



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**SEDIMENTOLOGÍA DEL SUBAMBIENTE DE INFRAPLAYA ADYACENTE A LAS
DESEMBOCADURAS DE LOS RÍOS GRIJALVA Y SAN PEDRO-SAN PABLO,**

MÉXICO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

GEOLOGÍA MARINA

PRESENTA:

MARTHA PATRICIA AYALA PÉREZ

TUTOR PRINCIPAL:

DR. JOHN SELVAMONY ARMSTRONG-ALTRIN SAM
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DR. ANTONIO ZOILO MÁRQUEZ GARCÍA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA, UNIDAD IZTAPALAPA

DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA
INSTITUTO DE CIENCIAS EL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

DRA. MARÍA LUISA MACHAIN CASTILLO
INSTITUTO DE CIENCIAS EL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

DRA. BLANCA ESTELA MARGARITA BUITRÓN SÁNCHEZ
INSITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1.	Antecedentes	5
1.2.	Hipótesis	6
1.3.	Objetivos	7
1.4.	Área de estudio.....	8
2.	Materiales y métodos.....	18
3.	Resultados.....	30
3.1.	Granulometría.....	30
3.2.	Análisis mineralógico.....	38
3.3.	Petrología.....	41
3.4.	Porcentaje de carbonatos y carbono orgánico.....	45
3.5.	Elementos mayores.....	50
3.6.	Elementos traza.....	74
3.7.	Tierras raras.....	115
4.	Consideraciones finales.....	125
5.	Conclusiones.....	133
6.	Referencias	137
7.	Anexos.....	151

Índice de Figuras

Figura 1. Zonificación de playa.....	2
Figura 2. Zonificación del perfil de playa.....	3
Figura 3. Área de estudio y puntos de muestreo.....	8
Figura 4. Anomalía mensual de precipitación.....	10
Figura 5. A) Viento dominante en la zona. Zavala et al., 2014. B) Patrón de vientos durante un Norte intenso, Golfo de México.....	11
Figura 6. Oleaje durante temporada normal y durante temporada de nortes.	13
Figura 7. L ₁ , L ₂ : giros ciclónicos, H: giro anticiclónico en el Golfo de México.	14
Figura 8. Cuencas hidrológicas.	15
Figura 9. Marco tectónico del centro-sur de México.	17
Figura 10. Difractómetro.	24
Figura 11. Muestras con dicromato de potasio	26
Figura 12. Porcentaje de arena, limo y arcilla.....	31
Figura 13. Distribución de sedimento por su tamaño de grano	32
Figura 14. Diagrama ternario Arena-Limo-Arcilla	33
Figura 15. Correlaciones entre el tamaño de grano y la clasificación del sedimento, mayo.....	35
Figura 16. Correlaciones entre el tamaño de grano y la clasificación del sedimento, noviembre	36
Figura 17. Minerales observados por difracción de rayos X	38
Figura 18. Minerales en las desembocaduras durante las dos temporadas.	40
Figura 19. Diagrama ternario para la clasificación de sedimentos	42
Figura 20a. Láminas delgadas observadas en el microscopio petrográfico, Grijalva.....	43

Figura 20b. Láminas delgadas observadas en el microscopio petrográfico. SPSP.....	44
Figura 21a. Distribución de carbonatos (CO ₃)	46
Figura 21b. Distribución de carbono orgánico	48
Figura 22. Porcentaje de carbonatos y carbono orgánico	49
Figura 23. Elementos mayores normalizados con UCC	51-52
Figura 24. Correlaciones de Fe ₂ O ₃ vs TiO ₂	54-55
Figura 25. Correlaciones entre Fe ₂ O ₃ vs Al ₂ O ₃	57-58
Figura 26. Correlaciones de Fe ₂ O ₃ vs SiO ₂	60-61
Figura 27. Correlaciones de Al ₂ O ₃ vs CaO para Grijalva	63
Figura 28. Correlaciones de Al ₂ O ₃ vs CaO para SPSP.....	64
Figura 29. Correlaciones entre CaO y %CO ₃ para Grijalva.....	65
Figura 30. Correlaciones entre CaO y %CO ₃ para SPSP.....	66
Figura 31. Diagrama de clasificación geoquímica	68
Figura 32. Diagrama discriminante de procedencia.....	70
Figura 33. Diagrama ternario de tendencia de meteorización	73
Figura 34. Elementos traza normalizados con UCC	76
Figura 35. Distribución de Cr, Sr y Zr en las desembocaduras	78
Figura 36. Factor de Enriquecimiento (EF)	80-81
Figura 37. Índice de Geoacumulación (Igeo)	83-84
Figura 38. Elementos de tierras raras normalizadas con UCC	117-118
Figura 39. Tierras raras normalizadas con Condrita	120-121
Figura 40. Tierras raras normalizadas con Condrita (Taylor y McLennan, 1985).....	122
Figura 41. Diagramas bivariados para sedimentos superficiales.....	124

Dedicado con amor a Daniel, mi compañero de vida y mi apoyo incondicional.

*Para Marina, mi pequeño gran motor y motivación, para que siempre crea en ella misma y
sepa que puede lograr todo lo que se proponga.*

Y, como siempre, a mis padres, presentes en cada pequeño paso en mi vida.

Agradecimientos

Gracias al programa de Doctorado del Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología por su apoyo para la realización de este trabajo y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada durante los cuatro años de estudio.

Agradezco la asistencia financiera proporcionada al Dr. John S. Armstrong Altrin S. del proyecto DGAPA-PAPIIT, número: IN107020 por el cual fue el análisis de mineralogía.

Agradezco la asistencia financiera proporcionada al Dr. John S. Armstrong Altrin S. del proyecto CONACyT Ciencia Básica, número: A1-S-21287 por el apoyo para los análisis de las muestras de sedimentos del Golfo de México.

Agradezco el proyecto institucional del Instituto de Ciencias de Mar y Limnología (ICML) n° 616.

Además, agradezco profundamente al Dr. John Armstrong por sus enseñanzas, principalmente en geoquímica de sedimentos, por su paciencia y su motivación.

Agradezco al Dr. Antonio Márquez, siempre presente en mi formación, mi “sensei” y gran amigo, gracias por tanto apoyo.

Gracias también al Dr. Miguel Ángel Alatorre, desde que lo conocí ha sido mi inspiración en diferentes áreas académicas, sus correcciones y comentarios han sido siempre muy acertados y útiles y también ha sido mi gran inspiración como persona.

Agradezco a la Dra. María Luisa Machain y a la Dra. Blanca Buitrón por sus comentarios en los tutorales para mejorar este trabajo y por sus preguntas que me enriquecieron.

Agradezco con mucho cariño al Dr. Arturo Carranza, con quien comencé a trabajar en el doctorado, aunque se tuvo que jubilar, es para mí un ejemplo a seguir, un gran investigador y amigo. Gracias por su confianza, por las largas pláticas para cuestionar todo y por la curiosidad científica que siempre compartimos.

Agradezco con todo mi corazón a Susana Santiago por su apoyo en el laboratorio de Química Marina, por sus enseñanzas, pláticas y convivencia. Gracias por tu valiosa y gran amistad Susy.

Agradezco a Eduardo Morales y a Ricardo por su apoyo en el procesamiento de muestras, por sus pláticas, motivación y convivencia en el laboratorio de Sedimentología.

Agradezco a Ofelia Pérez Arvizu por su apoyo en el análisis de elementos de tierras raras y elementos trazas en Juriquilla.

Agradezco a Daniel, por su apoyo incondicional y motivación diaria, sobre todo cuando sentía que no podía más. También agradezco a Marina, por la paciencia que debió tener a su corta edad para soportar mis ausencias durante el tiempo en laboratorio y las clases.

Agradezco a mi familia, especialmente a mis padres, por ser siempre una de mis mayores motivaciones para seguir y luchar por lo que quiero.

Finalmente quiero agradecer a los amigos que me han acompañado durante toda mi formación o parte de ella, por salidas inolvidables, desveladas, trabajo, pláticas, fiestas, crisis, apoyo y risas. Aunque hemos tomado un camino diferente, los llevo a todos en mi corazón y siempre los recuerdo con muchas sonrisas.

1. Introducción

Las playas son ambientes litorales de materiales no consolidados (Komar, 1976) que se encuentran influenciadas por el continente y el medio marino, por lo que modifican constantemente su morfología y composición de acuerdo con las condiciones naturales y antrópicas.

La playa se ha clasificado en tres zonas principales:

- 1) Supraplaya o playa emergida, que siempre se encuentra seca, excepto durante eventos hidrometeorológicos extremos.
- 2) Mesoplaya, caracterizada por ser la zona de vaivén del oleaje, considerada como la línea de costa.
- 3) Infraplaya, que es la playa que siempre se encuentra sumergida (Carranza-Edwards y Caso-Chávez, 1994) y abarca desde el límite de la mesoplaya hasta el nivel base del oleaje, es decir, la profundidad hasta la cual el oleaje puede remover el sedimento de fondo. El límite de esta zona generalmente coincide con el inicio de la plataforma continental (Figura 1).

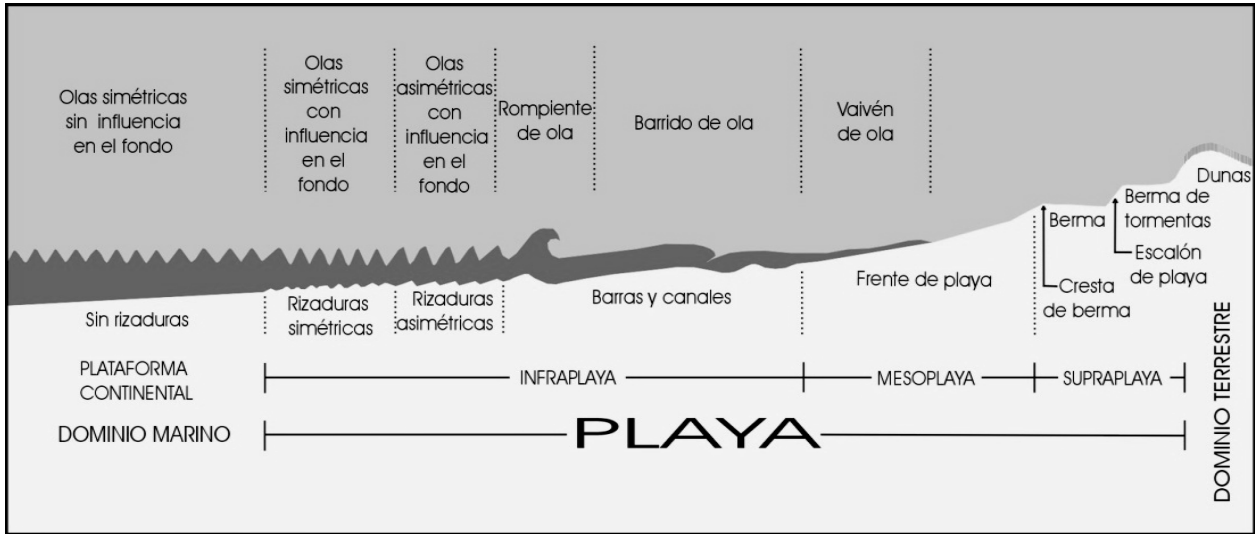


Figura 1. Zonificación de playa. Carranza-Edwards y Caso-Chávez (1994).

También existe otra zonificación de playas basado en cómo llega el oleaje a la línea de costa, donde la zona de *backshore* corresponde a zona de supraplaya, *shore-line* corresponde a la mesoplaya o donde llega el oleaje, y *fore-shore* a *shoreface* corresponde a la infraplaya (Figura 2). Cuando el oleaje se acerca hacia la línea de costa, la profundidad comienza a descender, entonces se dice que se presenta un someramiento, es decir, el oleaje comienza a incidir sobre el fondo y después se presenta la zona de rompiente o breaker zone, que es donde el oleaje rompe. En el caso de la infraplaya, abarca desde que comienza este someramiento hasta la línea de costa, incluyendo la zona de rompientes, barras, canales, rizaduras y cualquier tipo de morfología de fondo presente en este sitio.

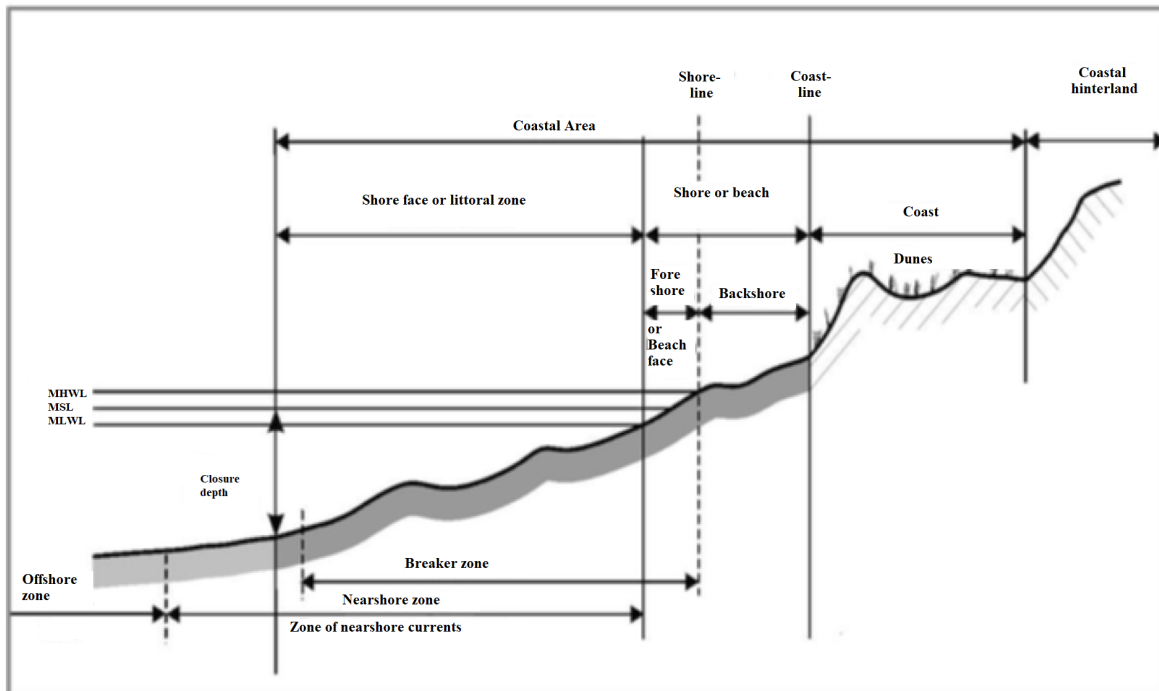


Figura 2. Zonificación del perfil de playa. Coastal Engineering Research Center, 1984.

En Tabasco y parte de Campeche dominan los cordones de dunas formados por depósitos aluviales de los ríos más caudalosos del país, el Usumacinta y el Grijalva. Este relieve bajo es vulnerable a los eventos hidrometeorológicos y marinos, por lo que los cambios morfológicos en la zona son muy dinámicos a nivel estacional y a lo largo de amplios periodos de tiempo (Ortiz, 1991).

Para entender el comportamiento de las diferentes zonas de la playa, es necesario analizar los sedimentos que la conforman. Mediante el análisis geoquímico es posible determinar las condiciones de intemperismo de la roca madre, proveniencia y ambiente de depósito (Armstrong-Altrin y Machain-Castillo, 2016), este último es la clave para determinar en qué condiciones se depositan actualmente los sedimentos y cómo varía esta deposición según el intemperismo y otros procesos que puedan ocurrir en la roca madre de la cuenca alta.

La concentración de elementos mayores y traza en sedimento terrígeno es considerada una herramienta útil para investigar las condiciones de intemperismo en el área donde se originaron, proveniencia, y para entender las condiciones reductoras en el ambiente de depósito, ya que la composición sedimentológica es controlada por la roca madre, factores climáticos y tectónicos de la fuente (Armstrong-Altrin et al., 2004). Por esta razón, los elementos trazas y de tierras raras son generalmente utilizados para identificar la roca madre y los ambientes tectónicos, además son indicadores para clasificar los elementos de tipo félsico, intermedio y máfico (Armstrong-Altrin et al., 2012).

Por otra parte, la infraplaya es más variable cuando se acerca a su frontera con la plataforma continental, estas variaciones en la infraplaya dependen principalmente del nivel base de la ola, que actúa sobre el material no consolidado del fondo. Cuando se presentan oleajes de tormenta, el nivel base de la ola aumenta su profundidad y el material fino puede entrar en movimiento hacia las partes más elevadas de la playa, lo que es de gran importancia porque estos sedimentos más finos pueden contener una mayor cantidad de contaminantes (Carranza-Edwards, 2010).

1.1. Antecedentes

La dinámica costera en Tabasco ha sido estudiada con mayor interés desde la década de los sesentas. La explicación morfogénica de los cordones litorales y su dinámica, así como las causas de su distribución espacial, fue descrita por Psuty (1965), mientras que el análisis de la interacción entre el manglar y los procesos geomorfológicos fue desarrollado por Thom (1967). La sedimentación, erosión y características geográficas de las llanuras de Tabasco fueron expuestas por West et al. (1969), quienes observaron que la llanura de cordones litorales no había crecido en 50 años.

Los componentes carbonatados fueron analizados por Carranza-Edwards et al. (1996), quienes encontraron bajas concentraciones de sedimentos carbonatados en playas de Tabasco. La petrografía y geoquímica de sedimentos del holoceno en el oeste del Golfo de México fue analizada por Kasper-Zubillaga et al. (1999). Recientemente, un análisis textural de sedimentos y de la erosión costera en la zona de Tabasco y Campeche fue realizado por Carranza-Edwards et al. (2015), donde se han observado las características y cambios sedimentológicos en la zona.

Tapia-Fernández et al. (2017) analizaron sedimentos del sur del Golfo de México y determinaron diferentes edades de ese sedimento, así como diversas características sedimentológicas y geoquímicas de algunas playas de Tabasco. Machain-Castillo et al. (2020) analizaron sedimentos marinos en el área marina cercana a la desembocadura Grijalva, donde encontraron distintos niveles de elementos que pueden considerarse contaminantes, así como características texturales diferentes a lo largo de núcleos de sedimento en la zona.

También se han llevado a cabo análisis texturales de los sedimentos superficiales de las distintas zonas de la playa, así como su composición mineralógica, morfodinámica, oleaje y vulnerabilidad costera por erosión en la zona (Ayala-Pérez, 2013).

1.1.2. Justificación

La investigación sedimentológica permitirá conocer las características texturales, petrológicas y geoquímicas de una zona de playa que cuenta con escasos estudios debido a su difícil acceso, ya que no presenta una profundidad suficiente para ingresar a bordo de un crucero oceanográfico, ni una profundidad óptima para realizar el muestreo sin lancha, además de ser una zona afectada por las barras sumergidas que pueden provocar la rotura del oleaje en diferentes profundidades y dificultar el muestreo, sobre todo durante la temporada de lluvias.

Esta zona, como se mencionó anteriormente, presenta una gran variabilidad estacional debido a los cambios en el nivel base del oleaje, por lo que estudiarla, ayuda a comprender los procesos que se generan en todas las zonas de la playa, así como los procesos que ocurren en las cuencas y que intervienen en gran medida en las playas. De esta manera será posible entender las diferencias entre los ambientes de ambas desembocaduras y los procesos dominantes en ellas.

1.2. Hipótesis

Los ríos Grijalva y San Pedro-San Pablo, a lo largo de su cauce, recorren una fisiografía similar, sin embargo, sus desembocaduras son dos ambientes completamente diferentes debido a los procesos oceánicos como las corrientes litorales del este que transportan sedimentos de la Sonda de Campeche y las corrientes estacionales del norte durante el invierno, así como procesos ocurridos en la cuenca alta como la construcción de presas y los cambios de trayectoria de los ríos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Integrar análisis texturales, petrológicos y geoquímicos que permitan comprender las diferencias que existen entre las desembocaduras de los ríos Grijalva y San Pedro-San Pablo durante la temporada climática de secas y nortes, así como analizar las afectaciones ambientales en la cuenca media, baja y zona marina que modifican el aporte de sedimentos en la zona de infraplaya.

1.3.2. Objetivos particulares

- Conocer la composición textural y variaciones estacionales de la zona de infraplaya en el área adyacente a las desembocaduras de los ríos Grijalva y San Pedro-San Pablo, para inferir el grado de energía en función del tamaño de partícula.
- Identificar las características petrológicas del sedimento superficial en las diferentes épocas de muestreo para inferir fuentes de procedencia.
- Realizar un estudio geoquímico de los sedimentos colectados para complementar los estudios de textura y petrología.
- Integrar la información anterior para resaltar las interacciones y afectaciones que se presentan en la zona de infraplaya y así poder aportar recomendaciones hacia la vulnerabilidad.

1.4. Área de estudio

La zona de estudio se encuentra en la zona marina del estado de Tabasco entre los $92^{\circ} 41'$ y los $92^{\circ} 27'$ de longitud oeste, y los $18^{\circ} 36'$ y los $18^{\circ} 39'$ de latitud norte, en la meso-región sur-sureste de México (Hernández *et al.*, 2008) y dentro de la provincia fisiográfica de la Bahía de Campeche. En la zona de estudio se encuentran las desembocaduras de los ríos Grijalva y San Pedro-San Pablo (Figura 3), cuyo sedimento es depositado en gran parte de la zona de playa.

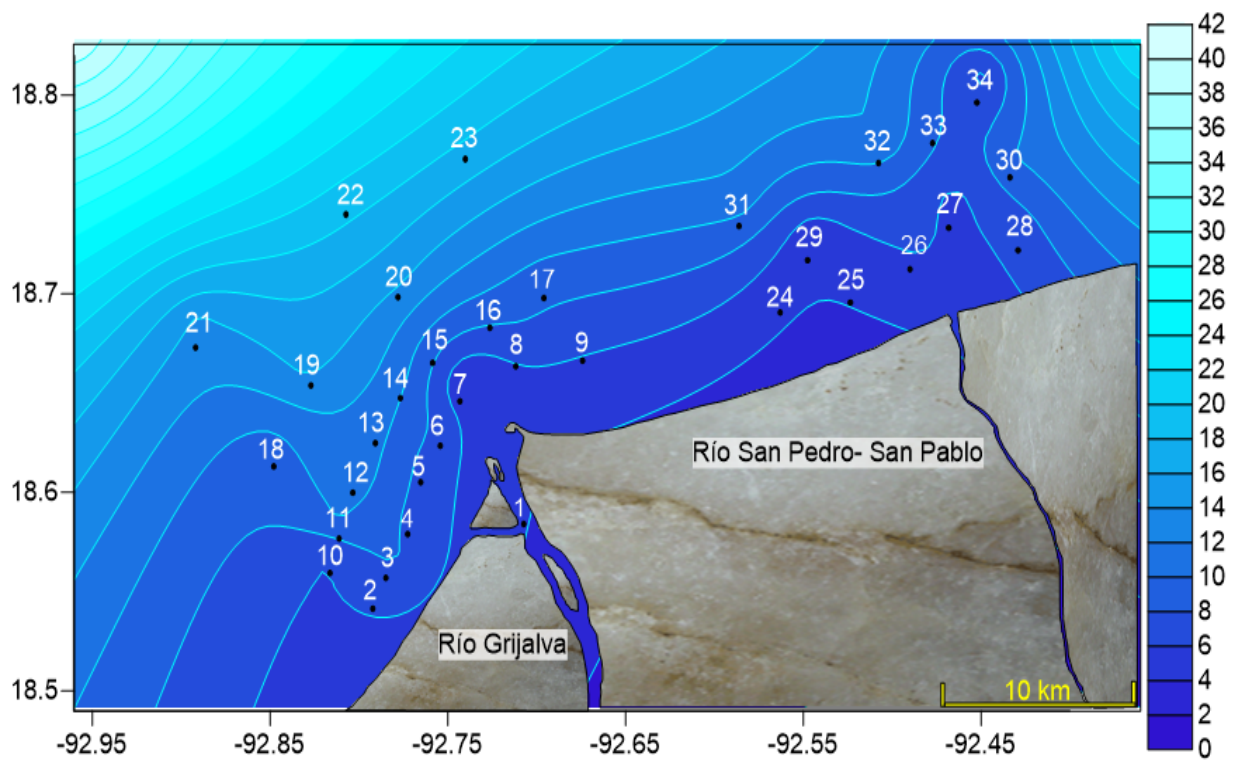


Figura 3. Área de estudio y puntos de muestreo.

1.4.1. Clima

El clima de la región es cálido y húmedo, con lluvias todo el año, aunque son más abundantes en verano. La precipitación media anual se encuentra entre 1500 y 2000 mm (Vidal, 1990) y la temperatura media anual es superior a 26° C (García y Vidal, 1990) (Figura 4). Los vientos dominantes son en dirección este-noreste, con una velocidad promedio entre 4 y 6 m/seg (Pérez, 1990), éstos son influenciados por masas de aire frío provenientes del norte, denominados frentes fríos o “nortes”, y por vientos del sur provenientes del Istmo de Tehuantepec, llamados “suradas”, así como por las tormentas tropicales y huracanes (Figura 5).

Los eventos meteorológicos extremos generan vientos de mayor intensidad en los meses de octubre, noviembre y diciembre (temporada de nortes), con máximas de 30 km/h, acompañados de fuertes lluvias en la región y en la cuenca alta (Figura 4). Las características del suelo y su poca altura sobre el nivel del mar, provocan que estas lluvias sean causantes de numerosas inundaciones en casi todo el territorio tabasqueño.

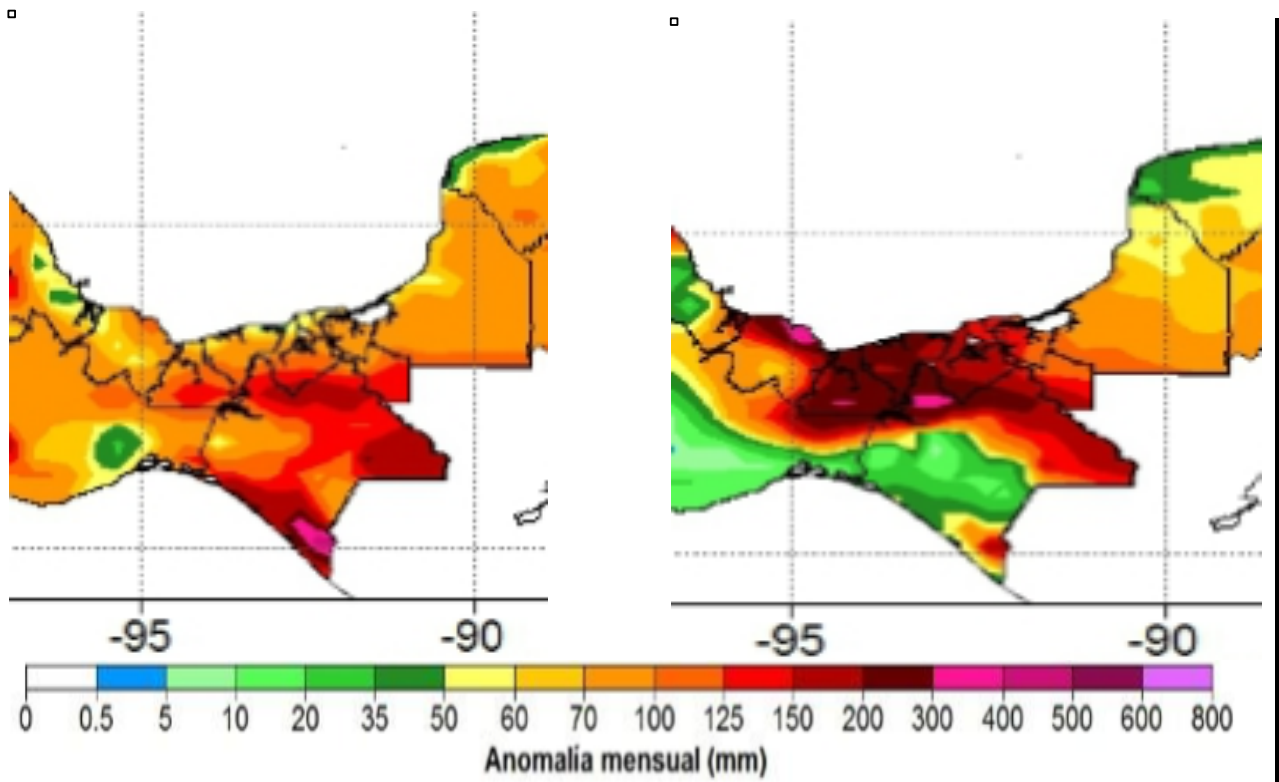


Figura 4. Anomalía mensual de precipitación durante mayo (A) y noviembre (B) del 2017.
CONAGUA (2017).

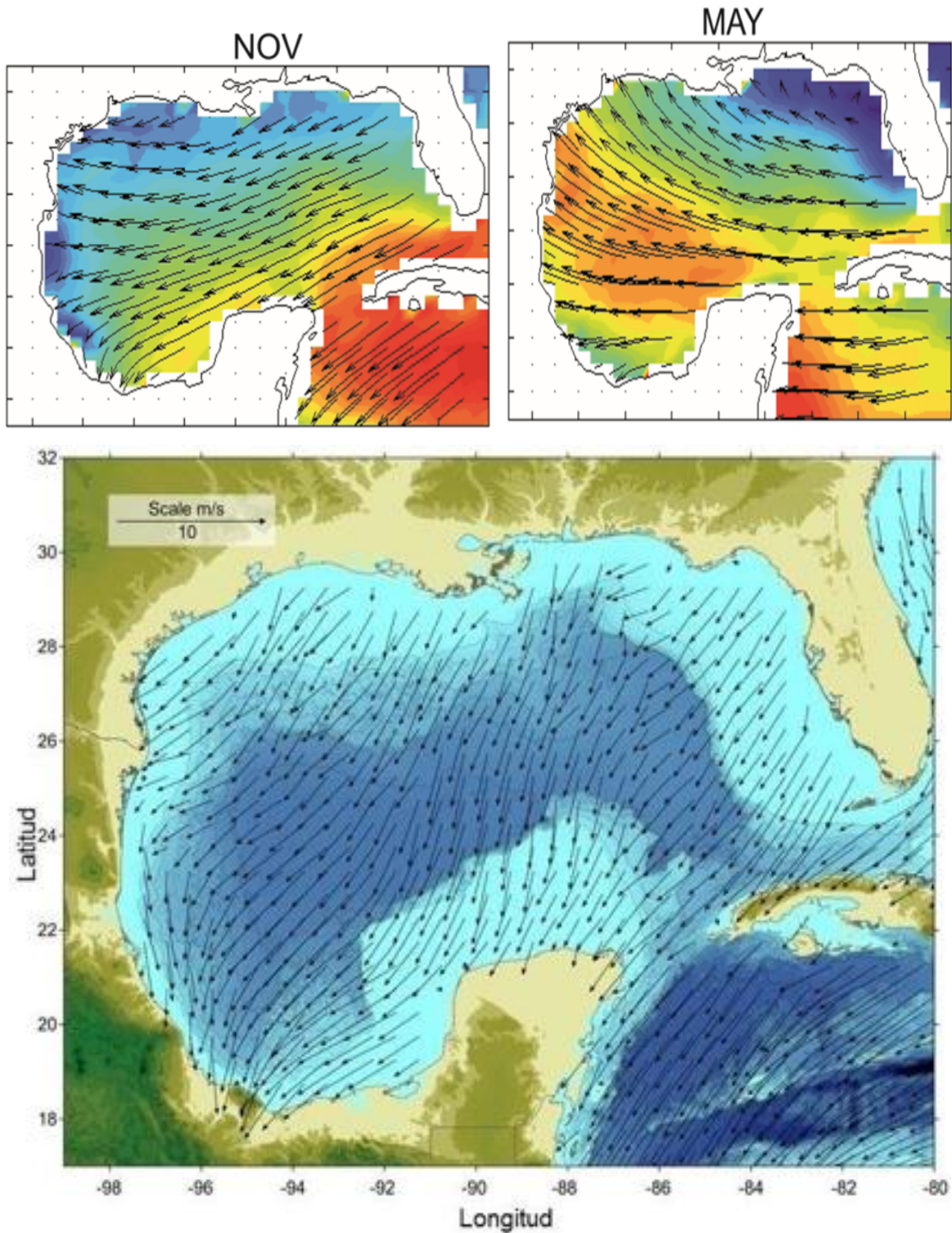


Figura 5. A) Viento dominante en la zona. Zavala et al. (2014). B) Patrón de vientos durante un Norte intenso, Golfo de México.

1.4.2. Características oceanográficas

En la línea de costa, la mayor parte del año se observa un oleaje de baja altura y energía proveniente del noreste (Psuty, 1969; Fernández et al., 1990), aunque los nortes erosionan las playas de la zona porque modifican la dirección del oleaje hacia el sureste durante el tiempo que dure este evento, cerca de cuatro días (Figura 6). De esta manera, la variación estacional del oleaje marca las fluctuaciones de avance o retroceso de la línea de costa, caracterizado generalmente con procesos erosivos durante la época de nortes (Ortiz-Pérez, 1991). La región presenta un oleaje con un promedio de 4s con energía intermedia a baja, con olas entre 1.4 y 2.3 m de altura, pero durante los nortes, tormentas tropicales y huracanes, alcanzan 9-10 s y 4.5 m de altura (Lankford, 1977; Fernández et al., 1990). El régimen de mareas es de tipo mixto y la circulación superficial es de 14 cm/seg en el verano, y de 6 a 8 cm/seg en invierno, con dirección este a oeste (Fernández et al., 1990).

La Bahía de Campeche, en la región sur del Golfo de México, presenta una circulación ciclónica durante el otoño, aunque ha sido registrado también en agosto (Cochrane 1963). Además, en la plataforma costera se observan giros ciclónicos más pequeños con diámetros de 150 km asociados al desprendimiento del gran giro anticiclónico (Monreal-Gómez y Salas-de-León 1990) (Figura 7). En la bahía estos giros ciclónicos tienen radios y velocidades tangenciales máximas de 1.75 y 1.31 veces mayores que los anticiclónicos. Es probable que los giros ciclónicos sean resultado de la formación del gran giro anticiclónico, de la geometría de la costa (Monreal-Gómez y Salas-de-León 1997) y la topografía asociada al cañón de Campeche, ya que cuando una corriente intensa pasa de una zona de mayor profundidad a una de menor profundidad induce la formación de giros anticiclónicos y de forma contraria cuando la corriente va de una de menor profundidad a una de mayor se forman giros ciclónicos.

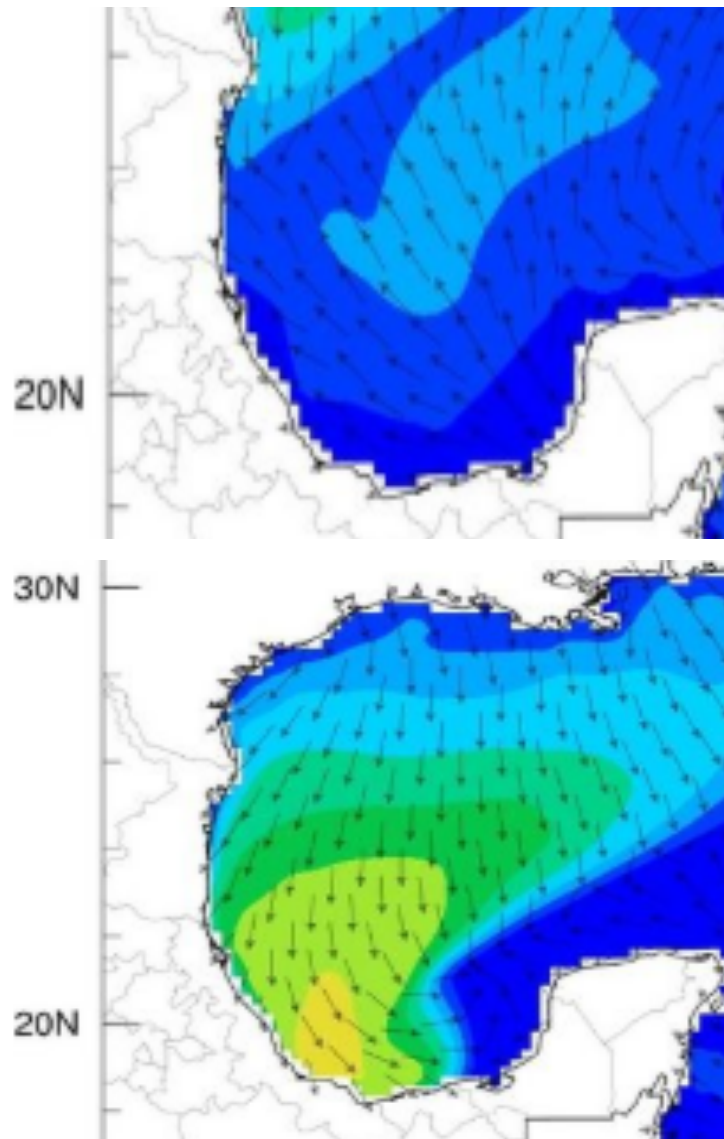


Figura 6. Oleaje durante temporada normal y durante temporada de nortes. SIPROMAT (SMN, CONAGUA), Servicio Mareográfico Nacional (UNAM).

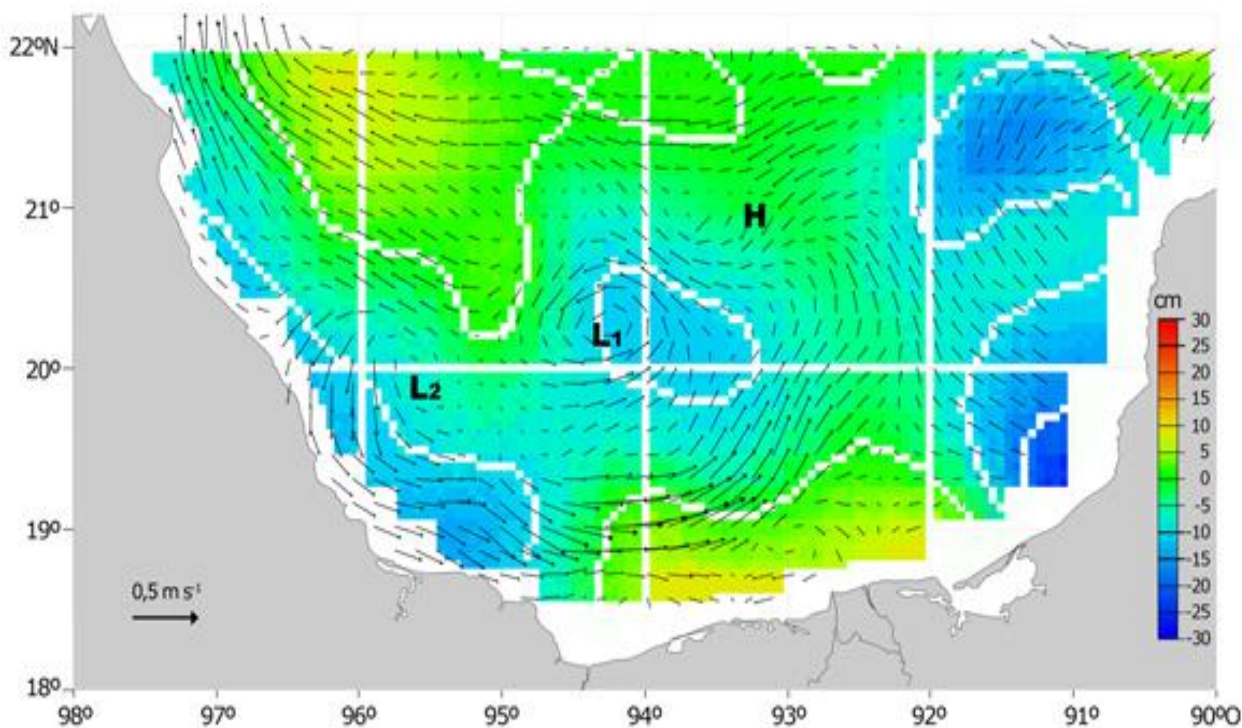


Figura 7. L_1 , L_2 : giros ciclónicos, H: giro anticiclónico en el Golfo de México. Díaz-Flores et al. (2017).

1.4.3. Marco hidrológico

Por otra parte, en la zona donde se obtuvieron las muestras desembocan dos ríos que forman parte del complejo deltaico más grande del país y drenan la cuenca Grijalva-Usumacinta. El Grijalva tiene una longitud de 1 521 km, una esorrentía de 115 136 millones de $m^3/año$ y una superficie de cuenca de 85 553 km^2 (Rubio y Triana, 2006; Rivera-Arriaga y Azuz-Adeth, 2010). El río San Pedro-San Pablo (SPSP) es el límite entre los estados de Tabasco y Campeche y actualmente es un brazo remanente del río Usumacinta de aproximadamente 40 km de longitud a partir de donde el Usumacinta cambia su rumbo para unirse con el río Grijalva (Ortiz-Pérez, 1991) (Figura 8).

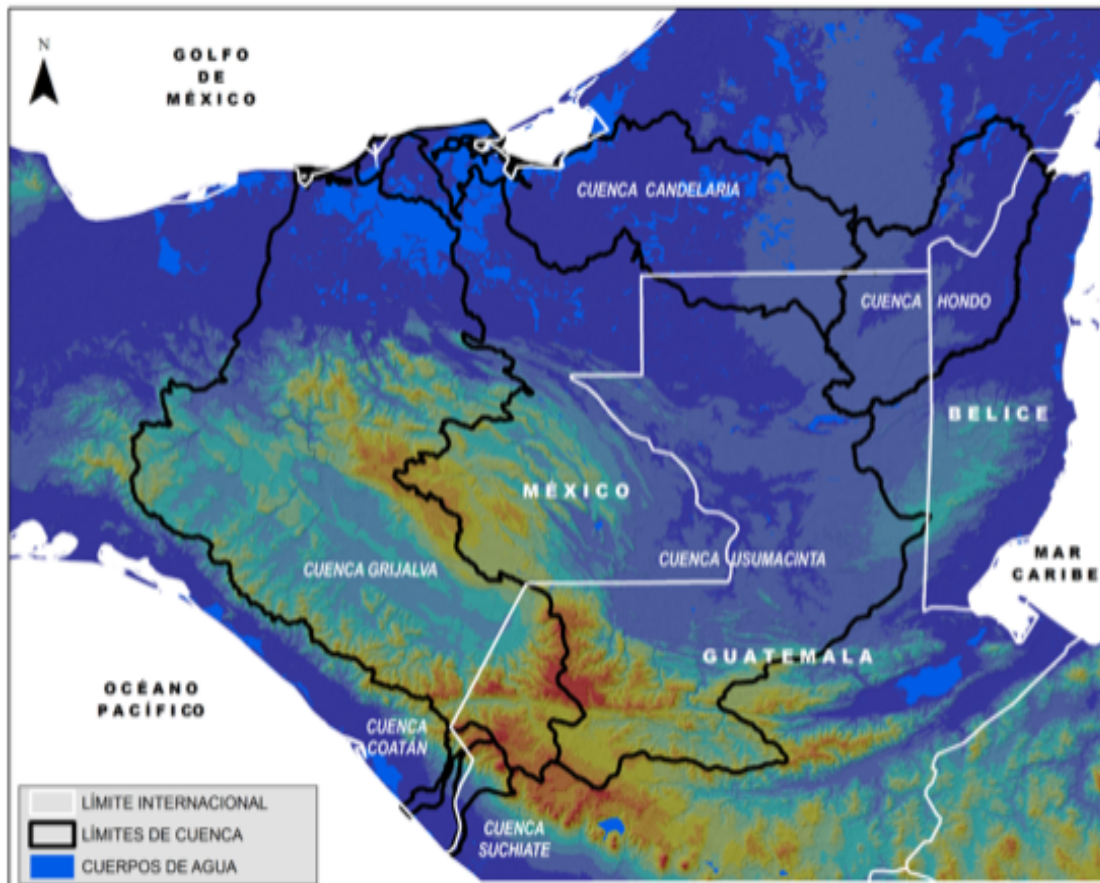


Figura 8. A) Cuencas hidrológicas. García, 2010. B) Imagen LandSat del 31 de julio de 2008, 16:32 h. Tomado de www.inecc.gob.mx.

1.4.4. Marco geológico

Geológicamente, al norte se encuentra la planicie costera del Golfo con terreno fluvial-lacustre y pendientes inferiores a los 0.5° constituidas por depósitos cuaternarios recientes sobre rocas calcáreas terciarias. En el sur se encuentra el Cinturón de pliegues y fallas de Chiapas (Sierra de Chiapas), con rocas carbonatadas del Jurásico Tardío y Paleógeno, rocas metamórficas paleozoicas, rocas ígneas extrusivas (andesitas y dacitas), piroclastos y rocas sedimentarias (lutitas, areniscas y limolitas) del Cretácico hasta el Cuaternario (Hernández-Santana *et al.*, 2012), todas ellas deformadas por pliegues durante el Mioceno Tardío. Posteriormente, durante el Plioceno y Pleistoceno, inició el aporte de sedimentos del Macizo de Chiapas que cubren la llanura costera. Además, la actividad tectónica formó un sistema de fallas con desplazamiento variable que repercute en la morfología de valles y ríos (Ortiz *et al.*, 2005; Solís-Castillo *et al.*, 2014).

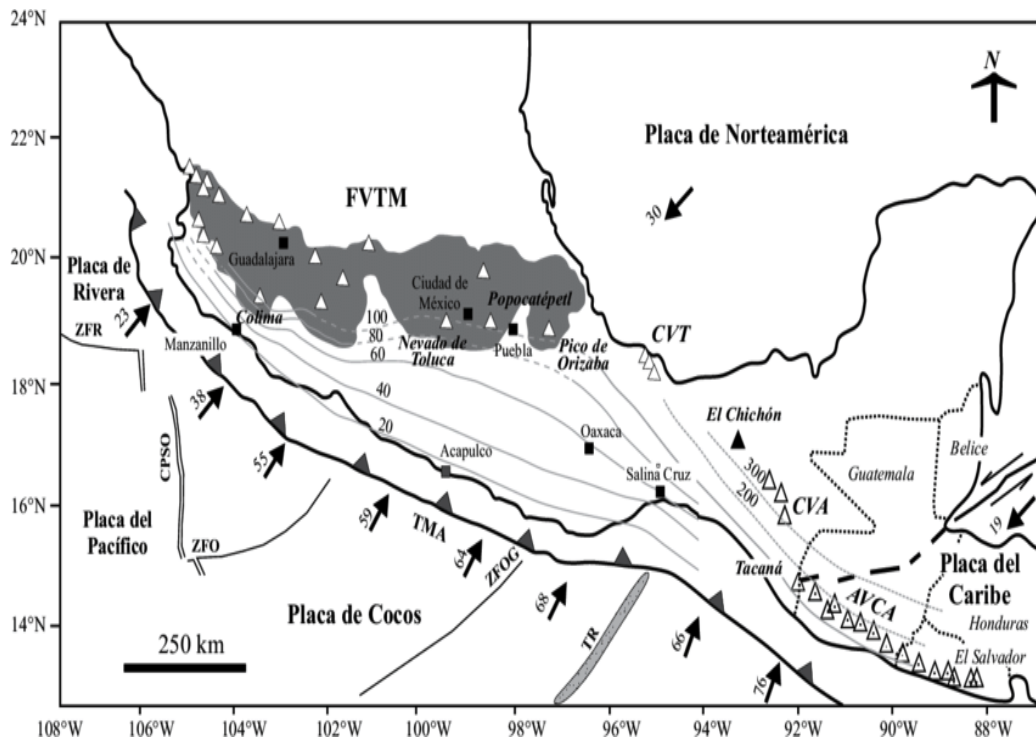


Figura 9. A) Carta Geológica Mexicana, 2007. Escala 1:2000000. B) Marco tectónico del centro-sur de México. Macías (2005).

2. Materiales y métodos

Se colectaron 34 muestras superficiales durante la temporada de secas, en mayo del 2017, y 33 muestras durante la temporada de nortes, en noviembre del 2017. Las muestras fueron obtenidas en la zona de infraplaya a una profundidad máxima y mínima de 19 y 3 m respectivamente (Tabla 1), a 5, 10 y 15 km de distancia de la línea de costa. De estas muestras, 23 fueron colectadas en la desembocadura del Río Grijalva (1 a 23) y 11 en la desembocadura del Río San Pedro-San Pablo (24-34) (Figura 3). El muestreo de noviembre no presentó en punto número 1, pero se respetó la nomenclatura de todos los sitios para poder compararlos con la temporada anterior. Al sedimento colectado se analizó su granulometría, petrología, porcentaje de carbonatos y carbono orgánico, elementos mayores, traza y tierras raras.

Tabla 1. Puntos de muestreo.

Estación	Latitud	Longitud	Profundidad (m)
1	18°34'26.16"N	92°41'6.00"O	9.1
2	18°32'30.89"N	92°45'46.04"O	8.2
3	18°33'22.20"N	92°45'9.92"O	7.3
4	18°34'25.19"N	92°44'34.86"O	7.3
5	18°35'39.79"N	92°44'7.24"O	7.3
6	18°36'29.34"N	92°43'27.18"O	3.7
7	18°37'40.38"N	92°42'44.63"O	7.3
8	18°38'22.62"N	92°41'6.63"O	6.4
9	18°38'24.78"N	92°39'6.00"O	6
10	18°33'29.77"N	92°46'54.90"O	10.1
11	18°34'21.40"N	92°46'35.98"O	11
12	18°35'29.15"N	92°46'2.37"O	11
13	18°36'44.76"N	92°45'23.97"O	11
14	18°37'47.51"N	92°44'35.76"O	9.1
15	18°38'45.83"N	92°43'31.70"O	9.1
16	18°39'22.04"N	92°41'48.92"O	9.1
17	18°40'4.62"N	92°40'13.08"O	9
18	18°36'15.25"N	92°48'25.22"O	14.6
19	18°38'13.25"N	92°47'9.05"O	14.6
20	18°40'16.63"N	92°44'27.61"O	13.7
21	18°39'24.82"N	92°50'29.68"O	19.2
22	18°42'26.58"N	92°45'52.30"O	18.3
23	18°43'40.85"N	92°42'16.62"O	18.3
25	18°39'27.18"N	92°31'8.58"O	4.6
26	18°40'12.66"N	92°29'18.60"O	4.6
27	18°41'8.04"N	92°28'6.66"O	6.4
28	18°40'33.78"N	92°26'6.78"O	5.5
29	18°40'35.64"N	92°32'21.60"O	7.3
30	18°42'15.48"N	92°26'15.36"O	4.6
31	18°41'33.30"N	92°34'23.10"O	10
32	18°42'57.24"N	92°30'7.44"O	11
33	18°43'8.10"N	92°28'32.16"O	11.9
34	18°44'7.74"N	92°27'6.48"O	8.2

2.1. Granulometría

El tamaño de partícula de sedimento se determinó con el analizador de difracción láser Coulter modelo LS-230 en el Laboratorio de Sedimentología del ICML. El análisis de tamaños o textura de sedimentos se llevó a cabo de acuerdo con la escala de tamaños de Wentworth (1922), con los límites propuestos por Carver (1971) y Folk (1980). Se realizó un diagrama ternario Arena-Limo-Arcilla (Shepard, 1954) para determinar la composición sedimentológica.

Los parámetros granulométricos obtenidos son:

2.1.1. Tamaño Gráfico Promedio ($Mz\phi$)

Es un parámetro estadístico que representa el tamaño de grano medio de la distribución total de los sedimentos, es decir, indica el diámetro de las partículas de una muestra. Los cambios de tamaño en las partículas ayudan a comprender las características de la roca fuente, el transporte y el área de depósito.

El tamaño gráfico promedio se calcula con la siguiente ecuación:

$$Mz\phi = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

Los resultados de esta ecuación corresponden a:

-1 ϕ a 0.01 ϕ Arena muy gruesa

0.01 ϕ a 1.0 ϕ Arena gruesa

1.1 ϕ a 2.0 ϕ Arena media

2.01 ϕ a 3.0 ϕ Arena fina

3.01 ϕ a 4.0 ϕ Arena muy fina

4.01 ϕ a 5.0 ϕ Limo grueso

5.01 ϕ a 6.0 ϕ Limo medio

6.01 ϕ a 7.0 ϕ Limo fino

7.01 ϕ a 8.0 ϕ Limo muy fino

8.01 ϕ a 14.0 ϕ Arcilla

2.1.2. Desviación estándar gráfica inclusiva ($\sigma_{I\phi}$)

La desviación estándar gráfica inclusiva indica el grado de homogeneidad de los granos de sedimento, es decir, indica si una muestra se encuentra bien clasificada o mal clasificada. A partir de este análisis es posible inferir los factores que han afectado su transporte y depósito, como el grado de turbulencia, la velocidad de transporte, naturaleza de los sedimentos o si existe transporte eólico y en qué medida.

Este parámetro se calcula mediante la ecuación:

$$\sigma_{I\phi} = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$$

A partir de los resultados, se puede clasificar al sedimento como:

Muy bien clasificado < 0.35

Bien clasificado ϕ 0.35 ϕ a 0.50

Moderadamente bien clasificado ϕ 0.50 ϕ a 0.71 ϕ

Moderadamente clasificado 0.71 ϕ a 1.00 ϕ

Mal clasificado 1.00 ϕ a 2.00 ϕ

Muy mal clasificado 2.00 ϕ a 4.00 ϕ

Extremadamente mal clasificado > 4.00 ϕ

2.1.3. Grado de asimetría (Sk_I)

El grado de asimetría indica si existe una mezcla de sedimento fino con sedimento grueso. Si la curva presenta asimetría positiva, entonces tenemos un exceso de material fino. Por otra parte, si se presenta una asimetría negativa, entonces tenemos un exceso de material grueso.

La ecuación para calcular el grado de asimetría es:

$$Sk_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

A partir de los resultados se realiza la siguiente clasificación:

1.0 ϕ a 0.3 ϕ Muy asimétrico hacia los tamaños finos

0.3 ϕ a 0.1 ϕ Asimétrico hacia los tamaños finos

0.1 ϕ a - 0.1 ϕ Casi simétrico

- 0.1 ϕ a - 0.3 ϕ Asimétrico hacia los tamaños gruesos

- 0.3 ϕ a - 1.0 ϕ Muy asimétrico hacia los tamaños gruesos

2.1.4. Curtosis (K_G)

La curtosis es una medida que representa la distribución de los tamaños de partículas. Si presenta un pico muy agudo, es leptocúrtica, lo que indica que la mayoría del sedimento presenta un tamaño de grano más uniforme y tiene una mejor clasificación, es decir, la muestra se encuentra muy bien clasificada. Si la curva presenta una disposición hacia los extremos máximos y mínimos, entonces es platicúrtica y presenta un sedimento muy mal clasificado, con partículas de diferentes tamaños. Si la curva es similar a la normal, entonces

es mesocúrtica y se encuentra medianamente clasificada.

La curtosis se determina usando la siguiente ecuación:

$$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

Y sus resultados indican:

Muy platicúrtico $<0.67\phi$

Platicúrtico 0.67ϕ a 0.90ϕ

Mesocúrtico 0.90ϕ a 1.11ϕ

Leptocúrtico 1.11ϕ a 1.50ϕ

Asimétrico hacia los gruesos 1.50ϕ a 3.00ϕ

Extremadamente leptocúrtico $>3.00\phi$

2.2. Mineralogía

El análisis mineralógico se llevó a cabo mediante la técnica de Difracción de Rayos X, ésta es una técnica no destructiva utilizada para la caracterización de materiales cristalinos. El patrón de difracción es una “huella dactilar” que permite identificar las sustancias y determinar su estructura cristalina. La identificación de fases se realizó con el software Match2 Crystal Impact, en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Las condiciones del difractómetro Siemens D5000 equipado con tubo de Cu, fueron 35kV y 20mA. El tiempo de barrido fue de 18 min.

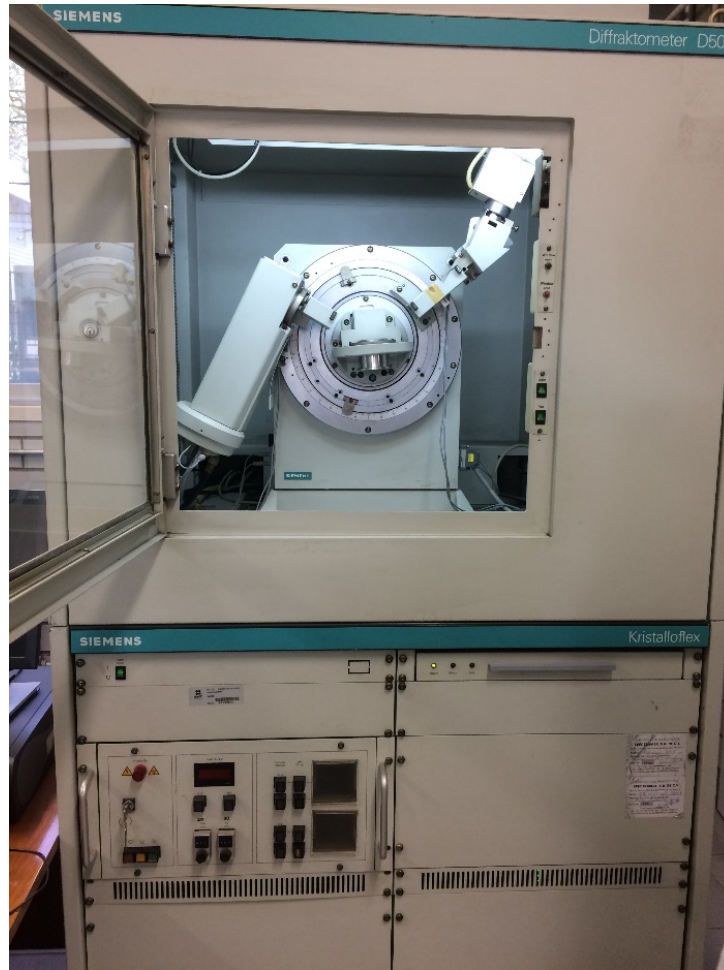


Figura 10. Difractómetro. Instituto de Geología, UNAM.

2.3. Petrología

La composición petrológica se obtiene mediante la observación de láminas delgadas en microscopio petrográfico. Se obtuvieron los porcentajes de cuarzo, fragmentos de roca y feldespatos mediante la técnica de estimación visual y con el diagrama ternario de clasificación de sedimentos (Folk et al., 1970).

2.4. Porcentaje de carbonatos y carbono orgánico

El sedimento colectado fue secado en un horno H-62 a 60°C, y una fracción fue molida en un molino SPEX 8000 MIXER/MILL en el Laboratorio de Química Acuática del ICMYL. Se utilizó un vial de ágata para los análisis químicos de carbonatos, carbono orgánico y elementos mayores, traza y de tierras raras.

El porcentaje de carbonato (CO_3) en sedimento se basó en una titulación por retroceso con ácido clorhídrico (HCl) y una solución de hidróxido de sodio (NaOH). El carbono orgánico (OC) fue calculado con el método de Walkley (1947), modificado por Jackson (1958), que se basa en una oxidación exotérmica de la materia orgánica en presencia de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado y dicromato de potasio (K_2CrO_7), titulado con sulfato ferroso amoniacal ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Se adiciona ácido fosfórico (H_3PO_4) para evitar interferencias. Este procedimiento diferencia la materia húmica de otras fuentes de carbono inorgánico.

2.5. Elementos mayores

El análisis de elementos mayores se determinó mediante un Espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XRF) SRS 3000 Siemens con precisión del estándar AGV-1 de 100% para todos los óxidos. Esto se llevó a cabo en el Laboratorio de Química Acuática del ICML. El método de Fluorescencia de Rayos X (XRF) es uno de los métodos más usados para determinar elementos mayores y está basado en la excitación de la muestra mediante un haz de rayos X primario que produce la excitación y formación de rayos X secundarios (fluorescencia), el cual tiene una específica longitud de onda para cada elemento (Rollinson, 1993). La intensidad de los rayos secundarios determina la concentración de cada uno de los elementos presentes en la muestra, considerando sus estándares de calibración.

Para este método, se calculó la pérdida por ignición obtenida al calentar el sedimento en una mufla a 110°C por seis horas, de este sedimento donde se calculó la pérdida, se mezcló 0.4g de éste con 5g de tetraborato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{LiBO}_2$) como fundente para formar pastillas que fueron analizadas en el XRF (Figura 11). Los porcentajes obtenidos fueron normalizados con los valores de corteza continental superior (UCC) (Taylor and McLennan, 1985).



Figura 11. Muestras con dicromato de potasio para calcular el carbono orgánico y preparación de las pastillas para calcular el porcentaje de elementos mayores.

Para analizar la meteorización a partir de los datos de elementos mayores, se calculó el Índice de Alteración Química (Nesbitt and Young, 1982), el Índice de Meteorización Química (Harnois, 1988) y el Índice de Alteración de la Plagioclasa (Fedo et al., 1995), así como el análisis a partir del diagrama ternario A-CN-K.

Para determinar la procedencia de sedimentos a partir de algunos elementos mayores, se utilizó un análisis con factores discriminantes y para analizar la composición geoquímica de los sedimentos se realizó el diagrama de Herron (1988).

2.6. Elementos trazas y de tierras raras

Los elementos trazas y de tierras raras fueron analizados en el Laboratorio Ultra limpio con el equipo de ICP-MS (espectrómetro de masas con plasma inductivamente acoplado) del Centro de Geociencias de Juriquilla (UNAM). Los resultados de elementos trazas fueron normalizados con los valores de corteza continental superior (UCC) y los resultados de tierras raras fueron normalizados con UCC y con Condrita (Taylor and McLennan, 1985). Se realizaron diagramas bivariados para determinar la procedencia sedimentológica asociada a dacita, andesita y basalto.

2.6.1. Elementos geogénicos y antropogénicos

Los resultados de los elementos trazas que pueden ser considerados como contaminantes más tóxicos fueron interpretados mediante el cálculo del Factor de enriquecimiento (EF) y el Índice de geoacumulación.

2.6.1.1. Factor de Enriquecimiento (EF)

El factor de enriquecimiento (EF) es un método para inferir el grado de contaminación por metales pesados en los sedimentos y para discriminar las fuentes naturales y antropogénicas (Celis-Hernández et al., 2017; Ramos-Vázquez et al., 2018). Para calcular el factor de enriquecimiento se puede utilizar el contenido de Fe_2O_3 o el de Al_2O_3 obtenidos en el análisis de elementos mayores como referencia de un elemento conservador para la normalización.

Para este estudio, se analizó el Factor de Enriquecimiento para los elementos Vanadio (V), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Estroncio (Sr), Estaño (Sn), Antimonio (Sb) y Plomo (Pb). El Co, Cu, Ni, Pb, Sn y Zn se consideran elementos muy tóxicos, disponibles y son fácilmente movilizados por la actividad humana, por lo que han sido incluidos como algunos de los contaminantes prioritarios (Galán-Huertos y Romero-Baena, 2008).

El factor de enriquecimiento se calculó con base en los valores promedio de UCC (Corteza Continental Superior, Taylor y McLennan, 1985) y con la ecuación:

$$EF = \frac{\left(\frac{m}{Al}\right)_{muestra}}{\left(\frac{m}{Al}\right)_{referencia}}$$

$\left(\frac{m}{Al}\right)_{muestra}$ = valores del metal analizado y del Al en la muestra.

$\left(\frac{m}{Al}\right)_{referencia}$ = valores del metal de interés y el Al en la UCC.

Según Birch (2003), los valores de EF se clasifican en: 1-2= sin enriquecimiento, 2-3= enriquecimiento mínimo, 3-5= enriquecimiento moderado, 5-10= enriquecimiento moderadamente severo, 10-25= enriquecimiento severo, 25-50= enriquecimiento muy severo y > 50= enriquecimiento extremadamente severo.

2.6.1.2. Índice de geoacumulación (Igeo)

El índice de geo-acumulación es un método para evaluar el grado de contaminación de metales pesados y estimar la contribución antropogénica de cada uno. Se calcula mediante la ecuación:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 * B_n} \right)$$

C_n = concentración medida del metal en la muestra de sedimento

1.5 = posible variabilidad generada por las variaciones litológicas

B_n = concentración geoquímica del metal de referencia

En este estudio se utilizaron los valores de referencia de UCC (Taylor y McLennan, 1985). Según Müller (1969), el Igeo consta de siete grados: <0 no contaminado, 0-1 no contaminado a moderadamente contaminado, 1-2 moderadamente contaminado, 2-3 moderadamente a altamente contaminado, 3-4, altamente contaminado, 4-5 altamente a extremadamente contaminado y 5-6 extremadamente contaminado. En este estudio, se calculó el índice de geo-acumulación para los mismos elementos: Vanadio (V), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Estroncio (Sr), Estaño (Sn), Antimonio (Sb) y Plomo (Pb), de esta manera es posible estimar en qué medida el factor de enriquecimiento observado anteriormente es antropogénico.

3. Resultados

A continuación se describen los resultados obtenidos durante los meses de mayo y noviembre, correspondiente a la temporada seca y de nortes, respectivamente.

3.1. Granulometría

El sedimento fue colectado en la zona de infraplaya, que presenta más cambios texturales debido a las diferencias en la energía del oleaje durante cada temporada (Carranza-Edwards, 2001). Mediante el análisis textural se obtuvieron los porcentajes de arena, limo y arcilla y a partir de ellos se puede inferir el tipo de transporte del sedimento: saltación, tracción y suspensión.

En el análisis textural se obtuvo un mayor porcentaje de limo en las desembocaduras durante las dos temporadas (Figura 12), con un promedio general de 80% durante secas y 79.3% en lluvias, lo que determina un mayor transporte por suspensión (Visher, 1969), seguido del contenido de arcilla con un promedio de 17.5% en secas y 19.3% durante lluvias. Los sitios que presentaron un mayor porcentaje de arena (sin llegar al 10%) fueron 7, 8 y 9 en la desembocadura del Grijalva durante la temporada de secas y 6 y 21 durante nortes, el sitio 1 se encuentra dentro del río y presentó un 98% de arena.

En la desembocadura del SPSP se observaron los mayores porcentajes de arena, principalmente en los sitios 26, 28 y 29 (32%, 27% y 10% respectivamente) durante la temporada de secas, mientras que durante los nortes el punto 28 fue el de mayor porcentaje (25%). La presencia de granos más gruesos está asociado a la turbulencia y al transporte por tracción (Visher, 1969), en este aspecto, los sitios en Grijalva con mayor porcentaje de arena en secas se encuentran cercanos a la desembocadura, sin embargo,

durante nortes se observó arena en el sitio más alejado, lo que puede indicar que la pluma del río llega hasta ese sitio.

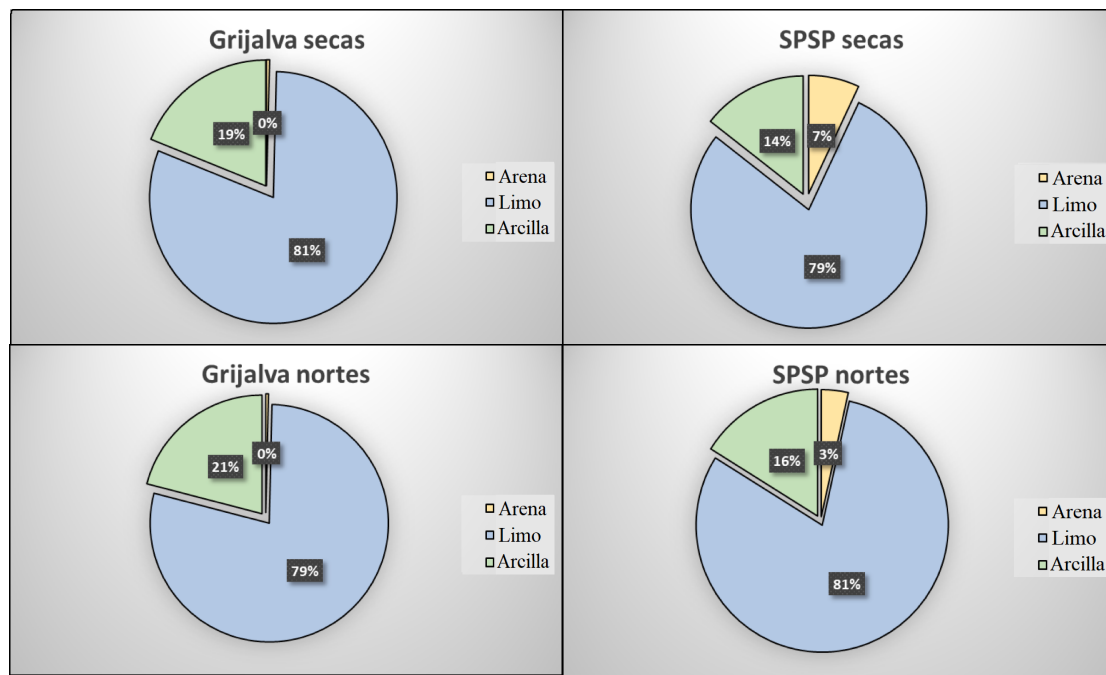


Figura 12. Porcentaje de arena, limo y arcilla.

Durante las dos temporadas, los sedimentos más gruesos se presentaron en la desembocadura del SPSP (Figura 13), en noviembre hacia la parte este de la misma, probablemente resultado de la corriente litoral que durante la temporada de nortes presenta esta dirección. Además, la construcción de presas en la cuenca del Grijalva retiene sedimento más grueso y la playa asociada a esta desembocadura presenta sedimento más fino, mientras que en la cuenca del Usumacinta y en la desembocadura SPSP no existen presas que frenen el transporte de este sedimento grueso y éste puede llegar a la zona de playa.

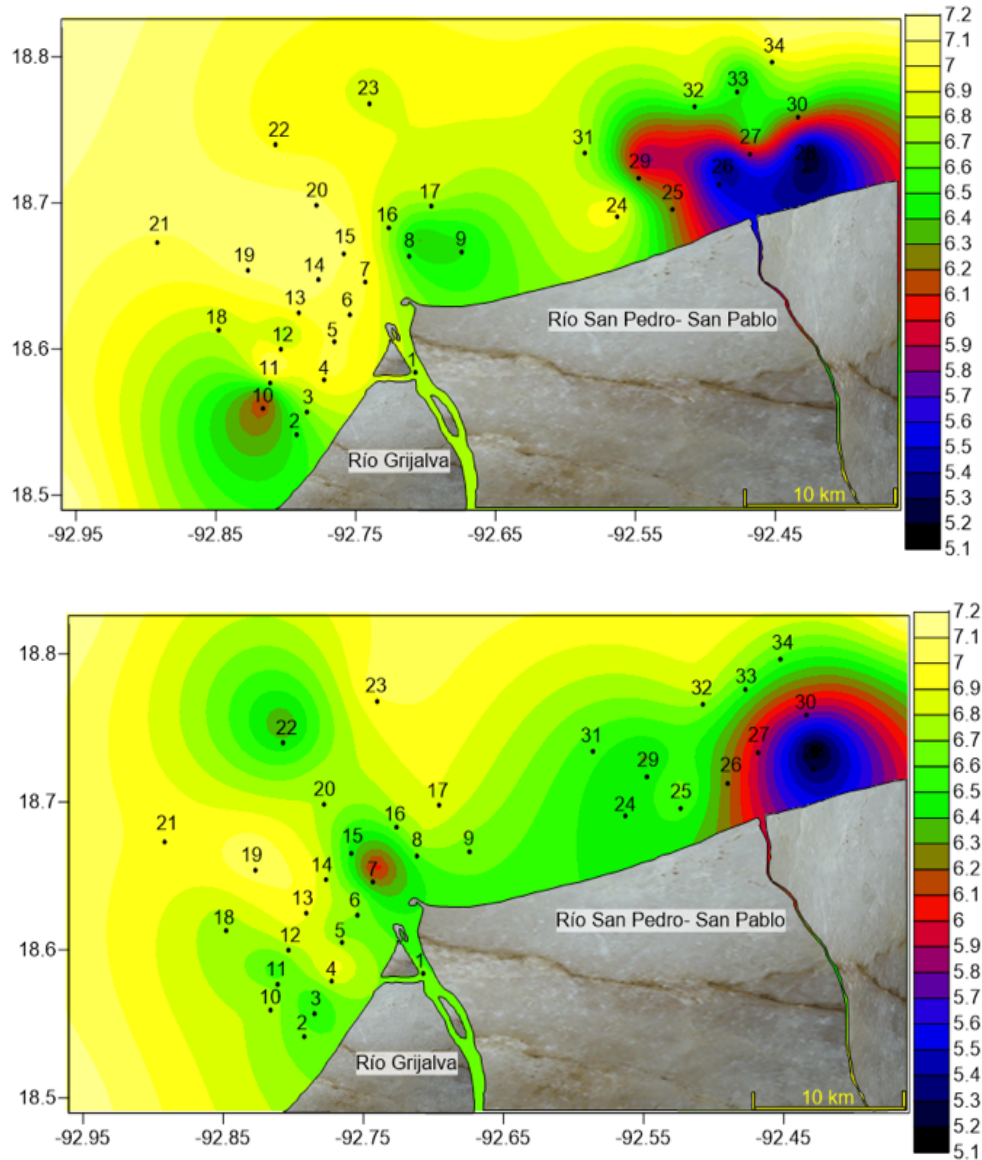


Figura 13. Distribución de sedimento por su tamaño de grano en las dos desembocaduras durante mayo del 2017 (A) y noviembre del 2017 (B)

En el diagrama ternario Arena-Limo-Arcilla para sedimentos superficiales (Shepard, 1954) (Figura 14), se puede observar la distribución de los sedimentos para las dos desembocaduras y diferentes temporadas. La mayor parte de ellas, como se mencionó anteriormente, corresponden a limo, aunque en SPSP existen algunas muestras que se

clasifican como limo arenoso, por su grano más grueso, principalmente en mayo (la temporada seca), cuando el oleaje es menos intenso que en noviembre, donde se presentó un norte intenso antes del muestreo.

El sitio 1, en el Río Grijalva, presentó una composición completamente arenosa, este tamaño de grano se encuentra asociado a los bajos y barras longitudinales formadas a lo largo del río por depósito y acumulación de sedimentos más gruesos, provocado por un aumento en el caudal durante temporadas de lluvias e inundaciones y su posterior depósito al disminuir la velocidad de corriente y el caudal, cuando han pasado las lluvias intensas.

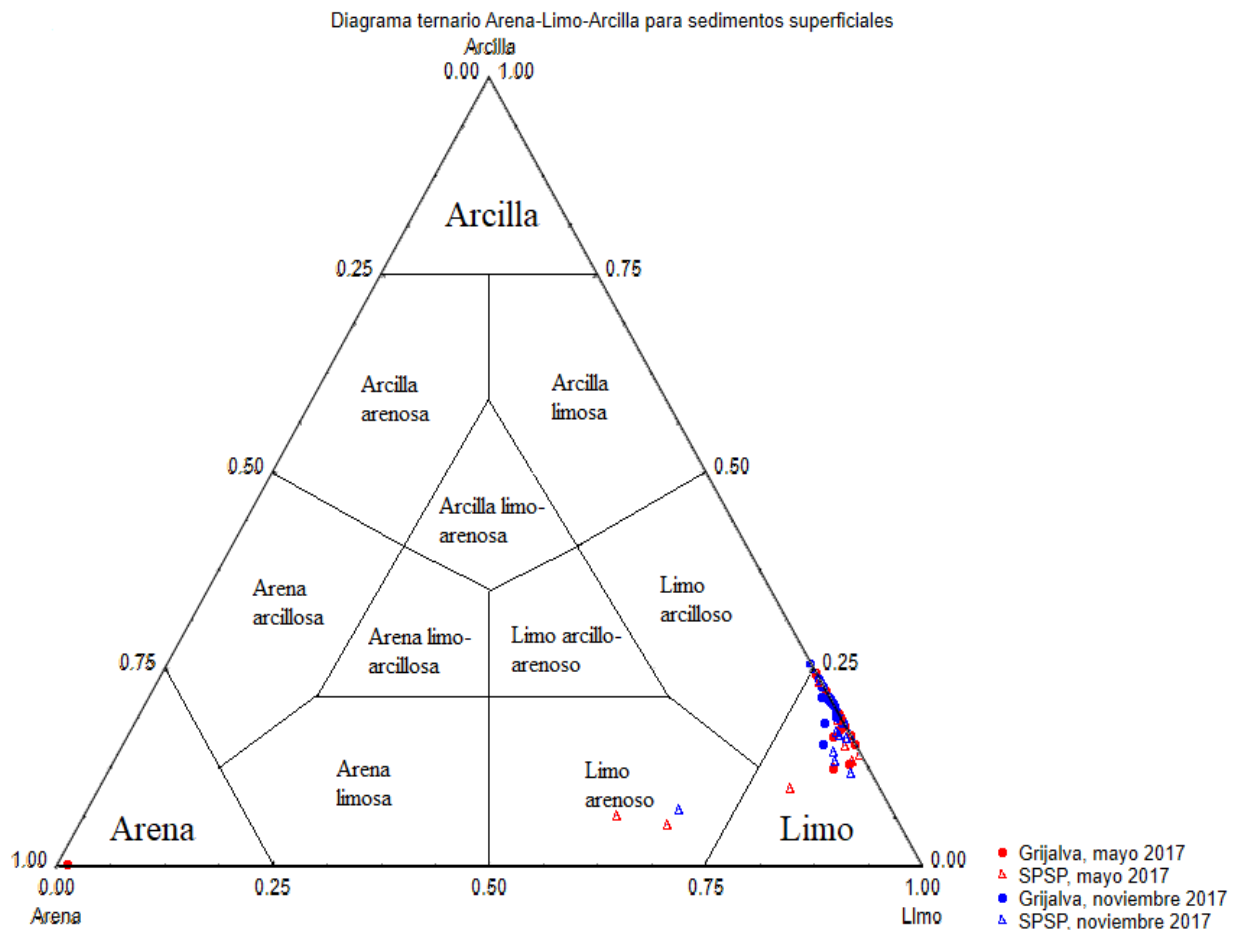


Figura 14. Diagrama ternario Arena-Limo-Arcilla (Shepard, 1954) para sedimentos superficiales de las desembocaduras Grijalva y SPSP.

Por otra parte, se observó una correlación positiva entre el tamaño de grano ($Mz\phi$) y la clasificación ($\sigma\phi$) en la desembocadura del Grijalva en la temporada de secas ($r= 0.7$, $n = 22$) (Figura 15) debido a la mayor presencia de granos finos, mientras que las muestras con mayor cantidad de granos gruesos presentan generalmente una mala clasificación y una correlación negativa, como en el mismo sitio durante la temporada de nortes ($r=-0.7$, $n=22$) (Figura 16) donde aumentó la presencia de granos más gruesos por el aporte de sedimento de supraplaya debido a la erosión costera y el aumento en la carga de sedimento del río por las precipitaciones en la cuenca alta, media y baja durante los nortes de la temporada.

En la desembocadura del SPSP no existió correlación significativa durante secas ($r=0.5$, $n=11$) (Figura 15) y durante la temporada de nortes no hubo correlación (Figura 16) ($r=0.02$, $n=11$) debido a que son muestras menos homogéneas, con una mala clasificación, probablemente a la influencia de la corriente de la sonda de Campeche que es mayor durante la temporada de secas, ya que la corriente litoral dominante y el oleaje para ese sitio es hacia el oeste, pero durante los vientos del norte, el oleaje cambia de dirección hacia el este, lo que pudo ocasionar que el porcentaje de arena sea menor.

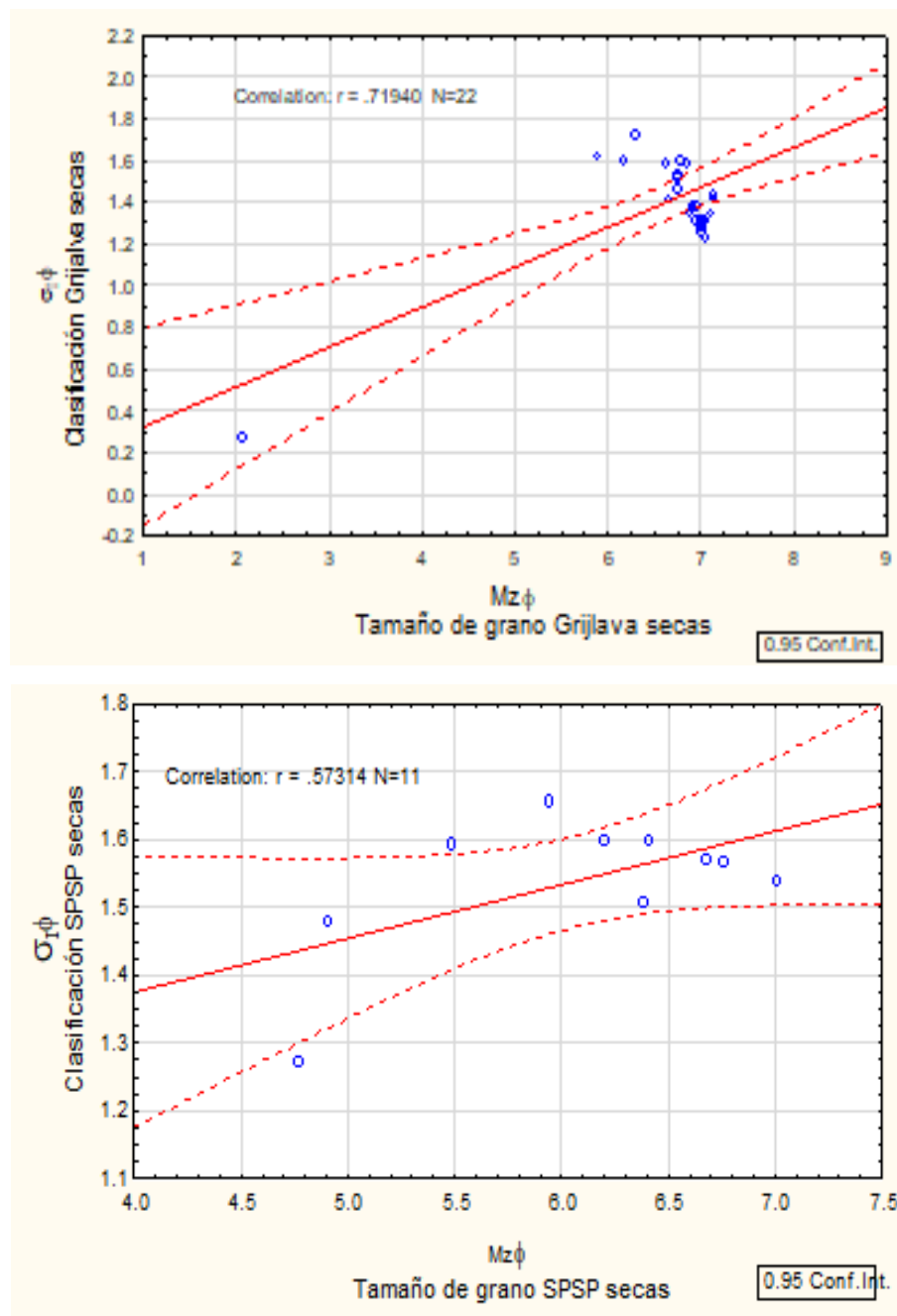


Figura 15. Correlaciones entre el tamaño de grano y la clasificación del sedimento en las desembocaduras Grijalva y SPSP, mayo 2017.

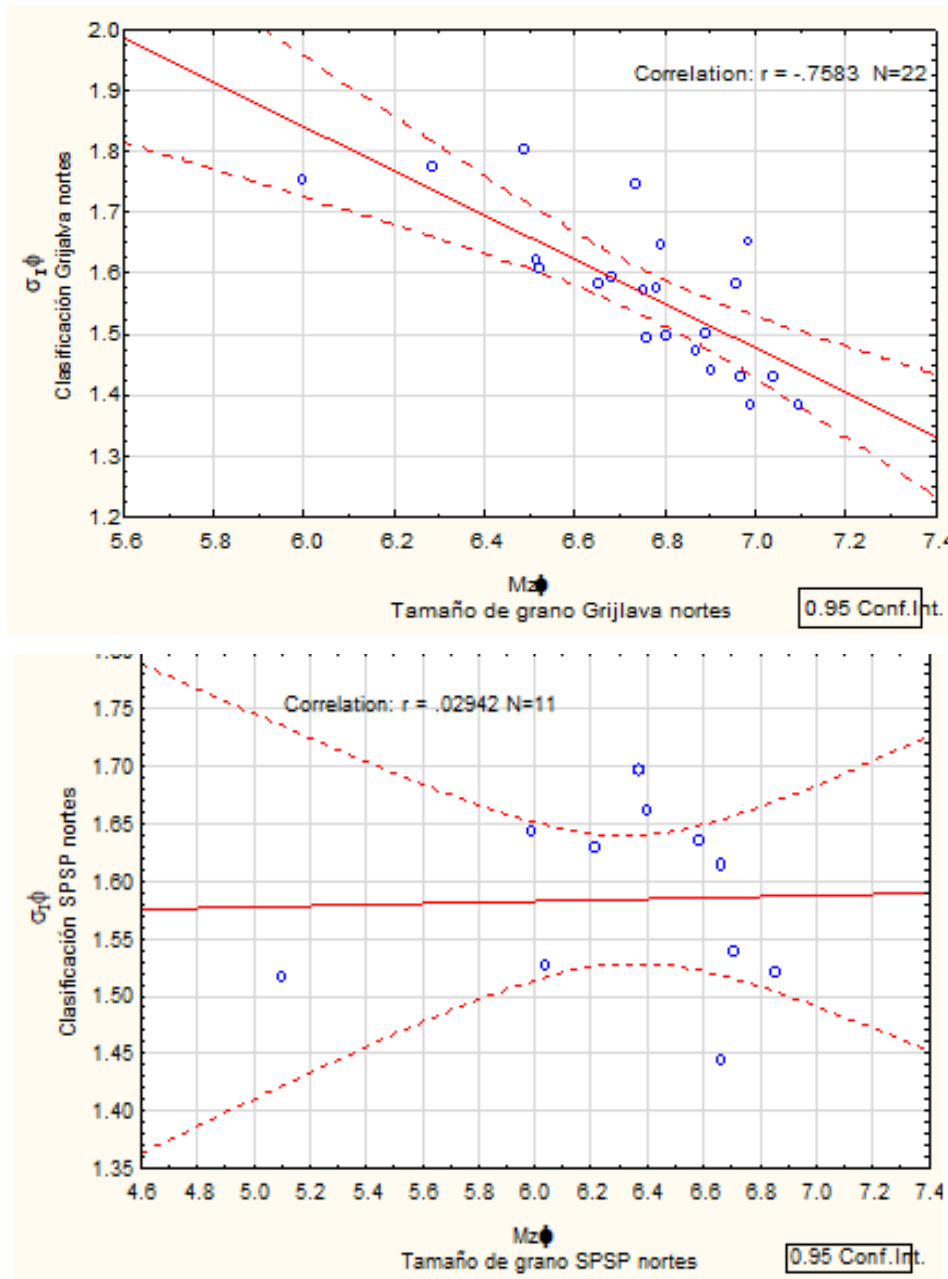


Figura 16. Correlaciones entre el tamaño de grano y la clasificación del sedimento en las desembocaduras Grijalva y SPSP, noviembre 2017.

El transporte de sedimentos y su distribución también se encuentra asociado a las celdas litorales en la zona y a la circulación superficial de las masas de agua dulce procedentes de

los ríos. Cuando los ríos descargan agua con baja salinidad, ésta permanece en la parte superficial mientras que el agua marina, al ser más densa debido al contenido de sales, permanece en el fondo. El agua dulce tiene una densidad de 1000 kg/m^3 , mientras el agua de mar tiene una densidad de 1025 kg/m^3 , la diferencia no parece considerable, pero es suficiente para que el agua de los ríos permanezca en la capa superficial y cuando está en movimiento tiende a moverse hacia la derecha por efecto de la fuerza de Coriolis (Zavala Hidalgo et al 2003).

En las celdas litorales los sedimentos se mueven dentro de cada una y en ocasiones pueden pasar de una celda a otra según el oleaje y las características de los límites entre ellas, de esta manera, algunas pueden ser semipermeables y permitir un transporte sedimentario unidireccional o bidireccional (Anfuso, 2004). Algunas de estas celdas se encuentran marcadas como barreras por la fuerza de la corriente en las desembocaduras, éstas pueden ser más o menos fuertes dependiendo de la temporada climática y la precipitación en la cuenca y determinan la cantidad de agua depositada en el mar y la fuerza con que ésta va a llegar. Las celdas también pueden estar definidas por la topografía y las corrientes asociadas a los giros ciclónicos y anticiclónicos: el giro ciclónico más cercano a la zona de las desembocaduras, al sur del gran giro anticiclónico, influye en el transporte de masas de agua en la región. Durante la etapa previa a la formación del giro cuando las corrientes son de este a oeste, las corrientes desplazan la pluma de los ríos Grijalva y SPSP hacia el oeste hasta 30 km, posteriormente cuando el giro está bien formado y se ubica en el centro de la Bahía de Campeche, la pluma es desplazada hacia el este en aproximadamente 40 km, lo que produce una oscilación semianual de la pluma con importantes consecuencias ecológicas y sedimentarias en la región (Monreal-Gómez & Salas-de-León 1990).

3.2. Análisis mineralógico

Mediante el método de difracción de rayos X se analizaron muestras de seis sitios para cada temporada. La tabla con los valores obtenidos se encuentra en el Anexo. Para la desembocadura del Grijalva se analizaron los puntos 2, 6 y 21, ubicados al oeste de la desembocadura, en la desembocadura y en el sitio más alejado hacia el noroeste, respectivamente. En la desembocadura SPSP se analizaron los puntos 24, 26 y 34, al oeste de la desembocadura, frente a la desembocadura y en el punto más alejado al noreste de la desembocadura, respectivamente. Los sitios 21 y 34 pueden reflejar de manera general el contenido mineralógico de los extremos del área de estudio, los sitios 2 y 24 se encuentran en puntos estratégicos de acuerdo a la dirección dominante de la corriente y transporte litoral, los sitios 6 y 26, al estar frente a las desembocaduras, pueden reflejar los sedimentos que llegan directamente de los ríos.

De manera general se observó que el mayor componente en las dos temporadas climáticas es el cuarzo, con 35% en mayo y 48% en noviembre. La calcita bajó su contenido de mayo a noviembre (17% a 14%), al igual que la caolinita de 11% a 4%, la halita de 8% a 4% y la biotita de 4% a 1%. La albita aumentó de 15% a 18% y la dolomita mantuvo su porcentaje de 6%. Sólo durante mayo se observó moscovita e illita, mientras que en noviembre se presentó 5% de halloysita (Figura 17).

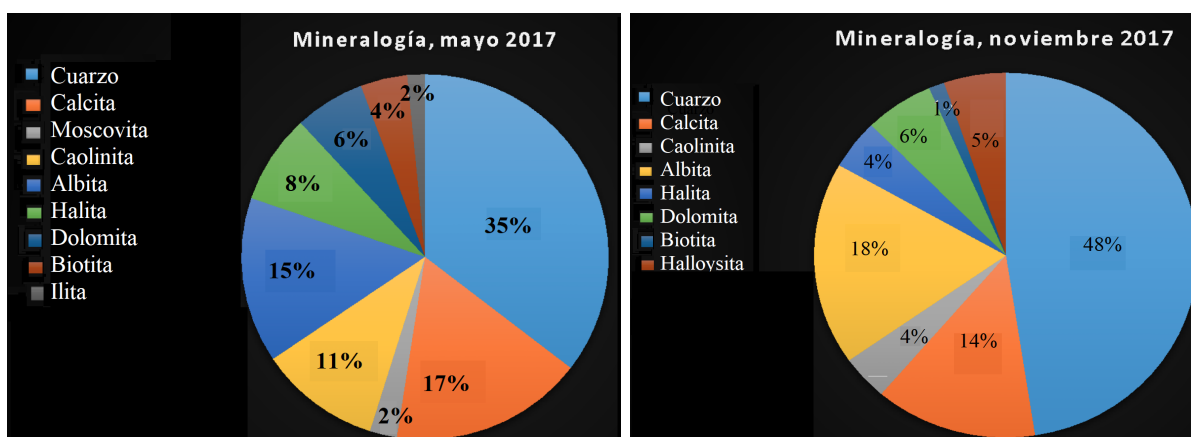


Figura 17. Minerales observados mediante la técnica de difracción de rayos X en las desembocaduras Grijalva y SPSP.

La presencia y distribución de la mayor parte de los minerales depende de la temporada climática, ya que gran parte de ellos son el reflejo de la meteorización en la cuenca alta, media y baja, porque lo que en la temporada con mayor precipitación (noviembre) se observan minerales como la halloysita, formada por la alteración hidrotermal de minerales como aluminosilicatos, dicha alteración no se presenta en la cuenca baja de la zona, por lo que su presencia sugiere un transporte desde las cuencas altas y una meteorización mayor.

Por otra parte, al analizar los minerales por sitio y temporada climática, se observó que la illita y moscovita sólo se presentaron en Grijalva durante la temporada seca (Figura 18). En este sitio (la desembocadura del Grijalva), el porcentaje de calcita bajó de 16% a 13% al igual que la caolinita, de 11% a 3%, la halita de 10% a 5%, la dolomita de 6% a 4%. La albita aumentó de 6% a 19%, la halloysita se presentó en noviembre con 7% y la biotita no se observó en la temporada de lluvias en esta desembocadura. Durante mayo, el punto 2 (al oeste de la desembocadura), presentó los niveles más elevados de moscovita, caolinita y biotita, además de halloysita en noviembre. El punto 6 (frente a la desembocadura), presentó los niveles más elevados de calcita, halita, dolomita durante las dos temporadas, e illita sólo en mayo. El punto 21 (el sitio más alejado al noroeste), presentó la mayor cantidad de cuarzo y albita durante las dos temporadas, además de caolinita en noviembre.

En SPSP el porcentaje de cuarzo aumentó de 37% a 43%, la calcita de 18% a 21% y la dolomita de 6% a 7%. La caolinita bajó de 11% a 5%, la halita de 6% a 4% y la biotita de 7% a 2%. La albita se mantuvo en 15% y la halloysita se presentó en noviembre con 3% (Figura 18). El punto 24 (al oeste de la desembocadura) presentó los niveles más elevados de calcita y halita en mayo, y halita, dolomita y halloysita en noviembre. El punto 26 (frente a la desembocadura SPSP) presentó la mayor cantidad de cuarzo, dolomita y biotita en este sitio durante mayo, y cuarzo, calcita y albita en noviembre. En el punto 34 (el sitio más alejado al noreste del área de estudio) presentó mayor porcentaje de caolinita en las dos temporadas, albita en mayo y biotita en noviembre.

De manera general, la halloysita se presentó hacia el oeste de las dos desembocaduras, en las zonas cercanas a la línea de costa, durante la temporada de lluvias intensas, lo que puede sugerir que el aporte de este mineral es por los ríos desde la cuenca alta, por su densidad se deposita de manera más rápida después de llegar al océano, cuando disminuye la velocidad de la corriente, por lo que no llega hasta los sitios más alejados.

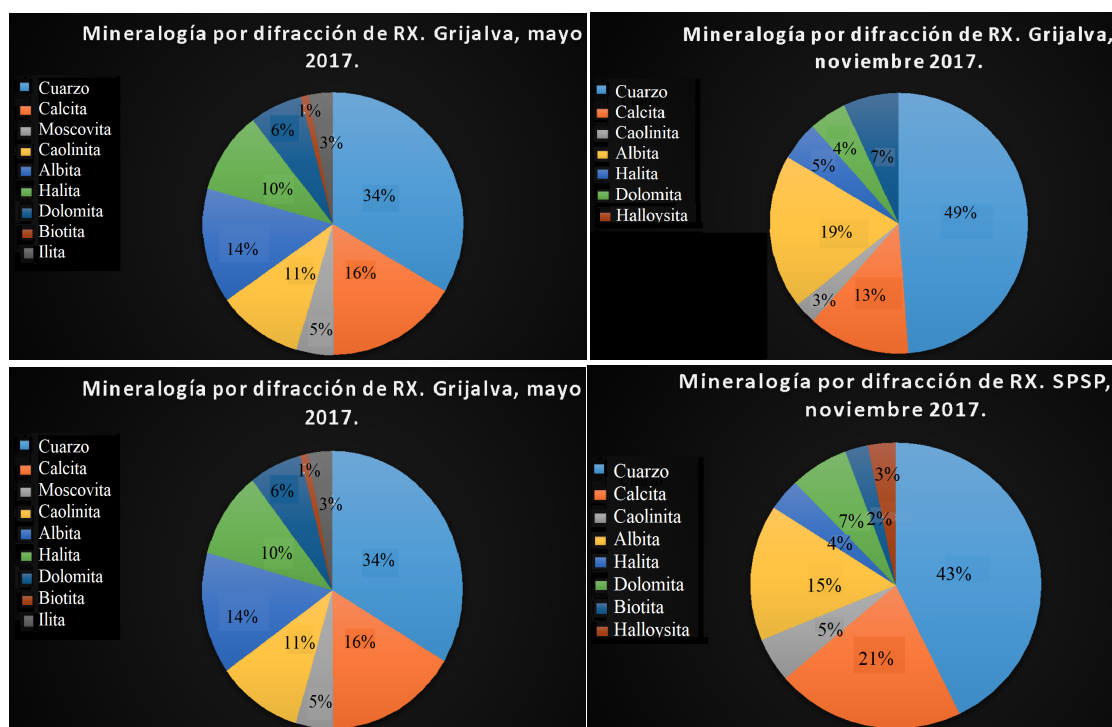


Figura 18. Minerales en las desembocaduras durante las dos temporadas.

Las arcillas como la calcita y la caolinita son características de una alta meteorización y también tienen una gran importancia en el comportamiento de contaminantes y materia orgánica. Cada mineral arcilloso tiene determinada superficie específica y las superficies mayores tienen mayor probabilidad de adsorber metales (Lerman, 1979), esta adsorción es máxima en la carga cero, cuando su competencia con los H^+ es mínima, aunque la materia orgánica y oxihidróxidos de Fe son más competitivos como adsorbentes. Entre los minerales arcillosos, los de mayor área superficial en orden descendente son la caolinita, illita y la montmorillonita, con menor área superficial están los óxidos de Mn, la goethita y los carbonatos (Bourg, 1995).

3.3. Petrología

A partir de los diagramas de estimación visual de Bacelle y Bosellini (1965), se determinó el contenido de cuarzo (Q), feldespato (F) y fragmentos de roca o fracción lítica (L). Los resultados fueron evaluados en el diagrama ternario para la clasificación de sedimentos de Folk et al. (1970) (Figura 19).

En Grijalva, durante mayo, el sedimento dominante es la feldarenita lítica, con una pequeña parte con subfeldarenita, litoarenita feldespática y baja cantidad de feldarenita. Durante noviembre aumenta el contenido de la porción de feldespatos, en forma de feldarenita y feldarenita lítica, pero también aumenta el contenido de cuarzo en algunos puntos, con lo que se obtuvo subfeldarenita y casi cuarzoarenita. Es decir, que para la temporada con lluvias intensas los sedimentos presentaron un mayor aporte de cuarzo y feldespato.

En SPSP durante mayo, la mayor parte de sedimento se encuentra entre feldarenita lítica y feldarenita, con un sitio con subfeldarenita, pero en noviembre, la mayor parte de sedimentos corresponden a feldarenita, con un par de sitios con subfeldarenita, es decir, con un aumento de feldespatos.

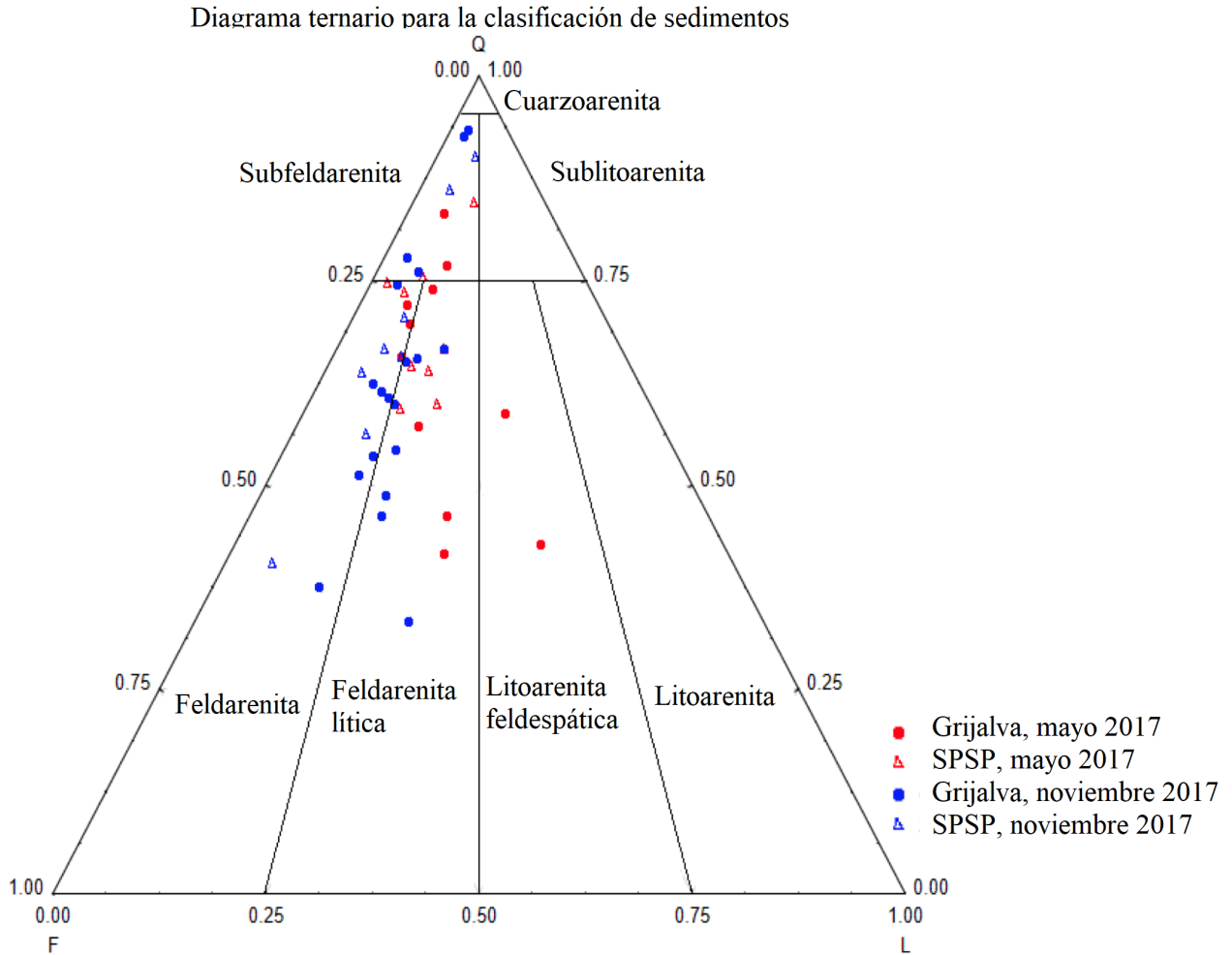


Figura 19. Diagrama ternario para la clasificación de sedimentos (Folk et al., 1970).

Por otra parte, las láminas delgadas también mostraron foraminíferos, sobre todo en SPSP durante mayo, aunque no fueron exclusivos de esta zona ni temporadas. Las imágenes muestran fotografías de dos sitios del Grijalva (Figura 20a), frente a la desembocadura y alejado de ella, para las dos temporadas de muestreo, así como dos sitios de SPSP (Figura 20b) con la misma disposición.

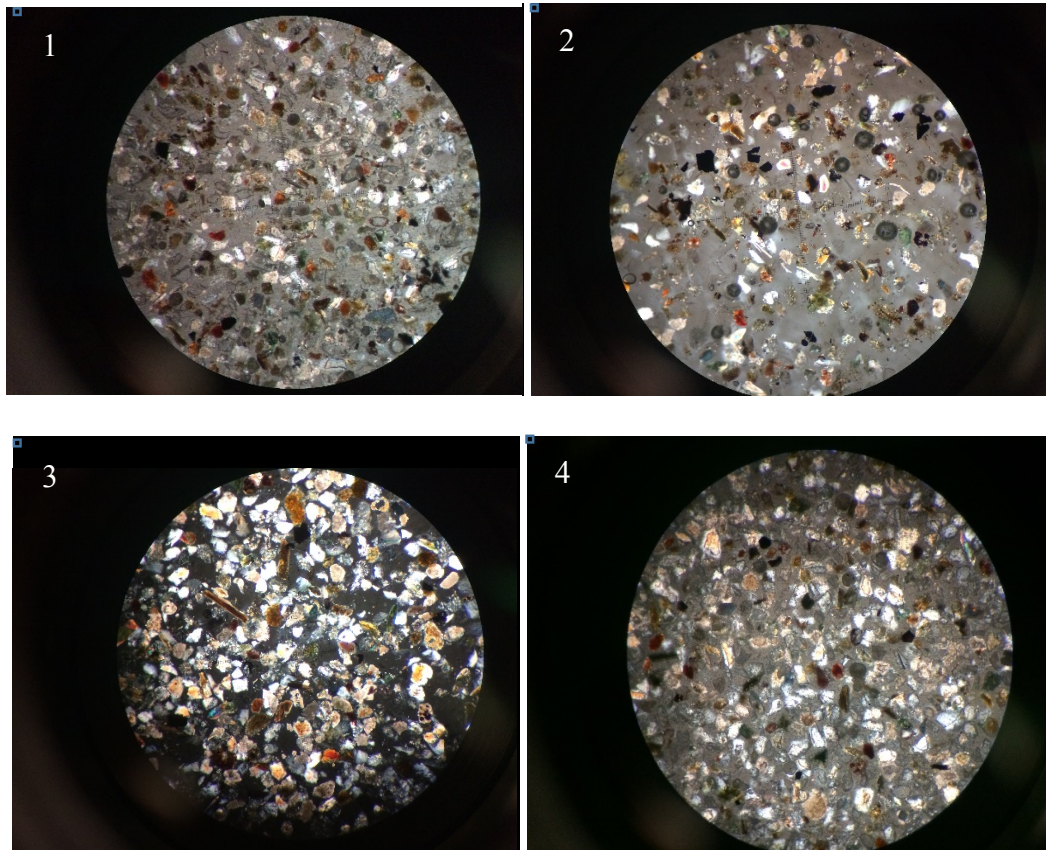


Figura 20a. Láminas delgadas de la desembocadura del Grijalva observadas en el microscopio petrográfico. 1) 5 Grijalva, mayo, 2) 5 Grijalva, noviembre, 3) 21 Grijalva, mayo y 4) 21 Grijalva, noviembre.

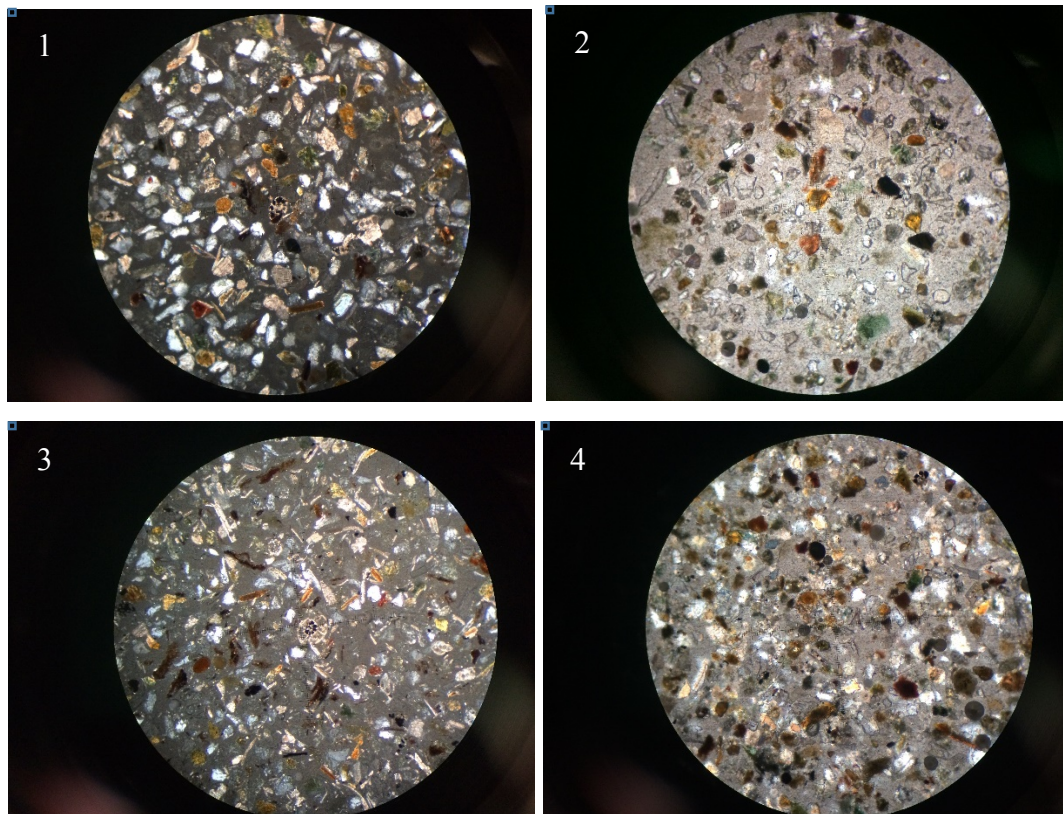


Figura 20b. Láminas delgadas de la desembocadura SPSP observadas en el microscopio petrográfico. 1) 27 SPSP, mayo, 2) 27 SPSP, noviembre, 3) 33 SPSP, mayo y 4) 33 SPSP, noviembre.

3.4. Porcentaje de carbonatos y carbono orgánico

En el estado de Tabasco dominan los sedimentos terrígenos aportados por los ríos, y es la zona con menor concentración de sedimentos carbonatados (Carranza-Edwards et al., 1996). El porcentaje total de carbonatos presentes en la zona de estudio fue de 23.8%, el máximo valor se encontró en los puntos 15 y 19, con 29.5% y el mínimo fue de 5.3%, en el punto 1, todos ubicados en la desembocadura del río Grijalva (Figura 21a). De manera general, el porcentaje de carbonatos fue mayor en la desembocadura del río San Pedro-San Pablo, con un promedio de 26.1% en secas y 25.6% en nortes, mientras que en la desembocadura del Grijalva fue de 23.5 y 20.1% en secas y nortes respectivamente.

Los sitios con mayor concentración de carbonatos se esperaban encontrar cercana a la desembocadura del Río San Pedro-San Pablo, por la cercanía de la Sonda de Campeche rica en sedimento carbonatado que es acarreado por la corriente hacia el oeste. Sin embargo, los dos puntos con máximos de carbonatos se encontraron en la desembocadura del Río Grijalva, esto debido al aporte de material biogénico (fragmentos de conchas) de los cuerpos de agua costeros en la zona, así como a la desviación que la corriente litoral presenta en la desembocadura del río San Pedro-San Pablo por la corriente de descarga de éste.

En la desembocadura del Grijalva, la mayor distribución de carbonatos durante secas se observó en la pluma de la desembocadura y fue desplazada hacia el norte durante la temporada de nortes, probablemente empujada por la fuerza de la corriente del río. En la desembocadura del SPSP la distribución de los carbonatos se mantuvo sin cambios significativos durante las dos temporadas, lo que indica el aporte constante de carbonatos de la sonda de Campeche (Figura 21a).

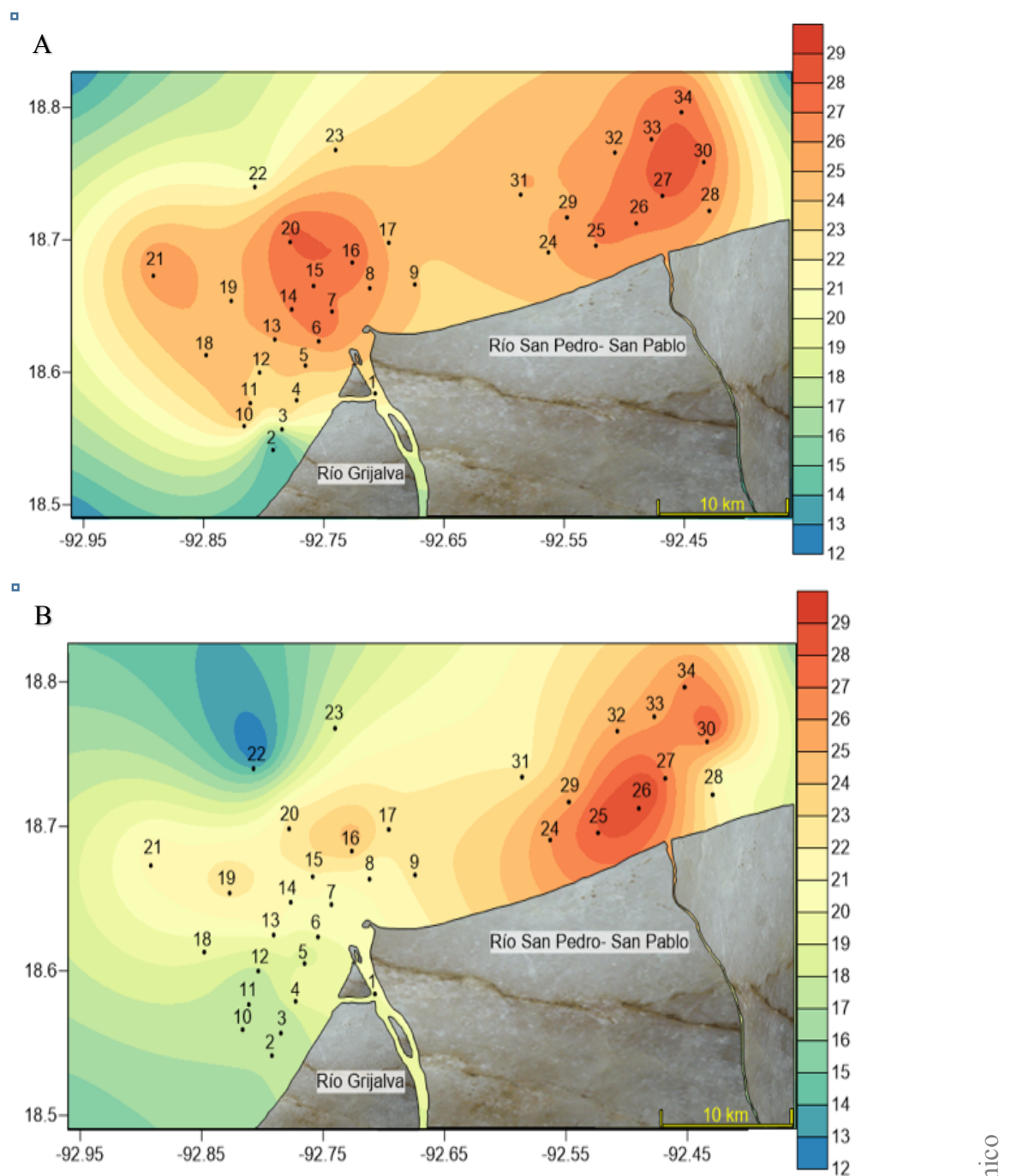


Figura 21a. Distribución de carbonatos (CO₃) en las desembocaduras durante mayo del 2017 (A) y noviembre del 2017 (B).

Por otra parte, el carbono orgánico encontrado en la zona de estudio proviene principalmente de la descarga de los ríos Grijalva y San Pedro-San Pablo y se observaron los mayores porcentajes en la desembocadura del Grijalva durante nortes (Figura 21b), con un promedio de 1.5% en esta temporada y 1.4% en secas, en la desembocadura del SPSP fue de 1.1% sin presentar cambios durante temporadas. El máximo valor fue de 2% y se encontró en el punto 4, en la desembocadura del Grijalva y el mínimo en el punto 1, en la misma desembocadura (Figura 22).

La distribución del mayor porcentaje de carbono orgánico en la desembocadura del Grijalva durante la temporada de secas presentó un comportamiento homogéneo durante casi todos los puntos de muestreo, mientras que durante nortes la mayor distribución fue observada en los puntos cercanos a la línea de costa, ya que durante la temporada de nortes se ha observado un aporte mayor de materia orgánica en la zona (Figura 21b).

En la desembocadura del SPSP, durante la temporada de secas, la mayor distribución de carbono orgánico se observó en los puntos más alejados de la línea de costa, mientras que durante nortes esta distribución sólo fue en los dos puntos localizados hacia el oeste de la desembocadura (Figura 21b).

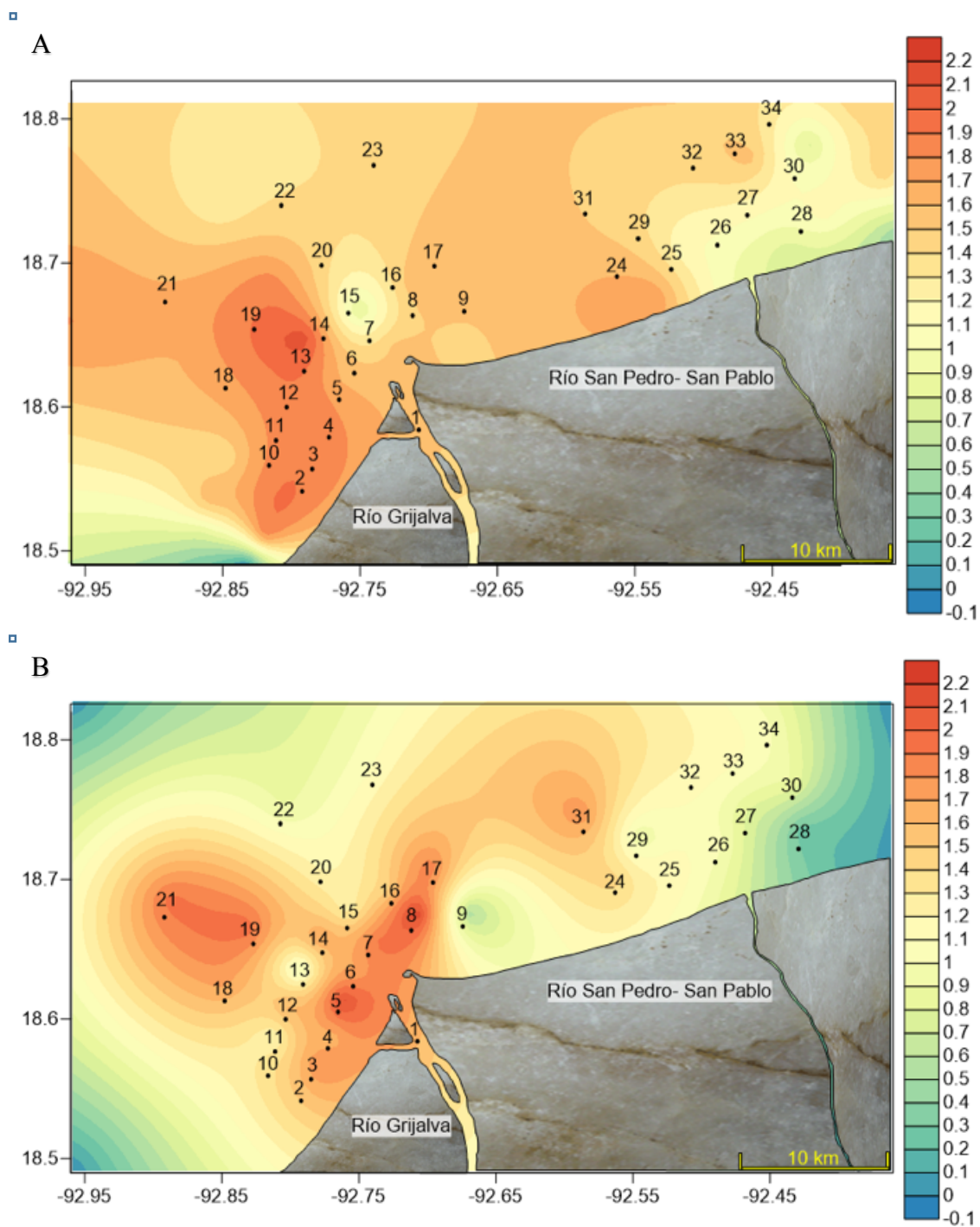


Figura 21b. Distribución de carbono orgánico en las desembocaduras durante mayo del 2017 (A) y noviembre del 2017 (B).

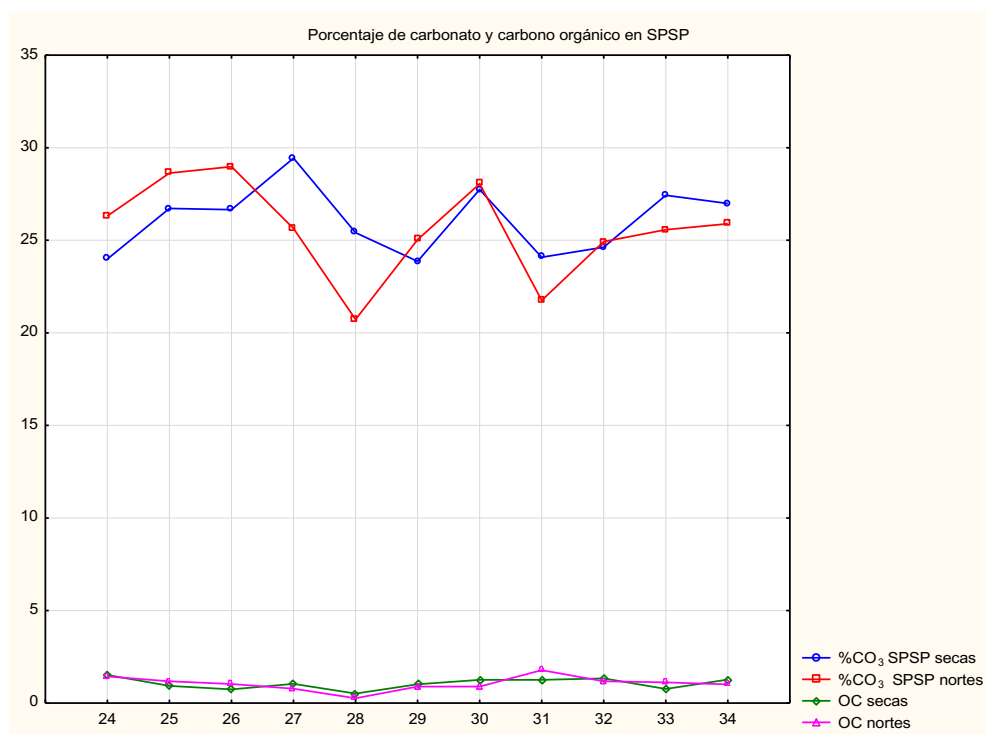
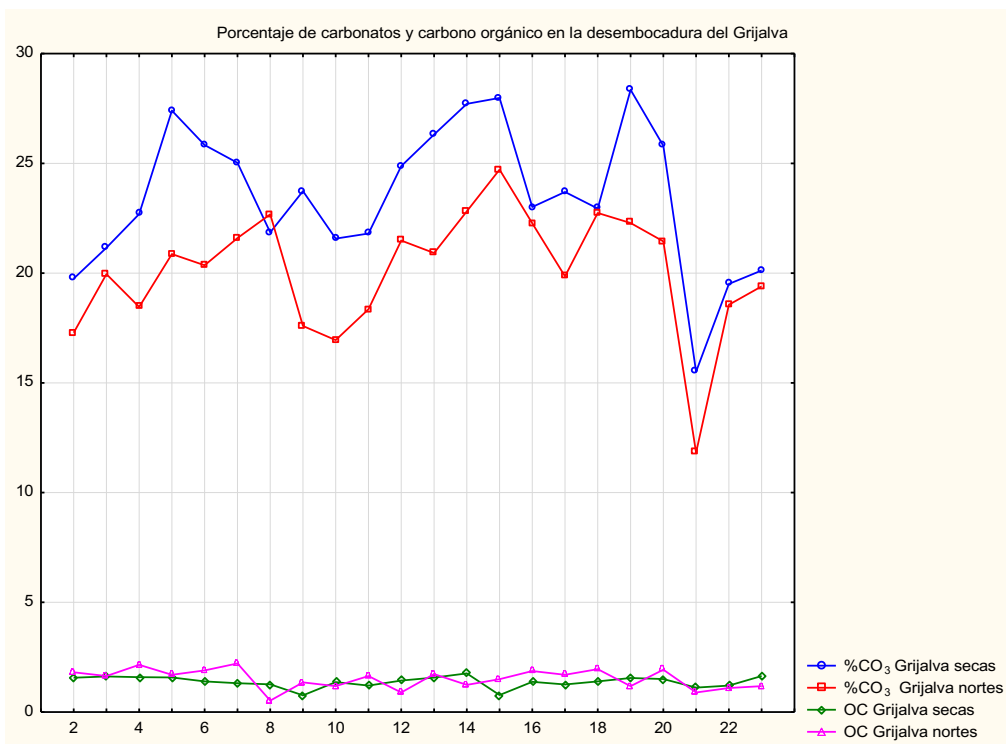


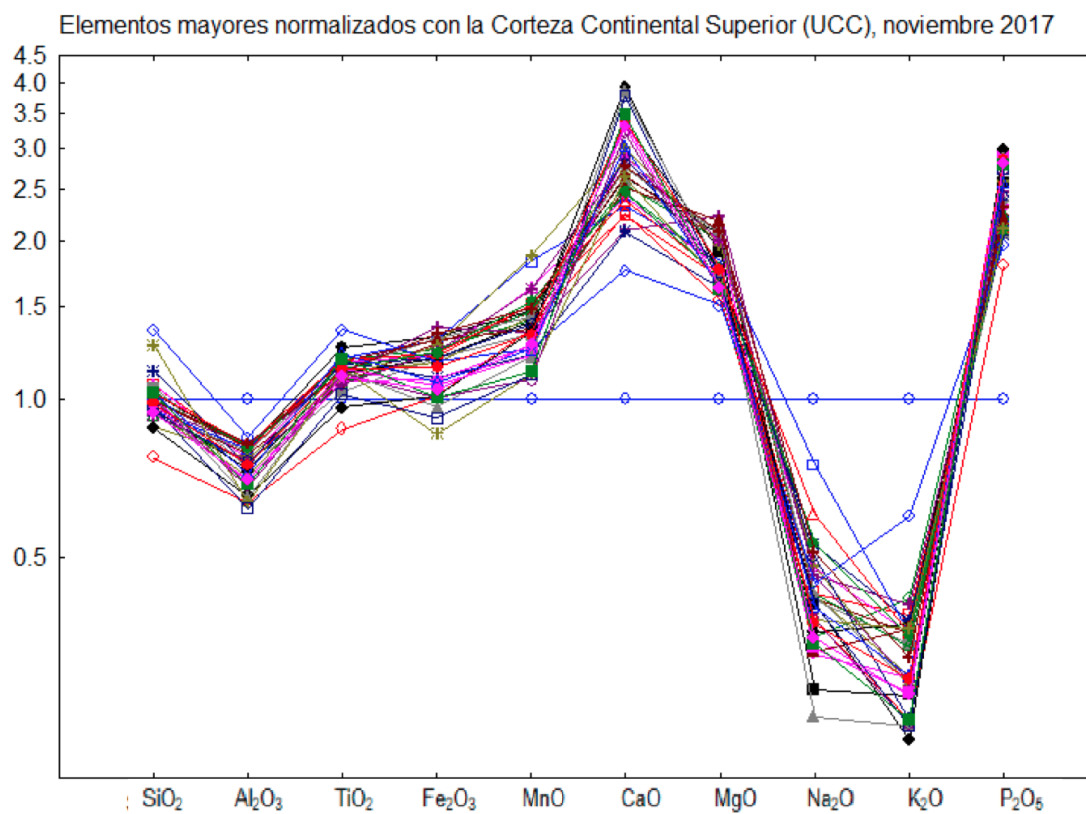
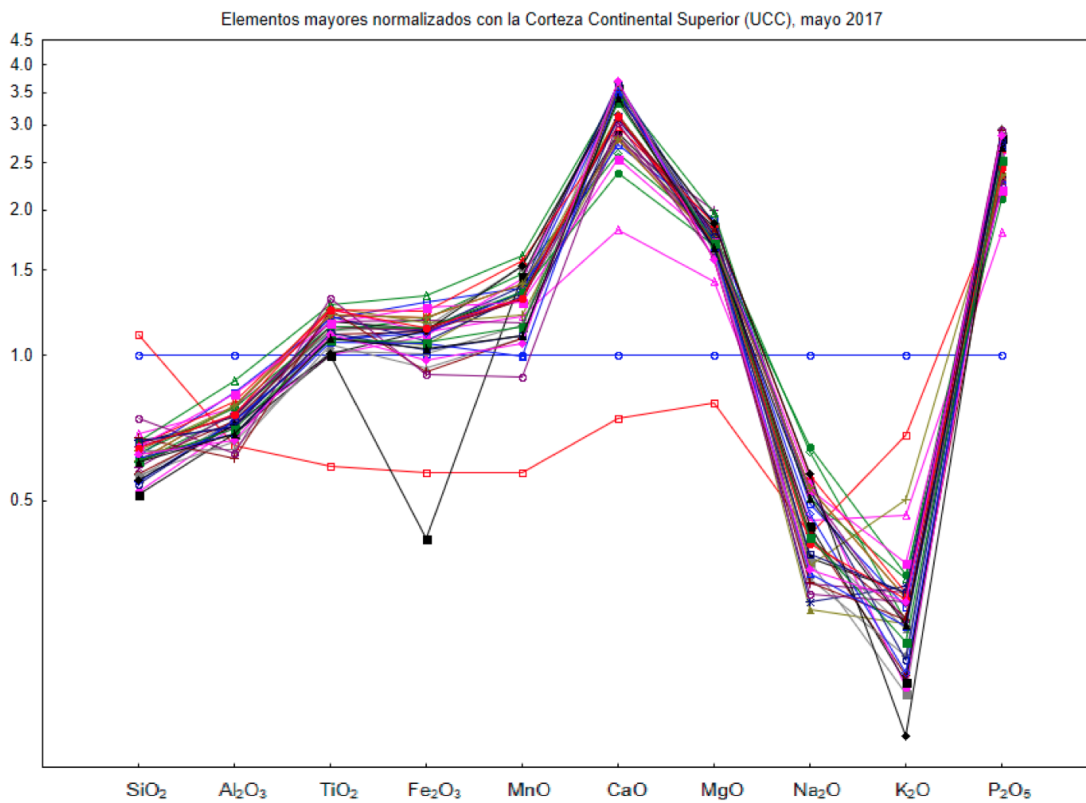
Figura 22. Porcentaje de carbonatos y carbono orgánico en sedimento de la desembocadura de los ríos Grijalva y San Pedro-San Pablo durante mayo y noviembre, 2017.

3.5. Elementos mayores

Para el análisis de elementos mayores se calculó la pérdida por ignición para cada muestra, con un valor máximo de 26.9% en la muestra 13, y el valor mínimo en la 1, ambas en la desembocadura del Río Grijalva. Los resultados son obtenidos en porcentajes de óxidos: SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , y P_2O_5 . Los resultados fueron normalizados con los datos de UCC (Corteza Continental Superior; Taylor y McLennan, 1985) (Figura 23).

El mayor componente fue el SiO_2 seguido por el Al_2O_3 , debido a la composición de la corteza terrestre. El SiO_2 presentó mayores concentraciones durante lluvias, sobre todo en la desembocadura del río San Pedro-San Pablo (Figura 23), mientras que el Al_2O_3 presentó el mayor porcentaje en la desembocadura del Grijalva durante lluvias, al igual que el Fe_2O_3 . El CaO fue mayor en San Pedro-San Pablo durante lluvias y el MgO , Na_2O y K_2O es mayor en el Grijalva durante secas (Figura 23).

En la normalización con UCC se observa que el elemento que sobresale a los valores establecidos en las dos desembocaduras y temporadas es el CaO , sobre todo en SPSP, donde no presentó variaciones considerables entre secas y nortes, así como el P_2O_5 , mientras que el Na_2O y K_2O se presentó por debajo del estándar (Figura 23). De manera general, se observó un enriquecimiento de TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , MgO y P_2O_5 , en este aspecto, el enriquecimiento de Fe_2O_3 en sedimento indica la presencia de materiales volcánicos, mientras que valores elevados de CaO puede representar carbonatos biogénicos (Armstrong-Altrin et al., 2012).



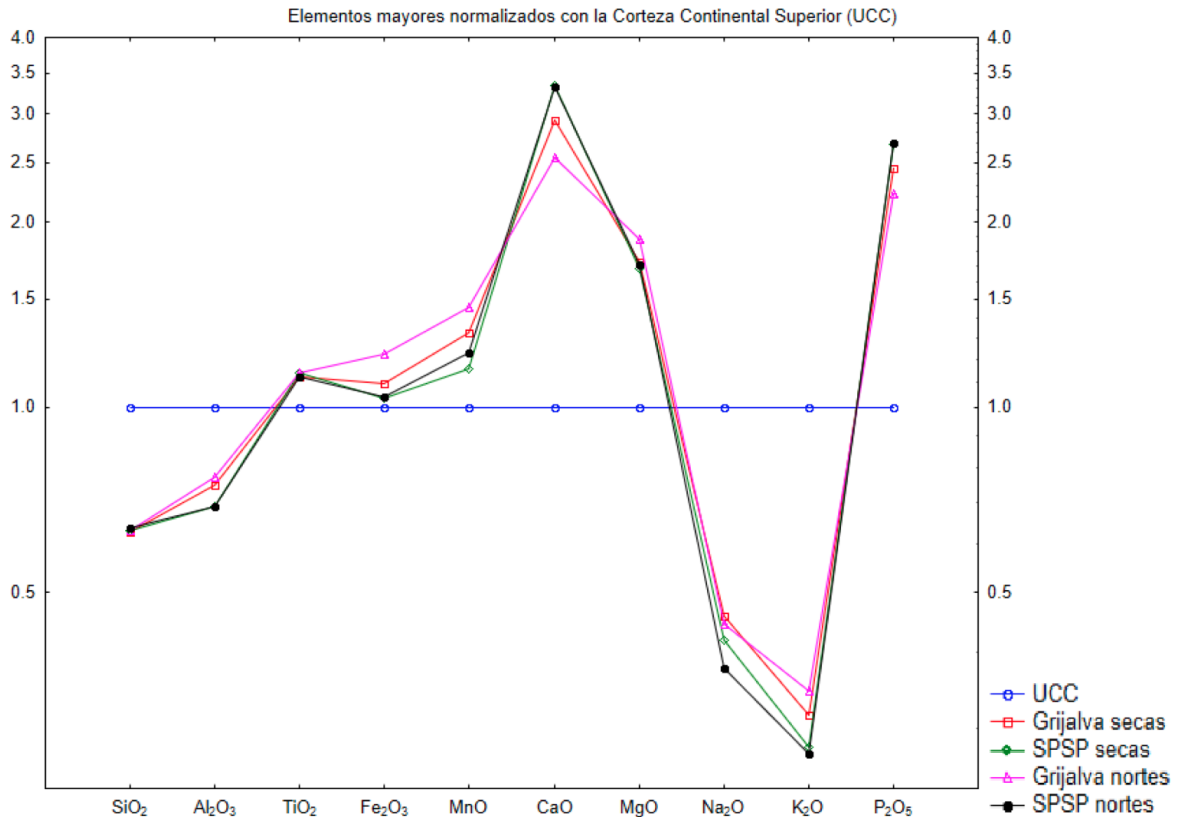
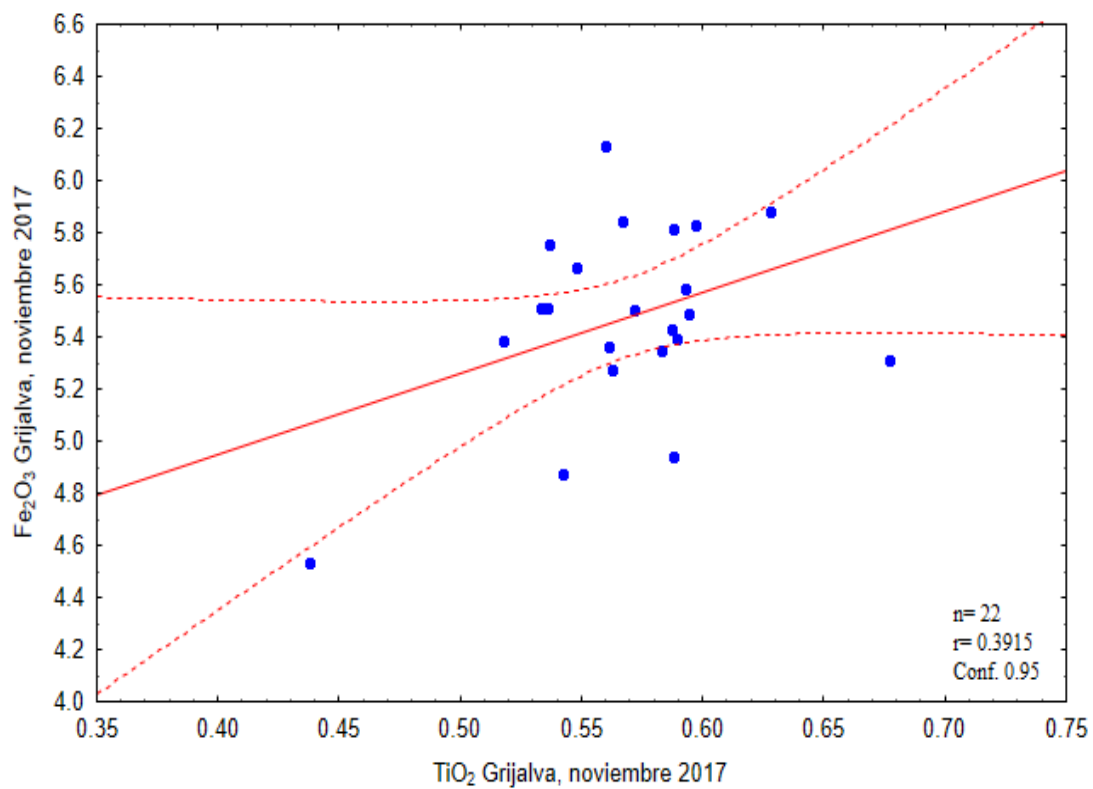
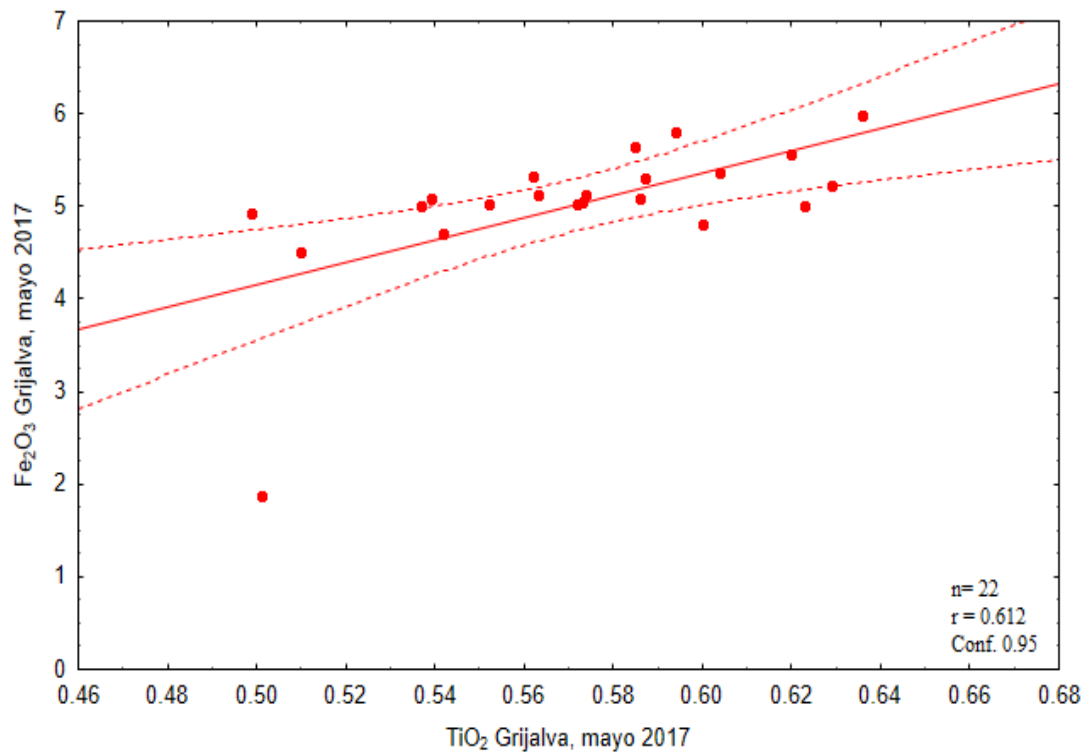


Figura 23. Elementos mayores normalizados con UCC (Corteza continental superior).

Por otra parte, se observó una correlación estadísticamente significativa ($r = 0.8$, $n = 22$) entre el SiO₂ y el K₂O en la desembocadura del Grijalva para las dos temporadas, mientras que en la desembocadura SPSP se observó una correlación menor ($r=0.6$ y 0.7 , $n=11$ para secas y nortes, respectivamente) sin cambios considerables entre temporadas. La correlación entre el SiO₂ y el Na₂O no es significativa, excepto para la desembocadura del SPSP durante secas, ($r= -0.7$, $n=11$), las correlaciones no significativas observadas en la mayor parte de los datos indican que el Na presentó movilidad durante el intemperismo y formación de minerales arcillosos (Armstrong-Altrin and Machain-Castillo, 2016), lo cual no se observó en la desembocadura del SPSP durante secas, donde se caracterizó una baja movilidad durante el intemperismo que pudo ser causado porque este río presenta un

menor caudal que el Grijalva, sobre todo en la zona cercana a su desembocadura, así como por las características texturales y mineralógicas del sedimento.

La correlación negativa entre CaO y MgO ($r = -0.79$) indica que el Mg encontrado podría no ser biogénico, sino asociado con material detrítico o mineral. La correlación positiva entre el TiO_2 con Fe_2O_3 ha sido reportada en playas arenosas del Golfo de México (Kasper-Zubillaga et al., 1999) y sugiere la presencia de titanomagnetita, la mayor correlación de estos elementos se observó en la desembocadura del Grijalva durante la temporada de secas ($r = 0.612$, $n = 22$), en este mismo sitio, durante noviembre, esta correlación fue de $r = 0.391$ $n = 22$, mientras que para SPSP fue de $r = -0.17$ y 0.19 ($n = 11$) durante mayo y noviembre, respectivamente (Figura 24). Por lo tanto, este mineral está asociado a la temporada seca en la desembocadura del Grijalva, mientras que en SPSP no hay correlaciones que sugieran su presencia, aunque podría presentarse de manera aislada en la zona. La elevada concentración de Fe_2O_3 , TiO_2 y Mn sugieren la presencia de aluminosilicatos, así como la correlación positiva de Al_2O_3 y Fe_2O_3 , lo que coincide con los aluminosilicatos encontrados en el análisis de difracción de Rayos X, principalmente en la desembocadura del Grijalva.



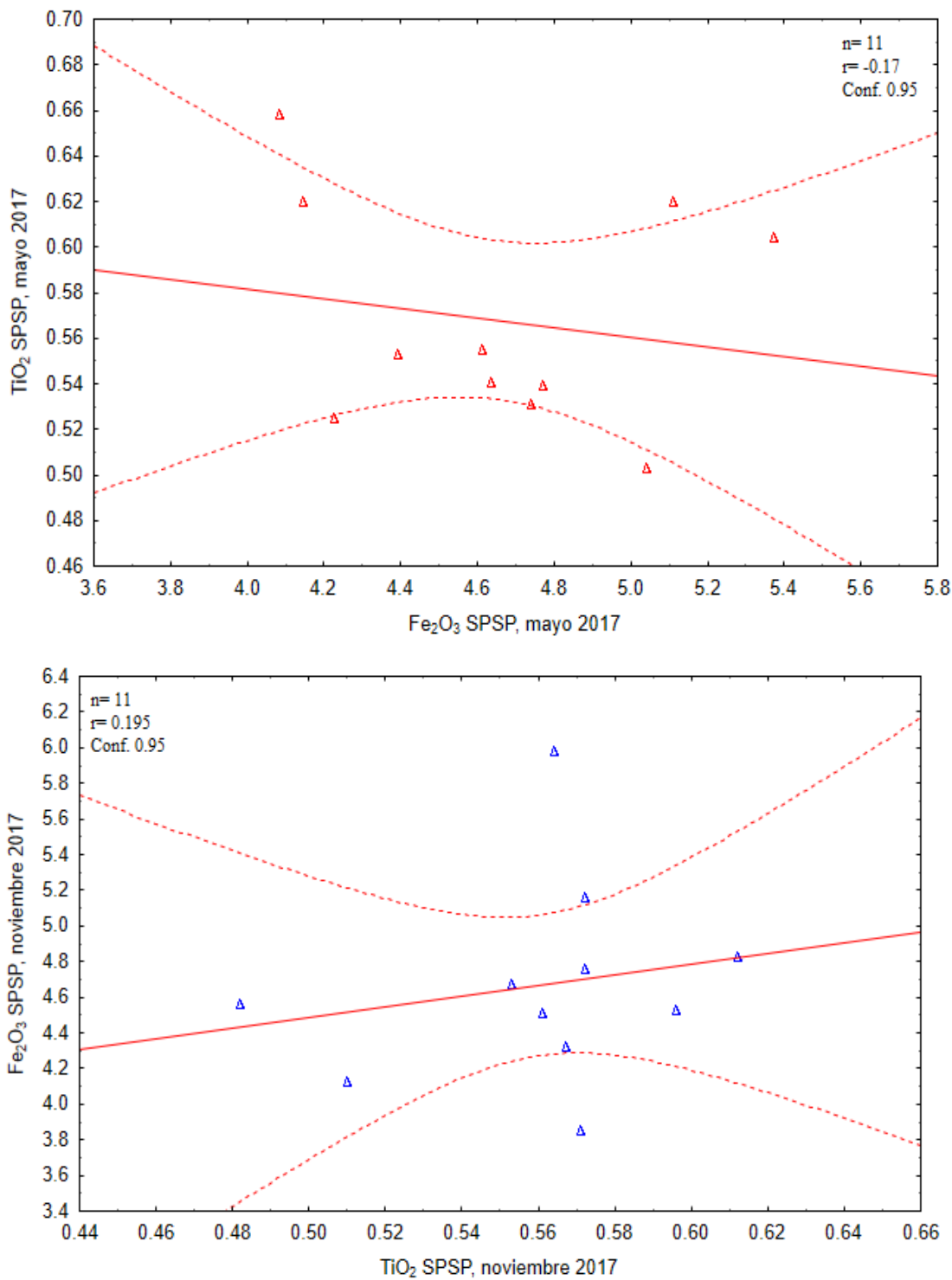
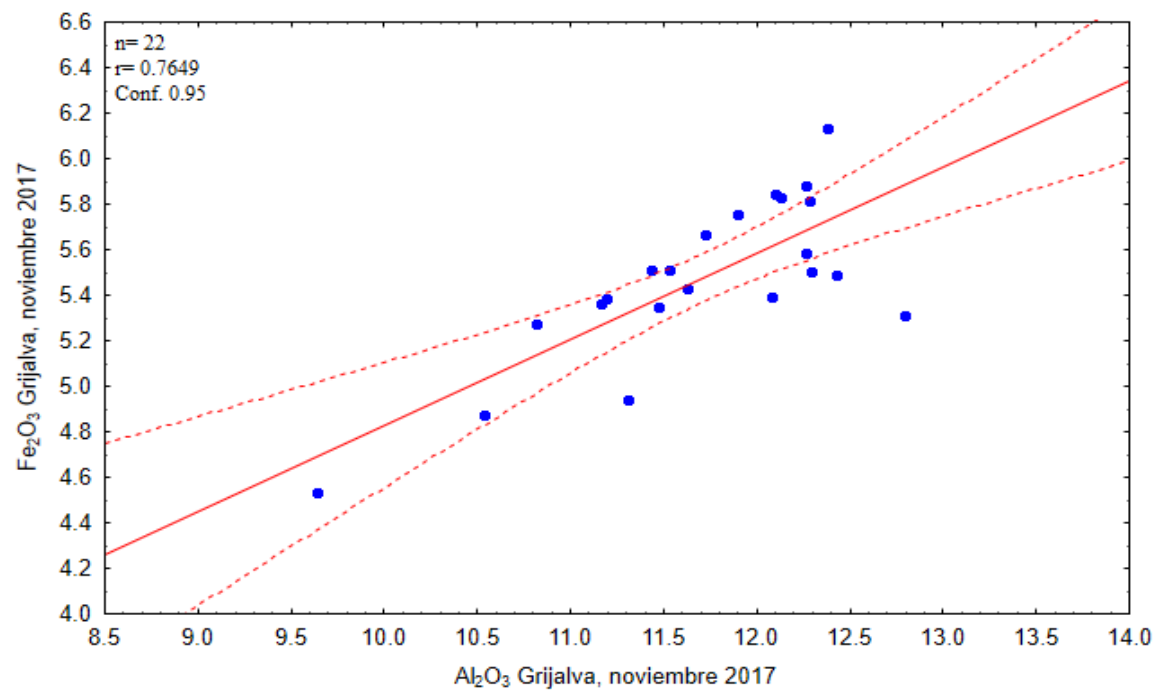
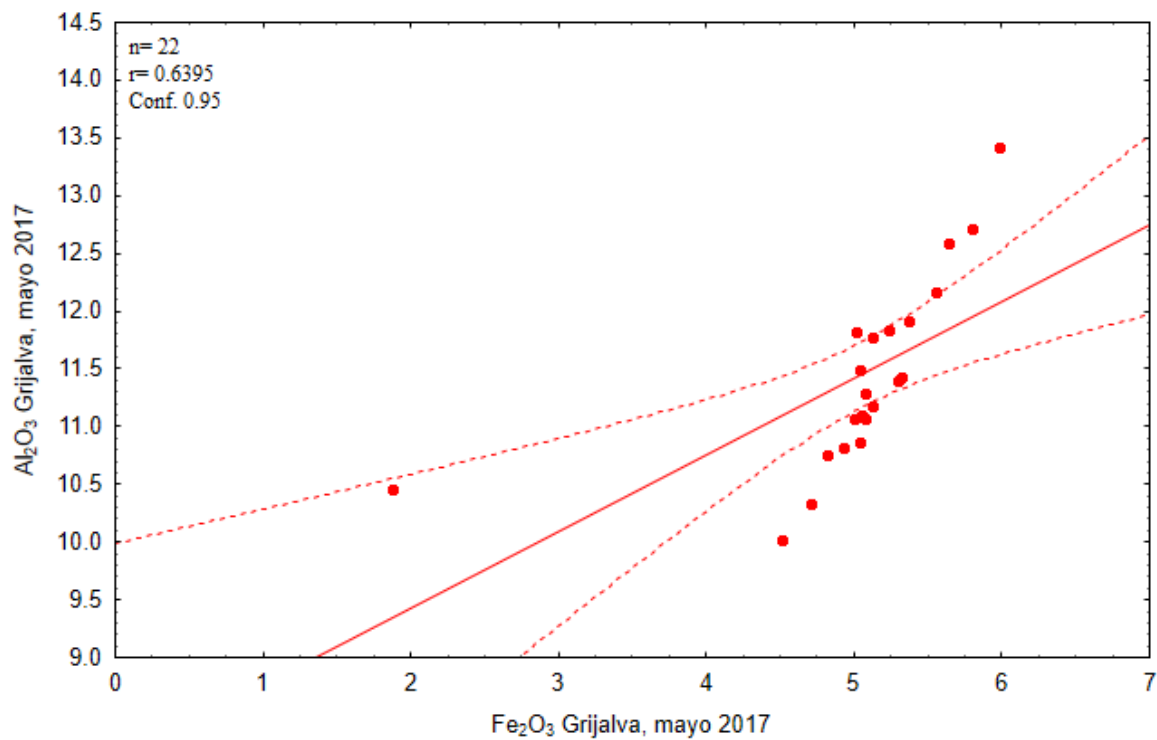


Figura 24. Correlaciones de Fe_2O_3 vs TiO_2 . A) Grijalva, mayo 2017, B) Grijalva, noviembre 2017, C) SPSP, mayo 2017 y D) SPSP, noviembre 2017.

Sumado a lo anterior, la correlación positiva de Al_2O_3 y Fe_2O_3 indican posible presencia de feldespato potásico (Celis-Hernández et al., 2017) y en Grijalva esta correlación fue de $r=0.63$ $n=22$ y $r=0.76$ para mayo y noviembre, respectivamente. En SPSP esta correlación fue bastante buena: $r=0.97$ $n=11$ y $r=0.96$ $n=11$ durante mayo y noviembre (Figura 25), lo que sugiere una mayor presencia de feldespato potásico en esta región, asociada a la cristalización de rocas ígneas del macizo de Chiapas durante el Permo-Triásico hasta el Jurásico (Weber et al., 2004).

Las correlaciones de Grijalva también fueron significantes, sobre todo durante noviembre, lo que sugiere un aumento de feldespato potásico por la descarga de ríos desde la cuenca alta, donde se observan las formaciones rocosas mencionadas y donde se origina este mineral, sin embargo, es probable que las presas en la cuenca del Grijalva frenen el transporte de los sedimentos y entre ellos, de este mineral, pero, durante la temporada de altas precipitaciones, es necesario abrir las cortinas y se permite que parte del sedimento en ellas pueda llegar a la zona de playa.



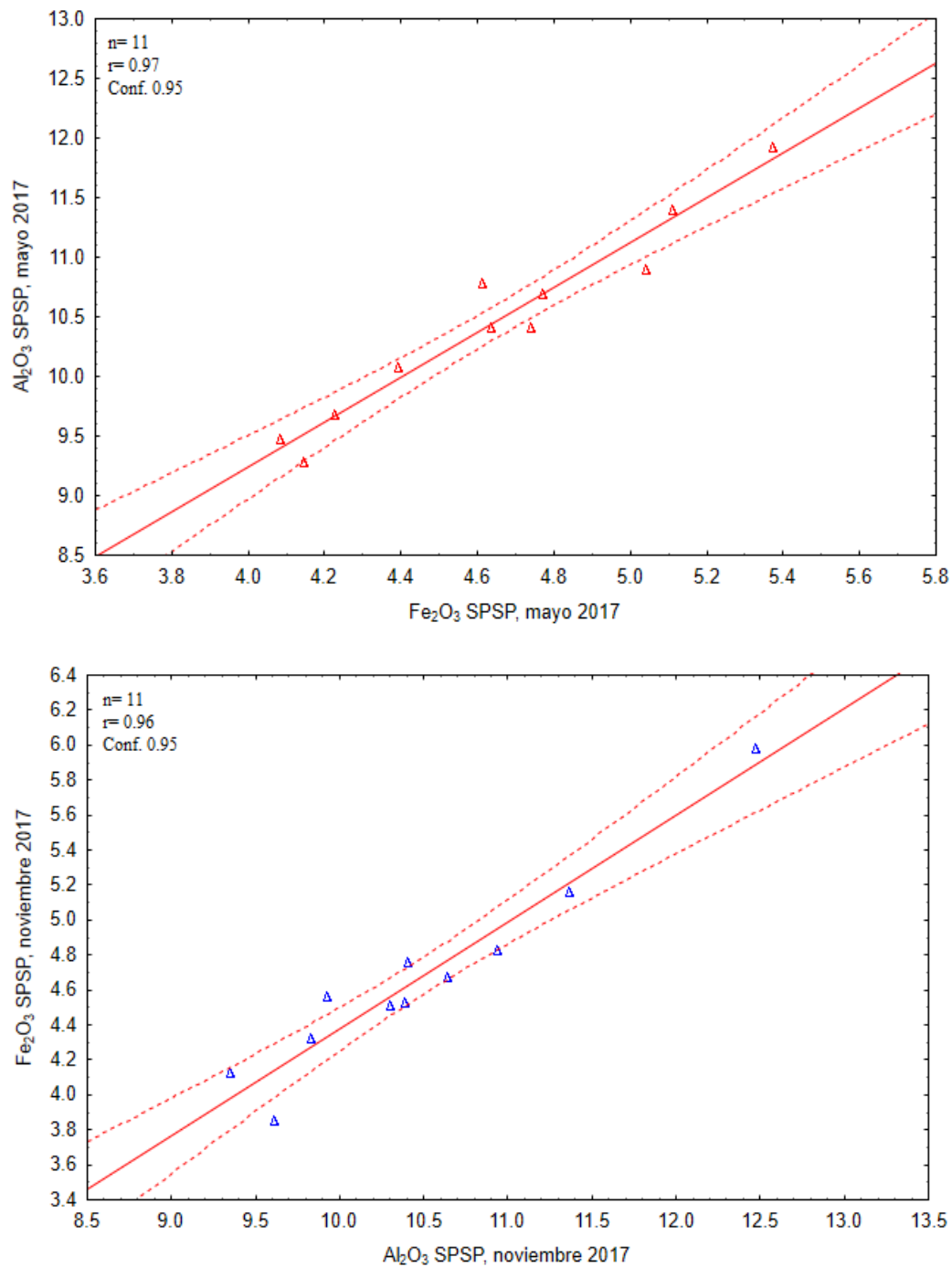
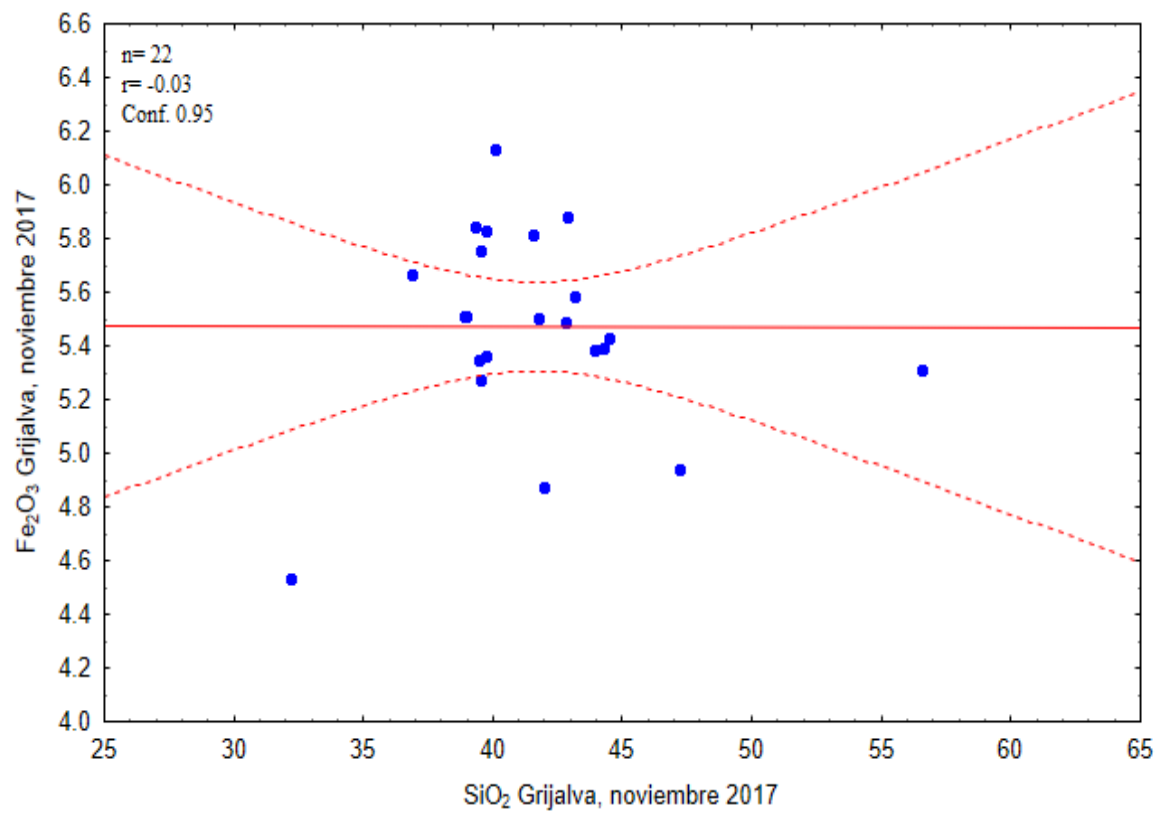
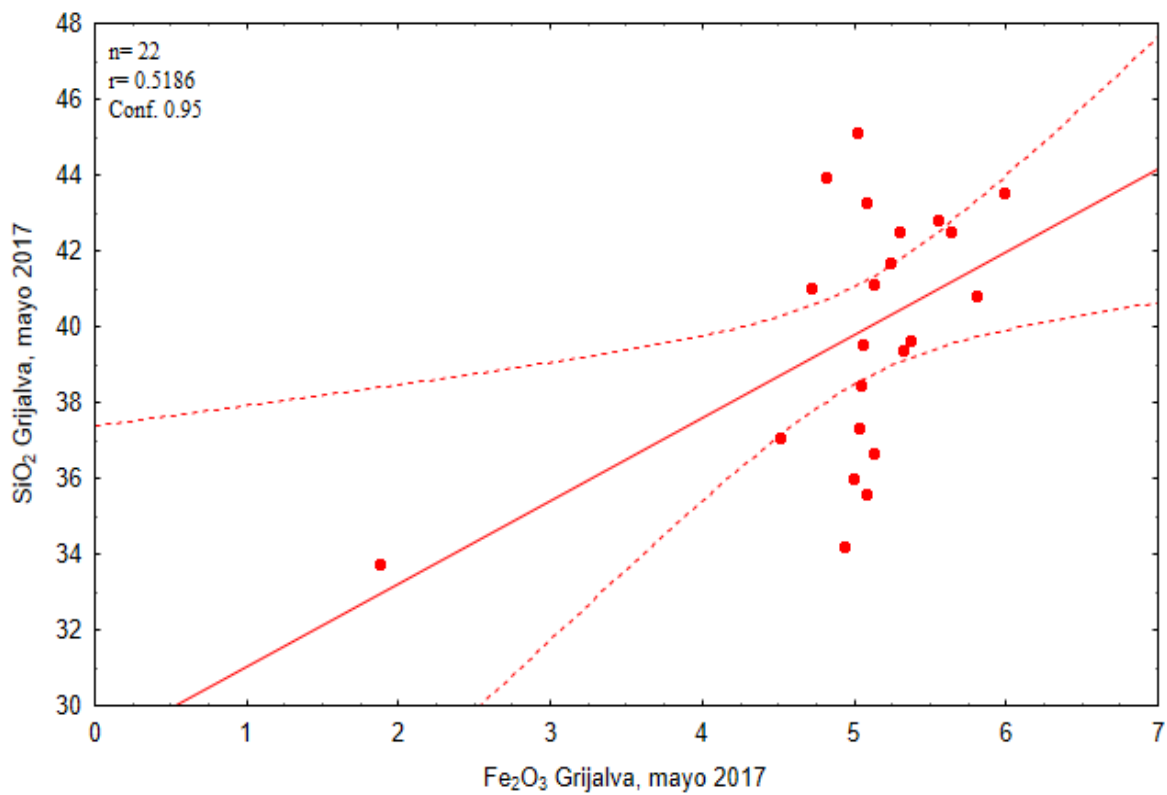


Figura 25. Correlaciones entre Fe_2O_3 vs Al_2O_3 en las desembocaduras Grijalva y SPSP durante mayo y noviembre, 2017.

De manera general, la correlación negativa de SiO_2 y Fe_2O_3 sugiere la presencia de sílice mineral, sin embargo, en las muestras analizadas no se observa una correlación estadísticamente significativa, en Grijalva durante mayo la correlación fue de $r=0.51$ ($n=22$), (Figura 26) por lo que la sílice encontrado principalmente en esta desembocadura, puede ser biogénico y asociado a organismos como diatomeas, reportadas en la zona de estudio por Hernández-Becerril et al. (2008).

En SPSP durante mayo se observó una correlación de $r=-0.66$ ($n=11$; Figura 26) lo que sugiere que en esta desembocadura existe una mayor cantidad de sílice mineral y no biogénico como en la desembocadura anterior durante la temporada de mayor sequía, mientras que, en esta misma región, SPSP, durante la época de nortes, disminuyó la cantidad de sílice mineral y aumentó en sílice biogénico ($r=-0.39$, $n=11$).



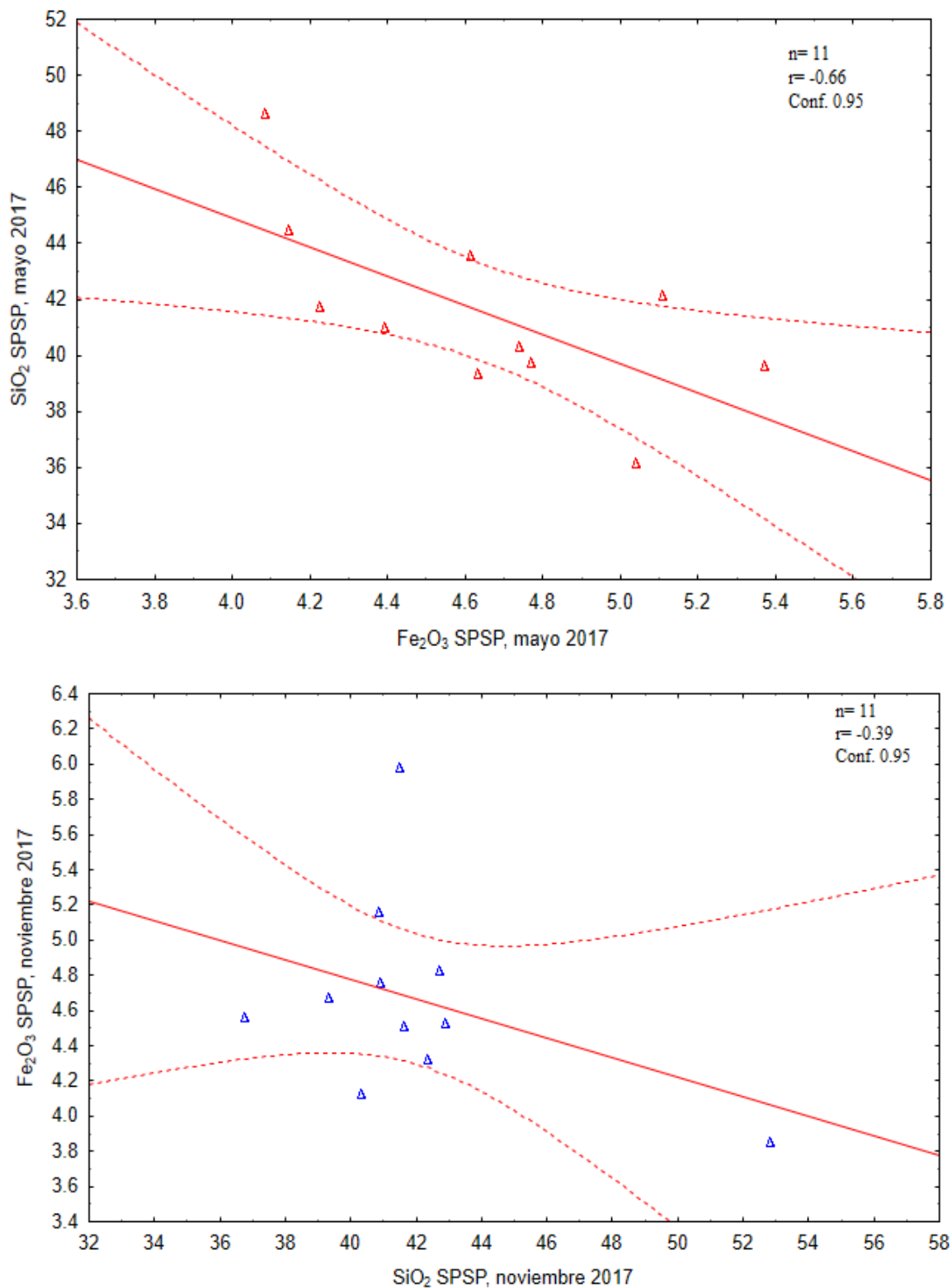


Figura 26. Correlaciones de Fe_2O_3 vs SiO_2 en las desembocaduras Grijalva y SPSP durante mayo y noviembre, 2017.

Por otra parte, la correlación entre CaO y Al₂O₃ aumenta con la presencia de plagioclasa terrígena (feldespato), encontrado también en la zona de estudio, y su correlación negativa indica la presencia de carbonato asociado a Ca. En las muestras de la temporada de secas en la desembocadura del Grijalva y del SPSP, la correlación fue de $r=-0.37$, $n=22$ y de $r=-0.19$, $n=11$ y durante la temporada de nortes Grijalva y SPSP no presentaron un cambio significativo: $r=-0.34$, $n=22$ y $r=-0.48$ ($n=11$; Figura 27 y Figura 28) , lo que indica que la plagioclasa terrígena no es tan abundante y su presencia y distribución no se encuentra influenciada por la temporada climática, por lo que su aporte moderado o bajo puede ser constante independientemente de la precipitación y sugiere que el feldespato en la zona está conformado en gran parte por anortita (CaAl₂Si₂O₈), es decir, asociado a Ca. Lo anterior debido a que la correlación negativa para las dos regiones y temporadas, sugiere que la mayor parte del carbonato se encuentra asociado a Ca, principalmente en SPSP.

La correlación entre CaO y %CO₃ obtenido en los análisis indica un mayor aporte biogénico, pero si no existe esta correlación entre ellos, sugiere un mayor aporte terrígeno. La correlación en Grijalva fue de $r=0.29$ ($n=22$) durante mayo y $r=0.91$ ($n=22$) durante noviembre, mientras que SPSP presentó un comportamiento similar con $r=-0.28$ ($n=11$) durante mayo y $r=0.85$ ($n=11$) durante noviembre (Figura 29 y Figura 30), lo que indica que en ambas desembocaduras, durante la temporada de nortes, el mayor aporte de carbonato es biogénico, mientras que durante la temporada seca es detrítico, aportada en su mayor parte por el río.

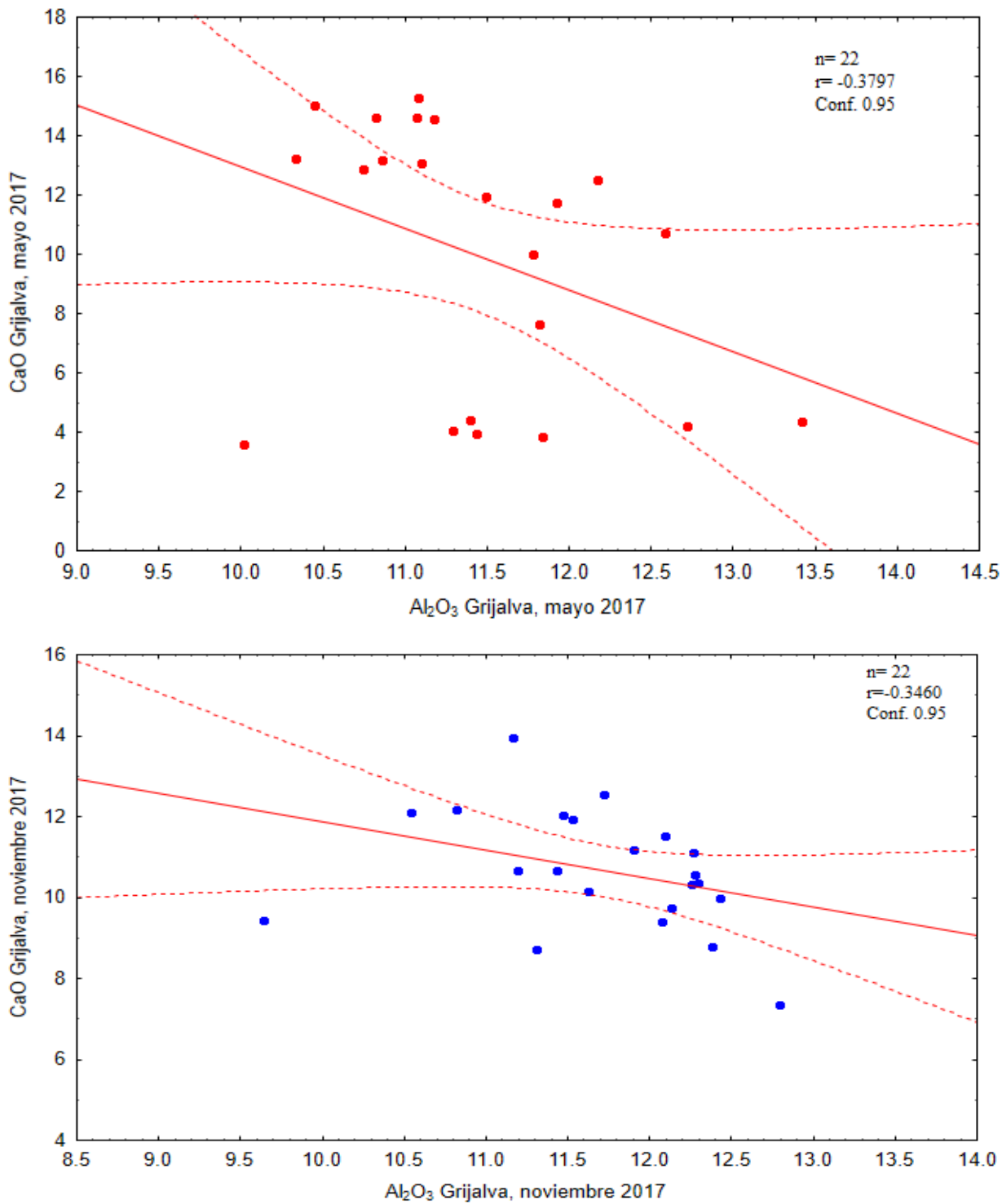


Figura 27. Correlaciones de Al_2O_3 vs CaO en la desembocadura Grijalva durante mayo y noviembre, 2017.

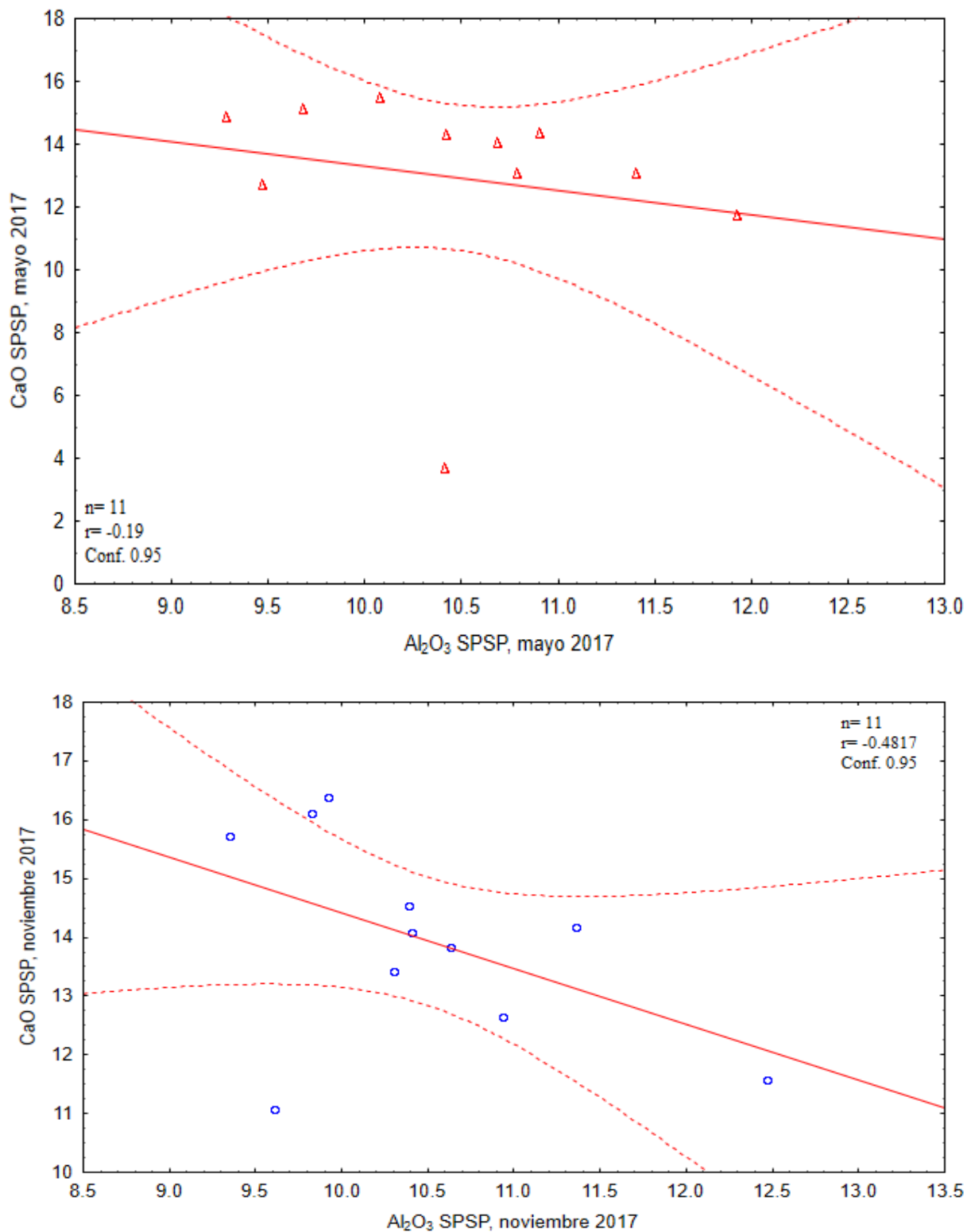


Figura 28. Correlaciones de Al₂O₃ vs CaO en la desembocadura SPSP durante mayo y noviembre 2017.

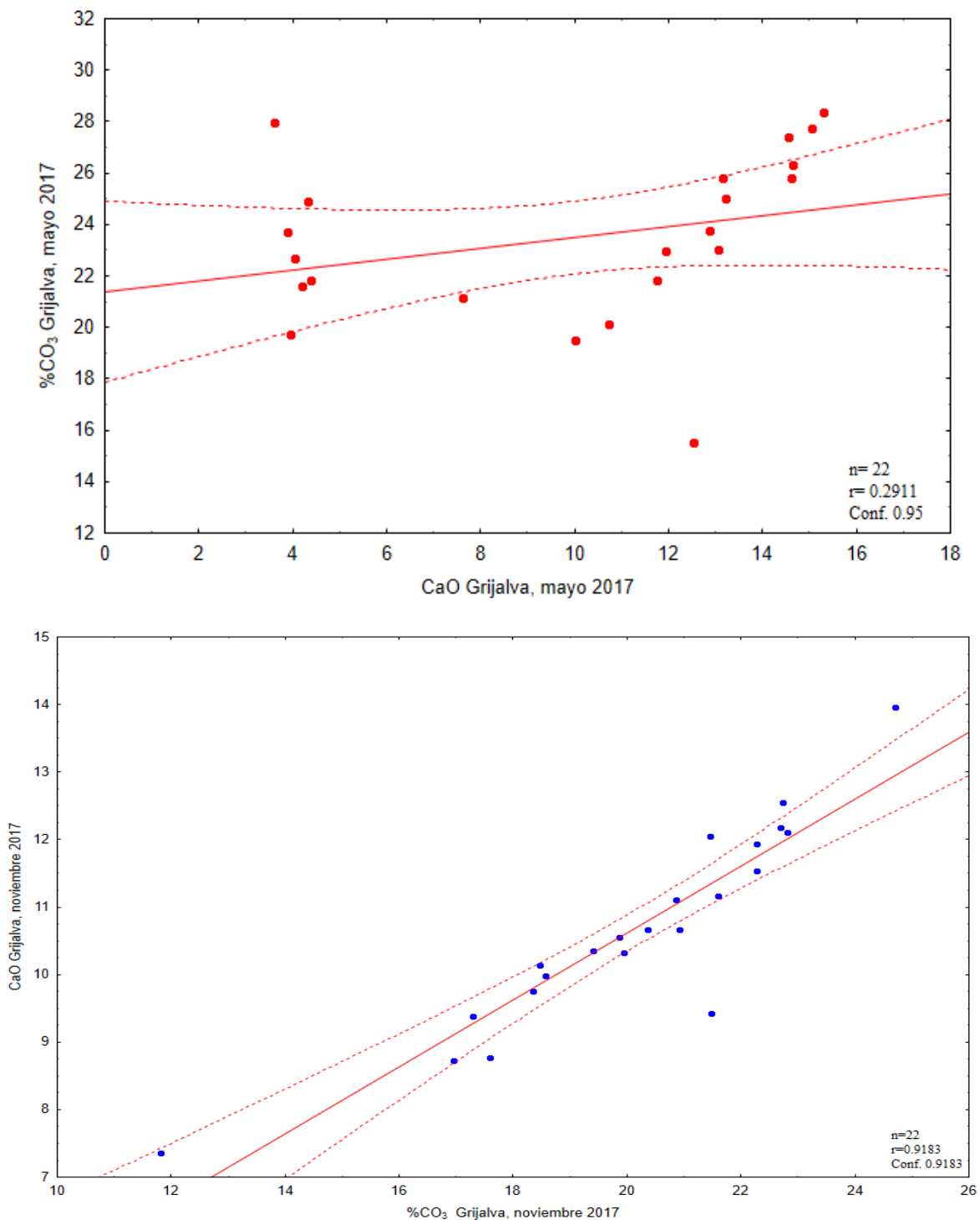


Figura 29. Correlaciones entre CaO y %CO₃ en la desembocadura Grijalva durante mayo y noviembre, 2017.

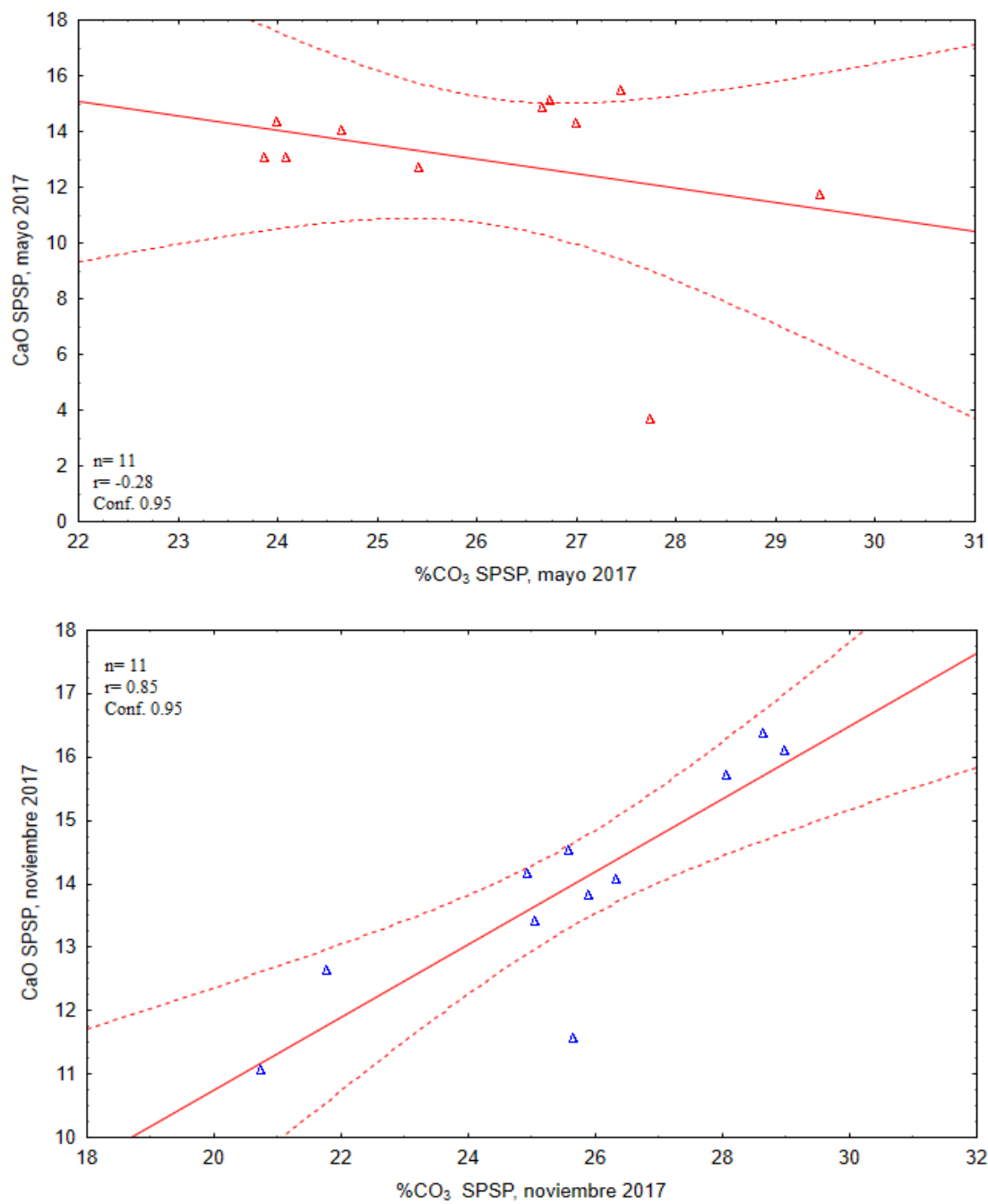


Figura 30. Correlaciones entre CaO y %CO₃ en la desembocadura SPSP durante mayo y noviembre, 2017.

De todas las correlaciones analizadas, se puede inferir que la mayor presencia de CaO biogénico en noviembre puede estar asociada a organismos de mayor tamaño, como moluscos y equinodermos, que resisten el oleaje y las corrientes intensas durante los eventos de norte, mientras que durante la temporada de secas, el SiO₂ es en mayor parte biogénico, probablemente aportado por diatomeas y silicoflagelados, organismos de menor tamaño cuyos esqueletos silíceos se sedimentan gracias al oleaje de baja energía.

3.5.1. Clasificación geoquímica de sedimentos

A partir del diagrama de Herron (1988) es posible determinar la clasificación de los sedimentos superficiales obtenidos en las desembocaduras de los ríos Grijalva y SPSP. Este diagrama fue elaborado a partir del $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ y el $\text{Log}(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$. Los resultados mostraron que los sedimentos de las dos regiones y temporadas pertenecen a la clasificación geoquímica de lutitas enriquecidas con Fe, en menor medida a lutitas (algunos sitios en la desembocadura del Grijalva durante secas) y a grauvaca una muestra de SPSP durante secas y una muestra de Grijalva durante lluvias (Figura 31), así como la muestra 1 de Grijalva durante la temporada de secas, esta muestra fue obtenida dentro del río y su composición es arenosa. La lutita con Fe se encuentra asociada al enriquecimiento de este elemento respecto a la Corteza Continental (UCC), aportado por procesos magmáticos y metamórficos en la cuenca alta de la región.

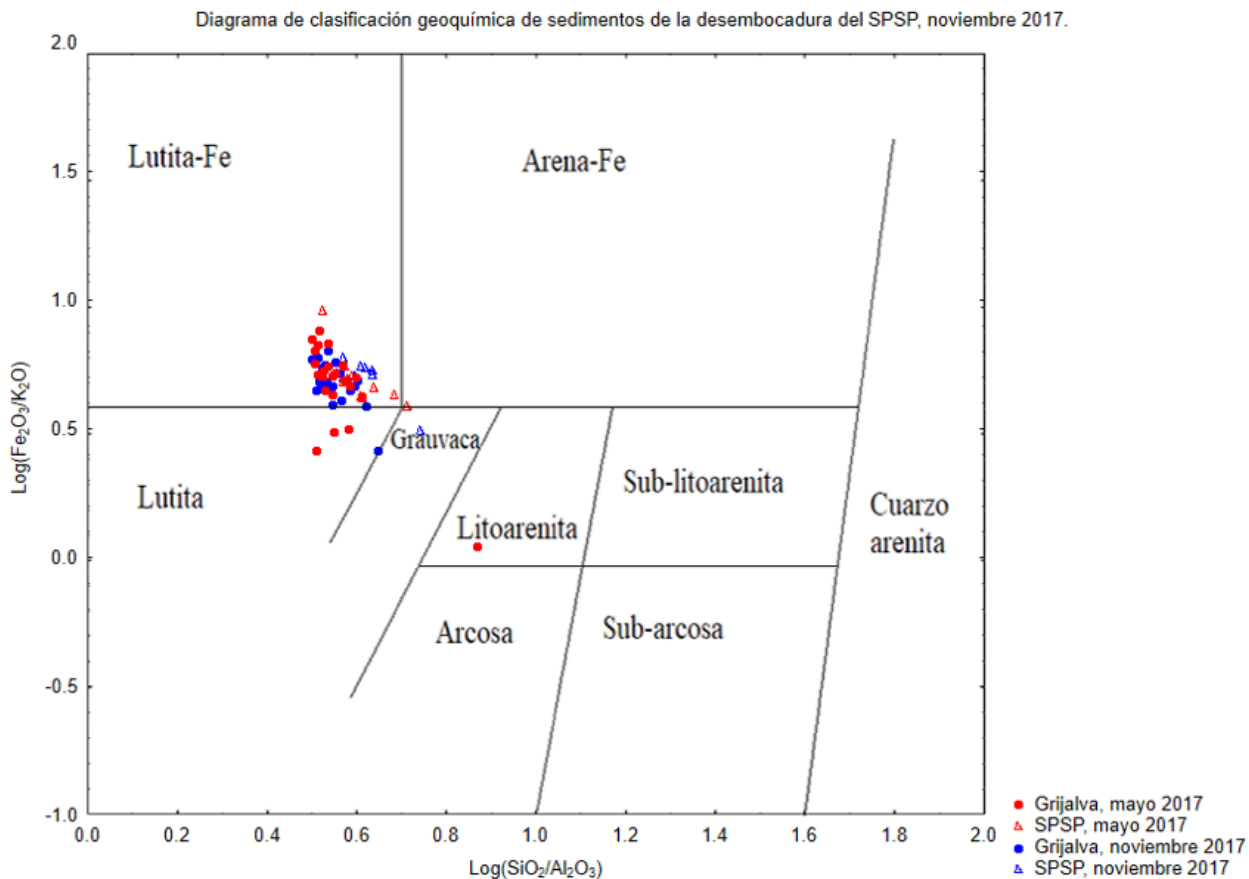


Figura 31. Diagrama de clasificación geoquímica de sedimentos superficiales de las desembocaduras Grijalva y SPSP.

3.5.2. Procedencia de sedimentos

A partir de la relación $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ es posible determinar la procedencia de sedimentos, en rocas ígneas máficas esta relación es < 14 , en rocas ígneas intermedias es de ~ 19 a 28 y en rocas félsicas es > 28 (Girtyetal, 1996). Los resultados obtenidos en ambas desembocaduras son de 18 a 22 , similar al de las rocas intermedias y en algunos resultados casi máficas.

Por otra parte, a partir del análisis de factores discriminantes de algunos elementos mayores también es posible identificar algunas fuentes de procedencia.

Para el factor discriminante 1 (DF1) se utilizó la fórmula: $(-0.263 \times \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)) + (0.604 \times \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)) + (-1.725 \times \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)) + (0.660 \times \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)) + (2.191 \times \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)) + (0.144 \times \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)) + (-1.304 \times \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)) + (0.054 \times \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)) + (-0.330 \times \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)) + 1.588$

El factor discriminante 2 (DF2) fue calculado a partir de: $(-1.196 \times \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)) + (1.604 \times \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)) + (0.303 \times \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)) + (0.436 \times \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)) + (0.838 \times \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)) + (-0.407 \times \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)) + (1.021 \times \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)) + (-1.706 \times \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)) + (-0.126 \times \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)) - 1.068$

Los resultados mostraron una procedencia de zona de colisión y, en menor medida, de arco volcánico (Figura 32). Al analizar la Carta Geológica y el marco tectónico de México, se observa que parte de la cuenca Grijalva-Usumacinta se encuentra ligada al Arco Volcánico de Chiapas, además se tiene una zona de colisión cercana a la zona de Tehuantepec, Oax., dentro del parte-aguas de la cuenca del Grijalva, en provincia fisiográfica de la Sierra de Chiapas hasta Guatemala (Weber et al., 2009; Godínez-Urban et al., 2011).

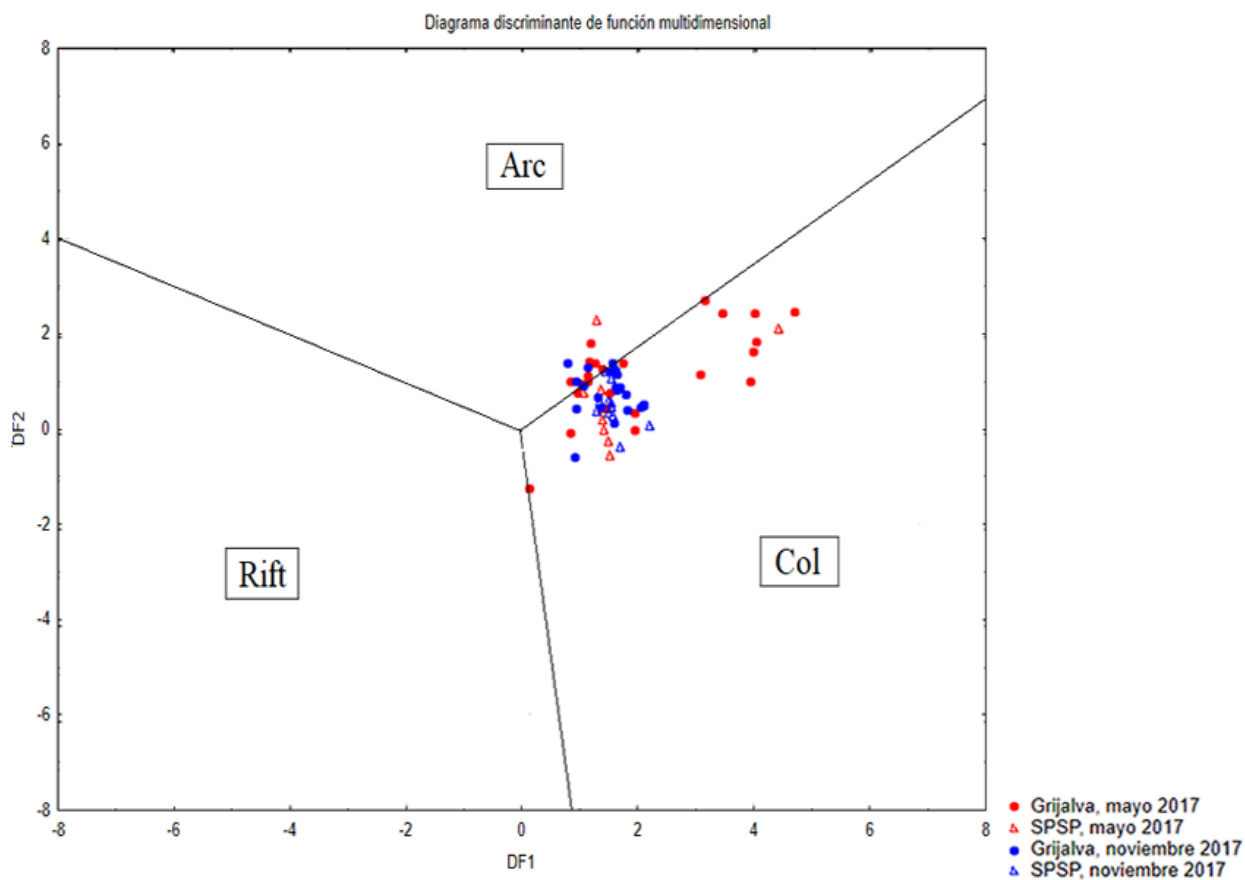


Figura 32. Diagrama discriminante de función multidimensional para el análisis de ambiente tectónico.

3.5.3. Meteorización

Para calcular la meteorización se desarrollaron las fórmulas del CIA (Chemical Index of Alteration; Nesbitt y Young, 1982), CIW (Chemical Index of Weathering; Harnois, 1988) y PIA (Plagioclase Index of Alteration; Fedo et al., 1995).

$$\text{CIA} = \left[\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}} \right] 100$$

$$CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] 100$$

$$PIA = [Al_2O_3 - K_2O / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] 100$$

CaO* representa sólo la parte asociada a silicatos. Se considera que el Ca contenido en el océano profundo representa sólo la cantidad de silicatos, ya que este Ca de mar profundo proviene de formas inorgánicas de C y Na, asociado con las sales marinas. El Ca contenido en la fracción de silicatos se calcula mediante la ecuación:

$$Ca = CaO_t - CaO_{trg}$$

$$CaO_{trg} = Al_2O_3 \cdot t \cdot (CaO / Al_2O_3)_{UCC}$$

t = abundancia total en la muestra

trg = terrígeno

Los valores de CIA, CIW y PIA en rocas ígneas no alteradas es menor a 50, en lutitas es entre 70 - 75 y en arcillas estos valores son cercanos a 100, entonces, estos valores incrementan con la intensidad de la meteorización (Nesbitt and Young, 1982; Fedo et al., 1995). Cuando los resultados de estos índices son ~50-60, indican una baja meteorización, ~60-80 moderada y >80 intensa. En la desembocadura del Grijalva y SPSP se obtuvieron valores cercanos a 80, es decir, sedimentos con una elevada meteorización, sin embargo, en Grijalva durante mayo se observaron algunos resultados con una meteorización baja, con valores cercanos a 50.

Estos índices también indican que algunos sedimentos provienen de un bajo relieve y son depositados en un ambiente cálido y húmedo, característico de la planicie costera de Tabasco. Cox et al. (1995) sugiere que la relación SiO_2/Al_2O_3 y Al_2O_3/Na_2O puede ser utilizada para inferir la madurez de sedimentos, de tal manera que valores > 6 y > 5 indican una elevada madurez de los sedimentos. A partir de estas relaciones, se obtuvieron

resultados de moderada y elevada madurez en algunos sitios de las desembocaduras Grijalva y SPSP, caracterizados por una mayor madurez en Grijalva durante noviembre.

Además de estos índices, se realizó un diagrama ternario A-CN-K de tendencia de meteorización de areniscas, limolitas y lutitas, debido a la composición geoquímica asociada a lutitas de la mayor parte de las muestras. Dentro de este diagrama, A representa el Al_2O_3 , CN es la suma de $CaO + Na_2O$ y K es el valor de K_2O . El número 50 en el diagrama indica el límite de la plagioclasa, que es cuando se comienza a considerar que hay una meteorización, bajo este valor, se consideran sedimentos poco maduros y con poco transporte.

Los resultados mostraron una elevada meteorización con su asociación hacia esmectita e illita, principalmente en Grijalva durante noviembre, probablemente asociado al transporte fluvial y meteorización química en la cuenca media, mientras que en la temporada seca se observó una mejor asociación con esmectita y plagioclasa (Figura 33), debido a una menor meteorización, así como una meteorización baja en algunos sedimentos de esta región, éstos pueden sugerir una fuente cercana y poco transporte, probablemente interferido por la planicie costera y la zona de pantanos cercana. Los sedimentos de SPSP no mostraron diferencias considerables entre temporadas, manteniendo una meteorización moderada asociada siempre a la presencia de esmectita (Figura 33).

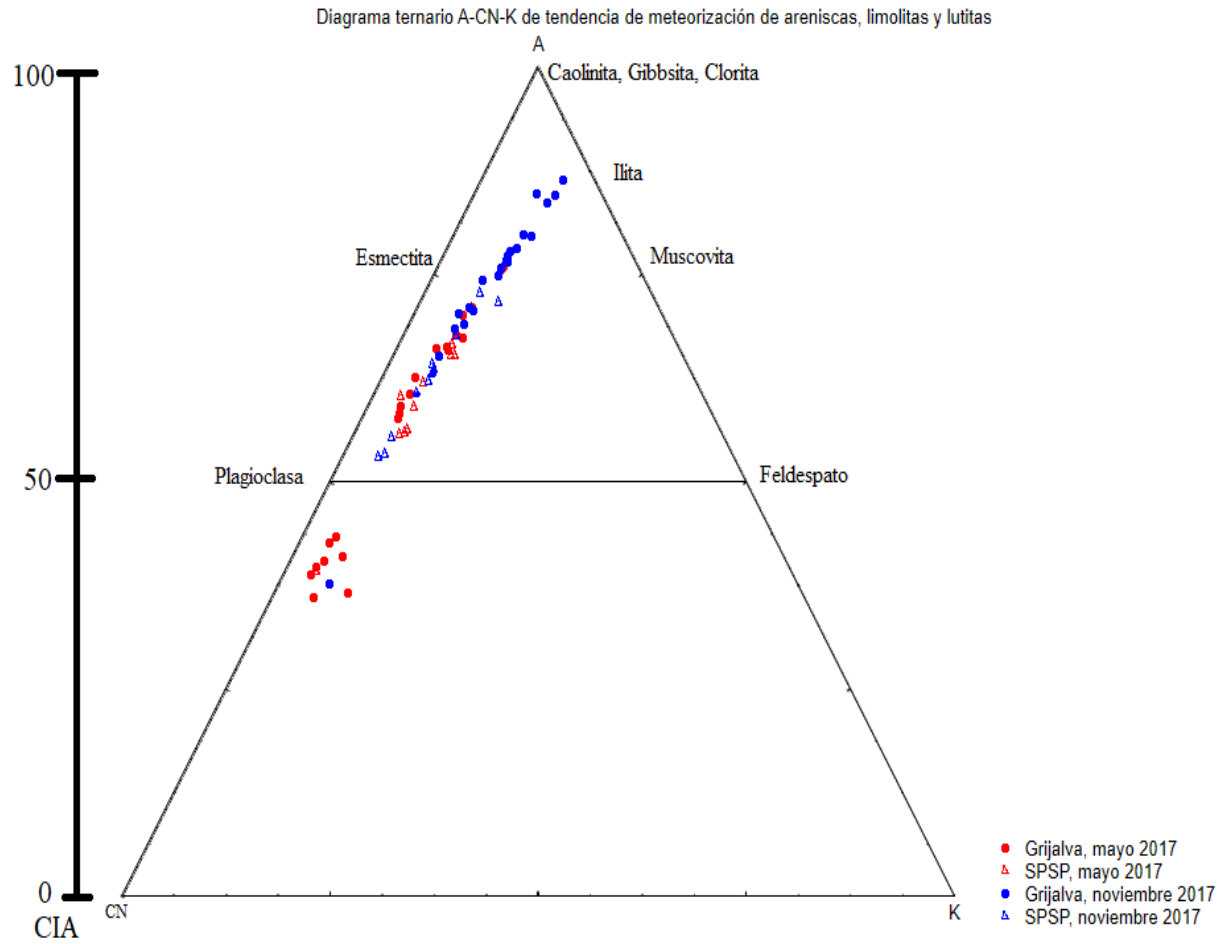


Figura 33. Diagrama ternario de tendencia de meteorización de areniscas, limolitas y lutitas (modificado por Nesbitt and Young, 1982).

3.6. Elementos trazas

Los elementos traza analizados fueron litio (Li), berilio (Be), fósforo (P), selenio (Se), titanio (Ti), vanadio (V), cromo (Cr), cobalto (Co), níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), galio (Ga), rubidio (Rb), estroncio (Sr), itrio (Y), circonio (Zr), niobio (Nb), molibdeno (Mo), estaño (Sn), antimonio (Sb), calcio (Ca) y bario (Ba), éstos fueron normalizados con UCC (Corteza continental superior). De manera general, el Cr presentó una anomalía positiva y su mayor distribución se observó frente a la desembocadura del Río San Pedro- San Pablo, aunque también hay algunos valores elevados en Grijalva. Se presentaron valores altos de Ni en algunos puntos para ambas normalizaciones, así como valores por encima de la normalidad para Sr y Sb, que se encuentran asociados a rocas félsicas (Figura 34).

El enriquecimiento de V, Co, Ni, Cu y Zn en sedimento indica la presencia de materiales volcánicos y de éstos, las muestras sólo presentan enriquecimiento en Ni. Los valores elevados de Sr obtenidos pueden estar asociados a carbonatos biogénicos y plagioclasa, mientras que el enriquecimiento de Rb, Cs y La indican componentes terrígenos (Armstrong-Altrin *et al.*, 2012), este enriquecimiento no se encuentra en las muestras analizadas. Las anomalías negativas de Y (Figura 34) sugiere la presencia de piroxenos y ortopiroxenos, aunque sólo se observaron en algunos sitios.

Por otra parte, los feldespatos y esfenos controlan las concentraciones de Ba, Na, Rb y Cs, estos elementos se presentaron en concentraciones bajas, lo que sugiere que, aunque existen feldespatos en las muestras, no son mayoría, ya que los sedimentos encontrados en infraplaya han pasado por un proceso de intemperismo y transporte mayor, algunos desde la cuenca alta del Grijalva-Usumacinta.

Los minerales ferromagnesianos controlan las concentraciones de Ta, Fe, Co, Sc y Cr, de estos elementos sólo el Cr se encontró en cantidades elevadas, sin embargo, en el análisis mineralógico se obtuvieron algunas concentraciones de biotita, hornblenda y olivino. El Hf

y Zr puede ser controlado por zircones y el P por apatita, aunque estos elementos no se encontraron en elevadas concentraciones.

Los efectos del intemperismo y su influencia en la composición del sedimento está asociada a elementos alcalinos contenidos en sedimentos. Éstos muestran que los cationes más grandes (Cs, Rb y Ba) están asociados al intemperismo, mientras que los cationes más pequeños (Na, Ca y Sr) pueden ser más filtrados o lixiviados. En arcillas con contenido de carbonato, los elementos Mn, Pb y Sr se encuentran principalmente contenidos en el componente carbonatado y los valores anómalos de estos elementos, se asocian a la presencia de carbonatos.

Por otra parte, los elementos trazas como La, Y y Th presentan concentraciones elevadas en rocas ígneas félsicas, mientras que el Cr, Ni, Co y V se encuentran enriquecidas en rocas ígneas máficas. En este aspecto, las muestras presentaron un enriquecimiento en Cr y Ni, característico de rocas máficas (Figura 34). De manera similar, los sedimentos de grano fino con elevadas concentraciones de Cr (>150ppm), Ni (>100ppm) y baja tasa de Cr/Ni (~1.3–1.5) sugiere una procedencia de la meteorización de rocas ultramáficas (Garver et al., 1999; Armstrong-Altrin et al., 2004), probablemente asociadas a intrusiones ultrabásicas.

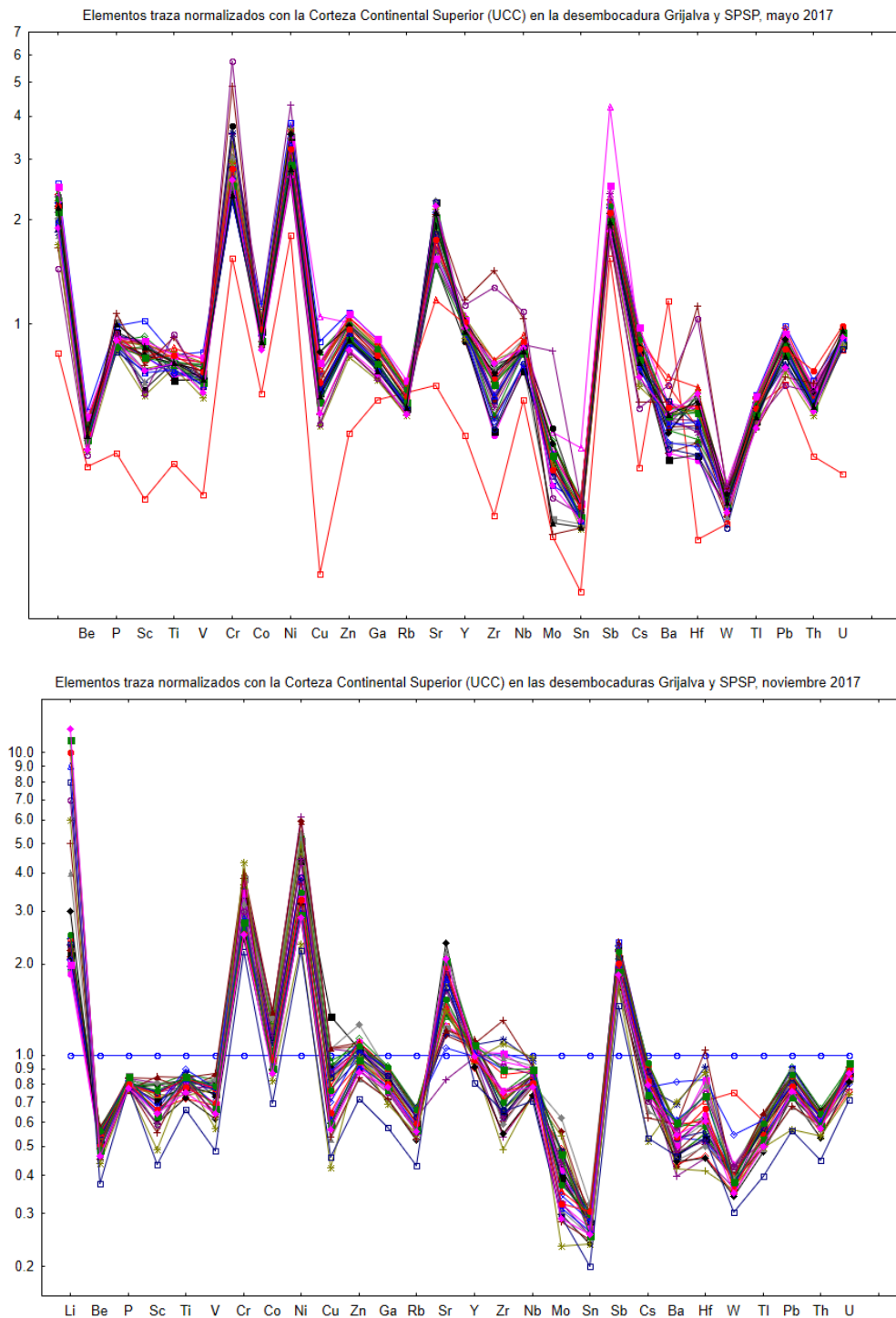


Figura 34. Elementos trazas normalizados con UCC (Corteza continental superior en mayo y noviembre, 2017).

En cuanto a la distribución de los máximos valores, se puede observar que el Cr presenta valores máximos en la desembocadura Grijalva durante las dos temporadas (Figura 35), en mayo se observa en los puntos cercanos a la línea de costa a cada lado de la desembocadura y en el sitio más alejado al noroeste (punto 21), mientras que en noviembre la distribución de sus máximos valores es general hasta aproximadamente los 10 m de profundidad y nuevamente en el sitio 23. En SPSP su distribución es más escasa pero presenta un comportamiento similar que en Grijalva, ubicándose en los sitios próximos a la línea de costa, cabe señalar que aunque se encontró en una menor cantidad de sitios, las concentraciones fueron mayores que en Grijalva.

El Sr presentó valores elevados en Grijalva (Figura 35), durante mayo, en los sitios que forman la pluma del río, mientras que en noviembre la distribución de valores máximos fue hacia el noroeste, en los sitios más profundos y alejados de la línea de costa. En SPSP su distribución fue general en la mayor parte de los puntos durante las dos temporadas. El Zr presentó sus valores más elevados en todos los sitios de la desembocadura SPSP durante las dos temporadas climáticas, mientras que en Grijalva sus valores máximos se encontraron al oeste de la desembocadura, en sitios cercanos a la línea de costa (Figura 35).

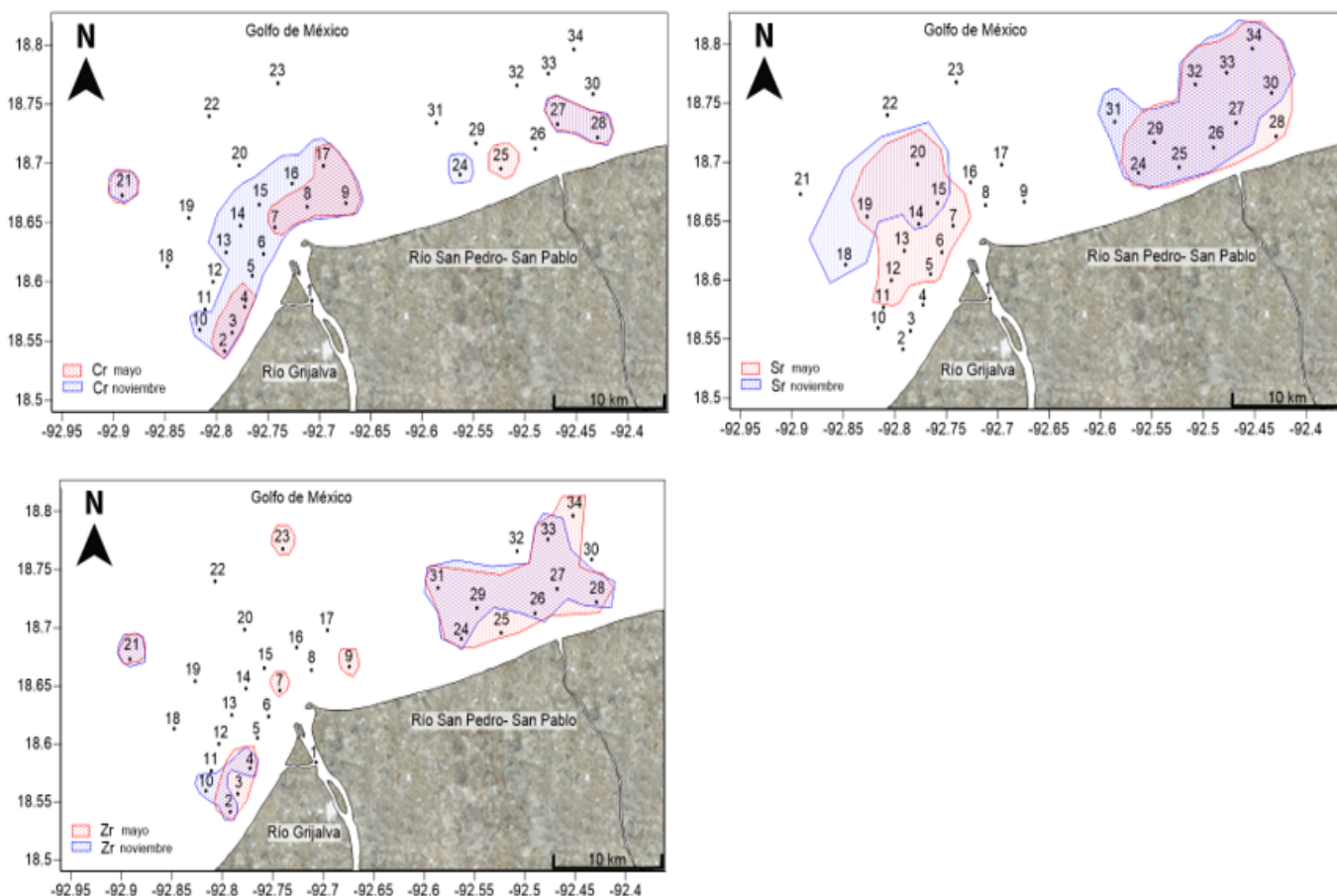


Figura 35. Distribución de Cr, Sr y Zr en las desembocaduras de los ríos durante las dos temporadas.

3.6.1. Elementos geogénicos y antropogénicos

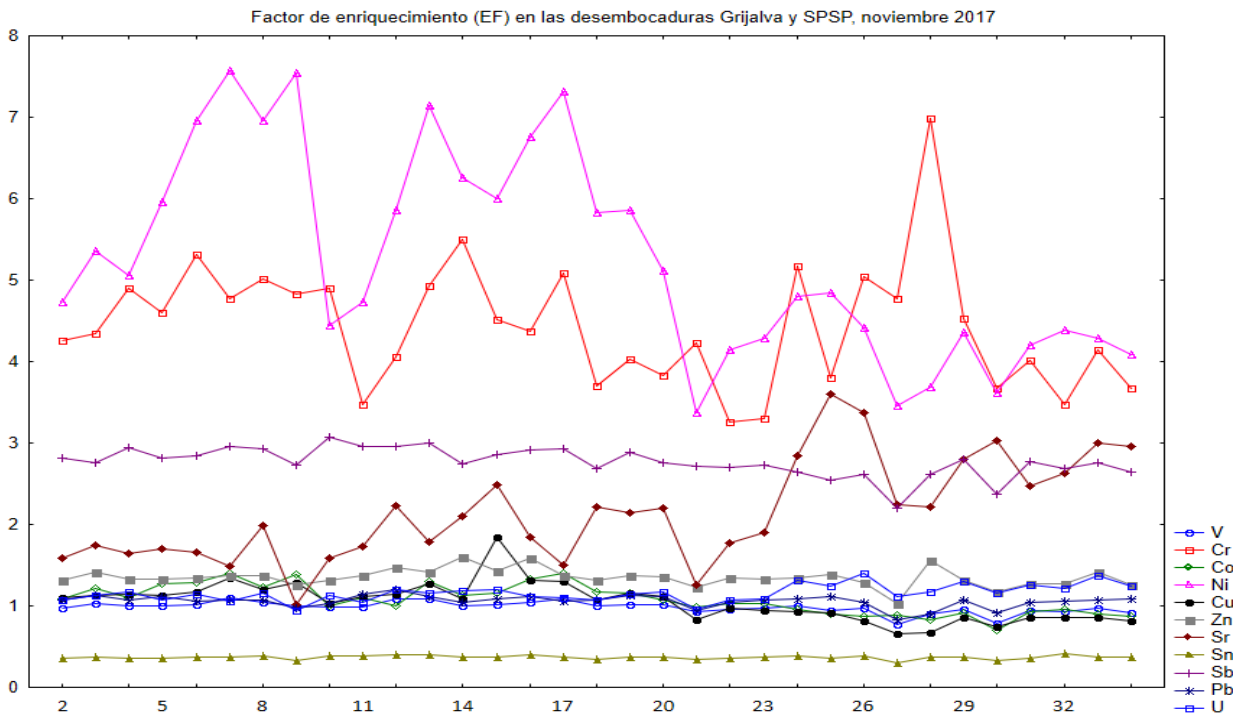
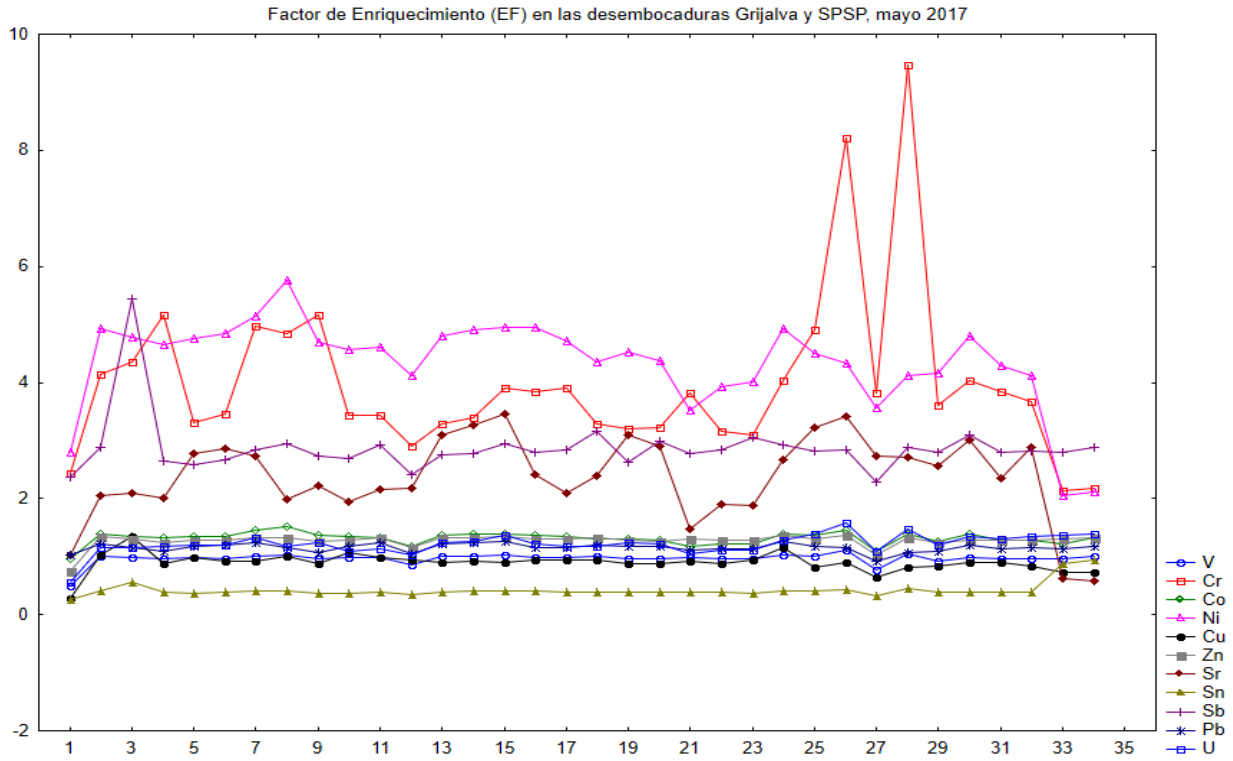
A partir de los datos de elemento traza se calculó el Factor de Enriquecimiento y el Índice de Geoacumulación.

3.6.1.1. Factor de enriquecimiento (EF)

En este estudio se utilizó el contenido de Al_2O_3 debido a que no presentó variaciones significantes y porque los sedimentos de la zona de estudio son detríticos, por lo que se

considera un elemento inmóvil que representa la fracción de arcilla en el sedimento. En la temporada de secas, los valores de EF para Cr, Ni y Sb presentaron enriquecimiento en todos los puntos de muestreo en diferentes niveles (Figura 36 A). Para el Cr, los valores de 8.21 y 9.46 en las estaciones 26 y 28 respectivamente, corresponden a un enriquecimiento moderadamente severo en los puntos más próximos a la desembocadura del Río San Pedro-San Pablo. El enriquecimiento con Ni fue de mínimo a moderado, con valores máximos de 5.13 y 5.76 en las estaciones 7 y 8, cercanas a la desembocadura del Río Grijalva. El Sb presentó enriquecimiento de mínimo a moderado en todos los sitios, con un mayor enriquecimiento en la estación 3, al suroeste de la desembocadura del Grijalva. El Sr presentó enriquecimiento moderado sólo en algunos sitios, con los mayores niveles en la desembocadura del Grijalva.

Durante la temporada de nortes (Figura 36 B) se presentó enriquecimiento de Cr, Ni, Sr y Sb en todos los puntos de muestreo. El Cr tuvo un enriquecimiento moderado en casi todos los sitios y moderadamente severo en la estación 28, al este de la desembocadura del San Pedro-San Pablo, con un EF de 6.99. El enriquecimiento de Ni fue de moderado a moderadamente severo, principalmente en la desembocadura del Grijalva, con valores de 7.54 y 7.57 en la estación 9 y 7 respectivamente. El enriquecimiento de Sr fue mínimo, con valores máximos de 3.60 en la estación 25 al oeste de la desembocadura del San Pedro-San Pablo. El Sb presentó enriquecimiento moderado con valores máximos de 3 y 3.08 en la estación 10 y 13 al este y suroeste de la desembocadura del Grijalva.



Elementos traza

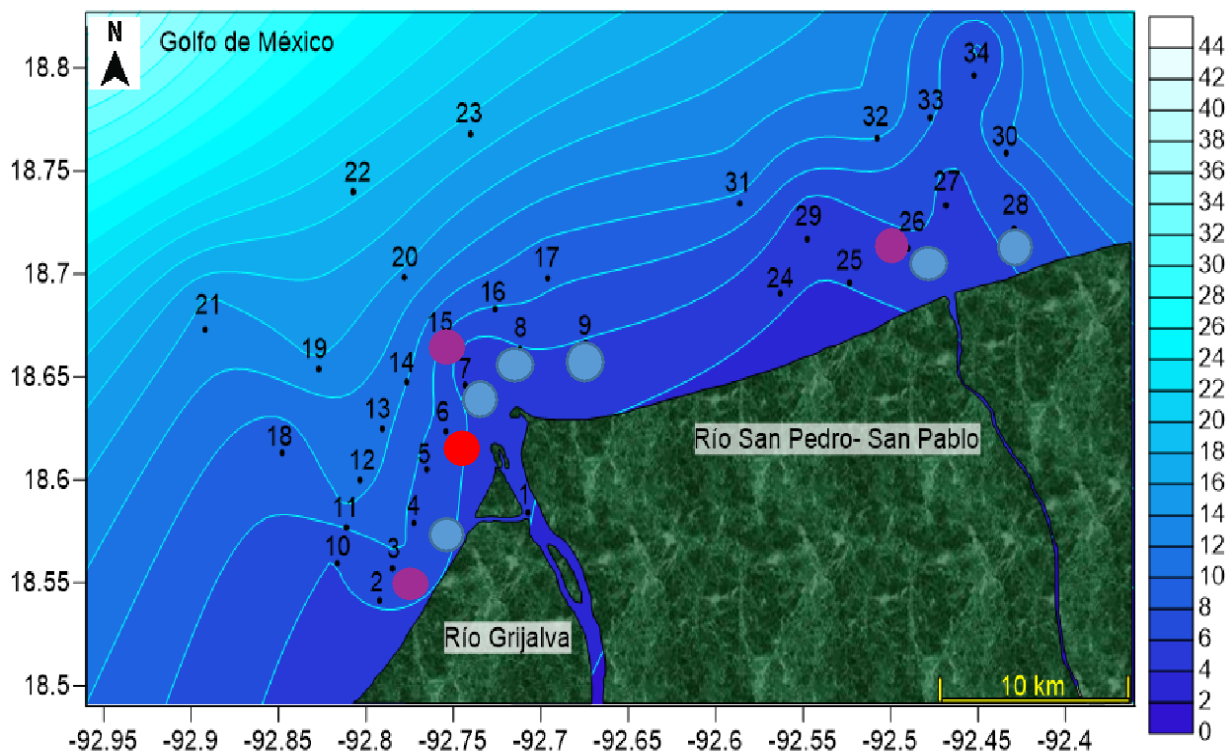


Figura 36. Factor de Enriquecimiento (EF) en las desembocaduras Grijalva y SPSP durante y distribución de los sitios con mayor enriquecimiento.

Celis-Hernández et al. (2017) encontraron valores de no enriquecimiento o enriquecimiento menor para V, Zn, Cr, Ni, Cu, Co, Pb y As en núcleos colectados en la desembocadura del Río Jamapa, Veracruz, mientras que Ramos-Vázquez et al. (2018) también encontraron valores de enriquecimiento <2 de Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, Zn y V en núcleos obtenidos del Golfo de México frente a los Tuxtlas, Veracruz, lo que sugiere la ausencia de metales pesados debido con fuente antropogénica en estos dos sitios.

En el caso de los valores obtenidos en este estudio en la desembocadura de los ríos Grijalva y San Pedro-San Pablo, el mayor enriquecimiento puede ser debido a que son sedimentos únicamente superficiales y en la zona de muestreo existe mayor movilidad y transporte de contaminantes por encontrarse en una zona de influencia del oleaje y corrientes. Además,

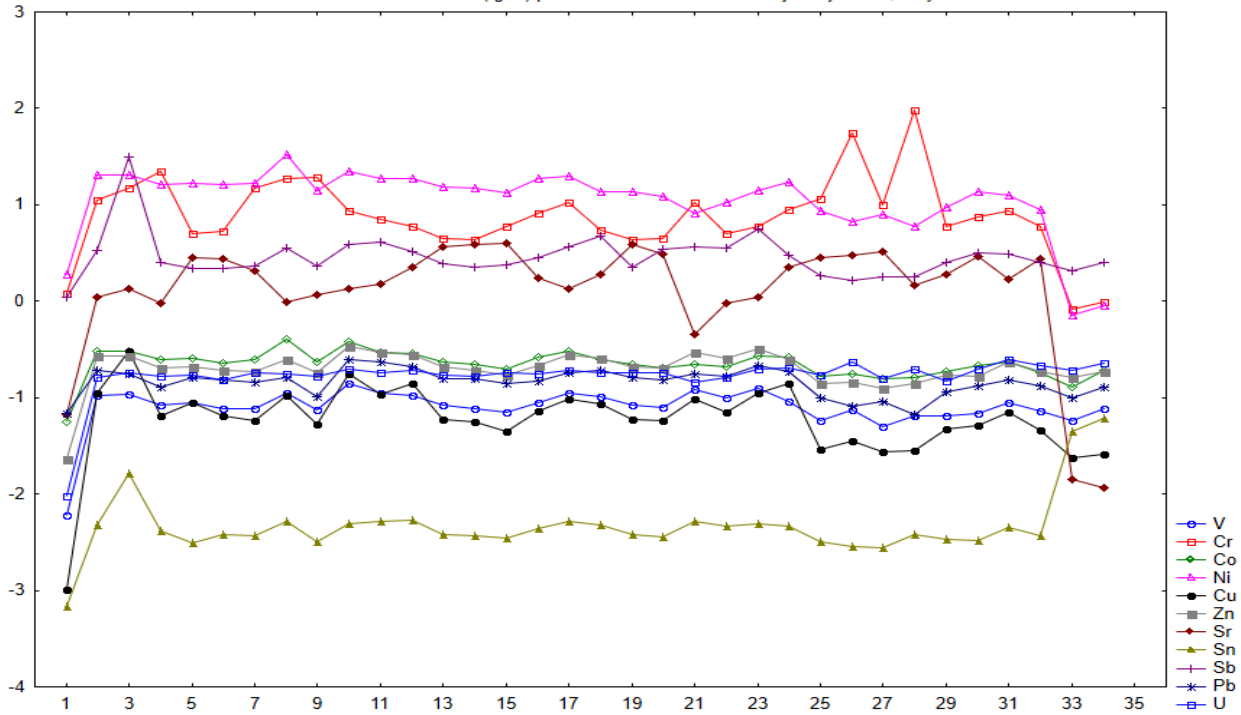
durante la temporada de nortes se observó un mayor enriquecimiento debido a la descarga de los ríos, sobre todo en la desembocadura del Grijalva Usumacinta (Figura 36).

3.6.1.2. Índice de geoacumulación (Igeo)

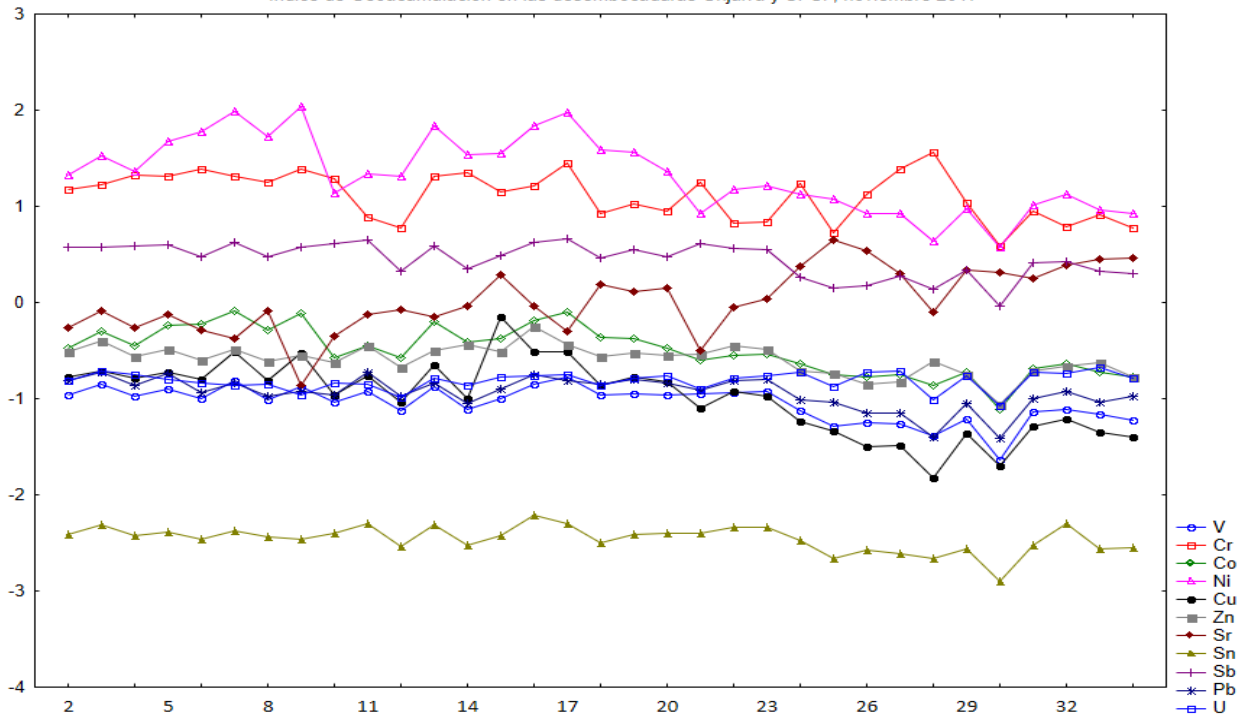
Por otra parte, durante la temporada de secas, Cr, Ni y Sb tuvieron un índice de geoacumulación de 1 a 2 (Figura 37), que implica sedimento moderadamente contaminado por causas antropogénicas, sobre todo en la desembocadura del Grijalva, aunque la mayor parte de los valores son menores a 0, excepto para Ni, que en casi todas las estaciones presentó un índice mayor a 1.

Para la temporada de nortes, sólo Cr y Ni presentaron un índice de geo-acumulación mayor a 1 y un aumento en este índice para casi todas las estaciones (Figura 37), lo que indica una contaminación moderada. De manera general, los mayores niveles de contaminación y en mayor cantidad de sitios se presentó en la desembocadura del Grijalva (Figura 37), esto asociado a la descarga que es mayor que en SPSP durante las dos temporadas.

Índice de Geoacumulación (Igeo) para las desembocaduras Grijalva y SPSP, mayo 2017



Índice de Geoacumulación en las desembocaduras Grijalva y SPSP, noviembre 2017



Elementos trazas

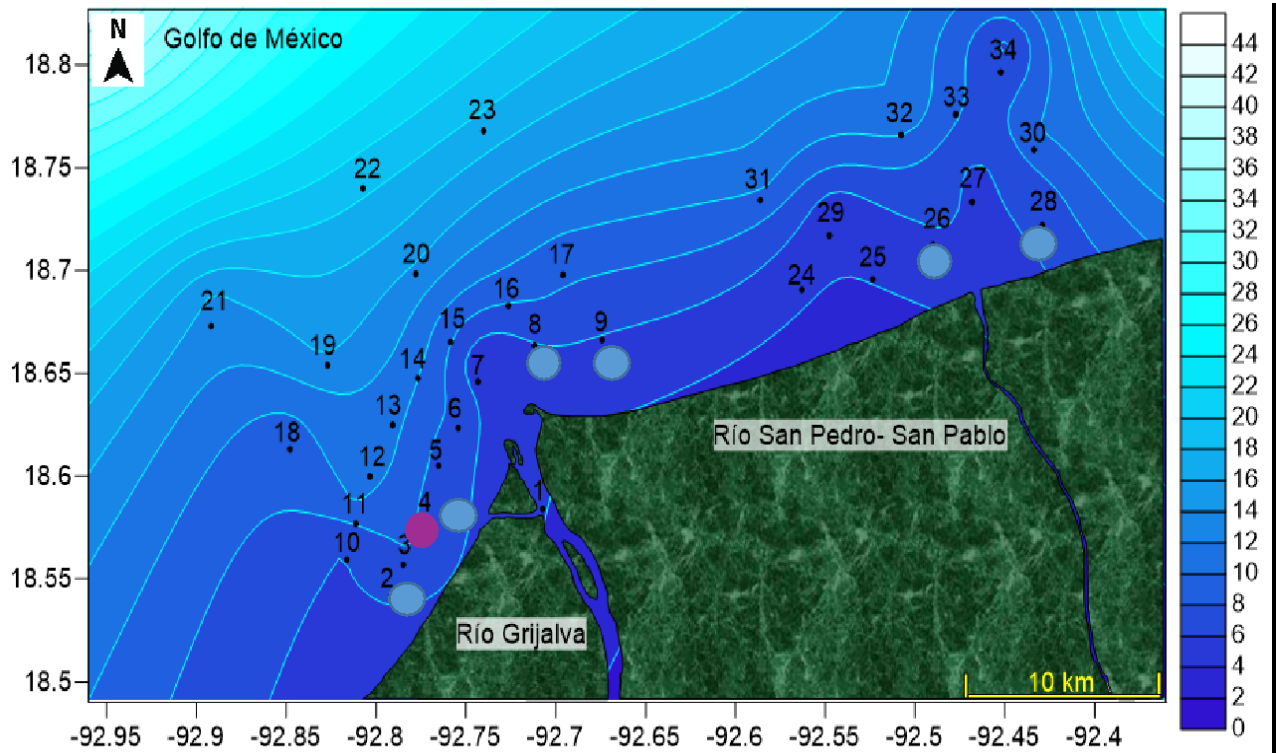


Figura 37. Índice de Geoacumulación (Igeo) en las desembocaduras Grijalva y SPSP y la distribución de contaminantes.



3.6.2. Contaminación por metales pesados y procedencia de sedimentos colectados en el Delta del Río Grijalva, Sur del Golfo de México

Heavy metal contamination and provenance of sediments recovered at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico: *Journal of Earth System Science*, 130, 88.

Martha Patricia Ayala-Pérez, John S. Armstrong-Altrin and Maria Luisa Machain-Castillo.



Heavy metal contamination and provenance of sediments recovered at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico

MARTHA PATRICIA AYALA-PÉREZ¹, JOHN S ARMSTRONG-ALTRIN^{2,*} 
and MARÍA LUISA MACHAIN-CASTILLO² 

¹Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 Mexico City, CDMX, Mexico.

²Unidad de Procesos Oceánicos y Costeros, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 Mexico City, CDMX, Mexico.

*Corresponding author. e-mail: armstrong@cmarl.unam.mx john_arms@yahoo.com

MS received 19 November 2020; revised 5 January 2021; accepted 6 January 2021

This study examines textural characteristics, carbonate, organic carbon and chemical composition of sediment samples recovered in the nearshore region (~3–19 m water depth) at the Grijalva River mouth, southern Gulf of Mexico. The aim of this study is to assess the heavy metal contamination and provenance variations in sediments between the dry and *northers* (rainy) seasons. The proportion of sand, carbonate, and organic carbon contents were abundant at sites located near to the Grijalva River mouth, principally in *northers* season. Silt content is dominant in the dry season, especially in the sites located away from the Grijalva River mouth. The Chemical Index (CIX) values obtained for the dry (~76–84) and *northers* (~75–87) seasons indicated a moderate to high intensity of weathering and a humid climate in the source area. The low K₂O/Al₂O₃ ratio values (<0.5) in the dry and *northers* seasons indicated a higher proportion of aluminosilicates than detrital minerals, due to moderate-to-high intensity of weathering. The correlation among elemental concentrations revealed the association of Cr, Nb, Zr, Hf, Y, and rare earth elements (REE) with detrital minerals rather than aluminosilicates. The major element concentrations, Th/Sc, La/Sc, Co/Th, and Cr/Ni elemental ratios indicated the derivation of sediments from intermediate and mafic igneous rocks. A similarity in the North American Shale Composite (NASC) normalized rare earth element (REE) patterns and Eu anomaly between the dry and *northers* seasons suggested that the variations in sediment input played a less significant role and the provenance of sediments remained constant. The enrichment factor (EF) showed moderate to severe enrichment for Cr, Ni, and Sb (EF = ~2.63–7.57), highest in the *northers* season, especially at the Grijalva River mouth, although the index of geo-accumulation (I_{geo}) for these elements suggested as moderately polluted (I_{geo} = 0.34–2.0). The slightly elevated EF values for Cr, Ni, and Sb during *northers* season were probably due to an increase in sediment discharge into the sea during the *northers* season. We inferred that the enrichment of Cr, Ni, and Sb in sediments was due to both lithogenic and anthropogenic origins. The sediments were influenced by the intermediate and basic igneous rocks of the Chiapas Massif Complex, and the waste generated by the urban areas located within the Grijalva River drainage basin.

Keywords. Contamination; enrichment factor; geochemistry; sediment texture; nearshore; Grijalva.

1. Introduction

Urbanization and industrialization of coastal areas in the last decade have increased the stress of the people living in the coastal and marine environments. Land-use changes due to settlements, agriculture, cattle raising, oil and mining industries increase erosion and associated heavy metal contaminants carried by the rivers, that ultimately discharge into the marine environment (El-Baz and Khalil 2018; Świercz and Zajęcka 2018; Maftai *et al.* 2019). These contaminants incorporated into the marine sediments could pose toxic effects in the local biota, therefore, it is important to determine the concentration of heavy metals in sediments and to assess their level of toxicity for the biota and marine sediments (Kurt 2018; Alexandrowicz 2019; Celis-Hernández *et al.* 2020; Wang *et al.* 2020).

The major and trace element concentrations of terrigenous sediments are useful to infer the provenance and intensity of weathering in the source area (Cullers 2000; Bansal *et al.* 2018; Greggio *et al.* 2018; Hu *et al.* 2019; Al-Kaaby and Albadran 2020; Armstrong-Altrin *et al.* 2020). The immobile elements like Al_2O_3 , TiO_2 , Th, Zr, Co, Nb, Sc and REE are the best indicators of parent rocks, which is due to their low mobility during transport and short residence time in seawater (Wang *et al.* 2018, 2019a, b; Men *et al.* 2019; Chaudhuri *et al.* 2020). Also, REE has a little geochemical fractionating during weathering, and Eu anomaly can provide information regarding the type of source rocks (Tapia-Fernandez *et al.* 2017; Carranza-Edwards *et al.* 2019; Madhavaraju *et al.* 2019; Balaram 2020).

Heavy metal concentrations in beach sediments were analyzed in various studies around the world and these studies utilized techniques like enrichment factor (EF) and geochemical index (I_{geo}) to assess the contamination degree (El-Baz and Khalil 2018; Lazo *et al.* 2018; Varga *et al.* 2018; Damian *et al.* 2019; Horasan and Arik 2019). In the Gulf of Mexico, the coastal processes like littoral currents, eddies, tidal, and wind directions were addressed by various researchers (Monreal-Gómez *et al.* 1992; Salas de León *et al.* 2004, 2005; Salas-Pérez *et al.* 2008; Expósito-Díaz *et al.* 2009). Similarly, trace element concentrations in the coastal and near-shore sediments from the southern Gulf of Mexico (sGOM) were studied by various authors, particularly their historical trends and heavy metal contamination (Ruiz-Fernández *et al.* 2012, 2019;

Rosales-Hoz *et al.* 2015; Celis-Hernández *et al.* 2017; Machain-Castillo *et al.* 2020). As, Ba and Cu have been found to exceed threshold effect level and Cd, Cr, and Ni probable effect level benchmarks in the sGOM (Machain-Castillo *et al.* 2019). Machain-Castillo *et al.* (2020) documented that the Grijalva River is an important contributor of heavy metals, pesticides, and hydrocarbons to the SW Gulf of Mexico.

Other studies investigated the provenance of coastal and deep sea sediments of the Gulf of Mexico based on the mineralogy, textural, and geochemistry data (Kasper-Zubillaga *et al.* 1999; Carranza-Edwards *et al.* 2015; Armstrong-Altrin and Machain-Castillo 2016; Ramos-Vázquez *et al.* 2017; Tapia-Fernandez *et al.* 2017; Anaya-Gregorio *et al.* 2018; Armstrong-Altrin *et al.* 2018, 2019, 2020; Ramos-Vázquez and Armstrong-Altrin 2019; Machain-Castillo *et al.* 2020).

The above-mentioned studies were concentrated within or far away from the coastline, where the sediment deposition and mixing processes are different from the nearshore environment. Nevertheless, knowledge on nearshore sediments is important, because it covers the river discharge area as well as the characteristics of the catchment area. In fact, the provenance and heavy metal contamination of sediments in the shallow water depth or nearshore environment in the Gulf of Mexico were less investigated. Hence, to fulfill this gap, this study examines the geochemistry of sediments recovered in the nearshore environment during the dry and *northers* seasons in front of the Grijalva River mouth, sGOM. The aim of this study is to investigate the status of heavy metal contamination in sediments in the Grijalva River discharge area and to recognize its hazard to the marine environment and biota. In addition, based on the geochemistry data, we investigated the intensity of weathering and provenance of sediments.

2. Study area

The study area is part of the Grijalva–Usumacinta River system (GURS), which is considered as the longest river in Mexico, its drainage basin consists of 85,553 km² (Day *et al.* 2003). The Grijalva River (1521 km length) originates from the northwestern Guatemala and Chiapas State, Mexico and discharges into the sGOM, Tabasco State. The annual

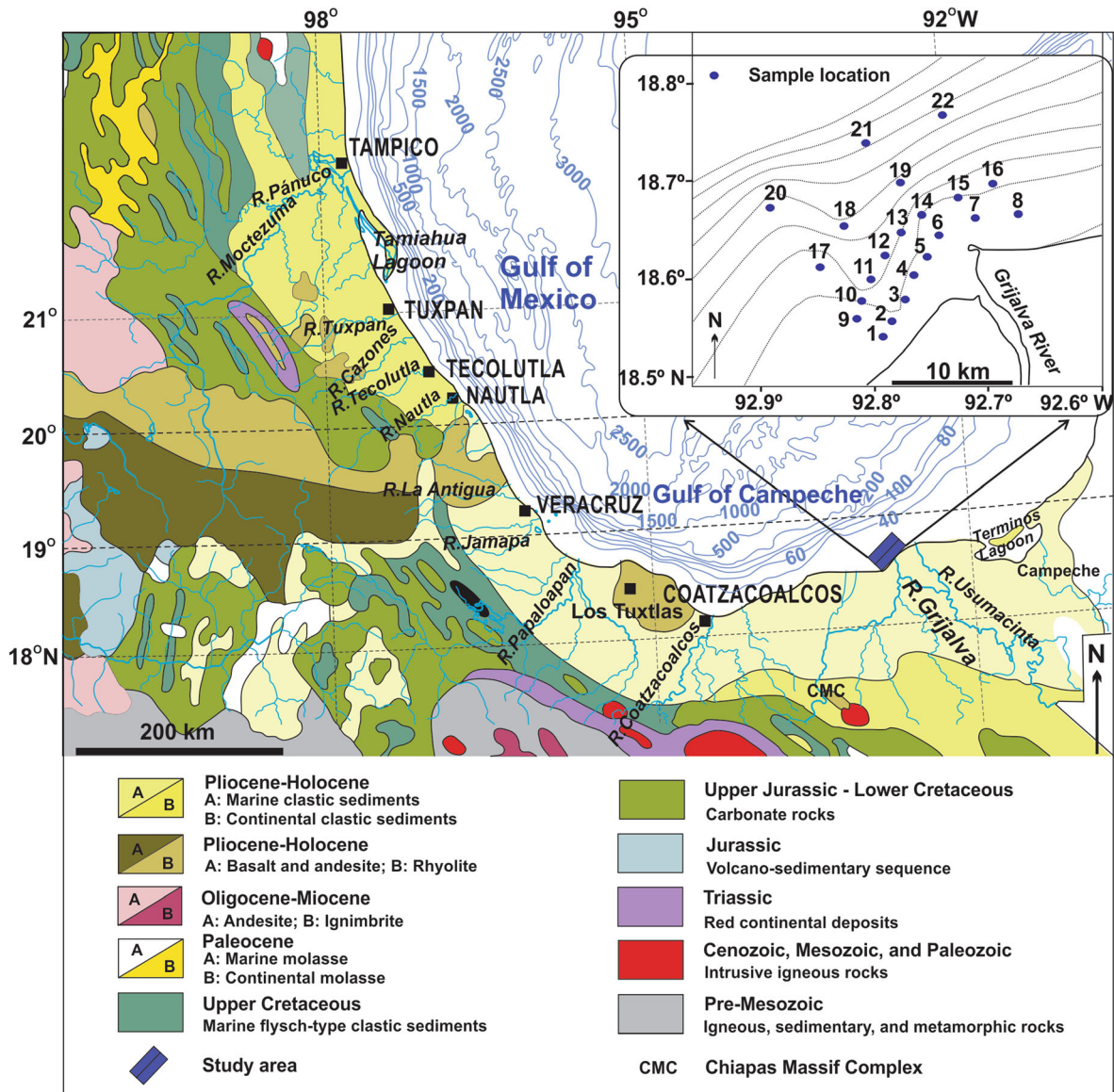


Figure 1. Map showing the sample locations in the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico (source: Carta Geológica; scale 1:1,000,000; map modified after Armstrong-Altrin 2015).

water discharge of GURS fluvial system in the Gulf of Mexico is $\sim 2678 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (Hudson *et al.* 2005).

The samples were collected in the nearshore zone at the Grijalva River mouth, in the sGOM, Tabasco State, within the physiographic province of the Bay of Campeche (figure 1; $92^{\circ}41' - 92^{\circ}27' \text{ W}$ longitude and $18^{\circ}36' - 18^{\circ}39' \text{ N}$ latitude). The Grijalva River is joined at its lower course with an arm of the Usumacinta River with a length of approximately 40 km from where the Usumacinta changes its course to join with the Grijalva River with a flow of $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ortiz-Pérez 1992). The development of industry along the GURS basin has propitiated the availability of metals, pesticides

and hydrocarbons in the nearshore environment (Rosales-Hoz *et al.* 2015).

2.1 Climate

The climate is warm and humid with an average annual temperature above 26°C (García and Vidal 1990). Rainfall is almost throughout the year, but it is more abundant in summer and fall seasons. The average annual precipitation is 2000 mm and occasionally it is $>3000 \text{ mm/year}$ (Yáñez-Arancibia *et al.* 2009). The prevailing winds are east-northeast direction, with an average speed of 4–6 m/s and they are influenced by *northers*, which are cold air masses from the

north, in addition to tropical storms and hurricanes. The *northers* generate winds of greater intensity during autumn and winter and they have high speed with high wind stress (>20 m/s) and last for 1–3 days (Salas de León *et al.* 1992) accompanied by heavy rain in the region. The waves are intermediate to low energy, between 1.4 and 2.3 m in height, except during the *northers*, tropical storms and hurricanes, where they reach 4.5 m in height. The surface circulation is east–west direction with 14 cm/sec in summer and 6–8 cm/s in winter and circulation may change west–east depends on the *northers* wind (Yáñez-Arancibia *et al.* 2009).

2.2 Lithology

The study area is part of the southern Gulf of Mexico coastal plain with fluvial-lacustrine sediments with Quaternary calcareous rocks (Rodríguez *et al.* 2010; Hernández-Hinojosa *et al.* 2018; Verma *et al.* 2019). The southern region consists of folds and faults from the Chiapas belt (Sierra de Chiapas), with exposures of carbonate (late Jurassic and Paleogene), metamorphic (Paleozoic), extrusive igneous (andesites and dacites), pyroclasts and sedimentary rocks (shale and sandstone) of the Cretaceous to Quaternary period (Schaaf *et al.* 2005; Armstrong-Altrin 2020). These exposures were deformed by folding during the Late Miocene. The Chiapas Massif contributed sediments to the coastal plain during the Pliocene and Pleistocene, also tectonic activity formed a fault system with variable displacement that affects the morphology of valleys and rivers (Verma *et al.* 2019).

3. Material and methods

A total of 44 surface sediment samples were recovered during the dry (number of samples $n = 22$; May 2017) and *northers* ($n = 22$; November 2017) seasons (figure 1). The samples were collected at water depth ~ 3 –19 m, in the nearshore zone, varying from 5 to 15 km away from the coastline (figure 1; table 1). The sediment samples were collected in the same site during dry and *northers* seasons, the sites were located by GPS.

The sediments were dried at 60°C for 48 hr in an H-62 oven and particle size was determined with the Coulter model LS-230 laser diffraction analyzer. Dried samples for geochemical analysis

Table 1. Location of surface sediment samples retrieved at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico.

Site	Latitude N	Longitude W	Water depth (m)
1	18°34'26.16"	92°41'6.00"	9.1
2	18°32'30.89"	92°45'46.04"	8.2
3	18°33'22.20"	92°45'9.92"	7.3
4	18°34'25.19"	92°44'34.86"	7.3
5	18°35'39.79"	92°44'7.24"	7.3
6	18°36'29.34"	92°43'27.18"	3.7
7	18°37'40.38"	92°42'44.63"	7.3
8	18°38'22.62"	92°41'6.63"	6.4
9	18°38'24.78"	92°39'6.00"	6.0
10	18°33'29.77"	92°46'54.90"	10.1
11	18°34'21.40"	92°46'35.98"	11.0
12	18°35'29.15"	92°46'2.37"	11.0
13	18°36'44.76"	92°45'23.97"	11.0
14	18°37'47.51"	92°44'35.76"	9.1
15	18°38'45.83"	92°43'31.70"	9.1
16	18°39'22.04"	92°41'88.92"	9.1
17	18°40'4.62"	92°40'13.08"	9.0
18	18°36'15.25"	92°48'25.22"	14.6
19	18°38'13.25"	92°47'9.05"	14.6
20	18°40'16.63"	92°44'27.61"	13.7
21	18°39'24.82"	92°50'29.68"	19.2
22	18°42'26.58"	92°45'52.30"	18.3

were ground to a fine flour consistency in an 8000 SPEX MIXER/MILL with an agate vial. Organic carbon content was determined by exothermic oxidation of the organic matter with H_2SO_4 and K_2CrO_7 , titrated with $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, then H_3PO_4 was added to avoid interference. This procedure differentiates humic matter from other inorganic carbon sources (Gaudette *et al.* 1974). Carbonates (CO_3) were determined by titration with HCl, in which excess HCl that did not react with the carbonate was reverse titrated with NaOH (Loring and Rantala 1992). Both analyses were made in duplicate and variation coefficients were in a range of 1.94–3.7% ($n = 10$).

Major elements were determined using a Siemens SRS 3000 XRF spectrometer with AGV-1 standard with a precision of 100 ± 2 for all oxides and the loss-on-ignition (LOI) was obtained by heating the sediment in a muffle at 800–900°C for 6 hrs and 0.4 g of sediment was mixed with 5 g of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$: LiBO_2 to form tablets that were analyzed in XRF. Trace elements were determined in 0.05 g of each sample by the inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) with sensitivity in the range of 3000 cps/ $\mu\text{g g}^{-1}$, and precision $<1.5\%$. The elements were normalized with the average

upper continental crust value (UCC; Taylor and McLennan 1985).

The geochemistry data were interpreted by employing geochemical indices such as enrichment factor (EF) and geo-accumulation index (I_{geo}). Vanadium (V), chromium (Cr), cobalt (Co), nickel (Ni), copper (Cu), zinc (Zn), strontium (Sr), tin (Sn), antimony (Sb), and lead (Pb) are considered as toxic elements and are easily mobilized by human activity, hence are widely utilized to infer pollutants (Bessa *et al.* 2020; Cusack *et al.* 2020).

The EF is a geochemical index to infer the degree of heavy metal contamination in sediments, which is used widely in various studies to discriminate natural and anthropogenic sources (Birth 2003; Celis-Hernández *et al.* 2017; Ramos-Vázquez *et al.* 2018). In general, to calculate EF, Fe_2O_3 or Al_2O_3 can be used as a reference conservative element for data normalization. In this work, Al_2O_3 content was used as a reference for normalization, because Al_2O_3 is considered as an immobile element, which represents the clay fraction in sediment and it did not present significant variation (Lazo *et al.* 2018). The enrichment factor can be calculated by an equation: $EF = (X/Al)_{sample} / (X/Al)_{UCC}$, where $(X/Al)_{sample}$ is the analyzed metal and Al content in sediments of this study. In $(X/Al)_{UCC}$, X is the value of analyzed metal concentration and Al represents the average UCC value of (Taylor and McLennan 1985). EF values are classified as: 1–2 = no enrichment, 2–3 = minimal enrichment, 3–5 = moderate enrichment, 5–10 = moderately severe enrichment, 10–25 = severe enrichment, 25–50 = very severe enrichment, and >50 = extremely severe enrichment (Birth 2003).

The I_{geo} is another method to estimate the anthropogenic contribution of heavy metals in sediment (Müller 1969). It can be calculated by an equation: $I_{geo} = \text{Log}_2 (C_n / 1.5 \times B_n)$ where C_n is the measured concentration of metal in sediment sample, 1.5 is a factor that considers possible variability generated by lithological variations and B_n represents the geochemical concentration of the reference element, UCC values were used for normalization (Taylor and McLennan 1985). The I_{geo} consists of seven categories: <0 uncontaminated, 0–1 uncontaminated to moderately contaminated, 1–2 moderately contaminated, 2–3 moderately to highly contaminated, 3–4 highly contaminated, 4–5 highly to extremely contaminated, and 5–6 extremely contaminated (Müller 1969).

4. Results

4.1 Sediment texture

Silt content is dominant and the average silt content varies between 75% and 85% in the dry and *northers* seasons, respectively (table 2). During dry season, highest percentage of silt is identified at sites 6 and 14 (84.9% and 84.4%, respectively), while during *northers* season, high silt content is recorded at sites 9 and 13 (81.6% and 81.4%, respectively). Highest percentage of clay content is identified at sites 9 (24.7%) and 22 (24.5%) in dry season, whereas during *northers* season, clay content is high at site 2 (25.9%). Sand content recorded is very low, which varies between 0% and 0.4%. Highest percentage of sand during dry season is recorded at site 8 (4.2%), whereas during *northers* season, it is maximum at site 5 (3.6%). However, sand contents recorded in other sites are <1%. Texturally, the sediments are classified as silt, except two samples, which are classified as clayey silt (figure 2).

4.2 Carbonate and organic carbon contents

The average total carbonate content varies between 15.5–28.4% and 11.8–24.7% in the dry and *northers* seasons, respectively (table 2). During dry season, highest carbonate content is recorded at sites 14 and 18, located in front of the river mouth (28 and 28.4%, respectively). Similarly, during *northers* season carbonate content is high at sites 13 (22.8%) and 14 (24.7%), located in front of the river mouth. The variation in average organic carbon content with respect to the dry and *northers* seasons is not significant (table 2). During dry season, highest organic carbon content (1.8%) is observed at site 13, while in *northers* season it is high at site 6 (2.2%).

4.3 Major element concentrations

The major element concentrations are listed in table 3. SiO_2 and CaO contents are high during *northers* season. Al_2O_3 recorded the highest value during the *northers* season at sites located away from the river mouth. MgO, Na_2O , and K_2O contents are higher during dry season relative to the *northers* season.

The correlation of SiO_2 against Fe_2O_3 , MgO, and CaO in the dry ($r = 0.09$, $r = 0.02$, and $r = -0.46$,

Table 2. Mean grain size (M_z), sand, silt, clay, CaCO_3 , and organic carbon contents (wt.%) in surface sediments (dry and northers seasons) retrieved at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico.

Dry season												
Site no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
M_z	2.1	6.7	6.9	6.9	7.0	6.9	6.2	6.3	5.9	7.1	6.6	7.0
Sand	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	4.2	0.0	0.6	0.0	0.0
Silt	80.8	80.6	80.7	81.2	82.1	84.9	81.4	83.4	75.3	81.7	79.4	81.3
Clay	19.3	19.5	19.3	18.8	17.8	13.1	16.6	12.4	24.7	17.6	20.6	18.7
CaCO_3	19.8	21.2	22.7	27.4	25.8	25.0	21.9	23.7	21.6	21.8	24.9	26.3
Organic carbon	1.6	1.6	1.6	1.6	1.4	1.3	1.3	0.8	1.4	1.2	1.4	1.6

Dry season											
Site no.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Mean ($n = 22$)
M_z	7.0	7.0	6.7	6.7	6.7	7.1	7.0	6.8	6.8	7.1	6.6 ± 1.04
Sand	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4 ± 1.03
Silt	80.7	84.4	81.8	80.9	77.7	83.3	80.4	77.7	79.0	75.5	80.7 ± 2.5
Clay	19.3	15.6	18.1	19.2	22.3	16.7	19.6	22.3	21.0	24.5	19.0 ± 1.8
CaCO_3	27.7	28.0	23.0	23.7	22.9	28.4	25.8	15.5	19.5	20.1	23.5 ± 3.2
Organic carbon	1.8	0.8	1.4	1.3	1.4	1.6	1.5	1.1	1.2	1.6	1.4 ± 0.26

Northers season												
Site no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
M_z	6.5	7.0	6.7	6.7	6.0	6.8	6.7	6.8	6.5	6.9	6.5	6.8
Sand	0.9	0.0	0.2	0.0	3.6	0.1	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0
Silt	77.5	74.1	80.8	76.4	80.7	78.6	79.4	77.0	81.6	79.3	78.8	78.3
Clay	21.6	25.9	19.0	23.6	15.7	21.3	20.6	22.9	18.4	20.6	21.2	21.7
CaCO_3	17.3	20.0	18.5	20.9	20.4	21.6	22.7	17.6	16.9	18.4	21.5	20.9
Organic carbon	1.8	1.6	2.2	1.7	1.9	2.2	0.5	1.4	1.2	1.6	0.9	1.7

Northers season											
Site no.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Mean ($n = 22$)
M_z	6.9	6.8	7.1	6.8	7.0	6.3	7.0	7.0	6.4	6.7	6.70 ± 0.27
Sand	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	2.3	0.0	0.0	0.4 ± 0.9
Silt	81.4	80.7	79.2	79.1	77.0	80.1	78.6	79.5	77.1	76.2	78.7 ± 1.9
Clay	18.3	19.2	20.8	20.9	23.0	19.8	21.4	18.2	22.9	23.8	20.9 ± 1.4
CaCO_3	22.8	24.7	22.3	19.9	22.7	22.3	21.4	11.8	18.6	19.4	20.1 ± 2.8
Organic carbon	1.2	1.5	1.9	1.7	2.0	1.2	1.9	0.9	1.1	1.2	1.5 ± 0.5

respectively; $n = 22$) and *northers* ($r = -0.81$, $r = -0.77$, and $r = -0.82$, respectively; $n = 22$) seasons are not significant, while the correlation between Al_2O_3 and Fe_2O_3 is significant in the dry ($r = 0.12$) and *northers* ($r = 0.8$; $n = 22$) seasons. A negative correlation is observed between Al_2O_3 and CaO in the dry ($r = -0.06$) and *northers* ($r = -0.03$; $n = 22$). However, CaO exhibits a positive correlation with CaO_3 during dry ($r = 0.34$) and *northers* ($r = 0.97$; $n = 22$) seasons. On the geochemical classification diagram, the *northers* and dry season sediments are classified as Fe-shale and shale types (figure 3; Herron 1988).

The UCC normalized major element concentrations for the dry and *northers* seasons are shown in figure 4. The TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , and P_2O_5 contents in sediments are slightly higher than in UCC. However, the major element concentrations are similar between dry and *northers* seasons, except an enrichment in MgO content in few samples, which belongs to dry season. The samples enriched in MgO content are depleted in CaO content relative to UCC. An enrichment in MgO content is probably due to the higher input of detritus derived from mafic rocks (Garver *et al.* 1996).

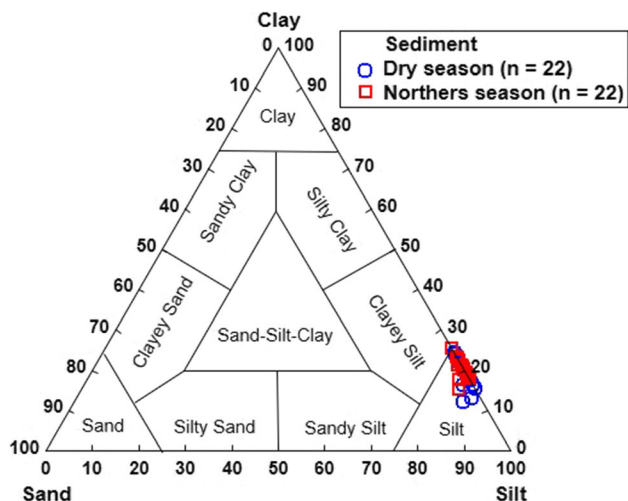


Figure 2. Sand-silt-clay ternary diagram for the sediments retrieved in the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico (modified after Shepard 1954).

4.4 Trace element concentrations

The trace element concentrations of sediments recovered during the dry and *northers* seasons are listed in table 4. The UCC normalized trace element concentrations are similar between the dry and *northers* seasons (figure 5). In comparison with average UCC, the large ion lithophile elements such as Ba, Rb, and Th are depleted, probably due to their high mobility during weathering. The transition trace elements like Cr and Ni are enriched relative to UCC. This enrichment may indicate the derivation of sediments from intermediate and mafic source rocks. Similarly, the high field trace elements like Nb, Hf and Y are depleted relative to UCC, except an enrichment in Zr content in few samples may suggest the abundance of zircon.

A positive correlation obtained between Al_2O_3 and Co, Rb, V, and Zn for the dry ($r = 0.47, 0.64, 0.73, \text{ and } 0.78$, respectively; $n = 22$) and *northers* ($r = 0.28, 0.35, 0.62, \text{ and } 0.33$, respectively; $n = 22$) seasons is observed. On the other hand, a negative correlation is observed for Al_2O_3 against Ba, Cr, Nb, Zr, and Y for the dry ($r = 0.16, -0.44, -0.04, -0.26, \text{ and } 0.01$, respectively; $n = 22$) and *northers* seasons ($r = -0.37, -0.35, -0.40, -0.57, \text{ and } -0.12$, respectively; $n = 22$). In addition, K_2O vs. Rb and Ba for the dry ($r = 0.63 \text{ and } 0.55$, respectively) and *northers* ($r = 0.60 \text{ and } 0.61$, respectively) seasons reveal a positive correlation. Similarly, significant positive correlation is observed for Zr against Hf ($r = 0.99$) for the *northers* season.

The REE concentrations for the dry and *northers* seasons are also listed in table 4 and the North American Shale Composite (NASC) normalized patterns are shown in figure 6. The $\sum REE$ contents in sediments from the dry and *northers* seasons are varying from ~ 107 to 129 (119 ± 7) and ~ 108 to 132 (123 ± 6.4), respectively (table 4). The variation in the average HREE content between the dry (13.7 ± 0.8) and *northers* (14.7 ± 0.7) seasons are not significant. However, LREE content in *northers* season (123.1 ± 6.4) is slightly elevated than in the dry season (104.1 ± 6.36). The NASC normalized REE patterns for the dry and *northers* seasons are homogeneous and characterized by elevated middle REE. The Eu anomalies in the dry and *northers* are near positive ($Eu/Eu^* = \sim 1$), varying from ~ 0.98 to 1.0 and ~ 0.97 to 1.03, respectively, indicating the influence of intermediate and mafic source rocks.

The correlation between $\sum REE$ and Al_2O_3 is negative for the dry ($r = -0.09$) and *northers* ($r = -0.02$) seasons, whereas, it is positive against TiO_2 ($r = 0.60$ and 0.55 , respectively) and Zr ($r = 0.71$ and 0.67 , respectively). Similarly, correlation values observed for $\sum REE$ vs. Fe_2O_3 and P_2O_5 for the dry ($r = 0.29$ and -0.35 , respectively) and *northers* ($r = -0.29$ and -0.48 , respectively) seasons are not significant.

4.5 Enrichment factor

During dry season, the EF values for Cr, Ni, Sr, and Sb are slightly elevated in all sites (table 5). EF values of Ni are minimal to moderate, with high values at sites 6 (5.13) and 7 (5.76), located at the river mouth. The EF values of Sb are varying from minimal to moderate enrichment, with an enrichment at site 2 (>5). Sr shows moderate enrichment at few sites, with the highest EF value in site 14 (3.45) located in front of the river mouth.

In *northers* season, Cr, Ni, Sr, and Sb show enrichment at all sites. Cr reveals a moderate enrichment in most of the sites. Ni reveals a moderate to moderately severe enrichment at sites 6 (EF = 7.57) and 8 (EF = 7.54), located at the Grijalva River mouth. Sr enrichment was minimal, with maximum EF value at site 14 (EF = 2.49) in the river mouth. In the *northers* season, the EF value of Sb suggested moderate enrichment, except at sites 9 (EF = 3.08) and 12 (EF = 3.00), which are located at the western side of the river mouth.

Table 3. Major element concentrations (wt.%) in surface sediments (dry and northers seasons) retrieved at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico.

Site no.	Dry season											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	39.36	45.11	43.29	36.67	37.34	41.02	42.52	43.93	40.82	39.64	43.52	34.20
TiO ₂	0.56	0.62	0.59	0.56	0.55	0.54	0.59	0.60	0.59	0.60	0.64	0.50
Al ₂ O ₃	11.44	11.82	11.29	11.18	10.86	10.33	11.39	10.75	12.72	11.92	13.41	10.82
Fe ₂ O ₃ *	5.32	5.01	5.08	5.13	5.03	4.71	5.30	4.82	5.80	5.37	5.98	4.93
MnO	0.10	0.08	0.09	0.11	0.09	0.10	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.10
MgO	10.94	3.13	12.11	4.07	3.85	3.81	11.69	3.97	11.45	3.77	14.77	3.87
CaO	3.96	7.62	4.06	14.55	13.16	13.23	4.40	12.87	4.20	11.75	4.34	14.64
Na ₂ O	2.45	1.77	1.48	1.45	1.66	1.16	1.31	1.20	1.91	2.06	1.96	2.14
K ₂ O	0.95	1.58	1.09	0.67	0.74	0.94	1.09	1.13	1.02	1.06	1.17	0.69
P ₂ O ₅	0.46	0.36	0.47	0.57	0.47	0.50	0.45	0.51	0.45	0.47	0.54	0.53
LOI	23.52	22.48	19.95	24.87	26.15	21.74	20.96	19.81	20.38	22.26	17.23	26.90
Sum	99.07	99.58	99.50	99.83	99.91	98.07	99.78	99.67	99.45	99.01	103.7	99.32
CIX	77.1	77.9	81.5	84.1	81.9	83.1	82.6	82.2	81.3	79.3	81.1	79.3
ICV	2.12	1.68	2.17	2.37	2.31	2.37	2.15	2.30	1.97	2.07	2.16	2.48
K ₂ O/Na ₂ O	0.39	0.89	0.74	0.47	0.44	0.81	0.83	0.94	0.53	0.52	0.59	0.32
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.29	0.26	0.26	0.30	0.29	0.25	0.27	0.24	0.31	0.30	0.31	0.32

Site no	Dry season										
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Mean (n = 22)
SiO ₂	33.73	37.09	39.54	41.72	38.47	35.58	36.02	42.80	41.15	42.54	39.8 ± 3.3
TiO ₂	0.50	0.51	0.57	0.63	0.57	0.54	0.54	0.62	0.57	0.59	0.57 ± 0.04
Al ₂ O ₃	10.45	10.01	11.10	11.84	11.49	11.08	11.07	12.17	11.78	12.58	11.4 ± 0.81
Fe ₂ O ₃ *	1.87	4.51	5.05	5.23	5.04	5.08	5.00	5.56	5.12	5.64	5.02 ± 0.78
MnO	0.10	0.08	0.09	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.10	0.09	0.09 ± 0.01
MgO	3.81	15.34	3.98	11.87	3.80	3.88	3.78	4.13	3.71	3.78	6.61 ± 4.29
CaO	15.04	3.60	13.06	3.87	11.93	15.29	14.61	12.52	10.00	10.73	9.97 ± 4.48
Na ₂ O	1.72	1.34	1.62	1.42	2.03	2.05	1.83	2.19	2.51	2.06	1.79 ± 0.39
K ₂ O	0.72	0.81	0.97	1.70	0.95	0.79	0.74	1.09	1.19	1.25	1.01 ± 0.27
P ₂ O ₅	0.56	0.59	0.48	0.47	0.46	0.56	0.54	0.54	0.42	0.44	0.49 ± 0.06
LOI	26.40	24.31	23.26	20.23	24.18	24.68	25.80	19.03	21.90	19.27	22.5 ± 2.7
Sum	94.90	98.18	99.73	99.07	99.0	99.62	100.0	100.8	98.45	98.96	99.4 ± 1.49
CIX	81.1	82.3	81.1	79.1	79.4	79.6	81.2	78.8	76.1	79.2	80.4 ± 2.00
ICV	2.27	2.62	2.28	2.09	2.12	2.50	2.40	2.15	1.97	1.92	2.20 ± 0.21
K ₂ O/Na ₂ O	0.41	0.60	0.60	1.20	0.47	0.39	0.41	0.50	0.48	0.61	0.59 ± 0.21
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.31	0.27	0.28	0.28	0.30	0.31	0.31	0.28	0.29	0.30	0.29 ± 0.02

Site no.	Northers season											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	44.24	43.12	44.48	42.89	43.91	39.54	39.53	40.05	47.23	39.71	32.17	38.97
TiO ₂	0.59	0.59	0.59	0.63	0.52	0.54	0.56	0.56	0.59	0.60	0.44	0.54
Al ₂ O ₃	12.08	12.26	11.62	12.27	11.20	11.90	10.82	12.38	11.31	12.13	9.64	11.43
Fe ₂ O ₃ *	5.39	5.58	5.43	5.88	5.38	5.76	5.27	6.13	4.94	5.83	4.54	5.51
MnO	0.11	0.10	0.11	0.10	0.09	0.10	0.10	0.09	0.09	0.13	0.10	0.10
MgO	3.75	3.90	3.89	4.51	4.61	4.38	4.39	4.91	3.57	4.02	3.39	4.40
CaO	9.39	10.33	10.14	11.10	10.66	11.17	12.18	8.77	8.73	9.76	9.42	10.67
Na ₂ O	1.66	1.37	1.86	1.40	1.61	1.63	1.65	1.79	2.05	2.91	1.48	1.65
K ₂ O	1.32	1.41	1.22	1.27	1.16	1.21	1.01	1.38	1.28	1.22	0.83	1.15
P ₂ O ₅	0.43	0.46	0.43	0.47	0.41	0.44	0.48	0.41	0.41	0.43	0.36	0.45
LOI	19.35	19.02	19.40	19.79	20.31	23.00	23.37	22.98	19.59	22.16	37.68	23.57
Sum	98.30	98.16	99.17	100.3	99.86	99.67	99.35	99.46	99.77	98.90	100.04	98.44

Table 3. (Continued.)

Northers season												
Site no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CIX	80.2	81.5	79.0	82.1	80.2	80.7	80.3	79.6	77.3	74.6	80.7	80.3
ICV	1.84	1.90	2.00	2.03	2.15	2.08	2.33	1.91	1.88	2.02	2.10	2.10
K ₂ O/Na ₂ O	0.79	1.03	0.65	0.90	0.72	0.74	0.61	0.77	0.62	0.42	0.56	0.69
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.27	0.28	0.26	0.29	0.25	0.30	0.27	0.31	0.24	0.31	0.30	0.29

Northers season											
Site no.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Mean (n = 22)
SiO ₂	41.95	39.73	39.33	41.52	36.90	38.90	39.47	56.53	42.79	41.74	41.58 ± 4.54
TiO ₂	0.54	0.56	0.57	0.59	0.55	0.53	0.58	0.68	0.59	0.57	0.57 ± 0.04
Al ₂ O ₃	10.54	11.16	12.10	12.28	11.72	11.53	11.48	12.79	12.43	12.29	11.70 ± 0.73
Fe ₂ O ₃ *	4.88	5.37	5.84	5.82	5.67	5.52	5.35	5.31	5.49	5.51	5.47 ± 0.36
MnO	0.09	0.10	0.10	0.10	0.13	0.11	0.10	0.09	0.11	0.11	0.10 ± 0.01
MgO	4.34	4.21	4.54	4.80	4.31	4.41	3.88	3.31	3.77	3.71	4.13 ± 0.44
CaO	12.11	13.95	11.54	10.56	12.55	11.93	12.05	7.35	9.98	10.35	10.7 ± 1.49
Na ₂ O	1.27	1.09	1.65	1.29	1.86	1.79	1.94	1.73	2.34	2.06	1.73 ± 0.39
K ₂ O	1.00	0.93	0.98	1.24	0.96	0.98	0.83	2.02	1.21	1.20	1.17 ± 0.25
P ₂ O ₅	0.47	0.52	0.48	0.44	0.52	0.50	0.49	0.39	0.42	0.42	0.44 ± 0.04
LOI	21.07	22.50	22.53	21.18	24.10	22.60	23.25	12.41	19.94	21.33	21.9 ± 4.32
Sum	98.3	100.1	99.6	99.8	99.3	98.8	99.4	102.6	99.1	99.3	99.4 ± 0.94
CIX	82.3	84.7	82.1	82.9	80.6	80.6	80.6	77.3	77.8	79.0	80.2 ± 2.17
ICV	2.30	2.35	2.08	1.99	2.22	2.19	2.15	1.60	1.89	1.91	2.04 ± 0.18
K ₂ O/Na ₂ O	0.78	0.85	0.59	0.97	0.52	0.55	0.43	1.17	0.52	0.58	0.70 ± 0.19
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.25	0.28	0.31	0.30	0.32	0.30	0.29	0.23	0.29	0.29	0.28 ± 0.02

Note: n = total number of samples; *Total Fe expressed as Fe₂O₃; CIX = 100*[Al₂O₃/(Al₂O₃ + Na₂O + K₂O)] (Nesbitt and Young 1982; Cullers 2000); ICV = [(CaO + K₂O + Na₂O + Fe₂O₃^(t) + MgO + MnO + TiO₂)/Al₂O₃]; Cox et al. 1995).

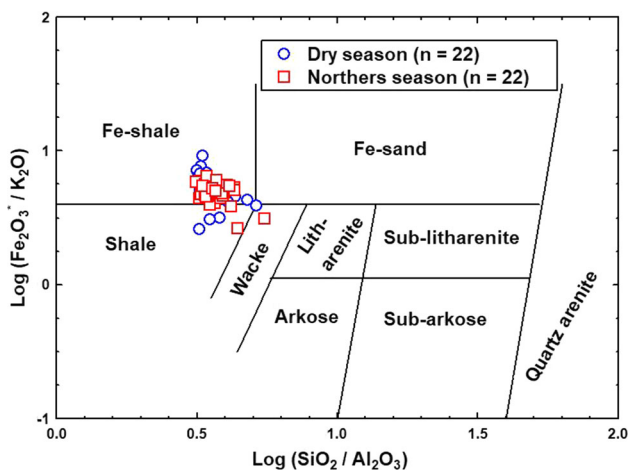


Figure 3. Geochemical classification diagram of sediments retrieved in the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico (modified after Herron 1988).

4.6 Geo-accumulation index

In dry season, I_{geo} values of Cr, Ni, and Sb vary between ~0.34 and 1.53, which implies that the

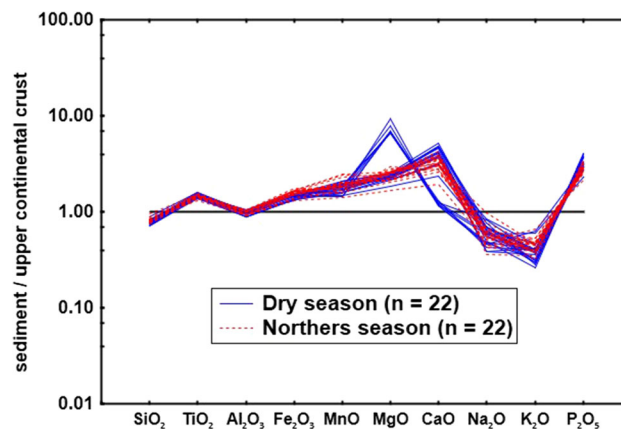


Figure 4. Upper continental crust normalized major element concentrations for the sediments retrieved in the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico. Normalization values are from Taylor and McLennan (1985).

sediments are moderately contaminated by anthropogenic sources, especially at the Grijalva River mouth (table 6). Although most of the I_{geo} values are <1, Ni exhibits >1 in almost all sites (I_{geo} = ~1.01–1.53). I_{geo}Ni value is maximum at

Table 4. Trace element concentrations (ppm) in surface sediments (dry and northers seasons) retrieved at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico.

Site no.	Dry season											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ba	282.9	290.8	269.4	248.3	232.1	288.5	292.5	296.8	286.5	365.3	271.6	231.8
Be	1.53	1.52	1.44	1.47	1.40	1.43	1.54	1.40	1.68	1.56	1.56	1.44
Co	17.87	17.85	16.71	16.85	16.37	16.74	19.44	16.42	19.15	17.61	17.53	16.51
Cr	257.9	281.2	317.9	202.2	205.3	280.1	301.9	303.1	238.9	223.4	212.4	194.6
Cs	4.17	4.09	3.27	3.89	3.75	3.54	3.92	3.39	4.48	4.31	4.30	3.99
Cu	19.33	26.20	16.39	18.00	16.38	15.83	19.04	15.54	22.28	19.23	20.69	15.97
Ga	14.20	14.23	13.00	12.81	12.63	12.94	14.01	12.70	15.33	14.76	14.50	13.27
Li	45.54	44.15	37.76	45.70	43.26	39.00	42.13	36.84	50.95	47.22	47.87	45.62
Mo	0.69	0.73	0.75	0.41	0.60	0.60	1.26	0.56	0.51	0.68	0.68	0.58
Nb	10.06	10.74	10.30	9.10	8.83	10.21	10.41	10.38	10.28	10.23	9.87	8.98
Ni	163.1	163.1	152.3	154.1	152.1	153.6	189.9	146.3	167.8	158.9	159.7	150.6
Rb	71.30	71.84	63.68	64.34	64.03	66.49	73.19	63.20	74.00	73.10	72.80	64.61
Sb	0.43	0.85	0.39	0.38	0.38	0.39	0.44	0.39	0.45	0.46	0.43	0.39
Sc	12.52	11.87	8.78	11.41	11.90	10.09	10.99	9.20	13.91	12.05	11.07	10.97
Sn	1.66	2.40	1.59	1.45	1.54	1.52	1.69	1.46	1.66	1.70	1.71	1.54
Sr	539.5	571.4	519.7	716.1	714.9	652.6	521.7	550.2	572.2	594.7	671.9	773.2
V	81.46	82.34	76.00	77.46	73.87	73.83	82.61	73.35	88.48	82.60	81.49	75.92
Y	22.32	23.19	19.49	20.80	19.60	23.02	22.36	22.31	22.60	22.72	21.74	20.36
Zn	71.62	71.65	65.67	66.59	64.64	64.48	70.31	63.78	76.79	73.87	72.42	66.59
Zr	140.2	132.3	138.5	102.30	102.5	149.2	118.9	129.9	113.9	112.3	102.9	90.25
La	23.44	25.56	24.62	20.83	21.07	23.38	23.68	24.68	24.55	24.14	23.81	21.64
Ce	48.09	52.25	50.47	44.76	43.39	47.42	48.57	50.75	50.90	49.48	48.87	44.37
Pr	5.84	6.32	6.11	5.11	5.16	5.74	5.88	6.21	6.06	6.00	5.93	5.35
Nd	22.56	24.42	23.53	19.78	19.99	22.07	22.71	23.98	23.82	23.17	22.92	20.77
Sm	4.69	5.07	4.82	4.14	4.16	4.57	4.75	4.92	4.99	4.84	4.79	4.32
Eu	1.02	1.07	1.00	0.89	0.89	0.99	1.02	1.04	1.06	1.06	1.03	0.93
Tb	0.66	0.71	0.65	0.59	0.59	0.67	0.67	0.69	0.70	0.69	0.67	0.61
Gd	4.20	4.47	4.17	3.76	3.71	4.18	4.23	4.36	4.45	4.33	4.26	3.89
Dy	3.82	4.01	3.67	3.40	3.35	3.89	3.80	3.88	3.98	3.90	3.80	3.49
Ho	0.76	0.78	0.71	0.67	0.66	0.77	0.75	0.77	0.77	0.76	0.74	0.69
Er	2.15	2.21	2.01	1.89	1.87	2.20	2.12	2.18	2.17	2.15	2.09	1.92
Yb	2.17	2.17	1.94	1.90	1.84	2.17	2.10	2.15	2.17	2.13	2.05	1.89
Lu	0.33	0.33	0.29	0.28	0.28	0.33	0.32	0.32	0.31	0.32	0.31	0.28
LREE	104.6	113.6	109.5	94.6	93.75	103.2	105.6	110.5	110.3	107.6	106.3	96.45
HREE	14.09	14.69	13.45	12.50	12.30	14.21	13.98	14.35	14.56	14.29	13.92	12.77
∑REE	119.7	129.4	123.9	108.0	106.9	118.4	120.6	125.9	125.9	122.9	121.3	110.2
Eu/Eu*	1.01	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	1.02	1.00	1.00

Site no.	Dry season										
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Mean ($n = 22$)
Ba	223.7	271.7	276.3	316.0	292.4	239.6	249.4	385.6	316.7	324.4	284.2 ± 40.9
Be	1.41	1.38	1.47	1.56	1.52	1.43	1.41	1.57	1.51	1.62	1.49 ± 0.08
Co	16.16	15.65	17.06	17.76	16.72	16.14	15.78	16.14	15.98	17.15	16.98 ± 1.00
Cr	193.4	213.5	233.4	252.5	206.9	193.1	194.8	253.8	203.0	213.1	235.3 ± 39.9
Cs	3.81	3.52	3.85	4.19	4.20	3.93	3.88	4.08	4.15	4.51	3.96 ± 0.33
Cu	15.77	14.73	17.03	18.53	17.88	15.99	15.89	18.50	16.93	19.34	17.98 ± 2.64
Ga	12.74	12.59	13.49	14.65	14.32	13.21	13.09	15.17	14.38	15.40	13.79 ± 0.94
Li	44.31	40.32	43.46	45.50	46.78	45.97	44.65	44.40	46.00	50.16	44.44 ± 3.57
Mo	0.60	0.58	0.60	0.62	0.64	0.57	0.57	0.63	0.61	0.63	0.64 ± 0.16
Nb	8.80	9.96	10.23	10.88	9.89	9.21	9.18	11.09	9.97	10.39	9.95 ± 0.66
Ni	148.6	143.3	159.2	161.6	145.2	145.1	139.9	124.1	134.1	146.3	152.7 ± 13.2

Table 4. (Continued.)

Site no.	Dry season										
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Mean ($n = 22$)
Rb	63.89	63.09	68.42	74.28	70.53	64.84	64.85	73.78	72.32	77.14	68.9 ± 4.61
Sb	0.38	0.39	0.41	0.44	0.48	0.38	0.44	0.44	0.44	0.51	0.44 ± 0.09
Sc	11.84	10.04	11.52	11.77	11.94	12.07	10.99	10.93	11.67	12.18	11.35 ± 1.12
Sn	1.52	1.50	1.61	1.69	1.65	1.54	1.52	1.69	1.63	1.67	1.63 ± 0.19
Sr	787.8	796.1	618.9	572.6	635.8	791.9	738.21	412.29	517.1	542.0	627.8 ± 108.1
V	73.81	71.98	77.62	82.56	80.71	75.97	74.72	84.72	79.78	85.55	78.95 ± 4.59
Y	19.81	21.51	21.72	23.05	21.29	20.21	20.48	21.94	21.35	22.61	21.57 ± 4.20
Zn	64.72	62.56	67.25	72.40	70.79	66.69	65.74	73.96	70.78	75.94	69.06 ± 4.20
Zr	92.99	113.7	115.6	125.29	109.3	94.5	98.9	149.3	127.6	128.0	117.7 ± 17.77
La	21.28	23.04	23.41	25.43	23.19	21.75	21.94	25.20	22.65	24.46	23.35 ± 1.44
Ce	43.65	46.82	47.78	51.97	47.62	44.54	45.14	52.09	46.50	50.06	47.98 ± 2.83
Pr	5.26	5.67	5.78	6.28	5.74	5.34	5.43	6.30	5.66	6.06	5.78 ± 0.38
Nd	20.38	22.00	22.39	24.33	22.26	20.77	21.05	24.35	21.93	23.43	22.39 ± 1.44
Sm	4.25	4.54	4.65	5.04	4.63	4.34	4.36	5.01	4.56	4.86	4.65 ± 0.29
Eu	0.91	0.98	1.00	1.09	1.01	0.94	0.95	1.10	1.01	1.07	1.00 ± 0.06
Tb	0.59	0.65	0.65	0.70	0.65	0.61	0.62	0.68	0.64	0.69	0.65 ± 0.04
Gd	3.78	4.07	4.14	4.48	4.12	3.91	3.93	4.36	4.05	4.35	4.15 ± 0.23
Dy	3.39	3.68	3.72	4.00	3.69	3.48	3.52	3.86	3.70	3.95	3.73 ± 0.21
Ho	0.67	0.73	0.73	0.78	0.72	0.68	0.69	0.75	0.73	0.77	0.73 ± 0.04
Er	1.88	2.04	2.06	2.21	2.04	1.91	1.95	2.14	2.06	2.17	2.06 ± 0.12
Yb	1.83	2.01	2.03	2.18	2.02	1.87	1.88	2.13	2.03	2.15	2.04 ± 0.12
Lu	0.28	0.30	0.30	0.33	0.30	0.28	0.28	0.32	0.30	0.32	0.31 ± 0.02
LREE	94.81	102.1	104.0	113.0	103.4	96.8	97.9	112.9	101.3	108.9	104.1 ± 6.36
HREE	12.42	13.47	13.64	14.68	13.55	12.75	12.88	14.24	13.51	14.40	13.7 ± 0.77
∑REE	108.2	116.5	118.6	128.8	117.9	110.4	111.8	128.3	115.8	124.3	118.8 ± 7.13
Eu/Eu*	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.00	1.01	1.03	1.03	1.02	1.00 ± 0.01

Site no.	Northerns season											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ba	327.4	314.9	317.1	285.3	282.3	235.6	253.9	219.8	379.7	292.2	241.7	256.9
Be	1.63	1.73	1.60	1.65	1.59	1.71	1.54	1.59	1.53	1.64	1.48	1.68
Co	18.41	20.73	18.74	21.56	21.87	23.91	20.90	23.51	17.11	18.71	17.06	22.22
Cr	280.6	290.8	310.8	308.2	325.3	310.0	296.7	327.1	302.9	230.1	213.8	308.2
Cs	4.03	4.31	3.79	4.22	3.61	4.12	3.63	3.88	3.58	4.26	3.74	4.09
Cu	22.00	22.80	21.77	22.74	21.63	26.30	21.29	26.10	19.25	22.21	18.20	23.98
Ga	15.00	15.61	14.38	15.07	13.88	15.06	13.63	14.17	14.39	15.10	13.23	14.96
Hf	4.09	3.63	4.54	3.60	3.50	2.93	3.21	2.65	5.31	3.03	2.69	3.19
Li	44.49	48.38	42.20	46.05	38.80	44.37	40.21	41.59	39.47	48.73	42.32	45.68
Mo	0.58	0.63	0.59	0.63	0.62	0.84	0.61	0.73	0.57	0.60	0.74	0.67
Nb	10.59	10.73	10.87	10.30	9.85	9.41	9.67	8.83	11.50	10.01	8.68	9.84
Ni	165.3	190.4	170.0	211.6	225.5	261.0	218.0	270.5	145.4	166.3	163.5	236.4
Pb	14.48	15.49	13.97	15.35	13.30	14.27	12.97	13.41	13.05	15.43	12.99	14.32
Rb	72.19	75.29	69.61	74.03	70.07	72.27	67.18	69.41	70.21	70.53	63.85	72.82
Sb	0.45	0.45	0.45	0.45	0.42	0.46	0.42	0.45	0.46	0.47	0.38	0.45
Sc	10.23	10.81	9.54	10.82	9.68	11.39	9.75	10.97	9.03	10.33	8.98	10.94
Sn	1.55	1.66	1.53	1.57	1.50	1.59	1.53	1.50	1.56	1.67	1.42	1.66
Sr	439.5	494.4	438.1	482.2	429.3	406.2	495.9	289.3	413.6	481.4	496.6	472.2
Th	6.83	7.16	6.57	7.04	6.61	6.76	6.34	6.25	6.79	6.83	5.94	6.85
Tl	0.46	0.48	0.44	0.47	0.45	0.48	0.43	0.45	0.44	0.44	0.39	0.46
U	2.38	2.55	2.50	2.42	2.35	2.32	2.32	2.16	2.35	2.34	2.13	2.43
V	82.52	88.76	81.81	86.24	80.11	91.73	79.64	87.83	77.97	84.77	73.38	87.9
Y	22.87	23.36	23.97	24.13	22.55	23.31	22.70	21.53	23.82	21.97	19.88	23.18

Table 4. (Continued.)

Site no.	<i>Northers season</i>											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zn	74.40	80.77	72.06	75.93	70.18	75.98	69.46	72.70	69.32	78.08	66.51	75.54
Zr	163.9	142.5	180.3	142.2	138.0	114.6	125.2	102.1	213.7	118.8	104.8	125.6
La	25.49	25.58	24.43	25.48	22.80	23.70	22.92	22.00	25.85	24.39	21.09	23.98
Ce	52.04	52.61	50.32	52.44	47.36	49.30	47.44	45.79	52.91	50.37	43.46	49.94
Pr	6.38	6.47	6.21	6.41	5.77	5.98	5.82	5.57	6.57	6.17	5.34	6.10
Nd	24.33	24.73	23.60	24.54	22.05	23.01	22.16	21.27	24.87	23.61	20.47	23.23
Sm	4.98	5.10	4.86	5.06	4.57	4.80	4.59	4.46	5.07	4.88	4.26	4.85
Eu	1.08	1.11	1.06	1.09	0.98	1.02	0.99	0.96	1.11	1.06	0.93	1.05
Tb	0.69	0.71	0.70	0.72	0.66	0.68	0.66	0.64	0.71	0.68	0.60	0.69
Gd	4.52	4.65	4.49	4.65	4.24	4.44	4.27	4.14	4.62	4.43	3.92	4.50
Dy	4.07	4.22	4.18	4.25	3.96	4.07	3.97	3.82	4.23	4.01	3.57	4.11
Ho	0.81	0.84	0.85	0.85	0.79	0.82	0.80	0.77	0.84	0.79	0.71	0.82
Er	2.25	2.34	2.37	2.38	2.21	2.26	2.23	2.12	2.37	2.19	1.96	2.28
Yb	2.23	2.29	2.36	2.33	2.16	2.24	2.18	2.09	2.36	2.15	1.91	2.24
Lu	0.34	0.34	0.35	0.35	0.32	0.33	0.32	0.31	0.36	0.32	0.28	0.33
LREE	113.2	114.5	109.4	113.9	102.5	106.8	102.9	99.08	115.3	109.4	94.62	108.1
HREE	14.91	15.39	15.30	15.53	14.35	14.85	14.44	13.89	15.48	14.56	12.96	14.97
\sum REE	129.2	130.9	125.8	130.5	117.9	122.7	118.4	113.9	131.9	125.1	108.5	124.1
Eu/Eu*	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.98	0.98	1.01	1.00	1.00	0.99
Site no.	<i>Northers season</i>											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Mean ($n = 22$)	
Ba	276.1	257.2	247.4	263.9	231.6	262.7	292.9	449.5	325.7	325.7	288.2 ± 53.2	
Be	1.48	1.57	1.70	1.74	1.59	1.62	1.60	1.68	1.66	1.68	1.62 ± 0.07	
Co	19.16	19.66	22.49	23.70	19.82	19.69	18.33	16.82	17.38	17.55	19.97 ± 2.28	
Cr	316.4	275.2	289.1	341.4	236.9	254.1	239.7	295.1	221.5	222.0	281.6 ± 38.9	
Cs	3.32	3.71	4.17	4.18	4.02	4.03	4.08	3.59	4.31	4.35	3.96 ± 0.29	
Cu	18.76	33.74	26.27	26.32	20.70	22.01	21.14	17.48	19.76	19.09	22.43 ± 3.66	
Ga	12.93	13.78	15.01	15.45	14.15	14.54	14.60	15.41	15.46	15.48	14.6 ± 0.77	
Hf	3.68	3.09	2.88	3.40	2.41	3.01	3.24	4.81	3.52	3.37	3.44 ± 0.71	
Li	37.01	42.98	46.65	45.76	46.26	46.13	46.83	41.33	48.84	50.17	44.28 ± 3.57	
Mo	0.63	0.59	0.93	0.73	0.81	0.67	0.73	0.52	0.54	0.56	0.66 ± 0.10	
Nb	9.93	9.80	9.61	10.29	8.87	9.68	10.25	11.42	10.25	10.38	10.03 ± 0.74	
Ni	191.1	194.1	236.6	260.1	198.0	195.4	170.0	125.0	149.3	152.4	195.3 ± 40.67	
Pb	12.30	13.64	15.13	14.57	14.13	14.59	14.29	13.57	14.58	14.67	14.11 ± 0.87	
Rb	65.67	66.59	71.97	74.87	67.40	69.32	69.79	74.48	74.15	74.16	70.72 ± 3.22	
Sb	0.38	0.42	0.46	0.47	0.41	0.44	0.42	0.46	0.44	0.44	0.44 ± 0.03	
Sc	8.76	9.60	11.01	11.58	10.06	10.21	10.25	9.25	10.17	10.43	10.17 ± 0.79	
Sn	1.43	1.53	1.78	1.67	1.46	1.55	1.56	1.56	1.64	1.64	1.57 ± 0.09	
Sr	510.4	640.8	512.8	425.7	599.8	569.6	583.5	371.2	505.9	536.9	481.6 ± 79.5	
Th	6.28	6.38	6.81	6.93	6.20	6.57	6.70	6.69	6.76	6.86	6.64 ± 0.30	
Tl	0.41	0.42	0.46	0.48	0.42	0.43	0.43	0.46	0.45	0.45	0.45 ± 0.02	
U	2.32	2.46	2.48	2.51	2.31	2.43	2.48	2.25	2.44	2.47	2.38 ± 0.11	
V	74.32	80.00	89.05	93.51	82.27	82.93	82.17	83.28	83.47	84.69	83.56 ± 5.06	
Y	22.28	22.28	23.57	24.70	20.65	22.47	22.99	21.88	22.14	22.15	22.65 ± 1.12	
Zn	78.88	74.69	89.63	78.35	71.95	74.26	72.88	73.45	77.84	76.02	74.95 ± 4.80	
Zr	145.4	120.4	111.9	132.8	92.7	118.1	125.9	192.7	135.3	132.9	135.5 ± 29.6	
La	23.02	23.05	23.92	25.00	21.97	23.54	24.48	25.46	24.65	24.64	23.97 ± 1.37	
Ce	47.17	47.51	49.71	51.97	45.28	48.68	50.01	52.35	50.79	50.47	49.45 ± 2.60	
Pr	5.80	5.81	6.06	6.31	5.53	5.96	6.15	6.46	6.26	6.24	6.06 ± 0.33	
Nd	22.07	22.15	23.21	24.17	21.18	22.77	23.38	24.63	23.79	23.81	23.14 ± 1.24	
Sm	4.55	4.60	4.86	5.03	4.42	4.74	4.85	5.03	4.92	4.93	4.79 ± 0.24	

Table 4. (Continued.)

Site no.	Northers season										Mean ($n = 22$)
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Eu	0.97	1.00	1.05	1.08	0.96	1.03	1.06	1.12	1.07	1.08	1.04 ± 0.06
Tb	0.65	0.65	0.69	0.72	0.62	0.67	0.69	0.68	0.68	0.68	0.68 ± 0.03
Gd	4.21	4.25	4.50	4.66	4.06	4.36	4.49	4.50	4.47	4.47	4.40 ± 0.20
Dy	3.92	3.91	4.17	4.34	3.69	3.96	4.09	3.97	4.03	4.05	4.03 ± 0.18
Ho	0.78	0.78	0.83	0.87	0.73	0.79	0.81	0.78	0.80	0.80	0.80 ± 0.04
Er	2.18	2.16	2.32	2.44	2.03	2.21	2.29	2.18	2.22	2.22	2.24 ± 0.11
Yb	2.15	2.11	2.27	2.39	1.98	2.15	2.24	2.17	2.18	2.19	2.20 ± 0.12
Lu	0.32	0.31	0.33	0.35	0.29	0.32	0.33	0.33	0.33	0.32	0.33 ± 0.02
LREE	102.6	103.0	107.8	112.5	98.38	105.7	108.9	113.9	110.4	110.1	123.1 ± 6.4
HREE	14.22	14.17	15.11	15.77	13.40	14.46	14.94	14.61	14.70	14.73	14.7 ± 0.68
\sum REE	117.8	118.3	123.9	129.3	112.7	121.2	124.9	129.7	126.2	125.9	123.1 ± 6.39
Eu/Eu*	0.97	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	1.00	1.03	1.00	1.01	0.99 ± 0.01

Note: n = total number of samples; $Eu/Eu^* = Eu_{NASC}/[(Sm_{NASC})(Gd_{NASC})]^{1/2}$. NASC = North American Shale Composite (Gromet *et al.* 1984). LREE = La + Ce + Pr + Nd + Pm; HREE = Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu; \sum REE = Total REE.

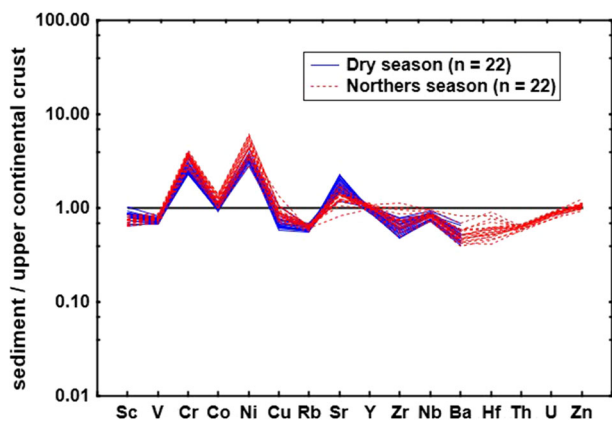


Figure 5. Upper continental crust normalized trace element concentrations for the sediments retrieved in the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico. Normalization values are from Taylor and McLennan (1985). Hf, Th, U, and Zn concentrations are not included, because these elements were not determined for the *Northers* season.

site 7 (1.53). The maximum $I_{geo}Cr$ value observed is 1.35 at site 3 and $I_{geo}Sb$ value is 1.50 at site 2.

During *northers* season, I_{geo} values of Cr and Ni are mostly >1 but are <2 , which reveals moderate contamination. The maximum $I_{geo}Cr$ value is 1.46 at site 16, located at the eastern side of the river mouth. $I_{geo}Ni$ value is 2.04 at site 8, which is the highest. Similarly, the highest $I_{geo}Sb$ value is observed in sites 10 and 16 (0.66; table 6).

5. Discussion

5.1 Sediment texture

Silt content is dominant in sediments. Highest percentage of silt is observed in the front and

western side of the Grijalva River mouth during the dry and *northers* seasons, respectively, which is due to the current direction towards the west. The variation in silt content is due to a cyclonic eddy (mesoscale) circulation within the Bay of Campeche and this eddy oscillates in strength and position during its transport towards the west, giving origin to small eddies (Monreal-Gómez and Salas-de León 1990; Salas-Monreal *et al.* 2018).

Highest percentage of clay content is recorded at the west and northern sides of the Grijalva River mouth in both seasons. Highest percentage of sand is recorded at the eastern side and in front of the river mouth during *northers* season, which is due to the presence of a small patch of sandy sediments (up to 32%). Predominance of fine-grained silt and clay could be related to the retention of coarse-grained sandy sediments due to the construction of dam in the Grijalva River draining upstream area. This inference is consistent with the recent study by Machain-Castillo *et al.* (2020), they reported that the sand content in the GURS decreased significantly due to the construction of dams in the Grijalva River draining area and land-use changes.

5.2 Carbonate and organic carbon contents

The average total carbonate content is high at the Grijalva River mouth during both seasons. However, the carbonate content is higher than reported by Machain-Castillo *et al.* (2020) from the westernmost part of the study area, suggesting that the study area is influenced by the terrigenous province from the sGOM. During dry season, the

Table 5. Enrichment factor (EF) values in surface sediments (dry and northers seasons) retrieved at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico.

Dry season											
Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V	1.01	0.99	0.96	0.98	0.97	1.01	1.03	0.97	0.99	0.98	0.86
Cr	4.13	4.35	5.15	3.31	3.46	4.96	4.85	5.16	3.44	3.43	2.90
Co	1.40	1.35	1.32	1.35	1.35	1.45	1.53	1.37	1.35	1.32	1.17
Ni	4.92	4.78	4.66	4.76	4.84	5.13	5.76	4.70	4.56	4.60	4.11
Cu	1.03	1.35	0.88	0.98	0.92	0.93	1.02	0.88	1.06	0.98	0.94
Zn	1.34	1.30	1.24	1.27	1.27	1.34	1.32	1.27	1.29	1.33	1.16
Sr	2.05	2.10	2.00	2.78	2.86	2.74	1.99	2.22	1.95	2.17	2.17
Sn	0.40	0.56	0.39	0.36	0.39	0.41	0.41	0.38	0.36	0.39	0.35
Sb	2.88	5.45	2.66	2.58	2.66	2.83	2.94	2.72	2.69	2.91	2.42
Pb	1.21	1.15	1.09	1.17	1.19	1.23	1.16	1.07	1.18	1.24	1.06
Site	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
V	1.00	1.00	1.02	0.99	0.99	1.00	0.97	0.96	0.99	0.96	0.97
Cr	3.29	3.39	3.90	3.85	3.90	3.30	3.19	3.22	3.82	3.16	3.10
Co	1.36	1.38	1.40	1.37	1.34	1.30	1.30	1.27	1.18	1.21	1.22
Ni	4.81	4.91	4.94	4.95	4.71	4.36	4.52	4.37	3.52	3.93	4.01
Cu	0.90	0.92	0.89	0.93	0.95	0.95	0.88	0.87	0.92	0.87	0.93
Zn	1.32	1.32	1.34	1.30	1.31	1.32	1.29	1.27	1.30	1.29	1.29
Sr	3.10	3.27	3.45	2.42	2.10	2.40	3.10	2.89	1.47	1.91	1.87
Sn	0.39	0.40	0.41	0.40	0.39	0.40	0.39	0.38	0.38	0.38	0.37
Sb	2.75	2.78	2.95	2.80	2.85	3.16	2.63	3.00	2.77	2.83	3.05
Pb	1.21	1.24	1.26	1.15	1.15	1.20	1.19	1.17	1.11	1.13	1.14
Northers season											
Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V	0.97	1.03	1.00	1.00	1.02	1.09	1.05	1.01	0.98	0.99	1.08
Cr	4.25	4.34	4.90	4.60	5.32	4.77	5.02	4.83	4.90	3.47	4.06
Co	1.08	1.22	1.10	1.27	1.29	1.41	1.23	1.38	1.01	1.10	1.00
Ni	4.73	5.36	5.06	5.96	6.95	7.57	6.96	7.54	4.44	4.73	5.86
Cu	1.11	1.13	1.14	1.13	1.17	1.34	1.20	1.28	1.03	1.11	1.15
Zn	1.32	1.41	1.33	1.32	1.34	1.37	1.37	1.26	1.31	1.38	1.48
Sr	1.58	1.75	1.64	1.71	1.66	1.48	1.99	1.01	1.59	1.72	2.24
Sn	0.35	0.37	0.36	0.35	0.37	0.37	0.39	0.34	0.38	0.38	0.41
Sb	2.81	2.76	2.95	2.81	2.84	2.96	2.93	2.73	3.08	2.96	2.96
Pb	1.07	1.13	1.07	1.12	1.06	1.07	1.07	0.97	1.03	1.14	1.20
Site	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
V	1.09	1.00	1.02	1.05	1.08	1.00	1.02	1.02	0.92	0.95	0.98
Cr	4.93	5.49	4.51	4.37	5.09	3.70	4.03	3.82	4.22	3.26	3.31
Co	1.31	1.13	1.16	1.32	1.39	1.17	1.16	1.08	0.99	1.02	1.03
Ni	7.14	6.26	6.00	6.75	7.31	5.83	5.85	5.12	3.38	4.15	4.28
Cu	1.27	1.08	1.84	1.32	1.30	1.07	1.16	1.12	0.83	0.97	0.94
Zn	1.41	1.60	1.43	1.59	1.37	1.31	1.38	1.36	1.23	1.34	1.32
Sr	1.79	2.10	2.49	1.84	1.50	2.22	2.14	2.21	1.26	1.77	1.90
Sn	0.40	0.37	0.38	0.41	0.38	0.34	0.37	0.38	0.34	0.36	0.37
Sb	3.00	2.75	2.86	2.91	2.93	2.69	2.89	2.76	2.71	2.70	2.72
Pb	1.12	1.04	1.09	1.12	1.06	1.08	1.13	1.11	0.95	1.05	1.07

Enrichment factor: $EF = (X/Al)_{\text{sample}} / (X/Al)_{\text{UCC}}$, where $(X/Al)_{\text{sample}}$ is the analyzed metal and Al content in sediments of this study (Birth 2003). In $(X/Al)_{\text{UCC}}$, 'X' is the value of analyzed metal concentration and Al represent average UCC value of Taylor and McLennan (1985).

Table 6. Geo-accumulation Index (I_{geo}) values in surface sediments (dry and northers seasons) retrieved at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico.

Dry season											
Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V	-0.98	-0.96	-1.08	-1.05	-1.12	-1.12	-0.96	-1.13	-0.86	-0.96	-0.98
Cr	1.05	1.18	1.35	0.70	0.72	1.17	1.28	1.28	0.94	0.84	0.77
Co	-0.51	-0.51	-0.61	-0.60	-0.64	-0.61	-0.39	-0.63	-0.41	-0.53	-0.54
Ni	1.30	1.31	1.21	1.22	1.20	1.22	1.53	1.15	1.35	1.27	1.27
Cu	-0.96	-0.52	-1.19	-1.06	-1.19	-1.24	-0.98	-1.27	-0.75	-0.96	-0.86
Zn	-0.57	-0.57	-0.70	-0.68	-0.72	-0.72	-0.60	-0.74	-0.47	-0.53	-0.56
Sr	0.04	0.12	-0.01	0.45	0.45	0.31	-0.01	0.07	0.12	0.18	0.36
Sn	-2.32	-1.78	-2.38	-2.51	-2.42	-2.44	-2.29	-2.50	-2.31	-2.28	-2.27
Sb	0.53	1.50	0.40	0.34	0.34	0.36	0.56	0.36	0.59	0.61	0.51
Pb	-0.72	-0.75	-0.89	-0.80	-0.82	-0.84	-0.79	-0.99	-0.60	-0.63	-0.68
Site	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
V	-1.08	-1.12	-1.16	-1.05	-0.96	-0.99	-1.08	-1.10	-0.92	-1.01	-0.91
Cr	0.64	0.64	0.78	0.91	1.02	0.73	0.63	0.65	1.03	0.71	0.78
Co	-0.63	-0.66	-0.70	-0.58	-0.52	-0.61	-0.66	-0.69	-0.66	-0.67	-0.57
Ni	1.19	1.17	1.12	1.27	1.29	1.14	1.14	1.08	1.01	1.02	1.15
Cu	-1.23	-1.25	-1.35	-1.14	-1.02	-1.07	-1.23	-1.24	-1.02	-1.15	-0.96
Zn	-0.68	-0.72	-0.77	-0.66	-0.56	-0.59	-0.68	-0.70	-0.53	-0.59	-0.49
Sr	0.56	0.59	0.60	0.24	0.13	0.28	0.59	0.49	-0.35	-0.02	0.05
Sn	-2.42	-2.44	-2.46	-2.36	-2.29	-2.32	-2.42	-2.44	-2.28	-2.34	-2.31
Sb	0.39	0.35	0.37	0.45	0.56	0.67	0.35	0.54	0.56	0.55	0.75
Pb	-0.80	-0.81	-0.86	-0.83	-0.74	-0.72	-0.80	-0.81	-0.76	-0.78	-0.67
Northers season											
Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V	-0.96	-0.85	-0.97	-0.90	-1.00	-0.81	-1.01	-0.87	-1.04	-0.92	-1.13
Cr	1.17	1.22	1.32	1.31	1.39	1.32	1.25	1.39	1.28	0.89	0.78
Co	-0.47	-0.30	-0.44	-0.24	-0.22	-0.09	-0.29	-0.12	-0.58	-0.45	-0.58
Ni	1.32	1.53	1.37	1.68	1.77	1.98	1.72	2.04	1.14	1.33	1.31
Cu	-0.77	-0.72	-0.78	-0.72	-0.79	-0.51	-0.82	-0.52	-0.96	-0.76	-1.04
Zn	-0.52	-0.40	-0.56	-0.49	-0.60	-0.49	-0.62	-0.55	-0.62	-0.45	-0.68
Sr	-0.26	-0.09	-0.26	-0.12	-0.29	-0.37	-0.08	-0.86	-0.34	-0.13	-0.08
Sn	-2.41	-2.31	-2.43	-2.39	-2.46	-2.38	-2.43	-2.46	-2.40	-2.31	-2.54
Sb	0.57	0.57	0.59	0.60	0.48	0.63	0.48	0.57	0.61	0.66	0.33
Pb	-0.82	-0.72	-0.87	-0.73	-0.94	-0.84	-0.97	-0.93	-0.97	-0.72	-0.97
Site	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
V	-0.87	-1.11	-1.00	-0.85	-0.78	-0.96	-0.95	-0.97	-0.95	-0.94	-0.92
Cr	1.31	1.35	1.14	1.22	1.46	0.93	1.03	0.95	1.24	0.83	0.83
Co	-0.20	-0.41	-0.38	-0.18	-0.11	-0.36	-0.37	-0.48	-0.60	-0.55	-0.54
Ni	1.84	1.53	1.56	1.84	1.98	1.59	1.57	1.37	0.92	1.18	1.21
Cu	-0.65	-1.00	-0.15	-0.51	-0.51	-0.86	-0.77	-0.83	-1.10	-0.92	-0.97
Zn	-0.50	-0.43	-0.51	-0.25	-0.44	-0.57	-0.52	-0.55	-0.54	-0.45	-0.49
Sr	-0.15	-0.04	0.29	-0.03	-0.30	0.19	0.12	0.15	-0.50	-0.05	0.03
Sn	-2.32	-2.53	-2.43	-2.22	-2.30	-2.50	-2.41	-2.40	-2.40	-2.33	-2.33
Sb	0.59	0.35	0.48	0.63	0.66	0.47	0.55	0.48	0.61	0.56	0.56
Pb	-0.83	-1.05	-0.90	-0.75	-0.81	-0.85	-0.81	-0.84	-0.91	-0.81	-0.80

$I_{geo} = \text{Log}_2 (C_n/1.5*B_n)$ (Müller 1969), where C_n is the measured concentration of metal n in sediment sample, 1.5 is a factor that considers possible variability generated by lithological variations and B_n represents the geochemical background concentration of the reference element.

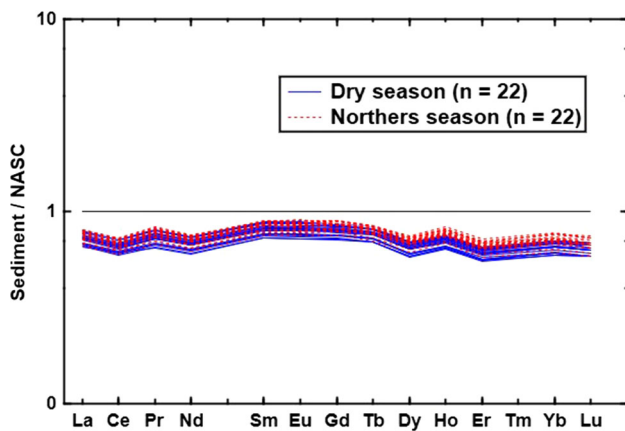


Figure 6. North American Shale Composite (NASC) normalized rare earth element concentrations for the sediments retrieved in the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico. Normalization values are from Gromet *et al.* (1984).

distribution of carbonate decreases in the sites located away from the river mouth. However, this did not imply that all carbonates are contributed by rivers, because, *northerns* season carbonates may also derive from the adjacent carbonate platform of Campeche. Organic carbon is high during *northerns* season at the west and eastern sides of the river mouth due to the river discharge. On the other hand, the organic carbon content appears to increase due to the oil exploitation and seep areas, but geochemical composition of sediments did not reveal the accumulation of oil-related elements.

5.3 Elemental variations

The correlation between SiO_2 against Fe_2O_3 , MgO , and CaO is not significant indicating that SiO_2 in sediments is associated with quartz grains and not biogenic opal or amorphous opaline silica. The positive correlation between Al_2O_3 and Fe_2O_3 is indicating an association of Fe with aluminosilicates. However, high positive correlation coefficient value obtained for Al_2O_3 vs. Fe_2O_3 in the *northerns* season indicates an increase in the input of detrital sediments. A positive correlation between Fe_2O_3 and K_2O during dry and *northerns* seasons is suggesting partial association of Fe with k-feldspars rather than opaque minerals. A negative correlation between Al_2O_3 and CaO suggests the association of Ca with biogenic carbonates rather than aluminosilicates. On the other hand, a positive correlation of CaO with CaCO_3 indicates that Ca content in sediments is related to biogenic sources during dry and *northerns* seasons. High sediment

input during *northerns* season may increase terrigenous materials associated with aluminosilicates. However, the results of this study indicate that textural parameters and CaCO_3 content in sediments are directly proportional to the amount of sediment input.

A positive correlation obtained between Al_2O_3 and Co, Rb, V, and Zn for the dry and *northerns* seasons is suggesting the association of these elements with aluminosilicates. Similarly, a negative correlation of Al_2O_3 against Ba, Cr, Nb, Zr, and Y for the dry and *northerns* seasons is indicating the association of these elements with accessory minerals. In addition, a positive correlation of K_2O vs. Rb and Ba for the dry and *northerns* seasons reveals that these elements are associated with alkali feldspar. A positive correlation of Zr against Hf in the *northerns* season indicates that these elements are probably hosted by accessory mineral zircon.

A negative correlation for $\sum\text{REE}$ vs. Al_2O_3 and a positive correlation against TiO_2 and Zr for the dry and *northerns* seasons are suggesting that REE is housed in detrital minerals like ilmenite and zircon, rather than aluminosilicates. A similarity in correlation coefficient values between dry and *northerns* seasons for most of the elements indicates minor variation in the type of sediment input between dry and *northerns* seasons.

5.4 Sediment weathering

Paleoweathering in the source area can be estimated through weathering indices like Chemical Index of Alteration ($\text{CIA} = 100 \times [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$; Nesbitt and Young 1982) and Chemical Index of Weathering ($\text{CIW} = 100 \times [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})]$; Harnois 1988), where CaO^* represents the amount of CaO in silicates only. CaO^* was calculated by the methodology proposed by McLennan *et al.* (1993), in which CaO values were accepted only if $\text{CaO} < \text{Na}_2\text{O}$; when $\text{CaO} > \text{Na}_2\text{O}$, it was assumed that the concentration of CaO equals to Na_2O . Unweathered igneous rocks have CIA values near to 50, whereas intensively weathered clay materials like kaolinite, gibbsite, and chlorite have values 100 (Nesbitt and Young 1982). These weathering indices were extensively used in various studies to infer the intensity of weathering (Tawfik *et al.* 2017, 2018; Szymański and Szkaradek 2018; Ishad *et al.* 2019; Kettanah *et al.* 2020). However, other studies documented that sediments contain significant proportions of carbonate or

phosphate minerals; hence CaO content in sediments may decrease the CIA or CIW values and leads to false interpretation (Cullers 2000). Hence, in this study to infer the intensity of weathering, a weathering index CIX ($CIX = 100 * [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O)]$) is preferred, which eliminates the CaO content (Cullers 2000). Similar to CIA and CIW, the CIX values increase if weathering increases and in highly weathered sediments, the values are greater than 80. The CIX values obtained for the dry and *northers* seasons range from ~ 76 to 84 (80.4 ± 2.0) and ~ 75 to 85 (80.2 ± 2.2), respectively, indicating a moderate to high intensity of weathering, which may reflect a warm and humid climate condition in the source area (McLennan *et al.* 1993) (table 3). In addition, (Cox *et al.* 1995) suggested that K_2O/Al_2O_3 ratio of >0.5 in sediments suggests higher proportion of alkali feldspar and <0.5 suggest higher proportion of aluminosilicates, relative to accessory minerals. The low K_2O/Al_2O_3 ratio values (<0.5) in the dry and *northers* seasons indicate the significant proportion of aluminosilicates due to moderate to high intensity of weathering.

5.5 Hydraulic sorting

Sediment sorting can be evaluated based on the Index of Compositional Variability (ICV) values, which decrease with increasing intensity of weathering (Cox *et al.* 1995). According to Cox *et al.* (1995), the ICV values are >1 in sediments associated with detrital minerals, like pyroxene and feldspar, whereas <1 in altered products like kaolinite, illite, and muscovite. The ICV values of the studied sediments are >1 for the dry (~ 1.7 – 2.6 ; 2.2 ± 0.2) and *northers* (~ 1.6 – 2.4 ; 2.0 ± 0.2) seasons, indicating the association of sediments with detrital minerals (table 3). In addition, Cox *et al.* (1995) proposed that the Al_2O_3/Na_2O and K_2O/Na_2O ratios are >5 and >1 , respectively, in compositionally matured sediments. In this study, the Al_2O_3/Na_2O and K_2O/Na_2O ratios in the dry (~ 4.7 – 8.9 and ~ 0.32 – 1.2 , respectively) and *northers* (~ 4.2 – 10.2 and ~ 0.42 – 1.2 , respectively) seasons are indicating a moderate compositional maturity.

5.6 Sediment provenance

The major and trace element concentrations vary widely in sediments derived from felsic,

intermediate, and mafic igneous rocks. Similarly, REE and certain trace elements like Zr, Hf, Y, Co, Sc, and Th are highly reliable to infer provenance, because of their low mobility during transportation (Karim *et al.* 2018; Saha *et al.* 2018; Yang *et al.* 2018; Wang *et al.* 2019a, b; Zeng *et al.* 2019; Banerjee *et al.* 2020; Chaudhuri *et al.* 2020). The provenance discrimination diagram of Roser and Korsch (1988) is widely used in various studies to determine the origin of sediments (Al-Jaberi and Al-Jafar 2020; Mustafa and Tobia 2020). This diagram is capable of differentiating sediments originated from mafic, intermediate, felsic, and quartzose recycled provenances. On this discrimination diagram (figure 7), the sediments from the dry and *northers* seasons plot in the mafic and intermediate provenance fields. This indicates that the sediments were contributed by intermediate and mafic source rocks. In addition, Girty *et al.* (1996) classified the sediment provenance based on the Al_2O_3/TiO_2 ratio. According to Girty *et al.* (1996), the Al_2O_3/TiO_2 ratio is >28 in felsic rocks, 16–27 in intermediate rocks, and <14 in mafic rocks. The average Al_2O_3/TiO_2 ratio in the dry and *northers* seasons vary from ~ 18 to 22 and ~ 19 to 22, indicating the derivation of sediments from intermediate and mafic source rocks.

Numerous studies documented that ferromagnesian trace elements like Cr, Ni, V, and Co are depleted in felsic igneous rocks and La, Y, and Th are enriched in felsic igneous rocks (Cullers 2000; Anaya-Gregorio *et al.* 2018; Tobia and Shangola 2019; Madhavaraju *et al.* 2020). Hence, these trace elements are relatively useful to discriminate sediment provenance. On the Sc–Th/Sc and La/Sc–Co/Th bivariate diagrams (figures 8 and 9, respectively), the samples from the *northers* season are plotted near to the average andesite composition, indicating their derivation from an intermediate igneous rock. The data of average composition of source rocks of Mexico included in figures 8 and 9 are compiled from Rodríguez *et al.* (2010), Schaff *et al.* (2005), and Verma *et al.* (2016). In addition, Garver *et al.* (1996) proposed that enrichment of (>150 ppm), Ni (>100 ppm) in clastic sediments with low Cr/Ni ratios (~ 1.3 – 1.5) are indicative of derivation of sediments from ultramafic rocks. In this study, Cr, Ni contents, and Cr/Ni ratio in the dry (235 ± 40 , 124 ± 13 , and 1.5 ± 0.3) and *northers* (282 ± 39 , 195 ± 41 , and 1.5 ± 0.3) seasons are indicating the derivation of sediments from the intermediate and mafic source rocks, probably from the Chiapas Massif Complex

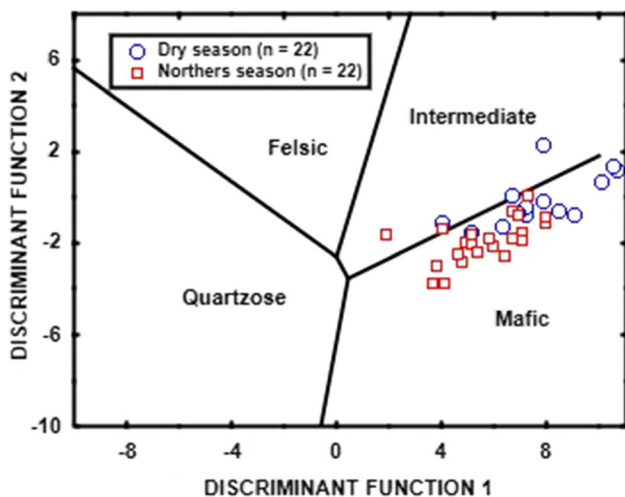


Figure 7. Provenance discriminant function diagram for the surface sediments retrieved in the southern Gulf of Mexico (after Roser and Korsch 1988). The discriminant functions are: Discriminant Function 1 = $(-1.773\text{TiO}_2) + (0.607\text{Al}_2\text{O}_3) + (0.760\text{Fe}_2\text{O}_3) + (-1.500\text{MgO}) + (0.616\text{CaO}) + (0.509\text{Na}_2\text{O}) + (-1.224\text{K}_2\text{O}) + (-9.090)$; Discriminant Function 2 = $(0.445\text{TiO}_2) + (0.070\text{Al}_2\text{O}_3) + (-0.250\text{Fe}_2\text{O}_3) + (-1.142\text{MgO}) + (0.438\text{CaO}) + (1.475\text{Na}_2\text{O}) + (1.426\text{K}_2\text{O}) + (-6.861)$.

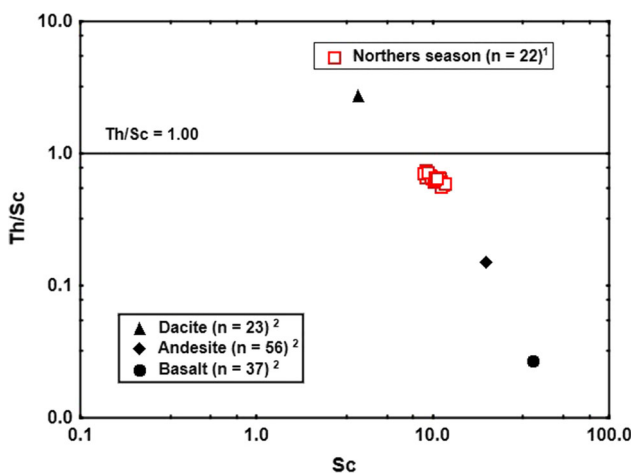


Figure 8. Th/Sc vs. Sc bivariate diagram for the surface sediments (*northers* season) retrieved in the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico. N = number of samples, ¹this study; the data of source rocks are compiled from ²Rodríguez *et al.* (2010), Schaff *et al.* (2005), and Verma *et al.* (2016). Co, Th, La, and Sc contents for the *northers* season are not determined, hence are not included.

located in the Grijalva River draining area. This interpretation is also supported by the domination of positive Eu anomaly. In addition, a similarity in REE patterns and Eu anomaly was identified among all samples from the dry and *northers* seasons, indicating a homogenous source.

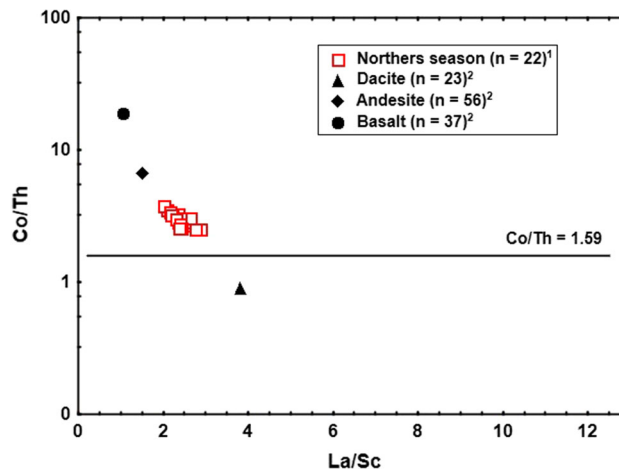


Figure 9. Co/Th vs. La/Sc bivariate diagram for the surface sediments (*northers* season) retrieved in the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico. N = number of samples, ¹this study; the data of source rocks are compiled from ²Rodríguez *et al.* (2010), Schaff *et al.* (2005), and Verma *et al.* (2016).

5.7 Heavy metal contamination

The EF calculated for Cr and Ni shows slightly elevated values (>1), which fall under the category moderately severe enrichment, maybe indicating an anthropogenic input. However, I_{geo} index show very low values for Cr and Ni, suggesting although there is an indication of anthropogenic contamination by EF, their presence is mainly due to natural source like weathering of rocks and not entirely related to an anthropogenic source. Similar behaviour is observed for Sr with low I_{geo} values. The EF values obtained in this study are slightly greater than those reported by other studies in the deep-sea area (~ 800 – 1300 m water depth) of the Gulf of Mexico (Armstrong-Altrin and Machain-Castillo 2016). The sediment samples analyzed by Armstrong-Altrin and Machain-Castillo (2016) correspond to ~ 4 – 5 m long nuclei recovered at ~ 800 – 1300 m water depth, while the sediments analyzed in this study correspond to surface samples. Furthermore, the samples of this study were collected in the nearshore zone, approximately between 5 and 19 m water depth, where the waves can affect the transport and distribution of sediments in the superficial layer. Hence, the variation in Cr and Ni contents between this study and Armstrong-Altrin and Machain-Castillo (2016) is identified due to the differences in water depth and distance from the coast.

Celis-Hernández *et al.* (2017) analyzed sediments recovered at the Jamapa River mouth, Gulf of Mexico and documented that EF values calculated

for V, Zn, Cr, Ni, Cu, Co, Pb, and As revealed non-enrichment or minor-enrichment. Similarly, Ramos-Vázquez *et al.* (2018) inferred EF values < 2 for Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, Zn and V in the deep-sea sediments in front of the Los Tuxtlas volcanic field, Gulf of Mexico. Further, these authors documented that these elements were probably derived by the weathering of intermediate source rocks like andesite and basalt. In this study, the EF values obtained for certain elements Cr, Ni and Sb reveal an enrichment in heavy metal contamination due to anthropogenic source, especially at sites located in front of the Grijalva River mouth. During *northers* season, compared to dry season, slightly elevated EF values are observed at the river mouth, which is due to the increase in sediment discharge into the sea during the *northers* season. We consider two possibilities for the enrichment of Cr, Ni, and Sb in sediments, (1) lithogenic origin, derived from the intermediate and basic igneous rocks of the Chiapas Massif Complex and (2) partly anthropogenic origin, because the Grijalva River drainage basin includes city, town, and cattle industries, hence the enrichment can be due to the waste generated within the urban area.

6. Conclusions

The sediment texture reveals the higher concentration of sand near the Grijalva River mouth relative to the sites located away from the coast. The compositional variation in sediments between the dry and *northers* seasons are not significant, except in carbonate and organic carbon contents.

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios in the dry and *northers* seasons are indicating a moderate compositional maturity. The average $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ratio in the dry (~ 14 – 2) and *northers* (~ 17 – 22) seasons are indicating the derivation of sediments from the intermediate and mafic source rocks. The Cr and Ni contents, and Cr/Ni ratio in the dry (246 ± 63 , 145 ± 17 , and 1.7 ± 0.6) and *northers* (272 ± 46 , 172 ± 47 , and 1.7 ± 0.5) seasons are indicating the derivation of sediments from intermediate and mafic source rocks. It seems that the sediments were largely derived from the Chiapas Massif Complex located in the Grijalva River draining area. A similarity in REE patterns and Eu anomaly between the dry and *northers* seasons is indicating a common source.

The EF values for Cr and Ni are slightly elevated, whereas I_{geo} shows very low values for Cr

and Ni. This reveals that although there is an indication of anthropogenic contamination by EF, their presence is mainly due to lithogenic sources like weathering of intermediate (andesite) and mafic (basalt) rocks, generally high in Cr and Ni contents. The result of this study reveals that it is necessary to monitor the coastal area regularly, although the contamination is minimal, it can increase and affect the organisms of economic importance and the inhabitants that feed on them. Especially, in the dry season, where high salinity can increase the mobilization of metals or facilitate their retention by forming more stable compounds. Also, the level of organic carbon in sediments is variable and tends to be slightly higher than in other places such as the open sea. This organic carbon reacts with metals and its adsorption can be so strong that it stabilizes them, facilitating their solubility, availability and dispersion, and leading to persistent toxicity.

Acknowledgements

Ayala-Pérez is thankful to the Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología (PCML) postgraduate program and to Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) for a doctoral fellowship. We acknowledge the financial assistance provided by a CONACyT project ‘Cambio global y sustentabilidad en la Cuenca del Usumacinta y zona marina de influencia: Bases para la adaptación al cambio climático desde la ciencia y la gestión territorial (FORDECyT 273646)’ for sample collection. This work was also supported by the CONACyT Ciencia Basica (no: A1-S-21287) and Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT; IN107020) projects. We are grateful to Eduardo Alfredo Morales, Ricardo Martínez Domínguez, Susana Santiago-Perez, and Arturo Ronquillo Arvizu for their help during sample preparation, and to Alejandro Rodríguez-Ramírez and members of the FORDECYT project for sample collection. We acknowledge our sincere thanks to Ofelia Pérez Arvizu for ICPMS analysis, carried out at the Ultra Clean Laboratory, UNAM, Juriquilla.

Author statement

Ayala-Pérez participated in sample analysis, analyzed the data, prepared the tables and figures and

wrote the first version of the manuscript. Machain-Castillo conceptualized the project and field work, interpreted the data and revised the text. Armstrong-Altrin revised the figures, data, text and prepared the final version for publication.

References

- Alexandrowicz W P 2019 Malacological evidence of the natural and anthropogenic changes of the environment in the eastern part of the Carpathian foreland: The studies in the Glinne stream valley near Rzeszów (Southern Poland), Carpathian; *J. Earth Environ. Sci.* **14(2)** 367–384.
- Al-Jaberi M H and Al-Jafer M Kh 2020 Elements distribution for the upper sandstone member of the Zubair Formation in Zubair oil field, Southern Iraq; *Iraqi Geol. J.* **53(1E)** 55–74.
- Al-Kaaby L F and Albadran B N 2020 Minerals and sedimentary characteristics of quaternary sediments of different regions in Southern Iraq; *Iraqi Geol. J.* **53(1A)** 68–89.
- Anaya-Gregorio A, Armstrong-Altrin J S, Machain-Castillo M, Montiel-García P and Ramos-Vázquez M 2018 Textural and geochemical characteristics of late Pleistocene to Holocene fine-grained deep-sea sediment cores (GM6 and GM7), recovered from southwestern Gulf of Mexico; *J. Palaeogeogr.* **7(3)** 253–271.
- Armstrong-Altrin J S 2015 Evaluation of two multi-dimensional discrimination diagrams from beach and deep sea sediments from the Gulf of Mexico and their application to Precambrian clastic sedimentary rocks; *Int. Geol. Rev.* **57** 1446–1461.
- Armstrong-Altrin J S 2020 Detrital zircon U–Pb geochronology and geochemistry of the Riachuelos and Palma Sola beach sediments, Veracruz State, Gulf of Mexico: A new insight on palaeoenvironment; *J. Palaeogeogr.* **9(4)**, <https://doi.org/10.1186/s42501-020-00075-9>.
- Armstrong-Altrin J and Machain-Castillo M 2016 Mineralogy, geochemistry and radiocarbon ages of deep sea sediments from the Gulf of Mexico, Mexico; *J. South Am. Earth Sci.* **71** 182–200.
- Armstrong-Altrin J, Ramos-Vázquez M, Zavala-León A and Montiel-García P 2018 Provenance discrimination between Atasta and Alvarado beach sands, western Gulf of Mexico, Mexico: Constraints from detrital zircon chemistry and U–Pb geochronology; *Geol. J.* **53(6)** 2824–2848.
- Armstrong-Altrin J S, Botello A V, Villanueva S F and Soto L A 2019 Geochemistry of surface sediments from the northwestern Gulf of Mexico: Implications for provenance and heavy metal contamination; *Geol. Quart.* **63(3)** 522–538.
- Armstrong-Altrin J S, Ramos-Vázquez M A, Hermenegildo-Ruiz N Y and Madhavaraju J 2020 Microtexture and U–Pb geochronology of detrital zircon grains in the Chachalacas beach, Veracruz State, Gulf of Mexico; *Geol. J.* **1–21**, <https://doi.org/10.1002/gj.3984>.
- Balaram V 2020 Current and emerging analytical techniques for geochemical and geochronological studies; *Geol. J.* **1–60**, <https://doi.org/10.1002/gj.4005>.
- Banerjee S, Choudhury T R, Saraswati P K and Khanolkar S 2020 The formation of authigenic deposits during Paleogene warm climatic intervals: A review; *J. Palaeogeogr.* **9** 27, <https://doi.org/10.1186/s42501-020-00076-8>.
- Bansal U, Banerjee S, Ruidas D K and Pande K 2018 Origin and geochemical characterization of the glauconites in the upper Cretaceous Lameta Formation, Narmada Basin, central India; *J. Palaeogeogr.* **7(2)** 99–116.
- Bessa A Z E, Nguetchoua G, Janpou A K, El-Amier Y A, Nguetnga O N N M, Kayou U R, Bisse S B, Mapuna E C N and Armstrong-Altrin J S 2020 Heavy metal contamination and its ecological risks in the beach sediments along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon); *Earth Syst. Environ.* <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00167-5>.
- Birth G 2003 A scheme for assessing human impacts on coastal aquatic environments using sediments; In: *Wollongong University Papers in Centre for Maritime Policy* (eds) Woodcoffe C D and Furness R A, Australia.
- Carranza-Edwards A, Márquez-García A, Tapia C, Rosales-Hoz L and Alatorre-Mendieta M 2015 Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noroeste; *Bol. Soc. Geol. Mex.* **67** 21–43.
- Carranza-Edwards A, Kasper-Zubillaga J J, Martínez-Serrano R G, Cabrera-Ramírez M, Rosales-Hoz L, Mendieta M A A, Márquez-García A Z and Santa-Cruz R L 2019 Provenance inferred through modern beach sands from the Gulf of Tehuantepec, Mexico; *Geol. J.* **54** 552–563.
- Celis-Hernández O, Rosales-Hoz L, Cundy Andrew B and Carranza-Edwards A 2017 Sedimentary heavy metal (loid) contamination in the Veracruz shelf, Gulf of Mexico: A baseline survey from a rapidly developing tropical coast; *Mar. Poll. Bull.*, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.039>.
- Celis-Hernandez O, Giron-García M P, Ontiveros-Cuadras J F, Canales-Delgadillo J C, Pérez-Ceballos R Y, Ward R D, Acevedo-Gonzales O, Armstrong-Altrin J S and Merino-Ibarra M 2020 Environmental risk of trace elements in mangrove ecosystems: An assessment of natural vs. oil and urban inputs; *Sci. Total Environ.* **1** 138643, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138643>.
- Chaudhuri A, Banerjee S, Prabhakar N and Das A 2020 The use of heavy mineral chemistry in reconstructing provenance: A case study from Mesozoic sandstones of Kutch Basin India; *Geol. J.*, <https://doi.org/10.1002/gj.3922>.
- Cox R, Lowe D R and Cullers R L 1995 The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States; *Geochim. Cosmochim. Acta* **59** 2919–2940.
- Cullers R L 2000 The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian–Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies; *Lithos* **51** 181–203.
- Cusack M, Arrieta J M and Duarte C M 2020 Source apportionment and elemental composition of atmospheric total suspended particulates (TSP) over the Red Sea coast of Saudi Arabia; *Earth Syst. Environ.* **4(4)** 777–788, <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00189-z>.
- Damian G, Iepure Z S G and Damian F 2019 Distribution of heavy metals in granulometric fractions and on soil profiles; *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* **14(2)** 343–351.
- Day J W, Yañez-Arancibia A, Mitsch W J, Lara-Dominguez A L, Day J N, Ko J Y, Lane R, Lindsey J and Zarate-Lomeli D 2003 Using ecotechnology to address water quality and

- wetland habitat loss problems in Mississippi basin: A hierarchical approach; *Biotechnol. Adv.* **22** 135–159.
- El-Baz S and Khalil M 2018 Assessment of trace metals contamination in the coastal sediments of the Egyptian Mediterranean coast; *J. Afr. Earth Sci.* **143** 195–200.
- Expósito-Díaz G, Salas-de León D, Monreal-Gómez A, Salas-Monreal D and Vázquez Gutiérrez F 2009 Inertial currents in the southern Gulf of Mexico; *Cienc. Mar.* **35**(3) 287–296.
- García E and Vidal R 1990 Temperatura media, Atlas Nacional de México, IV.4.4, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Garver J I, Royce P R and Smick T A 1996 Chromium and nickel in shale of the Taconic Foreland: A case study for the provenance of fine-grained sediments with an ultramafic source; *J. Sedim. Res.* **66** 100–106.
- Gaudette H, Flight W, Toner L and Folger D 1974 An inexpensive titration method for determination of organic carbon in recent sediments; *J. Sedim. Petrol.* **44** 249–253.
- Girty G H, Ridge D L, Knaack C, Johnson D and Al-Riyami R K 1996 Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California; *J. Sedim. Res.* **66** 107–118.
- Greggio N, Giambastiani B M S, Campo B and Dinelli E 2018 Sediment composition, provenance, and Holocene paleoenvironmental evolution of the Southern Po River coastal plain (Italy); *Geol. J.* **53** 914–928.
- Gromet L P, Dymet R F, Haskin L A and Korotev R L 1984 The North American Shale composite: Its compilation, major and trace element characteristic; *Geochim. Cosmochim. Acta* **48** 2469–2482.
- Harnois L 1988 The CIW index: A new chemical index of weathering; *Sedim. Geol.* **55**(3–4) 319–322.
- Hernández-Hinojosa V, Montiel-García P C, Armstrong-Altrin J S, Nagarajan R and Kasper-Zubillaga J J 2018 Textural and geochemical characteristics of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico; *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* **13**(1) 161–174.
- Herron M M 1988 Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data; *J. Sedim. Petrol.* **58** 820–829.
- Horasan B Y and Arik F 2019 Assessing heavy metal pollution in the surface soils of central Anatolia region of Turkey; *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* **14**(1) 107–118.
- Hu J, Ma Y, Li Z, Wu Y, Gao W, Peng B, Wei X and Liu D 2019 Jurassic sediments geochemical constraints on provenance, weathering process, and palaeoclimate variation of the north margin of Qaidam Basin, north-eastern Tibetan Plateau; *Geol. J.* **55**(4) 3247–3257.
- Hudson P F, Hendrickson D A, Benke A C, Varela-Romero A, Rodiles-Hernández R and Minckley W L 2005 Rivers of Mexico; In: *Rivers of North America* (eds Benke C and Cushing C E: Elsevier, Oxford, pp. 1031–1084.
- Irshad R, Khan M S and Ahmad A H M 2019 Sedimentological and petrochemical studies of Jurassic clastic rocks, Habo Dome Basin, Kachehh Mainland, Northwest India: Implications for depositional environment, provenance, and tectonic setting; *Island Arc* **28**(5) e12307.
- Kantha L 2005 Barotropic tides in the Gulf of Mexico; In: *Circulation of the Gulf of Mexico Observations and Models* (eds Lugo-Fernandez A and Wilton S, *Am. Geophys. Union* **161** 159–164.
- Karim K H, Daoud H S and Kuradawy A R H 2018 Record of Khurmala Formation (Late Paleocene–Early Eocene) in the Sulaimaniah Governorate, Kurdistan region, Northeast Iraq; *Iraqi Geol. J.* **51**(1) 1–22.
- Kasper-Zubillaga J J, Carranza-Edwards A and Rosales-Hoz L 1999 Petrography and geochemistry of Holocene sands in the western Gulf of Mexico: Implications for provenance and tectonic setting; *J. Sedim. Res.* **69** 1003–1010.
- Kettanah Y A, Armstrong-Altrin J S and Mohammad F A 2020 Petrography and geochemistry of siliciclastic rocks of the Middle Eocene Gercus Formation, northern Iraq: Implications for provenance and tectonic setting; *Geol. J.*, <https://doi.org/10.1002/gj.3880>.
- Kurt M A 2018 Comparison of trace element and heavy metal concentrations of top and bottom soils in a complex land use area; *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* **13**(1) 47–56.
- Lazo P, Steinnes E, Qarri F, Allajbeu S, Kane S, Frontasyeva M V and Harmens H 2018 Origin and spatial distribution of metals in moss samples in Albania: A hotspot of heavy metal contamination in Europe; *Chemosphere* **190** 337–341.
- Loring D H and Rantala R T T 1992 Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter; *Earth Sci. Rev.* **32** 235–283.
- Machain-Castillo M, Ruiz-Fernández A, Gracia A, Sanchez-Cabeza J, Rodríguez-Ramírez A, Alexander-Valdés H, Pérez-Bernal L, Nava-Fernández X, Gómez-Lizárraga L, Almaraz-Ruiz L, Schwinge P and Hollander D 2019 Natural and anthropogenic oil impacts on benthic foraminifera in the southern Gulf of Mexico; *Mar. Environ. Res.* **149** 111–125.
- Machain-Castillo M, Ruiz-Fernández A, Alonso-Rodríguez R, Sanchez-Cabeza J, Gío-Argáez F, Rodríguez-Ramírez A, Villegas-Hernández R, Mora-García A, Fuentes-Sánchez A, Cardoso-Mohedano J, Hernández-Becerril D, Esqueda-Lara K, Santiago-Pérez S, Gómez-Ponce M and Pérez-Bernal L 2020 Anthropogenic and natural impacts in the marine area of influence of the Grijalva – Usumacinta River (Southern Gulf of Mexico) during the last 45 years; *Mar. Poll. Bull.* **156** 111245.
- Madhavaraju J, Saucedo-Samaniego J C, Loser H, Espinoza-Maldonado I G, Solari L, Monreal R, Grijalva-Noriega F J and Jaques-Ayala C 2019 Detrital zircon record of Mesozoic volcanic arcs in the Lower Cretaceous Mural Limestone, Northwestern Mexico; *Geol. J.* **54** 2621–2645.
- Madhavaraju J, Armstrong-Altrin J S, Pillai R B and Pi-Puig T 2020 Geochemistry of sands from the Huatabampo and Altata beaches, Gulf of California, Mexico; *Geol. J.* **55** 1–20, <https://doi.org/10.1002/gj.3864>.
- Maftai A-E, Buzgar N, Buzat A and Apopei A-I 2019 Distribution and minor elements contamination in urban and Peri-Uban soils area of Slănic Moldova Romania; *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* **14**(2) 335–342.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K and Hanson G N 1993 Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics; In: *Processes controlling the composition of clastic sediments* (eds Johnsson M J and Basu A, *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* **284** 21–40.
- Men X, Mou C, Ge X and Wang Y 2019 Geochemical characteristics of siliceous rocks of Wufeng Formation in the Late Ordovician, South China: Assessing provenance, depositional environment, and formation model; *Geol. J.* **55**(4) 2930–2950.
- Monreal-Gómez M A and Salas de León D A 1990 Simulación de la circulación de la Bahía de Campeche; *Geofís. Inter.* **29**(2) 101–111.

- Monreal-Gómez A, Salas-de-León D, Padilla-Pilotze A and Alatorre-Mendieta M 1992 Hydrography and estimation of density currents in the southern part of the Bay of Campeche, Mexico; *Ciencias Mar.* **18(4)** 115–133.
- Müller G 1969 Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River; *Geol. J.* **2** 109–118.
- Mustafa R K and Tobia F H 2020 Geochemical application in unravelling paleoweathering, provenance and environmental setting of the shale from Chia Gara Formation, Kurdistan Region, Iraq; *Iraqi Geol. J.* **53(1A)** 90–116.
- Nesbitt H W and Young G M 1982 Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites; *Nature* **299** 715–717.
- Ortiz-Pérez M 1992 Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro; Campeche-Tabasco; *Investigaciones Geográficas* **25** 7–23.
- Ramos-Vázquez M A and Armstrong-Altrin J S 2019 Sediment chemistry and detrital zircon record in the Bosque and Paseo del Mar coastal areas from the southwestern Gulf of Mexico; *Mar. Petrol. Geol.* **110** 650–675.
- Ramos-Vázquez M A and Armstrong-Altrin J S 2020 Provenance and palaeoenvironmental significance of microtextures in quartz and zircon grains from the Paseo del Mar and Bosque beaches Gulf of Mexico; *J. Earth Syst. Sci.*, <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01491-0>.
- Ramos-Vázquez M A, Armstrong-Altrin J S, Rosales-Hoz L, Machain-Castillo M L and Carranza-Edwards A 2017 Geochemistry of deep-sea sediments in two cores retrieved at the mouth of the Coatzacoalcos river delta, Western Gulf of Mexico, Mexico; *Arab. J. Geosci.* **10(6)** 148.
- Ramos-Vázquez M, Armstrong-Altrin J, Machain-Castillo M and Gío-Argáez F 2018 Foraminiferal assemblages, ¹⁴C ages, and compositional variations in two sediment cores in the western Gulf of Mexico; *J. South Am. Earth Sci.* **88** 480–496.
- Rodríguez S R, Morales-Barrera W, Layer P and González-Mercado E 2010 A Quaternary monogenetic volcanic field in the Xalapa region, eastern Trans-Mexican volcanic belt: geology, distribution and morphology of the volcanic vents; *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **197** 149–166.
- Rosales-Hoz L, Carranza-Edwards A, Martínez-Serrano R, Alatorre M A and Armstrong-Altrin J S 2015 Textural and geochemical characteristics of continental margin sediments in the SW Gulf of Mexico: Implications for source and seasonal change; *Environ. Monit. Assess.* **187(205)** 1–19.
- Roser B P and Korsch R J 1988 Provenance signatures of sandstone–mudstone suites determined using discrimination function analysis of major-element data; *Chem. Geol.* **67** 119–139.
- Ruiz-Fernández A C, Sprovieri M, Piazza R, Frignani M, Sanchez J A, Alonso C, Martinez U, Perez L H, Preda M, Hillaire C, Gastaud J and Quejido A J 2012 Effects of land use change and sediment mobilization on coastal contamination (Coatzacoalcos River, Mexico); *Cont. Shelf Res.* **37** 57–65.
- Ruiz-Fernández A C, Sanchez J A, Perez L H and Gracia A 2019 Spatial and temporal distribution of heavy metal concentrations and enrichment in the southern Gulf of Mexico; *Sci. Total Environ.* **651** 3174–3186.
- Saha S, Burley S and Banerjee S 2018 Mixing processes in modern estuarine sediments from the Gulf of Khambhat, western India; *Mar. Petrol. Geol.* **91** 599–621.
- Salas-de-León D, Monreal-Gómez A and Colunga-Enríquez G 1992 Hidrografía y circulación geostrofica en el sur de la Bahía de Campeche; *Geofísica Int.* **31(3)** 315–323.
- Salas-de-León D, Monreal-Gómez A, Signoret-Poillon M and Aldeco-Ramírez J 2004 Anticyclonic-cyclonic eddies and their impact on near-surface chlorophyll stocks and oxygen supersaturation over the Campeche Canyon, Gulf of Mexico; *J. Geophys. Res.* **109** 1–10.
- Salas-Monreal D, Marin-Hernandez M, Salas-Perez J J, Salas-de-Leon D A, Monreal-Gomez M A and Perez-España H 2018 Coral reef connectivity within the Western Gulf of Mexico; *J. Mar. Syst.* **179** 88–99.
- Salas-Pérez J, Salas-Monreal D, Arenas-Fuentes V, Salas-de-León D and Riveron-Enzastiga M 2008 Tidal characteristics in a coral reef system from the western Gulf of Mexico; *Ciencias. Mar.* **34(4)** 467–478.
- Schaaf P, Stimac J, Siebe C and Macías J L 2005 Geochemical evidence for mantle origin and crustal processes in volcanic rocks from Popocatepetl and surrounding monogenetic volcanoes, central Mexico; *J. Petrol.* **46(6)** 1243–1282.
- Shepard F P 1954 Nomenclature based on sand-silt-clay ratios; *J. Sedim. Petrol.* **24(3)** 151–158.
- Świercz A and Zajęcka E 2018 Accumulation of heavy metals in the urban soils of the city of Skarżysko-Kamienna (Poland) with regard to land use; *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* **13(1)** 249–266.
- Szymański W and Szkaradek M 2018 Andesite weathering and soil formation in a moderately humid climate: A case study from the western Carpathians (Southern Poland); *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* **13(1)** 93–105.
- Tapia-Fernandez H J, Armstrong-Altrin J S and Selvaraj K 2017 Geochemistry and U–Pb geochronology of detrital zircons in the Brujas beach sands, Campeche, Southwestern Gulf of Mexico Mexico; *J. South Am. Earth Sci.* **76** 346–361.
- Tawfik H A, Ghandour I M, Maejima W, Armstrong-Altrin J S and Abdel-Hameed A-M T 2017 Petrography and geochemistry of the siliciclastic Araba Formation (Cambrian), east Sinai, Egypt: Implications for provenance, tectonic setting and source weathering; *Geol. Mag.* **154(1)** 1–23.
- Tawfik H A, Salah M K, Maejima W, Armstrong-Altrin J S, Abdel-Hameed A-M T and Ghandour M M E 2018 Petrography and geochemistry of the Lower Miocene Moghra sandstones, Qattara Depression, North Western Desert, Egypt; *Geol. J.* **53** 1938–1953.
- Taylor S and McLennan S 1985 *The continental crust: Its composition and evolution*; Blackwell, Oxford, UK, 349p.
- Tobia F H and Shangola S S 2019 Geochemistry of sandstones from Beduh Formation in northern thrust zone, Kurdistan region, Northern Iraq: provenance and tectonic setting; *Iraqi Geol. J.* **52(1)** 1–25.
- Varga N, Krcmar D, Dalmacija B, Gvozdenac S, Tricković J, Roncevic S and Prica M 2018 Assessment of sediment pollution using chemical and biological approach; *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* **13(2)** 359–368.
- Verma S P, Torres-Sánchez D, Velasco-Tapia F, Subramanyam K S V, Manikyamba C and Bhutani R 2016 Geochemistry and petrogenesis of extension-related magmas close to the volcanic front of the central part of the Trans-Mexican Volcanic Belt; *J. South Am. Earth Sci.* **72** 126–136.

- Verma S K, Torres E E M, Malviya V P, Torres-Hernández J R, Torres-Sánchez D, Rivera-Escoto B A and Mehta P 2019 Geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from the Fresnillo area (Chilitos Formation), Zacatecas, Mexico: Implications for the magma source and tectonic setting; *J. South Am. Earth Sci.* **96** 102351.
- Wang Z, Wang J, Fu X, Zhan W, Armstrong-Altrin J S, Yu F, Feng X, Song C and Zeng S 2018 Geochemistry of the Upper Triassic black mudstones in the Qiangtang Basin, Tibet: Implications for paleoenvironment, provenance, and tectonic setting; *J. Asian Earth Sci.* **160** 118–135.
- Wang J, He Z, Zhu D and Ding Q 2019a Geochemical characteristics, depositional environment, and provenance attitude of the Middle Jurassic Yangye Formation lacustrine mudstones in Kashi Sag, south-western Tarim Basin; *Geol. J.* **55(4)** 2976–2994.
- Wang Z, Wang J, Fu X, Feng X, Armstrong-Altrin J S, Zhan W, Wan Y, Song C, Ma L and Shen L 2019b Sedimentary successions and onset of the Mesozoic Qiangtang rift basin (northern Tibet), Southwest China: Insights on the Paleo- and Meso-Tethys evolution; *Mar. Petrol. Geol.* **102** 657–679.
- Wang X, Fu R, Li H, Zhang Y, Lu M, Xiao K, Zhang X, Zheng C and Xiong Y 2020 Heavy metal contamination in Surface sediments: A comprehensive, large-scale evaluation for the Bohai Sea, China; *Environ. Pollut.* **260** 113986.
- Yáñez-Arancibia A, Day J W and Currie-Alder B 2009 The Grijalva-Usumacinta river delta functioning: challenge for coastal management; *Ocean Yearbook* **23** 473–501.
- Yang Y, An K, Cui J and Liu F 2018 Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics, Hf isotope characterization and regional implications of the Chang tuff in Rujigou area, Helan mountains; *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* **13(1)** 121–134.
- Zeng S, Wang J, Chen W, Fu X, Feng X, Song C, Wang D and Sun W 2019 Geochemical characteristics of Early Cretaceous marine oil shale from the Changshe Mountain area in the northern Qiangtang Basin, Tibet: Implications for palaeoweathering, provenance, tectonic setting, and organic matter accumulation; *Geol. J.* **55(4)** 3229–3246.

Corresponding editor: SANTANU BANERJEE

3.6.3. Fuentes y efectos de los contaminantes

Algunos metales son esenciales para los seres vivos, pero en altos niveles de exposición provocan efectos dañinos a la salud humana, así como a la flora y fauna (García-García et al., 2012; Jiménez-Cisneros, 2001). Cuando causan estas alteraciones, se dice que son contaminantes. Una de las principales vías de transporte de éstos hasta la zona costera son los ríos, que arrastran estos materiales desde la cuenca media y alta, sumado al aporte de las zonas agrícolas e industriales cercanas a la línea de costa.

Los efectos de los metales pesados en los ecosistemas marinos son de particular interés, porque son contaminantes que persisten en los sedimentos y pueden ser liberados en el agua, como se mencionó durante los eventos meteorológicos extremos. De esta manera pueden tener una mayor disponibilidad para la biota marina, lo cual representa una potencial amenaza para el funcionamiento del ecosistema.

Como se mencionó en los resultados del Índice de Geoacumulación, los elementos que se presentan como contaminantes antropogénicos fueron el Ni, el Cr y el Sb, por lo que es necesario conocer sus fuentes y los posibles efectos en el ambiente y en el ser humano.

3.6.3.1. Níquel (Ni)

El níquel es un elemento abundante en la naturaleza que constituye aproximadamente el 0.008 % de la corteza terrestre y 0.01 % de las rocas ígneas, formando parte en distintos minerales y en meteoritos aleados con hierro. Este elemento también es esencial para algunas funciones biológicas y es demandado en la industria de plantas de energía, incineradoras de basuras, acero inoxidable, aleaciones resistentes a la corrosión y detergentes, etc.

Los efectos a la fauna y al ser humano son diversos y en distintos niveles, desde dermatitis hasta daño en la sangre y riñones, embolia, fallos respiratorios, asma y bronquitis crónica,

desórdenes del corazón y defectos de nacimiento. Además, este elemento es cancerígeno bajo elevadas exposiciones en el ser humano y en animales, esto se ha observado en poblaciones que viven cerca de refinerías (Alomá-Vicente et al., 2013). Algo importante de este elemento es que no se ha encontrado que se biomagnifique, por lo que no se ha prestado la suficiente atención en los daños a la salud humana como la de otros contaminantes que se bioacumulan y biomagnifican como el plomo o mercurio.

3.6.3.2. Cromo (Cr)

El cromo existe de manera natural formando parte rocas ígneas como espineles cromíferas, que es la forma más común en la litosfera superior (Dana, 1958), pero los minerales de Cr también se concentran por su peso específico elevado, dureza alta y solubilidad relativamente baja, por lo que su contenido en rocas sedimentarias es elevado y puede superar al de las rocas básicas. Cuando el potencial REDOX es muy elevado, el Cr se moviliza en forma de cromo hexavalente.

Existen diversos compuestos de cromo que representan una amenaza ambiental y humana debido a sus efectos nocivos. Las industrias de curtiduría de pieles y textiles utilizan sales de Cr en sus procesos, al igual que las industrias de acero, pinturas y la combustión de carbón, todas ellas generan cantidades de efluentes líquidos con alto contenido de este metal. En estos efluentes, el Cr puede encontrarse como hexavalente Cr^{6+} (en forma de ion cromato CrO_4^{2-} o del ion dicromato $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, o como trivalente Cr^{3+} que es más estable y 1.000 veces menos tóxico que el Cr^{6+}).

En la mayoría de casos, el nivel de Cr total que se encuentra en los cuerpos de agua es bajo ($10 \mu\text{g/L}$), ya que por el pH del agua, el Cr^{3+} se encuentra en la forma de $\text{Cr}(\text{OH})_3$, que es insoluble. El Cr^{6+} es soluble y domina la forma de CrO_4^{2-} y a pH ácido solo existe el $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, pero cuando se vierten a los ríos, la contaminación alcanza concentraciones superiores a los $25 \mu\text{g/l}$. Es decir, que si algunos contaminantes, la temperatura o el aporte de aguas

dulces modifica el pH, el Cr puede ser soluble en estos cuerpos de agua, en vez de depositarse en el sedimento, lo que provoca una mayor disponibilidad y afectación.

La distribución del metal depende de la dinámica y características propias del cuerpo de agua, sus orígenes y la capacidad de bioacumulación por la biota (Chávez-Porras, 2010). Las intoxicaciones se manifiestan en lesiones renales, gastrointestinales, del hígado, del riñón, de la glándula tiroides y la médula ósea, alteración del material genético, defectos de nacimiento, infertilidad, tumores y cáncer, además, en animales causa problemas respiratorios como daño las agallas de los peces, aunque no se ha visto que se bioacumule en ellos, sin embargo, la velocidad corporal de eliminación para todos los organismos (incluyendo el ser humano) es muy lenta.

3.6.3.3. Antimonio (Sb)

El antimonio es un elemento poco abundante, pero es posible encontrarlo en algunos minerales sulfídicos como la antimonita o estibnita (Sb_2S_3), cuando se encuentra libre está en forma de sulfuros. De manera natural, el Sb se encuentra en bajas concentraciones en suelos, ambientes acuáticos óxicos (estanques de baja profundidad), donde predomina la especie Sb(V) y en ambientes acuáticos anóxicos (sedimentos de lagos), donde es más común el Sb(III) (Filella et al., 2009).

La toxicidad del Sb depende de su estado de oxidación. A partir del sulfuro de antimonio se obtiene óxido de antimonio (Sb_2O_3) o Sb(III), que es más tóxico que el Sb(V), ya que presenta mayor afinidad por los grupos tiol (-SH) y gran capacidad de generar estrés oxidativo. Esto causa un desequilibrio las células por un aumento en radicales libres y daño en los tejidos, por esta razón, se consideran como potenciales agentes carcinógenos, así como causante de enfermedades pulmonares, problemas de corazón, diarrea, vómitos severos y úlceras estomacales (Cervantes, 2019).

El Sb y sus derivados son considerados como contaminantes ambientales peligrosos por la EPA (US Environmental Protection Agency) y el CEC (Council of the European Communities), con mayor toxicidad que el As, aunque su abundancia y biodisponibilidad es menor que la de éste. Las fuentes antropogénicas son la industria y minería, ya que es el noveno metaloide que más se explota (Wilson et al. 2010). Sin embargo, la combustión de derivados fósiles se considera la principal fuente antropogénica de Sb en el ambiente y su enriquecimiento en la atmósfera, suelos, plantas, sedimentos y nieve polar, sugiere que la contaminación por Sb es amplia (Shotyk et al., 2005).

3.6.4. Recomendaciones

Al mencionar brevemente los efectos de estos tres elementos, que ya se presentan como contaminantes antropogénicos, se observó que es necesario poner especial atención a las fuentes de ellos cercanas a la zona de estudio, así como las ubicadas en la cuenca Grijalva-Usumacinta, esto es relevante para comprender el origen de dichos contaminantes y su dinámica a lo largo de toda la cuenca.

Existen pocos estudios sobre la presencia de metales en la parte alta de la cuenca (Alvarado-Arcia et al., 2014), en este aspecto, Laino-Guanes et al. (2015) encontraron concentraciones mínimas de Cr y Ni en el límite con Guatemala. En la cuenca media y baja del río Grijalva, Leal-Ascencio et al. (2009) y Pérez-Cruz et al. (2013) confirmaron la presencia elevada de estos elementos en agua y sedimento de ríos y lagos, mientras que Rosales-Hoz et al. (1994), Vázquez et al. (1996) y Villanueva & Botello (1992) encontraron concentraciones elevadas en la desembocadura.

Por otra parte, en la cuenca alta del río Grijalva, en México y Guatemala, existen recursos minerales de gran interés para las empresas de esta actividad económica (Copae, 2010; Roblero-Morales, 2011) y durante 2010 se otorgaron 112 concesiones mineras en territorio chiapaneco (Roblero-Morales, 2011). La extracción de minerales puede causar contaminación por elementos asociados con la minería, dependiendo del proceso utilizado

y del manejo de los residuos, así como riesgos para la salud humana y disturbios al ambiente, ya que genera suelos con limitaciones físicas, químicas y biológicas para el establecimiento de la vegetación y otros organismos.

La minería es una de las industrias de más alto riesgo en el mundo para las personas que viven en las comunidades aledañas, esto debido al uso irracional de agua y la contaminación de la misma, así como por otros impactos extremos (Copae, 2010). Cuando cesan las explotaciones mineras, los sitios quedan abandonados, pero con una pésima calidad de agua, suelos y aire, tanto, que la afectación al medio ambiente continúa mientras no se tomen las medidas de remediación y saneamiento de los sitios (Kirschbaum et al., 2012).

Actualmente, en México existen diversas normas para muestreo y análisis de estos elementos con la finalidad de cuidar la calidad de cuerpos de agua y sedimentos, como la Norma Mexicana NMX-AA-026 para la determinación de nitrógeno, la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001 para cromo, la Norma Oficial Mexicana NOM-252-SSA1-2011 para determinación de elementos tóxicos, donde se incluye el antimonio, etc., sin embargo, aún falta perfeccionar y aportar metodologías y datos a dichas normas, pues algunas sólo consideran muestreos en agua, o alguna especiación de los elementos.

También existen normas para establecer los residuos mineros (Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009) y en general, los residuos peligrosos (Norma Oficial Mexicana NOM-052-semarnat-2005). Uno de los problemas principales de estas normas es, además de la actualización e implementación de técnicas y datos, que el antimonio no es tan considerado como un contaminante principal en agua y sedimento, se da prioridad a otros elementos como el arsénico, aún cuando su toxicidad es menor (como ya se mencionó en las características del Sb). Esto se debe a que, como se mencionó anteriormente, el Sb es menos abundante y presenta menor biodisponibilidad que otros elementos como el Ar, sin embargo, aunque presente estas características, es necesario considerarlo como el contaminante tóxico que es, sobre todo porque cada vez aumenta más su concentración por la quema de combustibles fósiles y la minería.

Por otra parte, la movilidad de los contaminantes es otro factor que debe considerarse para el adecuado control de residuos y afectar en menor medida el ambiente. En este aspecto, la NOM-141-SEMARNAT-2003 trata sobre las pruebas de movilidad de cromo y antimonio, ya que la presencia de minerales como la calcita, influye en la especiación de los elementos, neutraliza el ambiente ácido y disminuye la movilidad de la mayoría de los metales tóxicos y metaloides (Armienta et al., 2012). Así, la retención de metales tóxicos y metaloides se produce mediante la formación de carbonatos metálicos de baja solubilidad y la elevación del pH, lo que promueve la precipitación de hidróxidos de Fe que pueden retener Sb (Salas-Urviola et al., 2020). Por esta razón, es necesario monitorear los cuerpos de agua y regular de una mejor manera los vertidos en ellos.

A partir de los datos analizados y la normatividad presente, es notorio que en la regulación ambiental y en la evaluación de riesgos, es importante considerar la especiación química de los elementos, sobre todo de los más tóxicos y de los que más se ha registrado contaminación, así como aquellos que son más fáciles de mover en el ambiente y que pueden ser absorbidas por los organismos, además de afectar al ser humano de manera directa e indirecta.

3.7. Elementos de Tierras Raras (REE)

Las tierras raras (REE) o lantánidos, son un grupo de quince elementos, desde el lantano (La) hasta el lutecio (Lu). Todos ellos se encuentran en la naturaleza, excepto el prometio (Pm) que es radioactivo, aunque no se presentan como metales libres, sino en estructuras minerales con enlaces iónicos o covalentes con otras REE y no metales (Gómez, 1990). Las tierras raras son clasificadas dentro de dos subgrupos: las tierras raras ligeras o grupo del cerio (LREE), incluyendo los primeros siete elementos desde La a Eu, y las tierras raras pesadas o subgrupo del itrio (HREE), que incluye los grupos desde el Gd al Lu. El itrio y el escandio, aunque no son tierras raras verdaderas, tienen propiedades similares a las tierras raras pesadas (Gómez, 1990).

Los lantánidos analizados fueron lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), iterbio (Yb), lutecio (Lu) (Figura 38). Otros elementos analizados fueron el hafnio, talio, plomo, torio y uranio. El sitio donde se encontró mayor cantidad de tierras raras fue el punto 28, al este de la desembocadura SPSP y también en ese sitio las tierras raras ligeras se encontraron en mayor porcentaje, mientras que las tierras raras pesadas fueron más abundantes en el punto 26, estos dos puntos también presentaron un mayor porcentaje de arena y de Cr.

Para comprender la importancia de los REE, es necesario tener presente que la roca fuente es el factor determinante en la composición de los sedimentos (Taylor y McLennan, 1985), sin embargo, el intemperismo, los procesos hidrodinámicos y los procesos diagenéticos también pueden alterar la composición química de los mismos (Wronkiewicz y Condie, 1987, Cullers et al., 1988). Por esta razón, para el análisis geoquímico se utilizan elementos de baja movilidad, bajos coeficientes de fraccionamiento y tiempos de residencia cortos, tanto en la corteza como en el océano (Taylor y McLennan, 1985).

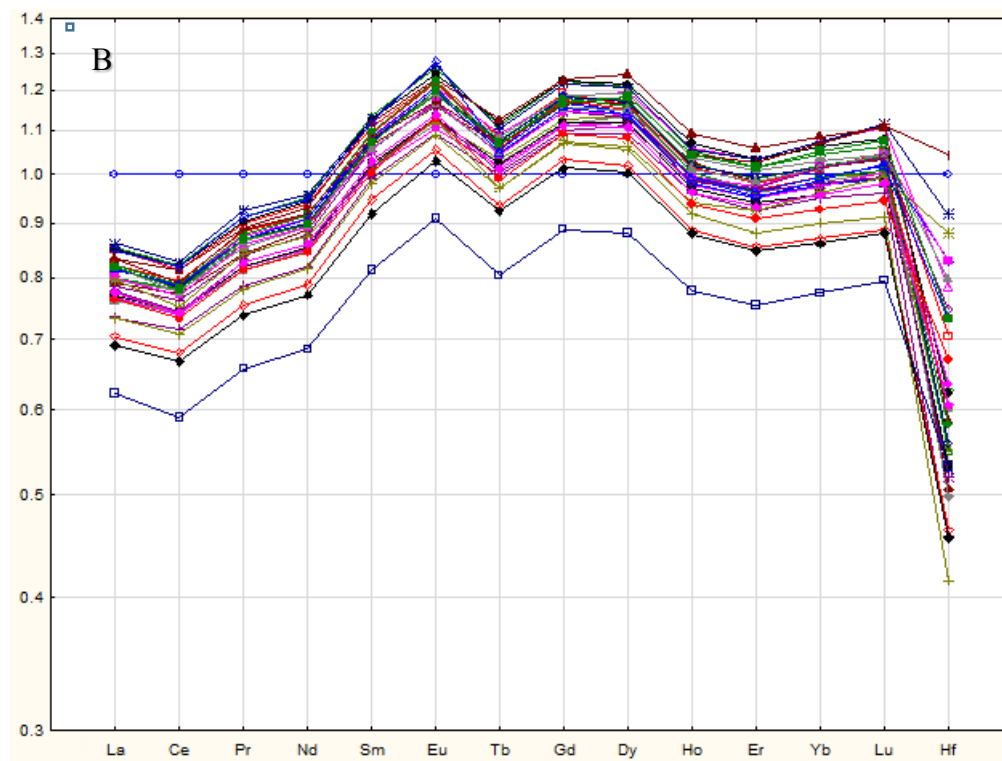
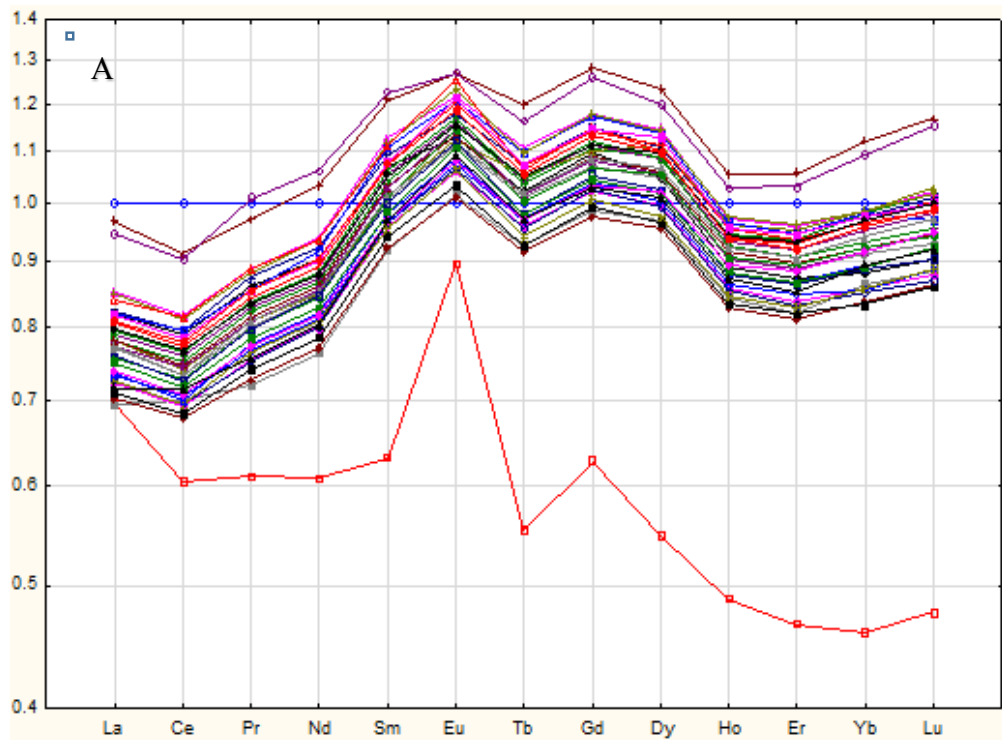
3.7.1. Procedencia

En este aspecto, algunos elementos trazas como Th y Sc y los elementos de tierras raras, son útiles para inferir sedimentos procedentes de la corteza porque no son afectados significativamente por geológicos como la diagénesis y metamorfismo, además de que son menos afectados por el fraccionamiento de minerales pesados que otros elementos como el Zr, Hf y Sn.

La abundancia de tierras raras y Th es mayor en rocas ígneas félsicas que en rocas ígneas máficas, así, esta abundancia se reproduce en sus productos de intemperismo. De igual manera, el Co, Sc, V, Ni y Cr se encuentran más concentrados en rocas ígneas máficas que en félsicas, así como en sus productos de intemperismo (como se mencionó en el apartado de Tierras Raras). La importancia radica en que estos elementos son transportados exclusivamente en el componente terrígeno de los sedimentos, por lo que puede reflejar la química de la roca fuente (Kasper-Zubillaga et al., 2008).

Para estos elementos menos móviles, la mineralogía puede controlar la distribución de REE, además, otros elementos están fuertemente controlados por minerales individuales, por ejemplo, Ti, Nb y Ta por ilmenita, rutilo o esfeno, las anomalías negativas de Nb son también características de la corteza continental y pueden ser un indicador de contaminación en la corteza por magmas.

Para analizar las relaciones mencionadas, se realizó una normalización de los datos con la UCC y otra con condrita (Figura 38, Figura 39).



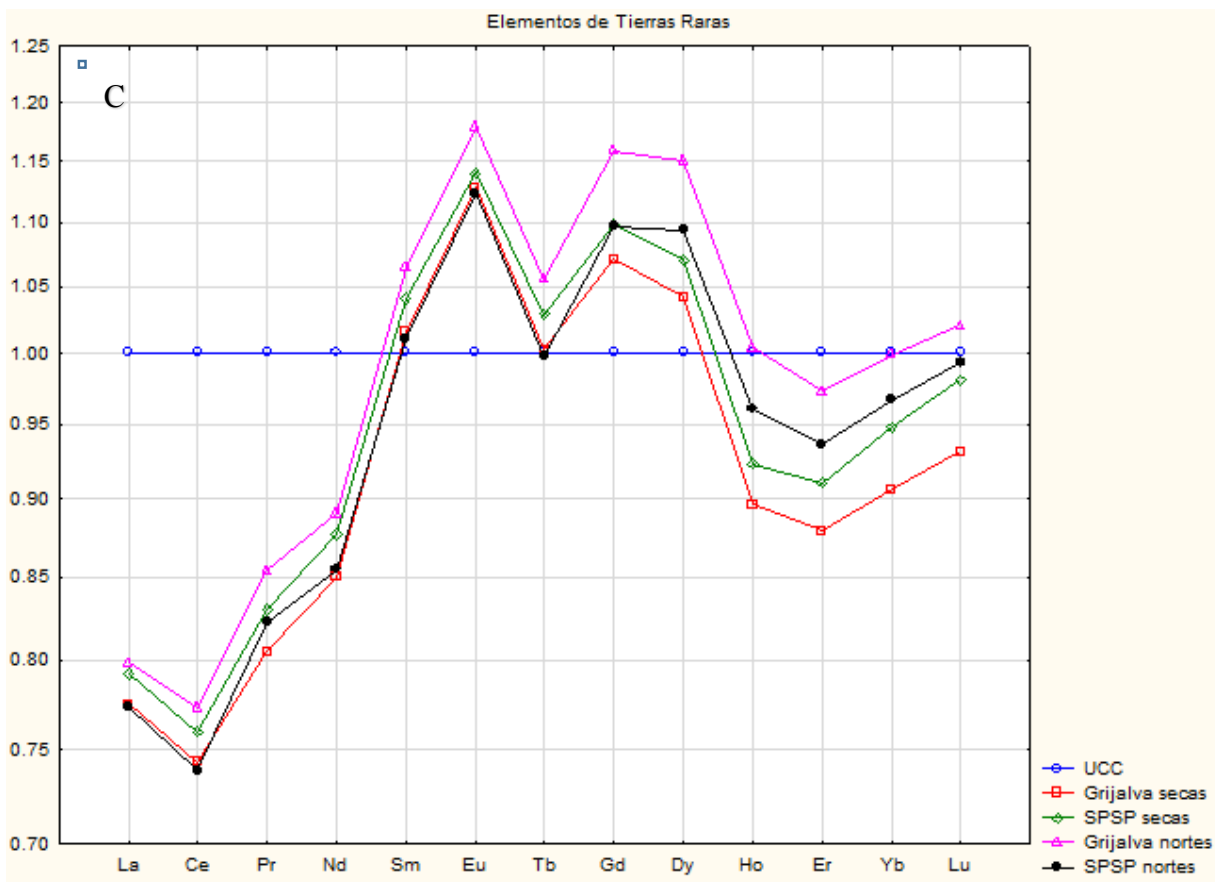
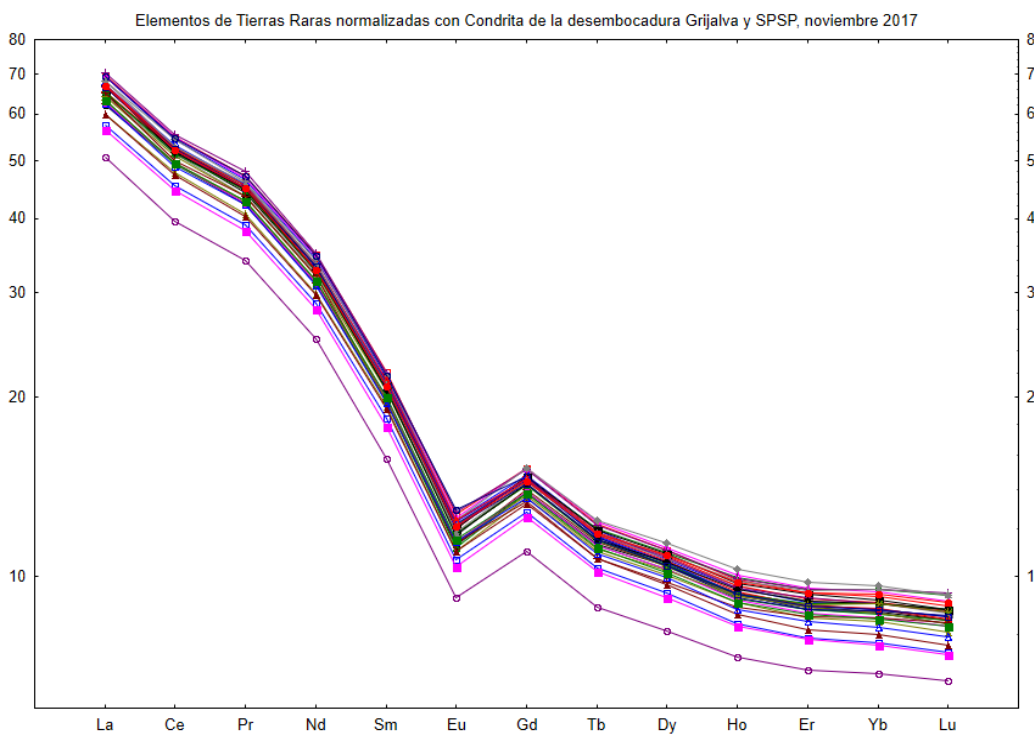
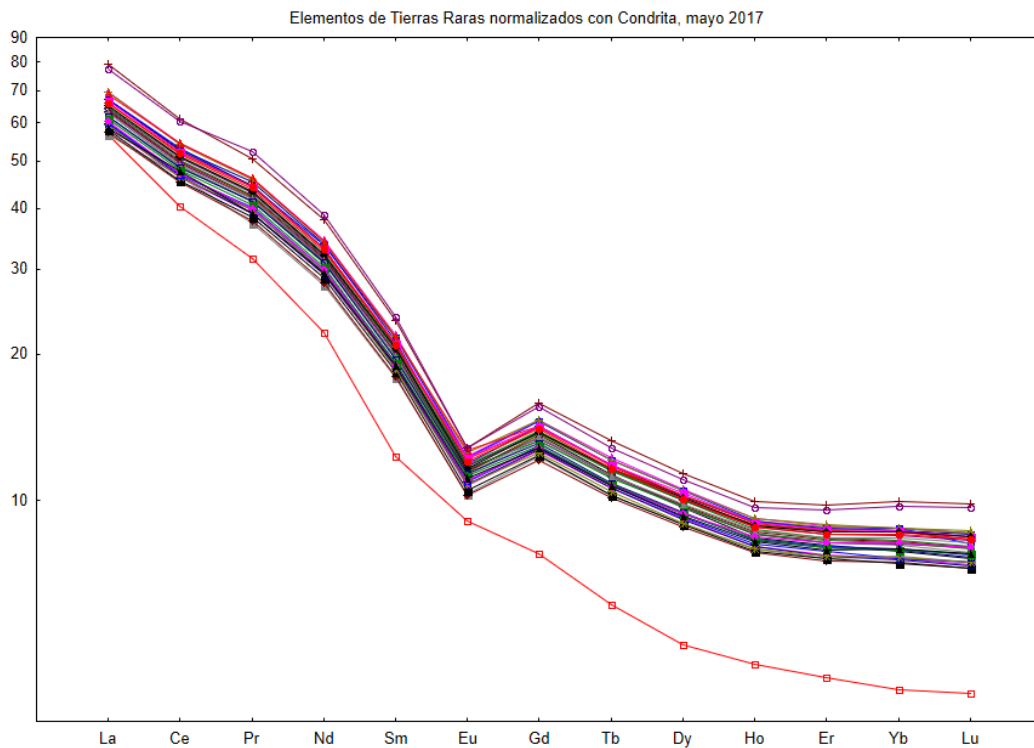


Figura 38. Elementos de tierras raras normalizadas con UCC (Taylor y McLennan, 1985). A) Mayo, 2017, B) noviembre, 2017, C) dividido por región y temporada.

La normalización con condrita muestra la composición estimada del manto primitivo y es utilizada para rocas ígneas, además de la composición con MORB, este manto primitivo es la composición del manto antes de la formación de la corteza continental, de tal manera que 19 elementos son acomodados en orden de compatibilidad creciente con respecto a un pequeño porcentaje de derretimiento del manto. En este aspecto, Thompson (1982) propone que la normalización con valores de condrita es preferible para la composición del manto primordial porque los valores de condrita son directamente medidos, no estimados, por lo que es recomendada para mantener consistencia con los diagramas REE.

En la normalización por condrita, la anomalía de Eu en elementos clásticos puede ser utilizada para inferir la procedencia de sedimentos, porque generalmente conservan la firma geoquímica de la roca de origen (Basu et al., 2016; Basu,2017). Esta anomalía está asociada con la presencia de rocas ígneas intermedias, probablemente andesita, esta anomalía ha sido reportada para el Golfo de México y relacionada con el material ígneo de la región de los Tuxtlas, Veracruz (Anaya-Gregorio et al., 2018).

En las muestras obtenidas en las desembocaduras de los ríos Grijlva y SPSP, esta anomalía se asocia a la presencia de material ígneo de tipo andesítico procedente del volcán El Chichón (o Chichonal) en Chiapas, cuya última erupción de importancia fue en 1982 y alteró la composición de los sedimentos que fueron transportados hasta la zona de muestreo. Aunque la anomalía de Eu podría ser resultado del aporte de material sedimentario de los Tuxtlas, la corriente litoral no favorece el transporte durante la mayor parte del año, ya que ésta es de este a oeste, excepto durante la temporada de nortes, donde puede cambiar su dirección un poco hacia el sureste, sumado a la celda litoral establecida por las desembocaduras de los ríos y la forma de la línea de costa.



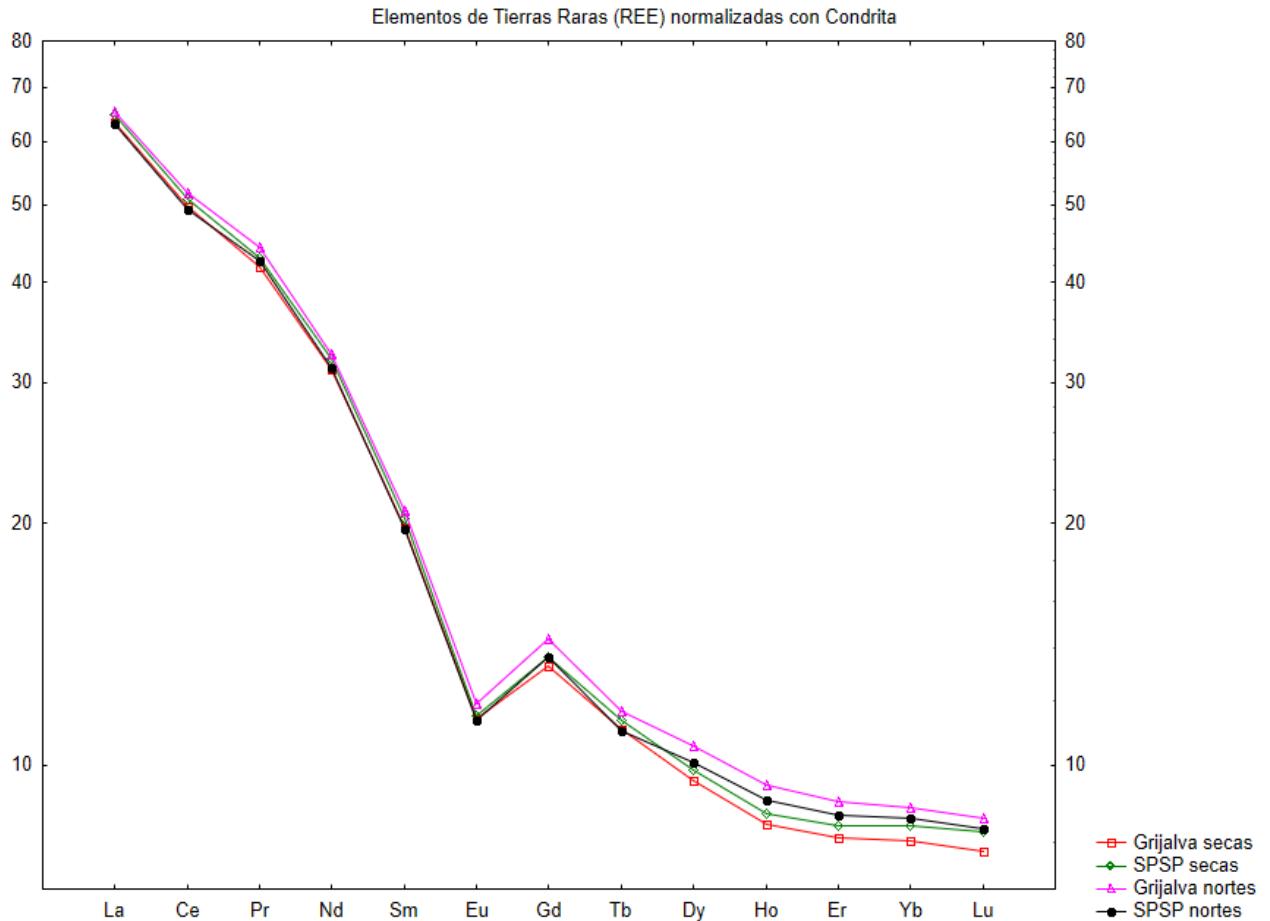


Figura 39. Tierras raras normalizadas con Condrita (Taylor y McLennan, 1985).

En la Figura 40 se observa un diagrama de REE normalizado a Condrita realizado por Tapia-Fernández (2018) donde se comparan andesitas de diferentes regiones con distintos sitios de muestreo. Estas andesitas son: Andesitas del Volcán Chichonal (Morton-Bermea et al., 2010), Andesitas del Arco Volcánico de Chiapas (Mora et al., 2007), Andesitas basálticas del Volcán Telapón (García-Tovar y Martínez-Serrano, 2011, y Basalto andesítico (Condie, 1993).

Al comprar estas gráficas con los datos obtenidos en Grijalva y SPSP durante las dos temporadas, se observa que se acercan a la disposición de una de sus muestras que se ubica en la zonas cercana a la desembocadura (Figura 40, E1 Superficie), pero también se observa

similitudes con las Andesitas del Arco Volcánico de Chiapas y con las Andesitas basálticas del Volcán Telapón, éstas últimas tienen una menor probabilidad de presentarse en la zona por pertenecer a otra cuenca hidrográfica y en la zona marina existe una celda litoral que divide estas regiones y, aunque esta celda puede modificarse de acuerdo a la temporada y a los procesos oceánicos y costeros, es poco probable que estos sedimentos se depositen en la zona de estudio y, si lo hacen, serían en cantidades mínimas.

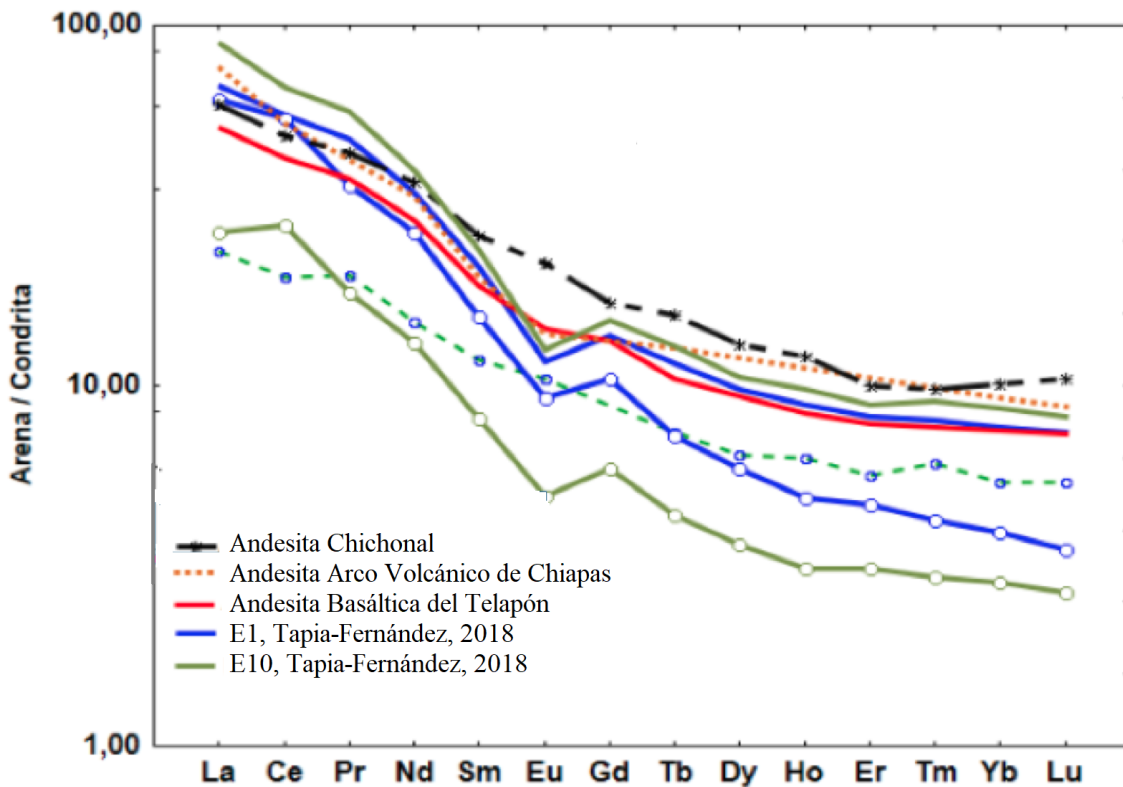


Figura 40. Tierras raras normalizadas con Condrita (Taylor y McLennan, 1985). Tomado de Tapia-Fernández (2018).

Por otra parte, la relación Co/Th mostró un valor de ~ 1.59 , que indica que parte de los sedimentos analizados provienen de la andesita. En este aspecto, los diagramas bivariados La/Sc vs Co/Th y Sc vs Th/Sc son también buenos indicadores de procedencia, ya que ayudan a hacer una discriminación entre las fuentes félsicas y básicas.

Los resultados para el área de estudio mostraron una tendencia mayor hacia la andesita que hacia la dacita (Figura 41), lo que refuerza los resultados obtenidos en los análisis anteriores.

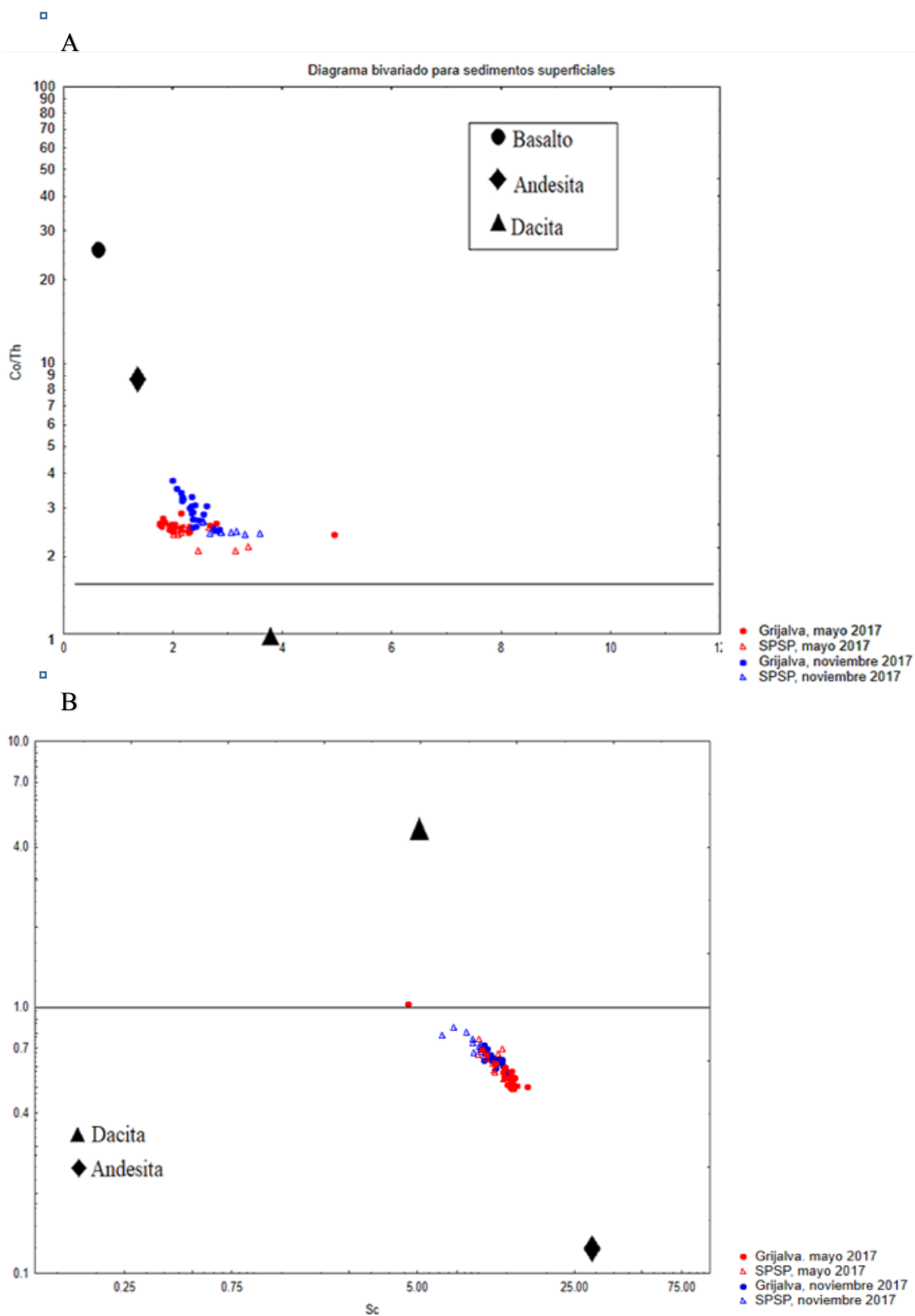


Figura 41. Diagramas bivariados para sedimentos superficiales. A) La/Sc vs Co/Th, B) Sc vs Th/Sc

4. Consideraciones finales

Antes de concluir el trabajo, se pretende hacer un aporte general como resultado de la integración de los diferentes componentes que intervienen en los datos que se observaron.

4.1. Eventos que pueden cambiar los resultados de esta caracterización

Algunos de los resultados obtenidos en este estudio pueden modificarse por diferentes factores naturales, como los eventos hidrometeorológicos extremos, ya que se ha visto que los nortes erosionan la línea de costa y el oleaje intenso remueve sedimentos del fondo, provocando su transporte (Ortiz-Pérez, 1988), lo que se reflejaría en texturas, mineralogía o contaminantes diferentes. Esto también está asociado a las lluvias intensas que promueven la meteorización, además de llevar una mayor cantidad de partículas y contaminantes por inundaciones en zonas urbanas.

Algunos factores humanos también pueden cambiar la caracterización actual de estas desembocaduras, tales como la construcción de las nuevas presas que se desea construir en el cauce del Usumacinta, en la cuenca alta y media de este río, antes de su unión con el río Grijalva. Este proyecto consiste en cinco presas hidroeléctricas funcionando en cadena. También las obras civiles en la línea de costa, la industria y el aporte de contaminantes pueden cambiar abruptamente los resultados obtenidos de una temporada a otra, en este último aspecto, se debe considerar la minería creciente en la zona de Chiapas (Roblero-Morales, 2011), donde se han otorgado más permisos para esta actividad económica, lo que afectaría en gran medida el sedimento y los contaminantes que lleguen a la línea de costa y posteriormente a la infraplaya.

Por otra parte, los resultados para elementos trazas y de tierras raras son poco cambiantes, por ello son utilizados para inferir fuentes de procedencia, ya que a pesar del intemperismo,

transporte o eventos hidrometeorológicos extremos, conservan características de la roca madre que permiten su análisis (Taylor y McLennan, 1985; Kasper-Zubillaga et al., 2008). Sin embargo, existen factores como el vulcanismo que podrían modificar estos resultados, un ejemplo de ello es la erupción del Chichón. Los datos de la misma zona (de muestras colectadas antes de la erupción del Chichón) analizados de Facio-Lince (2019), presentan resultados distintos para la composición y relaciones de algunas REE, por lo que el vulcanismo más reciente afectó esta composición.

Finalmente, el cambio climático actual también es un factor que modificará los ecosistemas y las regiones como las conocemos y, por lo tanto, también la caracterización realizada en este trabajo será modificada.

4.1. Afectación a la población

El último fin de cualquier trabajo, análisis o proyecto, debe ser la trascendencia del mismo. Es muy importante una caracterización de cualquier lugar, sustancia o especie, pero es necesario contemplar en qué medida ese estudio puede integrarse y colaborar con la mejora de las problemáticas existentes tanto en la región, como en sitios que de alguna manera presentan un daño colateral.

En este aspecto, se mencionan brevemente las vulnerabilidades detectadas que presenta la región, no exclusivamente de la zona de infraplaya, sino de la cuenca hidrológica como tal y sus habitantes. Dichas vulnerabilidades se han observado a lo largo del desarrollo de este trabajo, desde el análisis de la textura de sedimento, los contaminantes y la procedencia de todos estos.

Primero, es importante diferenciar y definir términos que, en ocasiones, confundimos en el lenguaje coloquial:

1. El peligro o amenaza es la probabilidad (generalmente natural) de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino.
2. La exposición es la cantidad de personas o bienes susceptibles de ser dañados. Esto incluye los poblados, las ciudades, las obras civiles, los pobladores, todo lo que podría estar afectado directa o indirectamente por el peligro.
3. Después de analizar lo anterior, entendemos la vulnerabilidad como la propensión de los sistemas expuestos (asentamientos humanos, infraestructura, etc.) a ser dañados por el peligro.
4. Finalmente, se tiene el riesgo, que es la probabilidad de que un peligro con una alta vulnerabilidad se convierta en un desastre. Matemáticamente se expresa como la amenaza por la vulnerabilidad ($A \times V$).

4.1.1. Peligro

Se han observado algunas amenazas naturales en la región.

1. Existe una erosión natural en la línea de costa cercana a la desembocadura SPSP asociada al cambio de trayectoria que presentó el Usumacinta hace miles de años (Ortiz, 1991).
2. Existe una amenaza natural de nortes y otros eventos meteorológicos extremos que afectan el transporte, depósito y disposición de sedimento, éstos provocan erosión en la línea de costa.
3. Hay una amenaza natural de inundaciones. Las inundaciones en la cuenca baja del Grijalva-Usumacinta no son nuevas, siempre han existido y continuarán. Esto se debe al suelo impermeable, a su topografía e hidrología: toda la cuenca baja es una planicie de inundación, por lo que en temporada de lluvias es normal que se inunde, así como durante eventos hidrometeorológicos extremos.
4. Al ser las desembocaduras de ríos caudalosos, sobre todo el Grijalva, existe una mayor cantidad de nutrientes en comparación con zonas marinas donde no desembocan ríos. Estos nutrientes pueden causar florecimientos algales nocivos (FAN's) y se ven potenciados por las descargas actuales con una mayor cantidad de nutrientes y contaminantes.
5. Estos FAN's pueden llegar a causar hipoxia en el sur del Golfo de México y, aunque no hay registro de anoxia, existe el peligro de que se presente. Además de hipoxia en zonas lagunares de la cuenca baja, donde se ha registrado mortandad de peces y mamíferos (manatíes) afectados por toxinas de bacterias.
6. La subsidencia es otra amenaza en la zona. Ésta pudo tener un origen hace miles de años de manera natural, debido a la acumulación y compactación de sedimentos depositados por los ríos (Yáñez-Arancibia, 1971). Sin embargo, actualmente esta subsidencia también se encuentra relacionada con la extracción de hidrocarburos en la región.

7. La amenaza por el aumento en el nivel del mar en las zonas costeras como un evento asociado al calentamiento global actual. En el caso de Tabasco, este peligro es mayor por la pendiente suave que presenta la planicie costera.

4.1.2. Exposición

Como se mencionó, se trata de los poblados, ciudades, habitantes, infraestructura que puede verse afectada por el peligro.

En este aspecto, la primera exposición es la zona costera, que presenta una exposición constante a la erosión registrada en todo el litoral tabasqueño (Ayala-Pérez, 2013), tanto la infraestructura, casas, servicios, como los pobladores. Otra exposición en primer plano son las ciudades y poblados sujetos a inundaciones cada año durante cada temporada de lluvias, así como los poblados ribereños que son comunes y se encuentran ubicados en los márgenes de los ríos tributarios, distributarios y principal, que, cuando aumenta el caudal de los ríos éstos se desbordan e inundan estos poblados.

Además, se presenta otra exposición hacia los habitantes que consumen especies locales, tanto ganaderas, pesquerías, y agricultura, el problema es que estas actividades son expuestas directamente a enfermedades, contaminantes y plagas. Esta exposición llega a otro nivel en el caso de especies que se exportan, principalmente productos agrícolas.

4.1.3. Vulnerabilidad

Se observaron diferentes tipos de vulnerabilidades:

4.1.3.1. Vulnerabilidad física.

Ésta radica principalmente en la falta de información y comunicación sobre la importancia de la cuenca, desde la cuenca alta hasta la zona costera y marina. En los proyectos de

manejo generalmente se considera la cuenca por secciones que después es difícil unificar para un manejo adecuado, los que trabajan la parte marina se centran en ella y los encargados de zonas urbanas, rurales y sus servicios se centran también sólo en ellos.

Falta el entendimiento general (y a todos los niveles) de que todo el sedimento, contaminantes, basuras, etc. son transportados hasta el océano, así como la importancia del sedimento en la formación de playas. Se tienen cinco represamientos importantes en la cuenca del Grijalva y la erosión costera en las playas de Tabasco cercanas a esa desembocadura se debe en gran medida a la retención de sedimentos en estas presas (Carranza et al., 2015).

Otra vulnerabilidad en esta área se centra en las obras civiles en la línea de costa. Éstas forman una barrera para el transporte de sedimento, provocando o acelerando los procesos erosivos en las playas. Si ya existe un proceso erosivo, se afecta aún más con las estructuras, incluso con las que pretenden proteger de la erosión, ya que los procesos costeros son complejos y se deben considerar todas las variables de distintos escenarios y probabilidades para intentar que las obras cumplan la función de manera óptima. Esto lleva años de análisis y muestreos, sumado a una inversión importante en modelos predictivos que puedan acercarnos a los escenarios posibles, así como un mantenimiento adecuado que, en nuestro país, está lejos de llevarse de manera adecuada.

De igual manera, la actividad petrolera y su infraestructura genera un peligro y una vulnerabilidad importante en la región. Esta vulnerabilidad está asociada a distintos sectores, pero en el aspecto físico, afecta la calidad de los sedimentos y el transporte de éstos.

Otra vulnerabilidad física en la región está ligada a las inundaciones frecuentes en la zona, principalmente porque la población no está preparada para las inundaciones que se presentan cada temporada de lluvias, todo ello como resultado de la falta de planeación en la región y el mal manejo integral en la zona.

4.1.3.2. Vulnerabilidad social

En cuanto a la vulnerabilidad social ésta se presenta ligada a la vulnerabilidad física. En ella se encuentra la pérdida de casas y negocios por erosión, las pérdidas por inundaciones (cada año), la pérdida de recursos por cambio de uso de suelo y la falta de disponibilidad del recurso hídrico, lo cual es curioso, porque la cuenca Grijalva-Usumacinta es la zona que presenta una mayor precipitación en el país y con ríos caudalosos encargados de llevar agua a todas las regiones, sin embargo, la calidad del agua a veces ya no es óptima para su uso doméstico, el sistema encargado de llevar agua a todos los sitios no funciona bien y contamina el agua y falta una cultura de captación de agua de lluvia en toda la región.

La siguiente vulnerabilidad social está relacionada con la contaminación del agua, suelo y sedimentos, tanto por desechos domésticos, como industriales y ganaderos. Esto se ve reflejado en los índices para calcular la contaminación de la zona, que descartaron para algunos elementos tóxicos un aporte natural.

La última vulnerabilidad social detectada se encuentra asociada a la contaminación y a las enfermedades causadas por ésta. A partir del análisis de los contaminantes encontrados en la zona y de sus efectos tóxicos en los organismos, se pueden pronosticar crisis sanitarias futuras si no se regulan los contaminantes vertidos en la región.

4.1.3.3. Vulnerabilidad económica

Todas las vulnerabilidades anteriores repercuten finalmente en la economía. Se presentan gastos por “desastres naturales” que no debieron ocurrir porque son producto del mal manejo en la región, además de pérdida de actividades económicas como ganaderías, agricultura y pesquerías.

Los contaminantes también generan daños en las pesquerías y gastos de emergencias sanitarias asociados a éstas.

4.1.3.4. Vulnerabilidad ambiental

La vulnerabilidad económica y ambiental se encuentran ligadas entre ellas. La afectación y pérdida de ecosistemas provocan o aumentan los desastres por eventos naturales y antropogénicos. Cuando aumentan estos eventos, también se ven afectados los ecosistemas, por lo que presentan una retroalimentación que generalmente no se ve o no se considera.

4.1.4. Riesgo

Sumado a todas las características de la cuenca que hacen que se tenga distintas amenazas, se suman los peligros asociados a la alta vulnerabilidad. Se mencionó que el riesgo es la capacidad de que el peligro se convierta en un desastre, pero es importante recalcar que los desastres tienen un origen humano, asociado a la mala planeación y manejo de áreas, recursos, infraestructura, etc.

Se mencionó el impacto de las presas, la erosión, pero también existe el riesgo de intrusión salina en la zona costera asociado a la erosión y al aumento del nivel del mar. Esto sumado al crecimiento de las ciudades y poblados que requieren espacio y recursos, todos ellos sobre una zona que se inunda frecuentemente, que genera contaminantes que afectan la alimentación, la salud y la economía. Sumado a la pérdida de ecosistemas que amortigüen el peligro y la vulnerabilidad en la región.

5. Conclusiones

5.1. Textura

Se observaron cambios en la granulometría del sedimento colectado en las dos temporadas, aunque en ambas domina el limo, durante la temporada de lluvias aumentó la presencia de arcilla y la cantidad de arena encontrada fue menor, además, la mayor cantidad de arena se observó en la zona de SPSP, probablemente porque su sedimento en parte proviene de la Sonda de Campeche y por la turbulencia de la zona causada por la barrera de la pluma del río y los giros en la zona adyacente durante diferentes temporadas.

5.2. Mineralogía

Se observó una gran cantidad de arcillas características de una alta meteorización, así como mayor cantidad de micas (biotita) y minerales pesados durante la temporada de secas, así como halloysita característica de la temporada de lluvias.

5.3. Carbonatos

La distribución de carbonatos varía según el sitio de muestreo, de manera general, la mayor cantidad de carbonatos se encontró hacia la desembocadura de SPSP durante la temporada de secas y éste es en mayor parte detrítico, mientras que durante los nortes el carbonato encontrado es en su mayoría biogénico.

5.4. Carbono orgánico

Durante la temporada de nortes aumentó la concentración y distribución de carbono orgánico, principalmente asociado a la materia orgánica procedente de las desembocaduras de los ríos, sobre todo el Grijalva, donde se observó una mayor concentración.

5.5. Elementos mayores

A partir del análisis de elementos mayores se observó una meteorización moderada, ésta es mayor durante la temporada de lluvias, lo que significa que durante esta temporada llegan al mar una mayor cantidad de sedimentos de la cuenca media que han pasado por un proceso de meteorización en ella.

También se observó que el CaO presente en la temporada de nortes es biogénico, probablemente asociado a moluscos y equinodermos, que son organismos de mayor tamaño y pueden resistir el oleaje y corrientes más intensas de esta temporada.

Por otro lado, en la temporada de secas se observó que el SiO₂ dominante es biogénico, probablemente aportado por diatomeas y silicoflagelados que se encuentran en la zona cuando el oleaje es de baja intensidad.

5.6. Elementos geogénicos y antropogénicos

En cuanto al factor de enriquecimiento, el Cr, Ni y Sb son los elementos que presentaron valores más elevados, considerados como un enriquecimiento moderadamente severo y por lo tanto una posible contaminación de importancia. Al calcular el índice de geoacumulación se observan valores que muestran una contaminación antropogénica con estos elementos.

5.7. Elementos de Tierras Raras

A partir del análisis de REE, se observó que la roca madre de donde proviene gran parte de los sedimentos tiene su origen entre Andesitas y Dacitas. Con los análisis de procedencia y el marco geológico se observó que gran parte de los sedimentos pertenecen al Arco Volcánico de Chiapas, formado por rocas ígneas intermedias.

Los sedimentos están asociados a tres fuentes: una fuente lítica de Macizo de Chiapas, Oaxaca y complejo Chuacús en Guatemala (Campeche), y dos fuentes ígneas que son Macizo de Chiapas y Chichón.

De manera general, se observó que:

- La Sonda de Campeche tiene una mayor influencia en la desembocadura SPSP.
- Durante los nortes se presentan cambios importantes en la textura y composición del sedimento, esto debido al aporte de ríos y a los sedimentos removidos por el oleaje intenso en zonas más profundas.
- A pesar de estas corrientes intensas durante los nortes, es poco probable que existe una influencia considerable de la zona de los Tuxtlas, en Veracruz, ya que la circulación dentro de la celda litoral está limitada por la batimetría, la forma de la costa, las corrientes y la descarga de los ríos, que, aunque no representa una barrera fija, sí puede ser suficientemente fuerte para limitar el transporte del noroeste.
- Existen vulnerabilidades y riesgos en toda la cuenca en los que se puede y se debe trabajar antes de que ocurran desastres que impacten de manera importante a la región.
- Estas vulnerabilidades y riesgos se magnifican con la sobrepoblación y el cambio climático.
- La importancia de las cuencas hidrológicas como fuente de sedimentos y aporte hídrico ha sido subvalorada y alterada.

La conclusión final de todo este estudio es que la sedimentología no sólo es analizar de qué se compone cada muestra sedimentaria, sino entender el ambiente de transporte y los procesos involucrados para ayudar a resolver los problemas actuales y evitar afectaciones futuras.

4. Referencias

Alomá-Vicente, I., Blázquez-García, G., Calero-de-Hoces, M., Martín-Lara, M., Rodríguez-Rico, I., Ronda-Gálvez, A., 2013. Panorama general en torno a la contaminación del agua por níquel. La biosorción como tecnología de tratamiento. *Revista Cubana de Química*. XXV(3):266-280. ISSN: 0258-5995.

Alvarado-Arcia, A., Ilizaliturri-Hernández, C. A., Martínez-Salinas, R. I., Torres-Dosal, A., 2014. Riesgos ambientales y de salud por metales (cadmio y mercurio) presentes en suelos y sedimentos del río Grijalva (pp. 240- 256). Cap. 9. En M. González-Espinosa, & M. C. BrunelManse (Eds.). *Montañas, pueblos y agua. Dimensiones y realidades de la Cuenca Grijalva*. Vol. 1. México, DF: El Colegio de la Frontera Sur y Editorial Juan Pablos.

Anfuso, G., 2004. Characterization of littoral cells in an apparently homogeneous coastal sector near Cadiz (SW Spain). *Revista C&G*, 18 (1-2).

Armienta M.A., Villaseñor G., Cruz O., Cenicerros N., Aguayo A., Morton O., 2012, Geochemical processes and mobilization of toxic metals and metalloids in an As-rich base metal waste pile in Zimapán, Central Mexico. *Appl. Geochem.* 27 (11), 2225-2237.

Armstrong-Altrin, J., Lee, Y., Verma, S., Ramasamy, S., 2004. Geochemistry of Sandstones from the Upper Miocene Kudankulam Formation, Southern India: Implications for Provenance, Weathering, and Tectonic Setting. *Journal of Sedimentary Research*, 74 (2): 285–297.

Armstrong-Altrin, J. Lee, Y., Kasper-Zubillaga, J., Carranza-Edwards, A., Garcia, D., Eby, G., Balaram, V., Cruz-Ortiz, N., 2012. Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico: Implication for provenance. *Geochemistry*, (72)345-362.

Armstrong-Altrin, J., Machain-Castillo, M., 2016. Mineralogy, geochemistry, and radiocarbon ages of deep sea sediments from the Gulf of Mexico, Mexico. *Journal of South*

American Earth Sciences, (71)182-200.

Ayala-Pérez, M., 2013. Morfodinámica y vulnerabilidad costera por erosión en playas de Tabasco, México. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias del Mar. UNAM. 154 p.

Bacelle, L., Bosellini, A., 1965. Diagrams for visual estimation of percentage composition in sedimentary rocks. Ann. Univ. Ferrara, N. S., sez. IX., Sci. Geol. Paleont. (1) 59–62.

Basu, A., Bickford, M., Deasy, R., 2016. Inferring tectonic provenance of siliciclastic rocks from the chemical compositions: A dissent. *Sedimentary Geology* 336: 26–35.

Basu, A. 2017. Evolution of siliciclastic provenance inquiries: A critical appraisal. In *Sediment Provenance*. Chapter 2, ed. Rajat Mazumder, 5–23. Elsevier. Netherlands.

Birth, G., 2003. A scheme for assessing human impacts on coastal environments using sediments. In: Woodcoffe, C.D., Furness, R.A. (Eds.), *Coastal GIS 2003 Wollongong University Papers in Center for Maritime Policy*. 14, Australia.

Bourg, A., 1995. Speciation of heavy metals in soils and groundwater and implications for their natural and provoked mobility. In “Heavy Metals”, W. Salomons, U. Förstner & P. Mader, eds. Springer-Verlag, Berlin, 19-31.

Bruker, 2011. GEO-QUANT M Preparation Manual. Bruker Axs GmbH, Karlsruhe, Germany. DOC-M80-EXX091 V2-07.

Carranza-Edwards, A., Caso-Chávez, M., 1994. Zonificación del perfil de playa. *Geo-UNAM*, 2(2), 26-32.

Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L., Santiago, S., 1996. A reconnaissance study of carbonates in Mexican beach sands. *Sedimentary Geology*, 101, 261-268.

Carranza-Edwards, A., 2001a. Grain size and sorting in modern beach sands. *Journal of Coastal Research*, 17, 38-52.

Carranza-Edwards, A., Centeno, E., Rosales-Hoz, L., Lozano, R., 2001b. Provenance of beach gray sands from western México. *Journal of South American Earth Science*, 14:291-305.

Carranza-Edwards, A., 2010. Causas y consecuencias de la erosión de playas, en Yáñez, A., (ed.), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología: impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera, Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Ver., 37-50.

Carranza-Edwards, A., Márquez-García, A., Tapia, C., Rosales-Hoz, L., Alatorre-Mendieta, M., 2015. Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noroeste. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 67: 21-43.

Carver, R., 1971. *Procedures in Sedimentary Petrology*. Athens, Georgia. 49-135 pp.

Celis-Hernandez, O., Rosales-Hoz, L., Cundy Andrew, B., Carranza-Edwards, A., 2017. Sedimentary heavy metal (loid) contamination in the Veracruz shelf, Gulf of Mexico: A baseline survey from a rapidly developing tropical coast. *Marine Pollution Bulletin*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.039>

Cervantes, C., 2019. Interacciones bacterianas con el antimonio. *Ciencia Nicolaita* (77)22-35.

Chávez-Porras, A., 2010. Description of chrome toxicity from the tannery industry and possible ways of removing it. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* (9)17: 41-50 - ISSN 1692-3324.

Chester, R., 2000. *Marine Geochemistry*. Blackwell Science. London. 506 pp.

Coastal Engineering Research Center, 1984. *Shore Protection Manual (SPM)*.

USACE, U.S. Army Coastal Engineering Research Center.

Cochrane, J., 1963. Yucatan Channel. Annual Report. Department of Oceanography, Texas A&M University, College Station, Ref. 63-18A: 6-11.

Condie, K.C., 1993, Chemical composition and evolution of upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales: *Chemical Geology*, 104, 1-37.

Copae, 2010. Situación actual del agua de los ríos Tzalá y Quivichil en el área de influencia de la mina Marlin, ubicada en los municipios de San Miguel Ixtahuacán y Sipacapa, departamento de San Marcos, Guatemala. Tercer informe anual del monitoreo y análisis de la calidad del agua. Comisión Pastoral Paz y Ecología. Recuperado de <http://goldcorpoutofguatemala.files.wordpress.com/2010/07/tercer20informe20anual20del20monitoreo.pdf>

Cullers, R.L., 1988, Mineralogical and chemical changes of soil and stream sediment formed by intense weathering of the Danburg Granite, Georgia, USA: *Lithos*, 21, 301-314.

Dana, E., 1958. A textbook of mineralogy with an extended treatise on crystallography and physical mineralogy. New York, John Wiley & Sons, Inc. London Chapman & Hall. 851 pp.

Díaz-Flores, M., Salas-de-León, D., Monreal-Gómez, M., 2017. Origin and evolution of cyclonic eddy of the Bay of Campeche, Gulf of Mexico. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* (52)3:441-450.

Facio-Lince, I., 2019. Estudio sedimentológico de arenas de playas de la provincia de sotavento en el sur del Golfo de México. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias del Mar. UNAM. 127 pp.

Fedo, C., Nesbitt, W., Young, G., 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleo weathering

conditions and provenance. *Geology*, 23(10):921–924.

Fernández, A., Gallegos, A., Zavala J., 1990. Oceanografía Física. Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Filella, M., Williams, P. A. y Belzile, N., 2009. Antimony in the environment: Knowns and unknowns. *Environ. Chem.* 6: 95-105.

Folk, R., Andrews, P., Lewis, D., 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 13:4, 937-968.

Folk, R., 1980. Petrology of sedimentary rocks, Hemphills, Austin, Texas, 170 pp.

Franzinelli, E., Potter, P.E., 1983. Petrology, chemistry and texture of modern river sands, Amazon River System: *Journal of Geology*, 91, 23-29.

Galán-Huertos, E., Romero-Baena, A., 2008, Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla*. 10:48-60.

García, E. y Vidal, R., 1990, “Temperatura media”, Atlas Nacional de México, Hoja IV.4.4, Instituto de Geografía, UNAM, México.

García-García, N., Pedraza-Garciga, J., Montalvo, J. F., Martínez, M., & Leyva, J. (2012). Evaluación preliminar de riesgos para la salud humana por metales pesados en las bahías de Buenavista y San Juan de los Remedios, Villa Clara, Cuba. *Revista Cubana de Química*, 24(2), 126-135.

García-Tovar, G.P., Martínez-Serrano, R.G., 2011. Geología y geoquímica de las lavas pleistocénicas del estratovolcán Telapón, Sierra Nevada, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(2), 301-322.

Garver, J. I., Soloviev, A. V., Kamp, P. J. J., Brandon, M. T., 1999. Detrital zircon

fission-track thermochronology: practical considerations and examples. Fission-track analysis: theory and application, edited by S. Martin and R. Polino, *Memorie di Scienze Geologiche*, 51(2)454-456.

Gaudette, H.E., Flight, W.R., Toner, L., Folger, D.W., 1974. An inexpensive titration method for determination of organic carbon in recent sediments. *J. Sediment. Petrol.* 44, 249–253.

Gavilán I.C., Fernández G., Menchaca A., Barraza L.A. y Gavilán A. (2017). Policy proposal for metals speciation in tailings contaminated soils: A case study in Chihuahua, Mexico. *J. Mex. Chem. Soc.* 61 (1), 14-22.

Godínez-Urban, A., Lawton, T., Molina-Garza, R., Iriundo, A., Weber, B., López-Martínez, A., 2011. Jurassic volcanic and sedimentary rocks of the La Silla and Todos Santos Formations, Chiapas: Record of Nazas arc magmatism and rift-basin formation prior to opening of the Gulf of Mexico. *Geosphere*, (7)1:121–144;

Harnois, L., 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedim. Geol.* 55(3–4) 319–322.

Hernández-Becerril, D.U., García-Reséndiz, J.A., Salas-de León, D.A., Monreal-Gómez, M.A., Signoret-Poillon, M., Aldeco-Ramírez, J., 2008, Nanoplankton fraction in the phytoplankton structure in the southern Gulf of Mexico (April 2000). *Ciencias Marinas*, 34(1): 77–90.

Hernández, J., Ortiz, M., Méndez, A., Salazar, M., Figueroa, J., 2008. Variaciones espacio-temporales de la línea costera del estado de Tabasco durante las últimas cuatro décadas y su representación cartográfica. CONACYT-Gobierno del Estado de Tabasco, Villahermosa, México.

Hernández-Santana, J., Méndez-Linares, A., Bollo-Manent, M., 2012. Análisis morfoestructural del relieve noroccidental del Estado de Chiapas, México: *Revista*

Geográfica Venezolana, 53, 57–75.

Herron, M., 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sedim. Petrol.* (58)820–829.

Jackson, M., 1958. *Soil Chemical Analysis*. Prentice-Hall, Inc., N. Jersey. 498 pp.

Jiménez-Cisneros, B., 2001. *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México, DF: Editorial Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA.

Kasper-Zubillaga, J., A. Carranza-Edwards and L. Rosales-Hoz, 1999. Petrography and geochemistry of holocene sands in the western Gulf of Mexico: implications for provenance and tectonic setting. *Journal of Sedimentary Research*, 69(5):1003-1010.

Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., Morton-Bermea, O., 2008, Heavy metals and rare earth elements in coastal and inland dune sands of El Vizcaino desert, Baja California peninsula, México: *Marine Georesources and Geotechnology*, 26(3), 172-188.

Kirschbaum, A., Murray, J., Arnosio, M., Tonda, R., Cacciabue, L., 2012. Pasivos ambientales mineros en el noroeste de Argentina: aspectos mineralógicos, geoquímicos y consecuencias ambientales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), 248-264.

Komar, P., 1976. *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

Laino-Guanes, R., Bello-Mendoza, R., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., Jiménez-Otárola, F., Musálem-Castillejos, K., 2015. Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VI(4)61-74.

Lankford, R., 1977. "Coastal lagoons: their origin and classification", in Wiley, M. (ed.), *Estuarine Processes*, Academic Press, New York, pp. 182-215.

Leal-Ascencio, M. T., Miranda, S., Sánchez, E., PrietoGarcía, F., Gordillo, A., 2009. Metals Pollution in the El Limon Lagoon, Chiapas, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(3), 415-421.

Lerman, A., 1979. *Geochemical Processes Water and Sediment Environments*. John Wiley & Sons. 481p.

Machain-Castillo, M., Ruiz-Fernandez, A., Alonso-Rodríguez, R., Sanchez-Cabeza, J., Gío-Argaez, F., Rodríguez-Ramírez, A., Villegas-Hernández, R., Mora-García, A., Fuentes-Sánchez, A., Cardoso-Mohedano, J., Hernandez-Becerril, D., Esqueda-Lara, K., Santiago-Perez, S., Gómez-Ponce, M., Pérez-Bernal, L., 2020 Anthropogenic and natural impacts in the marine area of influence of the Grijalva – Usumacinta River (Southern Gulf of Mexico) during the last 45 years. *Mar. Poll. Bull.* (156) 111-245.

Manzano, O., 1989. Estudio geomorfológico para la zonificación de las áreas de manejo de la reserva de la biósfera “Los Pantanos de Centla Tabasco”. Tesis del Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México.

Márquez, A., Pérez, V., Márquez, E., Flores, Z., 2007. Cambios en el tamaño de los sedimentos de las playas del litoral del Municipio de Solidaridad por efectos climáticos estacionales. *Revista de la Universidad del Caribe*, 59-68.

Monreal-Gómez, M., Salas-de-León, D., 1990. Simulación de la circulación de la Bahía de Campeche. *Geofísica Internacional* 29(2): 101-111.

Monreal-Gómez, M., Salas-de-León, D., 1997. Circulación y estructura termohalina del Golfo de México. En: LavínPeregrina MF (ed). *Contribuciones a la oceanografía física en México*. Monografía 3: 183-199, Unión Geofísica Mexicana, Cd. de México.

Mora, J.C., Jaimes-Viera, M.C., Garduño-Monroy, V.H., Layer, P.W., Pompa-Mera, V., Godínez, M.L., 2007. Geology and geochemistry characteristics of the Chiapanecan

Volcanic Arc (Central Area), Chiapas, Mexico: *Journal of volcanology and geothermal research*, 62, 43-72.

Morton-Bermea, O, Armienta, M.A. y Ramos S., 2010. Rare-Earth element distribution in water from El Chichon Volcano Crater Lake, Chiapas, México: *Geofísica Internacional*, 49(1), 43-54.

Müller, G., 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geol. J.* 2, 109–118.

Nesbitt, H., Young, G., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* (299)715–717.

Ortiz, M., 1988. Evidencias de cambios geomorfológicos del sistema litoral mediante el análisis de imágenes aéreas, p. 43-54. *In: Memorias ecología y conservación del delta de los ríos Usumacinta y Grijalva*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. División Regional, Tabasco. Gobierno del Estado. 714 p.

Ortiz, M., 1991, Retroceso Reciente de la Línea de Costa del Frente Deltaico del Río San Pedro, Campeche–Tabasco. Instituto de Geografía, UNAM.

Ortiz, M., Benítez, J., 1996, Elementos teóricos para el entendimiento de los problemas de impacto ambiental en las planicies deltaicas: la región de Tabasco y Campeche, en Botello, A. V., J. L. Rojas-Galaviz, J. Benítez y D. Zárate-Lomelí (eds.), *Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias*, EPOMEX, Serie científica 5, Universidad Autónoma de Campeche, pp. 483-503.

Ortiz, M., Méndez, A., 2004. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las costas bajas del Golfo de México y Mar Caribe. En: Rivera Arriaga, E., G. J. Villalobos, I. Azuz Adeath, y F. Rosado May (eds.), *El Manejo Costero en México*. Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. 654 p.

Palacio, A., 2010, La Morfología Costera Posthuracán como Indicador de la Intensidad de la Amenaza por Huracanes. *Interciencia*, (6):400-406.

Peizhen, Z., Molnar, P., Downs, W., 2001, sedimentation rates and grain sizes 2-4 MY ago due to the influence of climate change on erosion rates. *Nature*, 410, 891-897.

Pérez, G., 1990. Energía del viento predominante. Atlas Nacional de México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Pérez-Cruz, Y. G., Rangel-Ruiz, L., Gamboa-Aguilar, J., 2013. Metales en almejas y sedimentos en la Reserva de la Biosfera "Pantanos de Centla" Tabasco, México. *Hidrobiológica*, 23(1), 1-8.

Psuty, N., 1965. Beach – Ridge Development in Tabasco, *Annals of the Association of American Geographers*, (55): 112–124.

Psuty, N., 1967. The Geomorphology of Beach Ridges in Tabasco, México, *Coastal Studies Series* (18).

Ramos-Vázquez, M., Armstrong-Altrin, J., Machain-Castillo, M., Gío-Argáez, F., 2018. Foraminiferal assemblages, 14C ages, and compositional variations in two sediment cores in the western Gulf of Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*. (88)480-496.

Rivera-Arriaga, E., e I. Azuz Adeath, 2010. La gobernanza de las costas y océanos de México en un clima cambiante, p. 739-772. En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual y G.J. Villalobos-Zapata (eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Universidad Autónoma de Campeche, Cety's Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.

Roblero-Morales, M., 2011. El despertar de la serpiente, la Sierra Madre de Chiapas en riesgo: extracción minera y comunidades en resistencia en Chicomuselo, Chiapas. Tesis

de maestría. San Cristóbal de Las Casas, México: Universidad Autónoma Chapingo.

Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Santiago-Pérez, S., Méndez-Jaime, C., Doger-Badillo, R., 1994. Study of Anthropogenically Induced Trace Metal on the Continental Shelf in the Southeastern Part of the Gulf of Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 10(1), 9-13.

Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Carvajal, P., Méndez, C., Ruiz, M., 2003. Physico-chemical seasonal variability of a tropical estuary: major and minor elements in water and air. *Environment Geology* 44, 790-798.

Rothwell, R., 1989, *Minerals and Mineraloids in Marine Sediments*, Elsevier Applied Science, London, 278pp

Rubio, H., Triana, C., 2006). *Gestión integrada de crecientes, estudio del caso Grijalva* [Documento en pdf]. Recuperado de https://www.floodmanagement.info/publications/casestudies/cs_mexico_full.pdf

Salas-Urviola, F., Guadarrama-Guzmán, P., Gutiérrez-Bazán, J., García-Luna, N., Fernández-Villagómez, G., Alarcón-Herrera, M., 2020, Determinación de posible drenaje ácido de mina y caracterización de jales mineros provenientes de la mina cerro de mercado, Durango, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(3), 729-744.

Shepard, F., 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Research*, 24 (3): 151–158.

Sherpard, F., 1973, *Submarine Geology*, 3rd ed. Harper & Row, New York.

Shotyk, W., Krachler, M. y Chen, B., 2005. Anthropogenic impacts on the biogeochemistry and cycling of antimony. *Met. Ions Biol. Syst.* 44: 171-203.

Silva, R., Villatoro, M., Ramos, F., Pedroza, D., Ortiz, M., Mendoza, E., Delgadillo, M., Escudero, M., Félix, A., Cid, A., 2014. Caracterización de la zona costera y planeamiento

de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 117 p.

Solís-Castillo, B., Ortiz-Pérez, M., Solleiro-Rebolledo, E. 2014. Unidades geomorfológico-ambientales de las Tierras Bajas Mayas de Tabasco-Chiapas en el río Usumacinta: Un registro de los procesos aluviales y pedológicos durante el Cuaternario. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, (66)2:279-290.

Tapia-Fernandez, H., Armstrong-Altrin, J., Selvaraj, K., 2017. Geochemistry and U–Pb geochronology of detrital zircons in the Brujas beach sands, Campeche, Southwestern Gulf of Mexico Mexico; *J. South Am. Earth Sci.* (76) 346–361.

Taylor, S., McLennan, S., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, UK, p.349.

Thom, B., 1967, *Mangrove Ecology and Deltaic Geomorphology*. Tabasco, México, *Journal of Ecology*, (55): 301–343.

Thompson, R.N. 1982. Magmatism of the British Tertiary Volcanic Province. *Scottish Journal of Geology* 18: 49-107.

Torres, V., Márquez, A., Bolongaro, A., Chavarria, J., Expósito, G., Márquez, E., 2010. Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático, p. 325-344. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

Vázquez, G. F., Elias, D. M., Aguayo, J. E., Baeza, A., 1996. Trace Metal Species in Aquatic Samples of the Tabasco Lagoons, Mexico. *Environment International*, 22(3), 377-382.

Vidal, R., 1990. Precipitación, *Atlas Nacional de México*, Hoja IV.4.6, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Villanueva, F. S., Botello, A. V., 1992. Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe mexicano: una revisión. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 8(1), 47-61.

Visher, G., 1969. Grain size distribution and depositional processes. *Jour. Sed. Pet.*, (39)3.

Weber, B., Gruner B., Hecht, L., Molina-Garza, R., Köhler, H., 2004. El descubrimiento de basamento metasedimentario en el macizo de Chiapas: La "Unidad La Sepultura". *GEOS*, Vol. 22, No. 1, p. 2-11.

Weber, B., Valencia, V., Schaaf, P., Ortega-Gutiérrez, F., 2009. Detrital zircon ages from the Lower Santa Rosa Formation, Chiapas: implications on regional Paleozoic stratigraphy. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* (26)1:260-276.

Walkiey, A., 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils.-effects of variation in digestion conditions of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 63: 251-264.

West, R., Psuty, N. y Thom, B., 1969, *The Tabasco Lowlands of Southeastern Mexico*, Coastal Studies Series No. 27, Louisiana State University Press, Baton Rouge.

Wentworth, C., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Jour. Geol.* 30(5): 377-392.

Wilson, S. C., Lockwood, P. V., Ashley, P. M., Tighe, M., 2010. The chemistry and behaviour of antimony in the soil environment with comparisons to arsenic: A critical review. *Environ. Pollut.* 158: 1169-1181.

Wrokiewics, D.J., Condie, K.C., 1987, *Geochemistry of Archaean shales from the*

Witwatersand supergroup, South Africa, Source-area weathering and provenance: *Geochimica Cosmochimica Acta*, 51, 2401-2416.

Yáñez, A., 1971. Procesos costeros y sedimentos recientes de la Plataforma Continental al sur de la Bahía de Campeche *Bol. Soc. Geol. Mexicana*. (32):15-115.

Zavala Hidalgo, J., Morey, S., y O'Brien, J., 2003. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *J. Geophys. Res.*, 108 (12), 3389.

7. Anexos

Anexo 1. Granulometría de sedimentos superficiales de las desembocaduras Grijalva y SPSP, mayo 2017.

MUESTRA	FRACCIONES (%)			PARÁMETROS ESTADÍSTICOS				MODA		MEDIANA (f50)	
	ARENAS	LIMOS	ARCILLAS	Mzf	s _f	Sk _f	K _G	mm	f	mm	f
1	98.4	1.2	0.4	2.1	0.3	0.2	1.0	245.2	2.0	243.7	2.0
2	0.0	80.8	19.3	6.7	1.5	0.1	1.1	9.4	6.7	9.4	6.7
3	0.0	80.6	19.5	6.9	1.4	0.2	1.2	9.4	6.7	8.6	6.9
4	0.0	80.7	19.3	6.9	1.4	0.1	1.2	9.4	6.7	8.7	6.9
5	0.0	81.2	18.8	7.0	1.3	0.2	1.2	10.3	6.6	8.7	6.8
6	0.0	82.1	17.8	6.9	1.4	0.2	1.3	10.3	6.6	9.1	6.8
7	2.0	84.9	13.1	6.2	1.6	0.1	1.0	55.1	4.2	13.5	6.2
8	2.0	81.4	16.6	6.3	1.7	0.1	0.9	55.1	4.2	12.4	6.3
9	4.2	83.4	12.4	5.9	1.6	0.4	1.0	45.8	4.5	21.2	5.6
10	0.0	75.3	24.7	7.1	1.4	0.1	1.1	8.5	6.9	7.6	7.0
11	0.6	81.7	17.6	6.6	1.6	0.1	1.1	10.3	6.6	10.2	6.6
12	0.0	79.4	20.6	7.0	1.3	0.2	1.2	9.4	6.7	8.1	6.9
13	0.0	81.3	18.7	7.0	1.3	0.2	1.3	10.3	6.6	8.5	6.9
14	0.0	80.7	19.3	7.0	1.2	0.2	1.2	10.3	6.6	8.3	6.9
15	0.0	84.4	15.6	6.7	1.4	0.2	1.3	11.3	6.5	10.6	6.6
16	0.1	81.8	18.1	6.7	1.5	0.1	1.2	10.3	6.6	9.8	6.7
17	0.0	80.9	19.2	6.7	1.5	0.1	1.1	9.4	6.7	9.5	6.7
18	0.0	77.7	22.3	7.1	1.4	0.2	1.2	9.4	6.7	7.8	7.0
19	0.0	83.3	16.7	7.0	1.3	0.2	1.2	10.3	6.6	8.5	6.9
20	0.0	80.4	19.6	7.0	1.3	0.2	1.3	9.4	6.7	8.4	6.9
21	0.0	77.7	22.3	6.8	1.6	0.1	1.0	9.4	6.7	9.2	6.8
22	0.0	79.0	21.0	6.8	1.6	0.1	1.0	8.5	6.9	8.9	6.8
23	0.0	75.5	24.5	7.1	1.4	0.1	1.1	8.5	6.9	7.4	7.1
24	0.0	81.0	19.0	6.9	1.4	0.2	1.2	10.3	6.6	8.9	6.8
25	4.0	83.3	12.7	5.9	1.7	0.2	0.9	55.1	4.2	18.2	5.8
26	32.0	61.4	6.6	4.9	1.5	0.6	1.1	72.9	3.8	47.9	4.4
27	0.2	85.5	14.3	6.4	1.5	0.2	1.1	13.6	6.2	12.5	6.3
28	26.8	67.9	5.3	4.8	1.3	0.5	1.3	66.4	3.9	43.8	4.5
29	10.2	79.7	10.1	5.5	1.6	0.5	1.0	55.1	4.2	30.2	5.1
30	1.2	83.4	15.4	6.4	1.6	0.1	1.1	11.3	6.5	11.6	6.4
31	0.5	80.9	18.7	6.7	1.6	0.1	1.1	10.3	6.6	9.9	6.7
32	0.1	80.3	19.6	6.8	1.6	0.1	1.1	9.4	6.7	9.4	6.7
33	1.4	85.0	13.6	6.2	1.6	0.1	1.0	50.2	4.3	13.8	6.2
34	0.3	76.3	23.4	7.0	1.5	0.1	1.1	8.5	6.9	8.1	7.0

Anexo 2. Granulometría de sedimentos superficiales de las desembocaduras Grijalva y SPSP, noviembre 2017.

	FRACCIONES (%)			PARÁMETROS ESTADÍSTICOS				MODA		MEDIANA (f50)	
	ARENAS	LIMOS	ARCILLAS	Mzf	s _f	Sk ₁	K _G	mm	f	mm	f
2	0.9	77.5	21.6	6.5	1.8	0.2	0.9	41.7	4.6	13.0	6.3
3	0.0	74.1	25.9	7.0	1.6	0.1	1.0	7.8	7.0	8.0	7.0
4	0.2	80.8	19.0	6.7	1.6	0.1	1.1	10.3	6.6	9.9	6.7
5	0.0	76.4	23.6	6.7	1.7	0.2	0.9	41.7	4.6	10.1	6.6
6	3.6	80.7	15.7	6.0	1.8	0.3	0.8	55.1	4.2	19.0	5.7
7	0.1	78.6	21.3	6.8	1.6	0.1	1.0	10.3	6.6	9.5	6.7
8	0.0	79.4	20.6	6.7	1.6	0.2	1.0	18.0	5.8	11.0	6.5
9	0.2	77.0	22.9	6.8	1.6	0.1	1.0	10.3	6.6	9.6	6.7
10	0.0	81.6	18.4	6.5	1.6	0.1	0.9	41.7	4.6	10.9	6.5
11	0.1	79.3	20.6	6.9	1.5	0.1	1.1	10.3	6.6	8.9	6.8
12	0.0	78.8	21.2	7.0	1.4	0.2	1.2	10.3	6.6	8.4	6.9
13	0.0	78.3	21.7	6.9	1.5	0.1	1.1	10.3	6.6	9.0	6.8
14	0.2	81.4	18.3	6.5	1.6	0.2	1.0	11.3	6.5	11.5	6.4
15	0.1	80.7	19.2	6.8	1.5	0.1	1.1	10.3	6.6	9.6	6.7
16	0.0	79.2	20.8	6.9	1.4	0.1	1.1	10.3	6.6	8.9	6.8
17	0.0	79.1	20.9	6.8	1.6	0.1	1.0	11.3	6.5	9.9	6.7
18	0.0	77.0	23.0	7.1	1.4	0.2	1.2	9.4	6.7	7.9	7.0
19	0.1	80.1	19.8	6.8	1.5	0.1	1.1	10.3	6.6	9.4	6.7
20	0.0	78.6	21.4	7.0	1.4	0.2	1.2	10.3	6.6	8.6	6.9
21	2.3	79.5	18.2	6.3	1.8	0.2	0.8	45.8	4.5	13.7	6.2
22	0.4	77.1	22.9	7.0	1.4	0.1	1.2	8.5	6.9	7.9	7.0
23	0.0	76.2	23.8	7.0	1.6	0.1	1.1	8.5	6.9	8.2	6.9
24	1.4	81.9	16.7	6.4	1.7	0.1	1.0	10.3	6.6	11.6	6.4
25	0.7	83.0	16.3	6.7	1.4	0.1	1.2	11.3	6.5	10.4	6.6
26	3.1	82.3	14.6	6.2	1.6	0.2	1.0	14.9	6.1	14.2	6.1
27	3.5	83.1	13.5	6.0	1.6	0.3	0.9	50.2	4.3	18.0	5.8
28	24.6	68.1	7.3	5.1	1.5	0.5	1.0	66.4	3.9	41.0	4.6
29	1.4	81.4	17.2	6.4	1.7	0.1	1.0	50.2	4.3	11.9	6.4
30	2.4	85.7	12.0	6.0	1.5	0.2	1.0	26.1	5.3	16.9	5.9
31	0.2	80.2	19.5	6.6	1.6	0.2	1.0	11.3	6.5	11.0	6.5
32	0.1	79.1	20.8	6.9	1.5	0.1	1.2	9.4	6.7	8.9	6.8
33	0.0	79.6	20.4	6.7	1.6	0.1	1.0	10.3	6.6	10.3	6.6
34	0.5	80.4	19.1	6.7	1.5	0.1	1.1	10.3	6.6	9.7	6.7

Anexo 3. Carbonatos y carbono orgánico en sedimentos superficiales de la desembocadura Grijalva y SPSP, mayo 2017.

Muestra	%CO ₃	%OC
1	5.4	0.1
2	19.8	1.6
3	21.2	1.6
4	22.7	1.6
5	27.4	1.6
6	25.8	1.4
7	25.0	1.3
8	21.9	1.3
9	23.7	0.8
10	21.6	1.4
11	21.8	1.2
12	24.9	1.4
13	26.3	1.6
14	27.7	1.8
15	28.0	0.8
16	23.0	1.4
17	23.7	1.3
18	22.9	1.4
19	28.4	1.6
20	25.8	1.5
21	15.5	1.1
22	19.5	1.2
23	20.1	1.6
24	24.0	1.5
25	26.7	0.9
26	26.7	0.7
27	29.4	1.0
28	25.4	0.5
29	23.9	1.0
30	27.7	1.3
31	24.1	1.3
32	24.6	1.3
33	27.4	0.8
34	27.0	1.3

Anexo 4. Carbonatos y carbono orgánico en sedimentos superficiales de la desembocadura Grijalva y SPSP, noviembre 2017.

Muestra	%CO ₃	%OC
2	17.3	1.8
3	20.0	1.6
4	18.5	2.2
5	20.9	1.7
6	20.4	1.9
7	21.6	2.2
8	22.7	0.5
9	17.6	1.4
10	16.9	1.2
11	18.4	1.6
12	21.5	0.9
13	20.9	1.7
14	22.8	1.2
15	24.7	1.5
16	22.3	1.9
17	19.9	1.7
18	22.7	2.0
19	22.3	1.2
20	21.4	1.9
21	11.8	0.9
22	18.6	1.1
23	19.4	1.2
24	26.3	1.4
25	28.6	1.2
26	29.0	1.0
27	25.6	0.8
28	20.7	0.3
29	25.0	0.9
30	28.1	0.9
31	21.8	1.8
32	24.9	1.2
33	25.6	1.1
34	25.9	1.0

**Anexo 5. Elementos mayores en sedimentos de las desembocaduras Grijalva y SPSP,
mayo 2017.**

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI
1	72.6	9.9	0.3	2.6	0.0	3.1	1.7	1.7	2.3	0.4	0.1	4.4
2	39.4	11.4	0.6	5.3	0.1	4.0	10.9	2.5	1.0	0.5	99.6	22.5
3	45.1	11.8	0.6	5.0	0.1	7.6	3.1	1.8	1.6	0.4	0.6	22.5
4	43.3	11.3	0.6	5.1	0.1	4.1	12.1	1.5	1.1	0.5	100.4	20.0
5	36.7	11.2	0.6	5.1	0.1	14.5	4.1	1.4	0.7	0.6	0.9	24.9
6	37.3	10.9	0.6	5.0	0.1	13.2	3.9	1.7	0.7	0.5	1.2	26.2
7	41.0	10.3	0.5	4.7	0.1	13.2	3.8	1.2	0.9	0.5	0.7	21.7
8	42.5	11.4	0.6	5.3	0.1	4.4	11.7	1.3	1.1	0.5	100.7	21.0
9	43.9	10.7	0.6	4.8	0.1	12.9	4.0	1.2	1.1	0.5	0.6	19.8
10	40.8	12.7	0.6	5.8	0.1	4.2	11.5	1.9	1.0	0.5	100.8	20.4
11	39.6	11.9	0.6	5.4	0.1	11.7	3.8	2.1	1.1	0.5	1.0	22.3
12	43.5	13.4	0.6	6.0	0.1	4.3	14.8	2.0	1.2	0.5	110.6	17.2
13	34.2	10.8	0.5	4.9	0.1	14.6	3.9	2.1	0.7	0.5	1.6	26.9
14	33.7	10.5	0.5	1.9	0.1	15.0	3.8	1.7	0.7	0.6	0.4	26.4
15	37.1	10.0	0.5	4.5	0.1	3.6	15.3	1.3	0.8	0.6	98.1	23.3
16	39.5	11.1	0.6	5.0	0.1	13.1	4.0	1.6	1.0	0.5	1.1	23.3
17	41.7	11.8	0.6	5.2	0.1	3.9	11.9	1.4	1.7	0.5	99.6	20.2
18	38.5	11.5	0.6	5.0	0.1	11.9	3.8	2.0	0.9	0.5	1.3	22.2
19	35.6	11.1	0.5	5.1	0.1	15.3	3.9	2.1	0.8	0.6	1.6	24.7
20	36.0	11.1	0.5	5.0	0.1	14.6	3.8	1.8	0.7	0.5	1.0	25.8
21	42.8	12.2	0.6	5.6	0.1	12.5	4.1	2.2	1.1	0.5	1.1	16.0
22	41.1	11.8	0.6	5.1	0.1	10.0	3.7	2.5	1.2	0.4	1.1	21.9
23	42.5	12.6	0.6	5.6	0.1	10.7	3.8	2.1	1.3	0.4	1.3	19.3
24	36.2	10.9	0.5	5.0	0.1	14.4	4.1	2.2	0.6	0.5	1.7	23.6
25	41.8	9.7	0.5	4.2	0.1	15.1	3.7	1.6	0.9	0.5	1.4	21.2
26	44.5	9.3	0.6	4.1	0.1	14.9	3.5	1.3	1.0	0.6	0.3	19.2
27	39.6	11.9	0.6	5.4	0.1	11.7	3.8	2.1	1.1	0.5	1.0	22.0
28	48.6	9.5	0.7	4.1	0.1	12.7	3.5	1.2	1.0	0.6	0.2	16.6
29	43.6	10.8	0.6	4.6	0.1	13.1	3.7	1.5	1.1	0.5	1.4	19.6
30	40.3	10.4	0.5	4.7	0.1	3.7	14.8	1.4	0.9	0.5	100.0	21.5
31	42.1	11.4	0.6	5.1	0.1	13.1	3.7	1.6	1.1	0.5	1.0	20.5
32	39.8	10.7	0.5	4.8	0.1	14.0	3.8	1.6	0.9	0.5	1.4	22.6
33	41.0	10.1	0.6	4.4	0.1	15.5	3.5	1.4	1.0	0.6	0.7	21.7
34	39.4	10.4	0.5	4.6	0.1	14.3	3.7	2.0	0.9	0.5	1.3	22.7

Anexo 6. Elementos mayores en sedimentos de las desembocaduras Grijalva y SPSP,

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI	TOTAL
2	44.2	12.1	0.59	5.4	0.1	9.4	3.8	1.7	1.3	0.4	1.0	19.4	99.3
3	43.1	12.3	0.59	5.6	0.1	10.3	3.9	1.4	1.4	0.5	0.8	19.0	98.9
4	44.5	11.6	0.59	5.4	0.1	10.1	3.9	1.9	1.2	0.4	0.9	19.4	100.1
5	42.9	12.3	0.63	5.9	0.1	11.1	4.5	1.4	1.3	0.5	0.8	19.8	101.1
6	43.9	11.2	0.52	5.4	0.1	10.7	4.6	1.6	1.2	0.4	0.7	20.3	100.5
7	39.5	11.9	0.54	5.8	0.1	11.2	4.4	1.6	1.2	0.4	0.7	23.0	100.4
8	39.5	10.8	0.56	5.3	0.1	12.2	4.4	1.6	1.0	0.5	0.7	23.4	100.0
9	40.0	12.4	0.56	6.1	0.1	8.8	4.9	1.8	1.4	0.4	0.4	23.0	99.9
10	47.2	11.3	0.59	4.9	0.1	8.7	3.6	2.0	1.3	0.4	1.0	17.6	98.8
11	39.7	12.1	0.60	5.8	0.1	9.8	4.0	2.9	1.2	0.4	1.4	22.2	100.3
12	32.2	9.6	0.44	4.5	0.1	9.4	3.4	1.5	0.8	0.4	0.7	37.7	100.8
13	39.0	11.4	0.54	5.5	0.1	10.7	4.4	1.7	1.1	0.4	0.9	22.6	98.4
14	42.0	10.5	0.54	4.9	0.1	12.1	4.3	1.3	1.0	0.5	0.6	21.1	98.8
15	39.7	11.2	0.56	5.4	0.1	14.0	4.2	1.1	0.9	0.5	0.6	22.5	100.8
16	39.3	12.1	0.57	5.8	0.1	11.5	4.5	1.6	1.0	0.5	0.9	22.5	100.5
17	41.5	12.3	0.59	5.8	0.1	10.6	4.8	1.3	1.2	0.4	0.5	21.2	100.3
18	36.9	11.7	0.55	5.7	0.1	12.6	4.3	1.9	1.0	0.5	1.0	24.1	100.3
19	38.9	11.5	0.53	5.5	0.1	11.9	4.4	1.8	1.0	0.5	1.0	22.6	99.8
20	39.5	11.5	0.58	5.4	0.1	12.1	3.9	1.9	0.8	0.5	0.9	23.3	100.4
21	56.5	12.8	0.68	5.3	0.1	7.4	3.3	1.7	2.0	0.4	0.3	12.4	103.0
22	42.8	12.4	0.59	5.5	0.1	10.0	3.8	2.3	1.2	0.4	1.0	19.9	100.1
23	41.7	12.3	0.57	5.5	0.1	10.3	3.7	2.1	1.2	0.4	1.0	21.3	100.2
24	40.9	10.4	0.57	4.8	0.1	14.1	3.7	1.3	0.9	0.6	1.2	20.6	99.1
25	36.7	9.9	0.48	4.6	0.1	16.4	3.8	1.6	0.8	0.6	1.0	24.8	100.6
26	42.3	9.8	0.57	4.3	0.1	16.1	3.8	1.0	0.8	0.6	0.5	21.2	101.1
27	41.5	12.5	0.56	6.0	0.1	11.6	4.6	2.0	1.1	0.5	1.1	18.6	100.0
28	52.8	9.6	0.57	3.9	0.1	11.1	3.6	1.5	1.2	0.4	0.5	14.9	100.1
29	41.6	10.3	0.56	4.5	0.1	13.4	3.5	1.5	0.8	0.5	0.9	20.4	98.2
30	40.3	9.4	0.51	4.1	0.1	15.7	3.7	1.6	0.8	0.5	0.8	23.3	100.9
31	42.7	10.9	0.61	4.8	0.1	12.6	3.6	1.6	1.0	0.5	1.1	20.6	100.0
32	40.8	11.4	0.57	5.2	0.1	14.2	3.9	1.5	1.0	0.6	1.0	21.4	101.5
33	42.9	10.4	0.60	4.5	0.1	14.5	3.6	1.3	0.8	0.6	0.6	19.8	99.6
34	39.3	10.6	0.55	4.7	0.1	13.8	3.6	1.4	0.9	0.6	0.9	21.5	97.9

Anexo 7. Elementos traza en sedimentos de las desembocaduras Grijalva y SPSP, mayo 2017.

Muestra	Li	Be	P	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	Sb	Cs	Ba	Hf	W	Tl	Pb	Th	U
1	16.49	1.16	0.07	4.22	0.30	34.33	131.43	10.68	79.68	4.71	34.31	10.24	70.89	233.13	10.47	53.05	7.23	0.36	0.92	0.31	1.77	639.25	1.38	0.53	0.43	11.38	4.44	1.03
2	45.54	1.53	0.15	12.52	0.58	81.46	257.97	17.87	163.06	19.33	71.62	14.20	71.30	539.46	22.32	140.22	10.06	0.69	1.66	0.43	4.17	282.94	3.56	0.64	0.45	15.52	6.69	2.42
3	44.15	1.52	0.16	11.87	0.61	82.34	281.18	17.85	163.50	26.20	71.65	14.23	71.84	571.44	23.19	132.37	10.74	0.73	2.40	0.85	4.09	290.82	3.40	0.69	0.45	15.15	7.14	2.51
4	37.76	1.44	0.15	8.78	0.58	76.00	317.99	16.71	152.28	16.39	65.67	13.00	63.68	519.66	19.49	138.57	10.30	0.75	1.59	0.39	3.27	269.44	3.49	0.63	0.42	13.75	6.33	2.44
5	45.70	1.47	0.17	11.41	0.54	77.46	202.19	16.85	154.01	18.00	66.59	12.81	64.34	716.14	20.80	102.30	9.10	0.41	1.45	0.38	3.89	248.33	2.63	0.60	0.40	14.69	6.14	2.47
6	43.26	1.40	0.15	11.90	0.52	73.87	205.32	16.37	152.15	16.38	64.64	12.63	64.03	714.86	19.60	102.57	8.83	0.60	1.54	0.38	3.75	232.14	2.63	0.55	0.39	14.45	6.21	2.39
7	39.00	1.43	0.15	10.09	0.58	73.83	280.18	16.74	153.59	15.83	64.48	12.94	66.49	652.57	23.02	149.20	10.21	0.60	1.52	0.39	3.54	288.46	3.75	0.63	0.42	14.27	6.48	2.51
8	42.13	1.54	0.15	10.99	0.60	82.61	301.93	19.44	189.95	19.04	70.31	14.01	73.19	521.77	22.36	118.93	10.41	1.26	1.69	0.44	3.92	292.53	3.05	0.66	0.46	14.74	6.76	2.49
9	36.84	1.40	0.14	9.20	0.60	73.35	303.05	16.42	146.30	15.54	63.78	12.70	63.20	550.20	22.31	129.94	10.38	0.56	1.46	0.39	3.39	296.83	3.30	0.62	0.42	12.87	6.34	2.44
10	50.95	1.68	0.17	13.91	0.61	88.48	238.97	19.15	167.82	22.28	76.79	15.33	74.00	572.23	22.60	113.92	10.28	0.51	1.66	0.45	4.48	286.48	2.87	0.66	0.47	16.81	7.33	2.57
11	47.22	1.56	0.15	12.05	0.59	82.60	223.37	17.61	158.95	19.23	73.87	14.76	73.10	594.67	22.72	112.32	10.23	0.68	1.70	0.46	4.31	365.28	2.91	0.66	0.46	16.52	6.90	2.51
12	47.87	1.56	0.15	11.07	0.58	81.49	212.37	17.53	159.71	20.69	72.42	14.50	72.80	671.95	21.74	102.92	9.87	0.68	1.71	0.43	4.30	271.56	2.68	0.65	0.45	15.89	6.88	2.55
13	45.62	1.44	0.16	10.97	0.53	75.92	194.66	16.51	150.64	15.97	66.59	13.27	64.61	773.28	20.36	90.25	8.98	0.58	1.54	0.39	3.99	231.80	2.34	0.59	0.41	14.64	6.29	2.46
14	44.31	1.41	0.16	11.84	0.52	73.81	193.35	16.16	148.64	15.77	64.72	12.74	63.89	787.77	19.81	92.99	8.80	0.60	1.52	0.38	3.81	223.74	2.42	0.59	0.39	14.56	6.27	2.44
15	40.32	1.38	0.15	10.04	0.57	71.98	213.52	15.65	143.36	14.73	62.56	12.59	63.09	796.08	21.51	113.86	9.96	0.58	1.50	0.39	3.52	271.71	2.90	0.62	0.39	14.08	6.38	2.51
16	43.46	1.47	0.15	11.52	0.58	77.62	233.37	17.06	159.21	17.03	67.25	13.49	68.42	618.93	21.72	115.59	10.23	0.60	1.61	0.41	3.85	276.35	2.94	0.57	0.41	14.30	6.53	2.48
17	45.50	1.56	0.15	11.77	0.62	82.56	252.47	17.76	161.66	18.53	72.40	14.65	74.28	572.60	23.05	125.29	10.88	0.62	1.69	0.44	4.19	316.02	3.23	0.67	0.46	15.29	7.02	2.56
18	46.78	1.52	0.16	11.94	0.58	80.71	206.96	16.72	145.15	17.88	70.79	14.32	70.53	635.80	21.29	109.27	9.89	0.64	1.65	0.48	4.20	292.43	2.82	0.63	0.44	15.49	6.56	2.50
19	45.97	1.43	0.16	12.07	0.54	75.97	193.10	16.14	145.09	15.99	66.69	13.21	64.84	791.89	20.21	94.51	9.21	0.57	1.54	0.38	3.93	239.61	2.41	0.51	0.39	14.69	6.27	2.51
20	44.65	1.41	0.15	10.99	0.54	74.72	194.82	15.78	139.97	15.89	65.74	13.09	64.85	738.21	20.48	98.97	9.18	0.57	1.52	0.44	3.88	249.40	2.56	0.60	0.40	14.53	6.22	2.50
21	44.40	1.57	0.16	10.93	0.64	84.72	253.81	16.14	124.10	18.50	73.96	15.17	73.78	412.29	21.94	149.26	11.09	0.63	1.69	0.44	4.08	385.62	3.79	0.54	0.44	15.07	6.53	2.35
22	46.00	1.51	0.14	11.67	0.58	79.78	203.02	15.98	134.08	16.93	70.78	14.38	72.32	517.09	21.35	127.58	9.97	0.61	1.63	0.44	4.15	316.68	3.19	0.62	0.44	14.84	6.37	2.43
23	50.16	1.62	0.15	12.18	0.61	85.55	213.06	17.15	146.28	19.34	75.94	15.40	77.14	542.05	22.61	128.01	10.39	0.63	1.67	0.51	4.51	324.44	3.29	0.66	0.46	16.03	6.94	2.57
24	43.97	1.48	0.15	11.02	0.58	78.36	240.66	17.07	155.51	20.78	70.22	13.58	67.65	670.83	22.44	143.85	9.91	0.68	1.63	0.42	3.94	265.09	3.65	0.65	0.43	15.34	6.79	2.59
25	36.06	1.33	0.15	9.21	0.59	68.10	259.00	14.91	126.43	12.95	58.86	11.96	62.55	718.94	22.08	142.22	10.81	0.57	1.46	0.36	3.14	306.33	3.58	0.55	0.38	12.70	6.18	2.46
26	33.12	1.30	0.18	10.33	0.68	73.28	416.07	15.07	116.65	13.67	59.36	11.87	60.66	728.31	25.84	271.06	12.44	0.37	1.41	0.35	2.73	325.82	6.55	0.67	0.37	11.97	7.21	2.71
27	34.00	1.27	0.14	8.41	0.56	65.23	249.10	14.64	123.42	12.69	57.01	11.66	60.81	750.83	19.96	128.85	10.16	0.59	1.40	0.36	3.03	299.91	3.28	0.61	0.39	12.35	5.83	2.40
28	28.88	1.25	0.16	8.55	0.70	70.52	489.56	14.68	112.97	12.85	58.70	11.86	61.87	590.19	24.98	242.11	13.02	0.47	1.54	0.36	2.62	364.90	6.01	0.67	0.39	11.26	6.75	2.57
29	39.17	1.38	0.14	9.94	0.57	70.54	213.02	15.35	129.87	14.90	62.56	13.00	65.88	638.35	20.87	114.74	10.24	0.54	1.49	0.40	3.47	328.39	2.93	0.61	0.42	13.23	6.04	2.37
30	39.55	1.40	0.15	9.81	0.55	71.50	228.87	16.11	144.94	15.35	62.24	12.64	64.14	723.42	20.88	117.85	9.87	0.63	1.48	0.42	3.47	281.39	3.02	0.59	0.41	13.92	6.31	2.57
31	43.86	1.45	0.15	10.74	0.61	77.56	238.73	16.42	141.63	16.92	68.63	13.77	69.01	614.78	22.28	131.52	10.69	0.57	1.63	0.42	3.90	316.25	3.35	0.60	0.43	14.42	7.81	2.76
32	42.44	1.39	0.15	10.91	0.57	72.64	213.75	15.24	127.16	14.82	64.21	13.03	66.44	708.99	20.91	127.14	9.90	0.62	1.52	0.40	3.65	299.43	3.22	0.61	0.41	13.82	6.16	2.65
33	37.84	1.30	0.15	9.98	0.58	67.72	222.60	14.28	117.39	13.76	59.79	12.16	61.27	767.66	21.42	145.78	10.23	0.51	1.48	0.37	3.23	300.16	3.63	0.57	0.38	12.75	5.96	2.56
34	43.46	1.42	0.17	11.70	0.58	74.27	200.71	15.14	123.82	15.51	63.81	12.44	64.31	737.67	20.90	137.40	10.02	0.40	1.42	0.39	3.55	301.04	3.44	0.61	0.40	13.72	6.20	2.68

**Anexo 8. Elementos traza en sedimentos de las desembocaduras Grijalva y SPSP,
noviembre 2017.**

Muestra	Li	Be	P	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	Sb	Cs	Ba	Hf	W	Tl	Pb	Th	U
2	44.49	1.63	0.13	10.23	0.64	82.52	280.62	18.41	165.28	22.00	74.40	15.00	72.19	439.51	22.87	163.93	10.59	0.58	1.55	0.45	4.03	327.38	4.09	1.51	0.46	14.48	6.83	2.38
3	48.38	1.73	0.14	10.81	0.65	88.76	290.78	20.73	190.37	22.80	80.77	15.61	75.29	494.43	23.36	142.51	10.73	0.63	1.66	0.45	4.31	314.96	3.63	0.84	0.48	15.49	7.16	2.55
4	42.20	1.60	0.13	9.54	0.64	81.81	310.83	18.74	170.37	21.77	72.06	14.38	69.61	438.13	23.97	180.30	10.87	0.59	1.53	0.45	3.79	317.10	4.54	0.87	0.44	13.97	6.57	2.50
5	46.05	1.65	0.13	10.82	0.62	86.24	308.24	21.56	211.64	22.74	75.93	15.07	74.03	482.22	24.13	142.22	10.30	0.63	1.57	0.45	4.22	285.28	3.60	0.78	0.47	15.35	7.04	2.42
6	38.80	1.59	0.15	9.68	0.59	80.11	325.29	21.87	225.47	21.63	70.18	13.88	70.07	429.26	22.55	138.00	9.85	0.62	1.50	0.42	3.61	282.30	3.50	0.76	0.45	13.30	6.61	2.35
7	44.37	1.71	0.14	11.39	0.58	91.73	310.03	23.91	261.07	26.30	75.98	15.06	72.27	406.20	23.31	114.62	9.41	0.84	1.59	0.46	4.12	235.65	2.93	0.78	0.48	14.27	6.76	2.32
8	40.21	1.54	0.14	9.75	0.59	79.64	296.69	20.90	218.00	21.29	69.46	13.63	67.18	495.89	22.70	125.23	9.67	0.61	1.53	0.42	3.63	253.88	3.21	0.80	0.43	12.97	6.34	2.32
9	41.59	1.59	0.14	10.97	0.55	87.83	327.08	23.51	270.55	26.10	72.70	14.17	69.41	289.26	21.53	102.06	8.83	0.73	1.50	0.45	3.88	219.80	2.65	0.73	0.45	13.41	6.25	2.16
10	39.47	1.53	0.14	9.03	0.66	77.97	302.95	17.11	145.39	19.25	69.32	14.39	70.21	413.60	23.82	213.66	11.50	0.57	1.56	0.46	3.58	379.72	5.31	0.79	0.44	13.05	6.79	2.35
11	48.73	1.64	0.14	10.33	0.62	84.77	230.07	18.71	166.27	22.21	78.08	15.10	70.53	481.39	21.97	118.84	10.01	0.60	1.67	0.47	4.26	292.17	3.03	0.78	0.44	15.43	6.83	2.34
12	42.32	1.48	0.13	9.88	0.54	73.38	213.76	17.06	163.54	18.20	66.51	13.23	63.85	496.61	19.88	104.78	8.68	0.74	1.42	0.38	3.74	241.66	2.69	0.70	0.39	12.99	5.94	2.13
13	45.68	1.68	0.13	10.94	0.60	87.86	308.19	22.22	236.42	23.98	75.54	14.86	72.82	472.17	23.18	125.59	9.84	0.67	1.66	0.45	4.09	256.94	3.19	0.77	0.46	14.32	6.85	2.43
14	37.01	1.48	0.14	8.76	0.59	74.32	316.38	19.16	191.10	18.76	78.88	12.93	65.67	510.45	22.28	145.42	9.93	0.63	1.43	0.38	3.32	276.12	3.68	0.75	0.41	12.30	6.28	2.32
15	42.98	1.57	0.14	9.60	0.59	80.00	275.24	19.66	194.10	33.74	74.69	13.78	66.59	640.85	22.28	120.46	9.80	0.59	1.53	0.42	3.71	257.21	3.09	0.80	0.42	13.64	6.38	2.46
16	46.65	1.70	0.13	11.01	0.60	89.05	289.10	22.49	236.65	26.27	89.63	15.01	71.97	512.85	23.57	111.88	9.61	0.93	1.78	0.46	4.17	247.39	2.88	0.86	0.46	15.13	6.81	2.48
17	45.76	1.74	0.13	11.58	0.63	93.51	341.42	23.70	260.12	26.32	78.35	15.45	74.87	425.68	24.70	132.80	10.29	0.73	1.67	0.47	4.18	263.90	3.40	0.80	0.48	14.57	6.93	2.51
18	46.26	1.59	0.14	10.06	0.55	82.27	236.98	19.82	198.05	20.70	71.95	14.15	67.40	599.85	20.65	92.65	8.87	0.81	1.46	0.41	4.02	231.57	2.41	0.72	0.42	14.13	6.20	2.31
19	46.13	1.62	0.14	10.21	0.59	82.93	254.10	19.69	195.39	22.01	74.26	14.54	69.32	569.57	22.47	118.05	9.68	0.67	1.55	0.44	4.03	262.73	3.01	0.86	0.43	14.59	6.57	2.43
20	46.83	1.60	0.14	10.25	0.62	82.17	239.74	18.33	170.02	21.14	72.88	14.60	69.79	583.49	22.99	125.99	10.25	0.73	1.56	0.42	4.08	292.87	3.24	0.80	0.43	14.29	6.70	2.48
21	41.33	1.68	0.14	9.25	0.68	83.28	295.05	16.82	125.04	17.48	73.45	15.41	74.48	371.19	21.88	192.71	11.42	0.52	1.56	0.46	3.59	449.49	4.81	1.09	0.46	13.57	6.69	2.25
22	48.84	1.66	0.14	10.17	0.63	83.47	221.55	17.38	149.30	19.76	77.84	15.46	74.15	505.88	22.14	135.29	10.25	0.54	1.64	0.44	4.31	325.71	3.52	0.80	0.45	14.58	6.76	2.44
23	50.17	1.68	0.14	10.43	0.63	84.69	222.04	17.55	152.44	19.09	76.02	15.48	74.16	536.97	22.15	132.98	10.38	0.56	1.64	0.44	4.35	325.75	3.37	0.78	0.45	14.67	6.86	2.47
24	40.50	1.47	0.14	8.66	0.62	73.60	294.10	16.39	144.55	15.84	65.08	12.98	62.95	681.89	22.58	193.54	10.51	0.48	1.48	0.36	3.40	300.43	4.80	0.75	0.39	12.68	6.49	2.53
25	39.84	1.40	0.13	8.08	0.54	65.82	206.27	15.23	139.16	14.87	63.97	12.07	58.74	822.14	20.17	104.44	8.79	0.45	1.30	0.33	3.29	245.02	2.64	0.69	0.36	12.41	5.68	2.28
26	36.40	1.38	0.14	8.00	0.63	67.33	270.84	14.89	125.72	13.24	59.20	12.16	60.28	762.50	23.04	186.83	11.03	0.46	1.39	0.34	3.02	306.35	4.62	0.79	0.37	11.51	6.10	2.54
27	33.77	1.36	0.13	7.53	0.64	67.17	325.33	15.15	124.99	13.36	59.88	12.16	59.25	645.24	23.95	246.98	11.00	0.42	1.35	0.36	2.86	324.16	6.05	0.76	0.37	11.49	6.28	2.57
28	27.13	1.31	0.13	6.63	0.63	61.17	366.89	13.99	102.74	10.63	69.97	11.67	61.40	488.95	21.19	207.46	11.79	0.35	1.30	0.33	2.38	386.18	5.10	0.73	0.37	9.67	5.78	2.07
29	38.43	1.40	0.13	8.03	0.61	69.05	254.66	15.48	130.24	14.59	63.22	12.82	62.72	664.18	22.76	174.50	10.38	0.49	1.40	0.38	3.25	309.92	4.32	0.85	0.39	12.32	6.33	2.47
30	29.88	1.13	0.13	5.90	0.50	51.64	187.58	11.81	98.01	11.51	51.10	9.81	48.35	651.60	17.88	123.96	8.47	0.44	1.10	0.29	2.44	255.05	3.08	0.60	0.30	9.55	4.79	1.99
31	41.64	1.47	0.14	8.80	0.63	73.06	239.60	15.88	132.92	15.41	65.20	13.44	65.18	624.65	22.38	170.48	10.76	0.47	1.44	0.40	3.52	335.02	4.24	0.76	0.40	12.81	6.41	2.53
32	44.41	1.51	0.14	8.98	0.59	74.20	215.16	16.39	144.27	16.13	67.32	13.68	66.79	686.29	21.21	142.48	9.71	0.48	1.68	0.40	3.77	294.86	3.88	0.72	0.41	13.42	6.16	2.53
33	40.60	1.46	0.15	8.57	0.64	71.45	234.87	15.37	128.90	14.76	68.92	13.08	63.79	717.17	23.74	170.27	10.83	0.71	1.39	0.38	3.40	331.01	4.25	0.77	0.40	12.44	6.30	2.63
34	41.65	1.39	0.13	8.69	0.56	68.69	213.62	14.85	125.66	14.17	62.42	13.27	62.74	725.78	21.85	142.66	9.44	0.43	1.41	0.37	3.66	300.51	3.52	0.70	0.37	12.93	6.15	2.43

Anexo 9. Elementos de tierras raras en sedimentos de las desembocaduras Grijalva y

SPSP, mayo 2017.

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Tb	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Hf	W	Tl	Pb	Th	U
1	20.9	38.6	4.3	15.8	2.8	0.8	0.4	2.4	1.9	0.4	1.1	1.0	0.2	1.4	0.5	0.4	11.4	4.4	1.0
2	23.4	48.1	5.8	22.6	4.7	1.0	0.7	4.2	3.8	0.8	2.2	2.2	0.3	3.6	0.6	0.4	15.5	6.7	2.4
3	25.6	52.2	6.3	24.4	5.1	1.1	0.7	4.5	4.0	0.8	2.2	2.2	0.3	3.4	0.7	0.5	15.2	7.1	2.5
4	24.6	50.5	6.1	23.5	4.8	1.0	0.7	4.2	3.7	0.7	2.0	1.9	0.3	3.5	0.6	0.4	13.8	6.3	2.4
5	20.8	44.8	5.1	19.8	4.1	0.9	0.6	3.8	3.4	0.7	1.9	1.9	0.3	2.6	0.6	0.4	14.7	6.1	2.5
6	21.1	43.4	5.2	20.0	4.2	0.9	0.6	3.7	3.4	0.7	1.9	1.8	0.3	2.6	0.6	0.4	14.4	6.2	2.4
7	23.4	47.4	5.7	22.1	4.6	1.0	0.7	4.2	3.9	0.8	2.2	2.2	0.3	3.8	0.6	0.4	14.3	6.5	2.5
8	23.7	48.6	5.9	22.7	4.7	1.0	0.7	4.2	3.8	0.7	2.1	2.1	0.3	3.1	0.7	0.5	14.7	6.8	2.5
9	24.7	50.8	6.2	24.0	4.9	1.0	0.7	4.4	3.9	0.8	2.2	2.1	0.3	3.3	0.6	0.4	12.9	6.3	2.4
10	24.5	50.9	6.1	23.8	5.0	1.1	0.7	4.5	4.0	0.8	2.2	2.2	0.3	2.9	0.7	0.5	16.8	7.3	2.6
11	24.1	49.5	6.0	23.2	4.8	1.1	0.7	4.3	3.9	0.8	2.2	2.1	0.3	2.9	0.7	0.5	16.5	6.9	2.5
12	23.8	48.9	5.9	22.9	4.8	1.0	0.7	4.3	3.8	0.7	2.1	2.1	0.3	2.7	0.6	0.5	15.9	6.9	2.6
13	21.6	44.4	5.3	20.8	4.3	0.9	0.6	3.9	3.5	0.7	1.9	1.9	0.3	2.3	0.6	0.4	14.6	6.3	2.5
14	21.3	43.6	5.3	20.4	4.2	0.9	0.6	3.8	3.4	0.7	1.9	1.8	0.3	2.4	0.6	0.4	14.6	6.3	2.4
15	23.0	46.8	5.7	22.0	4.5	1.0	0.6	4.1	3.7	0.7	2.0	2.0	0.3	2.9	0.6	0.4	14.1	6.4	2.5
16	23.4	47.8	5.8	22.4	4.6	1.0	0.7	4.1	3.7	0.7	2.1	2.0	0.3	2.9	0.6	0.4	14.3	6.5	2.5
17	25.4	52.0	6.3	24.3	5.0	1.1	0.7	4.5	4.0	0.8	2.2	2.2	0.3	3.2	0.7	0.5	15.3	7.0	2.6
18	23.2	47.6	5.7	22.3	4.6	1.0	0.7	4.1	3.7	0.7	2.0	2.0	0.3	2.8	0.6	0.4	15.5	6.6	2.5
19	21.7	44.5	5.3	20.8	4.3	0.9	0.6	3.9	3.5	0.7	1.9	1.9	0.3	2.4	0.5	0.4	14.7	6.3	2.5
20	21.9	45.1	5.4	21.1	4.4	0.9	0.6	3.9	3.5	0.7	2.0	1.9	0.3	2.6	0.6	0.4	14.5	6.2	2.5
21	25.2	52.1	6.3	24.3	5.0	1.1	0.7	4.4	3.9	0.8	2.1	2.1	0.3	3.8	0.5	0.4	15.1	6.5	2.4
22	22.7	46.5	5.7	21.9	4.6	1.0	0.6	4.1	3.7	0.7	2.1	2.0	0.3	3.2	0.6	0.4	14.8	6.4	2.4
23	24.5	50.1	6.1	23.4	4.9	1.1	0.7	4.3	3.9	0.8	2.2	2.2	0.3	3.3	0.7	0.5	16.0	6.9	2.6
24	23.9	49.0	5.9	22.8	4.7	1.0	0.7	4.2	3.8	0.8	2.1	2.1	0.3	3.6	0.6	0.4	15.3	6.8	2.6
25	23.2	46.9	5.7	22.1	4.6	1.0	0.7	4.1	3.7	0.7	2.1	2.1	0.3	3.6	0.6	0.4	12.7	6.2	2.5
26	29.0	58.4	6.9	26.9	5.4	1.1	0.8	4.9	4.3	0.8	2.4	2.5	0.4	6.5	0.7	0.4	12.0	7.2	2.7
27	21.8	44.4	5.4	21.0	4.3	0.9	0.6	3.8	3.4	0.7	1.9	1.9	0.3	3.3	0.6	0.4	12.3	5.8	2.4
28	28.5	58.0	7.2	27.6	5.5	1.1	0.7	4.8	4.2	0.8	2.4	2.4	0.4	6.0	0.7	0.4	11.3	6.7	2.6
29	22.7	46.4	5.6	22.0	4.5	1.0	0.6	4.0	3.6	0.7	2.0	2.0	0.3	2.9	0.6	0.4	13.2	6.0	2.4
30	22.0	44.8	5.5	21.3	4.4	1.0	0.6	3.9	3.6	0.7	2.0	2.0	0.3	3.0	0.6	0.4	13.9	6.3	2.6
31	24.2	49.7	6.1	23.5	4.8	1.0	0.7	4.3	3.8	0.8	2.1	2.1	0.3	3.4	0.6	0.4	14.4	7.8	2.8
32	22.5	45.9	5.6	21.5	4.4	1.0	0.6	4.0	3.6	0.7	2.0	2.0	0.3	3.2	0.6	0.4	13.8	6.2	2.6
33	22.1	45.2	5.5	21.2	4.4	1.0	0.6	3.9	3.6	0.7	2.0	2.0	0.3	3.6	0.6	0.4	12.7	6.0	2.6
34	21.5	45.8	5.4	20.9	4.4	1.0	0.6	3.9	3.5	0.7	2.0	2.0	0.3	3.4	0.6	0.4	13.7	6.2	2.7

Anexo 10. Elementos de tierras raras en sedimentos de las desembocaduras Grijalva y SPSP, noviembre 2017.

Muestra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Tb	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Hf
2	25.5	52.0	6.4	24.3	5.0	1.1	0.7	4.5	4.1	0.8	2.3	2.2	0.3	4.1
3	25.6	52.6	6.5	24.7	5.1	1.1	0.7	4.7	4.2	0.8	2.3	2.3	0.3	3.6
4	24.4	50.3	6.2	23.6	4.9	1.1	0.7	4.5	4.2	0.8	2.4	2.4	0.4	4.5
5	25.5	52.4	6.4	24.5	5.1	1.1	0.7	4.7	4.3	0.9	2.4	2.3	0.3	3.6
6	22.8	47.4	5.8	22.0	4.6	1.0	0.7	4.2	4.0	0.8	2.2	2.2	0.3	3.5
7	23.7	49.3	6.0	23.0	4.8	1.0	0.7	4.4	4.1	0.8	2.3	2.2	0.3	2.9
8	22.9	47.4	5.8	22.2	4.6	1.0	0.7	4.3	4.0	0.8	2.2	2.2	0.3	3.2
9	22.0	45.8	5.6	21.3	4.5	1.0	0.6	4.1	3.8	0.8	2.1	2.1	0.3	2.7
10	25.8	52.9	6.6	24.9	5.1	1.1	0.7	4.6	4.2	0.8	2.4	2.4	0.4	5.3
11	24.4	50.4	6.2	23.6	4.9	1.1	0.7	4.4	4.0	0.8	2.2	2.1	0.3	3.0
12	21.1	43.5	5.3	20.5	4.3	0.9	0.6	3.9	3.6	0.7	2.0	1.9	0.3	2.7
13	24.0	49.9	6.1	23.2	4.8	1.0	0.7	4.5	4.1	0.8	2.3	2.2	0.3	3.2
14	23.0	47.2	5.8	22.1	4.5	1.0	0.7	4.2	3.9	0.8	2.2	2.1	0.3	3.7
15	23.1	47.5	5.8	22.1	4.6	1.0	0.7	4.2	3.9	0.8	2.2	2.1	0.3	3.1
16	23.9	49.7	6.1	23.2	4.9	1.0	0.7	4.5	4.2	0.8	2.3	2.3	0.3	2.9
17	25.0	52.0	6.3	24.2	5.0	1.1	0.7	4.7	4.3	0.9	2.4	2.4	0.4	3.4
18	22.0	45.3	5.5	21.2	4.4	1.0	0.6	4.1	3.7	0.7	2.0	2.0	0.3	2.4
19	23.5	48.7	6.0	22.8	4.7	1.0	0.7	4.4	4.0	0.8	2.2	2.2	0.3	3.0
20	24.5	50.0	6.2	23.4	4.8	1.1	0.7	4.5	4.1	0.8	2.3	2.2	0.3	3.2
21	25.5	52.4	6.5	24.6	5.0	1.1	0.7	4.5	4.0	0.8	2.2	2.2	0.3	4.8
22	24.6	50.8	6.3	23.8	4.9	1.1	0.7	4.5	4.0	0.8	2.2	2.2	0.3	3.5
23	24.6	50.5	6.2	23.8	4.9	1.1	0.7	4.5	4.0	0.8	2.2	2.2	0.3	3.4
24	24.0	49.3	6.1	23.2	4.8	1.0	0.7	4.4	4.0	0.8	2.2	2.2	0.3	4.8
25	20.7	42.7	5.2	20.0	4.1	0.9	0.6	3.9	3.5	0.7	2.0	1.9	0.3	2.6
26	24.5	49.5	6.1	23.3	4.8	1.0	0.7	4.4	4.0	0.8	2.3	2.2	0.3	4.6
27	25.0	50.5	6.3	23.9	4.9	1.0	0.7	4.4	4.1	0.8	2.4	2.4	0.4	6.0
28	23.8	48.0	6.0	22.7	4.5	1.0	0.6	4.1	3.7	0.8	2.1	2.1	0.3	5.1
29	23.3	47.5	5.9	22.3	4.6	1.0	0.6	4.2	3.9	0.8	2.2	2.2	0.3	4.3
30	18.6	37.8	4.7	17.8	3.7	0.8	0.5	3.4	3.1	0.6	1.7	1.7	0.3	3.1
31	24.5	50.2	6.2	23.6	4.8	1.1	0.7	4.4	4.0	0.8	2.2	2.2	0.3	4.2
32	22.9	46.8	5.8	22.0	4.5	1.0	0.6	4.2	3.8	0.7	2.1	2.0	0.3	3.9
33	24.5	50.0	6.2	23.3	4.8	1.1	0.7	4.4	4.1	0.8	2.3	2.3	0.3	4.2
34	23.2	47.4	5.9	22.4	4.6	1.0	0.6	4.2	3.9	0.8	2.1	2.1	0.3	3.5

Anexo 11. Factor de enriquecimiento en sedimentos de infraplaya colectados en mayo del 2017.

Muestra	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Sn	Sb	Pb	U
1	0.49	2.44	0.97	2.79	0.29	0.74	1.03	0.26	2.38	1.03	0.57
2	1.01	4.13	1.40	4.92	1.03	1.34	2.05	0.40	2.88	1.21	1.15
3	0.99	4.35	1.35	4.78	1.35	1.30	2.10	0.56	5.45	1.15	1.15
4	0.96	5.15	1.32	4.66	0.88	1.24	2.00	0.39	2.66	1.09	1.17
5	0.98	3.31	1.35	4.76	0.98	1.27	2.78	0.36	2.58	1.17	1.20
6	0.97	3.46	1.35	4.84	0.92	1.27	2.86	0.39	2.66	1.19	1.19
7	1.01	4.96	1.45	5.13	0.93	1.34	2.74	0.41	2.83	1.23	1.32
8	1.03	4.85	1.53	5.76	1.02	1.32	1.99	0.41	2.94	1.16	1.19
9	0.97	5.16	1.37	4.70	0.88	1.27	2.22	0.38	2.72	1.07	1.23
10	0.99	3.44	1.35	4.56	1.06	1.29	1.95	0.36	2.69	1.18	1.10
11	0.98	3.43	1.32	4.60	0.98	1.33	2.17	0.39	2.91	1.24	1.14
12	0.86	2.90	1.17	4.11	0.94	1.16	2.17	0.35	2.42	1.06	1.03
13	1.00	3.29	1.36	4.81	0.90	1.32	3.10	0.39	2.75	1.21	1.23
14	1.00	3.39	1.38	4.91	0.92	1.32	3.27	0.40	2.78	1.24	1.27
15	1.02	3.90	1.40	4.94	0.89	1.34	3.45	0.41	2.95	1.26	1.36
16	0.99	3.85	1.37	4.95	0.93	1.30	2.42	0.40	2.80	1.15	1.21
17	0.99	3.90	1.34	4.71	0.95	1.31	2.10	0.39	2.85	1.15	1.17
18	1.00	3.30	1.30	4.36	0.95	1.32	2.40	0.40	3.16	1.20	1.18
19	0.97	3.19	1.30	4.52	0.88	1.29	3.10	0.39	2.63	1.19	1.23
20	0.96	3.22	1.27	4.37	0.87	1.27	2.89	0.38	3.00	1.17	1.23
21	0.99	3.82	1.18	3.52	0.92	1.30	1.47	0.38	2.77	1.11	1.05
22	0.96	3.16	1.21	3.93	0.87	1.29	1.91	0.38	2.83	1.13	1.12
23	0.97	3.10	1.22	4.01	0.93	1.29	1.87	0.37	3.05	1.14	1.11
24	1.02	4.04	1.40	4.93	1.16	1.38	2.67	0.41	2.92	1.26	1.29
25	1.00	4.90	1.38	4.51	0.81	1.30	3.22	0.42	2.82	1.17	1.38
26	1.12	8.21	1.45	4.34	0.90	1.37	3.41	0.42	2.84	1.15	1.59
27	0.78	3.82	1.10	3.57	0.65	1.02	2.73	0.32	2.28	0.93	1.09
28	1.06	9.46	1.39	4.12	0.82	1.33	2.70	0.45	2.88	1.06	1.47
29	0.93	3.62	1.27	4.16	0.84	1.24	2.57	0.38	2.79	1.10	1.19
30	0.98	4.02	1.38	4.81	0.90	1.28	3.02	0.39	3.09	1.19	1.34
31	0.97	3.83	1.29	4.29	0.90	1.29	2.34	0.39	2.80	1.13	1.31
32	0.97	3.66	1.27	4.11	0.84	1.29	2.88	0.39	2.82	1.16	1.34
33	0.95	2.13	1.22	2.05	0.73	1.30	0.63	0.89	2.80	1.13	1.38
34	1.01	2.18	1.33	2.11	0.73	1.32	0.57	0.94	2.88	1.18	1.40

Anexo 12. Factor de enriquecimiento en sedimentos de infraplaya colectados en noviembre del 2017.

Muestra	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Sn	Sb	Pb	U
2	0.97	4.25	1.08	4.73	1.11	1.32	1.58	0.35	2.81	1.07	1.07
3	1.03	4.34	1.22	5.36	1.13	1.41	1.75	0.37	2.76	1.13	1.13
4	1.00	4.90	1.10	5.06	1.14	1.33	1.64	0.36	2.95	1.07	1.17
5	1.00	4.60	1.27	5.96	1.13	1.32	1.71	0.35	2.81	1.12	1.07
6	1.02	5.32	1.29	6.95	1.17	1.34	1.66	0.37	2.84	1.06	1.14
7	1.09	4.77	1.41	7.57	1.34	1.37	1.48	0.37	2.96	1.07	1.06
8	1.05	5.02	1.23	6.96	1.20	1.37	1.99	0.39	2.93	1.07	1.16
9	1.01	4.83	1.38	7.54	1.28	1.26	1.01	0.34	2.73	0.97	0.95
10	0.98	4.90	1.01	4.44	1.03	1.31	1.59	0.38	3.08	1.03	1.13
11	0.99	3.47	1.10	4.73	1.11	1.38	1.72	0.38	2.96	1.14	1.05
12	1.08	4.06	1.00	5.86	1.15	1.48	2.24	0.41	2.96	1.20	1.20
13	1.09	4.93	1.31	7.14	1.27	1.41	1.79	0.40	3.00	1.12	1.15
14	1.00	5.49	1.13	6.26	1.08	1.60	2.10	0.37	2.75	1.04	1.19
15	1.02	4.51	1.16	6.00	1.84	1.43	2.49	0.38	2.86	1.09	1.20
16	1.05	4.37	1.32	6.75	1.32	1.59	1.84	0.41	2.91	1.12	1.11
17	1.08	5.09	1.39	7.31	1.30	1.37	1.50	0.38	2.93	1.06	1.11
18	1.00	3.70	1.17	5.83	1.07	1.31	2.22	0.34	2.69	1.08	1.07
19	1.02	4.03	1.16	5.85	1.16	1.38	2.14	0.37	2.89	1.13	1.14
20	1.02	3.82	1.08	5.12	1.12	1.36	2.21	0.38	2.76	1.11	1.17
21	0.92	4.22	0.99	3.38	0.83	1.23	1.26	0.34	2.71	0.95	0.95
22	0.95	3.26	1.02	4.15	0.97	1.34	1.77	0.36	2.70	1.05	1.07
23	0.98	3.31	1.03	4.28	0.94	1.32	1.90	0.37	2.72	1.07	1.09
24	1.00	5.17	0.96	4.80	0.93	1.34	2.84	0.39	2.64	1.09	1.32
25	0.94	3.81	0.90	4.84	0.91	1.38	3.60	0.36	2.54	1.12	1.25
26	0.97	5.05	0.88	4.42	0.82	1.29	3.37	0.39	2.62	1.05	1.40
27	0.76	4.77	0.89	3.46	0.65	1.03	2.25	0.30	2.21	0.82	1.12
28	0.90	6.99	0.82	3.69	0.67	1.56	2.21	0.37	2.62	0.90	1.17
29	0.95	4.52	0.91	4.36	0.86	1.31	2.80	0.37	2.80	1.07	1.30
30	0.78	3.67	0.69	3.62	0.75	1.17	3.02	0.33	2.37	0.91	1.15
31	0.95	4.01	0.93	4.20	0.86	1.28	2.48	0.36	2.77	1.05	1.26
32	0.93	3.47	0.96	4.38	0.86	1.27	2.62	0.41	2.69	1.06	1.21
33	0.98	4.14	0.90	4.28	0.86	1.42	3.00	0.37	2.76	1.07	1.38
34	0.92	3.68	0.87	4.08	0.81	1.26	2.96	0.37	2.64	1.09	1.24

Anexo 13. Índice de Geoacumulación en sedimentos de las desembocaduras Grijalva y SPSP, mayo 2017.

Muestra	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Sn	Sb	Pb	U
1	-2.23	0.08	-1.26	0.27	-2.99	-1.63	-1.17	-3.16	0.04	-1.16	-2.03
2	-0.98	1.05	-0.51	1.30	-0.96	-0.57	0.04	-2.32	0.53	-0.72	-0.79
3	-0.96	1.18	-0.51	1.31	-0.52	-0.57	0.12	-1.78	1.50	-0.75	-0.74
4	-1.08	1.35	-0.61	1.21	-1.19	-0.70	-0.01	-2.38	0.40	-0.89	-0.78
5	-1.05	0.70	-0.60	1.22	-1.06	-0.68	0.45	-2.51	0.34	-0.80	-0.76
6	-1.12	0.72	-0.64	1.20	-1.19	-0.72	0.45	-2.42	0.34	-0.82	-0.81
7	-1.12	1.17	-0.61	1.22	-1.24	-0.72	0.31	-2.44	0.36	-0.84	-0.75
8	-0.96	1.28	-0.39	1.53	-0.98	-0.60	-0.01	-2.29	0.56	-0.79	-0.75
9	-1.13	1.28	-0.63	1.15	-1.27	-0.74	0.07	-2.50	0.36	-0.99	-0.79
10	-0.86	0.94	-0.41	1.35	-0.75	-0.47	0.12	-2.31	0.59	-0.60	-0.71
11	-0.96	0.84	-0.53	1.27	-0.96	-0.53	0.18	-2.28	0.61	-0.63	-0.74
12	-0.98	0.77	-0.54	1.27	-0.86	-0.56	0.36	-2.27	0.51	-0.68	-0.72
13	-1.08	0.64	-0.63	1.19	-1.23	-0.68	0.56	-2.42	0.39	-0.80	-0.77
14	-1.12	0.64	-0.66	1.17	-1.25	-0.72	0.59	-2.44	0.35	-0.81	-0.78
15	-1.16	0.78	-0.70	1.12	-1.35	-0.77	0.60	-2.46	0.37	-0.86	-0.74
16	-1.05	0.91	-0.58	1.27	-1.14	-0.66	0.24	-2.36	0.45	-0.83	-0.76
17	-0.96	1.02	-0.52	1.29	-1.02	-0.56	0.13	-2.29	0.56	-0.74	-0.71
18	-0.99	0.73	-0.61	1.14	-1.07	-0.59	0.28	-2.32	0.67	-0.72	-0.75
19	-1.08	0.63	-0.66	1.14	-1.23	-0.68	0.59	-2.42	0.35	-0.80	-0.74
20	-1.10	0.65	-0.69	1.08	-1.24	-0.70	0.49	-2.44	0.54	-0.81	-0.75
21	-0.92	1.03	-0.66	0.91	-1.02	-0.53	-0.35	-2.28	0.56	-0.76	-0.84
22	-1.01	0.71	-0.67	1.02	-1.15	-0.59	-0.02	-2.34	0.55	-0.78	-0.79
23	-0.91	0.78	-0.57	1.15	-0.96	-0.49	0.05	-2.31	0.75	-0.67	-0.71
24	-1.03	0.95	-0.58	1.24	-0.85	-0.60	0.35	-2.34	0.48	-0.73	-0.70
25	-1.24	1.06	-0.77	0.94	-1.53	-0.86	0.45	-2.49	0.26	-1.01	-0.77
26	-1.13	1.74	-0.76	0.82	-1.46	-0.84	0.47	-2.54	0.21	-1.09	-0.63
27	-1.30	1.00	-0.80	0.90	-1.56	-0.90	0.52	-2.56	0.26	-1.05	-0.81
28	-1.19	1.98	-0.80	0.78	-1.55	-0.86	0.17	-2.42	0.26	-1.18	-0.71
29	-1.19	0.77	-0.73	0.98	-1.33	-0.77	0.28	-2.47	0.40	-0.95	-0.82
30	-1.17	0.88	-0.66	1.13	-1.29	-0.78	0.46	-2.48	0.50	-0.87	-0.71
31	-1.05	0.94	-0.63	1.10	-1.15	-0.63	0.23	-2.34	0.49	-0.82	-0.61
32	-1.14	0.78	-0.74	0.95	-1.34	-0.73	0.43	-2.44	0.40	-0.88	-0.67
33	-1.24	-0.08	-0.89	-0.14	-1.63	-0.80	-1.85	-1.35	0.31	-1.00	-0.72
34	-1.11	-0.01	-0.72	-0.05	-1.59	-0.73	-1.93	-1.21	0.40	-0.89	-0.65

Anexo 14. Índice de Geoacumulación en sedimentos de las desembocaduras Grijalva y SPSP, noviembre 2017.

Muestra	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Sn	Sb	Pb	U
2	-0.96	1.17	-0.47	1.32	-0.77	-0.52	-0.26	-2.41	0.57	-0.82	-0.82
3	-0.85	1.22	-0.30	1.53	-0.72	-0.40	-0.09	-2.31	0.57	-0.72	-0.72
4	-0.97	1.32	-0.44	1.37	-0.78	-0.56	-0.26	-2.43	0.59	-0.87	-0.75
5	-0.90	1.31	-0.24	1.68	-0.72	-0.49	-0.12	-2.39	0.60	-0.73	-0.80
6	-1.00	1.39	-0.22	1.77	-0.79	-0.60	-0.29	-2.46	0.48	-0.94	-0.84
7	-0.81	1.32	-0.09	1.98	-0.51	-0.49	-0.37	-2.38	0.63	-0.84	-0.86
8	-1.01	1.25	-0.29	1.72	-0.82	-0.62	-0.08	-2.43	0.48	-0.97	-0.86
9	-0.87	1.39	-0.12	2.04	-0.52	-0.55	-0.86	-2.46	0.57	-0.93	-0.96
10	-1.04	1.28	-0.58	1.14	-0.96	-0.62	-0.34	-2.40	0.61	-0.97	-0.84
11	-0.92	0.89	-0.45	1.33	-0.76	-0.45	-0.13	-2.31	0.66	-0.72	-0.85
12	-1.13	0.78	-0.58	1.31	-1.04	-0.68	-0.08	-2.54	0.33	-0.97	-0.98
13	-0.87	1.31	-0.20	1.84	-0.65	-0.50	-0.15	-2.32	0.59	-0.83	-0.79
14	-1.11	1.35	-0.41	1.53	-1.00	-0.43	-0.04	-2.53	0.35	-1.05	-0.86
15	-1.00	1.14	-0.38	1.56	-0.15	-0.51	0.29	-2.43	0.48	-0.90	-0.77
16	-0.85	1.22	-0.18	1.84	-0.51	-0.25	-0.03	-2.22	0.63	-0.75	-0.76
17	-0.78	1.46	-0.11	1.98	-0.51	-0.44	-0.30	-2.30	0.66	-0.81	-0.75
18	-0.96	0.93	-0.36	1.59	-0.86	-0.57	0.19	-2.50	0.47	-0.85	-0.86
19	-0.95	1.03	-0.37	1.57	-0.77	-0.52	0.12	-2.41	0.55	-0.81	-0.79
20	-0.97	0.95	-0.48	1.37	-0.83	-0.55	0.15	-2.40	0.48	-0.84	-0.76
21	-0.95	1.24	-0.60	0.92	-1.10	-0.54	-0.50	-2.40	0.61	-0.91	-0.90
22	-0.94	0.83	-0.55	1.18	-0.92	-0.45	-0.05	-2.33	0.56	-0.81	-0.78
23	-0.92	0.83	-0.54	1.21	-0.97	-0.49	0.03	-2.33	0.56	-0.80	-0.76
24	-1.12	1.24	-0.64	1.13	-1.24	-0.71	0.38	-2.48	0.27	-1.01	-0.73
25	-1.29	0.73	-0.74	1.08	-1.33	-0.74	0.65	-2.66	0.15	-1.04	-0.88
26	-1.25	1.12	-0.78	0.93	-1.50	-0.85	0.54	-2.57	0.18	-1.15	-0.72
27	-1.26	1.39	-0.75	0.92	-1.49	-0.83	0.30	-2.62	0.27	-1.15	-0.71
28	-1.39	1.56	-0.87	0.64	-1.82	-0.61	-0.10	-2.66	0.14	-1.40	-1.02
29	-1.22	1.03	-0.72	0.98	-1.36	-0.75	0.34	-2.56	0.34	-1.05	-0.76
30	-1.64	0.59	-1.11	0.57	-1.70	-1.06	0.31	-2.90	-0.04	-1.42	-1.08
31	-1.14	0.94	-0.68	1.01	-1.28	-0.71	0.25	-2.52	0.41	-0.99	-0.73
32	-1.11	0.79	-0.64	1.13	-1.22	-0.66	0.39	-2.30	0.42	-0.93	-0.73
33	-1.17	0.92	-0.73	0.97	-1.35	-0.63	0.45	-2.57	0.33	-1.04	-0.67
34	-1.22	0.78	-0.78	0.93	-1.40	-0.77	0.47	-2.55	0.30	-0.98	-0.79