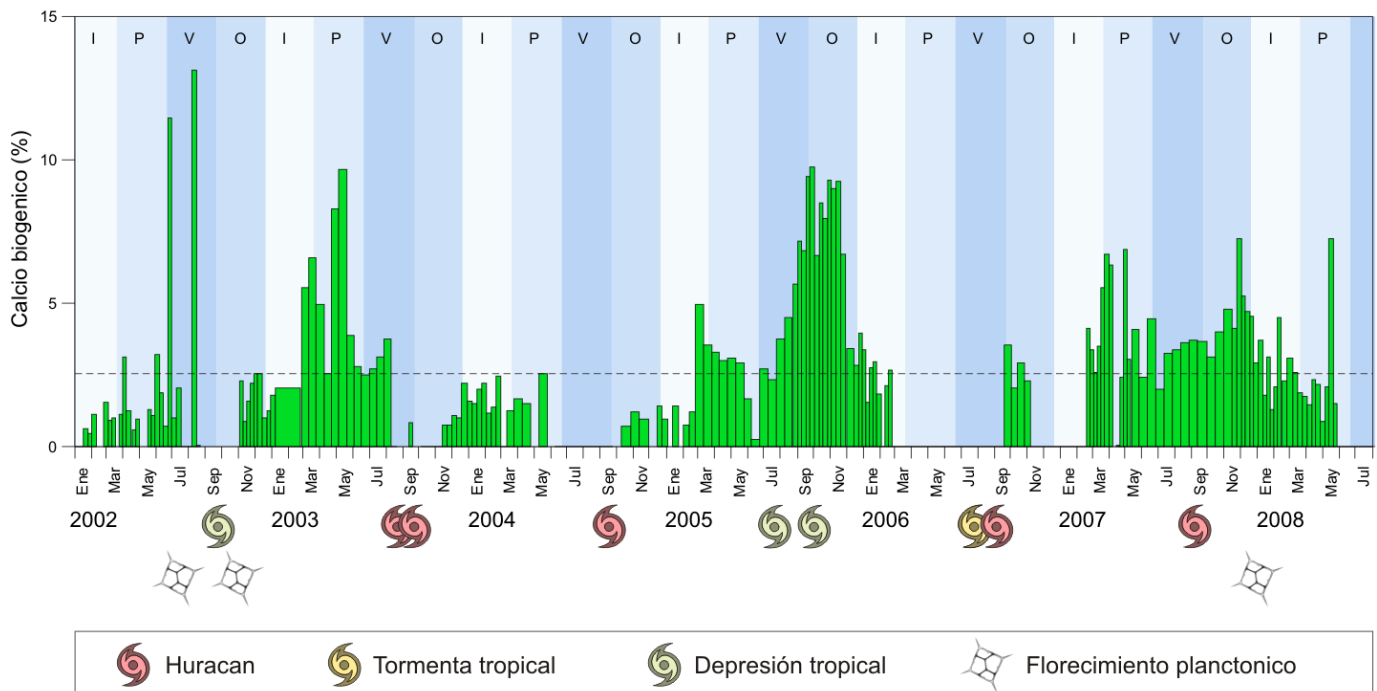


Figura 41. Contenido de Ca_{biog} en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008).

8.1.4. Variabilidad de los contenidos en la MPH de los elementos formados autigenamente en la columna de agua (resolución semanal-mensual)

Uranio

La variabilidad de los valores de uranio en el material particulado para la serie de tiempo 2002-2008 se presentan en la Figura 42. El mayor contenido (junio de 2002) corresponde con el evento de florecimiento planctónico reportado por Aguirre Bahena (2007). Valores elevados se detectaron en mayo de 2007 y 2008, sin embargo no fueron asociados a algún florecimiento registrado.

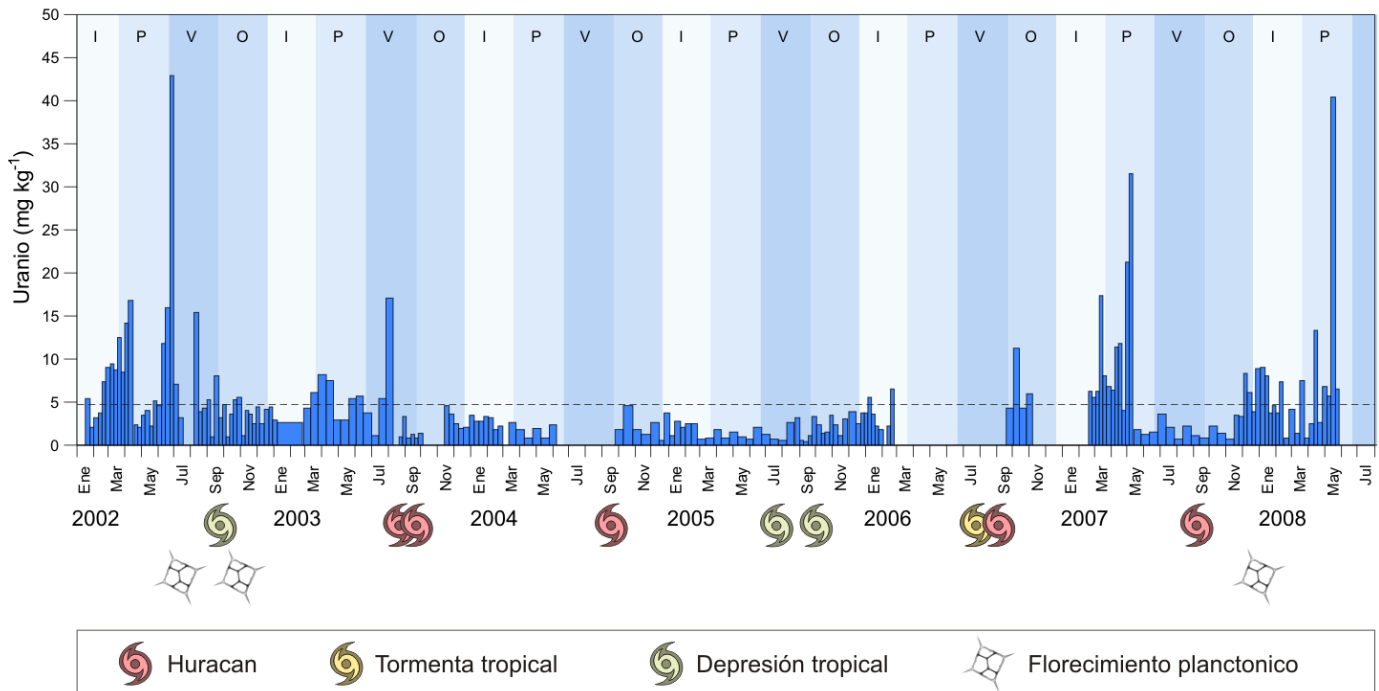


Figura 42. Contenido de U en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008).

La tendencia del uranio a asociarse a materia orgánica y productividad primaria fue encontrada por diversos autores en otras regiones (Klinkhammer y Palmer, 1991). En la trampa de Cuenca Alfonso (Figura 41) se observa cierta relación entre los valores

elevados de calcio en junio de 2002 y mayo de 2008, el primero concordando con un florecimiento planctónico. Otra causa de enriquecimiento de este elemento puede ser la formación de partículas autógenas debido a un incremento de la productividad primaria en aguas oceánicas intermedias por la utilización de oxígeno disuelto en el proceso de remineralización de partículas en hundimiento (Klinkhammer y Palmer, 1991;

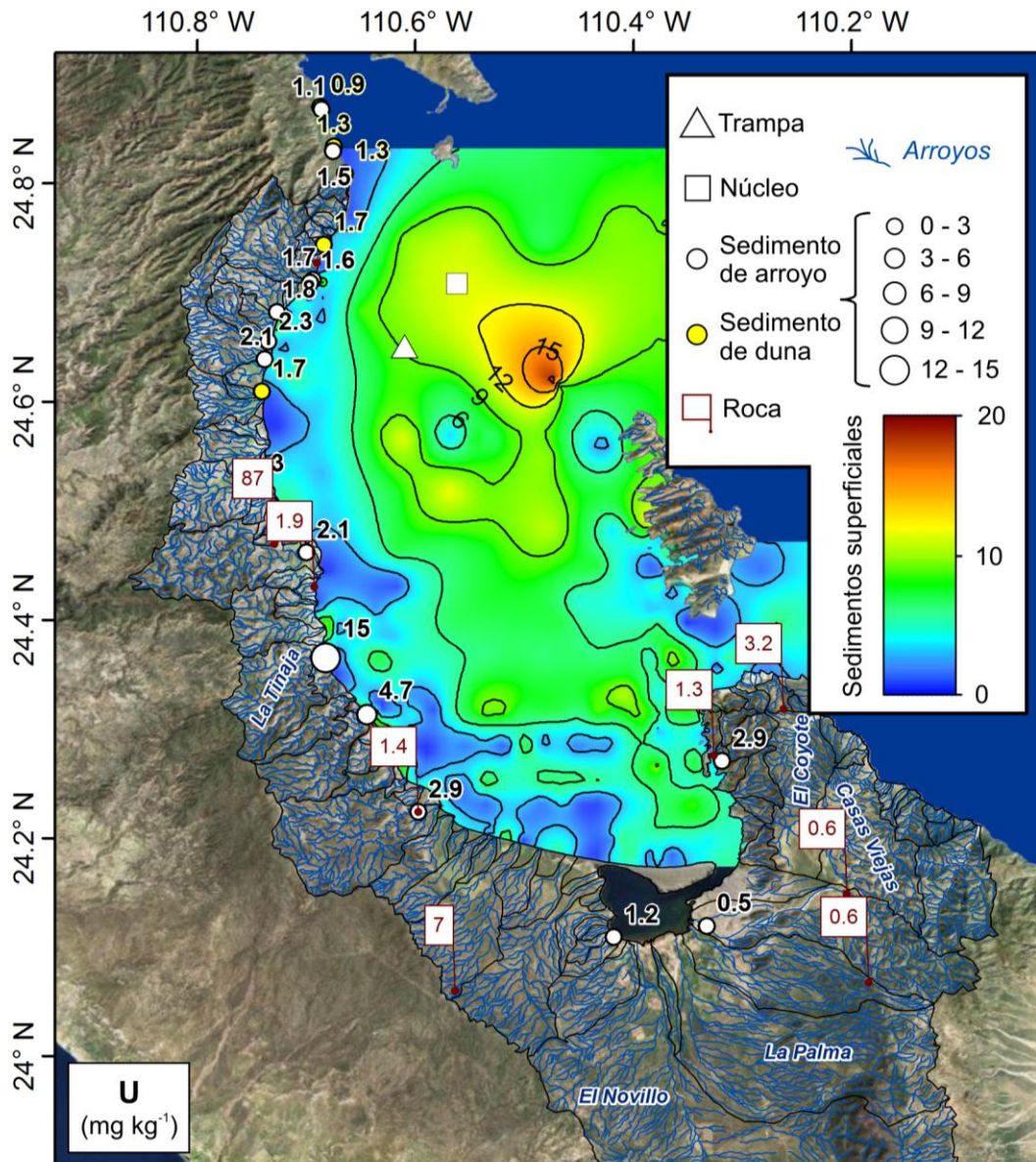


Figura 43. Contenido de uranio en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje, así como en sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz (datos de Rodríguez Castañeda, 2002).

Huerta-Diaz y Morse, 1992; Sarin et al., 2000; Böning et al., 2004, 2009). Esta ausencia de oxígeno en la columna de agua ocasiona que el uranio se reduzca de su forma típicamente disuelta (anión uranil-tricarbonato $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$) con un estado de oxidación +6 a su forma menos soluble con un estado de oxidación de +4, la cual tiene a formar partículas y acumularse en sedimentos, como lo que ocurre en los márgenes de Perú (Ku et al., 1977; Klinkhammer y Palmer, 1991; McManus et al., 2006) o en el Mar Negro (Anderson et al., 1989). Durante los cruceros oceanográficos a Cuenca Alfonso de este estudio fueron realizadas mediciones de oxígeno disuelto en la columna de agua y muestran condiciones suboxicas a partir de los 100-200 m (Figura 24). Sin embargo no existe un registro continuo de la variabilidad de la concentración de oxígeno durante la serie de tiempo muestreada, por lo cual no hay suficiente fundamento para aceptar o rechazar esta hipótesis. Una de las evidencias par tal enriquecimiento autógeno la distribución de uranio en los sedimentos de fondo de la Bahía de La Paz (Figura 43), la cual muestra mayores valores en las partes más profundas de la Cuenca Alfonso (Rodríguez Castañeda, 2002) y menores valores en la parte somera. Esto probablemente sea por el efecto de reducción de uranio de su fase disuelta a particulada que se ve reflejado en los sedimentos.

8.1.5. Variabilidad de los contenidos en la MPH de los elementos con aportes mixtos (resolución semanal-mensual)

Arsénico

Los cambios de los contenidos de arsénico en el tiempo en el material particulado de Cuenca Alfonso se presentan en la Figura 44. Los mayores contenidos de As en la MPH, al igual que con el Ca_{biog} y U corresponden con el florecimiento reportado por Aguirre-Bahena (2007) con valores de sílice biogénico de hasta 99% encontrados para junio y julio de 2002.

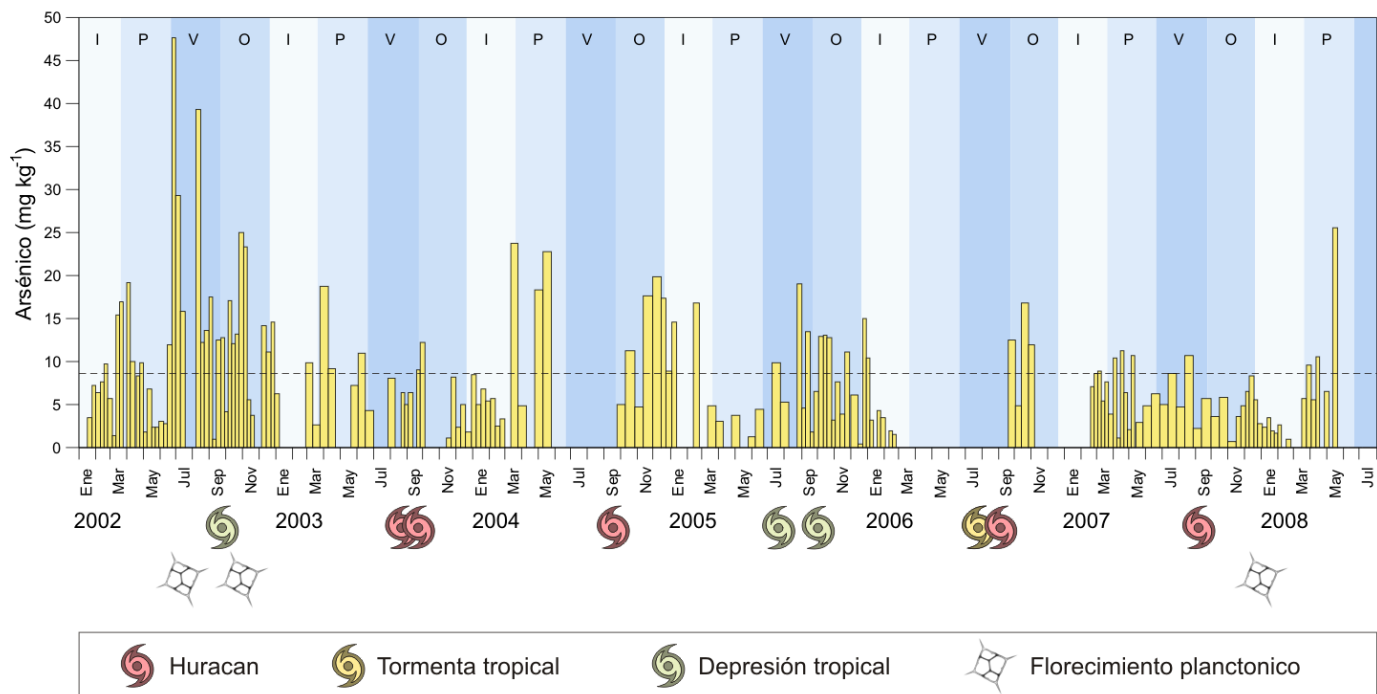


Figura 44. Contenido de As en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008).

Por un lado el arsénico en Cuenca Alfonso parece responder a los eventos con mucha materia orgánica y elevado uranio. Un mecanismo de transporte de As disuelto hacia el fondo puede ser a través de su captura por el fitoplancton, siendo este elemento un análogo de P y algunas especies de organismos incapaces de distinguir entre ambos elementos, incorporándolo dentro de sus tejidos (Bruland, 1983). Por otro lado este elemento es redox-sensible, al igual que el uranio, presentándose en forma de (hidr)oxoaniones en condiciones óxicas y ser absorbido a óxidos metálicos y otras partículas en condiciones subóxicas y anóxicas (Böning et al., 2004, 2009; Brumsack, 1989; McManus et al., 2006). Debido a que la cuenca estudiada en el presente trabajo demuestra tener condiciones subóxicas a partir de 100-200 m (Figura 24) una de las fuentes de As particulado puede ser el proceso mencionado arriba. Por último, algunas

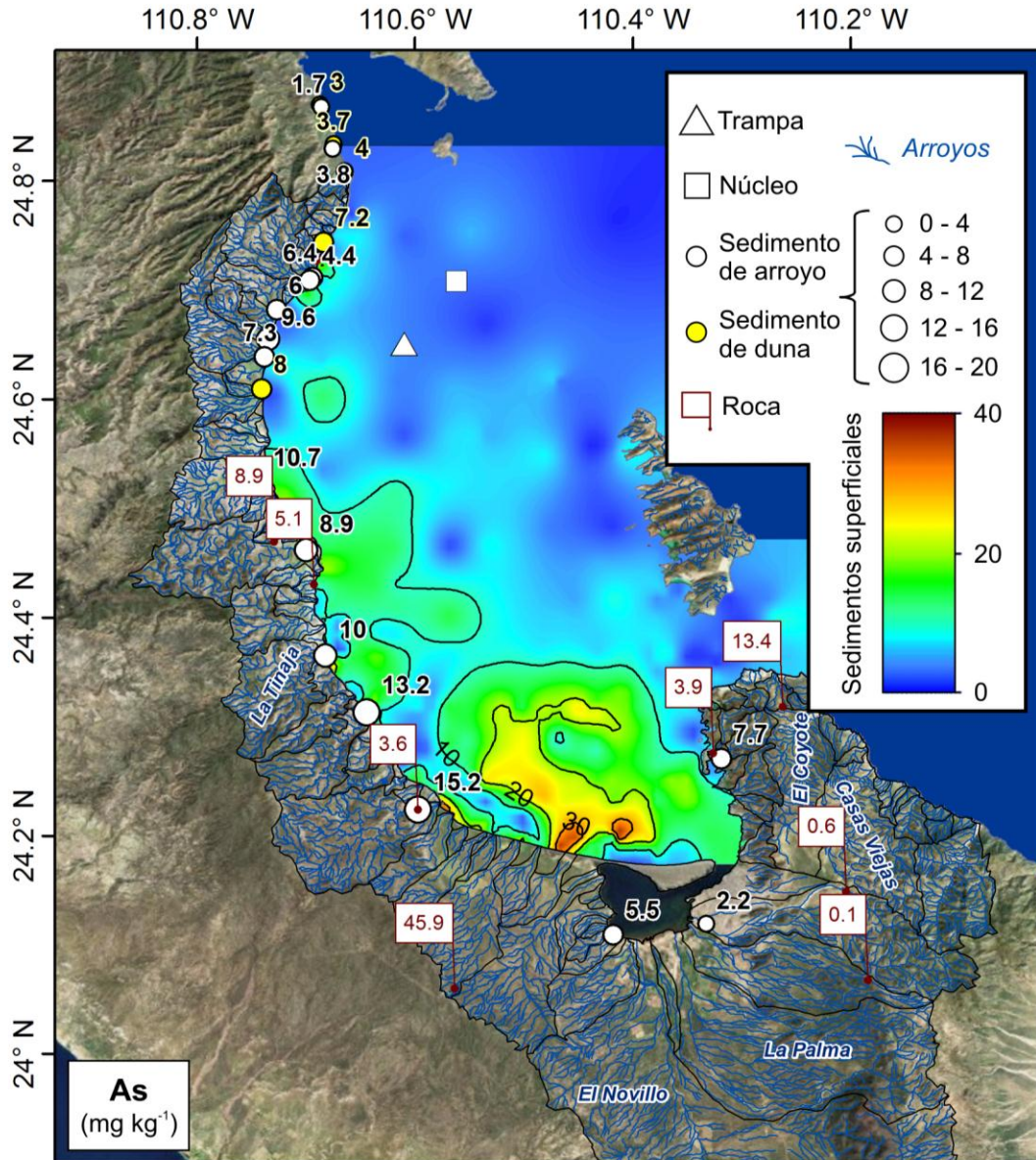


Figura 45. Contenido de arsénico en rocas, sedimentos de arroyo y duna de la cuenca de drenaje, así como en sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz (datos de Rodríguez Castañeda, 2002).

fluctuaciones de elevados valores de arsénico desde 2002-2008 para la Bahía de La Paz (Figura 44) se parecen a los picos de escandio, por lo tanto otra fuente podría ser eólica durante fuertes vientos en otoño-invierno. En cuanto a los sedimentos de fondo de la bahía (Figura 45), los mayores valores se concentran en la parte sur de este cuerpo de

agua y elevados valores en la parte sudoccidental. Esto no se podía explicar anteriormente sin contar con la geoquímica de las rocas de la región (Rodríguez Castañeda, 2002). La composición de las rocas de la Formación Lomas de la Virgen, especialmente el contenido de arsénico, puede ser la explicación para tales elevados valores de este elemento en la bahía. Otra fuente podría ser un flujo de agua subterránea, sin embargo este aporte aún no se ha evaluado.

8.1.6. Variabilidad de lantánidos (resolución semanal-mensual)

Los patrones de lantánidos normalizados con lutita norteamericana (NASC) para muestras obtenidas en periodos de eventos importantes son presentados en la Figura 46. Era de esperarse que los eventos de diferente naturaleza mostraran patrones drásticamente diferentes, pero no fue así. A grandes rasgos se puede concluir que los lantánidos en el MPH de Cuenca Alfonso para eventos extraordinarios de huracanes Ignacio y Marty, florecimientos planctónicos y supuestos periodos de fuerte aporte eólico (fuertes vientos

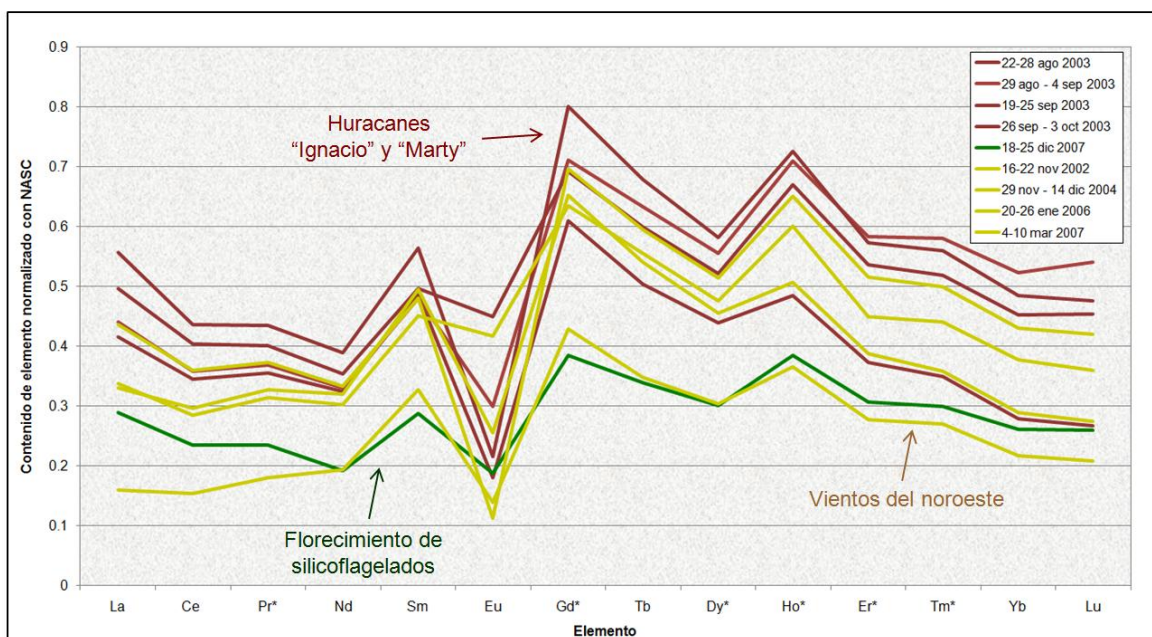


Figura 46. Patrones de lantánidos normalizados con lutita norteamericana para eventos extraordinarios desde 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008).

del noroeste y elevado contenido de Sc y Fe) tienen patrones similares, por lo cual se podría decir que el material terrígeno traído por eventos al parecer tiene una fuente muy similar. Sin embargo el periodo correspondiente al florecimiento de silicoflagelados (18 al 25 de diciembre de 2007) presenta menores contenidos de todos los lantánidos, lo cual puede ser un efecto de dilución con otros componentes de origen biogénico y autógeno.

Las razones La/Yb normalizadas con lutita norteamericana para la MPH de Cuenca Alfonso desde 2002 a 2008 se presentan en la Figura 47. Se puede distinguir que el patrón no fue tan claro como el de la MPH de algunas otras regiones (Otosaka y Noriki, 2000; Otosaka et al., 2004a), sin embargo se parece en algunos casos a las variaciones del contenido de Sc (Figura 40). Valores ligeramente mayores a veces corresponden con los eventos de huracanes, sin embargo no siempre es así. Los mayores valores de la razón La/Yb correlacionan con los eventos de vientos intensos, especialmente marcado

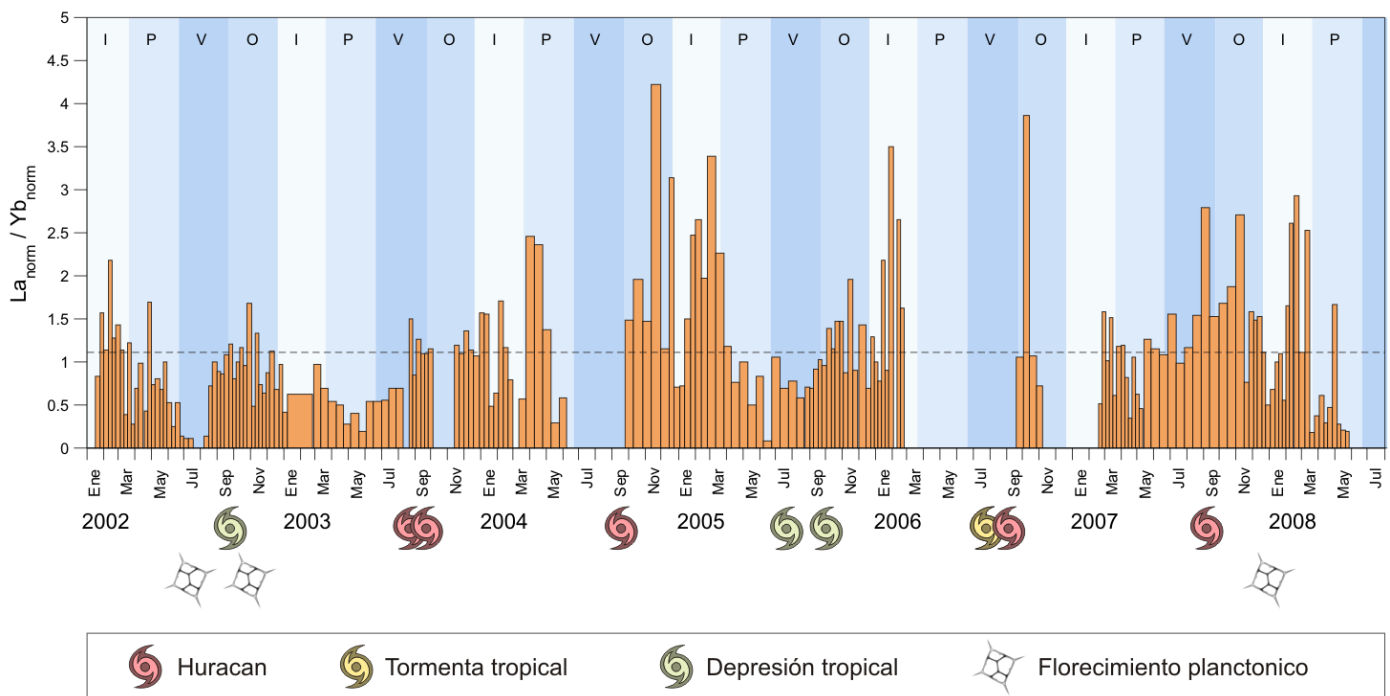


Figura 47. Razones La/Yb normalizadas con lutita norteamericana (NASC) en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008).

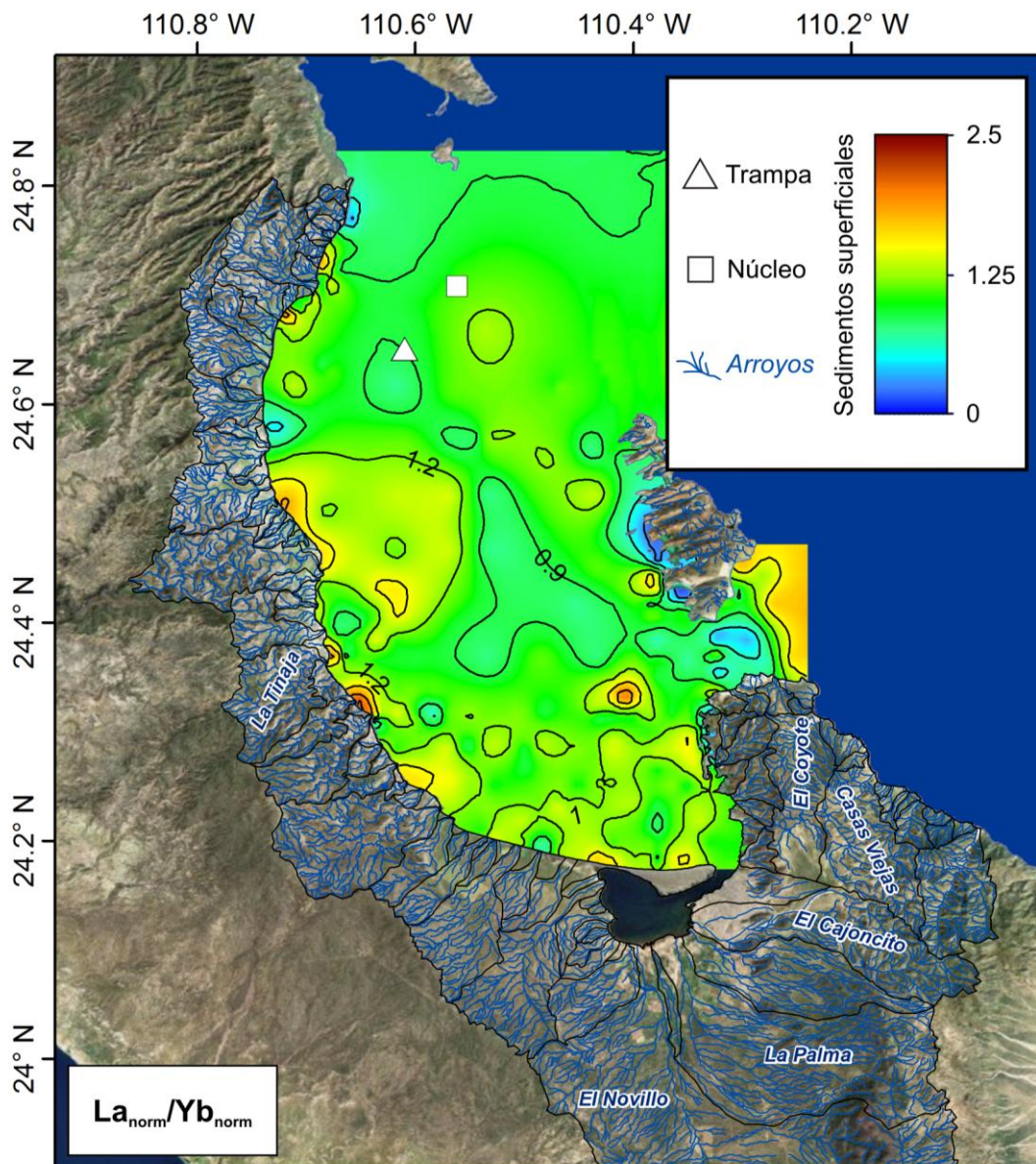


Figura 48. Razones La/Yb normalizadas con lutita norteamericana (NASC) en sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz (datos de Rodríguez Castañeda, 2002).

para noviembre de 2004. Esto puede indicar una diferenciación entre aporte local, tanto eólico como fluvial, y el aporte eólico de mayor distancia. La composición de las partículas terrígenas de fuentes cercanas debería de reflejar la mineralogía de las rocas que afloran alrededor, a diferencia de las partículas traídas desde lejos, que a su vez representarían rocas o desiertos de las regiones, desde las cuales fueron movidas.

Las anomalías de Eu normalizado con lutita NASC de las partículas en hundimiento de Cuenca Alfonso de 2002-2008 se presentan en la Figura 49. Al parecer existen ciertas variaciones de los valores, las cuales no muestran un patrón muy claro, sin embargo a veces las anomalías ligeramente positivas coinciden con alto contenido de Sc reportado para supuestos eventos de aporte eólico, concordando con fuertes vientos del noroeste. Por otro lado, la mayor anomalía positiva ocurrió en abril de 2009, lo cual correspondió a un periodo en el cual los contenidos de U y As fueron elevados. Este evento podría indicar un aporte hidrotermal o geotermal que pudo haber influenciado el material particulado. Una mancha de anomalía positiva de Eu fue encontrada en la parte costera, cerca de la posición de la trampa, para los sedimentos de fondo de la bahía (Rodríguez Castañeda, 2002), lo que se presenta en la Figura 50. Posiblemente pueda ser una zona de salidas de agua subterránea mezclada con las aguas geotermales o hidrotermales, especialmente debido a la existencia de fallas geológicas muy cercanas. Sin embargo por otro lado puede

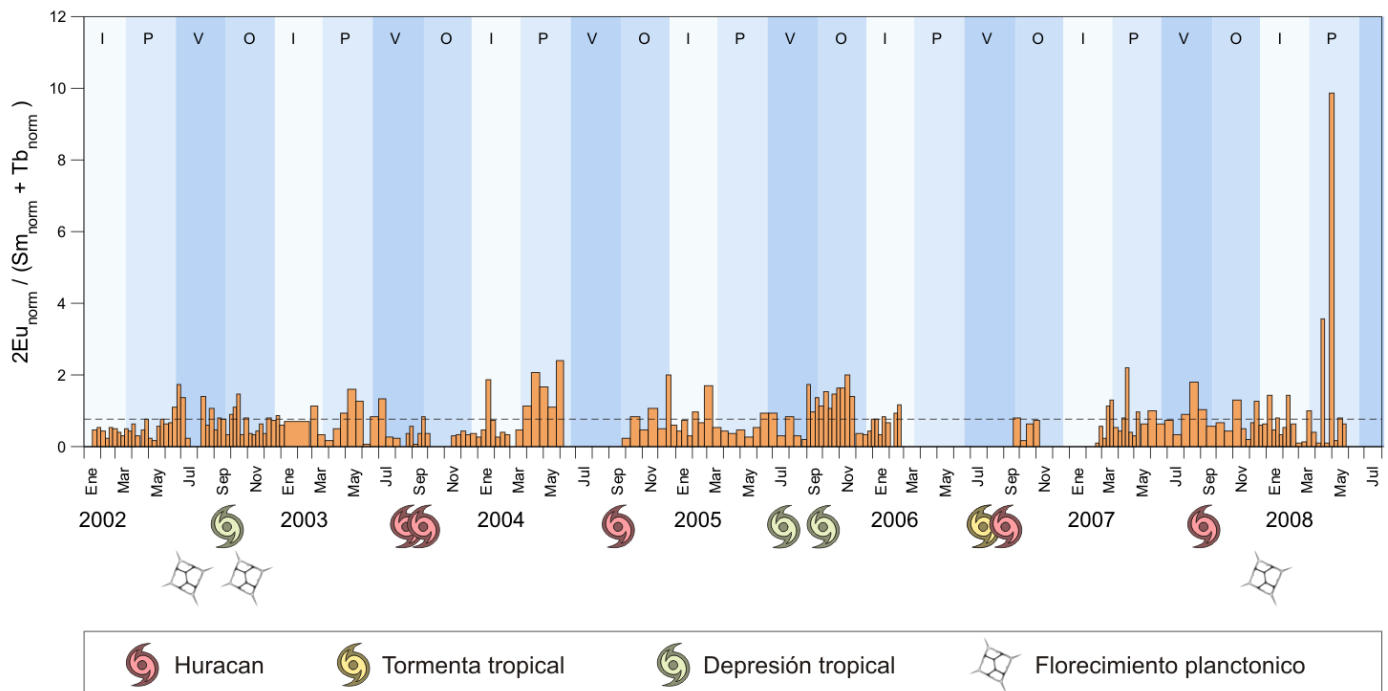


Figura 49. Anomalías de Eu normalizado con lutita norteamericana (NASC) en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso del 2002 al 2008, donde los datos del periodo 2002-2005 fueron tomados de Rodríguez Castañeda (2008).

ser un aporte de algún evento extraordinario de tormenta de polvo que pudo traer material particulado con diferente composición a la cuenca. Contribuciones hidrotermales y geotermiales son comunes a lo largo de toda la zona tectónicamente activa del Golfo de California por ejemplo en Bahía Concepción (Rodríguez-Meza et al., 2009; Leal-Acosta et al., 2010) y Cuenca Wagner (Canet et al., 2010). Aun así no existen datos de ^{222}Rn que podrían evidenciar tales aportes en la región.

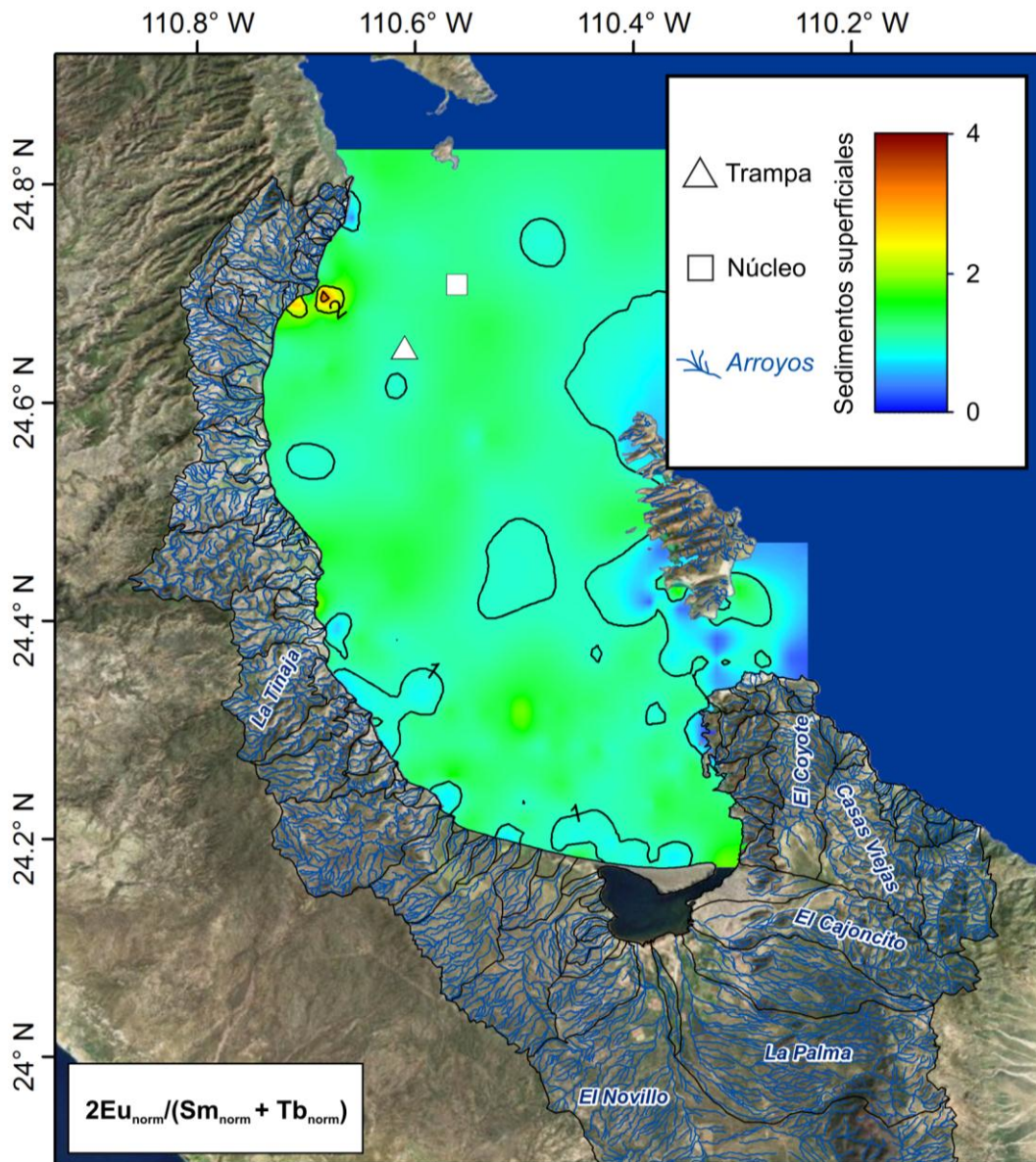


Figura 50. Anomalías de Eu normalizado con lutita norteamericana (NASC) en sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz (datos de Rodríguez Castañeda, 2002).

8.1.7. Aspectos generales de la variabilidad de la composición de materia particulada en hundimiento

Una gran parte de las series de tiempo de MPH obtenidas en todo el mundo por varios autores, incluyendo el presente estudio, muestran alta variabilidad temporal de la composición y flujos de elementos particulados (Huang y Conte, 2009; Ootosaka y Noriki, 2000; Ootosaka et al., 2004a, 2004b; Rodríguez Castañeda, 2008). Una clara estacionalidad fue encontrada para regiones de alta latitud, las cuales tienen un definido cambio entre cada una de las estaciones del año (Kuss y Kremling, 1999). El deshielo primaveral genera la mayor carga sedimentaria, llevando elementos disueltos y particulados a los márgenes oceánicos (Jeandel et al., 2011). La mezcla vertical estacional en la parte superior del océano permite que se dispare la diversidad planctónica en forma de florecimientos, proporcionando micronutrientes a las partículas en hundimiento durante otoño y primavera (Kuss y Kremling, 1999; Pohl et al., 2004). Comparando esta idea con los resultados de la trampa sedimentaria en Cuenca Alfonso, la productividad biológica no siempre correspondió con los mayores picos de contenidos y flujos de calcio y bio-calcio en la Bahía de La Paz, sin embargo algunos de estos ocurrieron durante primavera y otoño, lo cual es en acuerdo con lo encontrado para estudios anteriores. En regiones de latitudes más bajas, con clima subtropical, dichos efectos estacionales son menos pronunciados que en las regiones frías. Fuertes lluvias monsonales también aportan partículas terrígenas desde el continente al océano adyacente (Sarin et al., 2000), así como intensifican la productividad planctónica, como fue el caso de los florecimientos de radiolarios en la parte sur de Bahía de Bengala, Océano Índico nororiental (Gupta et al., 2002; Ittekkot, 1991). Vientos monsonales, por otro lado, pueden provocar surgencias costeras, lo que fue encontrado en el Mar Árabe, haciendo que aumente a su vez la sedimentación biogénica de ópalo particulado y carbonato de calcio (Balakrishnan Nair, 2006; Haake et al., 1993; Honjo et al., 1999). Cambios estacionales de la fuente de aporte de material continental pudo ser encontrada en las regiones climáticas cercanas al Mar del Japón (Nagaoka et al., 2010; Ootosaka y Noriki, 2000; Ootosaka et al., 2004a, 2004b), donde una de las contribuciones viene del material eólico del desierto de Gobi (Mongolia Interior) y la otra de detritos sedimentarios de las Islas de Japón y el arco Kuril-Kamchatka, tanto

recientemente erosionados, como más antiguos, pero resuspendidos que fueron transportados fluvialmente. Estas dos fuentes alternan una con la otra durante todo el año. Diferiendo de otras latitudes, la materia particulada en hundimiento de las regiones ecuatoriales y subecuatoriales tiene una variabilidad estacional menos expresada, presentando patrones no regulares a través del año (Huang y Conte, 2009). En zonas climáticas secas semiáridas y áridas, los mayores flujos de elementos particulados y contenidos en la SPM son controlados por eventos episódicos como son los ciclones tropicales (Huang y Conte, 2009; Rodríguez Castañeda, 2008), fuertes sismos (Hsu et al., 2004), tormentas de polvo (Jickells et al., 1984, 1998) y florecimientos fitoplanctónicos (Rodríguez Castañeda, 2008). En dichas regiones estacionalidades anuales claras no fueron encontradas tanto por otros autores (Silverberg et al., 2004; 2007, 2008; Thunell, 1998; Rodríguez Castañeda, 2008), como en el presente estudio. Sin embargo, una ciclicidad de mayor escala fue reportada para los componentes biogénicos de la MPH de la Cuenca Guaymas, Golfo de California y la Cuenca San Lazaro (Soledad) en frente de la costa del Pacífico de la península de Baja California, influenciado por las condiciones oceanográficas ENSO y PDO (Silverberg, 2004; Thunell, 1998, Ziveri y Thunell, 2000). Estos fenómenos se manifestaron en las magnitudes de los flujos de sílice biogénico y carbonatos, la razón entre los cuales cambió de un año a otro (Thunell, 1998). En el caso del área de estudio del presente trabajo (Bahía de La Paz) casi no se encontró relación con dichos fenómenos climáticos, con excepción de los florecimientos a mediados y finales de 2002, durante los cuales se colectaron en la trampa muestras con altos contenidos de calcio y bio-calcio (Aguirre Bahena, 2007, Rodríguez Castañeda, 2008). Aparte de esto durante todo el periodo (2002-2008) no se detectó en los indicadores de aporte terrígeno o biogénico (Sc y Ca, respectivamente) alguna relación clara con la variabilidad de “El Niño”, ni la “Oscilación Decadal del Pacífico”. Lo anterior probablemente debido a la existencia de una barrera batimétrica que impide que aguas más profundas del Golfo de California sean intercambiadas con la Bahía de La Paz y alteren sus condiciones oceanográficas (Aguirre Bahena, 2007).

Algunos de los eventos específicos que influenciaron la composición de MPH y flujos de elementos particulados en otras cuencas a lo largo del mundo, así como la del área de estudio, se discuten con más detalle a continuación.

8.1.8. Impacto de ciclones tropicales en la composición y flujos de elementos particulados

La entrada de material terrígeno al mar durante eventos de ciclones tropicales es sumamente importante en áreas secas, como la de la bahía del presente estudio. La variabilidad temporal de los contenidos de los elementos indicadores de aportes terrígenos (Al, Fe y Sc) depende principalmente del clima, el cual a su vez es directamente relacionado con la cantidad de lluvia (Rodríguez Castañeda, 2008). En regiones secas la precipitación pluvial es casi siempre ocasionada por el paso de ciclones tropicales. Esta es una situación diferente que en la de latitudes mayores, como la Cuenca Gotland, donde

Tabla 7. Ciclones tropicales importantes que han pasado cerca del área de estudio durante el periodo 2002-2008.

Numero	Nombre	Categoría más cercana al área de estudio	Fecha	Día más cercano al área de estudio
1	Iselle	DT	15-20/septiembre/2002	19/sep/2002
2	Ignacio	H	22-27/agosto/2003	26/agosto/2003
3	Marty	H	18-24/septiembre/2003	22/septiembre/2003
4	Javier	H	10-19/septiembre/2004	18/septiembre/2004
5	Eugene	DT	18-20/julio/2005	20/julio/2005
6	Otis	DT	28/septiembre/2005 - 3/octubre/2005	3/octubre/2005
7	Emilia	TT	21-28/julio/2006	26/julio/2006
8	John	H	28/agosto/2006 - 4/septiembre/2006	2/septiembre/2006
9	Henriette	H	30/agosto/2007 - 6/septiembre/2007	5/septiembre/2007

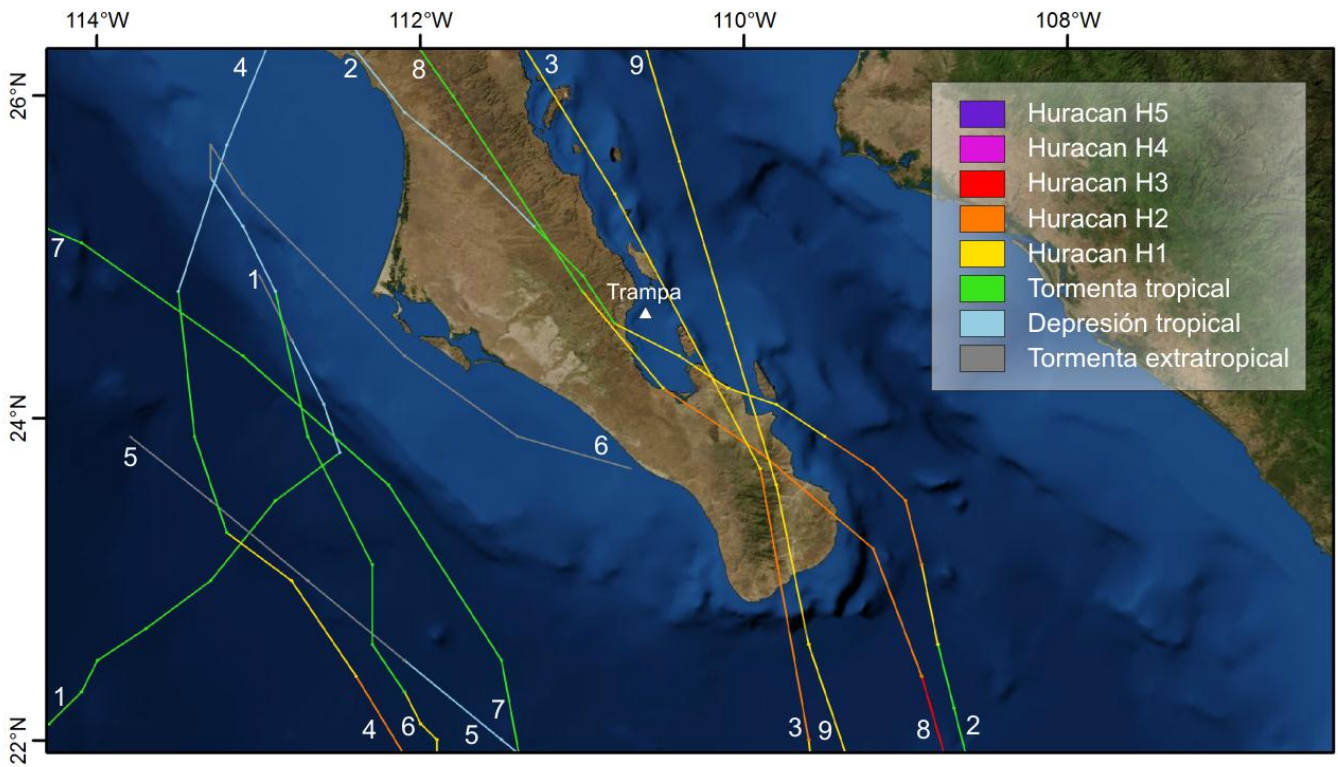


Figura 51. Trayectorias de los ciclones tropicales más importantes que han pasado cerca del área de estudio durante el periodo 2002-2008. Su numeración corresponde con la de la Tabla 7.

altas contribuciones de material terrígeno fueron encontradas en invierno, durante un año muestreado (Pohl et al., 2004). En Cuenca Alfonso no todos los ciclones tropicales trajeron suficiente cantidad de lluvia, necesaria para que los arroyos de las cuencas de drenaje se volvieran ríos temporales y trajeran material erosionado a la bahía (Tabla 7, Figura 51).

Algunos de ellos, especialmente los huracanes Ignacio (24-26 de agosto de 2003) y Marty (21-23 de septiembre de 2003) que trajeron elevados valores de Sc a la cuenca, fueron de mayores categorías que otros ciclones tropicales reportados para el periodo 2002-2008, y trajeron más lluvia al pasar por la zona de este estudio (Rodríguez Castañeda, 2008, Silverberg et al., 2007, 2008). Para 2002-2005 se encontró una gran contribución (más de 70%) de elementos terrígenos (Al, Fe, Sc y otros) durante estos eventos, comparando con el promedio anual (Rodríguez Castañeda, 2008), lo cual resalta la importancia de estos dos eventos episódicos. Los datos de la serie de tiempo de Cuenca Alfonso permiten considerar que los eventos de huracanes deben de ser tomados

en cuenta al interpretar registros paleoceanográficos de cambios climáticos del pasado. Una fuerte influencia por huracanes fue encontrada en el Mar de los Sargazos, localizado una zona climática similar a la del presente estudio, donde el paso del huracán Fabián alteró la composición de la MPH, disminuyendo los contenidos de la mayor parte de los elementos, debido a la dilución con carbonatos ricos en Mg, traídos del arrecife coralino de las Islas Bermudas (Huang y Conte, 2009).

¿Afectaron de alguna forma los elevados aportes de materia orgánica e inorgánica al ecosistema de la Bahía de La Paz? Se encontró que al pasar los huracanes Ignacio y Marty, aumentó la abundancia de cocolitofóridos en la materia particulada en hundimiento, colectada con la misma trampa que la del presente estudio, así como se amplificaron los flujos de estos organismos a la Cuenca Alfonso (Urcádiz Cázares, 2005). Esto, sin embargo, no fue reflejado en los contenidos de calcio y calcio biogénico en las partículas en hundimiento; solamente los flujos de dichos elementos particulados fueron ligeramente elevados durante estos huracanes (Rodríguez Castañeda, 2008). Diferiendo del caso del huracán Fabián en el Mar de los Sargazos (Huang y Conte, 2009), un transporte de sedimentos calcáreos durante los instantes con huracanes desde los márgenes de la Isla Espíritu Santo (Bahía de La Paz) no fue detectado en la trampa sedimentaria de este estudio. Los contenidos de carbono orgánico y sílice biogénico no fueron afectados de gran manera, a diferencia de sus flujos, que sí presentaron un ligero aumento (Aguirre Bahena, 2007). Las razones de isótopos estables ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$) no mostraron valores anómalos durante estos huracanes (Aguñiga et al., 2010). Más estudios ecológicos (conteo de organismos de mayor tamaño, como diatomeas y foraminíferos, relaciones tróficas, etc.) son necesarios para todo el periodo de tiempo muestreado por la trampa para poder establecer como exactamente los huracanes estimulan la proliferación de algunos grupos planctónicos.

8.1.9. Efecto de tormentas de polvo e aporte eólico en la variabilidad de la composición de partículas en hundimiento y flujos de elementos particulados

La importancia del transporte eólico de sedimentos en el aporte terrígeno total al Golfo de California, especialmente en su parte norte durante los eventos de tormentas del

Desierto de Sonora fue remarcado anteriormente (Baumgartner et al., 1991, Delgadillo-Hinojosa et al., 2006; Segovia-Zavala et al., 2009). Un hecho interesante fue que después de la construcción de la presa Hoover (1931-1936) en el Río Colorado, el cual se consideraba como la principal fuente de elementos particulados y disueltos al Alto Golfo, los flujos permanecieron, independientemente de la entrada reducida de agua (Carriquiry y Sanchez, 1999; Carriquiry et al., 2001; Shumilin et al., 2002). Elevados flujos de manganeso y fierro disueltos fueron encontrados en verano y otoño para el Golfo de California (Delgadillo-Hinojosa et al., 2006; Segovia-Zavala et al., 2009), así como considerables flujos de material particulado en hundimiento (Thunell, 1998). Lo anterior coincide con los elevados contenidos y flujos de escandio encontrados para el presente estudio en la Cuenca Alfonso (Figura 40), con los mayores picos en otoño, relacionados, como se comentó anteriormente, a fuertes vientos del noroeste que pudieron traer material tanto de lejos como de cerca (Figura 6). El ingreso de polvo del desierto de Sahara al ambiente marino fue detectado por trampas sedimentarias posicionadas en el Océano Atlántico subtropical, África occidental (Kremling y Streu, 1993) y Mar de los Sargazos (Jickells et al., 1998), así como hasta en los aerosoles cercanos a Florida (Trapp et al., 2010). Particularmente en el Mar de los Sargazos parte del Océano Atlántico (Jickells et al., 1998), una relativamente larga estimación del flujo de polvo eólico mediante trampa sedimentaria (desde 1978 hasta 1991) reveló los mayores aportes durante el mes de noviembre y los menores a finales de julio (Jickells et al., 1998). Los mayores contenidos del supuesto escandio eólico y flujos en la MPH colectada en el presente estudio y en trabajos anteriores de la misma trampa en la Bahía de La Paz (Aguirre Bahena, 2007; Rodríguez Castañeda, 2008; Silverberg et al., 2007, 2008) muestran un patrón muy similar al mencionado (elevado en noviembre y bajo en julio), incluyendo un pico moderado en marzo también encontrado en el Mar de los Sargazos (Jickells et al., 1984, 1998). Hasta en climas más fríos de altas latitudes, como el de la Cuenca Gotland en el Mar Báltico, picos no muy pronunciados, pero aun así notables se detectaron en la MPH entre febrero y marzo de 2000 y 2001, así como en noviembre y diciembre de 1999 y 2000. Los menores fueron reportados para primavera-verano. Dicho patrón es muy parecido al de la variabilidad temporal de escandio en Cuenca Alfonso (Figura 40). ¿Podrían estos picos de

aporte terrígeno en la Cuenca Gotland estar relacionados a entrada de partículas eólicas como fue el caso de otros estudios? Las similitudes son muy altas, sin embargo programas de monitoreo real de aerosoles cerca de las posiciones de las trampas discutidas aquí, incluyendo la del presente estudio, son evidentemente necesarios para poder aceptar o rechazar esta hipótesis.

8.1.10. Florecimientos planctónicos

El efecto de los eventos de florecimiento planctónico en la sedimentación oceánica es intensivamente estudiado por la comunidad científica (Gupta et al., 2002; Huang y Conte, 2009; Ittekkot, 1991; Noriki et al., 1985; Pohl et al., 2004). La importancia de micronutrientes, como Fe (aportado junto con otros elementos terrígenos como Sc), en la fertilización del mar fue descubierta recientemente (Duce and Tindale, 1991; Jickells et al., 2005). Este efecto ocurre principalmente en el océano abierto de características oligotróficas, donde el hierro es un elemento limitante, difiriendo de los mares costeros marginales de los que se conoce que son menos afectados por este déficit (Chester, 2003; Martin, 1992). El presente estudio en Cuenca Alfonso, por otro lado, parece ser el caso donde los florecimientos tienen poca relación con los aportes de material terrígeno (Figura 41).

Los florecimientos reportados hasta ahora parecen estar relacionados a otros factores oceanográficos y climáticos (Aguirre Bahena, 2007; Álvarez Gómez, 2010). Los mayores picos de contenidos de calcio y bio-calcio fueron muy cercanos a los florecimientos planctónicos reportados para junio y agosto de 2002, que fueron periodos con anómalamente bajos flujos de masa totales (Aguirre Bahena, 2007). El escandio anómalamente bajo encontrado durante este florecimiento, posiblemente se deba a la dilución de este elemento con componentes biogénicos como bio-SiO₂ (Figuras 40 y 41). Algo parecido fue reportado en julio y agosto de 2000 en una cuenca con clima mucho más frío en el Mar Báltico central, encontrándose la menor contribución de elementos terrígenos (Al, Fe) y elevados C_{org} y Cd, Ni y Zn biogénicos como resultado de un florecimiento fitoplanctónico de cianobacterias (Pohl et al., 2004). Los valores de uranio y arsénico en la MPH de Cuenca Alfonso fueron relativamente altos durante periodos de

floreCIMIENTO para toda la serie de tiempo (Rodríguez Castañeda, 2008). Otro florecimiento, reportado para silicoflagelados a finales de diciembre de 2007 (Álvarez Gómez, 2010), que se distinguió por el mayor flujo de masa total de todo el periodo 2002-2008 (Aguirre Bahena, 2007), ocurrió exactamente después de uno de los picos de calcio. Este comportamiento pudo ser explicado por cambios de nichos ecológicos en el ecosistema de la bahía, lo cual le permitió a los organismos silíceos dominar sobre los calcáreos en este tiempo (Aguirre Bahena, 2007). La posibilidad de una intrusión de aguas del Golfo de California no puede ser completamente descartada, especialmente después de encontrar taxas poco comunes en la Bahía de La Paz de cocolitofóridos en las muestras de trampa correspondientes a finales de diciembre de 2007 (Cortez Martínez, información personal).

Los eventos de “El Niño” y Oscilación Decadal del Pacífico parecieron no tener una influencia como la mencionada arriba en la composición y flujos de MPH de Cuenca Alfonso, difiriendo de otras partes del Golfo de California y Océano Pacífico (Silverberg, 2004; Thunell, 1998; Ziveri y Thunell, 2000). Esto debido a condiciones oceanográficas locales de la bahía, como la temperatura que parece no ser afectada por algún tipo de oscilación climática global, teniendo su propia variabilidad anual. Una excepción pueden sin embargo ser los florecimientos de julio y agosto de 2002 con alto contenidos de calcio y bio-calcio, que correspondieron a un “El Niño” de fuerza moderada (Rodríguez Castañeda, 2008)

8.1.11. Influencia de sismos

A pesar de que hubo una serie de sismos durante el muestreo (2002-2008) por ser el Golfo de California una zona tectónicamente activa (Fletcher et al., 2003), estos no fueron registrados ni en la composición de la MPH, ni en los flujos de elementos particulados en Cuenca Alfonso. Esto fue diferente a lo encontrado en la cuenca trasarco de Okinawa, al noreste de Taiwan, donde se encontró una buena correlación los flujos de MPH y la ocurrencia de terremotos, siendo el más fuerte registrado uno de 7.9 de Magnitud Richter (Hsu et al., 2004).

8.1.12. Reflexiones conclusivas acerca de la variabilidad de la composición de la materia particulada en hundimiento

El estudio de la larga serie de tiempo de Cuenca Alfonso permite darnos cuenta de la real complejidad de las causas de la variabilidad de contenidos de partículas en hundimiento y flujos. Cabe destacar que la aparente ciclicidad encontrada y concluida por otros autores puede solo reflejar una pequeña parte de la variabilidad que puede ser completamente diferente de un año a otro. Existe una evidente necesidad de instalación de trampas a largo plazo, monitoreo constante de aerosoles y determinaciones de elementos disueltos y particulados a diferentes profundidades de la columna de agua en todo el mundo. Esto con el fin de entender mejor la ruta que recorren las partículas en su camino al fondo oceánico.

8.2. Variabilidad vertical de la composición de la columna sedimentaria (resolución decadal)

8.2.1. Aspectos generales de la variabilidad de contenidos en perfiles verticales sedimentarios

La variabilidad de la composición de los sedimentos colectados por medio de núcleos ha sido extensivamente estudiada y se encontraron tanto efectos de variabilidad local, especialmente controlados por aportes fluviales, como en algunos casos fuertes tendencias globales, especialmente en componentes biogénicos y el efecto de contribución por aerosoles globales tanto naturales (polvo mineral), como antropogénicos (productos de incineración de combustibles fósiles y desechos sólidos, entre otros). Algunos estudios fueron enfocados en caracterizar el registro geológico de los sedimentos marinos por medio de núcleos profundos de Ocean Drilling Project (escala de millones de años), mientras que la escala de cientos de años quedó estudiada con menos detalle (Kennett, 1982; Chester, 2003). Una gran parte de los investigadores, trabajando con la geoquímica de núcleos de sedimentos recientes (200 años o menos), se enfocaron en buscar la influencia antropogénica (Chow et al., 1973; Boyle et al., 1994; Brandenberger et al., 2008; Patterson, 1987; Kersten et al., 2005; Trefry y Presley, 1976) y muchos menos los que enfatizaron a procesos naturales y enriquecimientos de algunos elementos traza

(Brandenberger et al., 2008; McManus et al., 2006; Dean et al., 2004; 2006; Gorsline et al., 2000, Nameroff et al., 2002).

En diversas regiones fue posible encontrar una variabilidad estacional natural por medio de indicadores geoquímicos de aporte terrígeno y biogénico. Variaciones de titanio, un indicador de aporte terrígeno al igual que el Sc y Fe, en núcleos de la Cuenca Cariaco, costa de Venezuela, hicieron posible la reconstrucción de los últimos 14000 años del ciclo hidrológico de la parte norte de América del Sur, encontrándose los menores valores de este elemento para los periodos de sequías como el caso del “Dryas Reciente” (“Younger Dryas”) y por otro lado los mayores aportes durante el “Máximo Climático del Holoceno” (Huag et al., 2001). El mismo método fue aplicado para los últimos 2000 años de la misma cuenca, encontrando periodos de sequía que fueron evidenciados por el colapso de la civilización maya (Huag et al., 2003). Cambios en aportes de material terrígeno fueron encontrados para los últimos 140000 años el Mar Arábigo por medio de Al, Ti, K y Zr, encontrándose mayores valores de estos elementos en los periodos glaciares, durante los cuales había más precipitación (Pattan et al., 2005). También para los periodos glaciares se encontraron los menores valores de CaCO_3 a diferencia de los interglaciares durante los cuales los contenidos fueron mayores (Pattan et al., 2005). Un efecto similar fue encontrado en el núcleo de Cuenca Alfonso del presente estudio, donde las distribuciones de alternancias de Ca y Sc son en muchas ocasiones contrarias (Figura 35a y 36a).

La influencia antropogénica tanto de escala global como local en los núcleos de sedimentos marinos recientes y lagos ha sido extensivamente estudiada, encontrándose en muchas ocasiones relación con desechos de minería y fundición cercanos (Rodríguez Figueroa, 2010; Audry et al., 2004; Kersten et al., 2005) o con efectos de contaminación global con Pb por utilización de gasolina con este elemento y quema de carbón enriqueciendo el ambiente en Se (Chow et al., 1973; Boyle et al., 1994; Patterson, 1987). Por otro lado hay regiones, en las cuales los aportes globales no son tan marcados debido a patrones de circulación atmosférica, como la Cuenca San Lázaro (Soledad), donde en comparación con núcleos de otras regiones como las cuencas San Pedro, Santa Mónica y Santa Bárbara, E.U.A., no se detectó un incremento global de Pb y su disminución a partir de finales de los 60s (Chow et al., 1973). Lo mismo ocurrió en contenidos de Pb disuelto

en perfiles de la columna de agua, donde se encontraron mayores concentraciones de este elemento en la superficie del mar del Atlántico Norte a diferencia del Pacífico Sur Central que se consideró el más prístino (Patterson, 1987). Una influencia antropogénica tampoco fue detectada para la capa superficial de sedimentos del presente estudio en Cuenca Alfonso, correspondiente a los últimos 100 años. El depósito de radionúclidos como ^{137}Cs es un proceso trazador de distribución global de otros contaminantes vía eólica. En núcleos de muchas partes del mundo se encontraron picos de ^{137}Cs , el cual es un producto de fisión nuclear, originado por extensivas pruebas de explosiones atómicas en la atmósfera (60s, con pico máximo antes de la firma del tratado sobre prohibición de pruebas nucleares en la atmósfera en 1963) y accidentes como Chernobyl (1986). Esto es de hecho un método efectivo de fechamiento de sedimentos recientes (Aoyama et al., 1986; Zhang et al., 2005). Diferenciado de otros estudios, en el área del presente trabajo no se encontraron elevadas radioactividades específicas de ^{137}Cs al momento de tratar de fechar el núcleo por este método adicional. Esto da más indicios, al igual que con los valores de Pb, de que en la Bahía de La Paz y en regiones cercanas a la Península de Baja California el efecto antropogénico global no es tan importante. En algunas regiones lejanas del accidente de Chernobyl, como en Norteamérica o Asia Oriental (Japón), estudiadas por otros autores, no fue encontrado el pico tan marcado de actividad de ^{137}Cs de 1983 (Aoyama et al., 1986, Zhang et al., 2005), lo cual se debe al transporte de aerosoles y circulación de masas de aire.

Por otro lado algunos efectos locales antropogénicos fueron encontrados en núcleos a lo largo del mundo (Boyle et al., 1994, Kersten et al., 2005, Rodríguez Figueroa, 2010). La influencia de tormentas en un punto de contaminación en el Mar Báltico detectado con la parte superficial de una serie de núcleos fue observada después de que estos elevados valores de contaminantes se hayan dispersado 12 años después por una gran parte de la Bahía de Mecklemburgo semicerrada y somera, sujeta a la frecuente acción del oleaje de tormenta (Kersten et al., 2005).

Debido a las grandes diferencias entre la composición y variabilidad de núcleos en diferentes partes del mundo, es más útil comparar la composición de los sedimentos laminados de Cuenca Alfonso con la variabilidad de otros núcleos del Golfo de California y

Océano Pacífico. Los principales factores que ocasionan la variabilidad de la composición elemental en los núcleos se describe a continuación.

8.2.2. Efecto de variabilidad climática

En muchos sedimentos superficiales a lo largo del mundo, incluyendo el Golfo de California, se encontró que los cambios climáticos son los factores que de mayor forma afectan la sedimentación en las cuencas oceánicas (Baumgartner, 1991, Pérez Cruz, 2000). Una de las herramientas comúnmente usadas tanto en conchas de foraminíferos de núcleos sedimentarios como en núcleos de hielo de Groenlandia y Antártica (Petit et al., 1999; Alley et al., 1997) para reconstruir cambios de la temperatura del pasado es la razón isotópica de $\delta^{18}\text{O}$. Según estas reconstrucciones se sabe que existieron picos de inestabilidad climática del Holoceno (Petit et al., 1999; Alley et al., 1997) que también fueron reportados para núcleos del Golfo de California (Douglas et al., 2007) y en los sedimentos correspondientes a los últimos 8000 años en Cuenca Alfonso (Pérez Cruz, 2000; Pérez-Cruz, 2009; González-Yajimovich, 2007). Conteos de radiolarios indicaron cambios climáticos importantes durante el Holoceno (Pérez Cruz, 2000). Para el mismo núcleo que el presente estudio se realizó un conteo de silicoflagelados, encontrando variabilidad de la abundancia de especies de estos organismos (Álvarez Gómez, 2010). Un conteo de organismos calcáreos no se ha realizado para sedimentos de Cuenca Alfonso, sin embargo los valores del presente estudio de calcio en el núcleo C44 parecen tener periodos de variabilidad. Al parecer existe una relación con los periodos más cálidos (inferidos del modelo ERSST de la NOAA) y elevados valores de calcio (Figura 52). Algo similar fue encontrado para el CaCO_3 en los núcleos del Mar Árabe, donde existe una clara relación con temperatura reconstruida por $\delta^{18}\text{O}$ en foraminíferos (Pattan et al., 2005). De lo que se observó tanto en la MPH como en el núcleo de Cuenca Alfonso, es que al parecer el calcio total tiene un origen casi completamente biogénico, por lo cual se puede inferir que es controlado por la vida de organismos calcáreos. Estos organismos, especialmente foraminíferos, prevalecen en condiciones cálidas, ya que es más fácil formar conchas precipitando CaCO_3 con mayor temperatura. La tendencia al aumento de calcio observada a grandes rasgos en el núcleo de este estudio, fue también observada en

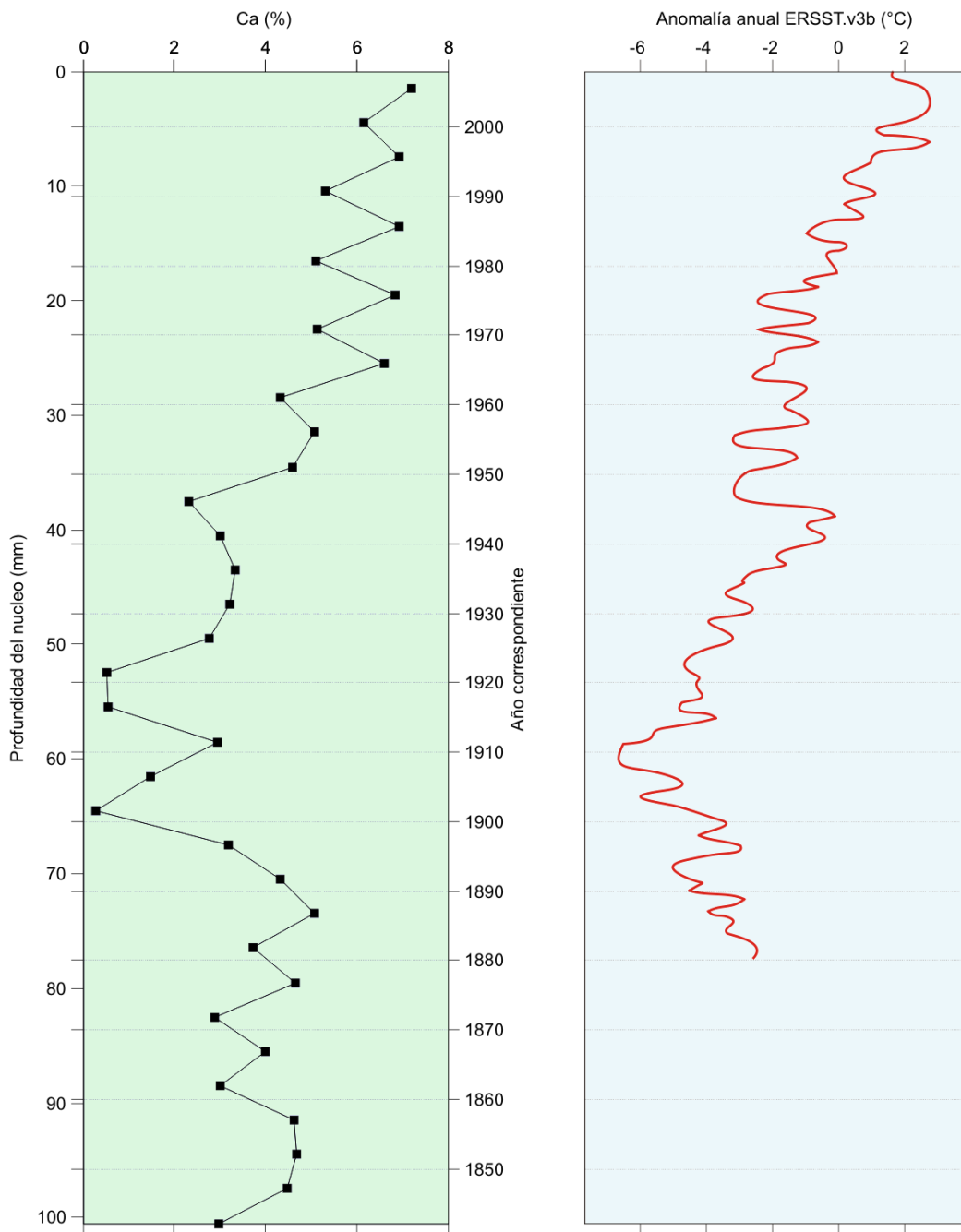


Figura 52. Contenido de calcio en la capa superficial de sedimentos del núcleo C44 comparado con la anomalía anual de temperatura superficial ERSST.v3b de la NOAA.

la Bahía de La Paz por Rodríguez Castañeda (2002) y puede indicar un incremento de temperatura global. Un aumento del aporte de CaCO_3 durante los últimos 200 años es reportado para los núcleos cercanos a Cuenca Guaymas (Dean et al., 2004). A pesar de estudiar núcleos con una resolución de tiempo mayor (8000 años - presente), los últimos 200 años presentan la misma tendencia al aumento (Douglas et al., 2007), que en el núcleo del presente estudio.

Por otro lado el periodo con mayor abundancia de elementos de aporte terrígeno (Sc, Fe, Ti), representa mayor incidencia de lluvias por condiciones más frías y concuerda con periodos de menores valores de Ca. Algo similar fue encontrado en uno de los núcleos colectados en la Bahía de La Paz, cortado a una mayor resolución, donde se encontró un periodo de bajo calcio y alto Fe (Rodríguez Castañeda, 2002), concluyendo la existencia de mayores aportes terrígenos. El efecto del viento para un núcleo que cubre el rango de los últimos 8000 años colectado en Cuenca Alfonso muestra indicios para episodios con aporte eólico (Pérez-Cruz et al., 2009). En los sedimentos laminados del área de estudio no fue posible establecer una relación, sin embargo dada la importancia de los aportes por el viento en la actualidad, lo cual se observó en la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso desde 2002 a 2008, dichos aportes pueden jugar un papel importante.

8.2.3. Efecto de eventos episódicos de menor escala

A diferencia de lo encontrado en la materia particulada en hundimiento a la escala de días-semanas, donde los eventos episódicos juegan un papel muy importante, estos al parecer no tuvieron un impacto tan marcado en el perfil vertical sedimentario.

En los componentes estudiados del núcleo de Cuenca Alfonso al parecer no hay una relación clara con ciclones tropicales. Sin embargo la fecha de uno de los huracanes históricos, que impacto fuertemente en las costas de Baja California Sur, Liza (1976), concuerda con uno de los picos de ligeramente elevado Sc y Fe (Figuras 36a y 36b). Esto podría ser posible debido al extremo aporte de estos elementos terrígenos durante eventos, lo cual ya se vio en elevados contenidos y flujos de MPH durante huracanes Ignacio y Marty (Figura 40), por lo tanto la hipótesis del impacto de fuertes eventos no puede excluirse.

En el presente estudio no parece haber mucha relación del registro paleocenografico y los sismos del pasado, a diferencia de los núcleos de mayor espesor colectados en Cuenca Alfonso y el Golfo de California adyacente de Gorsline et al. (2000) y González-Yajimovich et al., (2007) que si reportaron indicios de turbiditas originados por sismos y fallamiento en la Bahía de La Paz que modificaron la estructura sedimentaria.

Las tormentas de polvo se consideran uno de los mecanismos más importantes de transporte en el Golfo de California (Baumgartner et al., 1991) y en la SPM de Cuenca Alfonso fue encontrada una relación de elevados flujos de masa con rachas de viento (Aguirre Bahena, 2007). Desgraciadamente no existe un registro continuo histórico que pudiera relacionar esta variable con los contenidos de elementos terrígenos en el núcleo C44.

8.2.4. Efecto de diagénesis

El efecto de alteración por diagénesis es en algunos casos importante en sedimentos profundos con alto contenido de materia orgánica (Huerta-Díaz y Morse, 1992; Alagarsamy et al., 2005; McManus et al., 2006). Esto afecta principalmente a elementos redox-sensibles como Fe y Mn, especialmente sus fases móviles, y de menor manera al escandio y titanio en minerales resistentes (Alagarsamy et al., 2005; Huerta-Díaz y Morse, 1992). El perfil es caracterizado por un máximo de Fe u otro elemento en superficie que disminuye con la profundidad del núcleo. Sin embargo en el área de estudio de Cuenca Alfonso el efecto de diagénesis caracterizado por este perfil vertical característico no fue detectado. Probablemente esto debido a que existen condiciones subóxicas en la columna de agua y el Fe y Mn móvil ya fue reducido mientras se sedimentaron las partículas y el que se depositó fue el Fe en su forma residual de aluminosilicatos. Sin embargo es difícil definir que parte del Fe total corresponde a diagénesis, sin determinar su especiación. Una especiación con extracción secuencial fue hecha por Gibbs (1973, 1977) para los ríos Amazonas (Brasil) y Yukon (Canada y E.U.A.), encontrando que aproximadamente la mitad del Fe en partículas de estos ríos viene en su fase residual (poco móvil, fragmentos de aluminosilicatos) y una mucho menor parte asociado a materia orgánica. Por lo tanto en el área de estudio y en el núcleo de Cuenca Alfonso el Fe debe ser predominantemente de

minerales de aluminosilicatos, traídos por aporte terrígeno y resistentes a la disolución diagenética.

8.2.5. Cambio de condiciones redox del pasado

Para la capa de sedimentos superficiales de Cuenca Alfonso, muestreados con núcleos, de Diego et al. (1999) encontraron variaciones en el grado de bioturbación de los depósitos por organismos, cambiando la textura en periodos cortos de tiempo de laminada a bioturbada y viceversa. Los autores ligan este efecto con cambios en la oxigenación en la Bahía de La Paz, especialmente refiriéndose a cambios oceanográficos de la zona de mínimo oxígeno del Golfo de California. En el presente trabajo este mecanismo pudo estar afectando la especiación del uranio (Klinkhammer y Palmer, 1991) del pasado, donde mayores valores de este elemento corresponderían a menores concentraciones de oxígeno disuelto (Figura 37b). Sin embargo la existencia del umbral batimétrico tectónico que separa las partes profundas de la Bahía de La Paz (Nava-Sánchez et al., 2001) de las profundidades del Golfo de California con Zona de Mínimo Oxígeno, podría impedir las intrusiones de dichas aguas.

Un efecto similar ocurre en los núcleos profundos colectados en el Golfo de California en frente de Santa Rosalía, donde por estar a la profundidad de la zona de mínimo oxígeno y lejos del efecto antropogénico, el uranio es enriquecido autigenamente (Rodríguez Figueroa, 2010)

8.2.6. Efecto antropogénico

En el Golfo de California solo pocas localidades presentan enriquecimientos antropogénicos, comúnmente asociados a desechos de minería y fundición. Una de ellas son las costas de Santa Rosalía, Península de Baja California afectada por minería de cobre antigua (Rodríguez Figueroa, 2010). A pesar de que un enriquecimiento atmosférico por Pb no se encontró en núcleo C44 del presente estudio, Brumsack (1989) si denotó una gradual tendencia de aumento hacia la superficie del núcleo de la razón Pb/Al, indicando un aporte atmosférico de este elemento que se usaba como un aditivo a la gasolina en los años anteriores a los 1970s-1980s.

8.3. Principales asociaciones de elementos establecidos mediante análisis estadísticos multivariados

8.3.1. Asociaciones de elementos en la materia particulada en hundimiento de la serie de tiempo 2002-2008 (resolución semanal-mensual)

Las principales asociaciones de elementos de toda la serie de tiempo de la trampa sedimentaria fueron establecidas mediante el modo R del análisis de factores. De los 3 factores obtenidos que sumaron el 63.96 % de la proporción total, el Factor 1 corresponde a 36.63 %, el Factor 2 cubre el 15.69 y el Factor 3 representa el 11.64 %. Las cargas de los factores se muestran en la Tabla 8 y Figuras 53a y 53b. Los grupos de elementos

Tabla 8. Resultados del modo R del análisis de factores, aplicado a la composición elemental de la materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso.

Numero	Factor 1	Factor 2	Factor 3
La	0.8527	0.1198	0.0169
Cs	0.6666	-0.3051	-0.0977
Ca	0.3031	-0.2279	0.5874
Ba	0.0145	0.0787	0.7310
Sc	0.9418	0.0863	0.0157
Cr	0.6884	-0.3066	0.1918
Fe	0.9496	0.0540	0.0207
Co	0.3120	0.1825	-0.4273
As	0.0579	-0.8019	-0.1237
U	-0.1895	-0.7889	0.1990
Varianza explicada	3.6627	1.5688	1.1641
Proporción del factor	0.3663	0.1569	0.1164
Valores resaltados: > 0.5 Valores en verde: positivos más altos Valores en rojo: negativos más altos			

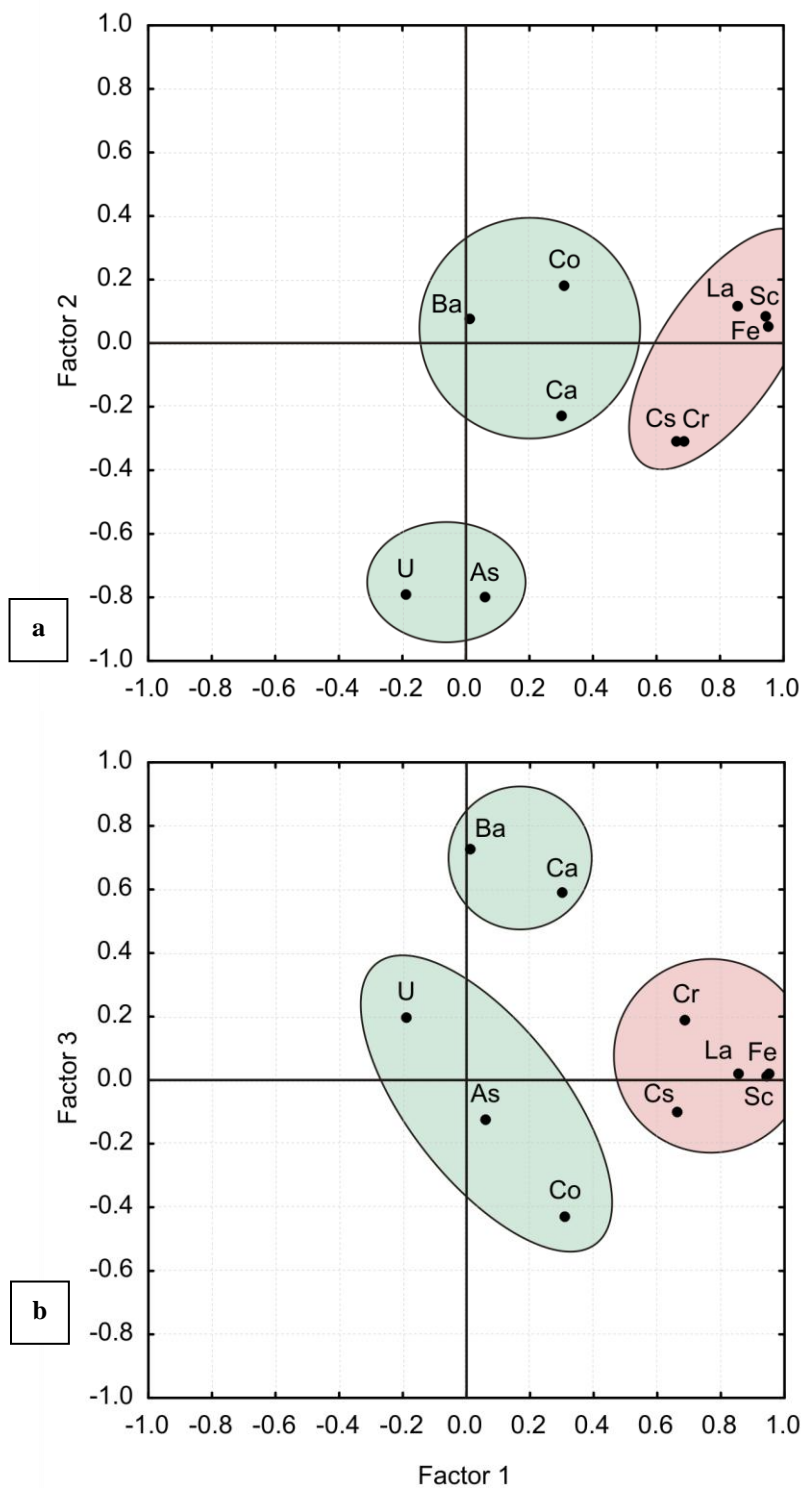


Figura 53. Cargas del modo R del análisis de factores, aplicado a la composición elemental de la materia particulada en hundimiento Cuenca Alfonso, graficadas en 2 planos: a) Factor 1 vs Factor 2, b) Factor 1 vs Factor 3.

fueron establecidos a partir de los planos graficados de los factores (Figuras 53a y 53b) de las cuales se encontraron las siguientes asociaciones: (a) Cr, Cs, Fe, La, Sc, probablemente asociados al aporte terrígeno y (b) As, Ba, Ca, Co, U (no tan claras asociaciones como el primer conjunto), que agrupan elementos de aporte biogénico, siendo componentes de tejidos de organismos o una aglomeración de materia orgánica.

8.3.2. Asociaciones de elementos en la parte superficial de los sedimentos de Cuenca Alfonso del núcleo C44 (resolución decadal)

Se establecieron las asociaciones de elementos en el núcleo de Cuenca Alfonso mediante el modo R del análisis de factores (Tabla 9). Se obtuvieron 3 factores que representaron 67.66 % de la proporción total, de los cuales el Factor 1 cubrió el 31.82 %,

Tabla 9. Resultados del modo R del análisis de factores, aplicado a la composición elemental de los horizontes del núcleo C44 de Cuenca Alfonso.

Numero	Factor 1	Factor 2	Factor 3
La	-0.0490	0.8935	0.0131
Cs	0.2932	0.7434	0.3461
Ca	-0.8195	-0.2325	-0.0513
Ba	0.4335	0.0422	0.6337
Sc	0.9666	0.1014	-0.0455
Cr	0.2895	0.7060	-0.2638
Fe	0.9493	0.0049	0.0097
Co	0.0723	-0.1851	0.4862
As	-0.1970	0.2845	0.6133
U	0.5201	0.0545	-0.5843
Varianza explicada	3.1817	2.0337	1.5499
Proporción del factor	0.3182	0.2034	0.1550
Valores resaltados: > 0.5 Valores en verde: positivos más altos Valores en rojo: negativos más altos			

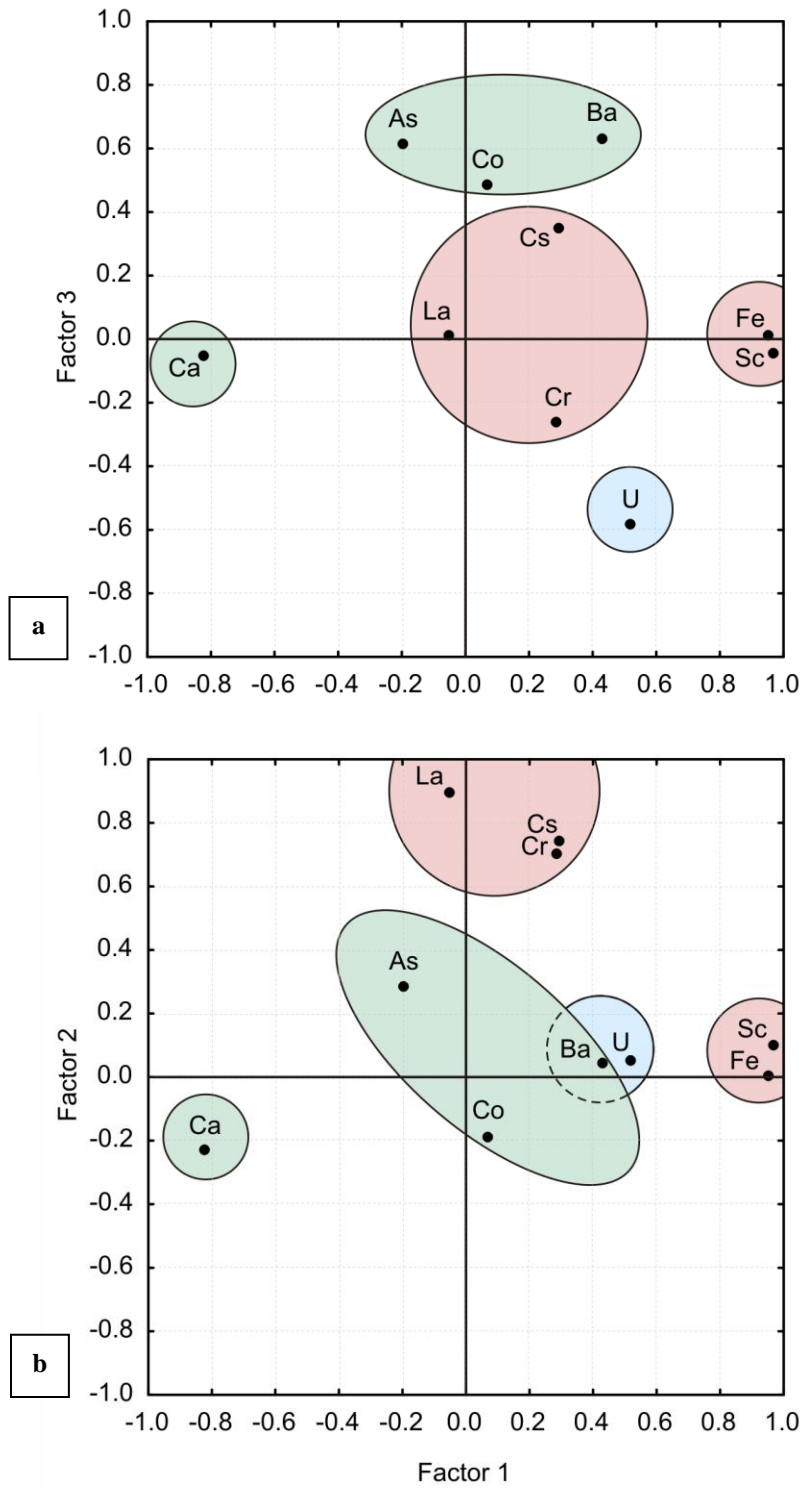


Figura 54. Cargas del modo R del análisis de factores, aplicado a la composición elemental de los horizontes del núcleo C44, graficadas en 2 planos: a) Factor 1 vs Factor 2, b) Factor 1 vs Factor 3.

el Factor 2 el 20.34 % y el Factor 3 el 15.50 %. Las cargas de cada uno de los factores se presentan en la Tabla 9 y en las Figuras 54a y 54b. Fue posible establecer las siguientes asociaciones elementales en los planos graficados de los factores (Figuras 54a y 54b), de los cuales se obtuvieron las siguientes asociaciones: (a) Sc y Fe, representando aporte terrígeno; (b) Cr, Cs y La, probablemente asociado a influencia terrígena de otra fuente o proceso; (c) As, Ba y Co, asociado a elementos probablemente consumidos por el fitoplancton; (d) Ca, representando aporte biogénico; y por ultimo (e) U (en el plano Factor 1 vs Factor 2 asociado a Ba), correspondiendo al aporte autógeno.

9. CONCLUSIONES

- 1) Existe alta variabilidad en el flujo de masa total, concentraciones y flujos de elementos particulados a la Cuenca Alfonso, por lo cual un patrón claro no se ha establecido a escala anual.
- 2) Eventos de ciclones tropicales fuertes, principalmente huracanes, afectaron los contenidos de escandio en la materia particulada en hundimiento.
- 3) El efecto de cambios de dirección e intensidad del viento desde vientos más fuertes del noroeste durante otoño-invierno a más débiles del sureste en primavera-verano en el área de estudio tiene una relación con el escandio terrígeno aportado eólicamente como materia particulada en hundimiento.
- 4) Los fuertes florecimientos planctónicos influenciaron los contenidos de calcio de la materia particulada en hundimiento.
- 5) En los perfiles verticales de contenidos en la capa superficial de sedimento laminado de Cuenca Alfonso algunos elementos muestran tendencias decadales.
- 6) Fue posible distinguir en los sedimentos laminados de Cuenca Alfonso un periodo de mayores aportes de escandio y fierro terrígenos desde 1890 a 1980, probablemente relacionado a un régimen más frío e mayor incidencia de lluvias.
- 7) Se registró mediante la composición del núcleo de Cuenca Alfonso un periodo con menores valores de calcio total y biogénico entre 1890 y 1950, así como posterior aumento gradual de estos, lo cual concuerda con las reconstrucciones de temperatura superficial ERSST de la NOAA.

8) Los estudios de trampas sedimentarias a largo plazo permiten validar los datos de núcleos sedimentarios, permitiendo encontrar proxies para una región específica.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Aguíñiga S., Sanchez A. and Silverberg N., 2010. Temporal variations of C, N, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{15}\text{N}$ in organic matter collected by a sediment trap at Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, SW Gulf of California. *Continental Shelf Research*. 30: 1692-1700.
- Aguirre Bahena F., 2007. Cambios temporales en los componentes y flujos de la materia en hundimiento en Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, durante el periodo 2002-2005. Tesis de Doctorado. CICIMAR-IPN, La Paz, 102 p.
- Alagarsamy R., Wolff G.A. and Chester R., 2005. Partitioning and speciation of trace metal diagenesis in differing depositional environments in the sediments of the Oman Margin. *Aquatic Geochemistry*, 11: 195-213.
- Alley R.B., Mayewski P.A., Sowers T., Stuiver M., Taylor K.C. and Clark P.U., 1997. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8,200 years ago. *Geology*, 25: 483-486.
- Álvarez Gómez I.G., 2010. Reconstrucción de la variabilidad del clima a través de los silicoflagelados conservados en los sedimentos laminados de Cuenca Alfonso. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN, La Paz, 98 p.
- Anderson R.F., Fleisher M.Q. and Leheray A.P., 1989. Concentration, oxidation state, and particulate flux of uranium in the Black Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 2215-2224.
- Aoyama M., Hirose K and Suzuki Y., 1986. High levels of radioactive nuclides in Japan in May. *Nature*, 321:819-820.
- Aranda-Gómez J.J., Pérez-Venzor J.A., 1988. Estudio Geológico de Punta Coyotes, Baja California Sur. *Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología*. 7: 1-21.
- Alvarado-Gastelum R., 2007. Estratigrafía de capas rojas y unidades adyacentes en el área de Punta Coyote, Baja California Sur, México. Tesis de licenciatura, UABCS, La Paz, 86 p.
- Audry S., Schäfer J., Blanc G. and Jouanneau J.-M., 2004. Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France). *Environmental Pollution*, 132: 413-426.

- Baba, J., Peterson, C.D., Schrader H.J., 1991a. Modern fine-grained sediment in the Gulf of California during the last century. In: Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T. (Eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 47: 569-587.
- Baba, J., Peterson, C.D., Schrader, H.J., 1991b. Fine-grained terrigenous sediment supply and dispersal in the Gulf of California during the last century. In: Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T. (Eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 47: 589-602.
- Balakrishnan Nair T.M., 2006. Monsoon control on trace metal fluxes in the deep Arabian Sea. *J. Earth Syst. Sci.*, 115: 461-472.
- Baturin G.N., 2004. Phosphate accumulation in the Ocean. Nauka Publ., Moscow, Russia, 464 p.
- Baumgartner T.R., Ferreira-Bartrina V. and Moreno-Hentz P., 1991. Varve formation in the central Gulf of California: A reconsideration of the origin of the dark laminae from the 20th century varve record, in: Dauphin, J.P., Simoneit, B.R. (Eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists Mem. 47, pp. 617-635.
- Boyle E.A., Sherrell R.M. and Bacon M.P., 1994. Lead variability in the western North Atlantic ocean and central Greenland. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58, 3227-3238.
- Böning P., Brumsack H.J., Böttcher M.E., Schnetger B., Kriete C., Kallmeyer J. and Borchers S.L., 2004. Geochemistry of Peruvian near-surface sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 68: 4429-4451.
- Böning P., Brumsack H.J., Schnetger B. and Grunwald M., 2009. Trace element signatures of Chilean upwelling sediments at ~36°S. *Marine Geology*, 259: 112-121.
- Brandenberger J., Crecelius E. y Louchouart P., Cooper S., McDougall K., Leopold E. and Liu G., 2008. Reconstructing trends in hypoxia using multiple paleoecological indicators recorded in sediment cores from Puget Sound, WA. NOAA Coastal Hypoxia Research Grant Number: NA05NOS4781203.

- Bruland K.W., 1983. Trace elements in seawater. In: Riley, J.P., Chester, R. (Eds.), *Chemical Oceanography*. Academic Press, London, pp. 157–220.
- Brumsack H.-J., 1989. Geochemistry of recent TOC-rich sediments from the Gulf of California and the Black Sea. *Geologische Rundschau*, 78: 851-882.
- Brumsack H.-J., 2006. The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: Implications for Cretaceous black shale formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232: 344-361.
- Buesseler K.O., Livingston H.D., Honjo S., Hay B.J., Manganini S.J., Degens E., Ittekkot V., Izdar E., and Konuk T., 1987. Chernobyl radionuclides in a Black Sea sediment trap. *Nature*, 329: 825-828.
- Busch M., Arrowsmith J.R., Umhoefer P.J., Coyan J.A., Maloney S.J. and Martínez Gutiérrez G., 2011. Geometry and evolution of rift-margin, normal-fault–bounded basins from gravity and geology, La Paz–Los Cabos region, Baja California Sur, Mexico. *Lithosphere*, 3: 110-127.
- Canet C., Prol-Ledesma R.M., Dando P.R., Vázquez-Figueroa V., Shumilin E., Birosta E., Sánchez A., Robinson C.J., Camprubí A., and Taulere E., 2010. Discovery of massive seafloor gas seepage along the Wagner Fault, northern Gulf of California. *Sedimentary Geology*. 228: 292-303.
- Carriguiry J.D. and Sánchez A., 1999. Sedimentation in the Colorado River Delta and Upper Gulf of California after a century of discharge loss. *Marine Geology*, 158: 125-145.
- Carriguiry J.D., Sánchez A., Camacho-Ibar V.F., 2001. Sedimentation in the northern Gulf of California after cessation of the Colorado River discharge. *Sedimentary Geology*, 144: 37-62.
- Chester R., 2003. *Marine Geochemistry*. Blackwell Publishing, London, 506 p.
- Chow T.J., Bruland K.W., Bertine K., Soutar A., Koide M. and Goldberg E.D., 1973. Lead Pollution: Records in Southern California Coastal Sediments. *Science*, 181: 551-552.
- Consejo de Recursos Minerales (CRM), 1999. *Monografía geológico-minera del estado de Baja California Sur*. Consejo de Recursos Minerales, Pachuca, 237 p.

- Conte M.H., 2005. Will changing climate change the deep? Bermuda Biological Station Research Currents, Fall 2005. 6-7.
- Cota Castro R.M., 2011. Transición entre los depósitos miocénicos sin arco y posteriores al arco, en el área de Alfredo V. Bonfil, arroyo Seco, Municipio de La Paz, Baja California Sur. Tesis de Licenciatura. UABCS, La Paz, 91p.
- Cruz-Orozco R., Martínez-Noriega C., Mendoza-Maravillas A., 1996. Batimetría y sedimentos de Bahía de La Paz, B.C.S., México. *Océanides*, 11: 21-27.
- Daesslé L.W., Ramos S.E., Carriquiry J.D. and Camacho-Ibar V.F., 2002. Continental Shelf Research, 22: 1311-1323.
- Daesslé L.W., Camacho-Ibar V.F., Carriquiry J.D. and Ortiz-Hernández M.C., 2004. The geochemistry and sources of metals and phosphorus in the recent sediments from the Northern Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 24: 2093-2106.
- Davies T.A. and Gorsline D.S., 1976. Oceanic sediments and sedimentary processes. In: Riley J.P. and Chester, R. (eds.). *Chemical Oceanography*, 5: 1-80.
- de Diego and Douglas R.G., 1999. Oxygen-related sediment microfabrics in modern "black shales", Gulf of California, Mexico. *The Journal of Foraminiferal Research*. 29: 453-464.
- Dean W., Pride C., Thunnell R., 2004. Geochemical cycles in sediments deposited on the slopes of the Guaymas and Carmen Basins of the Gulf of California over the last 180 years: *Quaternary Science Reviews*, 23: 1817-1833.
- Dean W.E., Zheng Y., Ortiz J.D. and Van Geen A., 2006. Sediment Cd and Mo accumulation in the oxygen-minimum zone off western Baja California linked to global climate over the past 52 kyr. *Paleoceanography*, 21, PA4209, doi:10.1093/aei/kwj154.
- Delgadillo-Hinojosa F., Macías-Zamora J.V., Segovia-Zavala J.A., Torres-Valdés. S., 2001. Cadmium enrichment in the Gulf of California. *Mar. Chem.*, 75: 109–122.
- Delgadillo-Hinojosa F., Segovia-Zavala J.A., Huerta-Díaz M.A. and Atilano-Silva H., 2006. Influence of geochemical and physical processes on the vertical distribution of manganese in Gulf of California waters. *Deep Sea Research I*, 53: 1301-1319.

- Douglas R., González-Yajimovich O., Ledesma-Vazquez J., Staines-Urias F., 2007. Climate forcing, primary production and the distribution of Holocene biogenic sediments in the Gulf of California. *Quaternary Science Reviews*, 26: 115-129.
- Drake W.R., 2005. Structural analysis, stratigraphy, and geochronology of the San José Island accommodation zone, Baja California Sur. M.S.Thesis. Northern Arizona University, Flagstaff, 232 p.
- Duce R.A. and Tindale N.W., 1991. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 36: 1715-1726.
- Fischer R., Galli-Olivier C., Gidde A., Schwennicke T., 1995. The El Cien Formation of southern Baja California, Mexico: Stratigraphic precisions, *Newsletters on Stratigraphy*, 32, 137-161.
- Fisher K., Dymond J., Lyle M., Soutar A. and Rau S., 1986. The benthic cycle of copper: Evidence from sediment trap experients in the eastern tropical North Pacific Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 50: 1535-1543.
- Fletcher J.M., Pérez-Venzor J.A., González-Barba G., Aranda-Gómez J.J., 2003. Ridge-trench interactions and the ongoing capture of the Baja California microplate - new insights from the southern Gulf Extensional Province. Guidebook for field trips of 99th annual meeting of the cordilleran section of the Geological Society of America, UNAM, Inst. de Geología, 13 - 31.
- Fowler S.W. and Knauer G.A., 1986. Role of large particles in the transport of elements and organic compounds through the oceanic water column. *Progr. Oceanogr.* 16: 147-194.
- García-Figueroa D.A., Schwennicke T., 2008. La Formación Lomas de la Virgen: sedimentos post arco (finales Mioceno Inferior a Medio) en Baja California Sur. En: Primer Congreso sobre la evolución geológica y ecológica del Noroeste de México, Hermosillo, p. 62-63.
- Gastil G., Krummenacher D. and Minch J., 1979. The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California. *Geological Society of America Bulletin*, 90: 839-857.

- GEOTRACES, 2006. An international study of the marine biogeochemical cycles of trace elements and their isotopes. Science plan. International Council for Science. Scientific Committee on Oceanic Research, Boston, USA.
- Gibbs R.J., 1973. Mechanisms of trace metal transport in rivers. *Science*, 180: 71-73.
- Gibbs R.J., 1977. Transport phases of transition metals in the Amazon and Yukon rivers. *Geological Society of America Bulletin*, 88: 829-843.
- González-Yajimovich O.E., 2004. Holocene sedimentation in the Southern Gulf of California and its climatic implications. Ph.D. Thesis, Univ. of Southern California, Los Angeles, 155 p.
- Gonzalez-Yajimovich O.E., Douglas R.G., Gorsline D.S., 2005. The preserved carbonate record in Holocene sediments of the Alfonso and Pescadero basins, Gulf of California, Mexico. *Proceedings of the Geologists' Association*, 116: 315-330.
- Gonzalez-Yajimovich O.E., Gorsline D.S., Douglas R.G., 2007. Frequency and sources of basin floor turbidites in Alfonso basin, Gulf of California, Mexico: Products of slope fail. *Sedimentary Geology* 199: 91-105.
- Gorsline D.S., de Diego T. and Nava-Sanchez E.H., 2000. Seismically triggered turbidites in small margin basins: Alfonso Basin, Western Gulf of California and Santa Monica Basin, California Borderland. *Sedimentary Geology*, 135: 21-35.
- Gupta S., Mohan R. and Guptha M., 2002. Radiolarian fluxes from the southern Bay of Bengal: sediment trap results. *Deep-Sea Research I*. 49, 1669-1688.
- Haake B., Ittekkot V., Rixen T., Ramaswamy V., Nair R.R. and Curry W.B., 1993. Seasonality and interannual variability of particle fluxes to the deep Arabian sea. *Deep Sea Research I*. 40: 1323-1344.
- Hausback B., 1984. Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico. Pp.219-236. In: *Geology of The Baja California Peninsula*. V. A. Frizzell - Editor, P.S.S.E.P.M., Los Angeles.
- Honjo S., 1978. Sedimentation of materials in the Sargasso Sea at a 5,367 m deep station. *Journal of Marine Research*, 36: 469-492.

- Honjo S., 1982. Seasonality of biogenic and lithogenic fluxes in the Panama Basin. *Science*, 218: 883-884.
- Honjo S., Daymond J., Prell W. Ittekkot V., 1999. Monsoon-controlled export fluxes to the interior of the Arabian Sea. *Deep Sea Research II*. 46, 1859-1902.
- Honjo S., Doherty K.W., 1988. Large aperture time-series sediment traps; design objectives, construction and application. *Deep-Sea Research*. 35: 133-149.
- Hsu S.-C., Lin F.-J., Jeng W.-L., Chung Y., Shaw L.-M. and Hung K.-W., 2004. Observed sediment fluxes in the southwesternmost Okinawa Trough enhanced by episodic events: flood runoff from Taiwan rivers and large earthquakes. *Deep Sea Research I*. 51: 979-997.
- Huag G.H., Günther D., Peterson L.C., Sigman D.M., Hughen K.A. and Aeschlimann B., 2003. Climate and the Collapse of Maya Civilization. *Science*, 299: 1731-1735.
- Huag G.H., Hughen K.A., Sigman D.M., Peterson L.C. and Röhl U., 2001. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Nature*, 293: 1304-1308.
- Huang S. and Conte M.H., 2009. Source/process apportionment of major and trace elements in sinking particles in the Sargasso Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 73: 65-90.
- Huerta-Diaz M.A. and Morse J.W., 1992. Pyritization of trace-metals in anoxic marine-sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 56: 2681-2702.
- Ittekkot V., Nair R.R., Honjo S., Ramaswamy V., Bartsch M., Manganini S.J., Desai B.N., 1991. Enhanced particle fluxes in Bay of Bengal induced by injection of freshwater. *Nature*. 351: 385-387.
- Jeandel C., Peucker-Ehrenbrink B., Jones M.T., Pearce C.R., Oelkers E.H., Godderis Y., Lacan F., Aumont O. and Arsouze T., 2011. Ocean margins: The missing term in oceanic element budgets? *EOS, Transactions American Geophysical Union*. 92: 217-219.
- Jickells T.D., An Z.S., Andersen K.K., Baker A.R., Bergametti G., Brooks N., Cao J.J., Boyd P.W., Duce R.A., Hunter K.A., Kawahata H., Kubilay N., laRoche J., Liss P.S.,

- Mahowald N., Prospero J.M., Ridgwell A.J., Tegen I., Torres R., 2005. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science*, 308: 67-71.
- Jickells, T.D., Deuser, W.G., Knap, A.H., 1984. The sedimentation rates of trace elements in the Sargasso Sea measured by sediment trap. *Deep-Sea Res.* 31: 1169-1178.
- Jickells T. D., Dorling S., Deuser W. G., Church T. M., Arimoto R. and Prospero J. M., 1998. Air-borne dust fluxes to a deep water sediment trap in the Sargasso Sea. *Global Biogeochem. Cycles* 12: 311-320.
- Kennett, 1982. *Marine Geology*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 813 p.
- Kersten M., Leipe T., and Tauber F., 2005. Storm disturbance of sediment contaminants at a hot-spot in the Baltic Sea assessed by ^{234}Th radionuclide tracer profiles. *Environ. Sci Technol.*, 39: 984-990.
- Klinkhammer G.P. and Palmer M.R., 1991. Uranium in the oceans: Where it goes and why. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 55: 1799-1806.
- Kremling K. and Streu P., 1993. Saharan dust influenced trace element fluxes in deep North Atlantic subtropical waters. *Deep-Sea Res.* I 40, 1155-1168.
- Ku T.L., Knauss K.G. and Mathieu G.G., 1977. Uranium in open ocean: concentration and isotopic composition. *Deep-Sea Res.* 24: 1005-1017.
- Kuss J. and Kremling K., 1999. Particulate trace element fluxes in the deep northeast Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.* I, 46: 149-169.
- Lavin M.F. and Marinone S.G., 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. Pp. 173-204. In: *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. O. U. Velasco Fuentes, J. Sheinbaum and J. L. Ochoa de la Torre – Editors. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Leal-Acosta M.L., Shumilin E., Mirlean N., Sapozhnikov D. and Gordeev V., 2010. Arsenic and mercury contamination of sediments of geothermal springs, mangrove lagoon and the Santispac Bight, Bahía Concepción, Baja California Peninsula. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 85: 609-613.
- Lisitzin, 1996. *Oceanic sedimentation*. AGU, Washington, 357 p.

- Maeda N., Noriki S. and Narita H., 2007. Grain size, La/Yb and Th/Sc of settling particles in the western North Pacific: Evidence for lateral transport of small Asian loess. *Journal of Oceanography*. 63: 803-812.
- Martin, J.H., 1992. Iron as a limiting factor in oceanic productivity, in: Falkowski P.G., Woodhead A.D. (Eds.), *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*. Plenum Press, New York, pp. 123-37.
- McManus J., Berelson W/M., Severmann S., Poulson R.L., Hammond D.E., Klinkhammer G.P. and Holm C. 2006. Molybdenum and uranium geochemistry in continental margin sediments: Paleoproxy potential. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 70: 4643-4662.
- Nagaoka D., Shigemitsu M., Minagawa M. and Noriki S., 2010. Anthropogenic Pb in settling particulate matter in the Northwestern Pacific examined using stable isotopes of Pb. *Journal of Oceanography*. 66: 117-132.
- Nameroff T.J., 1996. Suboxic Trace Metal Geochemistry and Paleorecord in Continental Margin Sediments of Eastern Tropical North Pacific. Ph.D. Thesis, Univ. Washington, Seattle, 189 p.
- Nameroff T.J., Balistrieri L.S., Murray J.W., 2002. Suboxic trace metal geochemistry in the eastern tropical North Pacific. *Geochim.Cosmochim.Acta*. 66: 1139-1158.
- Nava-Sánchez E.H., 1997. Modern fan deltas of the west coast of the Gulf of California, Mexico. PhD Thesis. University of Southern California, Los Angeles.
- Nava-Sánchez E.H., Gorsline, D. S. and Molina-Cruz, A., 2001. The Baja California Peninsula borderland: structural and sedimentological characteristics. *Sedimentary Geology*, 144: 63-81.
- Noriki S., Ishimori N., Harada K. and Tsunogai S., 1985. Removal of trace metals from seawater during a phytoplankton bloom as studied with sediment traps in Funaka Bay, Japan. *Mar.Chem.* 17: 75-89.
- Obeso-Nieblas M., Shirasago B., Sánchez-Velasco L. y Gaviño-Rodríguez., 2004. Hydrographic variability in Bahía De La Paz, B. C. S., Mexico, during the 1997-1998 El Niño. *Deep-Sea Res. II*, 51: 689-710.

- Obeso-Nieblas M., Shirasago-Germán B., Gaviño-Rodríguez J.H., Obeso-Huerta H., Pérez-Lezama E.L., Jiménez-Illescas A.R., 2007. Hidrografía en la Boca Norte de la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas*. 33: 281-291.
- Obeso-Nieblas M., Shirasago-Germán B., Gaviño-Rodríguez J., Pérez-Lezama E., Obeso-Huerta H., Jiménez-Illescas A., 2008. Variabilidad hidrográfica en Bahía de La Paz, Golfo de California, México (1995-2005). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. 43: 559-567.
- Ortega-Gutiérrez F., Mitre-Salazar, L.M., Alaniz-Álvarez S.A., Roldán-Quintana J., Aranda-Gómez J.J., Nieto-Samaniego A.F. and Morán-Zenteno D.J., 1991. Geologic provinces of Mexico - A new proposal and bases for their definition. UNAM, UAH, Sociedad Mexicana de Mineralogía y Secretaría de Educación Pública. Convención sobre la evolución geológica de México y Primer Congreso Mexicano de Mineralogía, Pachuca, Hgo, Memorias, 143-144.
- Otosaka S. and Noriki S., 2000. REEs and Mn/Al ratio of settling particles: horizontal transport of particulate material in the northern Japan Trench. *Mar. Chem.* 72: 329-342
- Otosaka S., Honda M.C. and Noriki S., 2004a. La/Yb and Th/Sc in settling particles: Vertical and horizontal transport of lithogenic material in the western North Pacific. *Geochemical Journal*, 38: 515-525.
- Otosaka S., Togawa O., Baba M., Karasev E., Volkov Yu. N., Omata N. and Noriki S., 2004b. Lithogenic flux in the Japan Sea measured with sediment traps. *Mar. Chem.* 91: 143-163.
- Otosaka S. and Noriki S., 2005. Relationship between Composition of Settling Particles and Organic Carbon Flux in the Western North Pacific and the Japan Sea. *Journal of Oceanography*. 61: 25-40.
- Pattan J.N., Masuzawa T. and Yamamoto M., 2005. Variations in terrigenous sediment discharge in a sediment core from southeastern Arabian Sea during the last 140 ka. *Current Science*, 89: 1421-1425.
- Patterson C., 1987. Global pollution measured by lead in mid-ocean sediments. *Nature*, 326: 244-245.

- Pérez Cruz L., 2000. Estudio paleoceanografico y sedimentológico holocénico de la Bahía de La Paz, Golfo de California. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., 167 p.
- Pérez-Cruz L., 2006. Climate and ocean variability during the middle and late Holocene recorded in laminated sediments from Alfonso Basin, Gulf of California. *Quaternary Res.*, 65: 401-410.
- Pérez-Cruz L. and Fucugauchi U., 2009. Magnetic mineral study of Holocene marine sediments from the Alfonso Basin, Gulf of California - implications for depositional environment and sediment sources. *Geofísica Internacional*, 48: 305-318.
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Benders M., Chappellaz J., Davis M., Delayque G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E. and Stievenard M., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399: 429-436.
- Piper D.Z. 1991. Geochemistry of a Tertiary sedimentary phosphate deposit: Baja California Sur, Mexico. *Chem. Geol.* 92: 283-316.
- Piper D.Z. 1994. Seawater as the source of minor elements in black shales, phosphorites and other sedimentary rocks. *Chem. Geol.* 114: 95-114.
- Pohl C., Löffler A. and Hennings U., 2004. A sediment trap flux study for trace metals under seasonal aspects in the stratified Baltic Sea (Gotland Basin; 57°19.20'N; 20°03.00'E). *Mar. Chem.*, 84: 143-160.
- Prospero J.M., 1999. Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the Southeastern United States: Implications for regional air quality. *Journal of Geophysical Research*, 104: 15,917-15,927.
- Rachold V. and Brumsack H.J., 2001. Inorganic geochemistry of Albian sediments from the Lower Saxony Basin NW Germany: palaeoenvironmental constraints and orbital cycles. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 174: 121-143.

- Rodríguez Castañeda A.P., 2002. Elementos mayores y traza en sedimentos y macroalgas de la Bahía de La Paz, Baja California Sur. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN, La Paz, 120 p.
- Rodríguez Castañeda A.P., 2008. Variación de flujos de los elementos particulados en Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, en el periodo 2002-2005. Tesis de Doctorado. CICIMAR-IPN, La Paz, 199 p.
- Rodríguez Figueroa G.M., 2010. Niveles de contaminación por metales pesados en la zona costera de Santa Rosalía: sedimentos y macroalgas. Tesis de Doctorado. CICIMAR-IPN, La Paz, 178 p.
- Rodríguez Meza G.D., 1999. Metales pesados en sedimentos de la Ensenada de La Paz, B.C.S., México. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN, La Paz, 130 p.
- Rodríguez-Meza G.D., Shumilin E., Sapozhnikov D., Méndez-Rodríguez L. y Acosta-Vargas B., 2009. Evaluación geoquímica de elementos mayoritarios y oligoelementos en los sedimentos de Bahía Concepción (B.C.S., México). Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 61: 57-72.
- Romero Bañuelos A.C., 2003. Hidrología y metales pesados en la materia particulada suspendida del agua superficial de la porción sur de la Bahía de La Paz., B.C.S., México. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-IPN, La Paz, 100 p.
- Roy-Barman M., Jeandel C., Souhaut M., Rutgers van der Loeff M., Voegelé I., Leblond N. and Freydisse R., 2005. The influence of particle composition on thorium scavenging in the NE Atlantic Ocean (POMME experiment). Earth Planetary Sci. Lett. 240: 681-693.
- Salinas González, 2000. Mezcla turbulenta y transporte de masa en la Bahía y Ensenada de La Paz, B.C.S.: Experimentación y modelación numérica. Tesis de Doctorado. CICIMAR-IPN, La Paz, 260 p.
- Salinas-González F., Zaitsev O. and Makarov V.G., 2003. Formación de la estructura termohalina del agua de la Bahía de La Paz de verano a otoño. Ciencias Marinas, 29: 51-65.

- Sánchez-Velasco L., Avalos-García C., Beier E., Lavin M., 2006. Larval fish assemblages and geostrophic circulation in Bahía de La Paz and surrounding SW region of the Gulf of California. *Journal of Plankton Research*, 28: 1-8.
- Sarin M.M., Krishnaswami S., Dalai T.K., Ramaswamy V. and V. Ittekkot., 2000. Settling fluxes of U- and Th-series nuclides in the Bay of Bengal: results from time-series sediment trap studies. *Deep Sea Research I*, 47: 1961-1985.
- Schlesinger W.H., 1997. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*, Academic Press, San Diego, 279 p.
- Schüßler U., Schulz-Bull D.E. and Bauerfeind E., 1997. Annual fluxes of particulate chemical trace compounds during the North-East water polynya experiment. 10: 391-400.
- Segovia-Zavala J.A., Delgadillo-Hinojosa F., Lares-Reyes M.L., Huerta-Díaz M.A., Muñoz-Barbosa A., Torres-Delgado A.V., 2009. Atmospheric input and concentration of dissolved iron in the surface layer of the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 35: 74-90.
- Segovia-Zavala J.A., Lares M.L., Delgadillo-Hinojosa F., Tovar-Sánchez A., and S.A. Sañudo-Wilhelmy, 2010. Dissolved iron distribution in the central región of the Gulf of California, Mexico, *Deep-Sea Res.I*, , 57: 53-64.
- Shumilin E.N., Carriquiry J.D., Camacho-Ibar V.F., Sapozhnikov D., Kalmykov S., Sánchez A., Aguíñiga-García S and Sapozhnikov Yu.A., 2002. Spatial and vertical distributions of elements in sediments of the Colorado River delta and Upper Gulf of California. *Marine Chemistry*, 79: 113-131.
- Silverberg N., Aguirre F., Aguíñiga S. and Romero N., 2006. Vertical flux of particulate matter in Alfonso Basin, La Paz Bay, during 2002. *Ciencias Marinas*, 31: 1-10.
- Silverberg, N., Martínez, A., Aguíñiga, S., Carriquiry, J.D., Romero, N., Shumilin, E. and Cota, S. 2004. Contrasts in sedimentation flux below the southern California Current in late 1996 and during the El Niño event of 1997-1998. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 59: 575-587.

- Silverberg N., Shumilin E., Aguirre-Bahena F., Rodríguez-Castañeda A.P. and Sapozhnikov D., 2007. The impact of hurricanes on sedimenting particulate matter in the semi-arid Bahía de La Paz, Gulf of California. *Contin. Shelf Res.*, 27: 2513-2522.
- Silverberg N., Shumilin E., Aguirre-Bahena F., Rodríguez-Castañeda A.P., and Sapozhnikov D., 2008. The impact of hurricanes on sedimenting particulate matter in the semi-arid Bahía de La Paz, Gulf of California. Erratum. *Contin. Shelf Res.* 28: 1089-1090.
- Spencer D.W., Brewer P.G., Fleer A., Honjo S., Krishnaswami S., and Nozaki Y., 1978. Chemical fluxes from a sediment trap experiment in the deep Sargasso Sea. *Jour. Mar. Res.*, 36: 493-523.
- 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. and McLennan S.M., 1985. *The continental crust: Its composition and evolution.* Blackwell Scientific Pub., London, 312 p.
- Thunell R.C., 1998. Seasonal and annual variability in particle fluxes in the Gulf of California: A response to climate forcing. *Deep-Sea Res. I*, 45: 2059-2083.
- Trapp J.M., Millero F. and Prospero J.M., 2010. Temporal variability of the elemental composition of African dust measured in trade wind aerosols at Barbados and Miami. *Marine Chemistry*, 120: 71-82.
- Trefry J.H. and Presley B.J., 1976. Heavy metals in sediments from San Antonio Bay and the northwest Gulf of Mexico. *Environmental Geology*, 1: 283-294.
- Umhoefer P.J., Dorsey R.J., Willsey S., Mayer L. and Renne P., 2001. Stratigraphy and geochronology of the Comondu Group near Loreto, Baja California Sur, Mexico. *Sedim. Geol.* 144: 125-147.
- Urcádiz Cázares, F.J., 2005. Flujos de cocolitos (cocolitóforos) y su aporte de CaCO_3 evaluado con trampa de sedimentos en la Cuenca Alfonso (Bahía de La Paz), Golfo de California, México, Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, 62 pp.

- Van Andel, T.H., 1964. Recent marine sediments of the Gulf of California. In: van Andel, T.J., Shor, G.G. - Editors. Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 3: 216-310.
- Vernadsky V.I., McMenamin M.A.S. and Langmuir D.B., 1998. The Biosphere. Copernicus, New York, 192 p.
- Wedepohl K.H., 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1217-1232.
- Zaytsev O., Rabinovich A.B., Thomson R.E. and Silverberg N., 2010. Intense diurnal surface currents in the Bay of La Paz, Mexico. *Continental Shelf Research*, 30: 608-619.
- Zhang X., He X. and Qi Y., 2005. Interpreting ^{137}Cs depth profiles with no single peak in lake deposits in China, p. 78-84. In: D.E. Walling and A.J. Horowitz(eds.). *Sediment Budgets 1*. International Association of Hydrological Sciences Publication 291, Wallingford, UK, IAHS Press.
- Ziveri P. and Thunell R.C., 2000. Coccolithophore export production in Guaymas basin, Gulf of California: response to climate forcing. *Deep-Sea Res. II*. 47: 2073-2100.

11. ANEXOS

Anexo 1. Contenidos de elementos en las muestras de sedimento de arroyo y duna, colectados en la cuenca de drenaje de la Bahía de La Paz

Clave muestra	Tipo	Contenido									
		As (mg kg ⁻¹)	Ba (mg kg ⁻¹)	Ca (%)	Co (mg kg ⁻¹)	Cr (mg kg ⁻¹)	Cs (mg kg ⁻¹)	Fe (%)	P (%)	Sc (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹)
2	Arroyo	7.7	674	3.92	13.2	30.5	6.6	3.40	0.283	13	2.9
5	Arroyo	2.2	1130	2.01	3.0	8.9	2.5	0.95	0.025	3	0.5
10	Arroyo	5.5	1040	2.11	4.4	19.1	6.0	1.86	0.063	5	1.2
17	Arroyo	15.2	840	4.07	12.2	44.2	4.5	3.70	0.285	14	2.9
18	Arroyo	13.2	884	4.11	12.7	37.5	4.4	3.77	0.220	13	4.7
19	Arroyo	10.0	635	8.04	7.2	45.8	4.7	1.97	1.730	10	15.0
21	Arroyo	8.9	661	4.14	22.9	76.0	5.0	7.22	0.195	19	2.1
22	Arroyo	10.7	934	5.07	11.6	28.7	4.5	3.48	0.230	14	3.0
24	Arroyo	6.4	789	4.44	10.8	37.4	2.1	3.02	0.100	12	1.7
25	Arroyo	7.3	837	4.58	9.9	31.6	3.7	2.65	0.102	12	2.1
26	Arroyo	9.6	847	4.55	11.1	37.5	2.4	3.37	0.191	13	2.3
27	Arroyo	6.0	944	4.21	7.5	22.5	2.0	2.23	0.106	10	1.8
28	Arroyo	4.4	812	4.61	11.4	33.5	2.1	3.05	0.069	13	1.6
30	Arroyo	1.7	634	5.50	22.5	61.8	1.2	5.80	0.082	23	1.1
31	Arroyo	3.8	854	4.68	10.2	28.7	1.5	3.01	0.074	12	1.5
D1	Duna	3.0	573	5.39	11.6	49.9	1.0	3.04	0.066	9	0.9
D2	Duna	3.7	628	7.35	13.2	53.5	1.4	4.17	0.062	17	1.3
D3	Duna	4.0	693	8.75	12.0	48.3	1.3	3.64	0.066	14	1.3
D4	Duna	7.2	803	7.24	6.0	15.0	2.3	2.20	0.062	8	1.7
D5	Duna	8.0	709	4.91	14.5	48.6	2.1	3.64	0.155	19	1.7
J1	Presa de jales antigua	8.4	323	13.50	3.5	559.0	4.2	1.33	3.880	10	39.0
AR 1	Sedimento húmedo en arroyo con agua residual	11.2	837	8.00	12.1	58.5	6.7	2.69	1.410	11	15.0

Anexo 2. Flujo de masa total de las partículas en hundimiento de Cuenca Alfonso

Clave muestra	Periodo de colecta		Número de días	Flujo de masa total (g m ⁻² d ⁻¹)
	Fecha de inicio	Fecha de terminación		
XII-2	2/12/05	15/12/05	14	1.857
XII-3	16/12/05	22/12/05	7	0.512
XII-4	23/12/05	29/12/05	7	0.687
XII-5	30/12/05	5/01/06	7	0.299
XII-6	6/01/06	12/01/06	7	0.786
XII-7	13/01/06	19/01/06	7	0.850
XII-8	20/01/06	26/01/06	7	2.287
XII-9	27/01/06	2/02/06	7	0.483
XII-10	3/02/06	9/02/06	7	0.133
XII-11	10/02/06	16/02/06	7	0.524
XII-12	17/02/06	23/02/06	7	0.423
XIV-1	20/09/06	1/10/06	12	1.127
XIV-2	2/10/06	13/10/06	12	0.775
XIV-3	14/10/06	25/10/06	12	0.530
XIV-4	26/10/06	6/11/06	12	0.764
XIV-5	7/11/06	17/02/07	103	0.428
XV-1	18/02/07	24/02/07	7	0.630
XV-2	25/02/07	03/03/07	7	0.639
XV-3	04/03/07	10/03/07	7	1.127
XV-4	11/03/07	17/03/07	7	0.703
XV-5	18/03/07	24/03/07	7	0.601
XV-6	25/03/07	31/03/07	7	0.734
XV-7	1/04/07	7/04/07	7	0.483
XV-8	8/04/07	13/04/07	7	0.308
XV-9	15/04/07	21/04/07	7	0.241
XV-10	22/04/07	28/04/07	7	0.305

XV-11	29/04/07	5/05/07	7	0.347
XV-12	6/05/07	11/05/07	6	0.174
XVI-1	13/05/07	27/05/07	15	0.416
XVI-2	28/05/07	12/06/07	15	0.906
XVI-3	12/06/07	26/06/07	15	0.633
XVI-4	27/06/07	11/07/07	15	0.477
XVI-5	12/07/07	26/07/07	15	0.596
XVI-6	27/07/07	11/08/07	16	0.471
XVI-7	12/08/07	27/08/07	16	0.489
XVI-8	28/08/07	12/09/07	16	1.947
XVI-9	13/09/07	28/09/07	16	0.396
XVI-10	29/09/07	14/10/07	16	0.397
XVI-11	15/10/07	30/10/07	16	0.530
XVI-12	31/10/07	14/11/07	15	0.310
XVII-1	16/11/07	23/11/07	8	0.896
XVII-2	24/11/07	1/12/07	8	1.404
XVII-3	2/12/07	9/12/07	8	0.647
XVII-4	10/12/07	17/12/07	8	1.624
XVII-5	18/12/07	25/12/07	8	4.541
XVII-6	26/12/07	2/1/08	8	2.915
XVII-7	3/1/08	10/1/08	8	1.480
XVII-8	11/1/08	17/1/08	7	0.639
XVII-9	18/1/08	24/1/08	7	1.203
XVII-10	25/1/08	31/1/08	7	0.694
XVII-11	1/02/08	7/02/08	7	0.618
XVII-12	8/02/08	14/02/08	7	0.628
XVIII-1	16/02/08	25/02/08	10	0.491
XVIII-2	26/02/08	5/03/08	9	0.616
XVIII-3	6/03/08	14/03/08	9	0.354

XVIII-4	15/03/08	23/03/08	9	0.209
XVIII-5	24/03/08	1/04/08	9	0.405
XVIII-6	2/04/08	10/04/08	9	0.365
XVIII-7	11/04/08	18/04/08	8	0.623
XVIII-8	19/04/08	26/04/08	8	0.743
XVIII-9	27/04/08	4/05/08	8	0.118
XVIII-10	5/05/08	12/05/08	8	0.337
XVIII-11	13/05/08	20/05/08	8	0.062
XVIII-12	21/05/08	28/05/08	7.5	0.812

Anexo 3. Contenidos de elementos en las muestras de materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso

Clave muestra	Contenido de elemento								
	As (mg kg ⁻¹)	Ba (mg kg ⁻¹)	Ca (%)	Co (mg kg ⁻¹)	Cr (mg kg ⁻¹)	Cs (mg kg ⁻¹)	Fe (%)	Sc (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹)
XII-2	6.06	270.00	6.17	9.95	23.0	2.21	1.68	6.60	3.84
XII-3	0.40	525.00	6.22	28.8	38.1	9.25	2.18	8.11	2.42
XII-4	14.90	300.00	6.83	12.7	32.2	0.85	1.94	6.91	3.66
XII-5	10.30	87.00	5.93	31.4	48.3	4.85	1.46	6.14	3.62
XII-6	3.16	50.00	3.93	10.3	34.4	4.21	1.5	5.73	5.49
XII-7	0.00	72.00	5.24	10.8	15.3	4.89	1.58	5.94	3.50
XII-8	4.28	200.00	6.30	7.7	31.9	3.27	2.11	7.96	2.22
XII-9	3.35	175.00	5.21	16.2	50.6	5.16	2.31	8.07	1.70
XII-10	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0	0.00	0.00
XII-11	1.86	330.00	4.55	12.7	32.8	4.57	1.59	5.84	2.11
XII-12	1.51	115.00	3.99	9.92	21.2	1.25	0.75	3.20	6.46
	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0	0.00	0.00
XIV-1	12.50	220.00	7.23	31.0	34.8	5.82	2.42	8.81	4.30
XIV-2	4.77	355.00	6.36	18.1	32.2	6.80	2.84	10.30	11.20
XIV-3	16.70	405.00	7.05	17.8	38.1	3.98	2.79	9.87	4.25
XIV-4	11.90	255.00	6.38	19.9	31.4	7.63	2.77	9.76	5.92
XIV-5	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0	0.00	0.00
XV-1	7.05	272.50	7.17	10.625	21.9	4.96	1.77	7.27	6.19
XV-2	8.54	755.00	6.95	10.4	26.8	7.37	2.19	8.57	5.51
XV-3	8.87	297.50	6.59	8.7	23.85	6.10	2.36	9.59	6.13
XV-4	5.28	455.00	6.73	7.96	26.1	8.18	2.06	7.70	17.30
XV-5	7.53	475.00	9.14	8.39	32.9	3.42	2.16	8.65	7.92
XV-6	3.89	567.50	9.68	9.49	31.4	1.17	1.875	7.10	6.71
XV-7	10.40	585.00	9.37	6.08	25.8	8.98	1.81	7.30	6.29
XV-8	1.04	1,575.00	0.84	15.4	24.2	2.39	2.27	8.44	11.30
XV-9	11.20	420.00	3.63	13.2	26.7	6.52	2.07	8.54	11.70

XV-10	6.37	880.00	4.90	22.0	15.2	2.77	1.36	5.99	3.98
XV-11	1.97	98.00	9.32	9.43	13.9	0.51	1.44	5.82	21.20
XV-12	10.60	1,320.00	6.12	1.11	3.6	1.39	1.64	7.35	31.40
	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0	0.00	0.00
XVI-1	2.84	104.50	6.43	5.84	26.85	4.02	1.29	5.60	1.70
XVI-2	4.84	32.50	3.60	2.975	9.65	0.95	0.605	2.87	1.15
XVI-3	6.15	71.00	5.83	2.89	13.4	1.03	0.785	3.31	1.46
XVI-4	4.98	39.50	3.54	4.315	13.16	1.97	0.87	3.68	3.57
XVI-5	8.61	133.00	5.47	3.8	21	3.98	1.275	5.29	1.98
XVI-6	4.67	35.00	6.02	6.05	29	3.18	1.605	6.31	0.60
XVI-7	10.60	106.50	6.14	6.915	20.45	3.73	1.61	5.99	2.16
XVI-8	2.13	80.50	7.00	8.32	16.55	2.85	1.8	7.88	1.02
XVI-9	5.69	170.00	7.02	8.38	22.25	3.80	1.99	8.06	0.71
XVI-10	3.48	160.00	7.13	10.16	21.75	7.72	2.29	9.54	2.21
XVI-11	5.72	60.50	7.96	9.545	28.25	5.98	2.295	9.49	1.27
XVI-12	0.63	167.50	8.12	8.16	25.7	4.11	1.995	7.97	0.59
XVII-1	3.55	502.50	6.60	7.285	22.45	5.24	1.44	5.97	3.37
XVII-2	4.84	225.00	9.91	7.775	20.6	2.79	1.69	6.36	3.22
XVII-3	6.42	262.50	8.16	8.345	20.95	4.76	1.83	6.94	8.32
XVII-4	8.33	372.50	7.65	8.025	24.75	3.35	1.86	7.06	6.09
XVII-5	5.53	365.00	7.08	6.23	10.59	2.38	1.56	6.07	3.79
XVII-6	2.74	275.00	5.11	11.605	18.15	0.62	1.22	5.23	8.79
XVII-7	2.29	56.50	5.89	4.61	10.56	1.95	1.315	5.21	8.94
XVII-8	3.40	230.00	3.43	5.145	37.75	1.34	0.99	3.90	7.95
XVII-9	1.87	492.50	4.52	3.49	6.375	2.22	0.86	3.39	3.75
XVII-10	1.55	67.00	2.78	10.165	10.175	0.33	0.89	3.58	4.55
XVII-11	2.53	437.50	4.86	8.14	22.55	2.08	1.74	6.65	3.72
XVII-12	0.00	630.00	8.41	12.56	25.95	8.88	2.48	9.34	7.32
XVIII-1	0.94	125.00	4.52	7.12	25.4	2.59	1.28	5.32	0.75
XVIII-2	0.00	185.00	4.78	6.34	21.4	0.69	0.98	4.04	4.10

XVIII-3	0.00	175.00	4.25	9.7	21.8	0.87	0.98	4.00	1.32
XVIII-4	5.61	520.00	3.20	8.6	6.58	1.57	0.83	3.21	7.46
XVIII-5	9.56	135.00	3.44	0.61	24.8	2.74	1.05	4.10	0.78
XVIII-6	5.49	850.00	2.46	6.83	3.83	1.38	0.52	2.45	2.49
XVIII-7	10.50	375.00	3.27	4.89	13.0	0.60	0.58	2.30	13.30
XVIII-8	0.00	360.00	3.28	5.56	12.2	3.93	0.56	2.66	2.59
XVIII-9	6.41	395.00	2.64	5.97	2.79	1.06	0.94	4.26	6.76
XVIII-10	0.00	125.00	3.86	7.51	13.1	2.16	1.53	4.31	5.56
XVIII-11	25.50	300.00	8.24	22.6	47.2	17.90	0.44	2.36	40.30
XVIII-12	0.00	285.00	2.60	4.98	18.0	0.47	0.67	2.63	6.41

Anexo 4. Contenidos de elementos de la serie de los lantanidos en las muestras de materia particulada en hundimiento de Cuenca Alfonso

Clave muestra	Contenido de elemento (mg kg ⁻¹)													
	La	Ce	Pr*	Nd	Sm	Eu	Gd*	Tb	Dy*	Ho*	Er*	Tm*	Yb	Lu
XII-2	11.20	21.30	2.38	9.02	2.32	0.17	2.62	0.37	2.00	0.41	1.09	0.15	0.76	0.12
XII-3	14.10	25.30	2.72	9.90	2.39	0.20	3.50	0.57	3.47	0.79	2.30	0.38	1.98	0.38
XII-4	11.90	21.10	2.30	8.57	2.11	0.20	2.70	0.39	2.19	0.45	1.20	0.17	0.90	0.14
XII-5	9.59	19.00	2.19	8.25	2.18	0.37	2.74	0.40	2.24	0.46	1.27	0.18	0.94	0.15
XII-6	8.22	16.10	1.79	6.97	1.72	0.31	2.47	0.36	2.11	0.46	1.29	0.19	1.03	0.17
XII-7	11.00	19.70	2.11	7.54	1.93	0.12	2.00	0.28	1.50	0.30	0.74	0.10	0.49	0.07
XII-8	10.80	20.80	2.48	9.97	2.57	0.50	3.30	0.50	2.76	0.60	1.53	0.22	1.17	0.18
XII-9	14.80	26.90	2.78	10.10	2.48	0.30	2.55	0.31	1.54	0.30	0.69	0.09	0.41	0.05
XII-10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
XII-11	9.56	17.30	1.97	7.13	1.77	0.31	1.80	0.23	1.21	0.23	0.56	0.07	0.35	0.05
XII-12	6.00	12.00	1.37	5.51	1.38	0.33	1.51	0.21	1.10	0.22	0.54	0.07	0.36	0.05
XIV-1	14.00	25.00	2.59	9.30	2.26	0.42	2.92	0.45	2.69	0.59	1.58	0.24	1.29	0.21
XIV-2	17.50	31.80	3.47	13.00	3.26	0.10	3.20	0.41	1.91	0.36	0.80	0.10	0.44	0.06
XIV-3	16.30	29.80	3.20	12.00	3.03	0.44	3.97	0.58	3.23	0.70	1.90	0.28	1.49	0.24
XIV-4	14.00	26.10	2.82	10.40	2.59	0.47	3.73	0.59	3.48	0.80	2.27	0.36	1.90	0.35
XIV-5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
XV-1	7.67	13.50	1.36	4.68	1.07	0.02	1.67	0.29	1.89	0.47	1.46	0.25	1.47	0.28
XV-2	11.60	21.30	2.33	8.98	2.24	0.27	2.74	0.38	2.00	0.41	1.03	0.14	0.71	0.11
XV-3	13.95	26.30	2.95	11.00	2.74	0.14	3.62	0.54	2.99	0.65	1.76	0.25	1.34	0.21
XV-4	9.91	19.70	2.28	9.02	2.38	0.55	2.69	0.37	1.90	0.39	0.96	0.13	0.64	0.10
XV-5	8.52	16.50	1.90	7.12	1.80	0.60	2.60	0.41	2.51	0.56	1.58	0.24	1.38	0.23
XV-6	7.01	14.45	1.68	7.01	1.86	0.20	2.17	0.30	1.67	0.34	0.85	0.12	0.58	0.09
XV-7	12.10	21.20	2.21	7.88	1.91	0.19	2.50	0.36	2.10	0.45	1.26	0.19	0.99	0.16
XV-8	11.90	20.00	2.09	7.12	1.70	0.35	2.50	0.40	2.50	0.56	1.60	0.25	1.43	0.25
XV-9	6.85	10.30	0.91	2.90	0.56	0.42	1.01	0.20	1.52	0.43	1.54	0.30	1.97	0.44
XV-10	12.00	19.60	1.92	6.35	1.31	0.13	1.87	0.30	1.82	0.43	1.24	0.19	1.11	0.18

XV-11	7.99	15.60	1.69	6.42	1.54	0.12	2.25	0.36	2.21	0.49	1.42	0.22	1.25	0.22
XV-12	4.21	10.30	1.40	6.98	2.14	0.47	2.75	0.40	2.25	0.46	1.23	0.18	0.90	0.14
XVI-1	7.40	14.25	1.51	6.00	1.47	0.21	1.82	0.26	1.45	0.31	0.79	0.11	0.57	0.09
XVI-2	3.36	6.31	0.68	2.56	0.61	0.14	0.75	0.12	0.65	0.14	0.37	0.05	0.29	0.04
XVI-3	4.89	9.47	1.01	3.63	0.91	0.13	1.12	0.17	0.96	0.21	0.57	0.08	0.44	0.07
XVI-4	4.01	8.45	0.96	3.77	1.01	0.15	1.06	0.15	0.76	0.15	0.37	0.05	0.25	0.04
XVI-5	4.80	9.79	1.18	4.72	1.21	0.09	1.50	0.21	1.19	0.25	0.66	0.09	0.48	0.07
XVI-6	6.87	13.50	1.49	5.88	1.47	0.28	1.72	0.25	1.41	0.30	0.79	0.11	0.58	0.09
XVI-7	8.02	14.00	1.39	4.76	1.08	0.43	1.26	0.19	1.10	0.24	0.65	0.10	0.51	0.08
XVI-8	9.33	17.10	1.94	7.00	1.73	0.34	1.70	0.22	1.15	0.22	0.53	0.07	0.33	0.05
XVI-9	9.07	16.70	1.79	6.61	1.58	0.19	1.81	0.26	1.44	0.32	0.80	0.12	0.58	0.09
XVI-10	11.10	20.25	2.29	8.75	2.20	0.30	2.61	0.36	1.87	0.38	0.96	0.13	0.65	0.10
XVI-11	11.85	20.95	2.25	8.19	2.03	0.17	2.21	0.31	1.67	0.35	0.87	0.12	0.62	0.09
XVI-12	10.17	18.90	2.12	7.81	2.01	0.49	2.05	0.26	1.34	0.25	0.60	0.08	0.37	0.05
XVII-1	6.14	13.30	1.60	7.00	1.95	0.21	2.51	0.35	1.95	0.42	1.07	0.16	0.79	0.13
XVII-2	8.85	16.85	1.89	7.18	1.86	0.08	2.03	0.29	1.54	0.32	0.79	0.11	0.55	0.08
XVII-3	11.25	20.65	2.32	8.92	2.29	0.33	2.68	0.38	2.04	0.41	1.07	0.15	0.74	0.11
XVII-4	10.93	19.70	2.10	7.74	1.85	0.50	2.21	0.31	1.72	0.37	0.96	0.14	0.70	0.11
XVII-5	9.25	17.15	1.86	6.36	1.64	0.23	2.00	0.31	1.75	0.39	1.05	0.15	0.81	0.13
XVII-6	6.41	13.10	1.53	6.24	1.64	0.26	2.40	0.38	2.29	0.50	1.44	0.22	1.27	0.21
XVII-7	5.87	12.35	1.43	6.09	1.66	0.55	2.11	0.32	1.82	0.40	1.07	0.16	0.84	0.14
XVII-8	6.14	12.55	1.47	6.31	1.71	0.16	1.98	0.28	1.57	0.33	0.85	0.12	0.60	0.09
XVII-9	5.57	10.45	1.20	4.44	1.10	0.20	1.41	0.21	1.17	0.25	0.66	0.10	0.50	0.08
XVII-10	3.55	7.51	0.90	3.76	1.04	0.08	1.40	0.21	1.25	0.28	0.77	0.11	0.62	0.10
XVII-11	8.62	16.35	1.83	7.01	1.77	0.19	1.97	0.28	1.49	0.31	0.75	0.11	0.51	0.08
XVII-12	16.40	27.90	2.79	9.61	2.25	0.66	2.52	0.35	1.83	0.37	0.93	0.13	0.61	0.09
XVIII-1	7.86	15.00	1.68	6.61	1.69	0.19	1.51	0.19	1.00	0.19	0.43	0.05	0.26	0.04
XVIII-2	6.84	13.10	1.43	5.98	1.47	0.03	1.70	0.24	1.40	0.30	0.80	0.11	0.60	0.09
XVIII-3	8.07	14.60	1.42	5.03	1.15	0.03	1.22	0.17	0.90	0.18	0.46	0.06	0.31	0.05

XVIII-4	1.92	4.47	0.61	2.96	0.90	0.24	1.42	0.23	1.52	0.37	1.11	0.18	1.09	0.19
XVIII-5	2.57	6.01	0.79	3.70	1.11	0.10	1.53	0.23	1.35	0.31	0.83	0.13	0.67	0.11
XVIII-6	2.82	5.47	0.63	2.53	0.66	0.01	0.92	0.14	0.84	0.19	0.54	0.08	0.45	0.08
XVIII-7	1.80	3.10	0.32	1.11	0.26	0.31	0.48	0.09	0.62	0.17	0.54	0.10	0.61	0.12
XVIII-8	3.47	8.42	1.13	5.13	1.64	0.03	2.00	0.31	1.66	0.37	0.97	0.14	0.73	0.12
XVIII-9	4.44	4.30	0.25	0.48	0.06	0.22	0.12	0.02	0.18	0.05	0.18	0.04	0.26	0.05
XVIII-10	1.57	3.49	0.51	2.42	0.77	0.03	1.09	0.17	1.03	0.23	0.67	0.10	0.57	0.09
XVIII-11	3.69	8.98	1.18	5.12	1.58	0.34	2.41	0.41	2.63	0.63	1.90	0.31	1.75	0.33
XVIII-12	1.92	5.11	0.80	4.38	1.56	0.23	2.00	0.32	1.86	0.41	1.17	0.18	0.96	0.16

Anexo 5. Contenidos de elementos en los horizontes del núcleo C44, colectado en Cuenca
Alfonso

Clave	Horizonte (mm)	Contenido								
		As (mg kg ⁻¹)	Ba (mg kg ⁻¹)	Ca (%)	Co (mg kg ⁻¹)	Cr (mg kg ⁻¹)	Cs (mg kg ⁻¹)	Fe (%)	Sc (mg kg ⁻¹)	U (mg kg ⁻¹)
CA-1	0 - 3	7.6	600	7.20	7.1	54.3	8.4	2.25	9.5	8.4
CA-2	3 - 6	4.5	290	6.15	1.5	75.7	11.0	2.06	9.6	7.8
CA-3	6 - 9	4.6	295	6.93	6.3	52.4	1.1	2.25	9.9	3.1
CA-4	9 - 12	1.3	235	5.33	7.5	74.7	8.2	2.14	10.3	8.5
CA-5	12 - 15	3.8	220	6.94	1.6	63.4	1.3	2.42	10.9	10.5
CA-6	15 - 18	7.2	130	5.10	8.7	68.1	2.0	2.59	11.7	7.0
CA-7	18 - 21		67	6.85	10.2	13.1	3.3	2.82	12.2	6.8
CA-8	21 - 24	5.9	420	5.14	8.9	56.8	15.3	2.62	11.4	10.7
CA-9	24 - 27		535	6.62	0.9	72.5	1.9	2.73	12.5	6.2
CA-10	27 - 30	1.5	350	4.32	6.5	53.5	10.0	2.58	11.6	12.1
CA-11	30 - 33		805	5.07	7.6	74.7	3.4	2.94	12.8	16.2
CA-12	33 - 36	3.2	205	4.61	7.2	60.9	0.7	2.97	13.0	19.1
CA-13	36 - 39	0.4	110	2.31	1.9	75.2	10.6	2.80	12.9	12.8
CA-14	39 - 42	1.7	885	3.01	9.2	89.3	11.4	2.96	14.1	9.6
CA-15	42 - 45	5.0	740	3.33	1.3	63.5	10.9	3.02	12.9	10.9
CA-16	45 - 48		98	3.23	10.5	8.4	11.5	2.66	12.0	3.8
CA-17	48 - 51		775	2.76	9.8	4.5	1.1	2.83	12.8	4.3
CA-18	51 - 54		285	0.51	5.5	59.9	1.7	3.31	14.4	1.3
CA-19	54 - 57		200	0.56	9.3	66.0	13.4	2.94	13.3	3.4
CA-20	57 - 60		280	2.96	7.4	70.1	8.4	2.86	12.9	5.3
CA-21	60 - 63		675	1.49	4.3	45.4	0.8	2.78	12.4	3.4
CA-22	63 - 66		50	0.29	7.6	54.5	8.1	2.60	11.8	1.7
CA-23	66 - 69		400	3.18	5.3	46.3	7.0	2.64	11.1	1.6
CA-24	69 - 72		285	4.32	7.7	53.0	2.0	2.49	11.8	1.0
CA-25	72 - 75	0.9	440	5.09	6.4	29.0	1.4	2.44	10.9	3.9
CA-26	75 - 78		53	3.73	5.0	49.6	1.1	2.43	10.4	1.7

CA-27	78 - 81		600	4.66	4.7	63.1	1.5	2.56	10.8	0.7
CA-28	81 - 84		200	2.89	5.8	71.1	6.1	2.45	10.8	0.9
CA-29	84 - 87		94	4.00	10.6	2.3	13.3	2.34	11.3	4.5
CA-30	87 - 90	9.7	555	3.01	5.1	67.7	16.3	2.82	12.7	5.3
CA-31	90 a 93		175	4.62	6.0	51.7	0.5	2.28	10.8	2.4
CA-32	93 - 96		105	4.68	9.3	44.7	11.8	2.72	11.5	4.7
CA-33	96 - 99		465	4.48	8.9	45.7	10.5	2.51	11.2	1.5
CA-34	99 - 102	9.1	240	2.99	8.7	51.3	7.1	2.45	11.4	9.3

Anexo 6. Contenidos de elementos de la serie de los lantánidos en los horizontes del núcleo C44, colectado en Cuenca Alfonso

Clave muestra	Contenido de elemento (mg kg ⁻¹)													
	La	Ce	Pr*	Nd	Sm	Eu	Gd*	Tb	Dy*	Ho*	Er*	Tm*	Yb	Lu
CA-1	13.70	27.60	3.23	13.00	3.50	0.39	4.00	0.53	2.74	0.51	1.29	0.17	0.80	0.12
CA-2	13.70	25.70	2.97	11.00	2.89	0.23	3.67	0.53	2.96	0.62	1.69	0.23	1.20	0.19
CA-3	14.10	27.80	3.19	12.20	3.17	0.70	3.90	0.53	2.97	0.61	1.50	0.21	1.06	0.16
CA-4	16.20	30.40	3.42	12.70	3.22	0.45	3.70	0.50	2.59	0.49	1.22	0.16	0.80	0.12
CA-5	14.40	30.60	3.88	16.80	4.58	0.26	5.98	0.84	4.78	1.04	2.73	0.40	1.94	0.33
CA-6	12.90	25.80	3.11	12.80	3.49	0.41	4.92	0.76	4.54	1.08	3.00	0.47	2.62	0.44
CA-7	10.70	22.20	2.75	11.60	3.22	0.39	3.78	0.51	2.58	0.48	1.19	0.16	0.74	0.11
CA-8	15.60	27.90	2.99	10.90	2.55	0.68	3.49	0.53	3.07	0.69	1.92	0.29	1.58	0.25
CA-9	14.00	28.80	3.30	13.10	3.52	0.26	4.68	0.67	3.92	0.79	2.08	0.30	1.57	0.24
CA-10	14.40	27.80	3.12	11.90	3.01	0.38	3.18	0.43	2.07	0.40	0.93	0.12	0.59	0.08
CA-11	15.10	30.50	3.50	13.90	3.75	0.38	4.04	0.53	2.60	0.47	1.11	0.14	0.67	0.09
CA-12	13.40	27.60	3.23	13.00	3.32	0.53	4.52	0.65	3.81	0.80	2.13	0.31	1.62	0.25
CA-13	15.20	30.00	3.38	13.10	3.37	0.46	3.78	0.50	2.53	0.46	1.12	0.15	0.70	0.10
CA-14	13.90	29.80	3.51	14.70	4.03	0.55	5.90	0.88	5.10	1.20	3.31	0.50	2.75	0.46
CA-15	11.70	24.70	3.00	12.70	3.59	0.44	4.49	0.63	3.48	0.71	1.85	0.25	1.26	0.19
CA-16	9.28	21.10	2.75	12.00	3.57	0.65	4.30	0.60	3.11	0.64	1.67	0.22	1.09	0.16
CA-17	13.90	28.00	3.32	13.60	3.75	0.88	4.71	0.66	3.81	0.78	2.04	0.30	1.53	0.23
CA-18	9.76	21.70	2.74	11.90	3.79	0.47	4.61	0.64	3.52	0.72	1.86	0.25	1.27	0.19
CA-19	3.80	12.30	2.20	13.20	5.59	0.64	5.60	0.68	3.22	0.59	1.26	0.15	0.65	0.09
CA-20	17.80	17.10	1.15	2.50	0.34	0.53	0.52	0.10	0.69	0.18	0.59	0.10	0.65	0.13
CA-21	15.30	32.10	3.97	16.90	4.63	0.42	4.77	0.61	3.00	0.56	1.27	0.16	0.71	0.10
CA-22	6.34	16.00	2.27	11.20	3.77	0.63	4.62	0.65	3.70	0.75	1.99	0.28	1.43	0.21
CA-23	6.40	15.20	2.06	9.28	2.92	0.53	3.23	0.44	2.26	0.42	1.02	0.14	0.65	0.09
CA-24	14.10	25.90	2.78	10.40	2.54	0.51	3.70	0.57	3.30	0.73	2.09	0.32	1.73	0.30
CA-25	9.12	22.80	3.43	17.10	5.63	0.05	6.03	0.80	4.08	0.77	1.85	0.23	1.06	0.15
CA-26	8.71	19.90	2.69	12.20	3.79	0.66	3.58	0.48	2.40	0.42	1.00	0.13	0.61	0.09
CA-27	9.45	22.60	3.18	14.70	4.73	0.87	5.52	0.77	4.18	0.82	2.09	0.29	1.40	0.20

CA-28	4.86	13.70	2.19	11.80	4.28	0.75	5.00	0.67	3.52	0.69	1.71	0.22	1.01	0.15
CA-29	10.40	23.20	3.06	13.30	4.05	0.20	4.81	0.66	3.58	0.71	1.79	0.23	1.15	0.17
CA-30	18.70	36.60	4.22	18.00	4.59	1.40	4.50	0.58	2.77	0.49	1.10	0.14	0.61	0.08
CA-31	13.70	27.40	3.18	13.00	3.48	0.02	4.02	0.54	2.89	0.56	1.34	0.18	0.88	0.13
CA-32	9.98	25.00	3.52	17.80	5.82	0.38	6.70	0.90	4.81	0.97	2.38	0.32	1.52	0.21
CA-33	13.30	29.30	3.50	14.60	4.06	0.71	4.47	0.59	2.82	0.50	1.19	0.15	0.68	0.09
CA-34	13.70	29.70	3.52	14.90	4.23	0.55	4.82	0.65	3.50	0.70	1.77	0.23	1.12	0.17