



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

“Granulometría y geoquímica de sedimentos detríticos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos del Golfo de México, México: Implicaciones de contaminación por metales pesados y su procedencia”

T E S I S

Que para optar por el grado de:

**Maestra en Ciencias
(Geología Marina)**

P r e s e n t a

**Ing. en Geología Ambiental
Fabiola Vega Bautista**

Tutor Principal

Dr. Armstrong Altrin Sam John Selvamony
(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología)

Comité Tutorial

Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM)

Dr. Antonio Zoilo Márquez García (Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa)

Dra. María Adela Monreal Gómez (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM)

Dra. Blanca Estela Buitrón Sánchez (Instituto de Geología, UNAM)

Ciudad Universitaria, CD. MX., Octubre 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



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 está 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.

"Nada en la vida debe ser temido, solamente comprendido. Ahora es el momento de comprender más para temer menos"

-Marie Curie

DEDICATORIA

A mis padres

“Con amor y admiración”

Cristina Bautista Hernández y Ponciano Vega Rivera, gracias por apoyarme toda mi vida y por estar presentes en cada una de mis etapas, en cada una de mis metas, en cada momento difícil y alegre que me ha tocado vivir. Gracias a ustedes he logrado convertirme en todo lo que soy ahora y siguen impulsándome todos los días para llegar a ser una mejor persona, hija, hermana, amiga y profesionista. Gracias por los valores que me enseñaron en casa, por toda su dedicación, esfuerzo, educación y amor que me han brindado. Los amo y estaré infinitamente agradecida por tanto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la asistencia financiera proporcionada al Dr. John S. Armstrong Altrin S. del proyecto DGAPA-PAPIIT, número: IN107020 por el cual fue posible la recolección de muestras y 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 geoquímicos de las muestras de sedimentos del Golfo de México.

Agradezco al proyecto institucional del Instituto de Ciencias de Mar y Limnología (ICML) n° 616, por las facilidades de transporte para la recolección de muestras en las playas del Golfo de México.

Muchas gracias a la Dra. Patricia Giron del Laboratorio de Difracción de Rayos X del Instituto de Geología, por la ayuda en la realización de los estudios de DRX e interpretación de los resultados.

Gracias al Ing. Carlos Linares López por su apoyo en los estudios de SEM-EDS realizados en el Laboratorio Universitario de Petrología del Instituto de Geofísica de la UNAM

Al M. en C. Eduardo Alfredo Morales de la Garza y a Ricardo Martínez Domínguez del Laboratorio de Sedimentología del ICML de la UNAM por la ayuda en la preparación de muestras para los análisis.

A la M.C. Laura Elena Gómez Lizárraga del ICML, por el servicio de microscopía electrónica de barrido SEM).

A los miembros de mi comité tutorial:

- Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta

Dr. Antonio Zoilo Márquez García

Dra. María Adela Monreal Gómez

Dra. Blanca Estela Buitrón Sánchez

Muchas gracias por su tiempo brindado, por su apoyo, por los consejos, los comentarios y las correcciones pertinentes para que este trabajo se lograra con éxito, así como las modificaciones necesarias para que se cumpliera el objetivo principal de esta investigación. Gracias por todo el conocimiento que me aportaron durante estos dos años de maestría, ya sea en las clases como en asesorías y las anécdotas que se quedarán grabadas por siempre.

A mi compañera de laboratorio Mayla, por ayudarme a resolver mis dudas y apoyarme en lo que necesité durante mi estancia en el laboratorio.

A mis hermanas por apoyarme siempre y por ser parte fundamental de mi vida, por haberme regalado la dicha de ser tía y porque quiero esforzarme para ser un ejemplo para mis sobrinos (Diego, Armandito y Mía). Gracias por ser una familia unida y por hacerme tan feliz.

A mis compañeros y amigos del posgrado y espero que de toda la vida: Brenda, Inna, Andee, Lu, César, Kevin, Raúl, Manu, Vic, por los momentos tan agradables que pasamos durante estos dos años. Por su apoyo moral y por su amistad sincera.

A mis roomies y amigos: May, Lau y Toño, por haberme permitido compartir un espacio con ustedes y por haber hecho muy amena mi estancia en CDMX, por todos los momentos y por su amistad.

Quiero agradecer a mi profe César Sánchez, por haberme inspirado desde la primaria, me enseñó a esforzarme para alcanzar mis metas, que me motivó a exigirme para sacar mi potencial académico. Gracias por tanto y aunque ya no está presente, sé que en cada meta lograda se sentirá orgulloso y recordaré las palabras de motivación y felicitaciones que me brindó el día que le comenté que había entrado al posgrado. Un abrazo hasta el cielo.

Agradecimiento especial a mi estimado tutor:

Dr. Armstrong, por todo su apoyo desde el comienzo hasta el final de este proceso, por su constante motivación, por sus consejos, por el conocimiento brindado durante sus clases y sus asesorías, por todo el material que me permitió utilizar en su laboratorio para realizar los análisis y por ser un excelente tutor y director de tesis.

Índice

1.	RESUMEN	12
2.	INTRODUCCIÓN	13
3.	ANTECEDENTES.....	15
4.	HIPÓTESIS	20
5.	JUSTIFICACIÓN	21
6.	OBJETIVO GENERAL	22
6.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
7.	MARCO TEÓRICO.....	23
7.1	ÁREA DE ESTUDIO.....	23
7.2	CLIMA	24
7.3	FISIOGRAFÍA.....	25
7.4	HIDROGRAFÍA	25
7.4.1	Río Tecolutla.....	26
7.4.2	Río Coatzacoalcos	27
7.5	OCEANOGRAFÍA FÍSICA	29
7.5.1	CORRIENTES MARINAS.....	29
8.	MARCO GEOLÓGICO	35
8.2	GEOLOGÍA LOCAL.....	36
9.	METODOLOGÍA	39
9.1	Trabajo de campo – muestreo	39
9.2	GRANULOMETRÍA.....	39
9.2.2	Características texturales:	40
9.3	MINERALOGÍA:	42
9.3.1	Difracción de Rayos-X:	42
9.3.2	SEM-EDS.....	43
9.4	MICROTEXTURAS	43
9.5	GEOQUÍMICA.....	43
9.5.1	Geoquímica de elementos mayores:	43
9.5.2	Elementos trazas:.....	44
10.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
10.1	GRANULOMETRÍA	45

10.2 MINERALOGÍA.....	46
10.3 MICROTERTURAS.....	56
10.3.1 Origen mecánico.....	60
10.3.2 Origen Químico.....	60
10.3.3 Paleoambientes de microtexturas de origen químico.....	60
10.4 GEOQUÍMICA.....	62
10.4.1 Elementos Mayores	62
10.4.2 Elementos Traza	65
10.5 Contaminación de sedimentos por metales.....	71
10.5.1 Factor de enriquecimiento (FE).....	71
10.5.2 Índice de Geoacumulación (I_{Geo}).....	74
11. CONCLUSIONES	78
12. BIBLIOGRAFÍA.....	80
13. ANEXOS	87
13.1 ARTÍCULO CIENTÍFICO	87

Índice de Tablas

Tabla 1. Eventos tectónicos del Golfo de México. Tomado de Bird <i>et al.</i> (2005).....	35
Tabla 2. Parámetros de granulometría de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos del Golfo de México	45
Tabla 4. Microtexturas identificadas y su respectivo origen de la playa de Tecolutla, Veracruz.	56
Tabla 5. Concentraciones medias de elementos en la corteza terrestre en ppm, según Taylor McLennan (1985). Modificado por Rudnick y Gao (2003).	62
Tabla 6. Concentraciones de elementos mayores (%) para 49 muestras de las playas de Tecolutla y Coatzacoalcos.....	63
Tabla 7. Concentraciones de elementos traza (ppm) para los sedimentos de las playas de Tecolutla y Coatzacoalcos.....	65
Tabla 8. Valores de Factor de Enriquecimiento (FE) para metales de las dos playas de estudio.	73
Tabla 9. Resultados del índice de Geoacumulación (IG) para los sedimentos de las playas de Tecolutla y Coatzacoalcos.	75

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de localización de las dos playas de estudio en el Golfo de México	23
Figura 2. Muestras de estudio en la playa de Tecolutla, Veracruz en el Golfo de México.	24
Figura 3. Muestras de estudio de la playa de Coatzacoalcos, Veracruz, en el Golfo de México.....	24
Figura 4. Cuenca Hidrográfica del Río Tecolutla	27
Figura 5. Cuenca hidrológica del Río Coatzacoalcos	28
Figura 6. Corrientes del Golfo de México (Arthur <i>et al.</i> 2017).....	29
Figura 7. Corrientes superficiales promedio inducidas por el viento de verano. (Martínez-López y Parés-Sierra, 1998).....	33
Figura 8. Transporte promedio (Sv), verticalmente integrado desde los 200 m de profundidad al fondo, generado por el viento de verano (Martínez-López y Parés-Sierra, 1998).	33
Figura 9. Corrientes superficiales promedio inducidas por el viento de invierno (Martínez-López y Parés-Sierra, 1998).....	34
Figura 10. Transporte promedio (Sv), verticalmente integrado desde los 200 m de profundidad al fondo, generado por el viento de invierno (Martínez-López y Parés-Sierra, 1998).....	34
Figura 11. Mapa geológico regional del área de estudio, los rombos de color rojo representan las dos áreas de estudio. Tomado y modificado de Ramos-Vázquez <i>et al.</i> (2018).	38
Figura 12. Grados de clasificación de los sedimentos. Tomado y modificado de Stow (2006)	41
Figura 13. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/Plagioclasa/Ilmenita).....	47
Figura 14. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Calcita)	47
Figura 15. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/Feldespatos)	48
Figura 16. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Ilmenita)	48
Figura 17. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Ilmenita)	49
Figura 18. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/Halita /Feldespatos)	49
Figura 19. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/ Plagioclasa).....	50
Figura 20. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/ Plagioclasa/Ilmenita).....	50
Figura 21. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/Piroxeno)	51
Figura 22. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Plagioclasa).....	51
Figura 23. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Ilmenita).....	52
Figura 24. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Ilmenita).....	52
Figura 25. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Calcita).....	52
Figura 26. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Plagioclasa).....	53
Figura 27. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo)	53
Figura 28. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Calcita/Ilmenita).....	54
Figura 29. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Ilmenita/Plagioclasa)	54
Figura 30. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Plagioclasa).....	54
Figura 31. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Plagioclasa).....	55
Figura 32. A) Subredondeado– angular; B) Relieve pronunciado; C) Escalones rectos (Straight steps); D) Redondeado, marcas de colisión.....	57
Figura 33. E) Angular, glóbulos de sílice; F) Glóbulos de sílice G) Redondeado; H) Disolución ...	57

Figura 34. I) Subredondeado, fracturas concoidales; J) película de sílice; K) Marcas en V; L) glóbulos de sílice.	58
Figura 35. M) Redondeado y glóbulos de sílice; N) Disolución; Ñ) Redondeado y baja esfericidad; O) Marcas de colisión	58
Figura 36. . P) Pequeños y grandes escalones Q) Rectas paralelas R) Escalones grandes S) Escalones	59
Figura 37. Diagrama de normalización de los sedimentos de playa de Tecolutla y Coatzacoalcos en comparación con la corteza continental superior (Taylor y McLennan, 1985).	64
Figura 38. Diagrama bivalente de $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ de sedimentos de playa de Tecolutla y Coatzacoalcos (Pettijohn <i>et al.</i> 1972).....	64
Figura 39. Diagrama de normalización de elementos traza para las playas de Tecolutla y Coatzacoalcos (Taylor y McLennan, 1985).	66
Figura 40. Diagrama de procedencia para los sedimentos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos (Cullers, 2000).....	67
Figura 41. Diagrama de procedencia para los sedimentos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos (Cullers, 2000).....	68
Figura 42. Diagrama de procedencia para los sedimentos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos (Cullers, 2000).....	69
Figura 43. Diagrama de procedencia para los sedimentos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos (Cullers, 2000).....	69
Figura 44. Zona industrial de Coatzacoalcos, Veracruz (Complejo petroquímico Pajaritos).....	77

1. RESUMEN

En este trabajo se realizaron análisis geoquímicos, mineralógicos y granulométricos en 49 muestras de las playas de Tecolutla ($n = 20$) y Coatzacoalcos ($n = 39$) localizadas al suroeste del Golfo de México con el objetivo de analizar las características geológicas de los sedimentos para inferir su procedencia.

De acuerdo a los resultados de granulometría, los sedimentos de la playa Tecolutla se clasifican como finas de bien a muy bien clasificadas, con tendencia de asimetría hacia los tamaños gruesos y con curvas en su mayoría mesocúrtica y leptocúrticas, mientras que los sedimentos de las Playa de Coatzacoalcos se clasifican como arenas finas de moderadamente a bien clasificadas, lo cual podría sugerir que las arenas de Tecolutla sufrieron un mayor transporte a diferencia de las de Coatzacoalcos. Los resultados de mineralogía indicaron que el cuarzo es el mineral más abundante en ambas de playa, seguido de la calcita y otros minerales. Se observaron microtexturas únicamente para las arenas de la playa de Tecolutla mediante SEM y las principales microtexturas observadas tienen un origen mecánico (marcas de colisión) y de origen químico (disolución y precipitación de SiO_2). Se realizó un diagrama de UCC para comparar los valores de los sedimentos muestreados contra los valores promedios de la corteza terrestre, los resultados para CaO y TiO_2 se reflejaron altos para las arenas de la playa de Tecolutla lo cual podría atribuirse a la litología de la región. También se realizó el diagrama de UCC para elementos traza de ambas playas, en el cual el Cu fue el único elemento que reflejó un incremento para algunas muestras de la playa de Tecolutla. Los diagramas de procedencia sugirieron que los sedimentos de Tecolutla son grauvacas-litoarenitas, mientras que los sedimentos de Coatzacoalcos se clasifican como litoarenitas y ambas playas con una procedencia ígnea-félsica. Para la parte ambiente se realizaron dos índices para analizar el nivel de contaminación de los sedimentos, el índice de geoacumulación y el factor de enriquecimiento, los valores obtenidos sugieren un nivel leve de contaminación, principalmente para la playa de Tecolutla, donde el elemento que reflejó mayor nivel de contaminación fue el Cu , así como niveles más bajos para Co , V , Sr y Ba , lo cual podría atribuirse a la zona industrial que se encuentra en la zona.

2. INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta tesis es registrar resultados acerca de las variaciones texturales, mineralógicas, geoquímicas y geocronológicas de los sedimentos costeros de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos del Golfo de México. En este proyecto se analizarán las variaciones geoquímicas entre los sedimentos costeros del Golfo de México con relación a su ambiente sedimentario.

Los estudios de tamaño de grano tienen una gran importancia en el orden de características texturales en los ambientes sedimentarios. También son utilizados en la caracterización de la dinámica de playas y ambientes sedimentarios antiguos, la cual opera durante el transporte del sedimento. Los detalles del estudio en los parámetros del tamaño de grano son un aspecto importante para la estabilidad de los ambientes sedimentarios en relación a las condiciones de la tectónica.

Los granos detríticos son utilizados como una herramienta para determinar la procedencia de diferentes tipos de sedimentos relativos a fuentes continentales. Son de gran importancia en la reconstrucción paleogeográfica y paleo-tectónica (Basu *et al.*, 1982). Este estudio es de igual relevancia para identificar las diferencias de cuarzo (mono-cristalino, poli-cristalino), feldespatos y la composición de fragmentos líticos dentro de las dos zonas de estudio, e inferir la influencia del tipo de roca fuente y del ambiente tectónico.

La combinación de microtexturas en superficies en granos de arenas detríticos puede ser utilizada para explicar la historia del paleo-ambiente del área fuente de la cual provienen los sedimentos. Identificar las microtexturas usando un microscopio electrónico de barrido es una herramienta importante para interpretar los ambientes sedimentarios antiguos y los mecanismos de transporte (Krinsley y Marshall 1987; Helland y Diffendal 1993; Armstrong-Altrin *et al.* 2005; Kasper-Zubillaga y Faustinos-Morales 2007).

El diagnóstico de patrones de microtexturas de superficies de granos de arena depende ampliamente del tipo de ambiente de procedencia y se puede diferenciar entre varios ambientes como el fluvial, marino, eólico y glacial. Si los granos de arenas se hubieran encontrado afectados bajo distintos ambientes, las características superficiales de los granos

de arena podrían consistir en una mezcla de distintas microtexturas producido durante el transporte de los sedimentos (Chakroun *et al.* 2009; Newsome y Ladd 1999).

Los sedimentos clásticos pueden ser el único registro, ya que la corteza ha sido removida por erosión, cubriéndose con depósitos jóvenes o sepultándose en la profundidad de la corteza, así que, la llave de la relación entre la procedencia y las cuencas está controlada por las placas tectónicas (Dostal y Keppie, 2009). Los elementos son muy utilizados para inferir la composición de la corteza porque sus atribuciones no están significativamente afectadas por la diagénesis y son muy poco afectadas por el fraccionamiento de minerales pesados, elementos como Zr, Hf, Sc, Th (Tripaldi *et al.* 2010). Una alta concentración de metales pesados entran en los ambientes costeros cada año como contaminantes a partir de procesos relacionados con actividades antropogénicas tales como las aguas residuales sin tratamiento. Algunos metales (como el Cu, Zn, Co, Mn, Cr, Mo, V, Pb y Ni) son conocidos por ser esenciales para los organismos marinos, pero usualmente muestran toxicidad si éstos se encuentran por encima de sus niveles normales.

3. ANTECEDENTES

Vázquez-Botello y Páez-Osuna (1987) realizaron una investigación en el suroeste del Golfo de México, en diferentes zonas: Río Coatzacoalcos, Laguna Ostión y Río Tonalá. Analizaron la concentración de varios metales pesados Ni, Co, Cr, Zn, Pb, Cd, Fe en muestras de sedimento mediante espectrofotómetro de absorción atómica Varian Techtron. Los autores argumentan que las concentraciones de dichos elementos son introducidas al medio marino por medio de los ríos como consecuencia del continuo desarrollo urbano e industrial.

Armstrong-altrin *et al.* (2012) investigaron acerca de la procedencia y geoquímica de arenas de tres playas del Golfo de México (Playa Azul, Tecolutla y Náu-tla). Para lograr el objetivo, se analizaron elementos mayores, tierras raras y elementos traza. Los resultados mostraron diferencias muy marcadas de las características geoquímicas y petrográficas entre las playas aun cuando la distancia de separación entre estas no supera los 50 km. Las arenas de Playa Azul reflejaron un alto contenido en SiO₂ (~ 64-84 %), Tecolutla (~ 47-69 %) y Náu-tla (< 46 %). En las tres playas el decremento en el tamaño de grano se asocia con el decremento en el contenido de SiO₂ y a su vez se asocia con un incremento en el contenido de TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, Zr, Hf, y V. El decremento del tamaño de las partículas también se asoció a un incremento de tierras raras, sin embargo, se reportaron diferencias del contenido de REE entre las playas de Náu-tla y Playa Azul, lo cual sugiere que la procedencia es un factor más importante a considerar para el control en el contenido geoquímico que el tamaño de grano.

Ruiz-Fernández *et al.* (2012) hicieron una investigación en la desembocadura del río Coatzacoalcos, reconstruyeron los cambios históricos del transporte de sedimentos y sobre la contaminación por metales traza, mediante el análisis de un núcleo de sedimentos. Las concentraciones de algunos metales traza (Al, Ca, Sr, Rb) reflejaron cambio en la fuente de sedimentación y contaminación a partir de la década de los 80's. Los autores concluyen que el incremento en la concentración de estos metales se debe a fuentes terrestres, relacionadas a suelos contaminados y erosionados, debido a un cambio de uso de suelo.

Armstrong-Altrin y Natalhy-Pineda (2014) publicaron un trabajo acerca de microtexturas en granos de arena de las playas de Tecolutla, Nautla y Veracruz. Los granos de arena se analizaron a través del microscopio electrónico de barrido con el fin de analizar los ambientes deposicionales y el paleoclima. Se encontraron un total de 24 microtexturas, 13 de origen mecánico, 5 de origen mecánico-químico y 6 de origen químico. Las microtexturas no se presentan de manera uniforme a lo largo de las tres playas de estudio lo cual se puede atribuir a diferentes condiciones como el clima, el tipo de transporte, la duración, la roca fuente y la dinámica de las áreas de estudio.

Armstrong-Altrin *et al.* (2015) llevaron a cabo una investigación de procedencia de sedimentos en el Suroeste del Golfo de México a través de análisis geoquímicos. Fueron analizados un total de 10 núcleos, mediante el análisis de elementos traza, mayores y tierras raras (REE). El índice de madurez química (ICV) y la relación $\text{SiO}_2/\text{AlO}_3$ indicaron una baja madurez composicional de los sedimentos. Las concentraciones de los elementos traza como Cr, Ni y V indicaron que el área de estudio recibe un aporte de rocas intermedias, de composición entre máfica y félsica. Por otra parte el Factor de Enriquecimiento (Fe) indica que los contenidos de Cd y Zn se encuentran influenciados por aporte antropogénico.

Armstrong-Altrin *et al.* (2015) realizaron un estudio de petrografía y geoquímica de sedimentos de las playas Chachalacas y Veracruz en el Golfo de México. El análisis de difracción de rayos-X y el microscopio electrónico de barrido (SEM-EDS) reflejó un contenido en minerales pesados como magnetita, ilmenita, y zircon para los sedimentos de Chachalacas. Los resultados de tierras raras sugieren que los contenidos de estos elementos son más altos en la playa Chachalacas a comparación de la playa de Veracruz, lo cual se relaciona con las concentraciones de elementos pesados en las arenas de Chachalacas. Los contenidos de Co, Cu, Ni y V son más bajos en Veracruz que Chachalacas, lo cual indica que el aporte para el área de Chachalacas es de rocas intermedias, con una mezcla de basalto, andesita, dacita, mientras que para la playa de Veracruz se asocia una composición andesítica y dacítica.

Coronado-Hernández (2015) llevó a cabo un trabajo sobre petrografía, granulometría y geoquímica de dos playas del suroeste del Golfo de México (Montepío y Hermosa). El objetivo principal de este trabajo fue inferir la procedencia de las arenas de las playas así

como analizar las diferencias de los minerales presentes en cada tamaño de grano. El alto contenido de Mg, Cr y Co presente en los sedimentos, indicó la presencia de minerales ferromagnesianos. Para la playa Hermosa, se encontró la existencia de Hf y Zr, lo cual indica la presencia de zircones, así como una composición félsica.

Rosales-Hoz *et al.* (2015) hicieron un estudio en la desembocadura del río Papaloapan, por medio de dos cruceros, se recolectaron muestras de sedimentos superficiales (15-30 m), de profundidad intermedia (30-80m) y zonas más profundas (> 300 m). Fueron analizados algunos metales traza V, Ni, Cu, Zn, Pb, Li, Cr, Co y Ba de los cuales los primeros 6 reflejaron un incremento en muestras más profundas, sin embargo el mayor incremento para Cr, Co, Cu y Ba se encontró en la zona costera. Los autores sugieren que el incremento del Cu puede estar asociado con la litología volcánica de la región, mientras que para los demás elementos se infiere que su incremento procede de la descarga del río.

Velasco-Ramos (2015) Realizó un trabajo de procedencia de sedimentos marinos de un núcleo localizado en el Golfo de México a través de análisis geoquímicos y sedimentológicos. De acuerdo a los análisis sedimentológicos, el tamaño de grano para los sedimentos de este núcleo fue de arcillas – limos, con una mala clasificación, lo cual se atribuye a la variabilidad de la corriente. Para los análisis de geoquímica, los resultados de CIA y $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sugieren que los sedimentos proceden de una fuente moderadamente intemperizada. Las REE reflejaron que los sedimentos provienen de andesitas, andesitas basálticas y rocas expuestas a lo largo del sudoeste del Golfo de México. Los análisis de metales pesados, sugieren la influencia de fuentes antrópicas. Los índices U/Th, V/Cr, Ni/Co y Autigénicos U sugieren un ambiente de depósito óxico.

Marca-Castillo (2018) publicó un estudio sobre implicaciones de intemperismo, procedencia y ambientes deposicionales en sedimentos de dos núcleos de talud localizados frente a los Tuxtlas, Veracruz, a través de análisis texturales, mineralógicos y geoquímicos. Los resultados del análisis textural reflejó que los sedimentos de ambos núcleos se encuentran dominados por limos. De acuerdo al análisis petrográfico, se encontraron restos biogénicos y líticos con redondez angular y baja esfericidad, lo cual sugiere un ambiente de baja energía y bajo nivel de intemperismo, que indica que los sedimentos proceden de una roca fuente cercana. Se encontraron cuarzo (composición félsica, líticos volcánicos y

piroxenos (composición intermedia). Además mediante SEM-EDS se encontraron minerales como la barita, gibbsita, caolinita, grosularia, magnetita, plagioclasa y clorito, los cuales probablemente tienen un origen continental. Los resultados de geoquímica sugieren que los sedimentos pudieran proceder de la erosión de rocas andesíticas de la zona costera del Golfo de México.

Tapia-Fernández (2018) efectuó una investigación acerca de procedencia y ambiente de depósito de sedimentos del litoral en el Sur del Golfo de México, mediante análisis granulométricos, petrográficos y geoquímicos. Para este estudio se analizó un total de 76 muestras de sedimentos, de las playas Brujas, Miramar, Playa Nuevo Campechito y El Zacatal. Con respecto a los resultados de sedimentología para las playas Brujas y El Zacatal los sedimentos son finos de moderadamente a bien calcificados, mientras que para la playa Nuevo Campechito y Miramar, los sedimentos son finos muy bien clasificados. De acuerdo al índice metamórfico, así como los resultados granulométricos, se sugiere que los sedimentos de la playa Miramar proceden de la erosión de rocas de la Cuenca Macuspana, los de Nuevo Campechito de Reforma Akal y de la Sierra de Chiapas, los de Zacatal de la erosión de los cordones litorales en la punta Zacatal con aporte de bioclásticos de la Laguna de Términos.

Hermenegildo-Ruiz (2019) hizo una investigación sobre procedencia de sedimentos a través de análisis de granulometría, mineralógico, geoquímica y geocronología de U-Pb en circones de la playa Chachlacas del estado de Veracruz, en el Golfo de México. Los resultados de granulometría reflejaron que las arenas son de tamaño fino, de bien a muy bien clasificadas, con un ambiente de alta energía. El SEM-EDS sugiere fases minerales correspondientes a minerales pesados como piroxenos y anfíboles procedentes de rocas básicas e intermedias, asociadas con actividad volcánica. Las microtexturas observadas sugieren un ambiente costero de alta energía.

González-Marín (2019) llevó a cabo un trabajo de investigación acerca de procedencia en circones de la Playa Montepío, San Andrés Tuxtla, en el Suroeste del Golfo de México, mediante estudios de geoquímica y geocronología U-Pb. Se realizó también un análisis granulométrico en 12 muestras de la Playa Montepío que reflejó que las arenas son de tamaño mediano a grueso con moderadamente buena clasificación lo cual sugiere que el

origen se dió en un ambiente de playa de alta energía con influencia continental. De acuerdo a los resultados de mineralogía, se encontraron minerales como cuarzo, piroxenos, plagioclasas, feldespatos y ferromagnesianos lo cual se puede explicar por la cercanía del Campo Volcánico de Los Tuxtlas. Asimismo, los resultados de geoquímica sugieren una fuente ígnea félsica. Las edades encontradas para los zircones fueron Proterozoico y Cenozoico.

Paulín-Zavala (2020) llevó a cabo un trabajo acerca de la procedencia de circones a través de geoquímica y geocronología por U-Pb de la playa Miramar Sur, en el estado de Tamaulipas, en el Golfo de México. El análisis granulométrico indicó que los sedimentos son arenas finas, de bien a muy bien clasificadas sugiriendo un ambiente de playa de alta energía. Mediante los análisis de mineralogía se encontró abundancia de cuarzo, feldespato potásico y en menor concentración se encontraron plagioclasa, ilmenita y titano-magnetita y en pocas cantidades se encontraron piroxeno, vidrio, circón y calcita. Las microtexturas encontradas reflejan un transporte de alta energía en un medio subacuático. Los resultados de geoquímica indica un origen ígneo.

Ramos-Vázquez (2021) realizó una investigación acerca de la procedencia de sedimentos detríticos de las playas de Tamaulipas, Tabasco, Campeche y sedimentos marinos del Golfo de México. Los resultados de granulometría reflejaron diferencias entre los tamaños de grano así como en la clasificación de los sedimentos variando entre cada playa. De acuerdo con la mineralogía se hallaron minerales de cuarzo, moscovita, cordierita, ferrosilita, albita, anortita, calcita, aragonita y material biogénico variando en contenido en cada playa. La geoquímica sugirió una procedencia de rocas intermedias, félsicas y máficas. El índice de intemperismo sugirió un intemperismo de moderado a alto. Con respecto a las microtexturas encontradas en este análisis, se sugiere un transporte eólico y fluvial principalmente.

4. HIPÓTESIS

Se espera encontrar diferencias entre los sedimentos de ambas playas, debido al aporte geológico que tiene cada área de estudio lo cual puede verse reflejado en las características granulométricas, geoquímicas y mineralógicas.

5. JUSTIFICACIÓN

Desarrollar una investigación que contribuya ampliamente al incremento del conocimiento en los campos de estudio dentro de la geología marina para generar datos nuevos acerca de la procedencia de los sedimentos en áreas en las cuales no se tiene registro de análisis similares es importante debido a que toda la información recabada puede ser reforzada por más trabajos y brindar un marco mas detallado de la evolución geológica de la zona así como también los valores de contaminación obtenidos pueden ayudar a evaluar la condición ambiental de las playas de estudio y en un futuro poder tomarse las medidas necesarias para mitigar el impacto en caso de existir niveles de contaminación.

Se han realizado diversos estudios acerca de procedencia de sedimentos en diversas zonas del mundo, analizando características texturales, geoquímicas y mineralógicas de los granos de playas; Sin embargo, la inferencia sobre la procedencia basada en la geoquímica de elementos mayores y trazas a lo largo de las áreas costeras del Golfo de México han sido poco documentadas, por lo que en este proyecto se pretende aplicar la información obtenida de los análisis granulométricos, mineralógicos, microtexturas y geoquímicos para inferir la procedencia de los sedimentos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos localizadas en el Golfo de México, siendo así uno de los pocos estudios de procedencia realizados en sedimentos de playa.

6. OBJETIVO GENERAL

Analizar las variaciones texturales, mineralógicas y geoquímicas de sedimentos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos del Golfo de México para interpretar su procedencia.

6.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar la distribución de los minerales y la relación con su procedencia.

Analizar las Microtexturas de los granos de cuarzo para determinar ambiente de depósito, transporte y abrasión físico-química.

Determinar las concentraciones de elementos mayores y traza de los sedimentos para identificar el tipo de roca fuente y su litología.

Interpretar los niveles de contaminación empleando indicadores ambientales tales como el índice de geo-acumulación, factor de enriquecimiento mediante la concentración de elementos trazas: Co, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y, Zn.

7. MARCO TEÓRICO

7.1 ÁREA DE ESTUDIO

El Golfo de México (Figura 1) se localiza hacia el sureste de Norteamérica y se encuentra delimitado al norte por los Estados Unidos (estados Florida, Alabama, Mississippi, Luisiana y Texas) y cinco estados mexicanos hacia el este (Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán) y al sureste con la isla de Cuba. El Golfo de México mide aproximadamente 1600 km de este a oeste, 900 km de norte a sur y tiene un área superficial de 1 543 000 km². El litoral marino se extiende de Cape Sable, Florida, a la punta de la península de Yucatán que abarcan 5,700 km y otros 380 km que pertenecen al extremo noreste de Cuba. Los lugares de muestreo son de diferentes partes de las costas del Golfo de México. De esta manera será posible estudiar las diferencias en los parámetros anteriormente citados. Fueron seleccionadas dos playas: 1) Tecolutla (Figura 2) (20°28'44.82"N y 97°00'20.58" W) y 2) Coatzacoalcos (Figura 3) (18°09'19.03"N y 94°25'40.61"W) pertenecientes al estado de Veracruz.

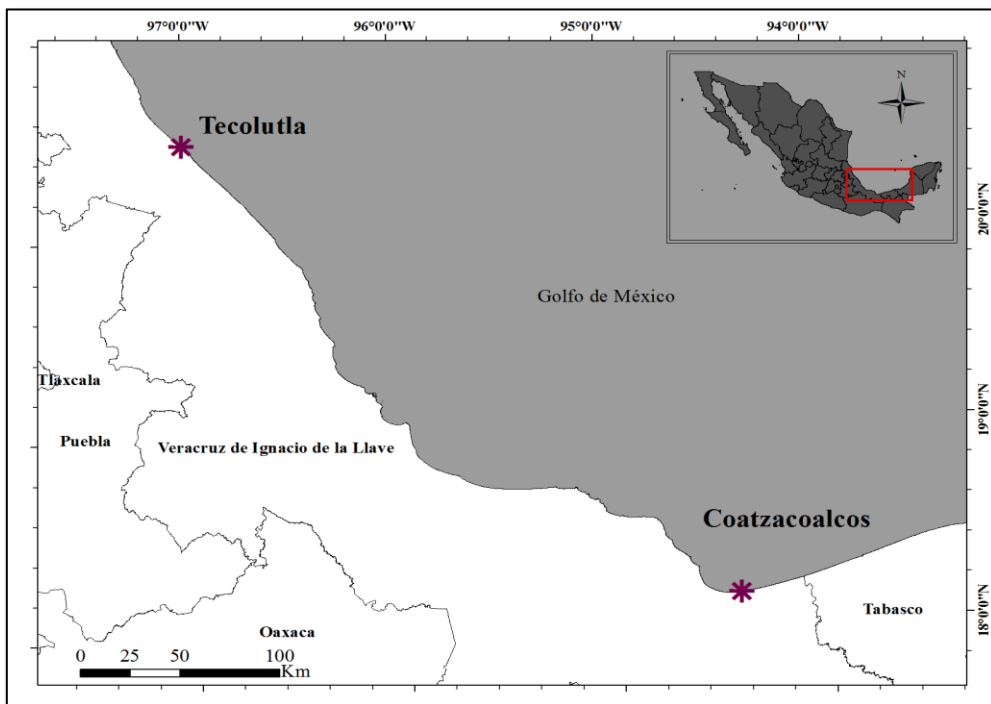


Figura 1. Mapa de localización de las dos playas de estudio en el Golfo de México

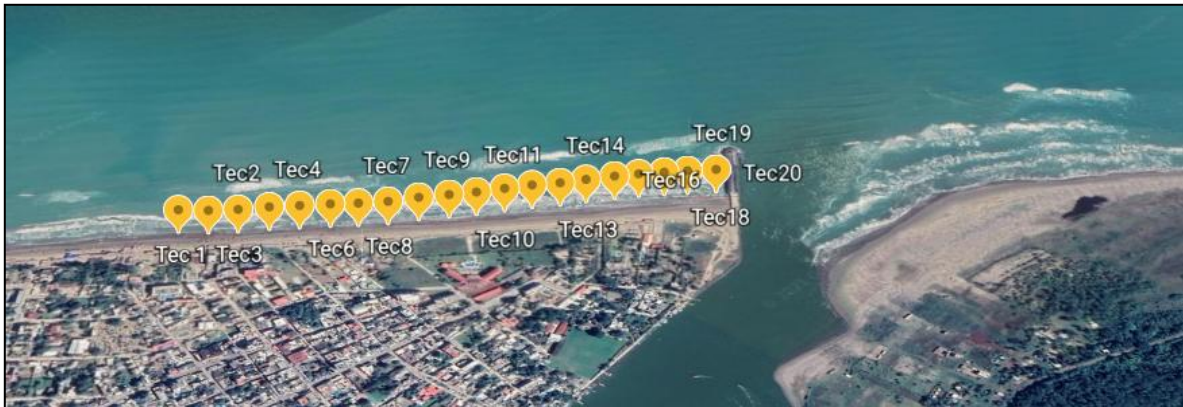


Figura 2. Muestras de estudio en la playa de Tecolutla, Veracruz en el Golfo de México.

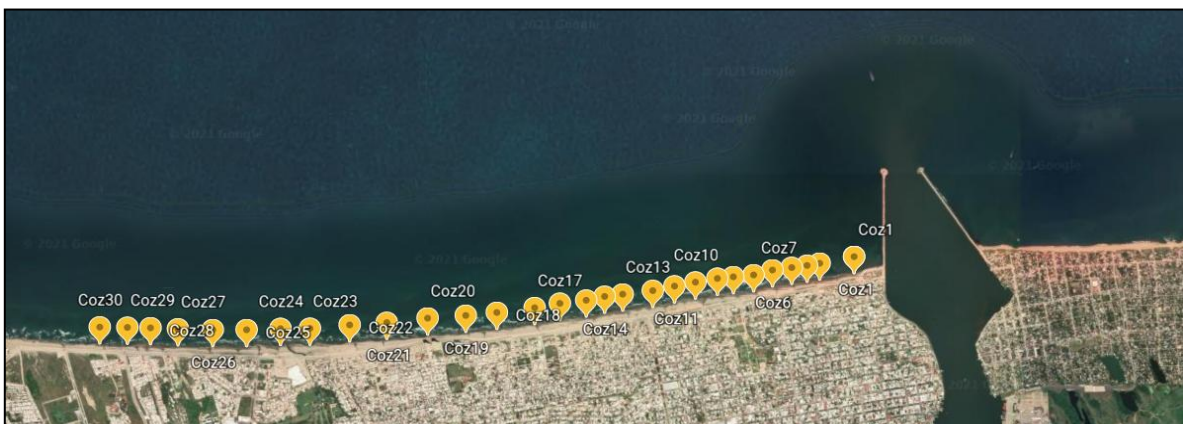


Figura 3. Muestras de estudio de la playa de Coatzacoalcos, Veracruz, en el Golfo de México.

7.2 CLIMA

El Golfo de México se encuentra ubicado entre las latitudes de 18° y 30° N, se localiza en la región subtropical en la cual se presentan abundantes lluvias y en consecuencia la humedad en esta zona es alta (Poag, 1981). La región de Tecolutla presenta un clima Cálido subhúmedo (Aw) con lluvias en verano, de acuerdo a la clasificación de Köppen.

Para Coatzacoalcos se han descrito dos estaciones, de lluvias y huracanes entre los meses de junio-septiembre y la estación de secas entre marzo-mayo. (Bahena-Manjarrez *et al.*, 2002; Ontiveros-Cuadras *et al.* 2012).

7.3 FISIOGRAFÍA

El Golfo de México presenta una amplia Plataforma Continental, la cual tiene mayor amplitud en las Penínsulas de Yucatán y Florida, y su menor amplitud se encuentra en las costas de Tamaulipas y Veracruz. La parte de la Plataforma Continental que ocupa la Península de Yucatán, también se le conoce como Banco de Campeche y está limitada al occidente por el Escarpe de Campeche (Martínez-López y Parés-Sierra, 1998).

La fisiografía del fondo marino determina en gran medida la distribución de la fauna bentónica, debido a que las características de la Plataforma Continental (como profundidad, amplitud, topografía) influyen en las corrientes, mareas, transporte y depositación de sedimentos y nutrientes, además en la luz incidente en las aguas del Golfo de México (Poag, 2015).

7.4 HIDROGRAFÍA

De acuerdo a estudios, alrededor del 80% del total de los sedimentos transportados por los ríos se depositan en las zonas costeras (playas y agua marina somera) y el 20% restante son transportados por la acción del viento, corrientes marinas. La influencia de los ríos para el transporte de sedimentos es fundamental para entender los procesos geológicos de la zona de estudio, ya que cuando ocurren inundaciones, crecidas, el transporte y acumulación de sedimentos será mayor que en temporada de secas (Escobar, 2002).

Entre los sistemas lóticos principales que forman parte del estado de Veracruz se encuentran: los ríos Pánuco, Tuxpan, Cazonas, Náutla, Antigua, Jamapa, Papaloapan y

Coatzacoalcos. Los ríos Tecolutla y Coatzacoalcos son considerados los más importantes para este trabajo debido a la influencia que tienen sobre el área de estudio.

7.4.1 Río Tecolutla

El río Tecolutla pertenece a la región hidrológica No. 27 Tuxpan-Náutla y tiene su origen en la Sierra Norte del estado de Puebla. En la parte septentrional es conocido como río Necaxa (Peña y Ayala, 2004).

La cuenca hidrográfica del río Tecolutla (Figura 4) se localiza geográficamente entre los 19°30' y 20°30' N, y los 97° y 98°15' W, abarca una superficie de ~7800 Km³. La parte alta de la cuenca se caracteriza por tener cauces angostos y profundos con pendientes abruptas, la zona intermedia de la cuenca la pendiente disminuye y para la zona baja, la cuenca atraviesa la planicie costera de Veracruz y sus aguas desembocan en el Golfo de México (Silva y Flores, 2017).

La cuenca es afectada principalmente por ciclones tropicales que se forman en el Caribe y Golfo de México los cuales influyen en la generación de lluvias intensas en los meses de junio a septiembre, mientras que para los meses de octubre a marzo es afectada por Nortes; todos estos fenómenos meteorológicos influyen en un incremento en el caudal del río Tecolutla (Sesma *et al.* 2012), en el cual se ha registrado gastos de hasta 4.65 y 2.19 m³/s en eventos de inundación.



Figura 4. Cuenca Hidrográfica del Río Tecolutla

El Río Tecolutla drena entre las coordenadas $19^{\circ} 30' - 20^{\circ} 30' N$ y $97^{\circ}-98^{\circ} 15' W$, tiene su origen en Xalapa al este de México y es uno de los ríos mas extensos, el cual drena un gran parte de terreno volcánico (Self, 1975).

Abarca el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) el cual está representado geológicamente por una procedencia del Neógeno al Cuaternario, extendiéndose a través de la parte central de México por alrededor de 1000 km. La litología del río que se drena está dominada por rocas sedimentarias y volcánicas del Cenozoico.

7.4.2 Río Coatzacoalcos

El río Coatzacoalcos se localiza en le vertiente del Golfo de México, comprende la cuenca hidrológica No. 29 y se caracteriza por ser uno de los más caudalosos de México (Ramírez, 2016). El gasto medio de la región hidrológica es de $1.78 \text{ m}^3/\text{s}$, que representa el 29.8% del gasto total del estado de Veracruz, de agua salobre (C.R.M, 1994). La cuenca abarca una

superficie de 21 599 Km² lo cual representa el 1.10% de todo el país (Figura 5) (INEGI, 2016). Es importante recalcar que la zona del delta del río Coatzacoalcos y el litoral se ven influenciados de manera negativa por los desechos industriales del área, así como los sedimentos depositados en las dunas son utilizados como material de construcción (Toledo *et al.* 1988).

Los ciclones y ondas tropicales son los principales fenómenos meteorológicos que provocan fuertes lluvias y como consecuencia inundaciones (Pérez *et al.* 2014).

El Río Coatzacoalcos se origina en el estado de Oaxaca y drena entre las coordenadas 17° 46' - 18° 10' N y 92° 25' - 94° 31' W con un promedio anual de descarga de 32, 732 Km² (Tamayo, 1991). La litología del Río Coatzacoalcos drena áreas principalmente de rocas volcánicas y metasedimentarias (metaclásticas y rocas carbonatadas) del Complejo Oaxaca.

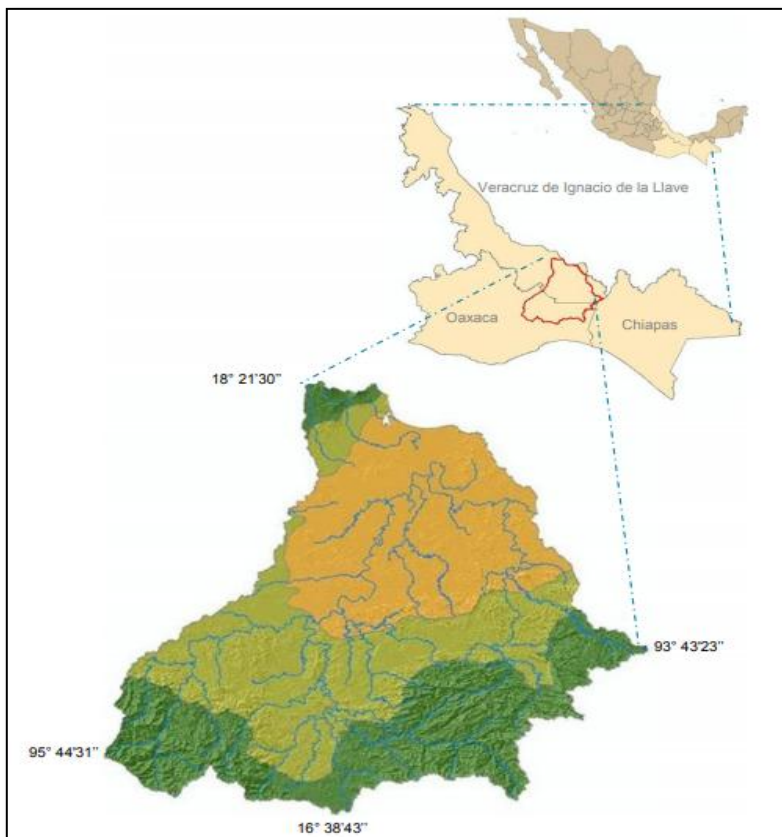


Figura 5. Cuenca hidrológica del Río Coatzacoalcos

7.5 OCEANOGRAFÍA FÍSICA

7.5.1 CORRIENTES MARINAS

7.5.1.1 Circulación del Golfo de México

La circulación en el Golfo de México se divide en dos principales corrientes (Figura 6), La Corriente del Lazo que se presenta en el oriente del Golfo de México y una Celda Anticiclónica, la cual se presenta en la zona occidental (Martínez-López y Parés-Sierra, 1998).

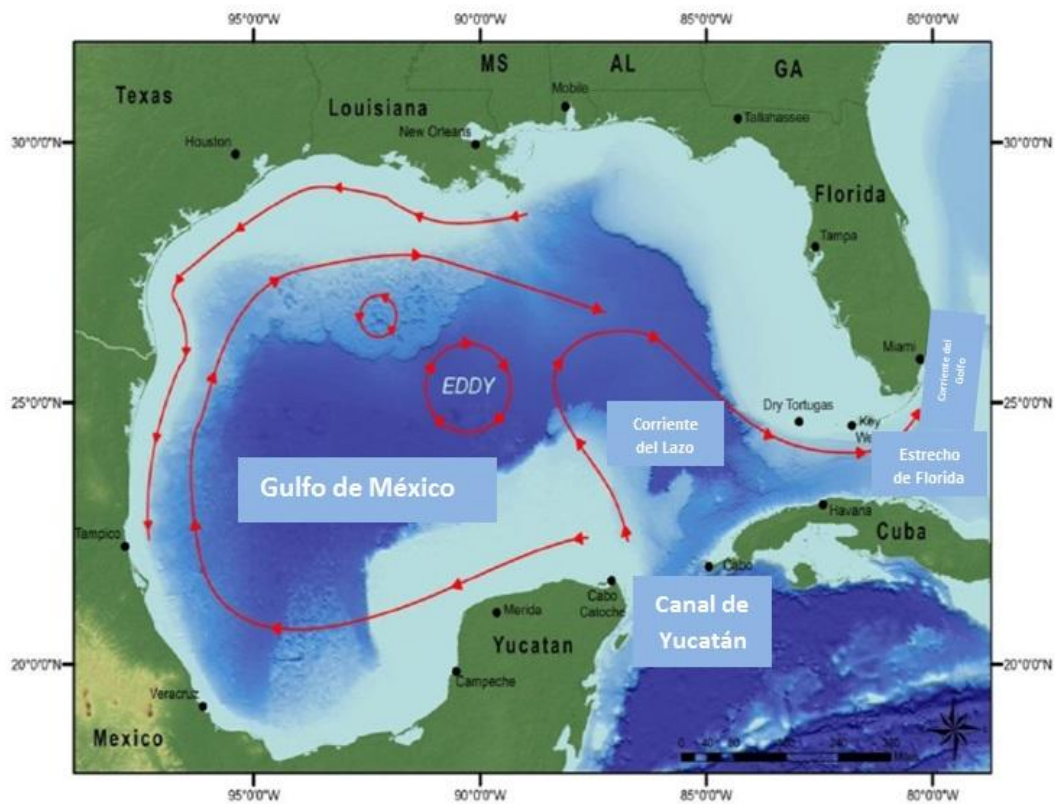


Figura 6. Corrientes del Golfo de México (Arthur *et al.* 2017).

7.5.1.2 Corriente del Lazo

Se atribuye a la Corriente de Yucatán como la principal causa de intrusión de la corriente del Lazo, esto debido a sus características dinámicas (Martínez-López y Parés-Sierra,

1998). En primavera y verano la Corriente de Lazo penetra más hacia el norte, mientras que en otoño e invierno se repliega hacia Cuba dando origen al gran giro anticiclónico, siendo éste de aproximadamente 300 km de diámetro, que posterior a su formación se desplaza hacia el oeste. En las zonas de las plataformas costeras de Texas-Luisiana, Florida y la Bahía de Campeche se observan giros ciclónicos, estos giros ciclónicos son más pequeños que el gran giro anticiclónico pues alcanzan diámetros máximos de aproximadamente 150 km (Monreal-Gómez y Salas-de-León 1990).

La corriente de Yucatán se intensifica en primavera y verano, debido a la fricción que se produce con el talud continental se genera una surgencia lo que provoca que el nivel de agua suba llevando consigo sedimentos suspendidos y nutrientes. Una vez que esta corriente entra en el Golfo de México se forma la Corriente de Lazo la cual se une con la corriente de Florida.

La corriente del Lazo hace que se forme un núcleo cálido y de alta salinidad, cuando este núcleo se desprende de la corriente del Lazo migra hacia el oeste hasta llegar frente a las costas de Tamaulipas y es en este punto donde se produce una colisión con el Talud continental, este choque produce oscilaciones, las cuales a su vez provocan el estrangulamiento de la corriente del Lazo (Monreal-Gómez *et al.* 2004).

7.5.1.3 Celda Anticiclónica

En el Golfo de México se forman giros de acuerdo a la diferencia de presión, por ejemplo en una zona de baja presión se forma un giro ciclónico, mientras que en una zona de alta presión se formará un giro anticiclónico (Monreal-Gómez *et al.* 2004).

De acuerdo a Ichiye (1962) se plantea la hipótesis de que los remolinos anticiclónicos que se desprenden de la Corriente del Lazo son la principal causa de la formación de la Celda anticiclónica. Posteriormente Elliot (1982), concluyó que la circulación en el Golfo de México (GDM) es impulsada por remolinos anticiclónicos provenientes del oriente reforzando la hipótesis de Ichiye (1962).

La traslación de los giros anticiclónicos es de ~ 6 km/día y pueden tener una duración de ~ 9 a 12 meses. La colisión de los giros anticiclónicos con el Talud genera subdivisiones y

una pérdida de volumen para estos giros aproximadamente una tercera parte ($2 \times 10^4 \text{ Km}_3$) de su volumen total ($6 \times 10^4 \text{ Km}_3$), a través de esto, transfieren movimiento angular a la masa de agua ocasionando giros ciclónicos (Vidal-Lorandini, y Vidal-Lorandini, 1997).

7.5.1.4 Corrientes derivadas de la acción del viento

En el Golfo de México, la acción del viento tiene una alta importancia con respecto a la generación de las corrientes a lo largo de las costas, produciéndose con una dirección igual a la dirección de la componente del vector del viento a lo largo de la costa. En la parte oeste del Golfo de México, las corrientes generadas por el viento sufren un cambio en su dirección, debido al cambio de dirección del viento a través del año. Durante el verano la dirección es predominante del sureste, mientras que en otoño e invierno son predominantes del noreste. La geomorfología del Golfo de México aunada a la acción del viento genera que se formen corrientes estacionales que van en dirección de las manecillas del reloj y en otras zonas en forma contraria. En otoño e invierno las corrientes a lo largo de las costas de Tamaulipas y Veracruz van en dirección sur en sentido contrario de las manecillas del reloj, mientras que en las costas de Campeche y Yucatán las corrientes van en sentido de las manecillas del reloj, estos procesos generan una confluencia de las corrientes en la parte sur del Golfo, lo cual genera flujos perpendiculares a las costas, desde la zona de plataforma hacia la zona oceánica. Durante el verano cuando los vientos tienen una componente hacia el norte, las corrientes son predominantes hacia esa dirección.

Por otra parte, las corrientes y por consecuencia el transporte de los sedimentos a través de ellas, se ven afectadas a su vez por los fenómenos meteorológicos como los nortes, que son característicos de vientos fríos de alta intensidad cuya dirección predominante es del norte-noreste, afectando las regiones costeras del Golfo de México. Estas condiciones meteorológicas ocurren durante las estaciones de otoño e invierno, asociándose con el movimiento hacia el sur de un anticiclón de núcleo frío. Los nortes tienen un impacto sobre todo en las costas del oeste y sur del Golfo de México, propiciando fuertes lluvias y la generación de vientos intensos (20 m/s), así como un oleaje alto de hasta 5.5 m (Marca-Castillo, 2018).

Martínez-López y Parés-Sierra (1998) realizaron un estudio para analizar las características de las corrientes marinas en el Golfo de México en verano (Figuras 7 y 8) e invierno (Figuras 9 y 10). En verano se reportó una corriente localizada en el Banco de Campeche la cual se dirige con dirección hacia el oeste, con velocidades entre 5 - 17 cm/s frente a las costas de Yucatán. Al llegar al Escarpe de Campeche esta corriente se divide en dos. Para la región occidental del Golfo (costas de Veracruz, Tamaulipas, etc) se reporta una corriente débil con dirección N-S paralela a la línea de costa, con magnitudes promedio de 1 cm/s para las costas de Veracruz. El transporte de las capas más profundas (> 200 m) en la parte occidental del Golfo se observa una circulación anticiclónica para la parte occidental en verano. Las velocidades de corrientes profundas varían de 0.02 a 0.10 m/s.

Para la temporada de invierno, la corriente superficial tiene similitud con la que se presenta en el Banco de Campeche. Para la porción occidental perteneciente a las costas de Veracruz, Tamaulipas y el Escarpe de Campeche la corriente presenta una dirección hacia el NO, con magnitudes de 1 cm/s. Para las capas más profundas también se encontraron características similares que la corriente superficial, sin embargo se diferencia por la presencia de un flujo con dirección hacia el sur en la parte occidental del Golfo de México.

Los sedimentos una vez suspendidos son transportados a favor de la dirección de las corriente, por lo cual estas juegan un papel muy importante para el transporte, depositación y por consiguiente la procedencia de los sedimentos (Carranza-Edwards *et al.* 2009 y Garzanti, 2014).



Figura 7. Corrientes superficiales promedio inducidas por el viento de verano. (Martínez-López y Parés-Sierra, 1998).

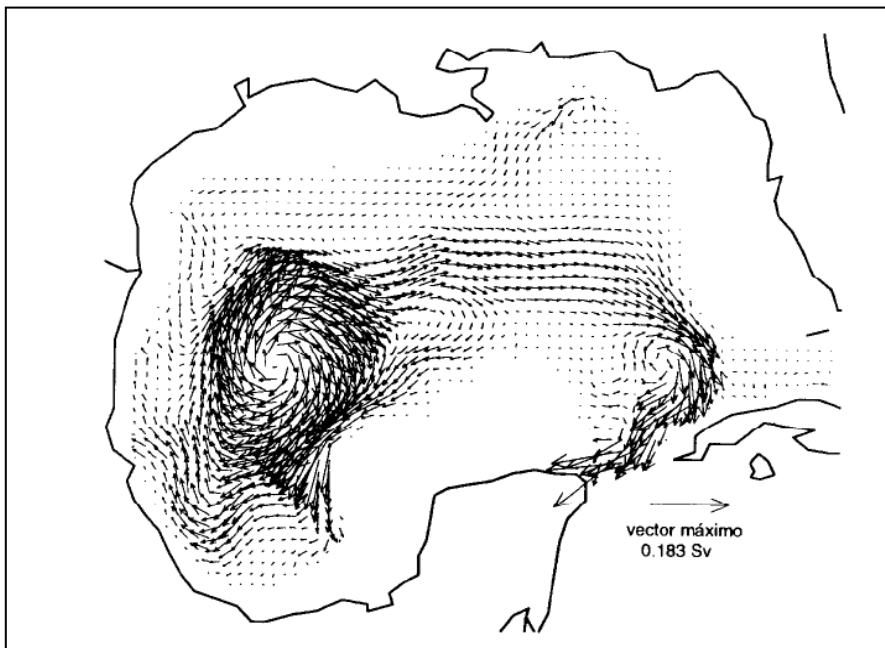


Figura 8. Transporte promedio (Sv), verticalmente integrado desde los 200 m de profundidad al fondo, generado por el viento de verano (Martínez-López y Parés-Sierra, 1998).

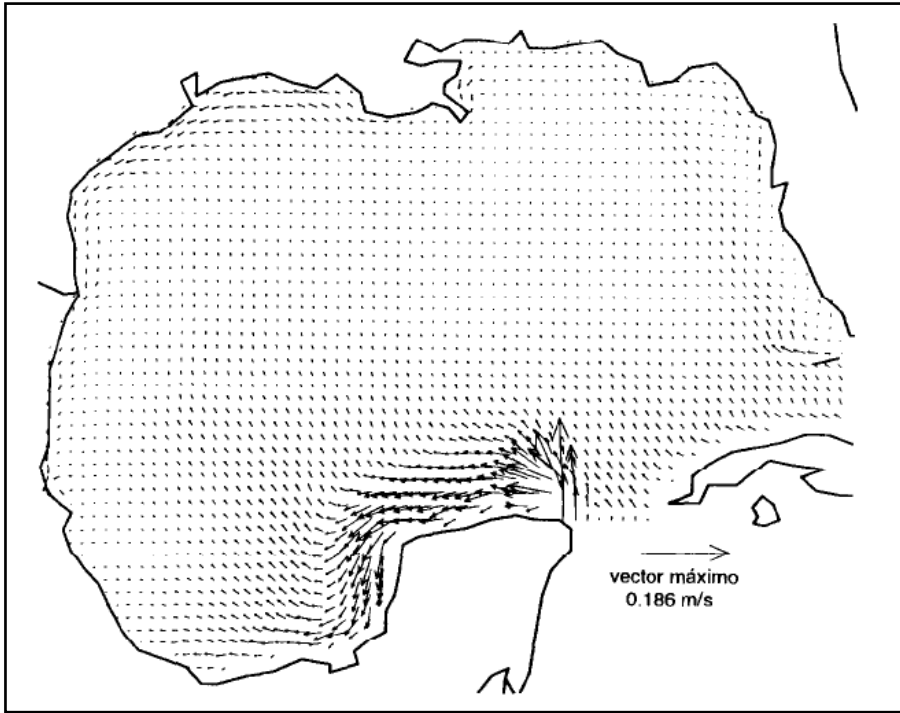


Figura 9. Corrientes superficiales promedio inducidas por el viento de invierno (Martínez-López y Parés-Sierra, 1998).

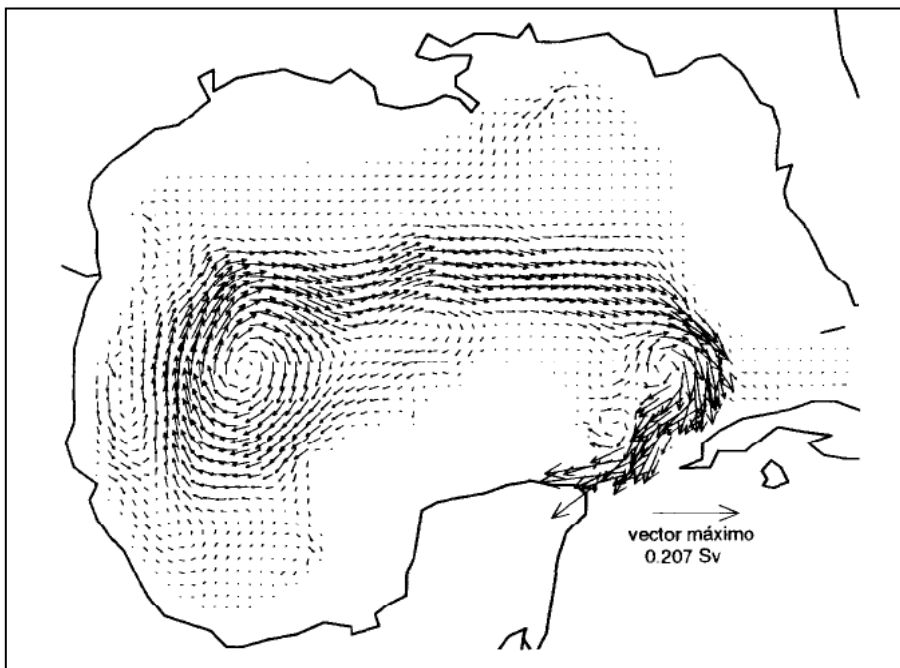


Figura 10. Transporte promedio (Sv), verticalmente integrado desde los 200 m de profundidad al fondo, generado por el viento de invierno (Martínez-López y Parés-Sierra, 1998).

8. MARCO GEOLÓGICO

8.1 Geología Regional

En la región sur del Golfo de México, la geología (Figura 11) tiene un gran impacto en los procesos tanto costeros como sedimentológicos y biológicos, principalmente en la transición entre los sedimentos carbonatados de la Plataforma Continental de Yucatán y los sedimentos deltáicos de los ríos Grijalva-Usumacinta, además de los diversos procesos de sedimentación que tienen lugar en la región, los cuales son generados por mecanismos físicos, oceanográficos, climáticos (Yáñez-Correa, 1969). En la tabla 1 se observan los eventos tectónicos que tuvieron lugar en el Golfo de México.

Tabla 1. Eventos tectónicos del Golfo de México. Tomado de Bird <i>et al.</i> (2005)				
Comienzo del rifting	Deposición de sal	Comienzo de la rotación de Yucatán	Comienzo de la extensión del piso oceánico	Termino de la extensión del piso oceánico
Triásico Tardío a Jurásico temprano	Completado en el Oxfordiano (160 Ma)	Finales del Jurásico Medio (Calloviano)	Calloviano, 166 Ma	Berrasiano, (140 Ma)
Triásico Tardío, 200 Ma	Principios del Calloviano a mitad del Oxfordiano por 160 Ma		Principios del Oxfordiano, 160 Ma	Berrasiano, 137.85 Ma
Triásico Tardío, 210 Ma	Finales del Calloviano, por 160 Ma		Finales del Calloviano, 160 Ma	Berrasiano, 140 Ma
Triásico Tardío a Jurásico Temprano	Finales del Jurásico Medio a principios del Jurásico Tardío		Finales del Calloviano u Oxfordiano Temprano	Principios del Jurásico Tardío pero más tardar a mitad del Oxfordiano
Triásico Tardío a finales del Jurásico Medio	Finales del Jurásico Medio		Jurásico Tardío	Principios del Jurásico Tardío
Triásico Tardío	Calloviano ~168-163 Ma		Principios del Oxfordiano, 160 Ma	Berrasiano, 140 Ma
Triásico Medio a Tardío, 230 Ma	Finales del Calloviano, principios del, Oxfordiano a Kimmeridgiano, 160-150 Ma	Finales del Calloviano a principios del Oxfordiano, 160 Ma	Kimmeridgiano, 150 Ma	Berrasiano. 140 Ma

8.2 GEOLOGÍA LOCAL

En el Golfo de México los mecanismos de sedimentación son influenciados por la acción de las mareas, corrientes oceánicas, el clima, la geología de la zona (principalmente las rocas que rodean la costa), el flujo costero, y el aporte de sedimentos que proviene de los ríos.

Poag (2015) divide al Golfo de México en 7 principales regímenes sedimentarios de acuerdo a su tipo de sedimentación y a su fuente principal de aporte de sedimentos:

Régimen del Mississippi. El aporte sedimentario de esta región se compone principalmente de limos, arcillas y detritus orgánicos, estos se depositan en aguas profundas para formar el abanico aluvial del Mississippi, aunque también aportan sedimentos finos de limos y arcillas a las llanuras de Sigsbee y Florida.

Régimen Central de Texas. Los sedimentos en esta área son de composición siliciclástica fangosa (limos, arcillas) los cuales cubren una gran porción de la plataforma de Texas-Louisiana.

Régimen de Río Grande. Predominan sedimentos siliciclásticos formando una banda estrecha de depósitos fangosos directamente en la entrada de la cuenca.

Régimen Mexicano. Este régimen es abastecido por el sistema de ríos Grijalva-Usumacinta, los sedimentos predominantes son terrígeno-arenosos.

Régimen del Este de México. Rodea el margen del Golfo de México desde el este del Mississippi hasta el sur de Florida. El sustrato principal en el interior de la plataforma es arena.

Régimen de Carbonatos de Florida. Abarca la parte sur, centro y algunos segmentos exteriores del estante del oeste de Florida.

Régimen de Carbonatos de Campeche. Los sedimentos predominantes en esta zona son carbonatos biogénicos y se encuentran en las zonas de los Arrecifes de Alacrán, Cayos Arca, Triángulos, y Cayo Arenas.

En cuanto a la geología local, las costas del estado de Veracruz se encuentran influenciadas por distintas provincias como la Planicie Costera del Golfo.

La Geología de Tecolutla, se ve influenciada por el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), que abarca unidades de andesitas de composición calco-alkalina (Plioceno-Mioceno) (Cantagrel y Robin, 1979; Negendank *et al.* 1985) y basaltos de composición alcalina (Plioceno) (Negendank *et al.* 1985).

Coatzacoalcos se encuentra parcialmente cubierto por el campo volcánico de los Tuxtlas, con una litología de rocas basálticas con edad del Mioceno Superior (~ 5.8 Ma), coladas de composición andesítica, andesitas, tobas andesíticas y basaltos del Plioceno, también se presentan cubriendo a la litología antes mencionada depósitos aluviales de grava y limo del cuaternario así como depósitos de arena por transporte eólico y depósitos litorales de cuarzo y magnetita (SGM, 2004).

En el estado de Veracruz, específicamente en la parte central se localiza la unión entre la Sierra Madre Oriental y el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) la cual se orienta de noroeste a sureste, esta morfología influye en la dirección del viento que se dirige del norte hacia el noroeste, aunado al viento generado por la presión sobre el agua del Golfo (represamiento de flujo), además el viento que procede de la parte continental y litoral intensifican los vientos entre 100 y 120 km/h (Zavala-Hidalgo y Fernández-Eguiarte, 2004).

Las arenas son transportadas en su mayoría por flujos turbulentos en la zona costera y marina (Pettijohn *et al.* 1972). En el Golfo de México los vientos y la forma propia del golfo generan zonas donde las corrientes se direccionan a favor de las manecillas del reloj y otras zonas donde giran en dirección contraria (Zavala-Hidalgo *et al.* 2003).

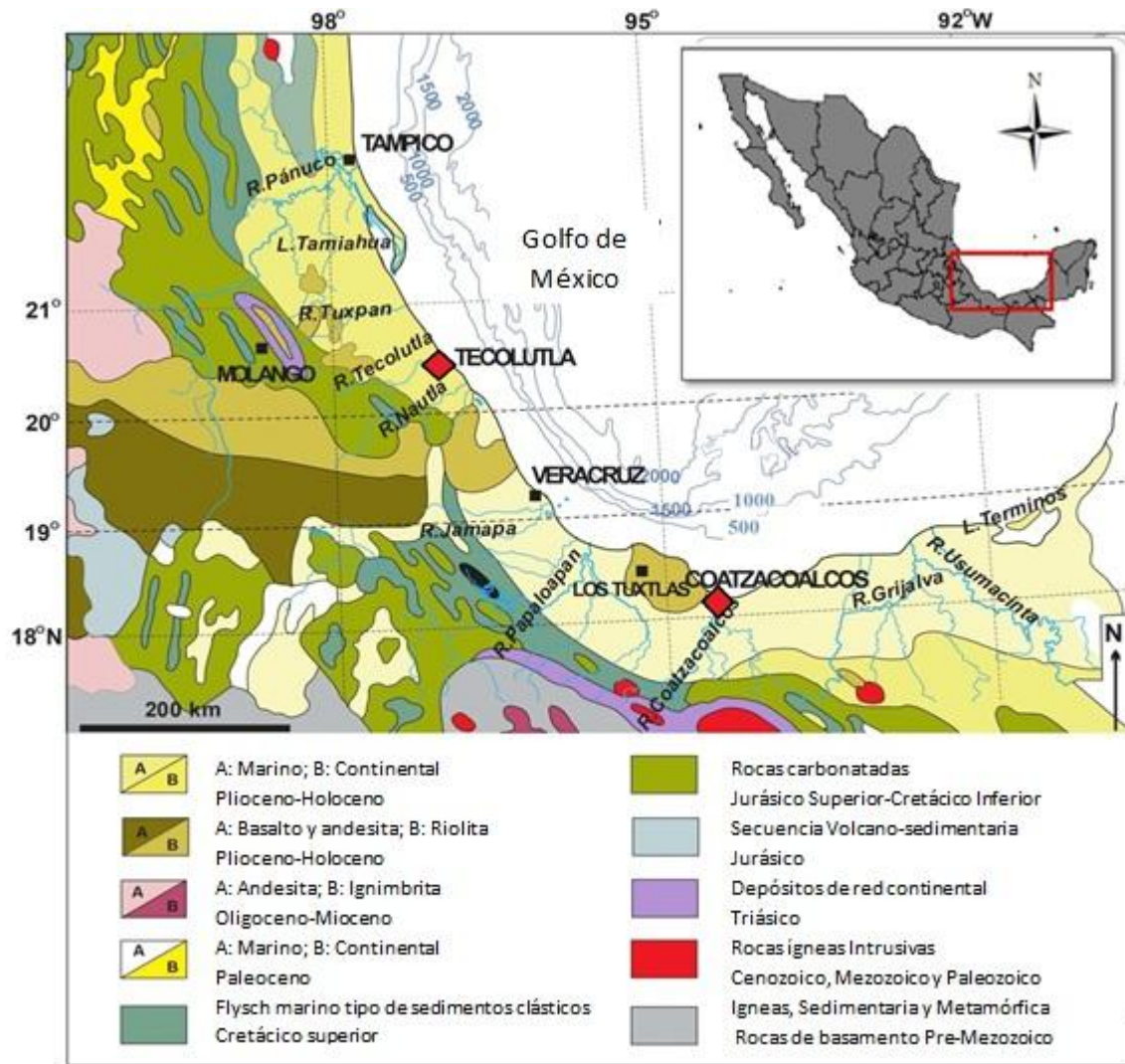


Figura 11. Mapa geológico regional del área de estudio, los rombos de color rojo representan las dos áreas de estudio. Tomado y modificado de Ramos-Vázquez *et al.* (2018).

9. METODOLOGÍA

9.1 Trabajo de campo – muestreo

Fueron recolectadas un total de 49 muestras correspondientes a las dos áreas de estudio, (n = 20 playa Tecolutla; n = 29 playa Coatzacoalcos), dichas muestras se recolectaron en la zona de la mesoplaya, dejando una distancia de 50 m entre cada una de ellas, recolectando 1 kg de cada muestra aproximadamente. Las muestras de Tecolutla fueron recolectadas en el mes de agosto, las muestras de Coatzacoalcos fueron recolectadas en julio de 2017.

9.2 GRANULOMETRÍA

9.2.1 Procesamiento de las muestras:

Para este análisis se utilizaron 49 muestras, 20 de pertenecientes a la playa de Tecolutla y 29 a la playa de Coatzacoalcos.

Se colocaron en recipientes de aluminio y se pusieron a secar en la campana a una temperatura de 50°C durante 3 días, una vez ya completamente secas se guardaron en sus bolsas previamente lavadas y secadas para evitar contaminar la muestra total. Se pesaron entre 35-40 g de cada muestra para tamizarlas.

El tamizador que se utilizó fue el Ro-Tap Sieve shaker y las muestras se tamizaron con las siguientes medidas de Phi: -1, -0.75, 0, 0.25, 1, 1.25, 2, 2.25, 3, 3.25, 4, PAN. Después de tamizar, se pesó el sedimento de cada tamiz y se registró, lo mismo se hizo para todas las muestras. Se obtuvieron los porcentajes acumulativos y se graficaron para poder obtener los valores de Phi los cuales se emplearon para hacer los cálculos y determinar los parámetros de Mz (tamaño de grano), clasificación, simetría y curtosis. Los resultados se presentan en la tabla 2.

9.2.2 Características texturales:

El análisis de los parámetros texturales de los sedimentos nos brinda información relevante acerca de las características del medio de transporte tales como energía, duración, incluso el tipo de transporte y su relación al ambiente sedimentario en el cual fueron depositados, en conjunto con otros análisis como la mineralogía y la geoquímica se puede saber la procedencia de los sedimentos (Sahu, 1964).

Tamaño de grano: Es un parámetro textural el cual representa el tamaño de grano medio de la distribución total de sedimentos, nos aporta información acerca de las características de la roca fuente, así como el tiempo y el tipo de transporte que sufrieron los sedimentos.

Se calcula con la siguiente ecuación:

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

Su clasificación es:

-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 Mediana
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

Desviación estándar gráfica inclusiva ($\sigma_{1\phi}$): Esta característica permite conocer el grado de clasificación de los sedimentos, lo cual nos puede brindar información acerca de las

características del transporte, tales como la energía y la duración, puesto que entre más tiempo se hayan transportado los clastos, mejor será la clasificación (Figura 12) (Stow, 2006).

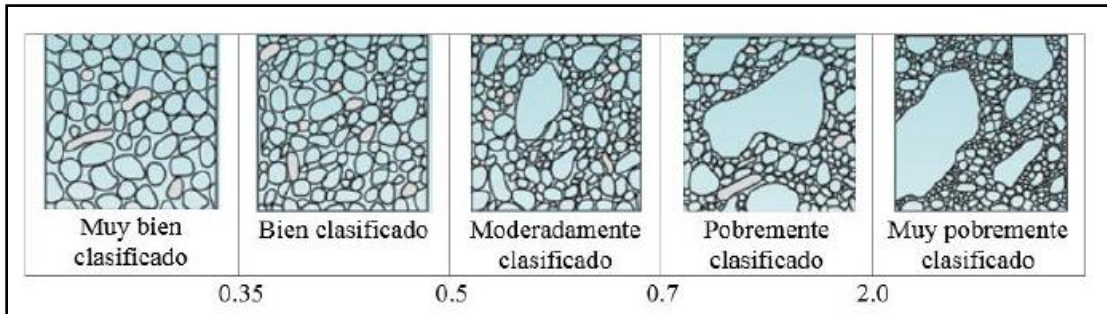


Figura 12. Grados de clasificación de los sedimentos. Tomado y modificado de Stow (2006)

La ecuación para obtener la desviación es la siguiente:

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

Su clasificación es:

$< 0.35 \phi$	Muy bien clasificado
0.35ϕ a 0.50ϕ	Bien clasificado
0.50ϕ a 0.71ϕ	Moderadamente bien clasificado
0.71ϕ a 1.00ϕ	Moderadamente clasificado
1.00ϕ a 2.00ϕ	Mal clasificado
2.00ϕ a 4.00ϕ	Muy mal clasificado
$> 4.00 \phi$	Extremadamente mal clasificado

Grado de asimetría (**Sk_I**): Es una medida de dispersión de los sedimentos la cual nos indica que las curvas con asimetría positiva tienden a una mayor cantidad de material fino, mientras que las curvas con asimetría negativa, tienden a una mayor cantidad de material grueso.

El grado de asimetría se obtiene mediante la siguiente ecuación:

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

Su clasificación es:

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

Curtosis Gráfica (**KG**): Es una medida de angulosidad de la curva de frecuencia y depende de la distribución de los tamaños de grano, pueden ser de tipo leptocúrtica, mesocúrtica y Platicúrtica

Se obtiene a través de la siguiente ecuación:

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

Su clasificación es:

<0.67 ϕ	Muy platicúrtico
0.67 ϕ a 0.90 ϕ	Platicúrtico
0.90 ϕ a 1.11 ϕ	Mesocúrtico
1.11 ϕ a 1.50 ϕ	Leptocúrtico
1.50 ϕ a 3.00 ϕ	Asimétrico hacia los gruesos
>3.00 ϕ	Extremadamente leptocúrtico

9.3 MINERALOGÍA:

9.3.1 Difracción de Rayos-X: En este trabajo se estudió la mineralogía de diferentes rangos del tamaño de grano para obtener las regularidades de la distribución de cada

mineral pesado en varios intervalos granulométricos de los sedimentos. Normalmente el rango más abundante en varios tipos de minerales pesados es 0.053 - 0.25mm. También una interpretación de los datos es determinar el tipo de fuente (tipo de roca fuente) de los materiales detríticos. Los minerales pesados concentrados en diferentes intervalos granulométricos identificaron mediante el método de Difracción de Rayos-X (Laboratorio de Difracción de Rayos-X del Instituto de Geología). En total, para el estudio mineralógico se utilizaron 20 muestras de sedimentos costeros de las playas de Tecolutla y Coatzacoalcos.

9.3.2 SEM-EDS 10 muestras para cada playa, 20 muestras en total de Tecolutla y Coatzacoalcos (Microscopio Electrónico de Barrido con microanálisis de rayos X del Instituto de Geofísica). Así como para microtexturas de la playa de Tecolutla.

9.4 MICROTERTURAS

Para este estudio se analizaron 28 granos de arena de cuatro muestras de la playa de Tecolutla, en la cual se encontraron diversas microtexturas, las cuales se enlistan en la tabla 3. Los granos de cuarzo se pisaron con ayuda de un pincel y unas gotas de agua, observándose en un microscopio óptico en el laboratorio de sedimentología del ICMYL. Posteriormente los granos se analizaron en el laboratorio SEM, utilizando el microscopio electrónico de barrido con ampliaciones desde X170 (100 µm) – X4300 (5 µm).

9.5 GEOQUÍMICA

9.5.1 Geoquímica de elementos mayores: 20 muestras pertenecientes a las dos playas de estudio (10 muestras para cada playa) se secaron a 50° C y se pulverizaron en un equipo Fritsch Pulverisette 2 en el laboratorio de Sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. El proceso se llevó a cabo con mucha precaución para evitar la contaminación de las muestras. Se pesaron entre 18-20 g de muestra triturada para los análisis de elementos mayores, traza y tierras raras. El análisis de elementos mayores se realizó en el laboratorio de Fluorescencia de Rayos X (LFRX) del Instituto de Geología de la UNAM, con un Espectrómetro RIGAKU ZSX Primus II y se determinaron las

concentraciones de los siguientes elementos: (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O y P_2O_5).

9.5.2 Elementos trazas: Los análisis de los elementos trazas (Ba, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Hf, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Th, U, V, Y, Zn, y Zr) se realizaron en el Laboratorio de Estudios Isotópicos, Centro de Geociencias, Instituto de Geología, UNAM con un equipo de ICP-MS. Se analizaron un total de 20 muestras para ambas playas de estudio (10 para cada playa).

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1 GRANULOMETRÍA

Las muestras de sedimentos de Tecolutla son arenas finas ($2.3-2.5 \pm 0.07 \Phi$) de bien a muy bien clasificadas ($0.26-0.41 \Phi$) con una asimetría que tiende a valores negativos y por ende hacia tamaños gruesos ($\sim -0.09 \pm 0.16$) y presenta curvas de tipo mesocúrticas y leptocúrticas. Los sedimentos de Coatzacoalcos se clasifican como arenas finas a medias ($1.4-2.32 \pm 0.22 \Phi$) de moderadamente bien clasificadas a muy bien clasificadas ($0.29 - 0.96 \Phi$), presentando una asimetría con tendencia hacia los tamaños gruesos ($\sim -0.19 \pm 0.11$) con curvas en su mayoría de tipo mesocúrticas y leptocúrticas (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros de granulometría de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos del Golfo de México

	Mz (Φ)	σ	Ski	K _G		Mz (Φ)	σ	Ski	K _G
TEC1	2.37	0.36	-0.17	1.02	COZ7	1.98	0.56	-0.11	0.87
TEC2	2.33	0.41	-0.17	1.23	COZ8	2.13	0.49	-0.23	1.01
TEC3	2.42	0.32	-0.17	1.50	COZ9	2.30	0.43	-0.24	0.99
TEC4	2.40	0.34	-0.05	1.00	COZ10	2.23	0.40	-0.24	1.07
TEC5	2.48	0.26	0.02	0.66	COZ11	2.48	0.26	-0.19	1.30
TEC6	2.50	0.27	0.06	0.82	COZ12	2.42	0.31	-0.20	0.96
TEC7	2.53	0.31	-0.33	1.08	COZ13	2.45	0.34	-0.28	1.09
TEC8	2.42	0.25	0.11	1.48	COZ14	2.48	0.30	-0.16	1.08
TEC9	2.40	0.36	-0.39	1.28	COZ15	2.28	0.35	-0.08	0.82
TEC10	2.47	0.34	-0.21	1.00	COZ16	2.20	0.31	0.02	0.81
TEC11	2.42	0.33	0.04	1.00	COZ17	2.23	0.40	-0.24	1.09
TEC12	2.37	0.27	-0.13	1.30	COZ18	2.27	0.44	-0.18	0.99
TEC13	2.32	0.28	0.07	1.11	COZ19	2.40	0.32	-0.14	1.00
TEC14	2.35	0.34	0.00	0.90	COZ20	2.37	0.37	-0.23	1.33
TEC15	2.43	0.34	0.12	1.00	COZ21	2.50	0.40	-0.23	0.85
TEC16	2.47	0.39	-0.39	1.14	COZ22	2.42	0.36	-0.04	1.52
TEC17	2.35	0.32	0.00	1.13	COZ23	2.37	0.34	-0.21	0.90
TEC18	2.30	0.33	-0.02	0.96	COZ24	2.45	0.36	-0.21	0.94
TEC19	2.30	0.37	-0.12	0.91	COZ25	2.45	0.30	-0.05	1.02
TEC20	2.28	0.30	-0.12	1.23	COZ26	2.33	0.29	-0.30	0.97
COZ1	2.47	0.29	0.00	1.17	COZ27	2.45	0.35	-0.24	0.82
COZ3	2.08	0.53	-0.21	1.00	COZ28	2.52	0.32	-0.28	1.18
COZ4	2.30	0.34	-0.35	1.00	COZ29	2.47	0.29	-0.24	1.29
COZ5	2.38	0.29	-0.15	1.17	COZ30	2.37	0.24	-0.51	1.37
COZ6	1.42	0.96	-0.15	0.97					

TEC: Muestras de arena de la playa Tecolutla; COZ: Muestras de arena de la playa Coatzacoalcos; Mz (Φ): Tamaño de grano; σ : Clasificación; Ski: Asimetría; K_G: Curtosis.

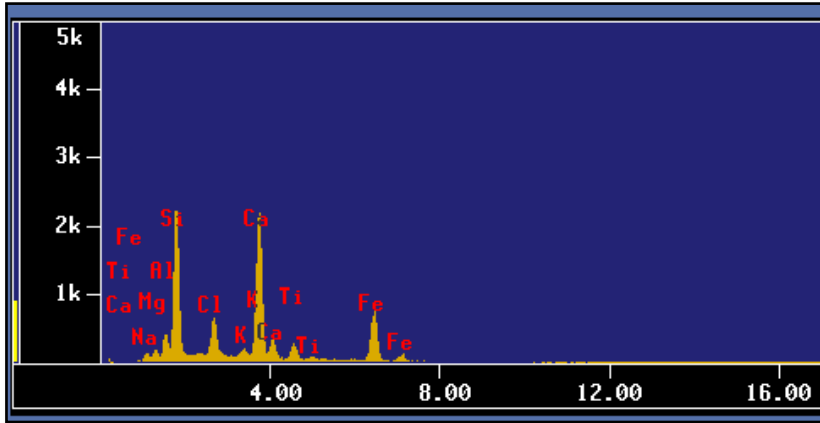
La buena clasificación de las arenas de Tecolutla sugieren que sufrieron un transporte largo, mientras que las arenas de Coatzacoalcos, aunque también reflejan de buena a moderada clasificación, podría sugerir que sufrieron un menor transporte en comparación con las arenas de Tecolutla, y por lo tanto que la fuente de procedencia se encuentra cerca

10.2 MINERALOGÍA

Cada área de estudio que se analiza en algún trabajo, contiene características geológicas únicas, que se debe a diversos factores como la litología de la zona, la actividad tectónica, la influencia de ríos, fenómenos meteorológicos (huracanes, sequías), acción de los vientos, corrientes marinas, etc; por lo tanto, es necesario realizar análisis como el de mineralogía, para conocer los minerales presentes en los sedimentos de las playas y poder inferir la fuente de procedencia, asimismo, al relacionar los resultados obtenidos junto con los de otros análisis como la granulometría y la geoquímica, se puede reconstruir la historia geológica y tectónica de la zona.

Los minerales que se encuentran de manera común en los sedimentos son: cuarzo, feldspatos, plagioclasas, moscovita, biotita, ortoclasa, microclina, rutilo, piroxenos, andalucita, calcita, entre otros. En la tabla 3 se presentan las principales asociaciones de los minerales más comunes en los sedimentos, de acuerdo a la clasificación de Feo-Codecido (1956):

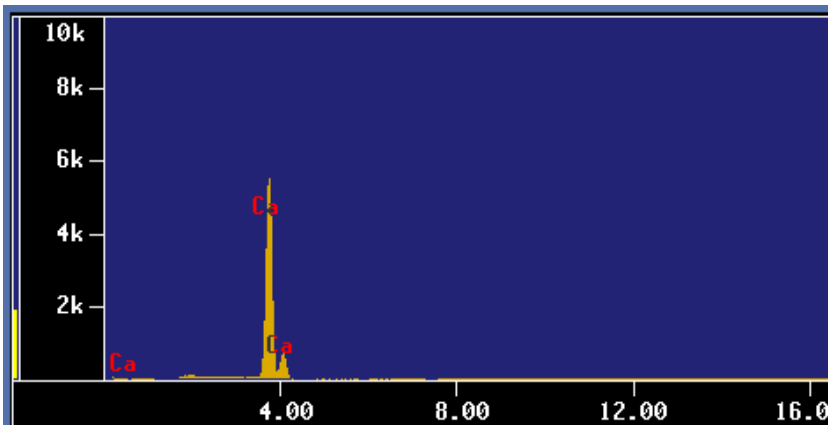
En las figuras 13-31, se presentan los resultados de los análisis de mineralogía de las muestras de Tecolutla y Coatzacoalcos cada una con su respectivo espectro y sus contenidos en porcentajes. En la Figura 13 se refleja la presencia de cuarzo (SiO_2), Plagioclasa $((\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_3\text{O}_8)$ e Ilmenita (FeTiO_3), el porcentaje de los contenidos de los principales óxidos, se encuentra representado en color rojo. El alto porcentaje en sílice podría sugerir un origen félsico, así como el alto contenido en CaO podría sugerir un alto contenido de biogénicos ó bien, una fuente cercana de composición cálcica.



Óxido	Peso %
Na ₂ O	3.602
MgO	2.824
Al ₂ O ₃	5.510
SiO ₂	31.023
SO ₃	0.464
Cl	3.625
K ₂ O	0.891
CaO	25.510
FeO	20.285
Cr ₂ O ₃	0.000
NiO	0.520
TiO ₂	5.364
MnO	0.381

Figura 13. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/Plagioclasa/Ilmenita)

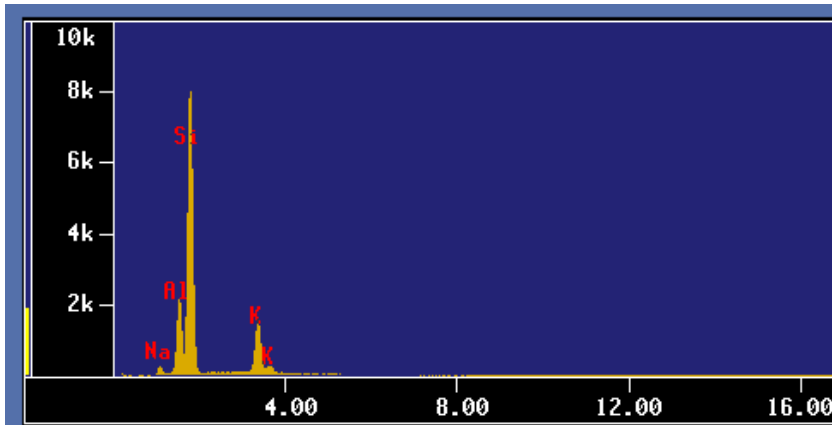
En la figura 14 se observa un enriquecimiento muy alto de CaO, lo cual sugiere una fuente de rocas carbonatadas y material biogénico.



Óxido	Peso %
Na ₂ O	0.646
MgO	0.366
Al ₂ O ₃	0.363
SiO ₂	0.238
SO ₃	0.517
Cl	0.000
K ₂ O	0.000
CaO	94.154
FeO	0.018
Cr ₂ O ₃	0.000
NiO	3.630
TiO ₂	0.000
MnO	0.067

Figura 14. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Calcita)

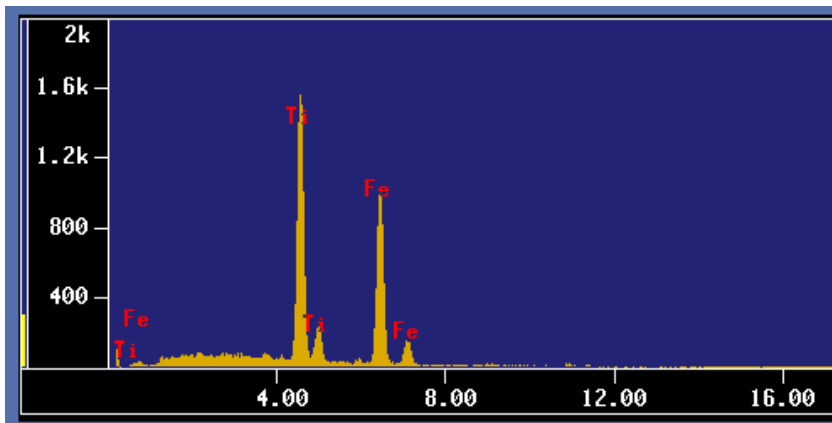
En la figura 15 se observa un alto contenido en los principales óxidos característicos de los feldspatos (K,Na,Ca,Ba,NH₄)(Si,Al)₄O₈, así como un mayor contenido en SiO₂ lo cual sugiere una fuente félsica.



Óxido	Peso %
Na ₂ O	4.051
MgO	0.000
Al ₂ O ₃	15.494
SiO ₂	67.915
SO ₃	0.167
Cl	0.144
K ₂ O	10.605
CaO	1.024
FeO	0.375
Cr ₂ O ₃	0.129
NiO	0.097
TiO ₂	0.000
MnO	0.000

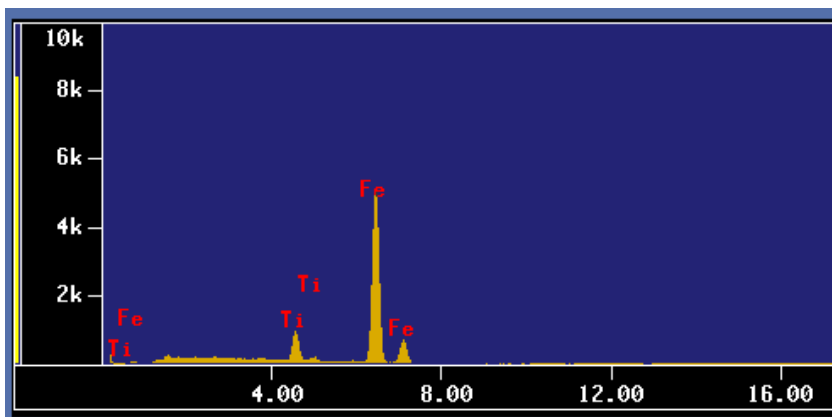
Figura 15. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/Feldespato)

En la figura 16, los altos contenidos de FeO y TiO₂ sugiere la presencia de Ilmenita Fe²⁺Ti⁴⁺O₃. Lo mismo se observa para la figura 17, aunque ambos espectros sugieren una composición similar y la presencia de Ilmenita, los contenidos en sus óxidos si presentan variaciones.



Óxido	Peso %
Na ₂ O	0.000
MgO	1.254
Al ₂ O ₃	0.443
SiO ₂	0.356
SO ₃	0.000
Cl	0.000
K ₂ O	0.043
CaO	0.519
FeO	47.382
Cr ₂ O ₃	0.000
NiO	0.053
TiO ₂	48.408
MnO	1.544

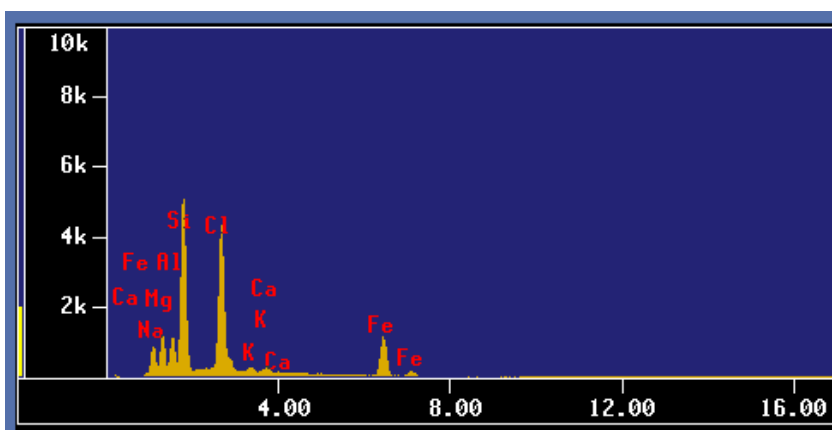
Figura 16. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Ilmenita)



Óxido	Peso %
Na ₂ O	0.561
MgO	1.547
Al ₂ O ₃	0.779
SiO ₂	0.548
SO ₃	0.000
Cl	0.146
K ₂ O	0.000
CaO	0.202
FeO	84.444
Cr ₂ O ₃	0.060
NiO	1.230
TiO₂	9.159
MnO	1.323

Figura 17. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Ilmenita)

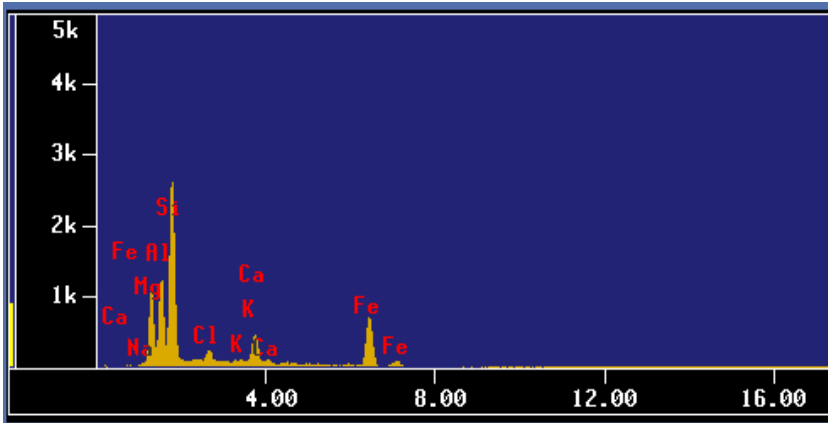
En la figura 18 se aprecia que el mayor contenido se encuentra en el SiO₂ por lo cual se puede considerar una posible procedencia de rocas félsicas, así como un alto contenido en otros óxidos característicos de minerales como la halita y feldespatos.



Óxido	Peso %
Na₂O	12.003
MgO	10.718
Al₂O₃	7.709
SiO₂	35.733
SO ₃	0.406
Cl	14.052
K ₂ O	0.684
CaO	0.968
FeO	16.675
Cr ₂ O ₃	0.000
NiO	0.714
TiO ₂	0.047
MnO	0.291

Figura 18. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/Halita/Feldespatos)

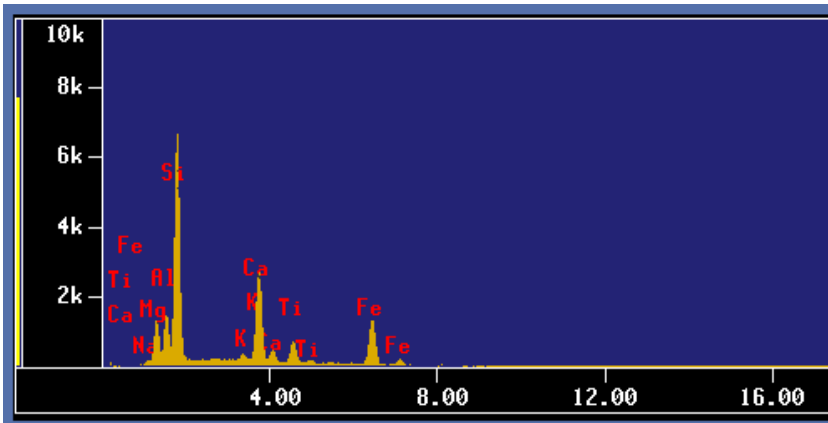
En la figura 19, se aprecia la presencia de minerales como cuarzo y plagioclasa, con un contenido en sus óxidos marcados en color rojo los que presentan mayor porcentaje.



Óxido	Peso %
Na ₂ O	0.312
MgO	18.805
Al ₂ O ₃	16.992
SiO ₂	38.002
SO ₃	0.719
Cl	1.175
K ₂ O	0.177
CaO	3.807
FeO	19.213
Cr ₂ O ₃	0.050
NiO	0.266
TiO ₂	0.141
MnO	0.342

Figura 19. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/Plagioclase).

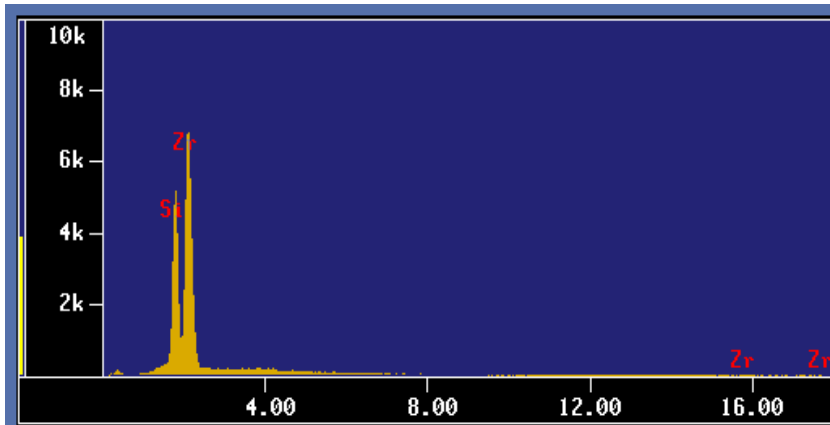
La figura 20 muestra contenidos de óxidos que hacen referencia a la presencia de minerales como el cuarzo, Plagioclase e Ilmenita, muy similar a lo observado en el espectro de la figura 13, sin embargo, existen algunas variaciones entre sus porcentajes.



Óxido	Peso %
Na ₂ O	1.777
MgO	11.007
Al ₂ O ₃	8.448
SiO ₂	40.577
SO ₃	0.121
Cl	0.131
K ₂ O	0.771
CaO	13.451
FeO	16.958
Cr ₂ O ₃	0.361
NiO	0.000
TiO ₂	5.827
MnO	0.570

Figura 20. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/Plagioclase/Ilmenita)

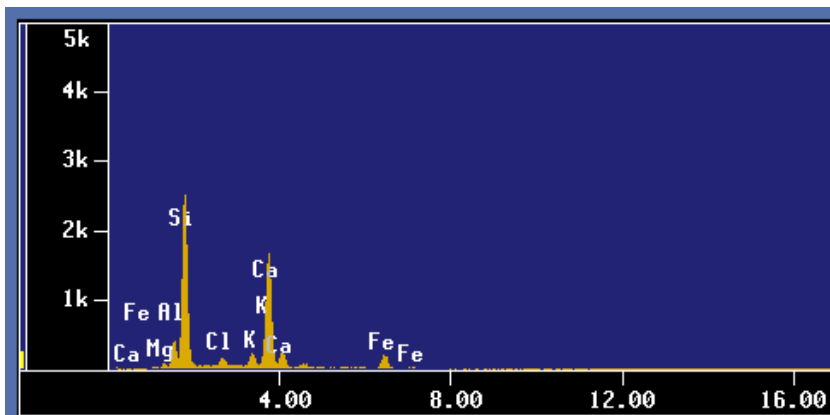
En la figura 21 se puede observar similitud como en la mayoría de los espectros un alto contenido en SiO₂ y un alto contenido en MnO, lo cual podría sugerir la presencia de piroxeno.



Óxido	Peso %
Na ₂ O	0.000
MgO	0.000
Al ₂ O ₃	0.419
SiO ₂	23.718
SO ₃	0.000
Cl	0.000
K ₂ O	0.000
CaO	0.000
FeO	0.000
Cr ₂ O ₃	0.000
NiO	0.050
TiO ₂	0.000
MnO	75.813

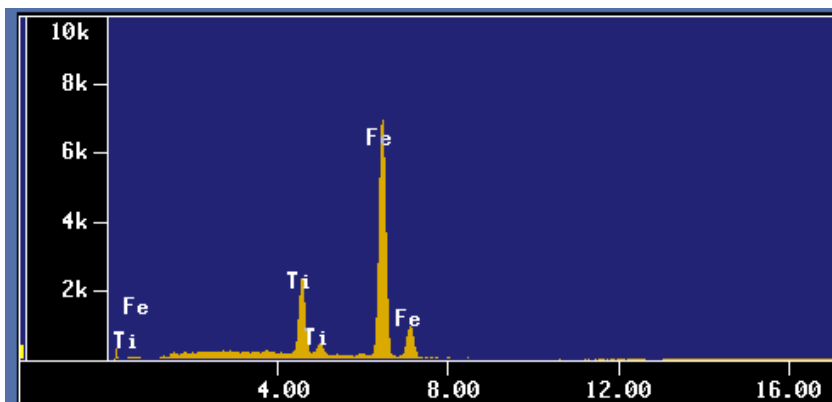
Figura 21. Espectro de sedimentos de la playa Tecolutla (Cuarzo/Piroxeno)

En las muestras de la Playa de Coatzacoalcos, se encontró cierta similitud en la presencia de los óxidos principales, con ligeras variaciones entre las muestras con respecto a la playa de Tecolutla, los minerales encontrados: Cuarzo, Plagioclasa, Ilmenita, Calcita (Figuras 22-31). La única diferencia en cuanto a los minerales presentes en ambas playas fue la ausencia de Feldespatos en las muestras de la playa de Coatzacoalcos.



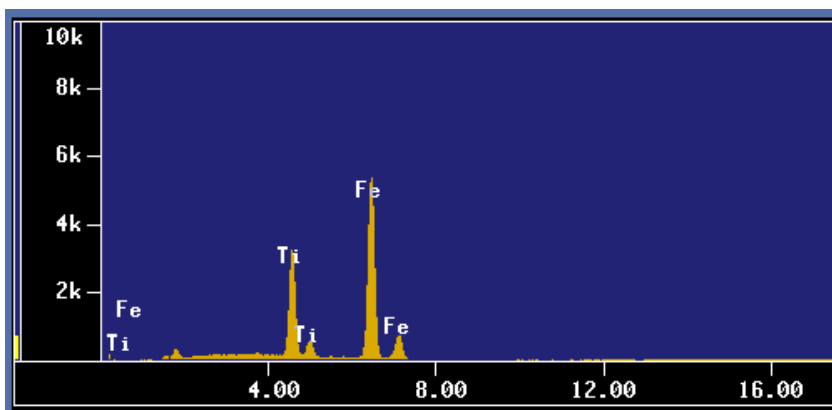
Óxido	Peso %
Na ₂ O	1.419
MgO	1.579
Al ₂ O ₃	7.055
SiO ₂	50.476
Cl	0.718
K ₂ O	2.808
CaO	26.380
TiO ₂	1.147
Cr ₂ O ₃	0.000
MnO	0.755
FeO	7.663

Figura 22. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Plagioclasa)



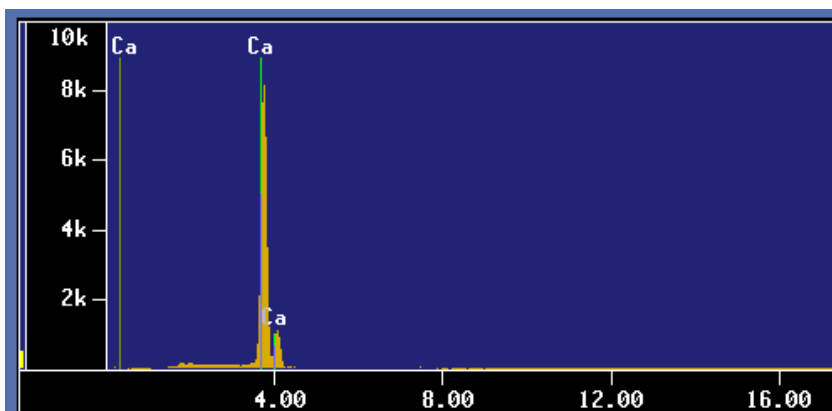
Óxido	Peso %
Na ₂ O	0.000
MgO	0.648
Al ₂ O ₃	0.972
SiO ₂	0.097
Cl	0.000
K ₂ O	0.000
CaO	0.365
TiO₂	17.311
Cr ₂ O ₃	0.384
MnO	1.289
FeO	78.934

Figura 23. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Ilmenita)



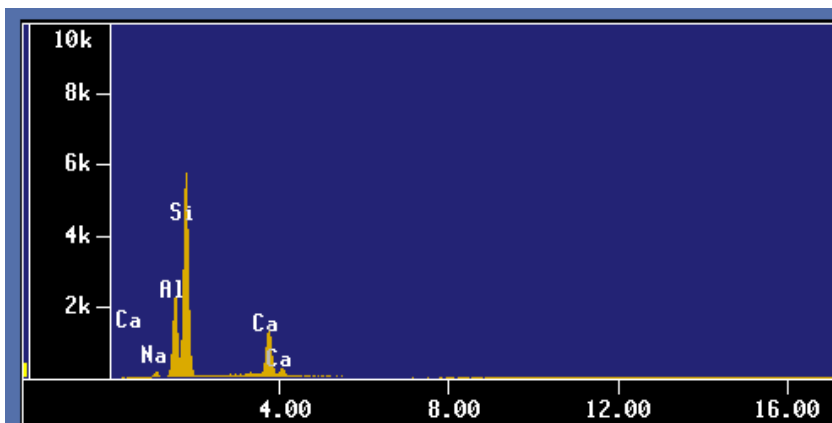
Óxido	Peso %
Na ₂ O	0.763
MgO	0.250
Al ₂ O ₃	0.848
SiO ₂	2.015
Cl	0.000
K ₂ O	0.163
CaO	0.255
TiO₂	28.161
Cr ₂ O ₃	0.113
MnO	0.403
FeO	67.028

Figura 24. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Ilmenita)



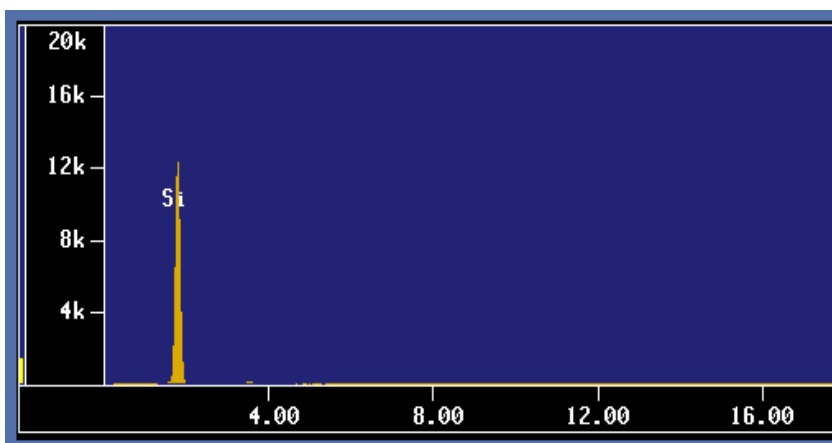
Óxido	Peso %
Na ₂ O	0.000
MgO	0.323
Al ₂ O ₃	0.478
SiO ₂	1.254
Cl	0.132
K ₂ O	0.000
CaO	95.973
TiO ₂	0.000
Cr ₂ O ₃	0.335
MnO	0.745
FeO	0.759

Figura 25. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Calcita)



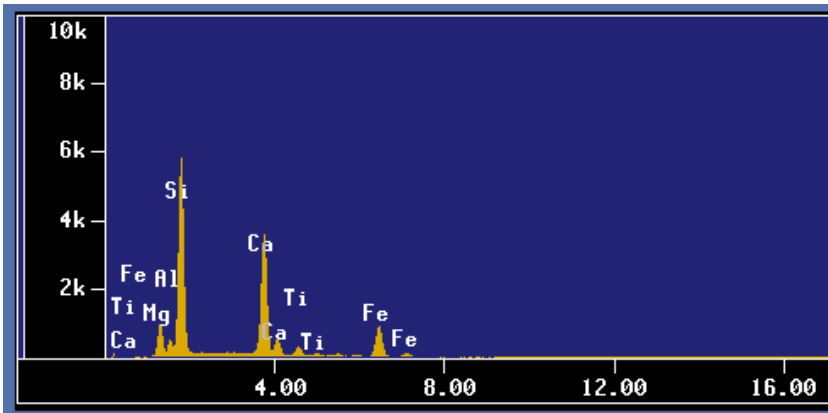
Óxido	Peso %
Na ₂ O	3.961
MgO	0.000
Al ₂ O ₃	21.294
SiO ₂	62.218
Cl	0.026
K ₂ O	0.390
CaO	11.665
TiO ₂	0.000
Cr ₂ O ₃	0.013
MnO	0.056
FeO	0.378

Figura 26. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Plagioclasa)



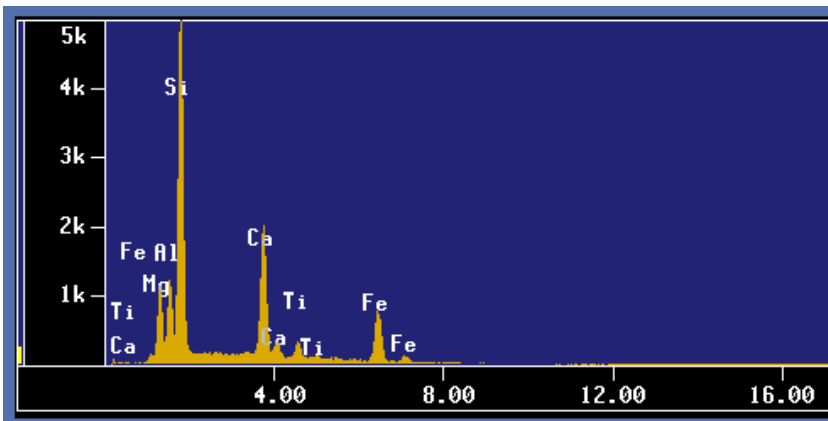
Óxido	Peso %
Na ₂ O	0.044
MgO	0.014
Al ₂ O ₃	0.000
SiO ₂	99.798
Cl	0.039
K ₂ O	0.000
CaO	0.000
TiO ₂	0.104
Cr ₂ O ₃	0.000
MnO	0.000
FeO	0.000

Figura 27. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo)



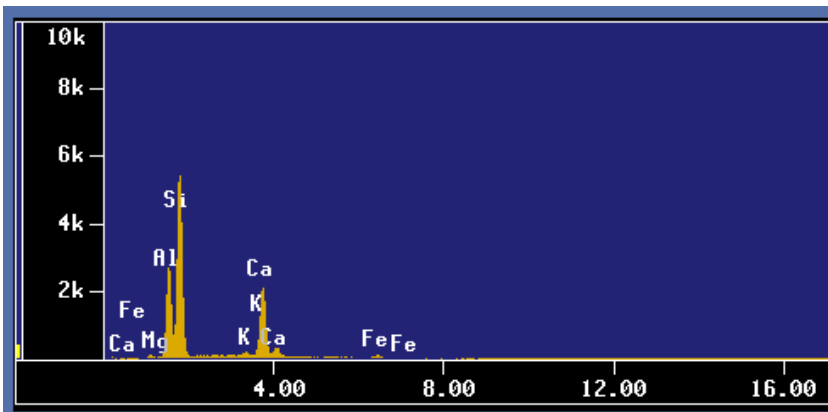
Óxido	Peso %
Na ₂ O	1.131
MgO	10.514
Al ₂ O ₃	3.506
SiO₂	43.557
Cl	0.076
K ₂ O	0.000
CaO	22.348
TiO ₂	3.326
Cr ₂ O ₃	0.724
MnO	0.407
FeO	14.411

Figura 28. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Calcita/Ilmenita)



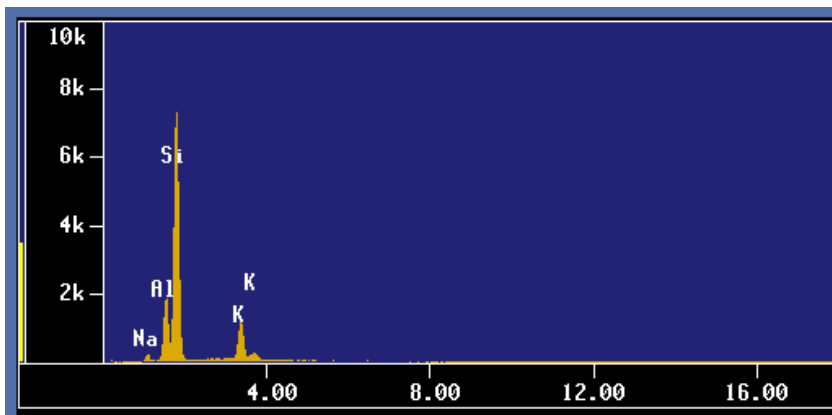
Óxido	Peso %
Na ₂ O	1.746
MgO	12.949
Al₂O₃	10.335
SiO₂	45.174
Cl	0.141
K ₂ O	0.203
CaO	13.303
TiO ₂	3.062
Cr ₂ O ₃	0.000
MnO	0.363
FeO	12.724

Figura 29. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Ilmenita/Plagioclase)



Óxido	Peso %
Na ₂ O	2.752
MgO	0.000
Al₂O₃	22.708
SiO₂	55.870
Cl	0.000
K ₂ O	0.560
CaO	15.451
TiO ₂	0.308
Cr ₂ O ₃	0.160
MnO	0.106
FeO	2.085

Figura 30. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Plagioclase)



Óxido	Peso %
Na ₂ O	4.405
MgO	0.000
Al ₂ O ₃	14.891
SiO ₂	69.022
Cl	0.125
K ₂ O	8.922
CaO	1.750
TiO ₂	0.000
Cr ₂ O ₃	0.055
MnO	0.123
FeO	0.706

Figura 31. Espectro de sedimentos de la playa Coatzacoalcos (Cuarzo/Plagioclasa)

Para los sedimentos de Tecolutla, los minerales encontrados fueron cuarzo, calcita, plagioclasa, ilmenita, halita, feldespato y piroxeno. Mientras que para las muestras de Coatzacoalcos se encontraron calcita, cuarzo, plagioclasa, ilmenita. Entre las dos playas se encuentran diferencias en cuanto a la variedad de los minerales presentes, sin embargo se puede observar que el cuarzo es el mineral que predomina en ambas playas. También se puede apreciar que solo en una muestra de la playa de Tecolutla se encuentra un porcentaje alto de Cl, lo cual puede atribuirse a las sales del agua de mar. En los sedimentos de Tecolutla se encontró piroxeno, lo cual puede indicar que la fuente de procedencia es cercana, ya que el piroxeno es un mineral muy inestable, sin embargo, en los sedimentos de Coatzacoalcos no fue encontrado.

10.3 MICROTERTURAS

El análisis de microtexturas presentes en los granos de arena resulta una herramienta útil para identificar el paleoambiente del cual provienen los sedimentos y conocer los mecanismos de transporte (Kasper-Zubillaga y Faustinos-Morales, 2007; Armstrong-Altrin y Natalhy-Pineda, 2014).

Las microtexturas se pueden clasificar en dos principales tipos: mecánicas y químicas, lo cual dependerá a su vez del tipo de ambiente del cuál procede como por ejemplo: eólico, marino, fluvial y glacial. En algunos casos existe una mezcla de microtexturas que ocurre cuando el sedimento estuvo expuesto a diferentes ambientes (Newson y Ladd, 1999; Chackroun *et al.* 2009).

Tabla 3. Microtexturas identificadas y su respectivo origen de la playa de Tecolutla, Veracruz.

Microtextura	Origen	Paleoambiente
Contorno subredondeado	Mecánico	Marino/eólico
Contorno subangular	Mecánico	Eólico
Contorno redondeado	Mecánico	Marino/eólico
Contorno angular	Mecánico	Eólico
Fracturas concoidales	Mecánico	Fluvial, marino, eólico
Escalones (steps)	Mecánico	Glaciar, litoral, energía de olas (alta energía)
Marcas en V	Mecánico	Glacio-fluvial, fluvial y sub-acuático
Rectas (Straights)	Mecánico	Litoral y energía de olas
Hoyos de disolución	Químico	Glaciofluvial, zona intersticial y diagenético
Glóbulos de sílice	Químico	Depositación/diagenético
Película de Sílice	Químico	Diagenético
Relieve resaltado	Mecánico/Químico	Glacial y energía de olas

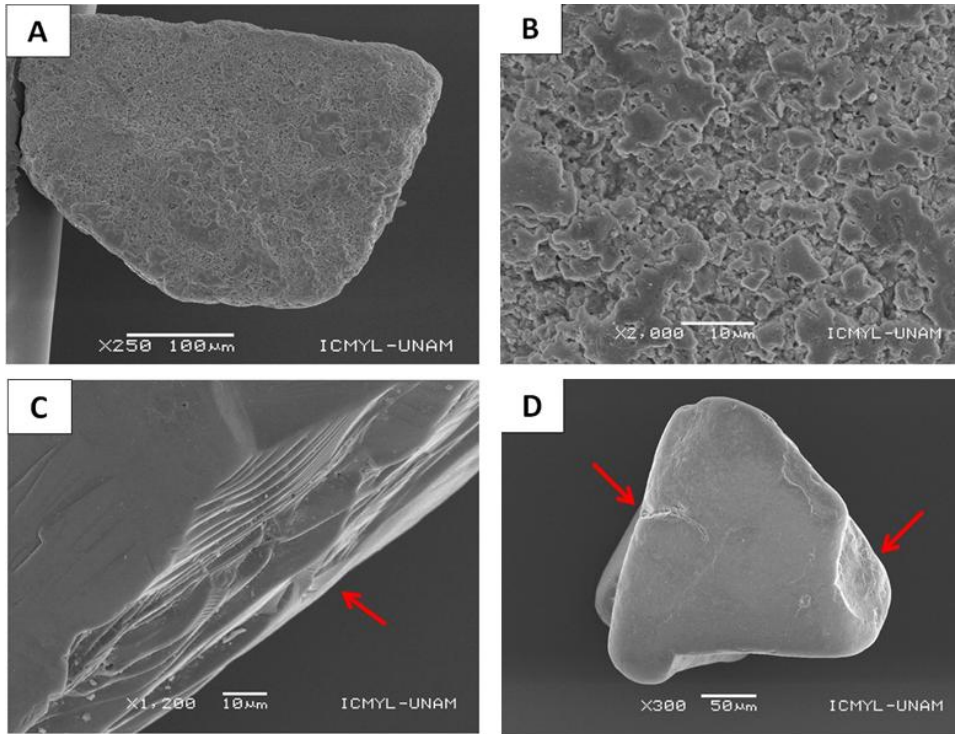


Figura 32. A) Subredondeado- angular; B) Relieve pronunciado; C) Escalones rectos (Straight steps); D) Redondeado, marcas de colisión.

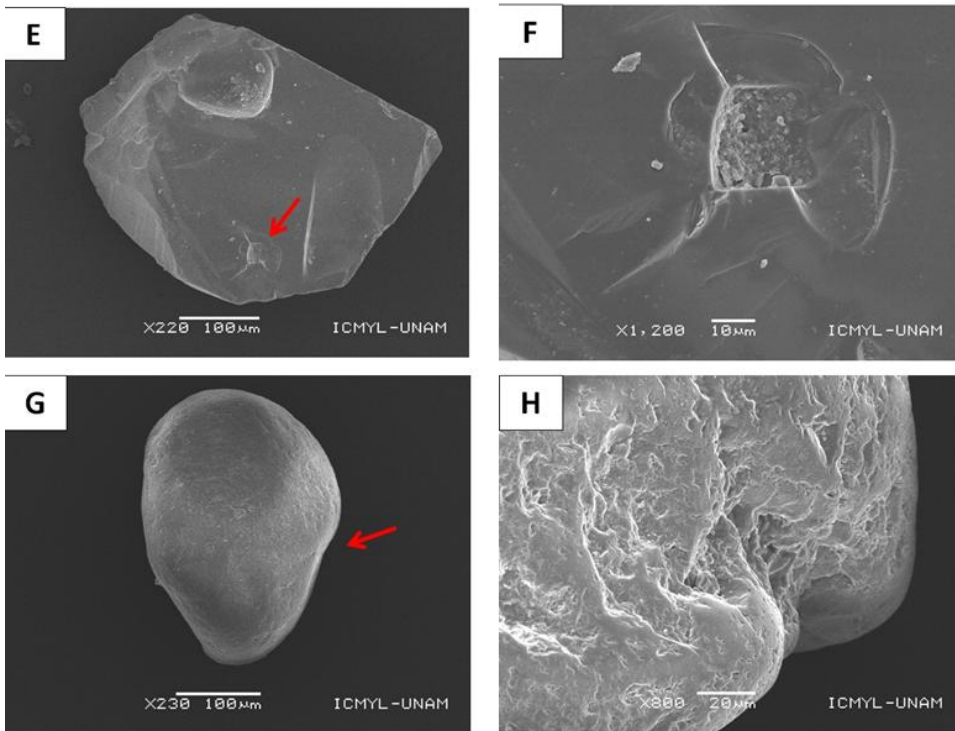


Figura 33. E) Angular, glóbulos de sílice; F) Glóbulos de sílice G) Redondeado; H) Disolución

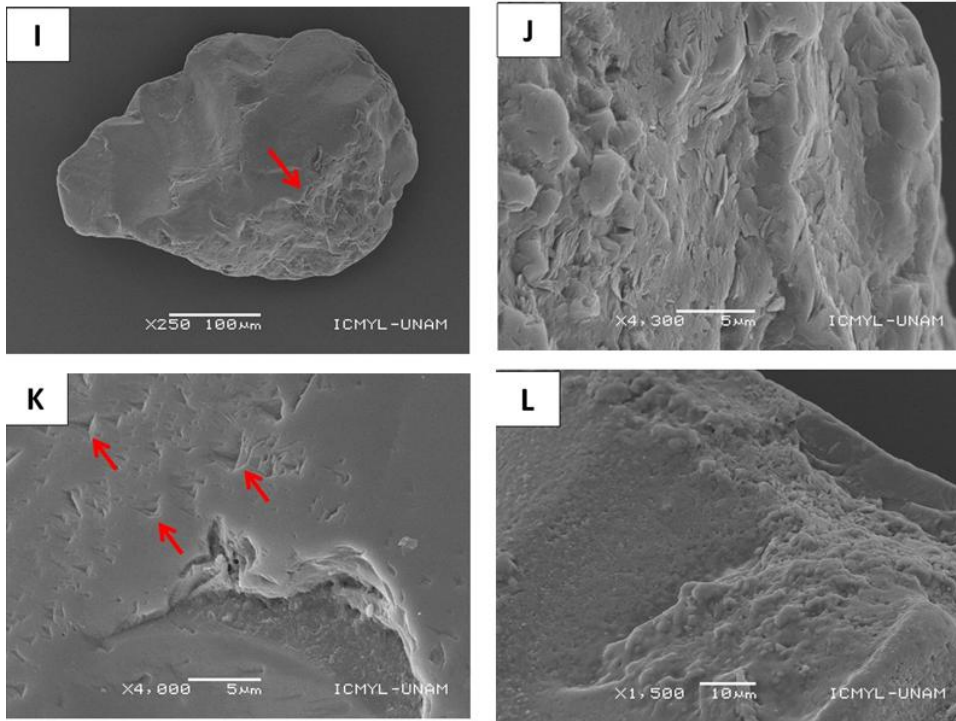


Figura 34. I) Subredondeado, fracturas concoidales; J) película de sílice; K) Marcas en V; L) glóbulos de sílice.

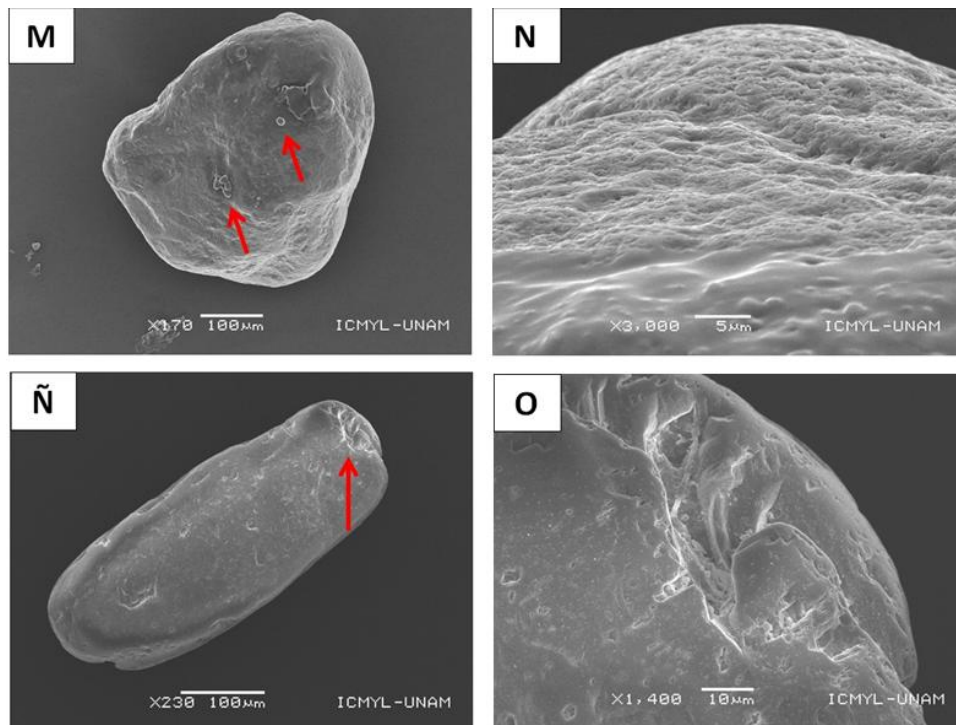


Figura 35. M) Redondeado y glóbulos de sílice; N) Disolución; Ñ) Redondeado y baja esfericidad; O) Marcas de colisión

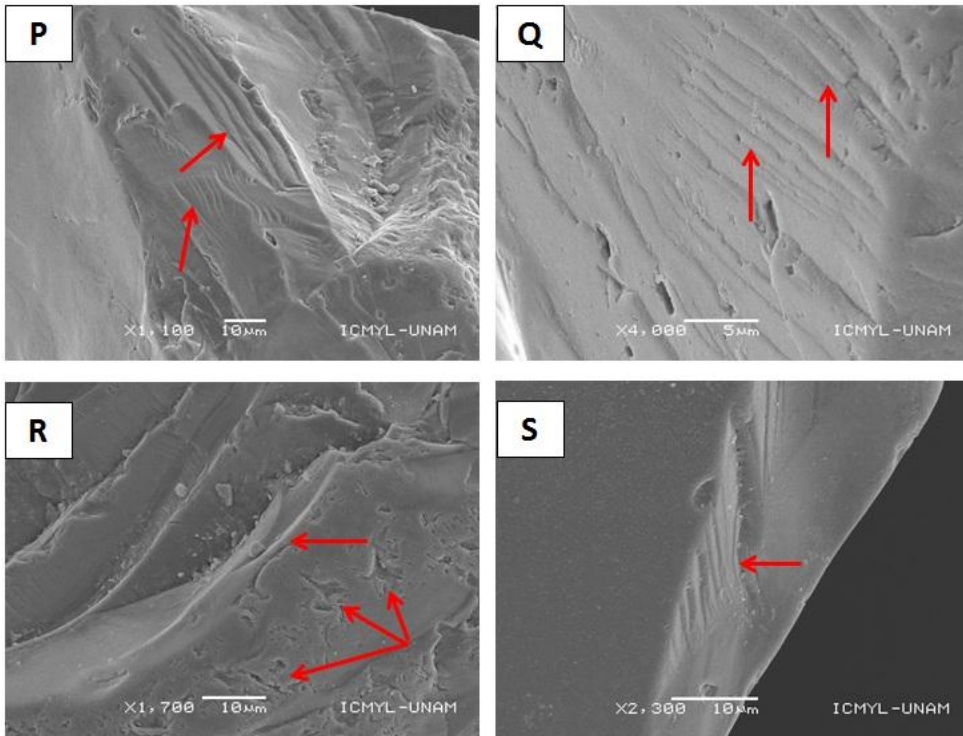


Figura 36. . P) Pequeños y grandes escalones Q) Rectas paralelas R) Escalones grandes S) Escalones

Los resultados en las imágenes SEM de las superficies de los granos de cuarzo indican que las microtexturas en su mayoría tienen un origen mecánico (Tabla 4), seguido en número por microtexturas de origen químico y por último microtexturas con una mezcla de origen químico-mecánico.

En este trabajo también se encontraron algunos granos sub-redondeados lo cual nos indica que probablemente fueron transportados de manera eólica, ya que la redondez en los granos de cuarzo es una característica de este tipo de transporte (Kasper-Zubillaga, 2009)

De acuerdo a Armstrong-Altrin y Natalhy-Pineda, (2014), las microtexturas como escalones rectos (Straights steps) (Figura 32-C; Figura 36-Q) tienen un origen de rocas cristalinas.

10.3.1 Origen mecánico

En los sedimentos se han encontrado un mayor número de microtexturas de origen mecánico tales como el grado de redondez, ya que algunos granos mostraron cierto nivel de angularidad, sin embargo, en su mayoría los granos reflejaron un nivel más alto de sub-redondez, lo cual se atribuye al tipo e intensidad del transporte. Por ejemplo, un grano que presenta un nivel alto de angularidad, refleja un transporte de corta duración, lo que significa que es muy probable que la roca fuente se encuentra cerca, por lo contrario ocurre cuando un grano presenta una alta redondez, sugiere que sufrió un transporte largo y por consecuencia la roca fuente se encuentra más alejada. (Tejan-Kella *et al.* 1991; Helland y Holmes 1997; Zoleikhaei 2016).

Se ha reportado que los sedimentos de las playas de Tecolutla se caracterizan por tener granos sub-angulares y angulares, lo cual es característico de ambientes de alta energía (ambiente marino) derivado de la colisión entre granos en el transporte de los sedimentos (Armstrong-Altrin y Natalhy-Pineda, 2014; Kasper-Zubillaga, 2009).

Las fracturas concoidales (Fig.34-I) son un ejemplo de microtexturas de este tipo de ambientes, a este tipo de microtexturas se pueden asociar otras como rectas (Straights) (Fig. 32-C; Fig. 36-Q) y escalones en forma de media luna (crescent shaped steps) (Figuras 36-P,R,S) (Armstrong-Altrin y Natalhy-Pineda, 2014).

10.3.2 Origen Químico

En cuanto a las microtexturas de origen químico como glóbulos de sílice (Fig. 33-F; Fig. 34-L) y películas de sílice (Fig. 34-J), sugieren un ambiente saturado en sílice, mientras que el intemperismo químico (Chemical Etching), hoyos de disolución (solution pits), sugieren contaminación marina.

10.3.3 Paleoambientes de microtexturas de origen químico

Las microtexturas como angularidad y sub-angularidad y por ende, la escasez de redondez en los granos de cuarzo, indican que los sedimentos probablemente fueron transportados

por acción del viento, mediante un ambiente eólico, fluvial costero así como la depositación de los sedimentos en una zona intersticial (Madhavaraju *et al.* 2006).

Las microtexturas de origen mecánico tales como marcas de colisión, fracturas concoidales y estriaciones paralelas son comunes en ambientes de alta energía fluvial y marino (intersticial) (Vos *et al.* 2014).

Las marcas en V son indicadores de ambientes fluviales y sub-acuosos (Mahaney *et al.* 2010; Song *et al.* 2019).

Las microtexturas rectas (Straights) son utilizadas para inferir la energía de las olas en los ambientes marinos, en este estudio específicamente fueron encontradas en la infraplaya que es la zona en donde rompen las olas y por consecuencia la energía de las olas es mayor (Margolis y Krinsley 1974; Costa *et al.* 2017; Armstrong-Altrin, 2020).

10.3.4 Paleambientes de microtexturas de origen químico

Algunas microtexturas de origen químico, como los hoyos de disolución (solution pits) y los glóbulos de sílice probablemente son originadas debido a la disolución y precipitación durante los procesos de diagénesis, los cuales son característicos en ambientes intersticiales y sub-acuosos. Los granos de cuarzo son mayormente afectados por procesos de disolución química en ambientes sub-acuosos marinos que en ambientes áridos (Chen *et al.* 2018).

Las características del oleaje y en general la dinámica de la playa, también influye en las características químicas que se presentan en la superficie. Las playas con baja energía (oleaje < 1 m) es mayor la influencia sobre las características químicas que en las playas con alta energía (> 1 m).

Los hoyos de disolución y precipitación de sílice más de una etapa en los procesos de diagénesis en ambientes en una zona de playa intersticial con alta humedad (Song *et al.* 2019).

De acuerdo a Ramos-Vázquez y Armstrong-Altrin (2019) una alta abundancia de microtexturas de origen químico puede sugerir un ambiente diagenético asociado a un alto

contenido de carbonatos (CaO > 30 wt %) el cual puede atribuirse a la influencia de rocas calizas.

10.4 GEOQUÍMICA

10.4.1 Elementos Mayores

Los elementos mayores son utilizados para analizar las condiciones de meteorización de la zona de origen (área fuente), condiciones climáticas, así como la determinación de la procedencia de los sedimentos (Armstrong-Altrin, *et al.* 2004, Asadi *et al.* 2013; Ahmad *et al.* 2014). En la tabla 5 se presentan las concentraciones de referencia de los elementos presentes en la corteza terrestre, los cuales son utilizados en diversos trabajos para normalizar los valores obtenidos en las muestras contra estas concentraciones y así verificar si se existe un enriquecimiento natural o si se debe probablemente a fuentes antropogénicas.

Tabla 4. Concentraciones medias de elementos en la corteza terrestre en ppm, según Taylor McLennan (1985). Modificado por Rudnick y Gao (2003).

ÓXIDO	% EN PESO.	EL EM	ppm	ELEM	ppm	ELEM	ppm	ELEM	ppm	ELEM	ppm	ELEM	ppm
SiO₂	57.1	Li	1.3	Zn	80	Nb	8	Ba	250	Dy	3.7	Re	0.4
TiO₂	0.9	Be	1.5	Ga	18	Mo	1.0	La	16	Ho	0.78	Os	0.05
Al₂O₃	15.9	B	10	As	1.6	Pd	1	Ce	33	Er	2.2	Ir	0.10
FeO	9.1	Sc	30	Se	1.0	Ag	80	Pr	3.9	Tm	0.32	Au	3.0
MnO	0.18	V	230	Rb	0.05	Cd	98	Nd	16	Yb	2.2	Tl	360
MgO	5.3	Cr	185	Sr	37	In	50	Sm	3.5	Lu	0.30	Pb	8.0
CaO	7.4	Co	29	Y	260	Sn	2.5	Eu	1.1	Hf	3.0	Bi	60
Na₂O	3.1	Ni	128	Zr	20	Sb	0.2	Gd	3.3	Ta	0.8	Th	4.2
K₂O	1.3	Cu	75	Nb	100	Cs	1.5	Tb	0.60	W	1.0	U	1.1

Las concentraciones de los elementos mayores obtenidos en este análisis se presentan en la tabla 6. Estos valores se compararon con la corteza continental superior (UCC, Taylor y McLennan, 1985) mediante un diagrama (Figura 37), en el cual se aprecia que para las muestras de Tecolutla TiO₂ y CaO están enriquecidos y Al₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O y P₂O₅ se encuentran por debajo y SiO₂ y MnO se mantienen similares a la UCC. Los sedimentos de

Coatzacoalcos, reflejan concentraciones de SiO₂ similares con la UCC mientras que los demás elementos se encuentran por debajo de manera más o menos uniforme.

El alto contenido de CaO (17.83 ± 2.13) probablemente se deba a material biogénico o a la litología de rocas carbonatadas de la región (Tapia-Fernández, 2018).

Por otra parte el alto contenido de TiO₂ que se presenta para dos muestras únicamente en Tecolutla (Tec-5 y Tec-15) sugiere la presencia de rocas como el rutilo, Ilmenita y a la dinámica local que la playa (Hernández-Coronado, 2015).

También se realizó un diagrama bivariado de Pettijohn *et al.* 1972 en el cual las arenas de las playas de Tecolutla se clasifican como grauvaca-litoarenitas y las arenas de Coatzacoalcos se clasifican como litoarenitas (Figura 38).

Tabla 5. Concentraciones de elementos mayores (%) para 49 muestras de las playas de Tecolutla y Coatzacoalcos

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
TEC-1	56.97	0.21	3.91	1.17	0.05	0.64	19.01	1.09	1.13	0.11	15.72
TEC-3	64.07	0.38	3.63	1.21	0.04	0.56	15.32	1.04	1.07	0.12	12.57
TEC-5	60.17	1.04	3.63	2.21	0.07	0.69	16.61	0.99	1.03	0.1	13.46
TEC-7	67.35	0.26	3.33	1.00	0.04	0.56	14.11	0.95	0.98	0.1	11.32
TEC-9	55.59	0.26	2.86	1.19	0.04	0.71	20.8	0.86	0.77	0.07	16.84
TEC-11	59.95	0.96	3.1	2.31	0.06	0.95	17.37	0.82	0.8	0.11	13.58
TEC-13	56.12	0.47	2.93	1.55	0.05	0.85	20.37	0.83	0.75	0.14	15.94
TEC-15	58.7	1.55	3.28	2.91	0.07	0.8	17.3	0.85	0.88	0.08	13.59
TEC-17	59.58	0.37	3.31	1.33	0.05	0.7	18.19	0.89	0.92	0.09	14.59
TEC-19	58.01	0.31	3.2	1.36	0.05	0.75	19.18	0.88	0.87	0.1	15.28
COZ-1	77.84	0.5	9.68	2.74	0.04	1.31	1.72	2.23	1.85	0.09	2.00
COZ-4	78.07	0.51	9.43	2.72	0.04	1.23	1.54	2.22	1.94	0.10	2.21
COZ-7	79.4	0.44	8.59	2.76	0.05	1.23	1.61	1.95	1.8	0.09	2.08
COZ-10	77.01	0.44	9.88	2.97	0.04	1.27	1.54	2.3	2.09	0.15	2.32
COZ-14	78.02	0.46	9.67	2.64	0.03	1.2	1.62	2.26	1.88	0.10	2.13
COZ-17	79.75	0.44	8.62	2.58	0.04	1.15	1.47	2.07	1.79	0.09	2.01
COZ-21	78.38	0.48	9.35	2.79	0.03	1.33	1.74	2.12	1.79	0.05	1.93
COZ-24	77.53	0.49	9.87	2.74	0.04	1.19	1.48	2.32	2.02	0.06	2.27
COZ-27	77.64	0.44	9.84	2.72	0.04	1.22	1.58	2.26	2	0.06	2.2
COZ-30	76.83	0.52	9.95	2.87	0.04	1.27	1.55	2.47	1.96	0.10	2.45

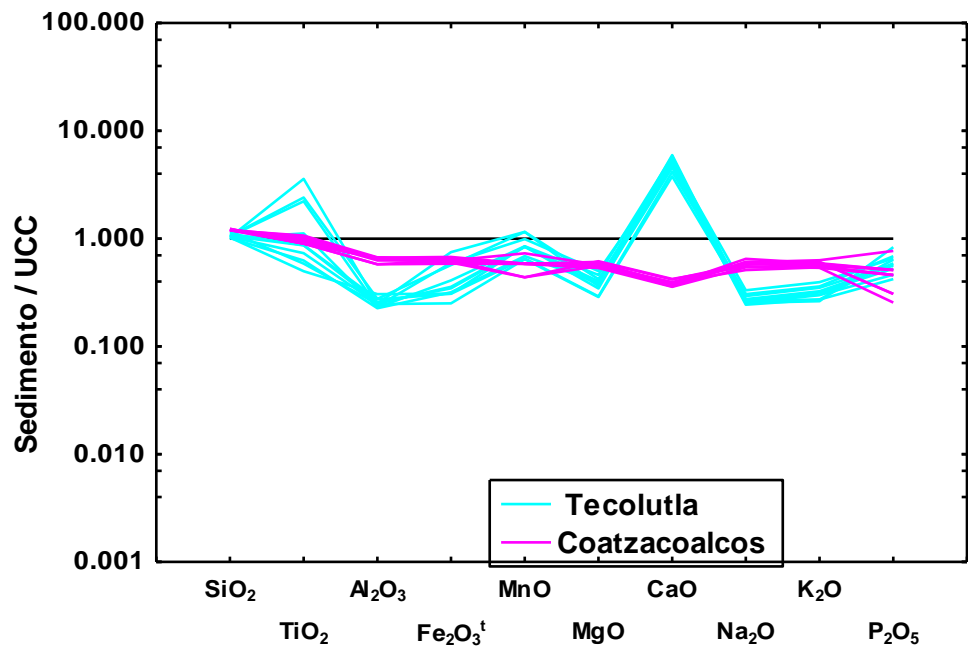


Figura 37. Diagrama de normalización de los sedimentos de playa de Tecolutla y Coatzacoalcos en comparación con la corteza continental superior (Taylor y McLennan, 1985).

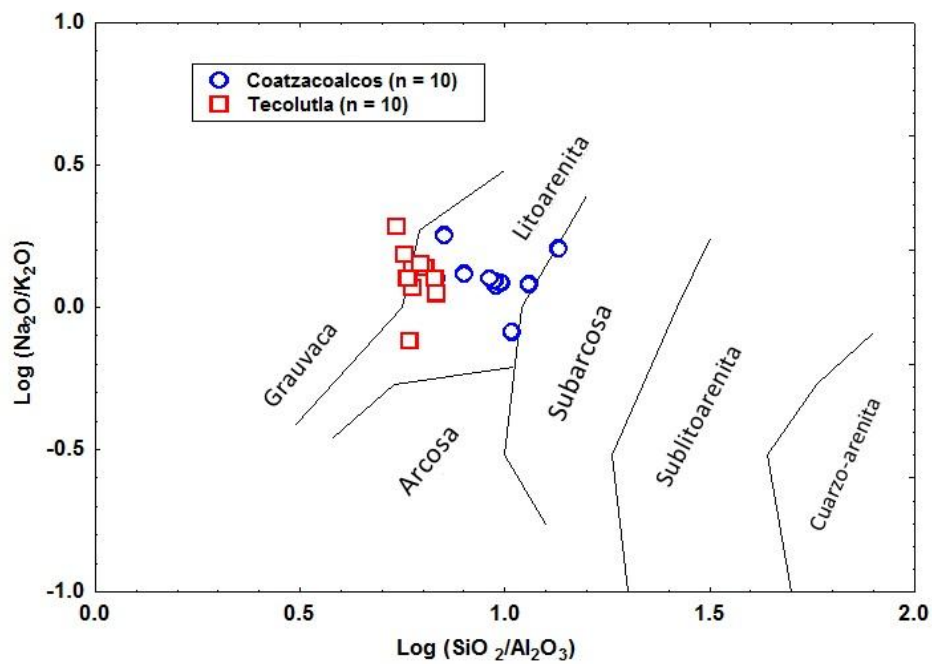


Figura 38. Diagrama bivalente de $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ de sedimentos de playa de Tecolutla y Coatzacoalcos (Pettijohn *et al.* 1972).

10.4.2 Elementos Traza

Los elementos traza son aquellos que se encuentran en una concentración menor al 0.1% (100 ppm). Los elementos traza incluyen al Rb, Cs, Be, Ba, Sr, Y, los lantánidos (La-Lu), Th, Nb, U, Ag, B, Sn, Pb, As, Sb, Se, Te, Hg, Mo y Bi, Los elementos traza aportan información acerca de la procedencia, debido a su corto tiempo de residencia en el agua de mar, lo cual permite preservar características específicas de su ambiente de formación (Hernández *et al.* 2018). En la tabla 7 se presentan los valores de elementos traza para las muestras de las áreas de estudio de este proyecto y en la figura 39, se aprecia el diagrama de normalización de los elementos traza con respecto a la UCC.

Tabla 6. Concentraciones de elementos traza (ppm) para los sedimentos de las playas de Tecolutla y Coatzacoalcos

	BA	CO	CR	CS	CU	GA	HF	MO	NB	NI	PB	RB	SC	SR	TA	TH	U	V	Y	ZN
COZ2	550.2	11.6	29.0	0.9	9.7	9.6	2.6	1.1	9.0	10.0	75.7	62.6	10.5	276.4	0.6	6.0	1.7	110.7	11.7	25.7
COZ3	536.9	12.5	27.9	0.7	9.7	9.0	2.4	0.1	7.6	9.5	54.7	52.7	10.6	245.4	0.9	7.7	1.8	126.5	10.6	22.4
COZ5	546.2	10.7	22.0	0.8	10.7	9.3	2.0	0.2	7.0	9.0	78.6	53.7	10.6	278.5	0.8	5.0	2.0	148.6	12.9	247.2
COZ6	378.5	13.5	31.6	0.7	11.5	9.5	2.2	0.6	5.7	10.3	63.8	52.7	10.9	213.7	1.0	8.0	1.5	106.6	11.7	210.4
COZ8	487.6	10.9	33.8	0.6	9.7	10.7	2.8	1.4	9.8	11.5	61.5	61.5	10.6	259.5	0.7	4.9	1.9	147.0	12.9	478.3
COZ9	462.6	9.9	29.9	1.0	12.6	9.8	1.3	0.8	8.7	10.7	58.3	40.3	14.9	210.6	1.0	6.5	1.6	128.7	9.7	298.5
COZ11	412.6	12.7	36.0	0.5	14.5	8.7	2.5	1.4	7.6	9.4	98.3	61.8	13.0	278.6	0.4	6.9	1.4	110.6	11.8	689.2
COZ13	589.3	13.8	24.8	0.6	9.8	9.2	2.4	0.9	6.8	10.4	102.4	59.0	10.6	224.4	0.7	6.7	1.3	98.5	13.8	578.7
COZ15	642.6	13.0	23.9	0.7	10.4	8.4	3.0	0.8	8.8	9.8	110.8	62.8	11.8	279.5	0.7	7.9	2.0	100.1	10.6	645.3
COZ18	614.9	15.0	19.7	0.6	11.6	9.2	2.1	0.7	7.6	11.7	87.5	66.4	10.7	264.5	0.9	3.7	1.8	85.6	12.0	756.4
TEC2	303.0	18.2	20.5	0.0	75.3	6.3	0.0	1.1	5.5	13.3	20.2	45.9	5.9	410.3	1.1	4.1	0.8	49.6	15.0	86.6
TEC4	310.0	16.3	19.6	0.0	72.6	7.7	0.0	1.0	5.3	16.5	14.6	52.5	6.5	409.6	1.1	4.4	1.0	45.1	15.6	82.1
TEC6	314.0	18.7	18.6	0.0	98.4	9.2	0.0	1.1	5.5	15.5	14.8	45.6	6.2	423.1	1.0	3.5	1.1	41.4	16.1	85.6
TEC8	306.0	21.5	22.4	0.0	110.3	8.3	0.0	1.1	4.3	17.3	13.6	44.3	7.2	411.9	1.0	1.1	1.0	40.1	13.6	65.1
TEC10	324.0	15.7	21.5	0.0	55.4	8.4	0.0	1.0	5.6	15.6	14.3	41.7	6.5	409.6	1.0	4.7	0.9	45.7	16.5	82.1
TEC12	279.0	22.7	28.7	0.0	65.2	7.7	0.0	1.0	4.9	21.5	14.6	40.1	8.7	423.9	1.3	2.1	0.7	43.3	15.1	72.6
TEC14	305.0	16.4	29.6	0.0	62.5	7.3	0.0	1.0	4.5	21.4	13.8	38.7	8.0	409.6	1.4	3.2	0.8	42.2	14.4	73.1
TEC16	310.0	15.2	25.8	0.0	51.3	9.4	0.0	0.9	4.7	16.5	10.6	42.6	6.3	413.3	1.2	3.1	1.1	45.1	14.8	68.5
TEC18	268.0	22.7	26.4	0.0	32.5	5.3	0.0	0.8	4.1	10.3	8.6	32.8	5.9	350.2	1.1	2.1	1.4	30.3	13.5	34.6
TEC20	308.0	16.4	19.2	0.0	35.6	8.3	0.0	1.0	5.1	15.4	9.6	41.9	6.4	409.7	1.1	4.6	1.3	44.9	15.4	81.1

En la Figura 39, se puede observar que casi todos los elementos traza se encuentran por debajo de los niveles de normalización de UCC para ambas playas, exceptuando el Cu, para la playa de Tecolutla en donde se observa un pico por encima de los valores normales de UCC, lo cual puede sugerir un origen litogénico (Armstrong-Altrin *et al.* 2019).

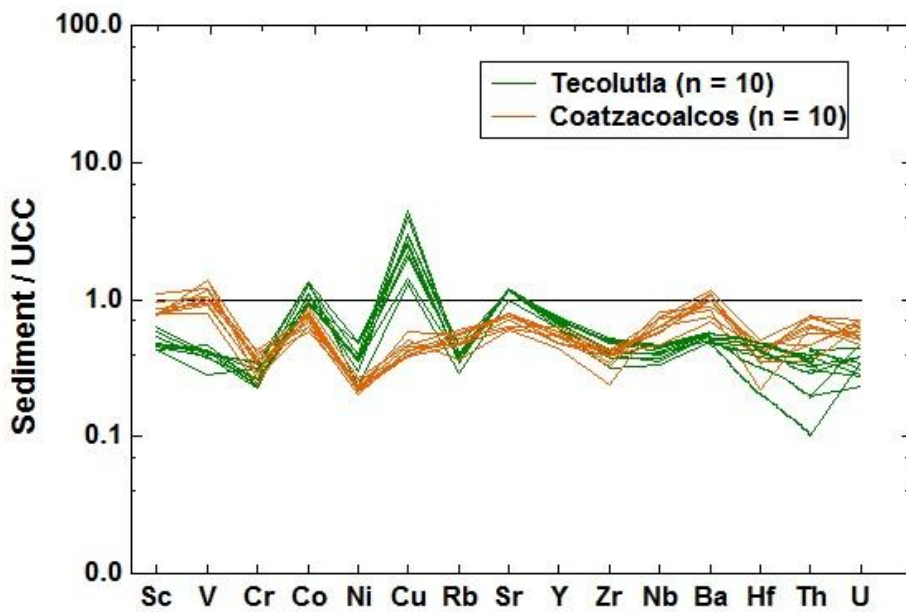


Figura 39. Diagrama de normalización de elementos traza para las playas de Tecolutla y Coatzacoalcos (Taylor y McLennan, 1985).

Respecto a la relación TiO_2/Ni (Figura 40) en los sedimentos de este trabajo sugiere una composición ígnea ácida para los sedimentos de las playas. Siendo más evidente la proximidad para las muestras de la playa de Tecolutla que las de Coatzacoalcos, aunque no representa una marcada diferencia.

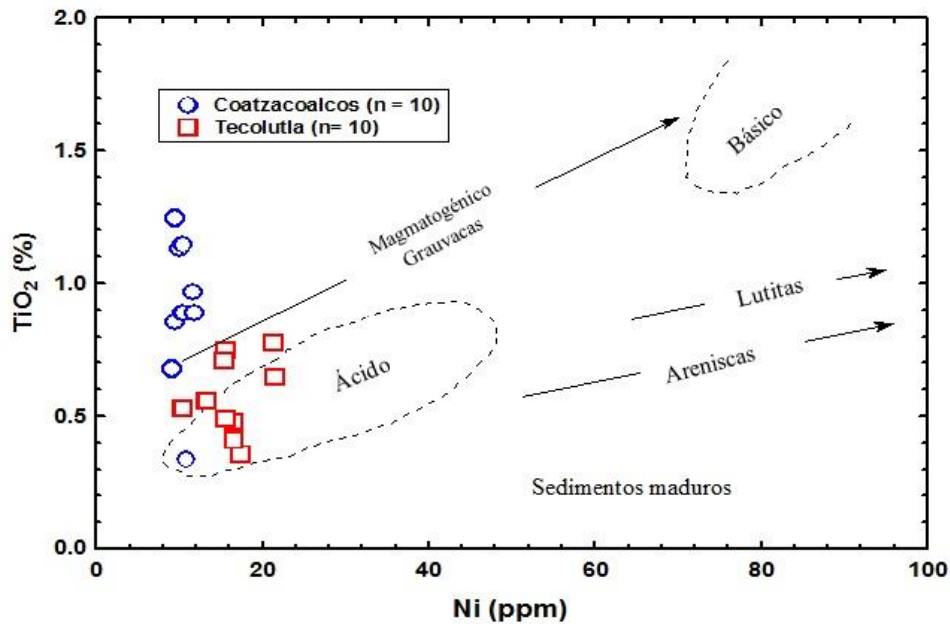


Figura 40. Diagrama de procedencia para los sedimentos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos (Cullers, 2000).

Existen elementos como Sc, Th, Co y La los cuales suelen ser muy utilizados en diversos trabajos para identificar el área de procedencia debido a que las concentraciones de estos elementos varían extensamente de acuerdo a los sedimentos félsicos, intermedios y máficos.

La relación Th/Sc es un índice que indica la composición global de la procedencia en función del contenido de escandio. De acuerdo al diagrama Th/Sc vs Sc (Figura 41) se puede observar que los sedimentos tanto de la playa de Tecolutla, como Coatzacoalcos se aproximan hacia rocas de composición félsica, por lo cual se puede interpretar un origen ígneo félsico.

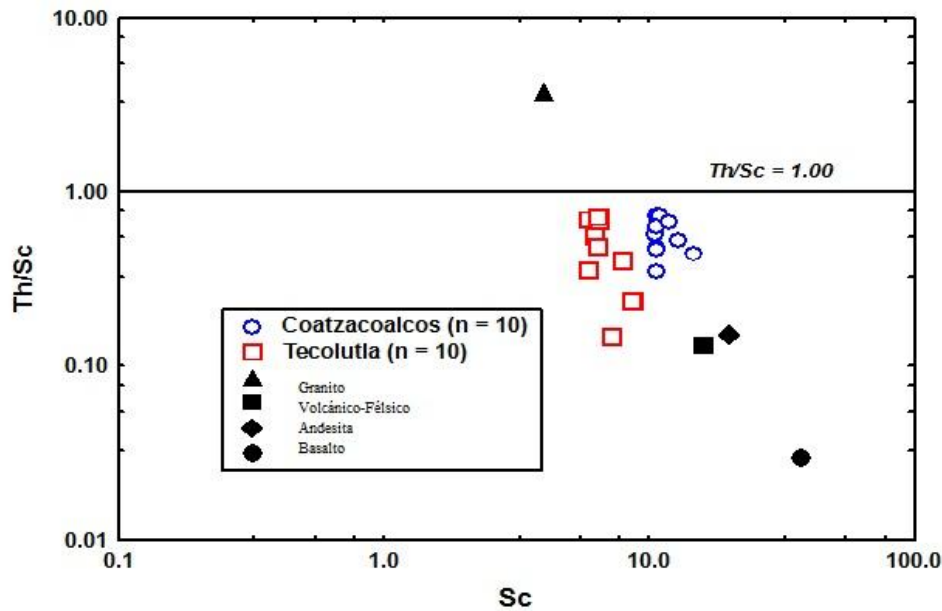


Figura 41. Diagrama de procedencia para los sedimentos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos (Cullers, 2000).

La distribución relativa de los elementos inmóviles que difieren en su concentración en las rocas félsicas y máficas como La y Th (enriquecida en rocas silíceas). En la Figura 42 se puede observar que los sedimentos de ambas playas se encuentran próximas a la clasificación de rocas volcánicas félsicas, sin embargo se aprecia que los sedimentos de las playas de Tecolutla se localizan más próximos a la clasificación de rocas intermedias en este diagrama.

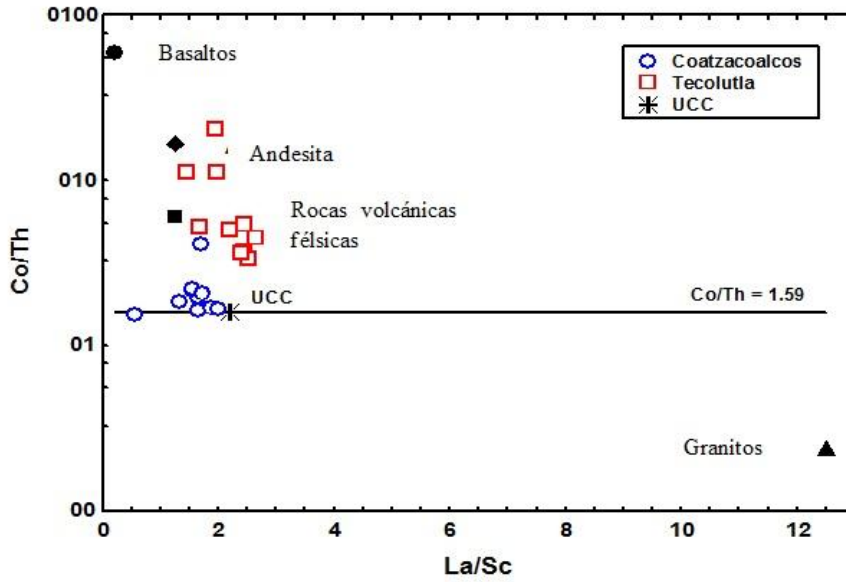


Figura 42. Diagrama de procedencia para los sedimentos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos (Cullers, 2000).

De acuerdo al diagrama de Cullers (2000) (Figura 43) indica que los sedimentos de Coatzacoalcos tienen una composición félsica (silícica), mientras que los sedimentos de la Tecolutla se encuentran más próximas a rocas intermedias.

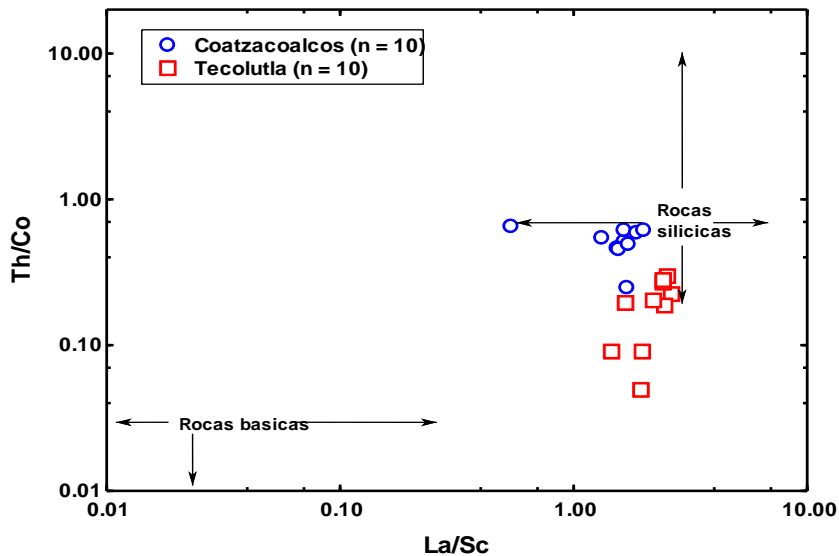


Figura 43. Diagrama de procedencia para los sedimentos de las playas Tecolutla y Coatzacoalcos (Cullers, 2000).

Los resultados de los análisis de granulometría, geoquímica y mineralogía en conjunto con trabajos ya publicados, sugieren que los sedimentos de la playa de Coatzacoalcos podrían estar influenciados por el aporte de la región de Los Tuxtlas, ya que el principal río que transporta estos sedimentos es el río Coatzacoalcos el cual atraviesa el Campo Volcánico de Los Tuxtlas junto con el río Papaloapan, los cuales descargan sus aguas y depositan los sedimentos transportados en el Golfo de México (Marca-Castillo, 2018). Aunado a esto, se sugiere que se podría estar recibiendo aporte de fuentes más cercanas a la zona de estudio, esto podría explicarse debido a los resultados obtenidos en granulometría, en donde el tamaño indica de fino a medio, lo que a su vez sugiere un menor transporte y coincide con la clasificación de Petijohn *et al.* 1972 en el cual se clasifican como Litoarenitas, lo cuál implica poco transporte y arenas más gruesas.

Para los sedimentos de la playa de Tecolutla se sugiere que los sedimentos podrían provenir de fuentes como la Sierra Madre Oriental y del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) esto se puede respaldar con diversos trabajos realizados en la zona, debido a que el Río Tecolutla drena esta área y por otro lado el aporte de sedimentos podría proceder de la Sierra Madre Oriental por la cercanía y por la coincidencia en la litología de rocas sedimentarias especialmente la presencia de un alto contenido de CaCO_3 lo cual podría indicar una fuente de rocas sedimentarias o el aporte de microorganismos a través de las corrientes superficiales.

10.5 Contaminación de sedimentos por metales

Los metales pesados son considerados como contaminantes de alta prioridad, ya que en altas concentraciones son nocivos para la biota marina y los seres humanos, afectando los ecosistemas marinos, terrestres y de transición (Rodríguez-Figueroa, 2004).

En las zonas costeras del Golfo de México, se han reportado altos niveles de contaminación por metales pesados tanto en ríos como en el mar, sedimentos y en organismos, esto debido principalmente a las actividades antropogénicas de las zonas próximas, principalmente en las áreas costeras de los estados de Veracruz y Tabasco (Vázquez-Botello *et al.* 2005). Wittmann y Förstner (1975) clasificaron las principales fuentes antropogénicas de las cuales pueden proceder los metales pesados a las zonas costero-marinas:

- (1 procesos industriales minero-metalúrgicos
- (2 producción de cemento y consumo de combustibles fósiles
- (3 utilización de metales y componentes metálicos
- (4 lixiviación de los metales desde los depósitos de desperdicios sólidos y basura en general.

En el Golfo de México, entre las cuencas hidrográficas reportadas con un nivel muy alto de contaminación se encuentra la cuenca hidrográfica de Coatzacoalcos, como consecuencia de la industria azucarera, petroquímica, galvanoplástica y de fertilizantes (Escobar, 2002). Para conocer si la fuente de aporte de los metales pesados es natural o antropogénica se han realizado diversos trabajos acerca de la abundancia de los elementos en la corteza terrestre (Taylor, 1964) los cuales permiten obtener valores de referencia para poder normalizar y comparar con las concentraciones que tenemos en nuestras muestras e inferir el tipo de fuente.

10.5.1 Factor de enriquecimiento (FE)

El factor de enriquecimiento (FE) es un análisis que permite evaluar el nivel de contaminación por metales pesados en un área de estudio y determinar si la fuente de contaminación procede de una fuente natural o por actividad antropogénica (Pakzad *et al.*

2014; Celis-Hernández *et al.* 2018), mediante el análisis de elementos traza. La ecuación para calcular el FE es la siguiente (Zoller *et al.* (1974):

$$EF = (m/Al)_{\text{muestra}} / (m/Al)_{\text{referencia}}$$

donde $(m/Al)_{\text{muestra}}$ representa la concentración de los elementos traza de las muestras, dividido entre el valor del Aluminio de las muestras, y $(m/Al)_{\text{referencia}}$ representa las concentraciones de referencia de los metales pesados divididos entre el valor de la concentración del Aluminio de referencia. Aunque se puede optar por utilizar cualquier otro elemento como referencia, para este trabajo se tomó como referencia al Al_2O_3 debido a que es considerado un elemento inmóvil (Lazo *et al.* 2018).

Los valores obtenidos mediante este factor se clasifican en siete clases o niveles, de acuerdo a Birch (2003); clase I) 1-2 no enriquecido; clase II) 2-3 enriquecimiento leve; clase III) 3-5 enriquecimiento moderado; clase IV) 5-10 moderada a severamente enriquecido; clase V) 10-25 severamente enriquecido; clase VI) 25-50 muy severamente enriquecido; clase VII) >50 extremadamente enriquecido.

De acuerdo a los resultados del FE (tabla 8) para la playa de Tecolutla, se observó un enriquecimiento clase II con respecto al Co para las muestras TEC8, TEC12 y TEC18; con respecto al Sr para las muestras TEC6, TEC14 y TEC16; con respecto al Cu para las muestras TEC18 y TEC20. Se observó un enriquecimiento clase III con respecto al Cu para las muestras TEC2, TEC4, TEC10, TEC12, TEC14 y TEC16. Enriquecimiento clase IV con respecto al Cu para las muestras TEC6 y TEC8.

Para la playa de Coatzacoalcos, se observó un enriquecimiento clase II con respecto al V, para las muestras COZ3, COZ5, COZ6, COZ9, COZ11 y COZ13; con respecto al Co únicamente en la muestra COZ13; con respecto al Ba, en las muestras COZ5, COZ8 y COZ15. Enriquecimiento clase III se presentó en la muestra COZ13 con respecto al Ba.

Con respecto al enriquecimiento del Co para algunas muestras tanto de Tecolutla como de Coatzacoalcos, se puede inferir que este elemento se asocia a rocas máficas y ultramáficas (Rodríguez-Figueroa, 2004).

El enriquecimiento del Sr en la clase II puede sugerir una procedencia de fuente antropogénica, pero además se ha reportado que el Sr se asocia a minerales inestables como piroxenos y feldspatos (Bindeman y Davis 2000). Cu y V son elementos los cuales suelen asociarse a condiciones redox en los ecosistemas marinos y de transición (Páez-Osuna *et al.* 1987). Se ha reportado que el Vanadio suele incrementarse en ambientes sub-óxicos y anóxicos (Tribovillard *et al.* 2006). Los elementos como el Co, Sr, Cu y V se asocian al intemperismo de rocas intermedias como andesitas y basalto (Ramos-vázquez *et al.* 2018). Para las muestras concentraciones < 2 se sugiere que no existe influencia antropogénica.

Tabla 7. Valores de Factor de Enriquecimiento (FE) para metales de las dos playas de estudio.

Muestra	Ni	V	Cr	Co	Sr	Cu	Ba
COZ2	0.34	1.57	0.53	1.04	1.20	0.59	1.52
COZ3	0.43	2.35	0.67	1.45	1.39	0.77	1.94
COZ5	0.44	2.99	0.57	1.35	1.71	0.92	2.14
COZ6	0.47	2.03	0.77	1.61	1.24	0.93	1.40
COZ8	0.61	3.22	0.95	1.50	1.74	0.91	2.08
COZ9	0.47	2.33	0.70	1.12	1.16	0.97	1.63
COZ11	0.42	2.02	0.85	1.45	1.55	1.13	1.46
COZ13	0.68	2.67	0.87	2.36	1.86	1.13	3.11
COZ15	0.39	1.65	0.51	1.34	1.40	0.73	2.06
COZ18	0.40	1.22	0.36	1.35	1.16	0.71	1.71
TEC2	0.48	0.74	0.39	1.71	1.87	4.80	0.88
TEC4	0.58	0.65	0.37	1.49	1.82	4.52	0.88
TEC6	0.60	0.66	0.38	1.87	2.05	6.68	0.97
TEC8	0.63	0.60	0.43	2.03	1.89	7.08	0.89
TEC10	0.54	0.65	0.39	1.40	1.77	3.35	0.89
TEC12	0.77	0.64	0.55	2.12	1.92	4.14	0.80
TEC14	0.85	0.69	0.63	1.69	2.05	4.39	0.97
TEC16	0.67	0.75	0.56	1.61	2.12	3.68	1.01
TEC18	0.36	0.44	0.50	2.09	1.56	2.03	0.76
TEC20	0.52	0.63	0.35	1.45	1.76	2.14	0.84

10.5.2 Índice de Geoacumulación (I_{Geo})

El índice de geoacumulación es una herramienta utilizada para analizar el grado de contaminación por metales pesados en un área de estudio (Gopal *et al.* 2016); Este índice se calcula mediante la siguiente ecuación (Muller, 1969; 1979)

$$\log_2 (C_n/1.5 \times B_n)$$

Donde C_n es la concentración del metal en la muestra del sedimento; B_n es el valor de referencia del metal y el valor constante de 1.5 representa la posible variabilidad debido a las variaciones litológicas.

Para este índice los resultados se pueden clasificar en seis niveles ó clases, de acuerdo al grado de contaminación de los sedimentos. Clase 0 (< 0 , sin contaminación); clase 1 ($0 < I_{Geo} < 1$, de no contaminado a moderadamente contaminado); clase 2 ($1 < I_{Geo} < 2$, moderadamente contaminado); clase 3, ($2 < I_{Geo} < 3$, de moderadamente a altamente contaminado); clase 4 ($3 < I_{Geo} < 4$, altamente contaminado); clase 5 ($4 < I_{Geo} < 5$, de altamente a extremadamente contaminado).

Los resultados de este análisis se encuentra en la tabla 9. Para las muestras de la playa de Coatzacoalcos no se observó ninguna clase de contaminación para ningún metal, se pueden observar que todos los valores están por debajo de 0, dando resultados negativos, los cuales entran en la clasificación 0 = sin contaminación.

Sin embargo, para la playa de Tecolutla, los resultados si reflejaron dos clasificaciones de contaminación, clase 1 para las muestras TEC2, TEC4, TEC10, TEC12, TEC14 y TEC16; clase 2 para las muestras TEC6 y TEC8, ambas clases con respecto al Cu.

Tabla 8. Resultados del índice de Geoacumulación (IG) para los sedimentos de las playas de Tecolutla y Coatzacoalcos.

Muestra	Ni	V	Cr	Co	Sr	Cu	Ba
COZ2	-2.73	-0.54	-2.10	-1.14	-0.93	-1.96	-0.58
COZ3	-2.80	-0.34	-2.16	-1.03	-1.10	-1.95	-0.62
COZ5	-2.88	-0.11	-2.50	-1.26	-0.91	-1.82	-0.59
COZ6	-2.69	-0.59	-1.98	-0.92	-1.30	-1.71	-1.12
COZ8	-2.52	-0.13	-1.88	-1.23	-1.02	-1.96	-0.76
COZ9	-2.63	-0.32	-2.06	-1.37	-1.32	-1.58	-0.83
COZ11	-2.81	-0.54	-1.79	-1.01	-0.91	-1.37	-1.00
COZ13	-2.67	-0.70	-2.33	-0.89	-1.23	-1.94	-0.49
COZ15	-2.76	-0.68	-2.38	-0.98	-0.91	-1.86	-0.36
COZ18	-2.50	-0.91	-2.66	-0.77	-0.99	-1.69	-0.42
TEC2	-2.32	-1.69	-2.60	-0.49	-0.36	1.00	-1.45
TEC4	-2.00	-1.83	-2.66	-0.64	-0.36	0.95	-1.41
TEC6	-2.09	-1.96	-2.74	-0.45	-0.31	1.39	-1.39
TEC8	-1.94	-2.00	-2.48	-0.24	-0.35	1.56	-1.43
TEC10	-2.08	-1.81	-2.54	-0.70	-0.36	0.56	-1.35
TEC12	-1.62	-1.89	-2.12	-0.17	-0.31	0.80	-1.56
TEC14	-1.63	-1.93	-2.07	-0.64	-0.36	0.74	-1.44
TEC16	-2.00	-1.83	-2.27	-0.74	-0.35	0.45	-1.41
TEC18	-2.69	-2.41	-2.24	-0.17	-0.58	-0.21	-1.62
TEC20	-2.10	-1.84	-2.69	-0.64	-0.36	-0.07	-1.42

Los resultados del factor de enriquecimiento y el índice de geoacumulación reflejaron un nivel de contaminación (clase II, III y IV para el F_{Enr} y clase 1 para el I_{Geo}) para algunos metales pesados como el Co, V, Sr, Ba y el Cu, siendo este último el de mayor nivel de contaminación, observándose concentraciones mayores para los sedimentos de las playas de Tecolutla, lo cual se puede asociar a un origen antropogénico.

Estos resultados coinciden con los obtenidos en la normalización con la UCC (Figura 37), en donde se observa que los sedimentos de la playa de Tecolutla reflejan un alto contenido de Cu, por encima de los valores de referencia.

Se ha comprobado que las concentraciones de Ba y Co presentes en los sedimentos detríticos son usados como una herramienta para identificar una fuente de procedencia de origen félsico (Ba) y máfico (Co).

Otros elementos como Sc, Cr y Co han sido ampliamente utilizados para sugerir diferenciar fuentes de origen máfico y félsico (Wronkiewicz y Condie, 1990 y Bhatia y Crook, 1986).

En este trabajo se esperaba encontrar un grado de contaminación mayor para la zona de Coatzacoalcos en comparación con la playa de Tecolutla, debido a que se encuentra muy cercana la zona industrial, como el complejo petroquímico Pajaritos entre otras (Figura 44). Sin embargo, no se encontró contaminación por influencia antropogénica en los sedimentos de Coatzacoalcos y esto podría deberse a que las muestras fueron tomadas del lado contrario a la pluma de descarga, por lo tanto una nueva hipótesis para un trabajo futuro, sería que si se toman muestras del lado de la pluma de descarga del río Coatzacoalcos, estos reflejaran altos niveles de contaminación debido a la fuerte influencia antropogénica que se presenta en la zona.

Es recomendable recolectar muestras de sedimentos de ambos lados de los ríos de cada playa de estudio (figuras 2 y 3), debido a que para este trabajo únicamente se recolectaron del lado izquierdo del ambos ríos. Uno de los parámetros que se tomó en cuenta para realizar el muestreo solo de un lado, fue la accesibilidad a la zona y el otro parámetro fue la repercusión que sugieren las corrientes litorales para la línea de costa, ya que diversos autores han mencionado que las corrientes tienen una dirección predominante de sur a norte, por lo tanto esto implica una mayor depositación del lado izquierdo de ambos ríos.

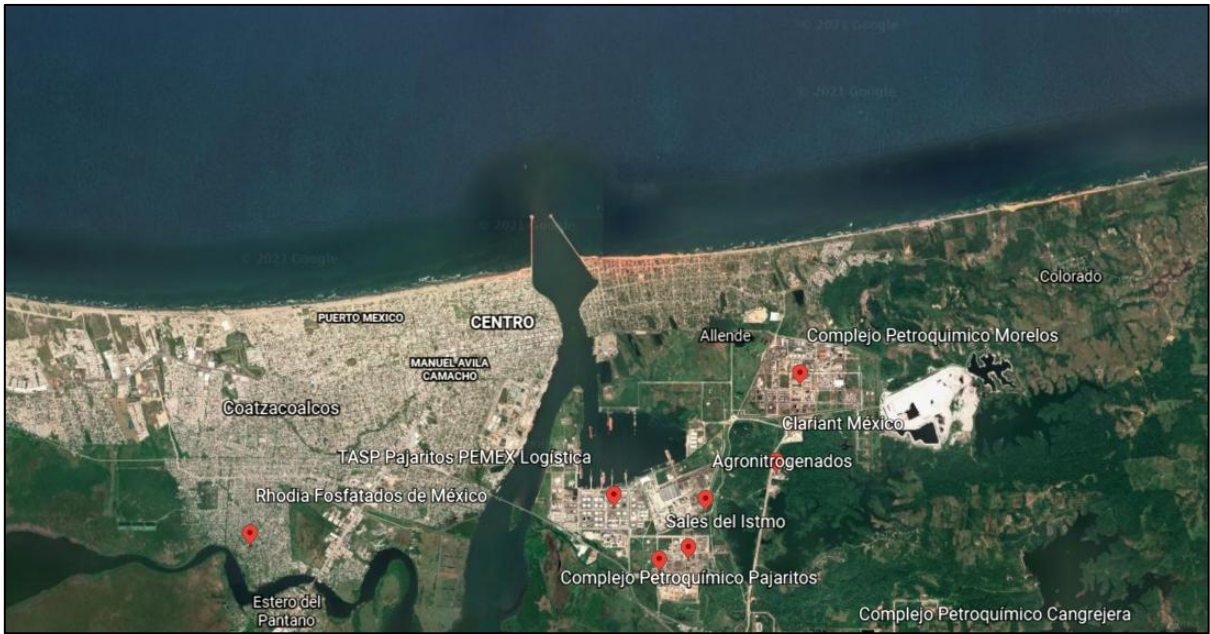


Figura 44. Zona industrial de Coatzacoalcos, Veracruz (Complejo petroquímico Pajaritos).

11. CONCLUSIONES

Las muestras de la playa de Tecolutla son arenas finas de bien a muy bien clasificadas, con tendencia de asimetría hacia los tamaños gruesos y con curvas en su mayoría mesocúrtica y leptocúrticas, por su parte las arenas de Coatzacoalcos son arenas finas de moderadamente a bien clasificadas, lo cual podría sugerir que las arenas de Tecolutla sufrieron un mayor transporte a diferencia de las de Coatzacoalcos, así mismo, que la fuente de procedencia de las arenas de Coatzacoalcos se encuentra más cerca que la fuente de procedencia de las arenas de Tecolutla.

Con respecto a los espectros obtenidos en los análisis de mineralogía, se observa que cuarzo es el mineral más abundante para ambas playas, seguido de calcita, plagioclasa, ilmenita y feldespatos.

De acuerdo al análisis en SEM las microtexturas más observadas en los granos de arenas son disolución de SiO_2 , precipitación y marcas de colisión lo cual sugiere un transporte eólico, fluvial, de transición y diagenético principalmente para los sedimentos de Tecolutla.

Se observa un incremento de CaO y TiO_2 , con respecto al diagrama de UCC, lo cual probablemente es debido a la litología de la región, procedente de rocas con minerales de rutilo, ilmenita y calizas o material biogénico.

Las arenas para la playa de Tecolutla se clasifican como grauvaca-litoarenitas y las arenas de Coatzacoalcos como Litoarenitas.

De acuerdo a los diagramas realizados con los resultados de elementos mayores y elementos traza, se sugiere que la procedencia para los sedimentos tanto de la playa de Tecolutla como de Coatzacoalcos es ígnea-félsica, lo cual coincide con el alto porcentaje de contenido en sílice (SiO_2) observado los resultados de mineralogía.

Los análisis de Factor de enriquecimiento y el índice de geoacumulación sugieren que los sedimentos se encuentran levemente afectados por fuentes antropogénicas, probablemente por el sector industrial de las zonas aledañas a las áreas de estudio. Los metales que

reflejaron una concentración mayor por encima de los niveles normales de la corteza continental son Co, V, Sr, Ba y el Cu, siendo el Cu el de mostró un nivel de contaminación mayor para la playa de Tecolutla, lo cual podría atribuirse a fuentes antropogénicas. Se recomienda realizar muestreos del lado derecho del río para analizar las diferencias que podrían encontrarse debido a la dirección de la descarga de los ríos para ambas playas.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Armstrong-Altrin J.S., Madhavaraju J., Ramasamy S., Asir NGG., 2005. Provenance and depositional history of sandstones from the Upper Miocene Kudankulam Formation, Tamil Nadu. *J Geol Soc India* 66: 59–65.
- Armstrong-altrin, J. S., y Natalhy-pineda, O., 2014. Microtextures of detrital sand grains from the Tecolutla , Nautla , and Veracruz beaches , western Gulf of Mexico , Mexico : implications for depositional environment and paleoclimate. *Arab J Geosci*, 7, 4321–4333.
- Ahmad, A. H. M., Noufal, K. N., Masroor, A. M., y Khan, T., 2014. Petrography and geochemistry of Jumara Dome sediments, Kachchh Basin: Implications for provenance, tectonic setting and weathering intensity. *Chinese J. Geochem.* 33. 9-23.
- Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., y Trejo-Ramírez, E., 2017. Mineralogy and geochemistry of sands along the Manzanillo and El Carrizal beach areas, southern Mexico: implications for palaeoweathering, provenance, and tectonic setting. *Geological Journal*, 52, 559-582.
- Armstrong-Altrin, J.S., Ramos-Vázquez, M.A., Zavala-León, A.C., y Montiel-García, P.C., 2018. Provenance discrimination between Atasta and Alvarado beach sands, western Gulf of Mexico, Mexico: Constraints from detrital zircon chemistry y U-Pb geochronology. *Geological Journal*, 1-25.
- Armstrong-Altrin, J. S., Botello, A. V, Villanueva, S. F., y Soto, L. A., 2019. Geochemistry of surface sediments from the north western Gulf of Mexico : implications for provenance and heavy metal contamination. *Geological Quarterly*, 63, 522–538
- Armstrong-Altrin J S., 2020. Detrital zircon U–Pb geochronology y geochemistry of the Riachuelos and Palma Sola beach sediments, Veracruz State, Gulf of Mexico: A new insight on palaeoenvironment; *J. Palaeogeogr.* 9, 28.
- Asadi, S., Moore, F., y Keshavarzi, B., 2013. The nature and provenance of Golestan loess deposits in northeast Iran. *Geol. J.* 48, 646-660.
- Bahena-Manjarrez, J.L., Rosales-Hoz, L., y Carranza-Edwards, A., 2002. Spatial and temporal variation of heavy metals in a tropical estuary. *Environ. Geol.* 42, 575-582.
- Basu, A., Blanchard, D.P., y Brannon, J.C., 1982. Rare earth elements in the sedimentary cycle: a pilot study of the first leg. *Sedimentology* 29, 737-742.
- Bindeman, I.N., y Davis, A.M., 2000. Trace element partitioning between plagioclase and melt: investigation on dopant influence on partition behavior. *Geochim. Cosmochim. AC* 64, 2863-2878.
- Birch, G., 2003. A scheme for assessing human impacts on coastal aquatic environments

- using sediments. In: Woodcoffe, C.D., Furness, R.A. (Eds.), Coastal GIS 2003. Wollongong University Papers in Centre for Maritime Policy, Australia.
- Bird, D. E., Burke, K., Hall, S. A. y Casey, J. F. 2005. Gulf of Mexico tectonic history: Hotspot, tracks, crustal boundaries and early salt distribution. AAPG bulletin, 89 (3), 311-328.
- Cantagrel, J.M. y Robin, C. (1979). K-Ar dating on eastern volcanic rocks-relations between the andesitic and the alkaline provinces: Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 5, 99-114.
- Carranza-Edwards, A., Kasper-Zubillaga, J.J., Rosales-Hoz, L., Morales-De la Garza, E., y Santa-Cruz, R.L., 2009, Beach sand composition and provenance in a sector of the southwestern Mexican Pacific: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26, 433-447.
- Celis-Hernandez, O., Rosales-Hoz, L., Andrew, B.C., Carranza-Edwards, A., Ian, W.C., y Hernandez-Hernandez, H., 2018. Historical trace element accumulation in marine sediments from the Tamaulipas shelf, Gulf of Mexico: an assessment of natural vs anthropogenic inputs. Sci. Total Environ. 622-623.
- Chakroun A, Miskovsky JC, Zaghib-Turki D., 2009. Quartz grain surface features in environmental determination of aeolian Quaternary deposits in northeastern Tunisia. Mineral Mag 73, 607-614.
- Chen, Q., Li Z., Dong, S., Wang, N., Lai, D. Y. F. y Ning K., 2018. Spatial variations in the chemical composition of eolian J. Earth Syst. Sci. (2020) 129:225 Page 13 of 16 225 sediments in hyperarid regions: A case study from the Badain Jaran Desert, northwestern China; J. Sedim. Res. 88, 290-300.
- Consejo de Recursos Minerales (C.R.M.), 1994. Monografía Geológica-Minera del Estado de Veracruz Publicación M-13e. Secretaria de energía, Minas e industrias para estatal subsecretaria de minas e industrias básicas. 137.
- Costa, P. J. M., Park, Y S, Kim, Y. D., Quintela, M. Mahaney, W. C., Dourado, F. y Dawson, S., 2017. Imprints in silica grains induced during an open-channel Cow experiment: Determination of microtextural signatures during aqueous transport; J. Sedim. Res. 87 677-687.
- Cox, R., Lowe, D.R., y Cullers, R.L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. Geochimica et Cosmochimica Acta 59, 2919-2940.
- Dostal, J., y Keppie, J.D., 2009. Geochemistry of low-grade clastic rocks in the Acatlan Complex of southern Mexico: Evidence for local provenance in felsic-intermediate igneous rocks. Sedim. Geol., 222, 241-253.
- Feo- Codecido, G., 1956. Heavy- mineral techniques and their application to Venezuelan

- stratigraphy AAPG Bull., 40,984-1000.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., y Young, G.M., 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23, 921-924.
- Folk, R.L., y Ward, W.C., 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *J. Sedim. Petrol.*, 27, 3-27.
- Garzanti, E., Vermeesch, P., Padoan, M., Resentini, A., Vezzoli, G., y Andò S., 2014, Provenance of passive margin sand (south Africa): *The Journal of Geology*, 122, 17-42.
- Gopal, V., Kalpana, G., Nethaji, S., y Jayaprakash, M., 2016. Geochemical study of core sediments from Ennore Creek, North of Chennai, Tamil Nadu, India. *Arab J. Geosci.* 9, 141.
- Harnois, L., 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology* 55, 319-322.
- Helland, P.E., Diffendal, R.F. Jr., 1993. Probable glacial climatic conditions in source areas during depositions of parts of the Ash Hollow Formation, Ogallala Group (Late Tertiary), of western Nebraska. *Am J Sci* 293, 744–757.
- Helland, P. E. y Holmes, M. A., 1997. Surface textural analysis of quartz sand grains from ODP site 918 oA the southeast coast of Greenland suggests glaciation of southern Greenland at 11 Ma; *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.* 135, 109–121.
- Hermenegildo-Ruiz, N. Y., 2019. Geoquímica y geocronología de U-Pb en circones de la playa Chachalacas, estado de Veracruz, Golfo de México: Implicaciones de procedencia. Facultad de Ingeniería, UNAM, Mexico. Thesis. 138.
- Hernández-Coronado, C. J., 2015. petrografía y geoquímica de arenas de playas del suroeste del golfo de méxico: implicación de procedencia. icmyl, unam, mexico. Maestría. Thesis. 77.
- Hernández-Hinojosa, V., Montiel-García , P. C., Armstrong-Altrin, J., Nagarajan, R., y Kasper-Zubillaga, J. J., 2018. Textural and Geochemical Characteristics of Beach Sand Along The Western Gulf of Mexico. *Capathian Journal of Eath and Environmental Sciences*, 161-174.
- Hossain, H. M., Zoleikhaei, Y., Frei, D., Morton, A., y Zamanzadeh, S. M., 2016. Roundness of heavy minerals (zircon and apatite) as a provenance tool for unraveling recycling: A case study from the SeBdrud and Sarbaz rivers in N and SE Iran; *Sedim. Geol.* 342, 106–117.
- Ichiye, T., (1962). Circulation and water mass distribution in the Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*, 2, 47–76.

- Kasper-Zubillaga, J.J., Faustinos-Morales, R., 2007. Scanning electron microscopy analysis of quartz grains in desert and coastal dune sands (Altar desert, NW Mexico). *Cien Mar* 33, 11–22.
- Krinsley, D.H., Marshall, J.R., 1987. Sand grain textural analysis: an assessment. In: Marshall JR (ed) *Clastic particles: scanning electron microscopy and shape analysis of sedimentary and volcanic clasts*. Van Nostrand-Reinhold, New York, 2–15.
- Lazo, P., Steignes, E., Qarri, F., Allajbeu, S., Kane, S., Stafilov, T., Frontasyeva, M.V., y Harmens, H., 2018. Origin and spatial distribution of metals in moss samples in Albania: hotspot of heavy metal contamination in Europe. *Chemosphere* 190, 337–341.
- López, J.M.G., Bauluz, B., Fernández-Nieto, C., Oliete, A.Y., 2005. Factors controlling the trace-element distribution in fine-grained rocks: the Albian kaolinite-rich deposits of the Oliete Basin (NE Spain). *Chem. Geol.* 214, 1-19.
- Madhavaraju, J., Lee, Y. I., Armstrong-Altrin, J. S., y Hussain, S. M., 2006. Microtextures on detrital quartz grains of upper Maastrichtian–Danian rocks of the Cauvery Basin, southeastern India: Implications for provenance and depositional environments; *Geosci. J.* 10, 23–34.
- Mahaney, W. C., Dohm, J. M., Costa, P., y Krinsley, D. H., 2010. Tsunamis on Mars: Earth analogues of projected Martian sediment; *Planet. Space Sci.* 58, 1823–1831.
- Marca-Castillo, M. E., 2018. Textura, mineralogía y geoquímica de los sedimentos de talud frente a los Tuxtlas, Veracruz: implicaciones sobre intemperismo, procedencia y ambientes deposicionales. ICMYL. CD. MX. Tesis maestría. 94.
- Margolis, S., y Krinsley, D. H., 1974. Processes of formation and environmental occurrence of microfeatures on detrital quartz grains; *Am. J. Sci.* 74, 449–464.
- Martínez-López, B., y Parés-Sierra, A., 1998. Circulación del Golfo de México inducida por mareas, viento y la corriente de Yucatán. *Ciencias Marinas*, 24, 65–93.
- Monreal-Gómez, M. A., Salas de León, D. A. y Gracia-Gasca, A., 2004. Golfo de México, circulación y productividad. *Ciencias*, 76, 24–33.
- Muller, G., 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal* 2, 108–118.
- Muller, G., 1979. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seitt 1971. *Umschan* 79, 778–783.
- Negendank, J.F., emmermann, R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H. y Werle, D., 1985. Geologic and geochemical investigation on the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional.* 24, 477–575.

- Nesbitt, H.W., y Young, G.M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715-717.
- Newsome D, y Ladd P., 1999. The use of quartz grain microtextures in the study of the origin of sand terrains in Western Australia. *Catena* 35, 1-17
- Ontiveros-Cuadras, J. F., Ruiz-Fernández, A. C., Sanchez-Cabeza, J. A., Wee-Kwong, L. L., y Pérez-Bernal, L. H., 2012. Geochemical fractionation of ^{210}Pb in oxic estuarine sediments of Coatzacoalcos River, Gulf of Mexico. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 291, 947-956.
- Páez-Osuna y Osuna-López, J.I., 1987. Acumulación de metales pesados en Mitla: Una laguna costera tropical. *Ciencias Marinas*; 13, 97-112.
- Pakzad, H.R., Pasandi, M., Soleimani, M., y Kamali, M., 2014. Distribution and origin of heavy metals in the sand sediments in a sector of the Oman Sea (the Sistan and Baluchestan province, Iran). *Quat. Int.* 345, 138-147.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. y Siever, R., 1972. *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag, New York, 618.
- Poag, C. W., 1981. *Ecologic atlas of benthic foraminifera of the Gulf of Mexico*. Woods Hole, Massachusetts: Hutchinson Publishing Company. 175.
- Poag, C. W., 2015. *Benthic Foraminifera of the Gulf of Mexico: Distribución, Ecology, Paleontology* (1ra edición). Corpus Christi: Texas A&M University Press College Station. 235.
- Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Martínez-Serrano, R. G., Alatorre, Miguel Angel, A. y Armstrong-Altrin, J. S., 2015. Textural and geochemical characteristics of marine sediments in the SW Gulf of Mexico: implications for source and seasonal change. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187-205.
- Roser, B. P., y Korsch, R. J., 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discrimination function analysis of major element data. *Chem. Geol.* 67, 119-39.
- Ruiz-Fernández, A. C., Sánchez-Cabeza, J. A., Alonso-Hernández, C., Martínez-Herrera, V., Pérez-Bernal, L. H., Preda, M., Hillaire-Marcel, C., Gastaud, J. y Quejido-Cabezas, A. J., 2012. Effects of land use change and sediment mobilization on coastal contamination (Coatzacoalcos River, México). *Continental Shelf Research*, 37, 57-65.
- Self, R.P., 1975. Petrologic changes in fluvial sediments in the Rio Nautla drainage Basin, Veracruz, Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology*, 45, 140-149.
- Servicio Geológico Mexicano, SGM Carta geológica - Minera, Escala 1:250,000 Coatzacoalcos E15-1-4, Veracruz.
- Sahu, B.K., 1964, Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments: *Journal of Sedimentary Petrology*, 34, 73-83.

- Song Z, Yuan X, Gao L, Li J, Liu X and Tang W., 2019. Quartz sand surface morphology of granitic Tafoni of Laoshan, China; *Indian J. Geo-Mar. Sci.* 48, 43–48.
- Stow, D.A.V., 2006. *Sedimentary Rocks in the Field: A Color Guide*. London, UK: Manson.
- Tamayo, J.L., 1991. *Geografía Moderna de Mexico*. Mexico, Trillas. 400.
- Tapia Fernández, H. J., 2018. Sedimentología, petrografía y geoquímica de sedimentos del litoral sur del golfo de México: implicaciones sobre el ambiente de depósito y procedencia. ICMyL, UNAM, México. Tesis Doctorado. 209.
- Taylor, S. R., y McLennan, S. M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford, UK: Blackwell.
- Tejan-Kella, M. S., Fitzpatrick, R. W. y Chittleborough D. J., 1991. Scanning Electron Microscope study of zircons and rutiles from a Podzol Chronosequence at Cooloola, Queensland, Australia; *Catena* 18, 11–30.
- Tribouvillard, N., Algeo, T.J., Lyons, T., Robouilleau, A., 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chem. Geol.* 232, 12–32.
- Tripaldi, A., Ciccioli, P.L., Alonso, M.S., y Forman, S.L., 2010. Petrography and geochemistry of late Quaternary dune fields of western Argentina: Provenance of eolian materials in southern south America. *Aeol. Res.*, 2, 33–48.
- Vázquez-Botello, A. y Páez-Osuna, F., 1987. *El Problema Crucial : La Contaminación* (1ra edición): Centro de Ecodesarrollo. México. 187.
- Vidal-Lorandini, V. M. y Vidal-Lorandini, F. (1997). La importancia de los Estudios Regionales de Circulación Oceánica en el Golfo de México. *Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 47, 191–200.
- Vos, K., Vandenberghe, N. y Elsen, J., 2014. Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation; *Earth Sci. Rev.* 128, 93–104.
- Wittmann, G.T.W. y U. Forstner., 1975. Metal enrichment of sediments in inland waters the Hartbeesport dam. *Water SA* 1, 76–82.
- Yáñez-Correa, A., 1969. Procesos costeros y sedimentos recientes de la plataforma continental al sur de la Bahía de Campeche. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 32, 75–115.
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S.L. y O'Brien, J.J., 2003. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of*

Geophysical Research, 108.

Zavala Hidalgo, J., Fernández Eguiarte, A., 2004. Propuesta para la regionalización de los mares mexicanos desde el punto de vista de los procesos físicos: el caso del Golfo de México: Taller de Ordenamiento Ecológico Costero, noviembre 15-16.

Zoller, W.H., Gladney, E.S., Duce, R.A., 1974. Atmosphere concentrations and sources of trace metals at the South Pole. Science 183, 199-201.

13. ANEXOS

13.1 ARTÍCULO CIENTÍFICO

Mineralogía y Geoquímica de las playas de Tecolutla y Coatzacoalcos, Suroeste del Golfo de México.

John S. Armstrong-Altrin , Jayagopal Madhavaraju, Fabiola Vega-Bautista, Mayla A. Ramos-Vázquez, Bárbara Yaneth Pérez-Alvarado, Juan J. Kasper-Zubillaga, Armel Zacharie Ekoa Bessa.



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Geochemistry

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apgeochem

Mineralogy and geochemistry of Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments, SW Gulf of Mexico

John S. Armstrong-Altrin^{a,*}, Jayagopal Madhavaraju^{b,**}, Fabiola Vega-Bautista^c,
Mayla A. Ramos-Vázquez^c, Bárbara Yaneth Pérez-Alvarado^c, Juan J. Kasper-Zubillaga, PhD^a,
Armel Zacharie Ekoa Bessa, PhD^d

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

^b Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Hermosillo, Sonora, Mexico

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

^d Department of Earth Sciences, University of Yaoundé I, P.O. Box: 812, Yaoundé, Cameroon

ARTICLE INFO

Handling editor: Prof. M. Kersten

Keywords:

Contamination
Provenance
Weathering Coastal
sediments
Composition

ABSTRACT

Mineralogic and geochemical studies were performed in the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments, located at the SW Gulf of Mexico. The main concern of this article is to infer the weathering, provenance, and degree in which trace metal pollution affects the beach sediment composition. The chemical index of weathering (CIX) for the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments indicate a moderate intensity of weathering in the source area. The $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio values (>6) in the Tecolutla and Coatzacoalcos sediments suggested a high compositional maturity and recycling. A difference in the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ratios between the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments points out that the sediments were derived from intermediate and felsic igneous rocks, respectively. A negative correlation for Al_2O_3 against TiO_2 and P_2O_5 , and trace elements Y, Nb, V, Sc, and Cr for the beach sediments suggests an association of these elements with detrital minerals rather than aluminosilicates. The provenance discrimination based on major element concentrations indicates an intermediate and a felsic provenance for the Tecolutla and Coatzacoalcos sediments. The major and trace element geochemistry of beach sediments are associated with a passive margin setting.

The Enrichment factor (EF) and Geo accumulation index (I_{geo}) values show that the Tecolutla sediments are moderately enriched by Cu (EF ~ 10–17) and Cr ($1 < I_{\text{geo}} < 2$). An enrichment of EF value for Cu in Tecolutla beach sediments may be a response of anthropogenic and natural sources by the weathering of intermediate igneous rocks. The moderately to highly enriched I_{geo} values of Pb, Zn, and V observed in the Coatzacoalcos beach sediments, indicate that the sediments were influenced by the waste generated by urban activities in the river drainage catchment area.

1. Introduction

The geochemical composition of terrigenous sediments is depending on the parental rock influence, climatic conditions, and tectonics of the source region, and is extensively utilized in various studies to infer the provenance and weathering condition in the source area (Wang et al., 2018; Basu, 2020; Chaudhuri et al., 2020a,b; Ayala-Pérez et al., 2021;

Madhavaraju et al., 2021; Ramírez-Montoya et al., 2021). Trace elements are considered as an excellent indicator of parent rocks due to their relatively low mobility during sedimentary processes (Mendieta-Lora et al., 2018; Armstrong-Altrin, 2020; Kettanah et al., 2020; Zheng and Yang, 2020; Hussain et al., 2021). Similarly, the concentration of certain trace elements like Nb, Th, Co, Sc, Cr, V, and Ni and their ratios varies widely between felsic and mafic igneous source rocks, and are

* Corresponding author;

** Corresponding author;

E-mail addresses: armstrong@cmarl.unam.mx, john_arms@yahoo.com (J.S. Armstrong-Altrin), mj@geologia.unam.mx, jmadhavaraju@yahoo.com (J. Madhavaraju), vegabf.14@gmail.com (F. Vega-Bautista), red132526black@hotmail.com (M.A. Ramos-Vázquez), barbara.peral@outlookes (B.Y. Pérez-Alvarado), kasper@cmarl.unam.mx (J.J. Kasper-Zubillaga), armelekoa@yahoo.fr (A.Z. Ekoa Bessa).

<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105103>

Received 16 June 2021; Received in revised form 20 September 2021; Accepted 21 September 2021

Available online 24 September 2021

0883-2927/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

considered as reliable indicators to discriminate parent rocks (Madhavaraju, 2015; Madhavaraju et al., 2016; Hernández-Hinosa et al., 2018; Maftai et al., 2019; Kasper-Zubillaga et al., 2021; Martizzi et al., 2021). On the other hand, numerous authors are interested in investigating the trace metal concentrations in beach sediments, because beaches receive metals through rivers, which drain along the areas where anthropogenic activities are common (Chougong et al., 2021; Ekoa Bessa et al., 2021a). Hence, due to the riverine input the concentration of trace metals in beach sediments are generally influenced by natural and anthropogenic sources such as sewage discharges and agricultural fertilizers (Ramos-Vázquez et al., 2017; Armstrong-Altrin et al., 2019; Mapel-Hernández et al., 2021; Ota et al., 2021).

Provenance inferences based on geochemistry of beach sands along the Gulf of Mexico are little. Very few studies analyzed the major and trace element geochemistry of beach sands along the southern Gulf of

Mexico and discussed the source rocks and tectonic environment (Kasper-Zubillaga et al., 2013; Armstrong-Altrin et al., 2018, 2021). Recently, few studies analyzed the microtextures on quartz grain surfaces in the Gulf of Mexico coast and inferred the palaeoenvironment (Mejía-Ledezma et al., 2020; Ramos-Vázquez and Armstrong-Altrin, 2020, 2021a, b).

Other studies analyzed the provenance of deep-sea sediments in the Gulf of Mexico (Armstrong-Altrin, 2015; Armstrong-Altrin et al., 2015; Anaya-Gregorio et al., 2018), metal contamination (Armstrong-Altrin and Machain-Castillo, 2016; Celis-Hernandez et al., 2020; Ayala-Pérez et al., 2021), and littoral currents (Salas-Monreal et al., 2018; Moore et al., 2021). However, the textural and geochemical composition of beach sediments along the SW Gulf of Mexico are sparse. The purpose of this paper is to determine the mineralogy and geochemistry of the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments in the southwestern Gulf

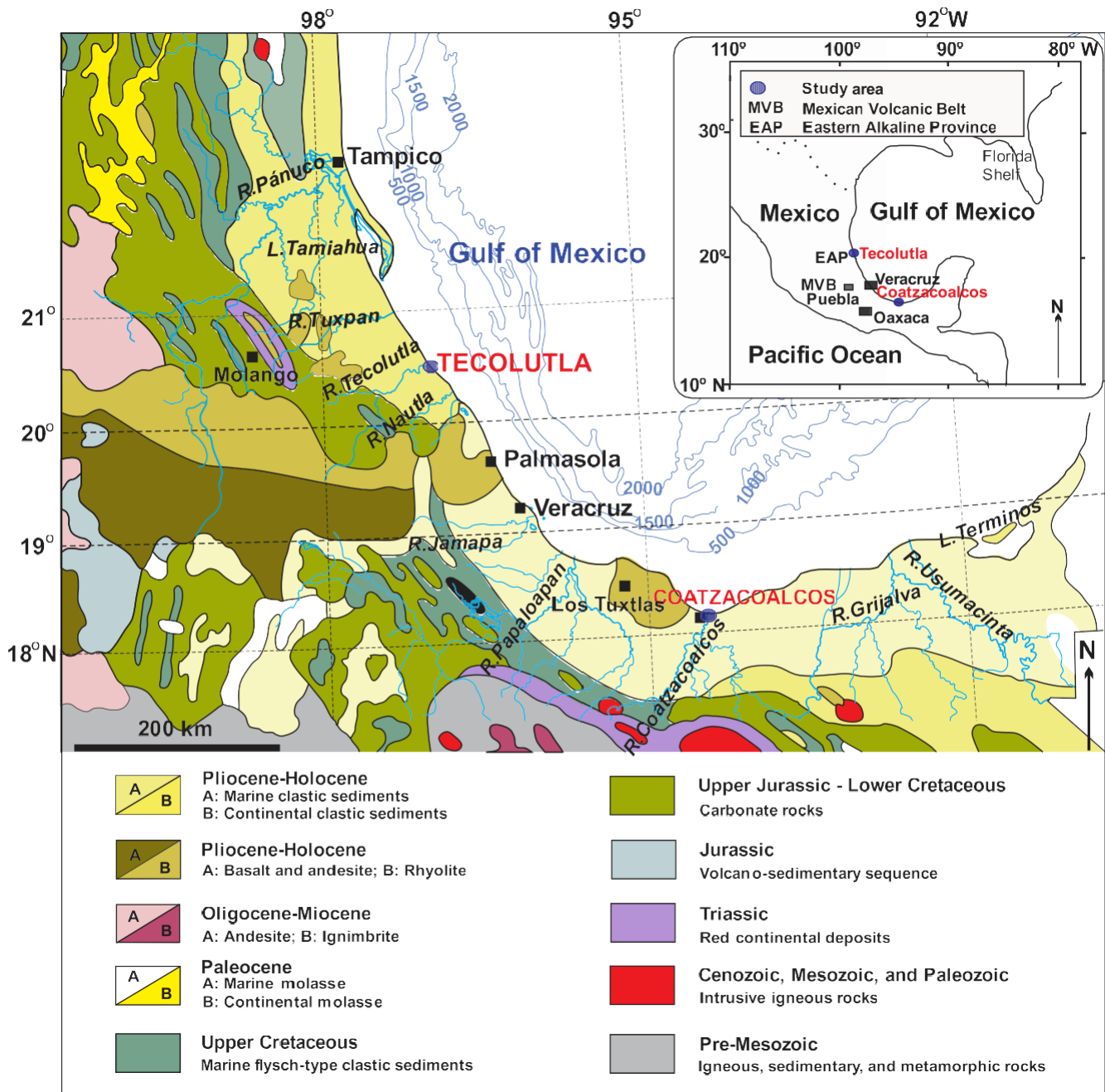


Fig. 1. Geological map showing Tecolutla and Coatzacoalcos beach areas, Gulf of Mexico (Source: Carta Geológica; scale 1:1,000,000; modified after Armstrong-Altrin, 2015).

of Mexico and to establish their provenance history. In addition, based on the trace metal concentrations the anthropogenic influence on the beach sediments will be also addressed in this paper.

2. Study area

The Tecolutla and Coatzacoalcos beaches are located at the Veracruz State, SW Gulf of Mexico (20° 28' 44.82" N - 97° 00' 20.58" W and 18° 09' 19.03" N - 94° 25' 40.61" W, respectively; Fig. 1). The Gulf of Mexico littoral zone belongs to the wave dominated marginal sea coast category with narrow coastal plain (Davis, 1988; Carranza-Edwards et al., 2019).

The coast is classified as transgressive and wave-dominated (Inman and Nordstrom, 1971; Boyd et al., 1992). In summer, longshore surface currents have a northward flow direction with an average velocity of 4.5 cm/s. However, during winter, longshore surface currents flow towards the south with an average velocity of 6 cm/s. Higher wind velocities were recorded during summer, which vary from 3.0 to 5.4 ms⁻¹ (Yañez-Arancibia and Day, 1982). The climate is considered as sub-humid to humid (Tamayo, 1991).

The outcrops along the Gulf of Mexico coastal areas are composed of alluvium and soils (Quaternary), volcanic rocks of mafic and intermediate compositions (Cenozoic), clastic and calcareous sedimentary rocks (Cenozoic and Mesozoic), and metamorphic rocks comprising schist and gneiss of Paleozoic and Precambrian ages (Ruiz-Mendoza et al., 2021; Verma et al., 2021, Fig. 1).

The major rivers feeding sediments seaward to the Tecolutla and Coatzacoalcos beaches in the Gulf of Mexico are Tecolutla and Coatzacoalcos, respectively. River Tecolutla, drains between 19° 30' - 20° 30' N and 97°-98° 15' W, which starts in the Xalapa uplift of eastern Mexico and is one of the major rivers, which drains along a large volcanic terrane (Self, 1975). The Xalapa uplift is the easternmost extension of the Mexican Volcanic Belt (MVB), which includes Neogene to Quaternary province, extending through Central Mexico for about 1000 km (Verma 2009, 2015). The lithology of the river draining area is dominated by sedimentary and volcanic rocks (Cenozoic). The Coatzacoalcos River originates in the Oaxaca State and drains between 17° 46' - 18° 10' N and 92° 25' - 94° 31' W, with a mean annual discharge of 32,732 hm³ (Tamayo, 1991). The lithology of the Coatzacoalcos River draining areas consist mainly of volcanic and metasedimentary rocks (metaclastic and carbonate rocks) of the Oaxacan Complex.

3. Methods and material

3.1. Grain-size analysis

Grain-size characteristics were analyzed by a Ro-Tap sieve Shaker, which is located at the Sedimentology Laboratory, Institute of Marine Sciences and Limnology (ICML), National Autonomous University of Mexico (UNAM). For grain-size classification, American Standard Test Material sieves 12, 14, 16, 20, 35, 60, 80, 100, 12, 140, 170, 200, and 230 μm were selected, and were measured based on Wentworth (1922) scheme. The textural parameters, mean, sorting, skewness, and kurtosis were calculated by following Folk and Ward (1957) equations.

3.2. Modal analysis

Modal composition was determined by counting 200 grains per thin-section. The point counts were done by Gazzi-Dickinson method (Gazzi, 1066; Dickinson, 1970).

3.3. SEM-EDS

The quantitative compositional data of selected grains was determined by JEOL-JXA-8900R Scanning Electron Microscopy equipped with Energy Dispersive X-ray Spectrometry (SEM-EDS) located at the Institute of Geophysics, UNAM, Mexico City.

3.4. Geochemistry

Major and trace element concentrations of 40 bulk sediment samples from the Tecolutla (n 20) and Coatzacoalcos (n 20) beaches were analyzed by X-ray fluorescence (Rigaku RIX-3000) at the Institute of Geology, UNAM. Accuracy of major element analysis was monitored by the standard JGB1 (GSJ) (Balaram, 2021). The precision of major element data was lesser than 5%. Loss on ignition was obtained by weighing after combustion 1 h at 1000 °C. The operation procedure to measure trace element concentrations was similar as detailed in Jarvis (1988). The United States Geological Survey Standard BCR-2 (Basalt, Columbia River) was used and the analytical precision of trace elements was less than 5%.

Enrichment Factor (EF) is calculated based on the equation of Zoller et al. (1974), i.e. $EF = (m/Al)_{\text{sample}} / (m/Al)_{\text{Background}}$, where (m/Al)_{sample} represents the metal/Al ratio of the sediment samples and (m/Al)_{Background} sample is reference values in this case upper continental crust (UCC). Geo-accumulation index (I_{geo}) is another index used to evaluate the degree of anthropogenic contamination of metals in sediments, which can be calculated by an equation, $\log_2 (C_n / 1.5 \times B_n)$ (Muller, 1969), where C_n is the measured concentration of the metal "n" in the sediment sample, B_n is the geochemical background concentration of metal "n", and the value of 1.5 is a factor that considers possible variability generated by lithological variations.

The I_{geo} consists of seven grades, i.e. Class 0 (I_{geo} = < 0, practically uncontaminated), Class 1 (0 < I_{geo} < 1, uncontaminated to moderately contaminated), Class 2 (1 < I_{geo} < 2; moderately contaminated), Class 3 (2 < I_{geo} < 3, moderately to highly contaminated), Class 4 (3 < I_{geo} < 4, highly contaminated), Class 5 (4 < I_{geo} < 5, highly to extremely contaminated).

4. Results

4.1. Textural parameters

The textural parameters of the Tecolutla and Coatzacoalcos sediments are listed in Table 1. The mean grain size (Mz expressed in φ units) varies from ~2.3 to 2.5 and ~1.4 to 2.5 for the Tecolutla and Coatzacoalcos sediments, respectively, indicating that the sand grains are fine to medium in size. However, the Coatzacoalcos sediments are dominantly characterized by medium-grained sands. On the other hand, the variations in sorting, skewness, and kurtosis values are not significantly different between the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments.

In the Tecolutla and Coatzacoalcos sediments, quartz is the major constituent, followed by feldspar and lithic fragments (Table 1). However, quartz content (~55–75%; the mean with one-standard-deviation value being 65 ± 6) in Coatzacoalcos sediments is slightly higher than in the Tecolutla beach sediments (~39–54%; 46 ± 4). The average quartz-feldspar-lithic fragment (QtFtLf) ratios for the Tecolutla and Coatzacoalcos sediments are Qt₄₆:Ft₃₁:Lf₂₃ and Qt₆₅:Ft₁₈:Lf₁₇, respectively.

4.2. Mineralogy

The SEM-EDS data indicates the concentration of minerals like quartz, ilmenite, zircon, and calcite in the Tecolutla beach sediments (Fig. 2 A, B, and C). Similarly, enrichment of Si, Ca, Mg, Ti and Fe in Coatzacoalcos sediments reveals the concentration of minerals like quartz, calcite, ilmenite, rutile, and magnetite (Fig. 2 D, E, and F).

4.3. Geochemistry

4.3.1. Major element concentrations

The major-element concentrations of the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments are listed in Table 1S (supplementary material). The SiO₂ content varies between ~55 and 8 and 67.3 wt %, and

Table 1

Textural parameters with mean grain size (M_z ; Folk and Ward, 1957) and modal composition (Qt-Ft-Lf; Gazzi, 1966; Dickinson, 1970) for the Tecolutla (TEC) and Coatzacoalcos (COZ) beach sediments, SW Gulf of Mexico, expressed in %.

Sample	M_z (ϕ)	Sorting (σ_1)	Skewness (s_{sk1})	Kurtosis (K_G)	Qt	Ft	Lf
TEC 1	2.37	0.36	-0.17	1.02	48	31	21
TEC 2	2.33	0.41	-0.17	1.23	46	35	19
TEC 3	2.42	0.32	-0.17	1.5	49	30	21
TEC 4	2.4	0.34	-0.05	1	53	30	17
TEC 5	2.48	0.26	0.02	0.66	52	34	14
TEC 6	2.5	0.27	0.06	0.82	54	29	17
TEC 7	2.53	0.31	-0.33	1.08	46	31	23
TEC 8	2.42	0.25	0.11	1.48	50	26	24
TEC 9	2.4	0.36	-0.39	1.28	44	25	31
TEC 10	2.47	0.34	-0.21	1	39	32	29
TEC 11	2.42	0.33	0.04	1	41	34	25
TEC 12	2.37	0.27	-0.13	1.3	42	33	25
TEC 13	2.32	0.28	0.07	1.11	46	26	28
TEC 14	2.35	0.34	0	0.9	43	30	27
TEC 15	2.43	0.34	0.12	1	42	30	28
TEC 16	2.47	0.39	-0.39	1.14	46	32	22
TEC 17	2.35	0.32	0	1.13	40	31	29
TEC 18	2.3	0.33	-0.02	0.96	51	29	20
TEC 19	2.3	0.37	-0.12	0.91	39	34	27
TEC 20	2.28	0.3	-0.12	1.23	44	33	23
Mean	2.4 ± 0.07	0.32 ± 0.04	-0.09 ± 0.15	1.09 ± 0.2	46 ± 5	31 ± 3	23 ± 4.6
COZ1	2.47	0.29	-0.02	1.17	63	23	14
COZ2	2.12	0.42	-0.12	1	59	20	21
COZ3	2.08	0.53	-0.21	1	67	18	15
COZ4	2.3	0.34	-0.35	1.17	55	22	23
COZ5	2.38	0.29	-0.15	0.97	71	15	14
COZ6	1.42	0.96	-0.15	0.87	73	14	13
COZ7	1.98	0.56	-0.11	1.01	69	18	13
COZ8	2.13	0.49	-0.23	0.99	75	17	8
COZ9	2.3	0.43	-0.24	1.07	62	20	18
COZ10	2.23	0.4	-0.24	1.3	58	23	19
COZ11	2.48	0.26	-0.19	0.96	73	12	15
COZ12	2.42	0.31	-0.2	1.09	63	16	21
COZ13	2.45	0.34	-0.28	1.08	62	18	20
COZ14	2.48	0.3	-0.16	0.82	58	19	23
COZ15	2.28	0.35	-0.08	0.81	61	18	21
COZ16	2.2	0.31	0.02	1.09	65	18	17
COZ17	2.23	0.4	-0.24	0.99	74	16	10
COZ18	2.27	0.44	-0.18	1	60	21	19
COZ19	2.4	0.32	-0.14	1.33	67	18	15
COZ20	2.37	0.37	-0.23	0.85	59	23	18
Mean	1.4 ± 0.3	0.4 ± 0.2	-0.18 ± 0.09	1.03 ± 0.1	65 ± 6	18 ± 3	17 ± 4

Qt = total quartz (mono and polycrystalline quartz), Ft = total feldspar (plagioclase + feldspar); Lf = lithic fragments (sedimentary + metamorphic + volcanic + plutonic).

~76.8 and 79.8 wt % in the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments, respectively. The average Al_2O_3 content in Tecolutla is lower than that in the Coatzacoalcos beach sediments (6 ± 3 and 9 ± 0.7 , respectively). In general, the major element concentrations in the Coatzacoalcos sediments are lower than the average upper continental crust values (UCC) (Fig. 3). However, Fe_2O_3 , TiO_2 , and CaO contents are enriched in the Tecolutla sediments relative to the UCC value. This suggests a higher proportion of detrital and carbonate fractions in the Tecolutla sediments relative to the average UCC. The carbonate skeletons within the coastal area probably increase the CaO content in the beach sediments. The enrichment of carbonate content in the Gulf of Mexico beach sediments was also addressed by few authors (Kasper-Zubillaga et al., 2019; Ramos-Vazquez and Armstrong-Altrin, 2019). Negative correlations observed for SiO_2 versus Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , TiO_2 , Fe_2O_3 , and CaO for the Tecolutla ($r = -0.40$, -0.19 , -0.35 , 0.02 , -0.40 , and -0.08 ; $n = 20$) and Coatzacoalcos ($r = -0.69$, -0.83 , -0.71 , -0.08 , -0.04 , and -0.10 ; $n = 20$) sediments suggest the association of these elements with accessory phases. Based on the log

(Fe_2O_3/K_2O) versus log (SiO_2/Al_2O_3) ratios the Coatzacoalcos sediments are geochemically classified as lith-arenite and Tecolutla sediments are classified as lith-arenite and sub-arkose types, indicating the higher proportion of feldspars in the later (Fig. 4; Pettijohn et al., 1972). This result agrees consistently with the statistically significant positive correlation between Al_2O_3 and K_2O observed in the Tecolutla sediments ($r = 0.85$, $n = 20$; critical t value for 99% confidence level is 0.71). A negative correlation

for Al_2O_3 against TiO_2 and P_2O_5 for the Tecolutla ($r = -0.02$ and -0.43) and

Coatzacoalcos ($r = -0.31$ and -0.02) sediments supports the association of these elements with detrital minerals rather than aluminosilicates (Ramos-Vazquez and Armstrong-Altrin, 2019).

4.3.2. Trace element concentrations

Trace element concentrations in the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments are reported in Table 2S (supplementary Material). The trace elements such as La, Y, Sc, Cr, Th, Zr, and Nb are highly useful to infer source rock composition and tectonic setting since they are least affected by secondary processes like weathering, diagenesis, and metamorphism (Cullers 2000; Verma and Armstrong-Altrin 2013, 2016).

In general, the trace element concentrations in the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments are lower than in UCC, except a slight enrichment in Cu and Ni contents (Fig. 5). V and Zn contents in the Coatzacoalcos sediments are higher than the Tecolutla sediments. On the other hand, Cu contents in the Tecolutla sediments are higher than in the Coatzacoalcos sediments (Fig. 5). The depletion of Zr content in the beach sediments relative to UCC indicates less concentration of zircon mineral. Absence of significant correlation between Al_2O_3 versus Y, Nb, V, Sc, and Cr for the Tecolutla ($r = 0.02$, -0.13 , -0.08 , -0.04 , and 0.03 , respectively) and Coatzacoalcos ($r = 0.25$, 0.34 , -0.36 , 0.38 , and 0.08 , respectively) beach sediments is suggesting the association of these trace elements with accessory minerals.

5. Discussion

5.1. Weathering

The weathering of igneous rocks results in the removal of alkaline cations such as Na^+ , K^+ , and Ca^+ and the preferential enrichment of residual Al_2O_3 in soil profile. Hence, the intensity of weathering in clastic sediments can be evaluated based on the relationship between alkali and alkaline rare earth elements (Nesbitt and Young, 1982). Similarly, the geochemical composition of terrigenous sediments is widely used in numerous studies to infer the weathering condition and sediment maturity (Madhavaraju et al., 2017, 2019; Tawfik et al., 2018; Banerjee et al., 2020; Krishnan et al., 2020; Mustafa and Tobia, 2020). Chemical indices such as Chemical Index of Alteration (CIA = $[Al_2O_3]/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \times 100$; Nesbitt and Young, 1982), Chemical Index of Weathering (CIW = $[Al_2O_3]/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O) \times 100$; Harnois, 1988), Plagioclase Index of Alteration (PIA = $[Al_2O_3 - K_2O]/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O) \times 100$; Fedo et al., 1995) and Index of Compositional Variability (ICV = $[(CaO + K_2O + Na_2O + Fe_2O_3^{(t)} + MgO + MnO + TiO_2)/Al_2O_3]$; Cox et al., 1995) are widely used by various authors to unravel the weathering condition in the source area. CaO^* represents the content in silicates only. Although, these weathering indices have been used in various studies, few studies cautioned that carbonate content in sediments that may have the effect of decreasing the CIA, CIW, and PIA values (Cullers, 2000; Selvaraj and Chen, 2006). Cullers (2000) proposed a modified chemical weathering index CIX ($CIX = 100 * [Al_2O_3]/(Al_2O_3 + Na_2O + K_2O)$), which eliminates CaO content. In this study, CaO content in the Tecolutla beach is > 10 (~10–21; Supplementary Table 1S). Hence, we prefer to use CIX to infer the weathering intensity. Similar to other weathering indices, CIX value increases up to 80 in highly weathered materials. The CIX values obtained for the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments range from ~63 to 80 (69.13 ± 5.29) and ~65 to 70 (68 ± 1.3), respectively

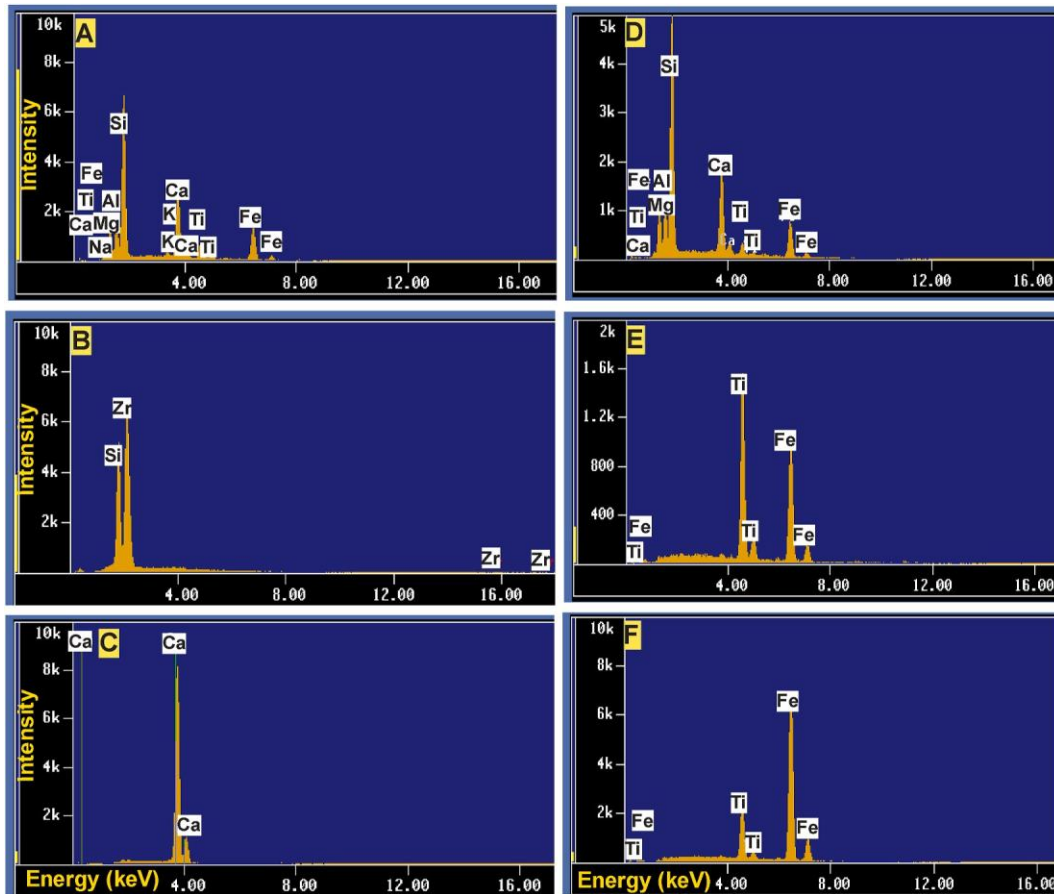


Fig. 2. SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive Spectrum) images for the Tecolutla (TEC1, TEC5, and TEC8) and Coatzacoalcos (COZ1, COZ5, and COZ8) beach sediments, Gulf of Mexico. (a) ilmenite and quartz, (b) zircon, (c) calcite, (d) ilmenite and quartz, (e) ilmenite, and (f) magnetite and rutile.

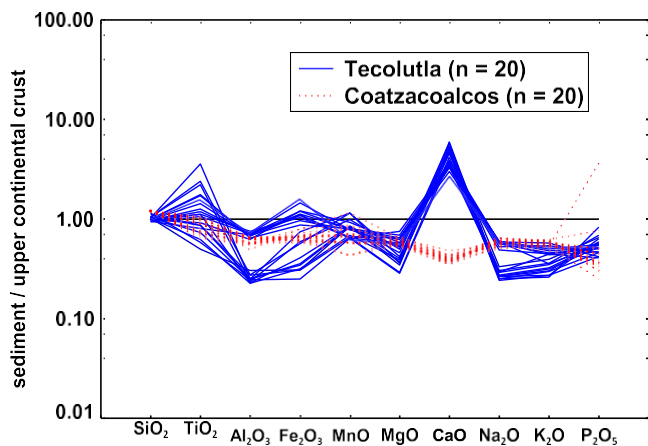


Fig. 3. Major element concentrations normalized against upper continental crust values (Taylor and McLennan, 1985). (Supplementary Table 1S). These CIX values reveal a moderate intensity of weathering, indicating warm and humid climatic conditions in the source area. K_2O/Al_2O_3 ratios in sediments are highly sensitive to temperature variations, high weathering converts feldspars into aluminosilicates, respectively relative to accessory minerals. The low K_2O/Al_2O_3 ratio values in the Tecolutla (~0.10–0.29) and Coatzacoalcos (~0.19–0.24) beach sediments indicate moderate weathering

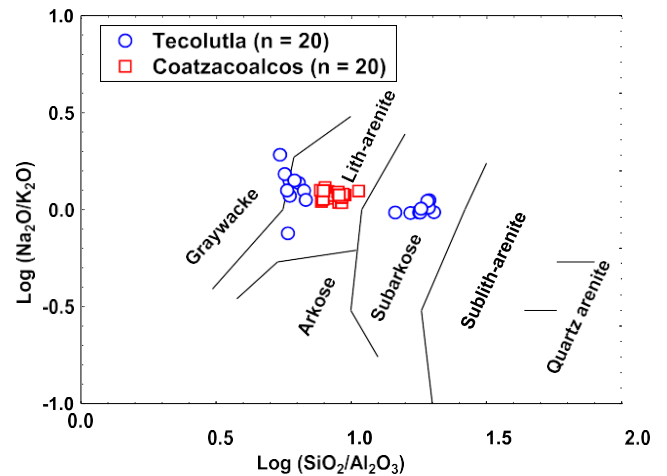


Fig. 4. $\log (SiO_2/Al_2O_3)$ - $\log (Na_2O/K_2O)$ bivariate plot for the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments (after Pettijohn et al., 1972). in the source area. The SiO_2/Al_2O_3 ratio values are widely used to infer sediment maturity, i.e., values > 6 indicate mature sediments. In this study, SiO_2/Al_2O_3 values are > 6 in the Tecolutla (~6–20) and Coatzacoalcos (~7.7–11) sediments, suggesting high compositional maturity. The proportion of heavy minerals like zircon and ilmenite in clastic sediments can be traced by the ternary plot of $15 \cdot Al_2O_3$ - $300 \cdot TiO_2$ -Zr (Garcia et al., 1994). On this plot (Fig. 6), Tecolutla sediments plot near

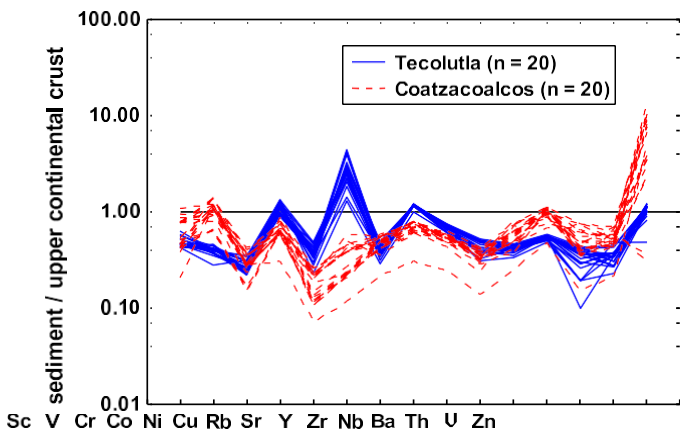


Fig. 5. Trace element concentrations normalized against upper continental crust values (Taylor and McLennan, 1985).

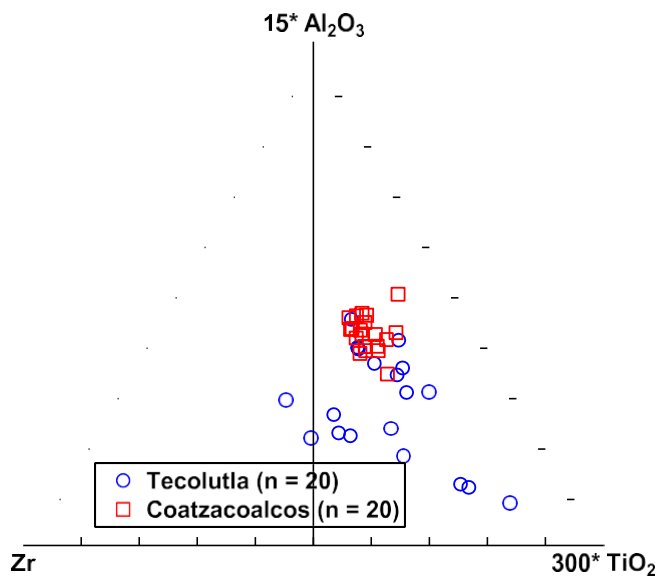


Fig. 6. Zr-300*-TiO₂-15*Al₂O₃ ternary plot for the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments (Garcia et al., 1994).

the TiO₂ apex and indicate an association of heavy minerals greater than the Coatzacoalcos sediments. Cox et al. (1995) demonstrated that Index of compositional Variability (ICV) is < 0.84 in mature sediments and >0.84 in compositionally immature first-cycle sediments. The ICV values in the Coatzacoalcos (1.15–1.11) are lower compared to those observed in the Tecolutla (4.65–4.46) sediments. The variation in ICV values between the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments suggest that the Tecolutla sands are enriched in rock-forming minerals than in Coatzacoalcos.

4.4. Provenance

Although the chemical composition of clastic sediments is influenced by the natural factors like sorting, weathering, and diagenesis, their compositional and elemental ratios are widely applied to various studies to infer sediment provenance and tectonic setting (Tawfik et al., 2018; Udayanapillai et al., 2020; Punia et al., 2021; Venu and Velmayil, 2021). The Al₂O₃/TiO₂ ratio in clastic sediments is widely used in various studies to infer the type of parent rocks (Madhavaraju et al., 2016; Al-Juboury et al., 2021; Eko Bessa et al., 2021b). The Al₂O₃/TiO₂ ratio varies from 3 to 8 for mafic, ~ 8–21 for intermediate, and ~21–70 for

felsic igneous rocks (Hayashi et al., 1997). The Al₂O₃/TiO₂ ratio in Tecolutla (13 ± 6) is lower compared to the Coatzacoalcos (22 ± 3) sediments. A difference in Al₂O₃/TiO₂ ratios between the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments supports that the sediments were derived from intermediate and felsic igneous rocks. In addition, the beach sediments are discriminated as mafic, intermediate, and felsic compositions based on their SiO₂ contents (Le Bas et al., 1986), which is also utilized in various studies (Hayashi et al., 1997; Armstrong-Altrin, 2009). On this discrimination plot, the Tecolutla and Coatzacoalcos sediments are classified as intermediate and felsic compositions (Fig. 7), respectively. For comparison, the average compositions of andesite, basaltic andesite, and basalt from the southern Gulf of Mexico coastal region are also included in Fig. 7 (Rosales-Lagarde et al., 2005, Torres-Sánchez et al., 2019; Verma et al., 2020, 2021).

The major element-based discriminant function diagram proposed by Roser and Korsch (1988) is extensively used in various studies to infer provenance (Tapia-Fernandez et al., 2017; Ramos-Vázquez et al., 2018). This diagram is efficient to discriminate sediments derived from mafic (P1), intermediate (P2), felsic (P3), and quartzose sedimentary (P4) sources. On this diagram (Fig. 8), the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments plot in the intermediate igneous and quartzose sedimentary fields, providing a difference in the parental rocks.

Girty et al. (1996) documented that TiO₂/Zr ratio show significant variations in felsic igneous (<55), intermediate (~55–195) and mafic (>195) igneous rocks. Hence, the TiO₂/Zr ratio in clastic sediments are useful to infer the source rock types. The TiO₂/Zr ratios in the Tecolutla and Coatzacoalcos sediments vary from ~22 to 193 and 52 to 126, respectively. It suggests that the Tecolutla sediments show felsic and intermediate composition of source rocks. The variation in the TiO₂/Zr ratio between both beach areas is significant, despite the fact that there is a provenance difference based on the Al₂O₃/TiO₂ ratio and major element concentrations. Cullers (2000) demonstrated a wide difference in V, Ni, and Th contents among felsic, intermediate, and mafic igneous rocks. Several studies considered these elements to discriminate the parental rocks (Madhavaraju, 2015; Armstrong-Altrin et al., 2017, 2021; Madhavaraju et al., 2021). On the Ni, Th, and V triangular plot (Fig. 9) the Tecolutla sediments are plotted near the average andesite composition, indicating the provenance of intermediate igneous rocks.

Chromium and Ni enrichment (>100 ppm) in clastic sediments with low Cr/Ni ratios (~1.3–1.5) indicates denudation of ultramafic rocks (Garver et al., 1996). The Cr, Ni, and Cr/Ni ratio in the Tecolutla (23.3, 16 ± 3, and 1.4 ± 0.3) and Coatzacoalcos (24 ± 6, 8 ± 2, and 3.4 ± 1.4) sediments suggest low contribution of sediments derived from the

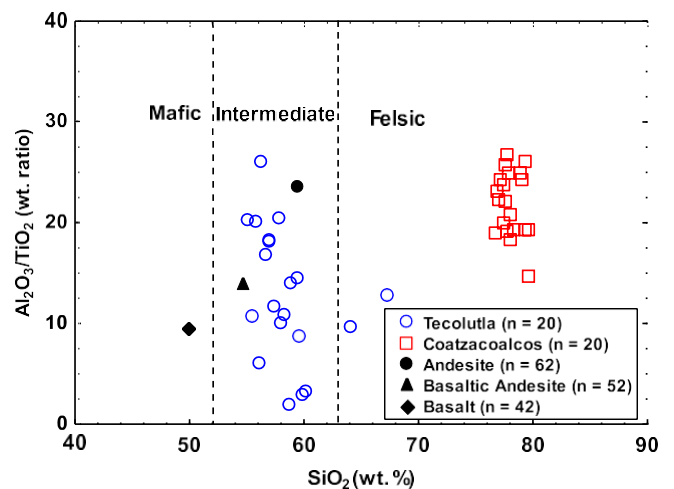


Fig. 7. The Al₂O₃/TiO₂ vs. SiO₂ bivariate plot for the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments. ¹This study; ²Average data for comparison are from Rosales-Lagarde et al. (2005), Torres-Sánchez et al. (2019), and Verma et al. (2021).

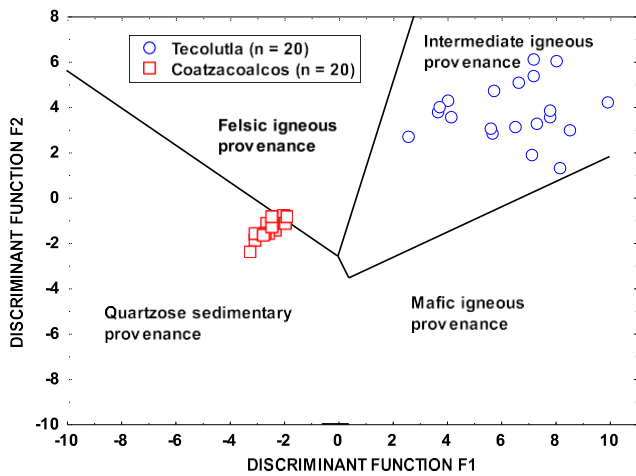


Fig. 8. Provenience discriminant function diagram for the Tecolutla and Coatzacoalcos sediments (Roser and Korsch, 1988). The discriminant functions are: Discriminant Function 1 = (-1.773*TiO₂) + (0.607*Al₂O₃) + (0.760*Fe₂O₃) + (-1.500*MgO) + (0.616*CaO) + (0.509*Na₂O) + (-1.224*K₂O) + (-9.090); Discriminant Function 2 = (0.445*TiO₂) + (0.070*Al₂O₃) + (-0.250*Fe₂O₃) + (-1.142*MgO) + (0.438*CaO) + (1.475*Na₂O) + (1.426*K₂O) + (-6.861).

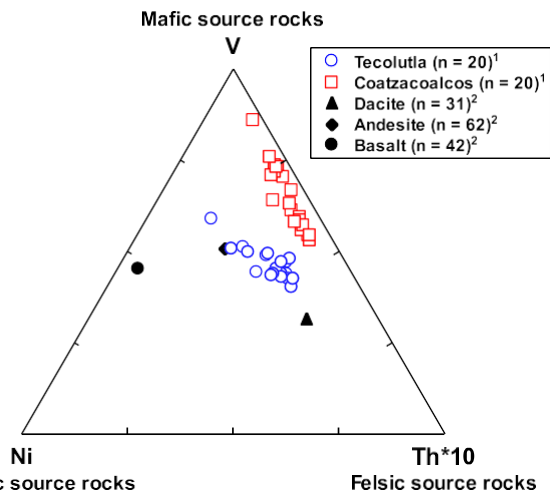


Fig. 9. Ni-Th*10-V ternary plot for the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments. Rosales-Lagarde et al. (2005), Torres-Sánchez et al. (2019), and Verma et al. (2021).

ultramafic rocks.

5.3. Trace metal contamination

In this study, the enrichment factor (EF) is calculated to be able to obtain the metal pollution indices in beach sands (Zoller et al., 1974), which is commonly used in various studies (Celis-Hernandez et al., 2020; Rauf et al., 2020; Ekoa Bessa et al., 2021a; Andráš et al., 2021). Al₂O₃ content is used as a reference for normalization and EF is calculated based on the average UCC values. In general, an EF value of <2 is considered as lithogenic origin and >2 is considered as anthropogenic source (Grousset et al., 1995). EF is classified into seven classes (Birch, 2003), i.e. class 1 (1–2; no enrichment), class 2 (2–3; minor enrichment), class 3 (3–5; moderate enrichment), class 4 (5–10; moderately severe enrichment), class 5 (10–25; severe enrichment), class 6 (25–50; very severe enrichment), and class 7 (>50; extremely severe enrichment). In the Tecolutla beach, the EF values for Cr, Ni and V provide no enrichment (<2) indicating low anthropogenic contamination. On the

other hand, EF for Co, Pb, Sr, and Zn in few samples vary between 2 and 6 suggesting a minor to moderately severe enrichment (Supplementary Table 3S). EF values for Ba in few samples vary from 2 to 3 (minor enrichment). Other samples show the highest EF values (~10–17) for Cu, indicating severe enrichment. In the Coatzacoalcos beach, the EF values for Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Sr, and V are <2 i.e. no enrichment, suggesting the absence of anthropogenic contamination. However, high enrichment for Pb (~3–14) and Zn (~4–23) is observed for the Coatzacoalcos beach sediments.

The I_{geo} values for the Tecolutla beach are <0 (I_{geo} < 0, practically uncontaminated) for Ba, Co, Cu, Ni, Pb, Sr, V, and Zn, which implies that the concentration of heavy metals in sediments is due to natural source (Supplementary Table 4S). The I_{geo} value for Cr falls under Class 2 (1 < I_{geo} < 2), suggesting moderate contamination. On the other hand, in Coatzacoalcos, I_{geo} values for Ba, Co, Cu, Cr, Sr, and Zn are <0, indicating practically uncontaminated. However, I_{geo} for Pb and V falls under class 3 (2 < I_{geo} < 3), suggesting moderately to a highly contaminated scenario. In general, Cu and Cr in Tecolutla and Pb, Zn, and V in the Coatzacoalcos sediments reveal an anthropogenic source. It seems the concentrations of Ba, Co, Ni, and Sr, in both beach areas support a natural source, derived from an intermediate source rock.

5.4. Tectonic setting

The tectonic setting of a sedimentary basin can be interpreted by the geochemical composition of terrigenous sediments. In order to infer the tectonic setting, researchers are still using the tectonic discrimination diagrams proposed by Bhatia (1983) and Roser and Korsch (1986). However, several studies indicated that these diagrams are not an accurate method to present geochemical data and caution of the low reliability of these tectonic discrimination diagrams (Verma et al., 2016; Rivera-Gómez et al., 2020). Verma and Armstrong-Altrin (2016) evaluated these old diagrams and proposed new discrimination diagrams, based on the compilation of worldwide database of major and trace element concentrations of sediments. These statistically proposed new diagrams efficiently discriminate sediments derived from active and passive margin settings and successfully applied in recent studies to infer the tectonic of an unknown basin (Etemad-Saeed et al., 2020; Bokanda et al., 2021). On these diagrams the beach sediments are largely plotted in the passive margin field, except few samples from the Coatzacoalcos

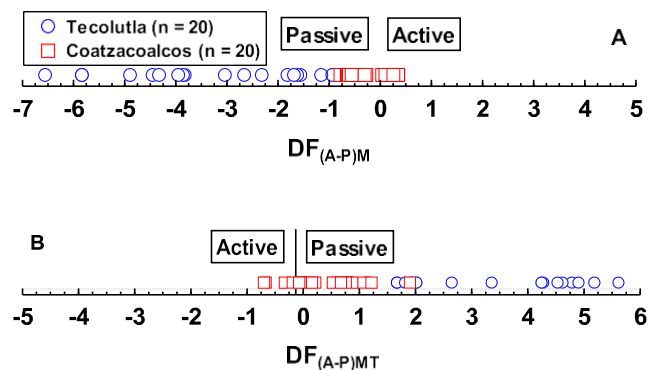


Fig. 10. Tectonic discrimination diagrams based on major (a) and major and trace (b) element concentrations (after Verma and Armstrong-Altrin 2016). The function (DF_{(A-P)M}) is derived from an equation: DF_{(A-P)M} = (3.0005 * ilr_{1TiM}) + (-2.8243 * ilr_{2AlM}) + (-1.0596 * ilr_{3FeM}) + (-0.7056 * ilr_{4MnM}) + (-0.3044 * ilr_{5MgM}) + (0.6277 * ilr_{6CaM}) + (-1.1838 * ilr_{7NaM}) + (1.5915 * ilr_{8KM}) + (0.1526 * ilr_{9PM}) - 5.9948. The function (DF_{(A-P)MT}) is to be calculated from equation: DF_{(A-P)MT} = (3.2683 * ilr_{1TiMT}) + (5.3873 * ilr_{2AlMT}) + (1.5546 * ilr_{3FeMT}) + (3.2166 * ilr_{4MnMT}) + (4.7542 * ilr_{5MgMT}) + (2.0390 * ilr_{6CaMT}) + (4.0490 * ilr_{7NaMT}) + (3.1505 * ilr_{8KM}) + (2.3688 * ilr_{9PM}) + (2.8354 * ilr_{10CrMT}) + (0.9011 * ilr_{11NbMT}) + (1.9128 * ilr_{12NiMT}) + (2.9094 * ilr_{13VMT}) + (4.1507 * ilr_{14YbMT}) + (3.4871 * ilr_{15ZrMT}) - 3.2088.

beach, which are plotted in the active margin field (Fig. 10 A and B). This result is consistent with the geology of the Gulf of Mexico, a passive margin tectonic setting. A few samples plotted in the active margin field may indicate the derivation of sediments from the nearby Mexican Volcanic Belt.

5. Conclusions

- 1) The provenance discrimination based on major element concentrations indicates an intermediate and felsic igneous provenance for the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments, respectively.
- 2) The weathering index (CIX) for the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments indicates a moderate intensity of weathering and a warm - humid climate confined in the source area.
- 3) The enrichment of Cr, Cu, Ni, and V contents in Tecolutla sediments indicates the derivation from intermediate igneous source rocks.
- 4) The major and trace element concentrations of the Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments is attributable to a passive margin setting.
- 5) The beach sediments are moderately contaminated by the trace metals Cu, Pb, Cr, and V, indicating an anthropogenic influence. In addition to the natural sources, the city sewages and boatyards are acted as sources for these trace metals.

Credit authorship contribution statement

John S. Armstrong-Altrin: Writing - original draft, Formal analysis, Resources, Funding acquisition. **Jayagopal Madhavaraju:** Writing - review and editing, Investigation. **Fabiola Vega-Bautista:** Methodology, Formal analysis. **Mayla A. Ramos-Vázquez:** Logistic fieldwork, Data curation, Methodology, Validation, Formal analysis. **Bárbara Yaneth Pérez-Alvarado:** Logistic fieldwork, Methodology, Formal analysis. **Juan J. Kasper-Zubillaga:** Review and editing. **Armél Zacharie Ekoa Bessa:** Formal analysis, review and editing.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgement

Armstrong-Altrin acknowledge the financial assistance provided by the CONACyT (no: A1-S-21287) and PAPIIT projects (no: IN107020) for chemical analysis. We extend our sincere thanks to Patricia Girón García, Carlos Linares-López, Laura E. Gómez Lizárraga and Teodoro Hernández Treviño, for XRF and SEM-EDS analyses. We are grateful to our laboratory assistants Eduardo Alfredo Morales, Ricardo Martínez Domínguez, and Susana Santiago-Perez for sample preparation. Ramos-Vázquez, Vega-Bautista, and Pérez-Alvarado are thankful to the Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología (PCML) postgraduate program and to the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología for scholarship. We are also grateful to the ICML Institutional Project (no. 616) for providing transport facilities during sample collection.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105103>.

References

Al-Juboury, A., Hussain, S.H., Al-Lhaebi, S.H., 2021. Geochemistry and mineralogy of the Silurian Akkas Formation, Iraqi western desert: implications for palaeoweathering, provenance and tectonic setting. *Arab. J. Geosci.* 14, 760.

Anaya-Gregorio, A., Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M., Montiel-García, P., 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.

Andráš, P., Midula, P., Matos, J.X., Buccheri, G., Drimal, M., Dirner, V., Melichová, Z., Ingrid, T., 2021. Comparison of soil contamination at the selected European coppermines. *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* 65 (1), 163–174.

Armstrong-Altrin, J.S., 2009. Provenance of sands from cazonos, Acapulco, and Bahía Kino beaches, Mexico. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 26 (3), 764–782.

Armstrong-Altrin, J.S., 2015. Evaluation of two multidimensional 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 (11–12), 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), 28. <https://doi.org/10.1186/s42501-020-00075-9>.

Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., 2016. Mineralogy, geochemistry, and radiocarbon ages of deep sea sediments from the Gulf of Mexico, Mexico. *J. South Amer. Earth Sci.* 71, 182–200.

Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Sanchez-Cabeza, J.A., Ruíz-Fernández, A.C., 2015. Geochemistry of deep sea sediments from the south-western Gulf of Mexico, Mexico: implication for depositional environment. *Contin. Shelf Res.* 95, 15–26.

Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Trejo-Ramírez, E., 2017. Mineralogy and geochemistry of sands along the Manzanillo and El Carrizal beach areas, southern Mexico: implications for palaeoweathering, provenance, and tectonic setting. *Geol. J.* 52 (4), 559–582.

Armstrong-Altrin, J.S., Ramos-Vázquez, M.A., Zavala-León, A.C., Montiel-García, P.C., 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., Soto, L.A., 2019. Geochemistry of surface sediments from the northwestern Gulf of Mexico: implications for provenance and heavy metal contamination. *Geol. Q.* 63 (3), 522–538.

Armstrong-Altrin, J.S., Ramos-Vázquez, M.A., Hermenegildo-Ruiz, N.Y., Madhavaraju, J., 2021. Microtexture and U-Pb geochronology of detrital zircon grains in the Chachalacas beach, Veracruz State, Gulf of Mexico. *Geol. J.* 56 (5), 2418–2438. <https://doi.org/10.1002/gj.3984>.

Ayala-Pérez, M.P., Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., 2021. Heavy metal contamination and provenance of sediments recovered at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico. *J. Earth Syst. Sci.* 130, 88. <https://doi.org/10.1007/s12040-021-01570-w>.

Balaram, V., 2021. Current and emerging analytical techniques for geochemical and geochronological studies. *Geol. J.* 56 (5), 2330–2359. <https://doi.org/10.1002/gj.4005>.

Basu, A., 2020. Chemical weathering, first cycle quartz sand, and its bearing on quartz arenite. *J. Indian Assoc. Sedimentol.* 37 (2), 3–14.

Bokanda, E.E., Fralick, P., Ekomané, E., Tatab, C.T., Ashukem, E.N., Beling, B.E., 2021. Geochemical constraints on the provenance, paleoweathering and maturity of the Mamfe black shales, west Africa. *J. Afr. Earth Sci.* 175, 104078.

Banerjee, S., Choudhury, T.R., Saraswati, P.K., Khanolkar, S., 2020. The formation of authigenic deposits during Paleogene warm climatic intervals: a review. *J. Palaeogeogr.* 9, 27. [ORG/10.1186/s42501-020-00076-8](https://doi.org/10.1186/s42501-020-00076-8).

Bhatia, M.R., 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *J. Geol.* 91, 611–627.

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

Boyd, R., Dalrymple, R., Zaitli, B.A., 1992. Classification of clastic coastal depositional environments. In: Donoghue, J.F., Davis, R.A., Fletcher, C.H., Suter, J.R. (Eds.), *Quaternary Coastal Evolution*. Elsevier, Amsterdam, pp. 139–150.

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., Santa-Cruz, R.L., 2019. Provenance inferred through modern beach sands from the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geol. J.* 54, 552–563.

Celis-Hernandez, O., Giron-Garcia, M.P., Ontiveros-Cuadras, J.F., Canales-Delgado, J. C., Pérez-Ceballos, R.Y., Ward, R.D., Acevedo-Gonzales, O., Armstrong-Altrin, J.S., Merino-Ibarra, M., 2020. Environmental risk of trace elements in mangrove ecosystems: an assessment of natural vs oil and urban inputs. *Sci. Total Environ.* 730, 138643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138643>.

Chaudhuri, A., Banerjee, S., Chauhan, G., 2020b. Compositional evolution of siliciclastic sediments recording the tectonic stability of a peritectonic rift: Mesozoic Kutch basin, western India. *Mar. Petrol. Geol.* 111, 476–495.

Chaudhuri, A., Banerjee, S., Prabhakar, N., Das, A., 2020a. The use of heavy mineral chemistry in reconstructing provenance: a case study from Mesozoic sandstones of Kutch Basin, India. *Geol. J.* 55 (12), 7807–7817. <https://doi.org/10.1002/gj.3922>.

Chougong, D.T., Ekoa Bessa, A.Z., Nguetchoua, G., Yongue, R.F., Ntyam, S.C., Armstrong-Altrin, J.S., 2021. Mineralogy and geochemistry of Lobé River sediments, SW Cameroon: implications for provenance and weathering. *J. Afr. Earth Sci.* 183, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104320>. No. 104320.

Cox, R., Lowe, D.R., Cullers, R.L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochem. Cosmochim. Acta* 59, 2919–2940.

- Cullers, R.L., 2000. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian - Permian age, Colorado, U.S.A.: Implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos* 51, 181–203.
- Davis, R.A., 1988. Morphodynamics of the west-central Florida barrier system: The delicate balance between wave- and tide-domination. In: Van der Linden, W.J., Cloetingh, S.A., Vandenberghe, J.P.W.J., Van De Graaff, W.J. (Eds.), *Coastal Lowlands, Geology and Geotechnology*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, pp. 225–235.
- Dickinson, W.R., 1970. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *J. Sediment. Petrol.* 40 (2), 695–707.
- Ekoka Bessa, A.Z., Nguetouhoua, G., Janpou, A.K., El-Amier, Y.A., Nguetnga, O.N.N.M., Kayou, U.R., Bisse, S.B., Ngo Mapuna, E.C., Armstrong-Altrin, J.S., 2021a. Heavy metal contamination and its ecological risks in the beach sediments along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon). *Earth Syst. Environ.* 5, 433–444. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00167-5>.
- Ekoka Bessa, A.Z., Fuh, G.C., Ndjigui, P.D., Armstrong-Altrin, J.S., Betsi, T.B., 2021b. Mineralogy and geochemistry of the Ossa lake Complex sediments, Southern Cameroon: Implications for paleoweathering and provenance. *Arab. J. Geosci.* 14 <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06591-9>. Article no. 322.
- Etemad-Saeed, N., Najafi, M., Vergés, J., 2020. Provenance evolution of Oligocene-Pliocene foreland deposits in the Dezful embayment to constrain Central Zagros exhumation. *J. Geol. Soc. London* 177 (4), 799–817.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23, 921–924.
- Folk, R.L., Ward, W.C., 1957. Brazos River bar, a study in the significance of grain-size parameters. *J. Sediment. Petrol.* 27, 3–26.
- García, D., Fontelles, M., Moutte, J., 1994. Sedimentary fractionations between Al, Ti, and Zr, and the genesis of strongly peraluminous granites. *J. Geol.* 102, 411–422.
- Garver, J.I., Royce, P.R., 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. Sediment. Res.* 66, 100–106.
- Gazzi, P., 1966. Le arenarie del flysch sopracretaceo dell'Appennino modenese: Correlazioni con il flysch di Monghidoro. *Mineral. Petrogr. Acta* 12, 69–97.
- Girty, G.H., Ridge, D.L., Knaack, C., Johnson, D., Al-Riyami, R.K., 1996. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California. *J. Sediment. Res.* 66, 107–118.
- Grousset, F.E., Quétel, C.R., Thomas, B., Donard, O.F.X., Lambert, C.E., Quillard, F., Monaco, A., 1995. Anthropogenic vs. lithogenic origins of trace elements (As, Cd, Pb, Rb, Sb, Sc, Sn, Zn) in water column particles: northwestern Mediterranean Sea. *Mar. Chem.* 48, 291–310.
- Harnois, L., 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sediment. Geol.* 55 (3–4), 319–322.
- Hayashi, K.-I., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochem. Cosmochim. Acta* 61 (19), 4115–4137.
- Hernández-Hinojosa, V., Montiel-García, P.C., Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., 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.
- Hussain, S.H., Al-Juboury, A.I., Al-Haj, M.A., Armstrong-Altrin, J.S., Al-Lhaebi, S.F., 2021. Mineralogy and geochemistry of the Late Triassic Baluti Formation, Northern Iraq. *J. Afr. Earth Sci.* 181, 104243. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104243>.
- Inman, D.L., Nordstrom, C.E., 1971. On the tectonic and morphologic classification of coasts. *J. Geol.* 79 (1), 1–21.
- Jarvis, K.E., 1988. Inductively coupled plasma mass spectrometry: a new technique for the rapid or ultra-level determination of the rare-earth elements in geological materials. *Chem. Geol.* 68, 31–39.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Armstrong-Altrin, J.S., Carranza-Edwards, A., Morton-Bermea, O., Lozano-Santa-Cruz, R., 2013. Control in beach and dune sands of the Gulf of Mexico and the role of nearby rivers. *Int. J. Geosci.* 4 (8), 1157–1174.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Arellano-Torres, E., Armstrong-Altrin, J.S., 2019. Physical degradation and early diagenesis in foraminiferal tests after subaerial exposure in terrigenous-depleted beaches of Yucatan, Mexico. *Carbonate. Evaporite* 34, 1175–1189.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Martínez-Serrano, R., Arellano-Torres, E., Álvarez Sánchez, L.F., Patiño-Andrade, D., González-Bermúdez, A., Carlos-Delgado, L., 2021. Petrographic and geochemical analyses of dune sands from southeastern Mexico. *Oaxaca, Mexico. Geol. J.* 56 (6), 3012–3034. <https://doi.org/10.1002/gj.4086>.
- Kettanah, Y.A., Armstrong-Altrin, J.S., 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.* 56, 2528–2549. <https://doi.org/10.1002/gj.3880>.
- Krishnan, G., Nagendra, R., Elango, L., Narasimha, K.N.P., Vybhav, K., Mujumdar, M., 2020. Spatial and Temporal Variations in Geochemistry of Cauvery River Sediments (Tamilnadu, India): Indicators of Provenance and Weathering. *J. Indian Assoc. Sedimentol.* 37 (2), 49–60.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.* 27 (3), 745–750.
- Madhavaraju, J., 2015. In: Ramkumar, M. (Ed.), *Geochemistry of Campanian-Maastrichtian Sedimentary Rocks in the Cauvery Basin, South India: Constrains on Paleoweathering, Provenance and End Cretaceous Environments, Chemostratigraphy: Concepts, Techniques and Applications*. Elsevier Special, pp. 185–214. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-419968-2.00008-X>.
- Madhavaraju, J., Tom, M., Lee, Y.I., Balaram, V., Ramasamy, S., Carranza-Edwards, A., Ramachandran, A., 2016. Provenance and tectonic settings of sands from Puerto Peñasco, Desemboque and Bahía Kino beaches, Gulf of California, Sonora, Mexico. *J. South Amer. Earth Sci.* 71, 262–275.
- Madhavaraju, J., Pacheco-Olivas, S.A., Gonzalez-Leon, C.M., Espinoza-Maldonado, I.G., Sanchez-Medrano, P.A., Villanueva-Amadoz, U., Monreal, R., Pi-Puig, T., Ramirez-Montoya, E., Grijalva-Noriega, F.J., 2017. Clay Mineralogy and geochemistry of the Lower Cretaceous siliciclastic rocks of the Morita Formation, Sierra San José section, Sonora, Mexico. *J. South Amer. Earth Sci.* 76, 397–411.
- Madhavaraju, J., Saucedo-Samaniego, J.C., Löser, H., Espinoza-Maldonado, I.C., Solari, L., Monreal, R., Grijalva-Noriega, F.J., 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., Pi-Puig, T., 2021. Geochemistry of sands from the Huatabampo and Altata beaches. *Gulf of California, Mexico. Geol. J.* 56 (5), 2398–2417. <https://doi.org/10.1002/gj.3864>.
- Martizzi, P., Chiyonobu, S., Hibi, Y., Yamato, H., Arato, H., 2021. Middle-late Miocene paleoenvironment of the Japan Sea inferred by sedimentological and geochemical characterization of coeval sedimentary rocks. *Mar. Petrol. Geol.* 128, 105059.
- Mafei, A.-E., Buzgar, N., Buzat, A., Apopei, A.-I., 2019. Distribution and minor elements contamination in urban and Peri-Urbain soils area of Sălciș Moldova, Romania. *Carpathian. J. Earth Environ. Sci.* 14 (2), 335–342.
- Mapel-Hernández, M.D., Armstrong-Altrin, J.S., Botello, A.V., Lango-Reynoso, F., 2021. Bioavailability of Cd and Pb in sediments of the National Park Veracruz Reef System, Gulf of Mexico. *Appl. Geochem.* 133 <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105085> article no. 105085.
- Mejía-Ledezma, Kasper-Zubillaga, J.J., Álvarez-Sánchez, L.F., Mendieta-Lora, M., Arellano-Torres, E., Tetlalmatzi-Martínez, J.L., González Bermúdez, A., Patiño-Andrade, D., Armstrong-Altrin, J.S., 2020. Surface textures of quartz and ilmenite grains from dune and beach sands of the Gulf of Mexico Coast, Mexico: implications for fluvial, aeolian and marine transport. *Aeol. Res.* 45, 100611. [ORG/10.1016/j.aeolia.2020.100611](https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100611).
- Mendieta-Lora, M., Mejía-Ledezma, R.O., Kasper-Zubillaga, J.J., Arellano-Torres, E., Álvarez Sánchez, L.F., 2018. Mineralogical and geochemical implications of weathering rates in coastal dunes and beach sands close to a volcanic rock source in the western Gulf of Mexico, Mexico. *Chem. Erde Geochem.* 78, 323–329.
- Moore, S., Heise, E.A., Grove, M., Reisinger, A., Benavides, J.A., 2021. Evaluating the impacts of dam construction and longshore transport upon modern sedimentation within the Rio Grande Delta. *J. Coast Res.* 37 (1), 26–40.
- Muller, G., 1969. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal* 2, 108–118.
- Mustafa, R.K., Tobia, F.H., 2020. Geochemical application in unraveling 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., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715–717.
- Ota, Y., Suzuki, A., Yamaoka, K., Nagao, M., Tanaka, Y., Irizuki, T., Fujiwara, O., Yoshioka, K., Kawagata, S., Kawano, S., Nishimura, O., 2021. Geochemical distribution of heavy metal elements and potential ecological risk assessment of Matsushima Bay sediments during 2012–2016. *Sci. Total Environ.* 751, 141825.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R., 1972. *Sand and Sandstones*. Springer-Verlag, New York, p. 618p.
- Punia, A., Bharti, R., Kumar, P., 2021. Provenance identification of soil at the confluence of Thar desert, Aravalli hills, and alluvial plain based on trace and rare earth elements geochemistry. *Arab. J. Geosci.* 14, 201.
- Ramírez-Montoya, E., Madhavaraju, J., Monreal, R., 2021. Geochemistry of the sedimentary rocks from the Antimonio and Rio Asunción Formations, Sonora, Mexico: Implications for weathering, provenance and chemostratigraphy. *J. South Amer. Earth Sci.* 106, 103035. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103035>.
- Ramos-Vázquez, M.A., Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., Gío-Argáez, F.R., 2018. Foraminiferal assemblages, ^{14}C ages, and compositional variations in two sediment cores in the western Gulf of Mexico. *J. South Amer. Earth Sci.* 88, 480–496.
- Ramos-Vázquez, M., Armstrong-Altrin, J.S., Rosales-Hoz, L., Machain-Castillo, M.L., 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.A., 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., Armstrong-Altrin, J.S., 2020. Provenance and paleoenvironmental significance of microtextures in quartz and zircon grains from the Paseo del Mar and Bosque beaches, Gulf of Mexico. *J. Earth Syst. Sci.* 129 (1), 225. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01491-0>.
- Ramos-Vázquez, M.A., Armstrong-Altrin, J.S., 2021a. Provenance of sediments from Barra del Tordo and Tesoro beaches, Tamaulipas State, northwestern Gulf of Mexico. *J. Paleogeogr.* 10, 1–17. <https://doi.org/10.1186/s42501-021-00101-4>.
- Ramos-Vázquez, M.A., Armstrong-Altrin, J.S., 2021b. Microtextures on quartz and zircon grain surfaces in the Barra del Tordo and Tesoro beaches, northwestern Gulf of Mexico. *Arab. J. Geosci.* 14 <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07333-7>. Article no. 949.
- Rauf, A.U., Mallongi, A., Astuti, R.D.P., 2020. Mercury and chromium distribution in soil near maros karst ecosystem. *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* 15 (2), 453–460.
- Rivera-Gómez, M.A., Armstrong-Altrin, J.S., Verma, S.P., Díaz-González, L., 2020. APMDisc: An online computer program for the geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margins. *Turk. J. Earth Sci.* 29 (3), 550–578.

- Rosalas-Lagarde, L., Centeno-García, E., Dostal, J., Sour-Tovar, F., Ochoa-Camarillo, H., Quiroz-Barroso, S., 2005. The Tuzanco Formation: Evidence of an Early Permian submarine continental Arc in East-Central Mexico. *Int. Geol. Rev.* 47 (9), 901–919.
- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *J. Geol.* 94, 635–650.
- Roser, B.P., 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-Mendoza, D.V., Verma, S.K., Torres-Sánchez, D., Barry, T.L., Moreno, J.A., Torres-Hernández, J.R., 2021. Geochemistry and geochronology of intermediate volcanic rocks from the Compostela area, Nayarit, Mexico: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Geol. J.* 56, 4401–4428.
- Salas-Monreal, D., Marin-Hernandez, M., Salas-Perez, J.J., Salas-de-Leon, D.A., Monreal-Gomez, M.A., Perez-España, H., 2018. Coral reef connectivity within the Western Gulf of Mexico. *J. Mar. Syst.* 179, 88–99.
- Self, R.P., 1975. Petrologic changes in fluvial sediments in the Rio Nautla drainage Basin, Veracruz, Mexico. *J. Sediment. Petrol.* 45 (1), 140–149.
- Selvaraj, K., Chen, C.T.A., 2006. Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan: constraints from solid-phase geochemistry of sediments and sedimentary rocks. *J. Geol.* 114, 101–116.
- Tamayo, J.L., 1991. *Geografía Moderna de Mexico*. Mexico, Trillas, p. 400.
- Tapia-Fernandez, H.J., Armstrong-Altrin, J.S., Selvaraj, K., 2017. Geochemistry and U-Pb geochronology of detrital zircons in the Brujas beach sands, Campeche, Southwestern Gulf of Mexico, Mexico. *J. South Amer. Earth Sci.* 76, 346–361.
- Tawfik, H.A., Salah, M.K., Maejima, W., Armstrong-Altrin, J.S., Abdel-Hameed, A.-M.T., Ghandour, M.M.E., 2018. Petrography and geochemistry of the Lower Miocene Moghara sandstones, Qattara Depression, north Western Desert, Egypt. *Geol. J.* 53, 1938–1953.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford.
- Torres-Sánchez, D., Verma, S.K., Verma, S.P., Velasco-Tapia, F., Torres-Hernández, J.R., 2019. Petrogenetic and tectonic implications of Oligocene-Miocene volcanic rocks from the Sierra de San Miguelito complex, central Mexico. *J. South Amer. Earth Sci.* 95, 102311.
- Udayanapillai, A.V., Perumal, V., Armstrong-Altrin, J.S., 2020. Provenance, weathering, tectonic setting and palaeo-oxygenation condition of the Cretaceous calcareous greyshale (CGS) from the Kallakudi Dalmia limestone quarry no: II, Uttatur group, Trichinopoly, Tamilnadu, India. *Himal. Geol.* 41 (1), 11–20.
- Venu, U.A., Velmayil, P., 2021. Texture, mineralogy and geochemistry of Teri sediments from the Kuthiraimozhi deposit, southern Tamilnadu, India: implications on provenance, weathering and palaeoclimate. *Arab. J. Geosci.* 14, 364.
- Verma, S.P., 2009. Continental rift setting for the central part of the Mexican Volcanic Belt: A statistical approach. *Open Geol. J.* 3, 8–29.
- Verma, S.P., 2015. Origin, evolution, and tectonic setting of the eastern part of the Mexican Volcanic Belt and comparison with the Central American Volcanic Arc from conventional multielement normalized and new multidimensional discrimination diagrams and discordancy and significance tests. *Turk. J. Earth Sci.* 24, 111–164.
- Verma, S.P., Armstrong-Altrin, J.S., 2013. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chem. Geol.* 355, 117–180.
- Verma, S.P., Armstrong-Altrin, J.S., 2016. Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings. *Sediment. Geol.* 332, 1–12.
- Verma, S.P., Díaz-González, L., Armstrong-Altrin, J.S., 2016. Application of a new computer program for tectonic discrimination of Cambrian to Holocene clastic sediments. *Earth Sci. India* 9, 151–165.
- Verma, S.K., Fimbres, K.G.A., Torres-Sánchez, D., Hernández, J.R.T., Torres-Sánchez, S. A., López-Loera, H., 2020. Geochemistry and petrogenesis of Oligocene felsic volcanic rocks from the Pinos Volcanic Complex, Mesa Central, Mexico. *J. South Amer. Earth Sci.* 102, 102704.
- Verma, S.K., Torres-Sánchez, D., Hernández-Martínez, K.R., Malviya, V.P., Singh, P.K., Torres-Hernández, J.R., Rivera-Escoto, B.A., 2021. Geochemistry of Eocene felsic volcanic rocks from the Mesa Virgen-Calerilla, Zacatecas, Mexico: Implications for the magma source and tectonic setting. *Geol. J.* 56 (7), 3771–3790. <https://doi.org/10.1002/gj.4133>.
- Wang, Z., Wang, J., Fu, X., Zhan, W., Armstrong-Altrin, J.S., Yu, F., Feng, X., Song, C., 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.
- Wentworth, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geol.* 30, 377–392.
- Yañez-Arancibia, A., Day Jr., J.W., 1982. Ecological characterization of Terminos Lagoon: a tropical lagoon estuarine system in the southern Gulf of Mexico. *Oceanol. Acta* 5, 431–500.
- Zheng, D.-Y., Yang, W., 2020. Provenance of upper Permian-lowermost Triassic sandstones, Wutonggou low-order cycle, Bogda Mountains, NW China: implications on the unroofing history of the Eastern North Tianshan Suture. *J. Palaeogeogr.* 9, 19.
- Zoller, W.H., Gladney, E.S., Duce, R.A., 1974. Atmosphere concentrations and sources of trace metals at the South Pole. *Science* 183, 199–201.