



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA**

**GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS Y GEOCRONOLOGÍA U-Pb DE ZIRCONES
DETRÍTICOS DE PLAYA NORTE Y PLAYA TAMIAHUA DEL GOLFO DE MÉXICO:
IMPLICACIÓN DE PROCEDENCIA**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

Q. ITZAMNA ZAKNITE FLORES OCAMPO

DIRECTOR DE TESIS

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

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, septiembre de 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

"Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales."

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento al Dr. John S. Armstrong Altrin S. por la oportunidad de trabajar con él, por el tiempo y apoyo brindado.

Agradezco al Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, por la oportunidad de pertenecer a dicho posgrado y por el apoyo brindado durante la maestría.

Agradecimiento especial a CONACyT por apoyar mis estudios de maestría otorgándome una beca para mi manutención.

Muchas gracias a los miembros de mi comité, el Dr. Alfonso Vázquez Botello, el Dr. Madhavaraju Jayagopal, el Dr. John S. Armstrong Altrin S., el Dr. Carlos Ortega Obregón y la Dra. Berlaine Ortega Flores por su tiempo y por las aportaciones a este trabajo.

Agradezco la asistencia financiera proporcionada al Dr. John S. Armstrong Altrin S. del proyecto PAPIIT, número: IN107020 por el cual fue posible la recolección de muestras y el análisis de circones por U-Pb.

Agradezco la asistencia financiera proporcionada al Dr. John S. Armstrong Altrin S. del proyecto CONACyT, 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. Teresa Pi Puig 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.

Agradezco al Ing. Teodoro Hernández Treviño por permitirme emplear el equipo del Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) para la separación de circones, así como su orientación y ayuda para realizar esta actividad.

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.

Agradezco a los Dres. Luigi Solari, Carlos Ortega Obregón y Harim Arvizu Gutiérrez, por la datación y geoquímica de circones, realizados en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias, UNAM.

Agradezco 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.

Finalmente, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme una educación de la más alta calidad.

RESUMEN

Sedimentos recolectados de dos playas del Golfo de México se analizaron para determinar su tamaño de grano, mineralogía y geoquímica. Además, se estudió la geocronología U-Pb de circones detríticos de los sedimentos. El objetivo de este estudio es inferir la procedencia, paleoambiente, meteorización y nivel de contaminación por metales pesados en sedimentos. La playa de Tamiahua está ubicada en la parte centro-norte del estado de Veracruz, mientras que Playa Norte se encuentra en la Ciudad de Carmen, estado de Campeche. Ambas playas están ubicadas cerca de las lagunas denominadas Tamiahua y Términos, respectivamente.

Los sedimentos de las playas son de grano fino y de tamaño homogéneo, lo que indica una condición de baja energía. Los datos geoquímicos indican que los sedimentos de Playa Norte están compuestos principalmente de materiales carbonatados. Asimismo, la alta concentración de metales pesados se debe a la contaminación antropogénica derivada de diferentes industrias ubicadas a lo largo de las zonas costeras del Golfo de México. Las concentraciones de elementos traza y de tierras raras sugieren que los sedimentos de Playa Norte se derivaron de las rocas ígneas félsicas.

Por otro lado, los sedimentos de Tamiahua está empobrecidos en materiales carbonatados y enriquecidos en contenidos de SiO₂, en relación con Playa Norte. La anomalía negativa ($Eu / Eu^* = <1$) en los sedimentos de Tamiahua puede indicar que se derivaron de rocas fuente félsicas o que existe la presencia de plagioclasas que se formaron a poca profundidad.

Los datos de geocronología U-Pb de los circones detríticos revelan que los circones de Playa Norte están dominados por la edad Proterozoica, mientras que los circones Tamiahua están dominados por la edad Cenozoica. Con base en la geología de las áreas de playa se interpreta que los sedimentos de Playa Norte proceden del Macizo de Chiapas principalmente y la Sierra Chuacús a través de los ríos Grijalva y Usumacinta, cuyos desagües en los terrenos de la fuente consisten en circones de 1000 Ma. Por otro lado, Playa Tamiahua está rodeada por los terrenos de la Sierra Madre Oriental, la Provincia Alcalina Oriental Mexicana y el Valle de Huizachal los cuales están dominados por circones de ~ 2 - 20 Ma, 200-300 Ma y de 1000-1300 Ma.

ABSTRACT

The sediments collected from two beach in the Gulf of Mexico were analyzed for grain-size, mineralogy, and geochemistry. In addition, U-Pb geochronology of detrital zircons separated from bulk sediments were also studied. The objective of this study is to infer the provenance, paleoenvironment, weathering and level of heavy metal contamination in sediments. Tamiahua beach is located in the north-central part of the Veracruz State and Playa Norte is situated in the Ciudad de Carmen, Campeche State. Both beaches are located near to the lagoons named as Tamiahua and Terminos, respectively.

The beach sediments are fine-grained and homogenous in grain size, indicating a low energy condition. The geochemistry data indicate that Playa Norte sediments are mainly composed of carbonate materials. Similarly, high concentration of heavy metals is due to the anthropogenic contamination derived from different industries located along the Gulf of Mexico coastal areas. The trace and rare earth element concentrations suggest that the Playa Norte sediments were derived from the felsic igneous rocks or that there is the presence of plagioclase that formed at shallow depth.

On the other hand, Tamiahua sediment is depleted in carbonate materials and enriched in SiO₂ content, relative to Playa Norte. The negative anomaly ($Eu/Eu^* = <1$), in Tamiahua sediments indicates that they derived from felsic source rocks.

The U-Pb geochronology data of the detrital zircons reveal that Playa Norte zircons are dominated with Proterozoic age, while Tamiahua zircons are dominated with Cenozoic age. Based on the geology of the beach areas it is interpreted that Playa Norte sediments come mainly from the Chiapas Massif and the Sierra Chuacús through the Grijalva and Usumacinta rivers, which drains in the source terranes of the Sierra Madre Oriental, the Mexican Eastern Alkaline Province and the Huizachal Valley, which are dominated by zircons of ~ 2 - 20 Ma, 200-300 Ma and 1000-1300 Ma.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN	5
ABSTRACT.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE ECUACIONES	12
ÍNDICE DE ANEXOS	12
I. GENERALIDADES.....	13
1.1 INTRODUCCIÓN	13
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	16
1.4 HIPÓTESIS.....	17
1.5 ANTECEDENTES	18
II. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 SEDIMENTO Y ROCAS SEDIMENTARIAS.....	20
2.2 GRANULOMETRÍA.....	23
2.2.1 MEDIA (M_z).....	23
2.2.2 DESVIACIÓN ESTÁNDAR (σ).....	24
2.2.3 ASIMETRÍA (S_k)	25
2.2.4 CURTOSIS (K_G).....	26
2.3 GEOQUÍMICA.....	28
2.4 CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS.....	29
2.5 GEOCROLOGÍA U-Pb.....	33
III. ÁREA DE ESTUDIO	36
3.1 PLAYA NORTE	37
3.1.1 CLIMA	37
3.1.2 GEOLOGIA.....	39
3.1.3 FISIOGRAFÍA	41
3.1.4 TOPOGRAFÍA	41
3.1.5 HIDROGRAFÍA.....	41

3.1.6	LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS.....	43
3.2	PLAYA TAMIAHUA	45
3.2.1	CLIMA	45
3.2.2	GEOLOGÍA.....	47
3.2.3	FISIOGRAFÍA	49
3.2.4	TOPOGRAFÍA	49
3.2.5	HIDROGRAFÍA.....	49
3.2.6	LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS.....	50
IV.	MÉTODOLOGÍA.....	52
4.1	GRANULOMETRÍA.....	52
4.2	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO CON MICROANÁLISIS DE RAYOS X.....	52
4.3	DIFRACCIÓN DE RAYOS X	53
4.4	GEOQUÍMICA.....	53
4.4.1	ELEMENTOS MAYORES.....	54
4.4.2	ELEMENTOS TRAZA Y TIERRAS RARAS.....	54
4.5	GEOQUÍMICA Y GEOCROLOGÍA U-Pb EN CIRCONES.....	55
V.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	56
5.1	GRANULOMETRÍA.....	56
5.2	MINERALOGÍA	62
5.2.1	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM-EDS).....	62
5.2.2	DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	66
5.3	GEOQUÍMICA.....	70
5.3.1	ELEMENTOS MAYORES.....	71
5.3.2	ELEMENTOS TRAZA	76
5.3.3	TIERRAS RARAS.....	81
5.3.4	PROCEDENCIA	85
5.3.5	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON	87
5.3.6	INTEMPERISMO	90
5.3.7	CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS.....	93
5.4	GEOQUÍMICA Y GEOCROLOGÍA U-Pb EN CIRCONES.....	100
5.4.1	GEOQUÍMICA DE CIRCONES.....	100
5.4.2	GEOCROLOGÍA U-Pb DE CIRCONES.....	105
VI.	CONCLUSIONES	110

VII. REFERENCIAS.....	113
ANEXOS.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESCALA GRANULOMÉTRICA DE WENTWORTH PARA CLASIFICAR SEDIMENTOS DETRÍTICOS.....	20
FIGURA 2. PROCESO DE LITIFICACIÓN DE UNA ROCA SEDIMENTARIA	21
FIGURA 3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL GRADO DE ASIMETRÍA	26
FIGURA 4. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA CLASIFICACIÓN DE CURTOSIS	27
FIGURA 5. DECAIMIENTO RADIOACTIVO DE ²³⁸ U A ²⁰⁷ Pb.....	34
FIGURA 6. DIAGRAMA DE CONCORDANCIA DE WETHERILL	34
FIGURA 7. MORFOLOGÍA DE CIRCONES	35
FIGURA 8. MAPA DEL ÁREA DE ESTUDIO, PLAYA TAMIAHUA Y PLAYA NORTE	36
FIGURA 9. TEMPERATURA PROMEDIO DE PLAYA NORTE	37
FIGURA 10. PRECIPITACIÓN PROMEDIO EN PLAYA NORTE.....	38
FIGURA 11. VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO EN PLAYA NORT.....	38
FIGURA 12. TEMPERATURA PROMEDIO DEL AGUA EN PLAYA NORTE.....	39
FIGURA 13. MAPA GEOLÓGICO DE PLAYA NORTE	40
FIGURA 14. MAPA HIDROLÓGICO DE CAMPECHE	43
FIGURA 15. LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTRE	44
FIGURA 16. TEMPERATURA PROMEDIO DE PLAYA TAMIAHU	45
FIGURA 17. PRECIPITACIÓN PROMEDIO EN PLAYA TAMIAHU	46
FIGURA 18. VELOCIDAD PROMEDIO DE VIENTO EN PLAYA TAMIAHU	46
FIGURA 19. TEMPERATURA PROMEDIO DEL AGUA EN PLAYA TAMIAHUA	47
FIGURA 20. MAPA GEOLÓGICO DE PLAYA TAMIAHUA.....	48
FIGURA 21. MAPA HIDROLÓGICO DEL NORTE DE VERACRUZ.....	50
FIGURA 22. LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.....	51
FIGURA 23. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA	57
FIGURA 24. DIAGRAMA DE MEDIA VS. DESVIACIÓN ESTÁNDAR RELATIVA PARA CLASIFICAR ENTRE ARENA DE PLAYA O DE DUNA.....	61
FIGURA 25. FOTOMICROGRAFÍA, ESPECTRO Y ANÁLISIS SEMICUANTITATIVO DE LAS FASES MINERALES DE PLAYA NORTE.....	63
FIGURA 26. FOTOMICROGRAFÍA Y ESPECTRO DE LAS FASES MINERALES DE PLAYA NORTE	63
FIGURA 27. FOTOMICROGRAFÍA, ESPECTRO Y ANÁLISIS SEMICUANTITATIVO DE LAS FASES MINERALES DE PLAYA TAMIAHUA	65
FIGURA 28. FOTOMICROGRAFÍA Y ESPECTRO DE LAS FASES MINERALES DE PLAYA TAMIAHUA.....	65
FIGURA 29. DIFRACTOGRAMAS DE LA MUESTRAS DE PLAYA NORTE	67
FIGURA 30. DIFRACTOGRAMA DE LAS MUESTRAS DE PLAYA TAMIAHUA	69
FIGURA 31. DIAGRAMA NORMALIZADO CON EL PROMEDIO DE LA CORTEZA CONTINENTAL SUPERIOR PARA ELEMENTOS MAYORES.....	74
FIGURA 32. DIAGRAMA DE CLASIFICACIÓN QUÍMICA DE ARENA	75
FIGURA 33. DIAGRAMA DE LA CLASIFICACIÓN GEOQUÍMICA DE ARENISCAS, LIMOLITAS Y LUTITAS.....	76
FIGURA 34. DIAGRAMA NORMALIZADO PARA ELEMENTOS TRAZA DE LOS SEDIMENTOS COSTEROS DE PLAYA NORT	80
FIGURA 35. DIAGRAMA NORMALIZADO PARA TIERRAS RARAS CON LOS VALORES DE CONDRITA	84
FIGURA 36. DIAGRAMA DE PROCEDENCIA DE SEDIMENTOS	86
FIGURA 37. COMPARACIÓN DE LOS PATRONES DE REE NORMALIZADOS DE CONDRITA CO PLAYA NORTE Y TAMIAHUA	89
FIGURA 38. MAPA QUE MUESTRA LA UBICACIÓN DE LAS ÁREAS DE PLAYA Y TERRENOS DE MÉXICO	90
FIGURA 39. RELACIÓN Th/U CONTRA EDADES DE CIRCONES DETRÍTICOS DE PLAYA NORT	101
FIGURA 40. DIAGRAMA MULTIELEMENTAL DE ELEMENTOS TRAZA NORMALIZADOS CON CONDRITA DE LOS CIRCONES DETRÍTICOS DE PLAYA NORTE	102
FIGURA 41. RELACIÓN Th/U CONTRA EDADES DE CIRCONES DETRÍTICOS DE PLAYA TAMIAHUA	103
FIGURA 42. DIAGRAMA MULTIELEMENTAL DE ELEMENTOS TRZA NORMALIZADOS CON CONDRITA DE LOS CIRCONES DETRÍTICOS DE PLAYA TAMIAHUA.....	104
FIGURA 43. DIAGRAMA DE CONCORDIA DE CIRCONES DETRÍTICOS DE PLAYA NORTE	105
FIGURA 44. HISTOGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE EDADES PARA LOS SEDIMENTOS DE PLAYA NORTE.....	107

FIGURA 45. DIAGRAMA DE CONCORDIA DE CIRCONES DETRÍTICOS DE PLAYA TAMIAHUA.....	108
FIGURA 46. HISTOGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE EDADES PARA LOS SEDIMENTOS DE PLAYA TAMIAHUA.	109

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE SEDIMENTOS RESPECTO A LA MEDIA.....	24
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE SEDIMENTOS RESPECTO A LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR.....	25
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE SEDIMENTOS DE ACUERDO AL GRADO DE ASIMETRÍA	26
TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE ARENAS DE ACUERDO A LA CURTOSIS	27
TABLA 5. CATEGORÍAS DEL FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO	30
TABLA 6. CATEGORÍAS DEL ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN.....	31
TABLA 7. ESTÁNDARES DE LA CALIDAD DE LOS SEDIMENTOS.....	32
TABLA 8. VALORES DE M-ERM-Q	32
TABLA 9. COORDENADAS DE LAS MUESTRAS DE PLAYA NORTE.....	44
TABLA 10. COORDENADAS DE LAS MUESTRAS DE PLAYA TAMIAHUA	51
TABLA 11. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA PN 2.....	56
TABLA 12. PARÁMETROS TEXTURALES DE LOS SEDIMENTOS COSTEROS DE PLAYA NORTE	59
TABLA 13. PARÁMETROS TEXTURALES DE LOS SEDIMENTOS COSTEROS DE PLAYA TAMIAHUA.....	60
TABLA 14. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS MAYORES EN % DE LOS SEDIMENTOS COSTEROS DE PLAYA NORTE.....	71
TABLA 15. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS MAYORES EN % DE LOS SEDIMENTOS COSTEROS DE PLAYA TAMIAHUA	73
TABLA 16. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TRAZAS (PPM) DE LOS SEDIMENTOS COSTEROS DE PLAYA NORTE	78
TABLA 17. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TRAZAS (PPM) DE LOS SEDIMENTOS COSTEROS DE PLAYA TAMIAHUA	79
TABLA 18. CONCENTRACIÓN DE TIERRAS RARAS (PPM) DE LOS SEDIMENTOS COSTEROS DE PLAYA NORTE	82
TABLA 19. CONCENTRACIÓN DE TIERRAS RARAS (PPM) DE LOS SEDIMENTOS COSTEROS DE TAMIAHUA	83
TABLA 20. ÍNDICES DE INTEMPERISMO.....	92
TABLA 21. VALORES DEL FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO EN SEDIMENTOS DE PLAYA NORTE Y PLAYA TAMIAHUA	95
TABLA 22. VALORES DEL ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN PARA PLAYA NORTE Y PLAYA TAMIAHUA	96
TABLA 23. LÍMITES DE METALES EN SEDIMENTOS EN PPM	97
TABLA 24. CONCENTRACIONES DE METALES EN SEDIMENTOS DE PLAYA NORTE Y PLAYA TAMIAHUA	98
TABLA 25. VALORES DE M-ERM-Q OBTENIDOS EN LOS SEDIMENTOS DE PLAYA NORTE Y PLAYA TAMIAHUA	99

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. MEDIA	23
ECUACIÓN 2. DESVIACIÓN ESTÁNDAR	24
ECUACIÓN 3. ASIMETRÍA	25
ECUACIÓN 4. CURTOSIS	27
ECUACIÓN 5. FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO	30
ECUACIÓN 6. ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN	30
ECUACIÓN 7. COCIENTE PROMEDIO ERM	32
ECUACIÓN 8. ANOMALÍA DE EUROPIO	84
ECUACIÓN 9. FUNCIONES DISCRIMINANTES 1 Y 2	85
ECUACIÓN 13. CIA.....	90
ECUACIÓN 14. CIW.....	91
ECUACIÓN 15. PIA.....	91
ECUACIÓN 16. CARBONATOS EN SEDIMENTOS MARINOS	92

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. IDENTIFICACIÓN DE FASES CRISTALINAS DE LAS MUESTRAS DE PLAYA NORTE	130
ANEXO 2. IDENTIFICACIÓN DE FASES CRISTALINAS DE LAS MUESTRAS DE PLAYA TAMIAHUA.....	132
ANEXO 3. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA Y TIERRAS RARAS DE CIRCONES DETRÍTICOS DE PLAYA NORT	135
ANEXO 4. CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA Y TIERRAS RARAS DE CIRCONES DETRÍTICOS DE PLAYA TAMIAHUA	139
ANEXO 5. RESULTADOS DE GEOCRONOLOGÍA U-Pb EN CIRCONES DE PLAYA NORTE.....	143
ANEXO 6. RESULTADOS DE GEOCRONOLOGÍA U-Pb EN CIRCONES DE PLAYA TAMIAHUA	147

I. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los sedimentos de manera natural comprenden una matriz compleja de materiales de diferente origen que contribuyen a reflejar el estado del ecosistema que conforman. Sin embargo, el ecosistema se ve constantemente modificado por partículas y elementos de origen antropogénico que interactúan con los procesos físicos, químicos y biológicos que ahí se realizan (Rodríguez Meza, 1999; Córdoba Saldaña, 2011).

La importancia del estudio de los sedimentos recae en que son una herramienta para entender los procesos superficiales del planeta y así predecir posibles alteraciones futuras; aunque también se estudian para encontrar fuentes de materiales de interés económico o fuentes de contaminación. En México, el análisis de ambientes sedimentarios se ha desarrollado durante los últimos 60 años debido a la necesidad de interpretar su procedencia y al interés económico por la concentración de minerales pesados depositados en estos ambientes (Habib Galindo, 2017).

Por otro lado, los ecosistemas costeros son altamente frágiles, dinámicos y presentan transformaciones ocasionadas por las desembocaduras de los ríos, el mar, los vertimientos municipales e industriales y el viento, ocasionando alteraciones y contaminación en el ecosistema (Villanueva y Botello, 1992). Entre los principales contaminantes se encuentran los metales pesados y metaloides como Hg, As, Cd, Pb, Cr, etc., que se fijan a los sedimentos mediante reacciones de adsorción, precipitación, hidrólisis, etc. (García-Rico et al., 2004). La estimación de estos contaminantes naturales y de aporte antropogénico permiten estimar el nivel de contaminación de la zona afectada, por lo tanto, el estudio de la geoquímica de los sedimentos es de suma importancia para valorar el impacto ambiental y los efectos que pueden causar en los organismos.

Por otra parte, el estudio de la procedencia de los sedimentos a través de los circones detríticos permite conocer los antecedentes geocronológicos de la roca madre y con los patrones de las edades de los circones es posible reconstruir la historia paleogeográfica y paleoambiental de la Tierra.

En particular, la zona del Golfo de México es y ha sido estudiada ampliamente en respuesta a la necesidad de información, respecto a su riqueza energética, alimentaria e industrial. Sin embargo, actualmente también es motivo de estudio debido al deterioro y vulnerabilidad que presenta debido al desarrollo y progreso costero así como la nueva problemática sobre el Cambio Climático (Vazquez Botello et al., 2014).

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los estudios de granulometría, mineralogía, geoquímica, y datación de sedimentos son considerados como una clave importante para poder identificar la procedencia y el paleoambiente de una región en particular. Sin embargo, en algunas regiones del Golfo de México estos estudios en sedimentos costeros son pocos y con falta de información, por lo que este trabajo aportará información al conocimiento de procedencia y paleoambiente en la zona del Golfo de México.

De manera similar, los estudios de la relación entre la contaminación de metales con la edad y la fuente de sedimentos son escasos e importantes, por lo tanto, uno de los propósitos del proyecto es determinar la procedencia, intensidad de intemperismo, y el nivel de contaminación por metales pesados de los sedimentos costeros de dos playas del Golfo de México, que ayudarán como referencia para futuras investigaciones sobre procedencia y evaluación de los niveles de contaminación.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener y archivar resultados de las variaciones texturales, mineralógicas, geoquímicas y geocronología U-Pb de circones de playa para conocer su procedencia.

1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- ❖ Determinar las concentraciones de elementos mayores, traza y tierras raras de los sedimentos para identificar el tipo de roca fuente y su litología.
- ❖ Determinar la procedencia de los sedimentos mediante la comparación de patrones de tierras raras entre las rocas costeras del Golfo de México y las de este estudio.
- ❖ Analizar características texturales de sedimentos para identificar el ambiente de depósito.
- ❖ Determinar la fuente potencial de los sedimentos mediante fechamiento U-Pb de circones.
- ❖ Interpretar los niveles de contaminación empleando indicadores ambientales tales como el índice de geo-acumulación, factor de enriquecimiento, factor de contaminación mediante la concentración de elementos traza.

1.4 HIPÓTESIS

- ❖ Los sedimentos detríticos reflejan su procedencia y litología fuente a través de su composición mineralógica y química, por lo tanto, con el análisis de estos factores se podrá conocer los principios que forman y controlan a los sedimentos.
- ❖ Si se crea un modelo para interpretar la procedencia de los sedimentos, este facilitará y permitirá reconstruir el paleoambiente de una zona de estudio.
- ❖ Con el análisis de los datos obtenidos y la comparación con valores normalizados, se obtendrá información sobre la alteración y contaminación de los sedimentos en la zona de estudio.

1.5 ANTECEDENTES

A continuación, se presentan los estudios más recientes realizados en Playa Tamiahua, Playa Norte y sus alrededores.

Los estudios de procedencia de sedimentos costeros en el Golfo de México se basan en gran medida en las características granulométricas, petrográficas y geoquímicas del medio (Anaya-Gregorio et al., 2018; Armstrong-Altrin, 2009, 2015; Armstrong-Altrin et al., 2019; Carranza-Edwards et al., 2001; Hernández-Hinojosa et al., 2018; Kasper-Zubillaga et al., 1999; Rodríguez-Revelo et al., 2014).

Torres Rodríguez et al. (2010) evaluaron la vulnerabilidad de Playa Norte por efecto del cambio climático. Su estudio demostró que las modificaciones antropogénicas han roto el aporte de sedimentos del continente hacia la costa, incrementando así el efecto erosivo de las corrientes marinas y litorales, esto trae como problemática inundaciones en las ciudades aledañas.

Carranza-Edwards et al. (2014) realizaron estudios similares sobre las variaciones sedimentológicas en playas del sur del Golfo de México, incluyendo Playa Norte. El estudio reveló problemas de erosión de la playa debido a procesos antrópicos tomando en cuenta datos recientes (2007) y antiguos (1981), asimismo reflejó que los sedimentos recientes presentan clasificaciones más pobres en sus sedimentos, lo que sugiere mayores variaciones meteorológicas y antrópicas.

En el tema de contaminación, Gonzalez-Jáuregui et al. (2014) analizaron contaminantes orgánicos persistentes en sedimentos procedentes del Rio Champotón y encontraron componentes en concentraciones por encima de los límites máximos permisibles. Vazquez Botello et al. (2014) han estudiado la contaminación en sedimentos y agua por contaminantes orgánicos, hidrocarburos y metales en Playa Norte y alrededores; sus estudios revelan que existe contaminación de estos tres tipos debido a la industria petrolera de la zona.

En cuanto a estudios sobre geoquímica y geocronología de sedimentos Zavala-León (2018) trabajó con sedimentos de Plata Atasta, una playa cercana a Playa Norte. En su estudio determinó que las arenas pertenecían a un ambiente de alta energía

procedente de los ríos Grijalva y Usumacinta, y que presentaban minerales como ilmenitas, magnetitas, rutilos y circones. En cuanto a los circones encontró su procedencia en el Macizo de Chiapas y Oaxaca con edades del Neoproterozoico y Mesoproterozoico.

Tapia Fernández (2013) desarrolló estudios sedimentológicos y geoquímicos en sedimentos de Playa Tamiahua, teniendo como resultado arenas de grano fino, bien clasificadas provenientes de ambiente de duna. Respecto a los resultados geoquímicos revela que los sedimentos provienen de una fuente félsica, con bajo contenido de minerales pesados y enriquecimiento en Rb, Ba y Ta.

Vazquez Botello et al. (2014; 2015) y Armstrong-Altrin et al. (2019) han desarrollado distintas investigaciones en la parte norte del Golfo de México para estudiar la contaminación de la zona por hidrocarburos y metales pesados, concluyendo en cada uno de sus trabajos el aporte antropogénico, esto derivado principalmente de la industria petrolera.

Existen diversos estudios que han analizado circones metamórficos, ígneos y detríticos en los diferentes terrenos tectono-estratigráficos de México (Barboza-Gudiño et al., 2010; Keppie et al., 2003; Martínez-Sánchez, 2016; Ortega-Gutiérrez et al., 1995; Rubio-Cisneros y Lawton, 2011; Solari et al., 2011; Weber et al., 2008; Gonzalez-Leon et al., 2017; Madhavaraju et al., 2019 Wengler et al., 2019). Estudios realizados por Ramos-Vázquez et al. (2019) en algunas regiones del Golfo de México, como Paseo del Mar y Bosque revelaron algunos datos geocronológicos de los sedimentos de la zona, sin embargo, estos estudios no son suficientes para conocer la procedencia de toda la costa del Golfo de México. Tapia-Fernández et al. (2017) estudiaron la geoquímica y las edades de U-Pb de los circones detríticos de la playa de Brujas en la parte suroeste del Golfo de México y documentaron la procedencia de sedimentos. Armstrong-Altrin et al. (2018) estudiaron la procedencia de sedimentos en las playas de Atasta y Alvarado del Golfo de México con base en la composición de sedimentos y las edades de U-Pb de circones detríticos. Documentaron una diferencia en los terrenos de origen entre las dos áreas de playa y describieron la importancia de los ríos para definir la composición de los sedimentos en las áreas costeras del Golfo de México.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 SEDIMENTO Y ROCAS SEDIMENTARIAS

El sedimento es un material sólido de composición orgánica e inorgánica que se deposita de forma no consolidada sobre la superficie de la Tierra, se forma por procesos de intemperismo y erosión de rocas y minerales preexistentes o por restos de plantas y animales, es transportado a través del viento, el agua, el hielo y por gravedad.

El tamaño de un sedimento es variado, por tanto, para identificarlo se utiliza la escala granulométrica de Wentworth (Figura 1), esta tiene 6 clasificaciones (aglomerado, grava, sábulo, arena, limo y arcilla) que van de acuerdo con el diámetro de cada partícula.

		mm	ϕ
		↑	↑
PSEFITAS	Aglomerado	— 1024 —	-10
		— 512 —	-9
	Grava	— 256 —	-8
		Gruesa — 128 —	-7
		— 64 —	-6
		Mediana — 32 —	-5
		Fina — 16 —	-4
	Sábulo	— 8 —	-3
		— 4 —	-2
	PSAMITAS	Muy Gruesa	— 2 —
— 1 —			0
Arena		Gruesa — 0,5 —	1
		Mediana — 0,25 —	2
		Fina — 0,125 —	3
		Muy Fina — 0,062 —	4
PELITAS	Grueso — 0,031 —	5	
	Limo	— 0,015 —	6
		Fino — 0,0078 —	7
Arcilla	— 0,0039 —	8	
	— 0,0020 —	9	
		↓	↓

Figura 1. Escala granulométrica de Wentworth para clasificar sedimentos detríticos (González Marín, 2019)

Con el paso del tiempo, el sedimento sufre un proceso llamado diagénesis, esto es el conjunto de procesos físicos (temperatura, presión), químicos (pH, potencial óxido-reducción) y biológicos (microorganismos) por el cual el sedimento se ve alterado. Dentro de los procesos diagenéticos, ocurre la litificación, mediante la cual el sedimento se transforma en una roca sedimentaria (Figura 2). La litificación incluye 2 etapas: compactación y cementación (Zavala-León, 2018; González Marín, 2019).

En la primera etapa de la litificación el sedimento se acumula en la superficie terrestre, por ende, el peso del material va aumentando y el espacio que existe entre cada grano se reduce, la presión aumenta y expulsa el agua existente en los poros (espacio libre que hay entre granos), los sedimentos se compactan y se acomodan en el pequeño espacio disponible entre granos. Posteriormente, ocurre la etapa de cementación, en la cual los iones disueltos en el agua precipitan para formar un cementante entre los espacios vacíos que hay entre granos y mantenerlos unidos. Los cementantes más comunes son la calcita, óxidos de hierro y sílice. La sílice es el cementante más duro y, por lo tanto, origina las rocas sedimentarias más duras.

La mayoría de las rocas sedimentarias se forman por el proceso anteriormente descrito, sin embargo, también se forman como aglomeraciones de cristales intercrecidos después de que el sedimento es depositado. Un ejemplo de esto son los restos esqueléticos calcáreos que recristalizan a una caliza más densa hasta formar una roca sedimentaria (Boggs, 2009).

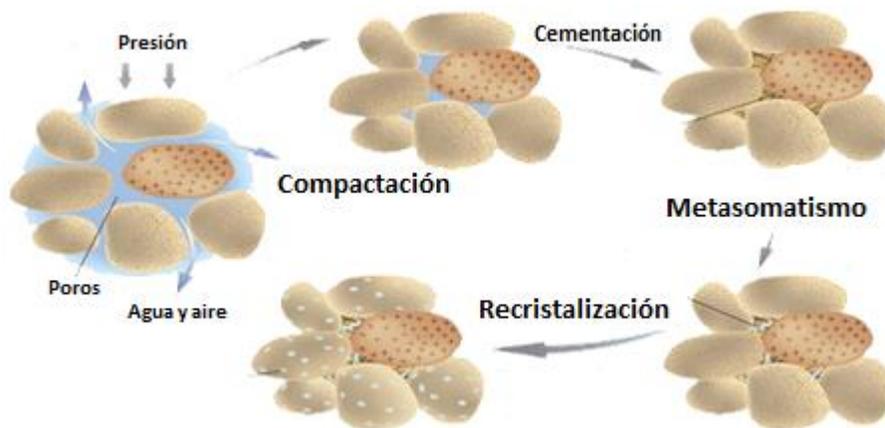


Figura 2. Proceso de litificación de una roca sedimentaria (Farah et al., 2008)

Una vez formadas las rocas sedimentarias se van a clasificar de acuerdo con su origen:

- ❖ Rocas sedimentarias detríticas o clásticas. Son aquellas que se forman a partir de fragmentos de otras rocas (clastos) por condiciones de erosión e intemperismo y se han unido por medio de un cementante (Dana, 1970). Con base en el tamaño de los clastos, se conforman tres grupos:
 - Conglomerados. Sus clastos tiene tamaños mayores a 2 mm, se forman en las proximidades del área fuente.
 - Areniscas. Sus componentes detríticos varían entre 0.062 mm a 2 mm e incluyen 3 componentes principales: cuarzo, feldespato y fragmento de roca.
 - Lutitas. Tienen detritos que son de diámetros menores a 0.062 mm, provienen de ambientes sedimentarios continentales y representan un régimen de flujo de baja energía, se dividen en 2 tipos: limos (0.004-0.062 mm) y arcillas (< 0.004 mm).

- ❖ Rocas sedimentarias no detríticas o no clásticas. Se forman por la precipitación de sustancias disueltas en el agua o por restos de organismos.
 - Carbonatadas. Son aquellas que están formadas por minerales de carbonato principalmente.
 - Químicas. Formadas por la precipitación de iones y minerales disueltos en el agua, estos se transportan, sedimentan y concentran formando rocas sedimentarias por el proceso de litificación.
 - Organogénicas. Se forman por los restos de organismos, se subdividen en 2 tipos
 - De biomineralización. Compuestas a partir de esqueletos de seres vivos.
 - Orgánicas. Formadas por restos de material celular procedente de seres vivos.

2.2 GRANULOMETRÍA

El estudio de la granulometría permite obtener información acerca del origen, tipo de transporte, medio de transporte y ambiente de depositación de material no consolidado. En general, la información granulométrica sirve para conocer el proceso de los sedimentos desde que son desprendidos hasta su depositación. La importancia de conocer y estudiar estas características recae en que representa la historia geológica de la Tierra, ya que en ella se registran los cambios climáticos y procesos tectónicos (González y Millán, 2016).

Esta información se obtiene a través de parámetros texturales o granulométricos tales como la media, mediana, desviación estándar, asimetría y curtosis.

2.2.1 MEDIA (M_z)

Representa el tamaño promedio de la distribución total de sedimentos con la cual se clasifica dentro de una escala de tamaños. Además, está relacionado con la energía cinética media existente en el ambiente sedimentario y sus condiciones de depósito, esto es influenciado por parámetros como la velocidad del agente de transporte, forma y gravedad específica, composición, durabilidad, y resistencia del sedimento durante el transporte. El tamaño de grano será más grande si la cantidad de energía impartida sobre el sedimento es también mayor. Entonces el tamaño promedio del sedimento sirve como indicador para medir la abrasión, fricción y acreción. La media (M_z) se calcula a partir de los percentiles (16, 50, 84) de la curva de distribución acumulativa pertenecientes a los tamaños de grano medidos en unidades phi ϕ . Esta unidad (ϕ) corresponde al $-\log$ del tamaño de grano en mm. (Moiola y Weiser, 1968).

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

Ecuación 1. Media (Folk y Ward, 1957)

Con el resultado obtenido de la media, el sedimento se clasifica de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 1. Clasificación de sedimentos respecto a la media

Rango	Clasificación
-1.0 a +0.01 ϕ	Arena muy gruesa
+0.02 a +1.0 ϕ	Arena gruesa
+1.1 a +2.0 ϕ	Arena mediana
+2.1 a +3.0 ϕ	Arena fina
+3.01 a +4.0 ϕ	Arena muy fina

2.2.2 DESVIACIÓN ESTÁNDAR (σ)

La desviación estándar es una medida del grado de dispersión de los tamaños de grano de una muestra a partir de una curva de distribución acumulativa (Karikalan, R. et al., 2020). Sirve como medida para interpretar la energía del ambiente de depósito y es de gran utilidad para clasificar sedimentos de diferentes ambientes deposicionales. Está influenciada por distintos parámetros como la forma del grano, el grado de turbulencia, la velocidad del agente de transporte, las propiedades hidrodinámicas y el ambiente de depósito (McKinney y Friedman, 1970). Al igual que el parámetro anterior, el factor Phi (ϕ) representa el $-\log_2$ del tamaño del grano (mm) y ϕ_{84} , ϕ_{16} , ϕ_{95} y ϕ_5 representan a los valores phi de los percentiles de la curva de distribución acumulativa. Se utiliza la fórmula:

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$$

Ecuación 2. Desviación estándar (Folk y Ward, 1957)

De acuerdo con el resultado obtenido, se clasificará como:

Tabla 2. Clasificación de sedimentos respecto a la desviación estándar

Rango	Clasificación
$<0.35 \phi$	Muy bien clasificado
0.36 a 0.50ϕ	Bien clasificado
0.51 a 0.70ϕ	Moderadamente bien clasificado
0.71 a 1.0ϕ	Moderadamente clasificado
1.1 a 2.0ϕ	Mal clasificado
2.1 a 4.0ϕ	Muy mal clasificado
$>4.1 \phi$	Extremadamente mal clasificado

2.2.3 ASIMETRÍA (S_K)

La asimetría analiza la posición de la media respecto a la mediana (media es el promedio del conjunto de datos; mediana, es el valor medio de los datos ordenados de menor a mayor). Es decir, relaciona el grado del tamaño de las partículas respecto a un tamaño de grano fino o grueso. Valores positivos indican que la cola se halla del lado de los granos finos (media $>$ mediana), mientras que valores negativos significan que la cola se halla del lado de los granos gruesos (media $<$ mediana) y cuando la distribución es simétrica la media y la mediana tienen el mismo valor (Figura 3). Esta información indica la proporción de mezcla entre granos finos y gruesos (Folk and Ward, 1957). Para obtener la asimetría se utilizan los valores de phi ϕ_{16} , ϕ_{84} , ϕ_{50} , ϕ_5 y ϕ_{95} correspondientes a la curva de distribución acumulativa, la fórmula es:

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

Ecuación 3. Asimetría (Folk y Ward, 1957)

Los valores de asimetría obtenidos se clasifican de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 3. Clasificación de sedimentos de acuerdo al grado de asimetría

Rango	Clasificación
+1.0 a +0.3 ϕ	Asimetría muy positiva
+0.3 a +0.1 ϕ	Asimetría positiva
+0.1 a -0.1 ϕ	Simétrica
-0.1 a -0.3 ϕ	Asimetría negativa
-0.3 a -1.0 ϕ	Asimetría muy negativa



Figura 3. Representación gráfica del grado de asimetría

2.2.4 CURTOSIS (K_G)

La curtosis es una comparación entre la dispersión de la parte central y la dispersión de los extremos de una curva de frecuencia normal (gaussiana). En conjunto con la asimetría son parámetros sensibles para detectar ambientes de depositación y para averiguar si la frecuencia es resultante de la mezcla de poblaciones distintas. En general la curva de frecuencia puede adoptar tres formas totalmente bien definidas: una totalmente aguda con colas muy gruesas y/o finas (leptocúrtica) en la cual se presenta un elevado grado de concentración alrededor de los valores centrales de la variable; una intermedia, que representa un grado de concentración normal alrededor de los valores centrales de la variable; y otra de forma achatada con inflexiones pequeñas (platicúrtica) la cual presenta un reducido grado de concentración alrededor de los valores centrales de la variable (Figura 4), debido a la mezcla de más de una

población. Para obtener este parámetro también se usan los percentiles ϕ_{95} , ϕ_5 , ϕ_{75} y ϕ_{25} de la curva de distribución. Se utiliza la fórmula:

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

Ecuación 4. Curtosis (Folk y Ward, 1957)

Tabla 4. Clasificación de arenas de acuerdo a la curtosis

Rango	Clasificación
$<0.67 \phi$	Muy platicúrtica
0.67 a 0.90ϕ	Platicúrtica
0.91 a 1.10ϕ	Mesocúrtica
1.11 a 1.5ϕ	Leptocúrtica
1.51 a 3.0ϕ	Muy Leptocúrtica
$>3.0 \phi$	Extremadamente leptocúrtica

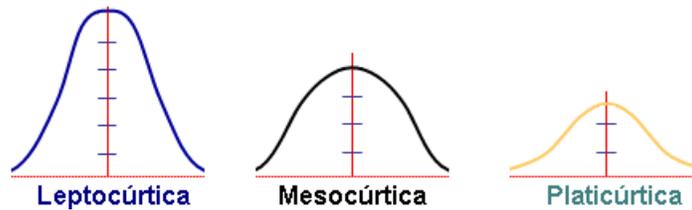


Figura 4. Representación gráfica de la clasificación de curtosis

2.3 GEOQUÍMICA

La geoquímica de los sedimentos es de gran importancia para la caracterización de los procesos geológicos, en específico los estudios de procedencia de sedimentos, su objetivo es deducir los factores que se relacionan con la producción de sedimentos y relacionarlos con la roca madre (Arias-Madrid et al., 2012). En concreto, esta disciplina se encarga de estudiar la formación, comportamiento, distribución e interacción de los elementos en los materiales geológicos en el planeta. Para su estudio los elementos se dividen en elementos mayores, traza y tierras raras.

Los elementos mayores son los que se encuentran en mayor concentración en la corteza terrestre (mayor a 1%), estos son Si, Ti, Al, Fe, Mn, Ca, K, Na y P, su concentración se expresa en porcentaje peso y dan información acerca de la clasificación, origen y madurez del material (Tapia Fernández, 2017).

La serie de los elementos traza está compuesta por V, Cr, Ni, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, As, B, Be, Cd, Co, Cu, Mn, Pb, Sn, Ta, Th, Tl, Sc y Ga. Estos elementos se encuentran en proporciones menores al 0.1 % en el arreglo elemental de la especie mineral. Sin embargo, en algunas ocasiones pueden sustituir a los elementos mayores en los minerales formadores de roca (Hernández Coronado, 2015). Son utilizados para inferir la procedencia de los sedimentos, esto se debe a la baja movilidad que presentan y a la alta resistencia al intemperismo conservando así, información sobre la roca madre de la cual provienen (Tripaldi et al., 2010).

Las tierras raras (REE, por sus siglas en inglés) en la naturaleza no se encuentran de forma libre, ya que son inestables, por tanto, están aunadas a minerales, se concentran en las fracciones finas y son utilizadas para inferir la composición de la roca fuente, la intensidad de intemperismo e interpretar la relación entre la geoquímica y el ambiente tectónico. Las REE sufren poca alteración ante procesos como la diagénesis, el intemperismo y el transporte, por este motivo son buenos indicadores de su material parental (Taylor y McLennan, 1985; Tripaldi et al., 2010). La concentración de las tierras raras dependerá de la composición de la roca madre, la adición de minerales accesorios y del intemperismo (Tapia Fernández, 2013; Hernández Coronado, 2015).

Las REE son elementos trivalentes o tetravalentes que presentan un comportamiento geoquímico similar, estas se dividen en ligeras (LREE: La, Ce, Pr, Nd, Sm) y pesadas (HREE: Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu); sin embargo, algunos autores (Plank y Langmuir, 1998; Sánchez Palencia et al., 2016) que dividen a Nd, Pm, Sm, Eu y Gd como tierras raras medias (MREE). Para fines de este trabajo solo usaremos LREE y HREE.

2.4 CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS

Los metales pesados son constituyentes que se encuentran en el ambiente de manera natural, y dependiendo de la zona, las concentraciones de estos serán distintas. No obstante, las actividades antropogénicas como la agricultura, la minería, la industria petrolera, la farmacéutica, entre muchas otras más, han incrementado los valores de fondo de estos metales, ocasionando la alteración y contaminación del ambiente (Barbieri, 2016; Castro-González et al., 2019). Como consecuencia de estos problemas, existen diversos parámetros que evalúan los niveles de contaminación en sedimentos y cada uno define un aspecto en particular. Entre estos, los más utilizados son: Índice de geoacumulación (Igeo), Guía de Calidad de Sedimentos (SQG, por sus siglas en inglés, Sediment, Quality Guidelines) y Factor de enriquecimiento (FE) (Müller, 1969; Hakansson, 1980; Taylor y McLennan, 1985; CCME, 2001; Bahloul et al., 2018).

El FE es un indicador de la presencia e intensidad de la contaminación antropogénica. Este parámetro se calcula con la normalización de la concentración base de un metal respecto a la concentración obtenida del metal de interés. Generalmente se utiliza Al, Mn y Rb como metales de referencia, ya que estos son estables, sufren mínima intemperización y son de baja movilidad.

$$FE = \frac{\left(\frac{C_M}{C_{ER}}\right)_{muestra}}{\left(\frac{V_M}{V_{ER}}\right)_{referencia}}$$

C_M = concentración del metal de interés en la muestra
 C_{ER} = concentración del metal de referencia en la muestra
 VF_m = valor de fondo del metal de interés
 VFr = valor de fondo del metal de referencia

Ecuación 5. Factor de enriquecimiento (Hakanson, 1980)

El valor obtenido con la ecuación de FE se compara con los valores de la siguiente tabla para determinar el nivel de contaminación por actividad antropogénica.

Tabla 5. Categorías del factor de enriquecimiento

Valor	Categoría
FE < 2	Pobrementemente enriquecido
2 < FE < 5	Moderadamente enriquecido
5 < FE < 20	Significativamente enriquecido
20 < FE < 40	Altamente enriquecido
FE > 40	Extremadamente enriquecido

El índice de geoacumulación es otro parámetro utilizado para determinar el grado de contaminación en sedimentos respecto a la concentración de metales presentes (Müller, 1969), la fórmula utilizada es:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{\left(\frac{C_M}{C_{ER}} \right)_{muestra}}{1.5 * \left(\frac{VF_m}{VFr} \right)_{referencia}} \right]$$

C_M = concentración del metal de interés en la muestra
 C_{ER} = concentración del metal de referencia en la muestra
 VF_m = valor de fondo del metal de interés
 VFr = valor de fondo del metal de referencia

Ecuación 6. Índice de geoacumulación (Müller, 1969)

De acuerdo con los resultados obtenidos en del índice de geoacumulación, se determinará el grado de contaminación respecto a la siguiente tabla:

Tabla 6. Categorías del Índice de geoacumulación

Clase	Igeo	Categoría
0	$I_{geo} \leq 0$	Sin contaminar
1	$0 < I_{geo} \leq 1$	Bajo
2	$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderado
3	$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderado-alto
4	$3 < I_{geo} \leq 4$	Alto
5	$4 < I_{geo} \leq 5$	Muy alto
6	$I_{geo} > 5$	Extremo

Adicionalmente a los índices, existen valores de referencia que evalúan la calidad de los sedimentos, estos valores están definidos para distintos contaminantes orgánicos e inorgánicos relacionados con una posible amenaza biológica hacia los ecosistemas acuáticos. La Guía de la Calidad Ambiental Canadiense (CEQG) divide las concentraciones en 2 niveles: efecto umbral (TEL) y efecto probable (PEL), estos niveles definen tres efectos biológicos probables. Por debajo del TEL, los efectos adversos ocurren rara vez, entre el TEL y el PEL los efectos adversos son posibles y ocasionales, y por encima del PEL los efectos adversos ocurren de manera frecuente (CCME, 2001). Por otro lado, Long et al. (1995) desarrolló una Base de Datos de Efectos Biológicos para Sedimentos (BEDS), la cual también presenta 2 niveles de referencia: efecto de rango bajo (ERL) y efecto de rango medio (ERM). Estos valores perfilan tres rangos de efectos: por debajo de ERL los efectos biológicos ocurren raramente, entre el ERL y el ERM los efectos son ocasionales y por encima del ERM los efectos ocurren de manera muy frecuente. Los metales estandarizados se encuentran a continuación:

Tabla 7. Estándares de la calidad de los sedimentos (Long et al., 1995; CCME, 2001)

Elemento	CEQG		BEDS	
	TEL	PEL	ERL	ERM
As	7.24	41.6	8.2	70
Cd	0.07	4.2	1.2	9.6
Cr	52.3	160	81	370
Cu	18.7	108	34	270
Pb	30.2	112	46.7	218
Zn	124	271	150	410

Por último, Long et al. (1995) determinó el Cociente Promedio ERM (m-ERM-Q: m = promedio, ERM = efecto de rango medio, Q = cociente). Dicho parámetro analiza el efecto adverso de todos los metales en conjunto. Para calcular este índice se utiliza la fórmula:

$$m - ERM - Q = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{ERM_i} \right)}{n}$$

ERM = valor de toxicidad del metal (Long et al., 1995)

C_i = concentración del metal

n = número de metales

Ecuación 7. Cociente promedio ERM

Tabla 8. Valores de m- ERM- Q

m- ERM- Q	Probabilidad de toxicidad	Categoría
m- ERM- Q < 0.1	Baja probabilidad (9%)	T1
0.1 < m- ERM- Q < 0.5	Probabilidad cercana al 21 %	T2
0.51 < m- ERM- Q < 1.5	Probabilidad media (49%)	T3
m- ERM- Q > 1.51	Probabilidad alta (76%)	T4

2.5 GEOCRONOLOGÍA U-Pb

La datación de materiales geológicos es una herramienta de gran importancia, ya que con ella se puede conocer la historia de las rocas, incluyendo su edad y procedencia, además con esta información en conjunto se pueden plantear hipótesis acerca de la formación y evolución de los materiales terrestres, así como, establecer escalas de tiempo geológicas.

Actualmente diversos métodos son utilizados para la datación de estos materiales geológicos, uno de ellos y el utilizado en este trabajo es la datación radiométrica de U-Pb. Este sistema se rige por el decaimiento radiactivo de dos isótopos de uranio: el isótopo ^{238}U decae al isótopo ^{206}Pb y posee un tiempo de vida media de 4.47×10^9 años con una constante de decaimiento de 15.5125×10^{-11} años $^{-1}$, el isótopo ^{235}U decae al isótopo ^{207}Pb , presenta una vida media de 7.04×10^8 años y una constante de decaimiento de 98.485×10^{-11} años $^{-1}$ (Dalrymple, 1991). La evolución de estos dos pares isotópicos con distintas tasas de decaimiento hace que el método se utilice para fechar minerales que contengan uranio con edades desde 1 hasta 4500 Ma (Schoene, 2013).

Este decaimiento de uranio a plomo se da por medio de desintegraciones alfa (α) y beta (β), sufriendo un total de 8 desintegraciones α y 6 β para $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$; y 7 α y 4 β para la cadena $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ (Figura 5).

La técnica más utilizada para la datación U-Pb es la espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente con ablación láser (LA-ICP-MS), esta técnica tiene la ventaja de ser precisa, rápida y con límites de detección de partes por trillón (ppt). Una vez obtenidos los resultados de las edades con esta técnica, los datos pueden ser representados a través de una gráfica conocida como diagrama de concordia de Wetherill (1956), la cual representa la relación $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ en función de la edad del material. El arreglo lineal de los puntos t_0 (edad de cristalización de la roca) y t_1 (edad del evento metamórfico) generan una línea recta llamada discordia, la cual expresa un comportamiento anómalo o de sistema abierto. Por otro lado, las muestras que permanecieron como un sistema cerrado desde el momento de su formación hasta su última evolución formarán una línea cuya pendiente es proporcional a la edad

del material conocida como concordancia (Figura 6) (Wetherill, 1956; Solari et al., 2009; Hermenegildo Ruiz, 2019).

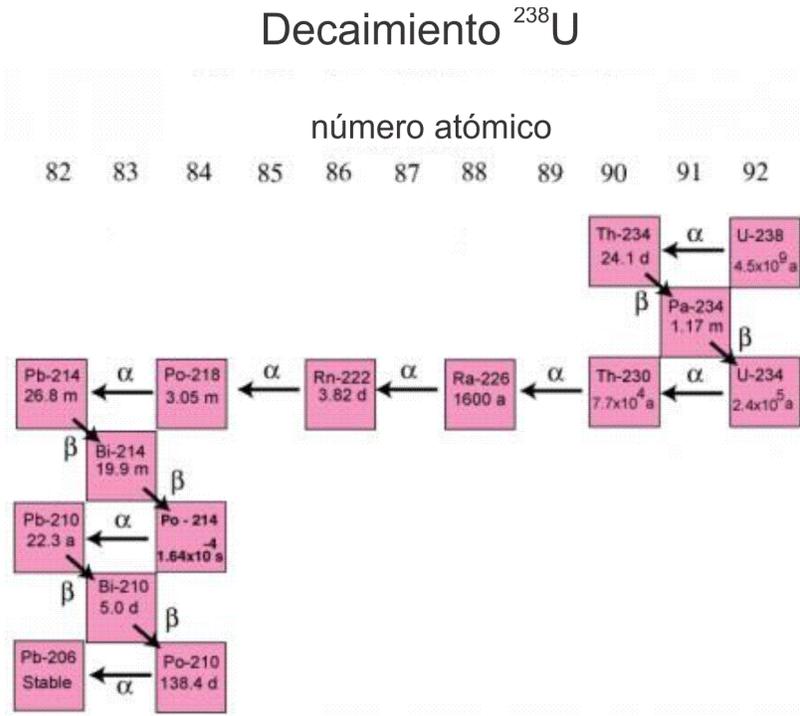


Figura 5. Decaimiento radioactivo de ^{238}U a ^{207}Pb (EPA, 2017)

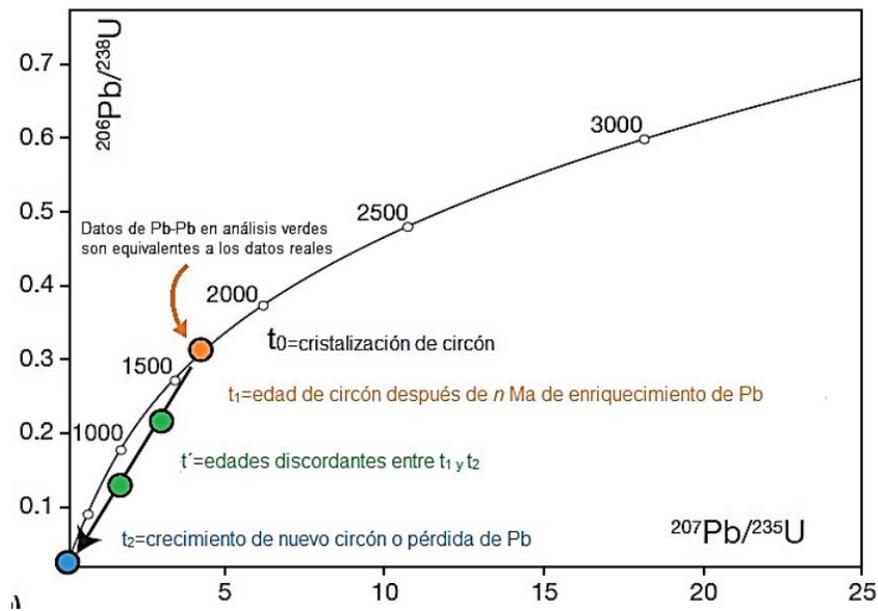


Figura 6. Diagrama de concordancia de Wetherill (Schoene 2013)

La datación U-Pb generalmente se realiza en el mineral circón, sin embargo, también es posible utilizar minerales como monacita, titanita, apatita, rutilo y baddeleyita. La ventaja de utilizar el circón es que contiene en su estructura uranio pero rechaza al plomo, por tanto, se asume que el contenido total de plomo presente en el circón es radiogénico (González Marín, 2019; Hermenegildo Ruiz, 2019).

El circón es un mineral compuesto por silicato de zirconio ($ZrSiO_4$), se presenta como un pequeño cristal de color traslúcido (incoloro, rosado, púrpura, amarillo o azul), su color dependerá de la concentración de tierras raras o traza que contenga y de las condiciones de formación (Figura 7). Este mineral se encuentra en la fracción de minerales pesados, es altamente resistente a la meteorización física y química, a los procesos de transporte y al metamorfismo de alta temperatura. Los circones pueden incorporar a su estructura elementos traza y tierras raras como el U, Th, Hf e Y, los cuales se utilizan para diferenciar entre las fuentes del material y para obtener información acerca de la procedencia de las rocas (rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias) (Tapia Fernández, 2017; Zavala-León, 2018; Hermenegildo Ruiz, 2019).



Figura 7. Morfología de circones (Markwitz y Kirkland, 2018)

III. ÁREA DE ESTUDIO

Se eligieron dos playas del Golfo de México para su estudio, una ubicada en la parte norte, del estado de Veracruz, conocida como Playa Tamiahua ($21^{\circ}17'11.13$ N, $97^{\circ}25'32.37$ O) y otra en el estado de Campeche, en Ciudad de Carmen, conocida como Playa Norte ($18^{\circ}39'03.23$ N, $91^{\circ}51'00.37$ O). En la Figura 8, se muestra el mapa geológico de la zona.

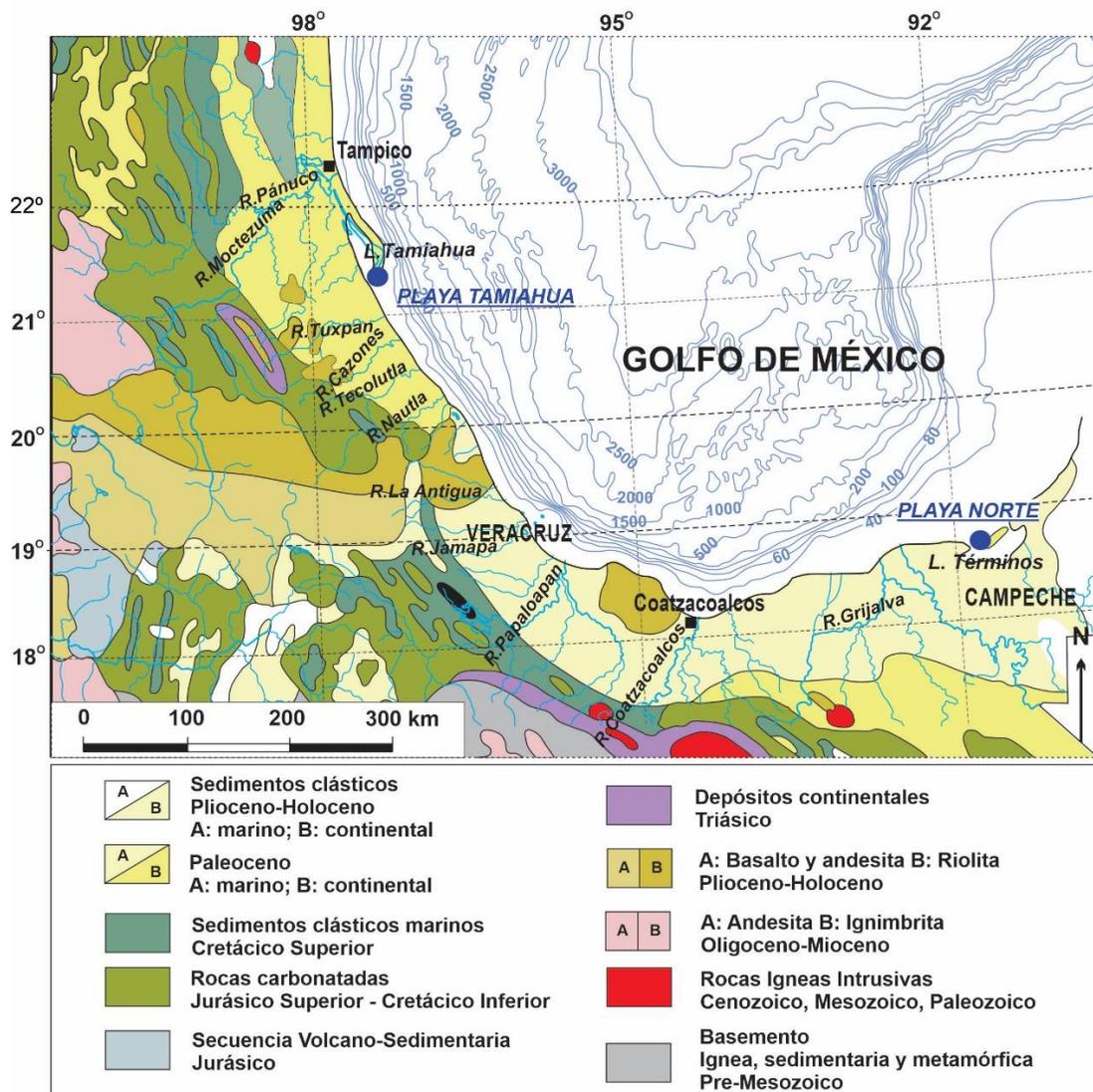


Figura 8. Mapa del área de estudio, Playa Tamiahua y Playa Norte (Carta Geológica, Dirección General de Geografía del Territorio Nacional; escala 1:1,000,000)

3.1 PLAYA NORTE

Playa Norte se encuentra en Ciudad del Carmen, Campeche, se localiza al suroeste de la península de Yucatán, limita al norte con el Golfo de México, al sur con la Laguna de Términos, al este con el puente que atraviesa Boca Puerto Real y que comunica con la Isla Aguada y al oeste con el puente de Zacatal que atraviesa Boca del Carmen y comunica con la península de Atasta y el estado de Tabasco. Playa Norte es la principal playa de Isla del Carmen, se ubica en las coordenadas geográficas 18° 43' 54.3" latitud norte y 91° 44' 9.8" longitud oeste (SEDESOL, 2009; INAFED, 2018).

3.1.1 CLIMA

Durante el transcurso del año en Playa Norte la temperatura varía entre 21°C y 32°C, rara vez baja a menos de 18 °C o sube a más de 36 °C (Figura 9). En la temporada de calor (abril-agosto) la temperatura promedio es de 33°C, es una época bochornosa y mayormente despejada, mientras que en temporada de frío, la temperatura promedio es de 22°C y mayormente nublada. Generalmente, todo el año se encuentra con un alto porcentaje de humedad (Cedar Lake Ventures, 2019; GMAO, 2019).

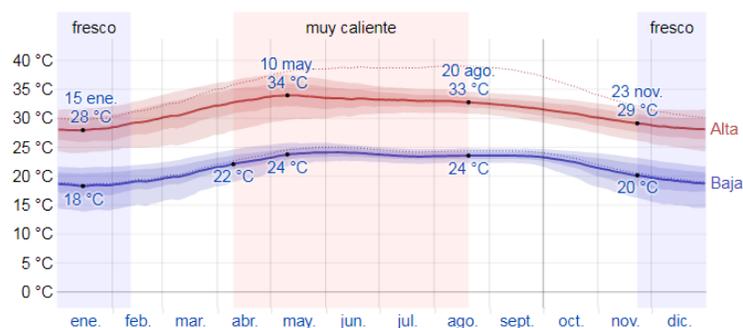


Figura 9. Temperatura promedio de Playa Norte. La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diaria con las bandas de los percentiles 25º a 75º, y 10º a 90º. Las líneas delgadas punteadas son las temperaturas promedio percibidas correspondientes (Weatherspark, 2019)

La temporada de lluvias intensas es de mayo a octubre con una precipitación promedio de 137 mm, de noviembre a enero las lluvias son más ligeras con precipitaciones de 37 mm y el periodo sin lluvia solamente es de febrero a abril (Figura 10).

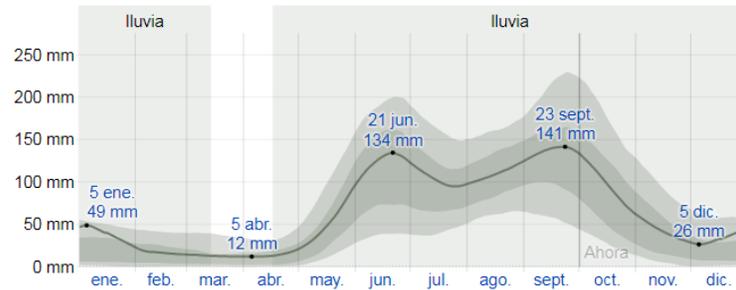


Figura 10. Precipitación promedio en Playa Norte (Weatherspark, 2019)

La velocidad promedio del viento por hora tiene variaciones estacionales leves durante el transcurso del año. De octubre a junio ocurren los vientos más fuertes con una velocidad de 11.3 Km/h, mientras que de junio a octubre la velocidad del viento baja a 9.8 Km/h en promedio (Figura 11).

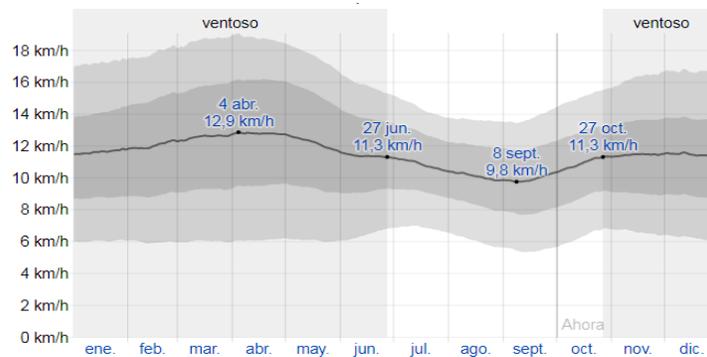


Figura 11. Velocidad promedio del viento en Playa Norte (Weatherspark, 2019)

Playa Norte se encuentra rodeada de grandes cuerpos de agua (Golfo de México y Laguna de Términos), que reportan variaciones estacionales de temperatura durante el año. En temporada calurosa, la temperatura del agua varía entre los 28° y 29°C; en temporada fría, esta temperatura tiene variaciones entre 24°C y 28°C (Figura 12).

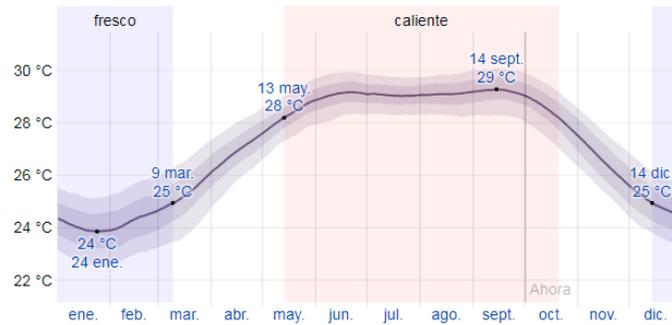


Figura 12. Temperatura promedio del agua en Playa Norte (Weatherspark, 2019)

3.1.2 GEOLOGIA

Playa Norte está compuesta en alternancia de litoral rocoso rico en materia orgánica con arenas carbonatadas y algunos silicatos (Figura 13). Las arenas provienen del suministro aluvial y de la barrera de arena, el área adyacente se compone de material proveniente de ríos como subproductos de la escorrentía aluvial (Carranza-Edwards et al., 2014; Magallanes-Ordóñez et al., 2015).

La Cuenca Grijalva-Usumacinta es el sistema que rodea y aporta grandes cantidades de material a Playa Norte, ya que, está conformada por numerosos sistemas hidrológicos que arrastran material sedimentario hasta el Golfo. La cuenca está conformada por la Depresión Central, La Meseta Central, La Planicie Costera del Golfo y las tierras bajas del Chapayal (CONAGUA, 2014). La Depresión Central se encuentra en el estado de Chiapas, paralela a la Sierra Madre, se compone de rocas calcáreas y arcillosas. La Meseta Central es una cuenca cerrada y semiárida constituida por sedimentos granulares que son abastecidos por rocas riolíticas y calizas de la zona. La Planicie Costera del Golfo de México está formada de sedimentos consolidados y no consolidados, se recarga a través de la Sierra de Chiapas, la Sierra del Centro y la Sierra del Noroeste. Las tierras bajas del Chapayal se empalman con la Sierra de Chiapas y se componen de calizas y rocas sedimentarias clásticas (CONAGUA, 2014; Solís-Castillo et al., 2014; Velázquez Aguirre et al., 2015).

Toda la Isla del Carmen pertenece al Cuaternario y se encuentra conformada por 3 tipos de sedimentos: lacustres, palustres y del litoral (Figura 13; INEGI, 2009). La sección lacustre se encuentra en el sector conocido como Isla Matamoros, el

segmento litoral comprende la zona urbana de la isla y la región comprendida entre Bahamitas y San Nicolasito y el resto de la isla hace parte del Cuaternario palustre (SEMAR, 2015).

El material predominante en la isla son sedimentos del litoral y están formados por material calcáreo, arcillas, arenas finas y gravas constituidas de conchas de moluscos cuyo tamaño hace que las partículas resulten más gruesas (SEMAR, 2015), estas arenas y gravas son fácilmente degradables. El material del litoral limita con los sedimentos arenosos del lacustre y palustre en donde se desarrollan los manglares; siendo esta una zona de poca estabilidad en términos geológicos ya que se encuentran en constantes procesos de formación (SEDESOL, 2009).

La variedad litológica sugiere que, debido a la extrema variabilidad de las condiciones de sedimentación, la estratigrafía no está bien definida. En la parte poniente de la zona de transición y la parte central de la cuenca, los sedimentos miocénicos presentan espesores de 4000 m, hacia el oriente de la zona de transición, los sedimentos miocénicos carbonatados de la plataforma de Yucatán se presentan acuñados discordantemente sobre sedimentos del Eoceno y del Oligoceno (Yáñez Correa, 1971).



Figura 13. Mapa geológico de Playa Norte, Campeche (Carta Geológica, Dirección General de Geografía del Territorio Nacional)

3.1.3 FISIOGRAFÍA

La superficie de la planicie costera presenta ondulaciones de baja amplitud pertenecientes a antiguas dunas. Estos cerros se extienden a lo largo de la línea de costa y se encuentran en grupos bien definidos; fueron originados por la acumulación de depósitos de tormenta (Yáñez Correa, 1971). Durante el periodo invernal se forman masas de aire frío que generan vientos fuertes conocidos como “nortes” (lluvias y bajas temperaturas). Este fenómeno propicia a la construcción y desarrollo de las dunas.

3.1.4 TOPOGRAFÍA

Isla del Carmen carece de sistemas montañosos, su superficie es prácticamente plana con pendientes menores al 3%, por lo que presenta escasa deformación de área, además, la orografía del territorio está constituida por una planicie ligeramente inclinada de este a oeste, esta característica de la isla hace que el desalojo de las aguas pluviales sea lento (SEMAR, 2015).

Ciudad del Carmen se encuentra a 2 metros aproximadamente sobre el nivel del mar. En específico, Playa Norte presenta una pendiente promedio del 2 %. En la parte de mesoplaya se observa un canal formado por los efectos de mareas, además se hace notorio un proceso de erosión en la época de nortes y secas, por su valor de pendientes esta playa se considera estable (SEDESOL, 2009).

3.1.5 HIDROGRAFÍA

Ciudad del Carmen se encuentra rodeada de grandes cuerpos de agua, el Golfo de México y la Laguna de Términos (Figura 14). En la Laguna de Términos se encuentra la desembocadura del sistema Grijalva-Usumacinta a través de los ríos Palizada, Chumpán, Sabancuy, Candelaria y Mamantel, esta región se destaca por lo caudaloso de sus corrientes,. (Phleger y Ayala-Castañares, 1971; SEMAR, 2015).

El Río Usumacinta tiene una longitud aproximada de 1078 km, nace en la Sierra de Guatemala y es el de mayor aporte de agua en el área. Tiene dos ríos dependientes por los cuales desemboca; el Río Palizada que llega a la Laguna de Términos y el Río San Pedro que descarga directamente en el Golfo de México (Yáñez Correa, 1971). El Río Chumpán, tiene su origen en una zona cercana al Río Usumacinta, sus afluentes principales son los arroyos de San Joaquín y la Piedad y el Río Salsipuedes que desemboca en la Laguna de Términos a través de la boca del Río Balchacah (SAIG, 2016). El Río Grijalva mide 700 km aproximadamente, nace en la Sierra de los Cuchumate y desemboca en el Golfo de México, sus ríos confluentes son El Chilapilla y el Puxcatán. El Río Mamantel, corre de este a oeste sobre terrenos de roca caliza y desemboca en la Laguna de Términos a través de la boca de Pargos, después de atravesar la Laguna de Paulau y tiene como afluente los arroyos de Cheneil, Montaraz y Xothukan (Botello, 1978).

Los ríos de menor tamaño son: San Pedro y San Pablo, Piña de Vapor, Chivoja Chico y Chivoja Grande. El Río San Pedro y San Pablo, es el único en el municipio que desemboca en el Golfo de México. Es afluente del río Usumacinta y sirve como límite entre los estados de Campeche y Tabasco.

Las lagunas que destacan en el municipio son: Pom, Puerto Rico, Santa Gertrudis, Atasta y de Términos. De éstas destaca Laguna de Términos, que cuenta con una superficie de 160 mil hectáreas de las que, en la actualidad, 705,016 son consideradas área de protección para la flora y fauna de la región (Ignacio et al., 2009; SAIG, 2016; INAFED, 2018).

Los arroyos más importantes del lugar, son: La Caleta, Arroyo Grande, De los franceses, Las Pilas y la Laguna del Caracol, localizados en Ciudad del Carmen (SEDESOL, 2009).



Figura 15. Localización de los puntos de muestreo (obtenida de Google Earth, 2020)

Tabla 9. Coordenadas de las muestras de Playa Norte

MUESTRA	LATITUD	LONGITUD
PN1	18°39'53.26" N	91°49'52.56" O
PN2	18°39'53.25" N	91°49'52.47" O
PN3	18°39'53.28" N	91°49'52.65" O
PN4	18°39'53.29" N	91°49'52.73" O
PN5	18°39'53.30" N	91°49'52.81" O
PN6	18°39'53.32" N	91°49'52.91" O
PN7	18°39'53.34" N	91°49'53.01" O
PN8	18°39'53.34" N	91°49'53.10" O
PN9	18°39'53.35" N	91°49'53.20" O
PN10	18°39'53.36" N	91°49'53.31" O
PN11	18°39'53.38" N	91°49'53.41" O
PN12	18°39'53.40" N	91°49'53.50" O
PN13	18°39'53.42" N	91°49'53.59" O
PN14	18°39'53.44" N	91°49'53.69" O
PN15	18°39'53.45" N	91°49'53.79" O
PN16	18°39'53.45" N	91°49'53.92" O
PN17	18°39'53.46" N	91°49'54.05" O
PN18	18°39'53.47" N	91°49'54.16" O
PN19	18°39'53.48" N	91°49'54.27" O
PN20	18°39'53.49" N	91°49'54.38" O

3.2 PLAYA TAMIAHUA

Playa Tamiahua se encuentra en la zona norte del estado de Veracruz. Limita al norte con Ozuluama de Mascareñas, Tampico Alto, el Río Pánuco y el estado de Tamaulipas, al este limita con el Golfo de México, al sur con Tempapache y el Río Tuxpan, al oeste con Tamalín, Chinampa de Gorostiza, Naranjos Amatlán, Tancoco y Cerro Azul. Playa Tamiahua es una playa que comienza con una barra muy extensa que se ensancha a medida que desciende de norte a sur para formar la isla Juan. A. Ramírez (PRONANP, 2005; INEGI, 2009).

3.2.1 CLIMA

Durante el año, en Playa Tamiahua, la temperatura varía desde los 17°C hasta los 32°C, rara vez la temperatura baja a menos de 13°C o sube o más de 34°C. La temporada de lluvias suele ser bochornosa, muy caliente, con alta humedad y pocos vientos; en la temporada seca el clima es cálido y con vientos. La temporada de calor es de mayo a octubre, con un promedio diario de 31 °C (Figura 16). La temporada fresca es de diciembre a febrero, con una temperatura promedio de 21 °C, los días más fríos son de 17 °C (Tapia Fernández, 2013; GMAO, 2019).

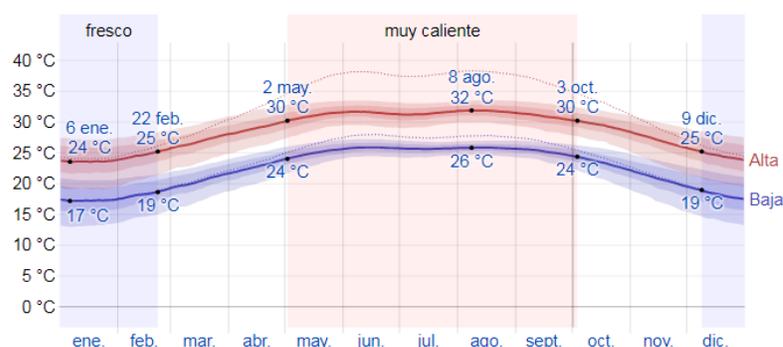


Figura 16. Temperatura promedio de Playa Tamiahua. La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diaria con las bandas de los percentiles 25º a 75º, y 10º a 90º. Las líneas delgadas punteadas son las temperaturas promedio percibidas correspondientes (Weatherspark, 2019)

La temporada de lluvias es de junio a octubre con una precipitación de 259 mm, la temporada seca va de octubre a junio con precipitaciones promedio de 29 mm (Figura 17).

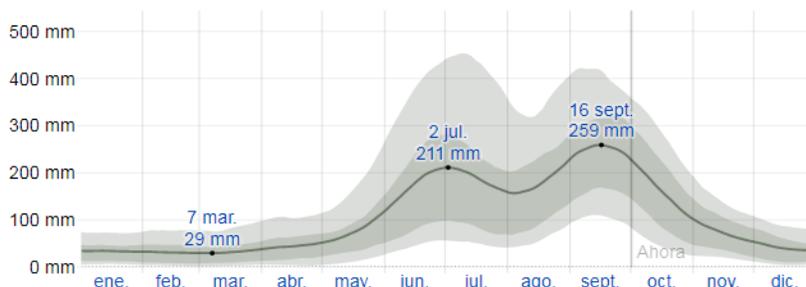


Figura 17. Precipitación promedio en Playa Tamiahua (Weatherspark, 2019)

La velocidad promedio del viento por hora en Tamiahua tiene variaciones estacionales leves en el transcurso del año (Figura 18). La época más ventosa del año transcurre de octubre a julio, con velocidades promedio de más de 15 Km/hora. De julio a octubre los vientos son más ligeros, con un promedio de 12 Km/h (GMAO, 2019).

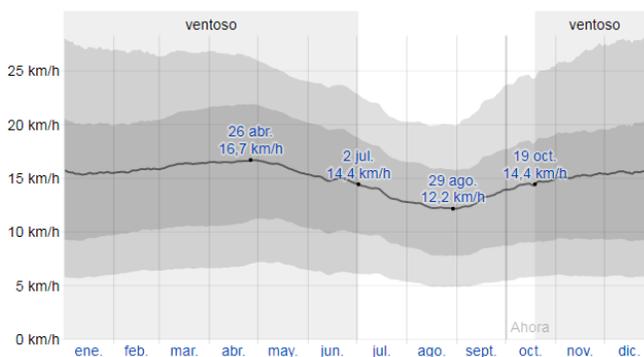


Figura 18. Velocidad promedio de viento en Playa Tamiahua (Weatherspark, 2019)

La temperatura promedio del agua tiene variaciones estacionales extremas a lo largo del año. En los meses de junio a octubre, el agua presenta temperatura de 28° a 29°

C (Figura 19). La época del año cuando el agua está más fría es de diciembre a marzo, con una temperatura promedio de 24 °C.

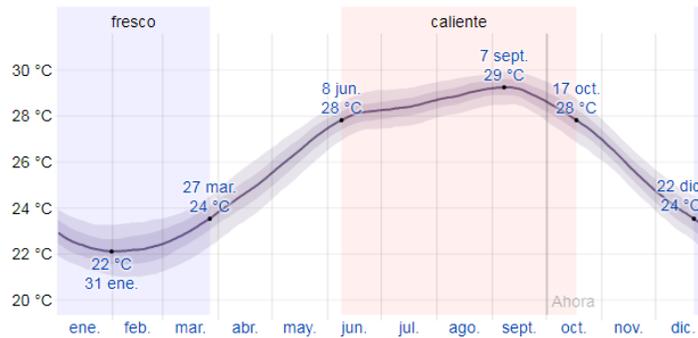


Figura 19. Temperatura promedio del agua en Playa Tamiahua (Weatherspark, 2019)

3.2.2 GEOLOGÍA

La región alrededor de Tamiahua está compuesta principalmente por arenas cuarzosas provenientes de dos provincias geológicas (Figura 20); la Sierra Madre Oriental, cuyas rocas están relacionadas a ambientes marinos y la Faja de Oro constituida por rocas sedimentarias principalmente areniscas, lutitas y algunos conglomerados. En la zona también se pueden encontrar rocas ígneas ácidas e intermedias y rocas volcánicas de los periodos Cenozoico al Cuaternario (Ignacio et al., 2009; Tapia Fernández, 2013). La Laguna de Tamiahua, se sitúa sobre la cuenca terciaria de Tampico-Misantla y alrededor se presentan lomeríos de sedimentos terciarios y cuaternarios.

Respecto a las rocas sedimentarias del Cretácico presentes en la zona se pueden encontrar calizas, dolomitas, areniscas y lutitas, mientras que en los cauces de los ríos predominan depósitos aluviales y fluviales del Cuaternario (Lara-Domínguez, 2009; CONAGUA, 2015).

De acuerdo con Carranza-Edwards et al. (2005), en la zona norte de Veracruz hay dominio geológico del macizo volcánico de Los Tuxtlas.

Enfrente de la costa, hacia el norte y sur de Playa Tamiahua se encuentran arrecifes coralinos muertos; éstos tienen importancia debido a que aportan cantidades importantes de sedimentos carbonatados hacia la costa (PRONANP, 2005).

Estudios realizados por Phleger y Ayala-Castañares (1971) distinguieron cuatro clases de sedimentos que llegan a la Laguna de Tamiahua y que se transportan hasta Playa Tamiahua: grupo 1) arenas finas de bien a moderadamente clasificadas, distribuidas en la parte norte; el grupo 2) consiste en arenas finas pobremente clasificadas; el grupo 3) consiste en limos pobremente clasificados provenientes de ríos y esteros de la parte sur de la laguna y; el grupo 4) consiste en arcillas muy pobremente clasificadas que predominan en la parte centro.

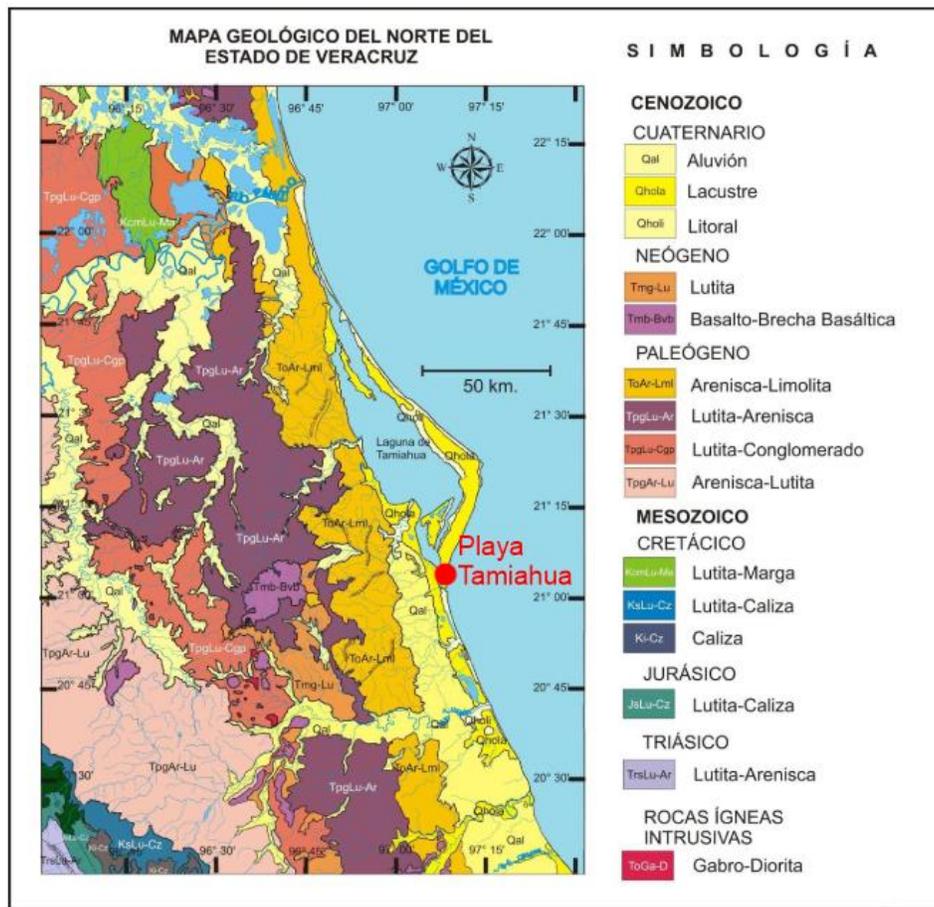


Figura 20. Mapa geológico de Playa Tamiahua (Carta Geológica, Dirección General de Geografía del Territorio Nacional; escala 1:1,000,000)

3.2.3 FISIOGRAFÍA

La zona costera alrededor de la Laguna de Tamiahua es una barrera arenosa de forma angular que separa a la laguna del Golfo de México. La anchura de la playa va desde los 6 km en la parte norte hasta los 500 metros en la parte sur (Phleger y Ayala-Castañares, 1971).

La línea de costa está conformada por una planicie que abarca hasta el nivel del mar y por lomeríos de hasta 350 m en la parte norte. En la planicie existe una acumulación de sedimentos transportados por el viento que forman dunas, estas dunas se encuentran en mayor proporción y de mayor tamaño en el norte, mientras que en el sur son de menor tamaño (Tapia Fernández, 2013).

3.2.4 TOPOGRAFÍA

La topografía cercana a Playa Tamiahua es prácticamente llana, con una variación máxima de 20 m de altitud, alrededor de la playa hay una altitud de 3 m sobre el nivel del mar. En un radio de 16 km el relieve es básicamente plano y más allá de los 16 km las variaciones de la superficie son mínimas, ya que cuenta con una altitud promedio de 1.3 m (Phleger y Ayala-Castañares, 1971).

3.2.5 HIDROGRAFÍA

Al oeste de Playa Tamiahua se encuentra la Laguna de Tamiahua (Figura 21), la tercer laguna costera de mayor tamaño de la República Mexicana, y se une con el Río Pánuco a través de los canales Chijol, Calabozo, Wilson y Laguna de Tampico Alto. En ella desembocan numerosos ríos; entre los principales se encuentran La Laja, Cucharas, Carbajal, Tancochín, el arroyo Tampache y el estero Milpas, que en épocas de lluvia aportan grandes cantidades de sedimentos especialmente limo-arcillosos producto de la erosión de rocas paleo-neógenas de la llanura costera; algunos de esos ríos forman pequeños deltas en su desembocadura. La laguna presenta dos bocas: al

norte la Barra de Tampachiche y al sur la Barra de Corazones (Calva y Torres Alvarado, 2000; Ocaña-Luna y Sánchez-Ramírez, 2016).

La Laguna de Tamiahua presenta aguas poco transparentes, con abundantes sedimentos terrígenos finos en suspensión. El agua es predominantemente salobre; distinguiéndose dos fases, una ultrahalina con salinidad mayor de 30%, y una polihalina con salinidad entre 16 y 30%. La primera restringida a la boca y áreas vecinas, afectadas directamente por las mareas, en tanto que el resto es polihalino (Phleger y Ayala-Castañares, 1971; Carranza-Edwards et al., 2005; PRONANP, 2005).

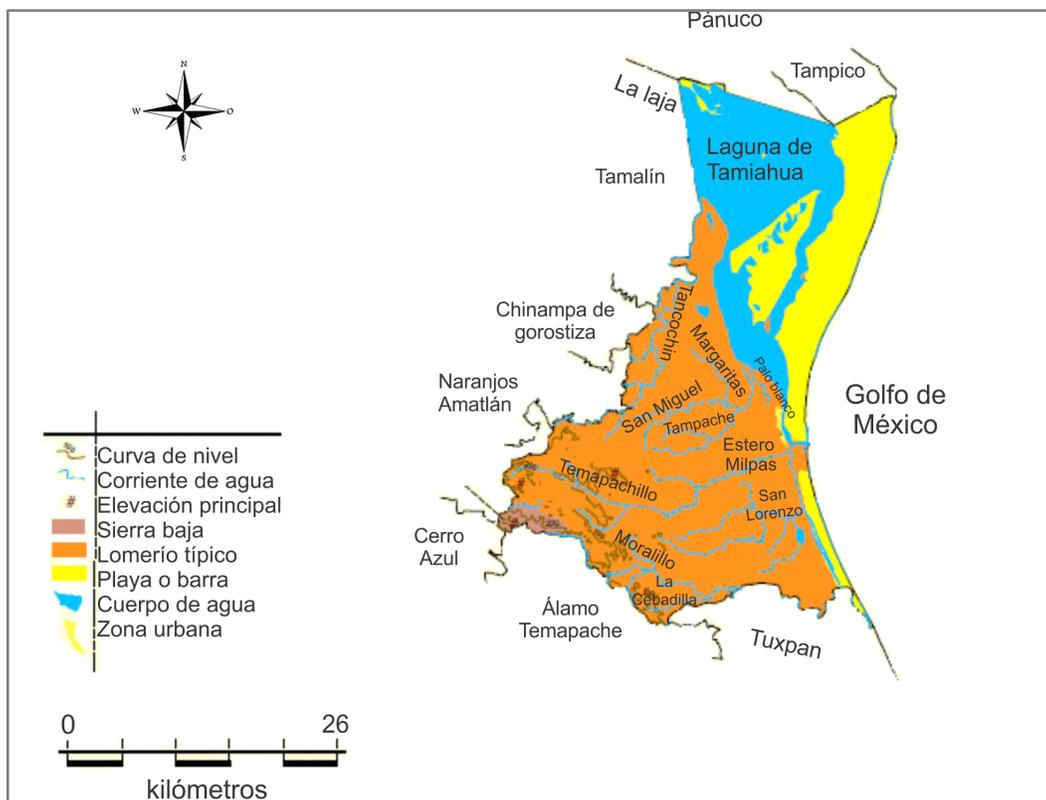


Figura 21. Mapa hidrológico del norte de Veracruz (Ignacio et al., 2009).

3.2.6 LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS

En la tabla 10 y la figura 22 se presentan las coordenadas de las 20 muestras de sedimentos recolectadas en Playa Tamiahua.



Figura 22. Localización de los puntos de muestreo (obtenida de Google Earth, 2020)

Tabla 10. Coordenadas de las muestras de Playa Tamiahua

MUESTRA	LATITUD	LONGITUD
THA 1	21°17'12.92"N	97°25'13.06"O
THA 2	21°17'14.54"N	97°25'12.92"O
THA 3	21°17'16.17"N	97°25'12.82"O
THA 4	21°17'17.71"N	97°25'12.73"O
THA 5	21°17'19.29"N	97°25'12.63"O
THA 6	21°17'20.87"N	97°25'12.53"O
THA 7	21°17'22.47"N	97°25'12.44"O
THA 8	21°17'24.08"N	97°25'12.31"O
THA 9	21°17'25.81"N	97°25'12.25"O
THA 10	21°17'27.30"N	97°25'12.18"O
THA 11	21°17'28.92"N	97°25'12.08"O
THA 12	21°17'30.41"N	97°25'12.07"O
THA 13	21°17'32.07"N	97°25'12.05"O
THA 14	21°17'33.67"N	97°25'11.96"O
THA 15	21°17'35.30"N	97°25'11.91"O
THA 16	21°17'36.91"N	97°25'11.84"O
THA 17	21°17'38.45"N	97°25'11.75"O
THA 18	21°17'40.05"N	97°25'11.73"O
THA 19	21°17'41.69"N	97°25'11.7"O
THA 20	21°17'43.32"N	97°25'11.5"O

IV. MÉTODOLÓGÍA

Se recolectaron 20 muestras de 2 kg aproximadamente cada una de en la zona de estudio. Se llevaron al Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología para secarlas en un horno para este propósito marca Riosa, modelo H-62 durante 24 horas a 60°C, al término del secado las muestras se guardaron en bolsas resellables para evitar la humedad y realizar los análisis correspondientes.

4.1 GRANULOMETRÍA

La muestra recolectada se cuarteo varias veces para su homogeneización y representatividad. Se pesaron 35 g de cada muestra y se tamizaron en un tamizador marca Tyler, modelo RX-29, utilizando 12 tamices de distintos tamaños de malla (10, 12, 14, 16, 20, 35, 60, 80, 100, 120, 170 y 200) durante 15 minutos. Al término del tiempo se pesó la muestra que se quedó en cada uno de los tamices y se calcularon los parámetros texturales (media, desviación estándar, asimetría, y curtosis) propuestos por Folk y Ward (1957). Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

4.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO CON MICROANÁLISIS DE RAYOS X

De cada playa se eligieron 5 muestras, se pesaron 10 g y se llevaron al Laboratorio Universitario de Petrología del Instituto de Geofísica de la UNAM. Cada muestra se pegó a un portaobjetos con cinta doble cara, después se cubrió con spray grafito y se colocó en un porta muestras, una vez montadas las muestras se analizaron en el microscopio electrónico de barrido (SEM) marca es JEOL modelo JXA-8900R. Se realizó un análisis cualitativo y semicuantitativo de los elementos mayores en forma de óxidos de la muestra en general y posteriormente se seleccionaron al azar ciertos granos para determinar su composición.

4.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Se escogieron 5 muestras de cada playa para realizar estudios mineralógicos de los sedimentos. Se pesaron 2 g aproximadamente de cada una, se molieron mediante un mortero de ágata y se midieron en el Laboratorio de Difracción de Rayos X, en el Instituto de Geología mediante un difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de hierro, tubo de cobalto de foco fino y detector PIXcel 3D; se utilizó un porta muestras de aluminio de doble carga (muestras de Tamiahua) y un porta muestras de 0 background (muestras de Playa Norte). La medición se realizó en el intervalo angular 2θ de 5° a 70° con un “step scan” de 0.003° (2θ) y un tiempo de integración de 40 s por paso.

La identificación se realizó utilizando el software HighScore (PANalytical) y las bases de datos ICSD (Inorganic Crystal Structure database) e ICDD (International Center for Diffraction Data). La cuantificación se realizó mediante el método de RIR (Reference Intensity Ratio) implementado en el software HighScore versión 4.5.

4.4 GEOQUÍMICA

Para realizar los análisis de elementos mayores, traza y tierras raras se eliminaron los carbonatos de las muestras, esto para que no interfirieran en los resultados.

Se eligieron 10 muestras de cada playa y se pesaron 40 g de cada una, después se preparó una solución de HCl 1:10 para eliminar los carbonatos, ya que estos tienden a cementar las partículas de menor tamaño (Aguilar, 1999; Armstrong, 2013), sin embargo, al ser una solución diluida no altera otros minerales presentes. Las muestras se colocaron en vasos de precipitados y a cada una se le fue agregando ácido poco a poco y se agitaron hasta que dejaron de burbujear. El contenido de ácido dependió de la cantidad de carbonatos de cada muestra, una vez que dejaron de reaccionar, se lavaron con suficiente agua destilada hasta que el agua de enjuague pasó de ser amarilla a traslúcida. Una vez que las muestras quedaron sin carbonatos se dejaron

decantando con un poco de agua durante 24 horas, pasado este tiempo se eliminó el agua y las muestras se metieron a un horno de secado hasta que estuvieran completamente secas. Cuando las muestras quedaron secas, se molieron en un pulverizador marca FRITSCH modelo 2, hasta obtener un tamaño de grano menor a 200 micras.

4.4.1 ELEMENTOS MAYORES

Para el análisis de elementos mayores, se pesaron 10 g de las muestras sin carbonatos y se llevaron a analizar al Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, LANGEM, del Instituto de Geología de la UNAM. Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de Rayos X marca SIEMENS modelo SRS 3000.

4.4.2 ELEMENTOS TRAZA Y TIERRAS RARAS

Para el análisis de elementos traza y tierras raras, se pesaron 5 g de las muestras sin carbonatos y se enviaron para su análisis al laboratorio ACTLABS en Canadá. La preparación de las muestras fue realizar una digestión parcial con agua regia (HNO_3 -HCl) y llevarlas a un microondas a 60°C para hacer la extracción de elementos, posteriormente se filtraron, se aforaron y se analizaron en un espectrómetro de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Los estándares utilizados en esta técnica fueron: OREAS 15d, OREAS 923, OREAS 520, OREAS 907, OREAS 621 y OREAS 263.

4.5 GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA U-Pb EN CIRCONES

Se eligieron las muestras con mayor cantidad de arena fina, ya que en esta porción se encuentra el mayor número de circones. Se llevaron al Laboratorio de Separación de Minerales (LUGIS) del Instituto de Geofísica de la UNAM, ahí se realizó la separación manual de cerca de 100 circones de cada playa en un microscopio estereoscópico, se montaron en un portaobjetos con cinta adhesiva y se enviaron al Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias, Querétaro para su análisis utilizando el método de Ablación Láser acoplado a Espectrometría de Masas con Plasma Inductivamente Acoplado (LA-ICP-MS). Antes del análisis, los circones se cubrieron con resina epóxica y se devastaron con papel lija y para exponer la parte cercana al centro del circón. Una vez listos los circones se analizaron con medio de un espectrómetro de masas de cuádruplo con plasma acoplado por inducción (ICP-MS) Thermo acoplado a un sistema de ablación láser de excímeros Resonetics Resolution.

El sistema de ablación láser en LEI (Solari et al., 2010), consiste en una estación de trabajo Resonetics, equipada con un láser excimer LPX y una celda S-155 de dos volúmenes. La estación de trabajo láser está conectada a un ICPMS Cuadrupol Thermo ICap. Se usa un homogeneizador de señal justo después de la célula de ablación, antes de que el material ablacionado entre al plasma. Se usan 350 ml de He como gas portador, mezclado con 4,5 ml de N₂. Se empleó una tasa de repetición de 5 Hz durante este trabajo, con una fluencia constante en el objetivo de 6 J/cm², monitoreada al comienzo y al final de cada sesión analítica por medio de un monitor de energía externo, y empleando sistemáticamente a lo largo de toda la duración de este estudio, un punto analítico de 23 µm.

El diagrama de concordia, la distribución de densidad de probabilidad y los gráficos de histograma, así como los cálculos de error de edad se realizaron con el software ISOPLOT 3.70 (Ludwig, 2003). El algoritmo Tuff-Zirc combinado en el mismo software se usó para calcular las edades medias de ²⁰⁶Pb/²³⁸U y sus errores, así como para filtrar valores atípicos, que son preferidos para granos de circón menores de 1000 Ma (Ludwig, 1998, 2003).

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 GRANULOMETRÍA

Los parámetros texturales son de gran importancia ya que se utilizan para conocer las características acerca del transporte del sedimento, las condiciones de depositación, la roca fuente y el ambiente tectónico.

Con los datos obtenidos de granulometría se construyó una curva de frecuencia y a partir de esta curva se obtuvieron los parámetros texturales media, desviación estándar, asimetría y curtosis utilizando el método grafico propuesto por Folk y Ward (1957). En la tabla 11 se muestra un ejemplo del tratamiento de los datos para obtener la curva de frecuencia de la muestra PN 2 (Figura 23).

Tabla 11. Distribución granulométrica de la muestra PN 2

Malla ASTM	phi (ϕ)	peso (g)	Peso (%)	Acumulado (%)
16	-0.25	0.1	0.29	0.29
35	1.0	0.2	0.57	0.86
60	2.0	1.7	4.86	5.71
80	2.5	4.1	11.71	17.43
100	2.75	6.9	19.71	37.14
120	3.0	13.7	39.14	76.29
170	3.5	7.4	21.14	97.43
200	3.75	0.9	2.57	100.0
Pérdida tamiz	--	--	--	100.0
Total		35.0		

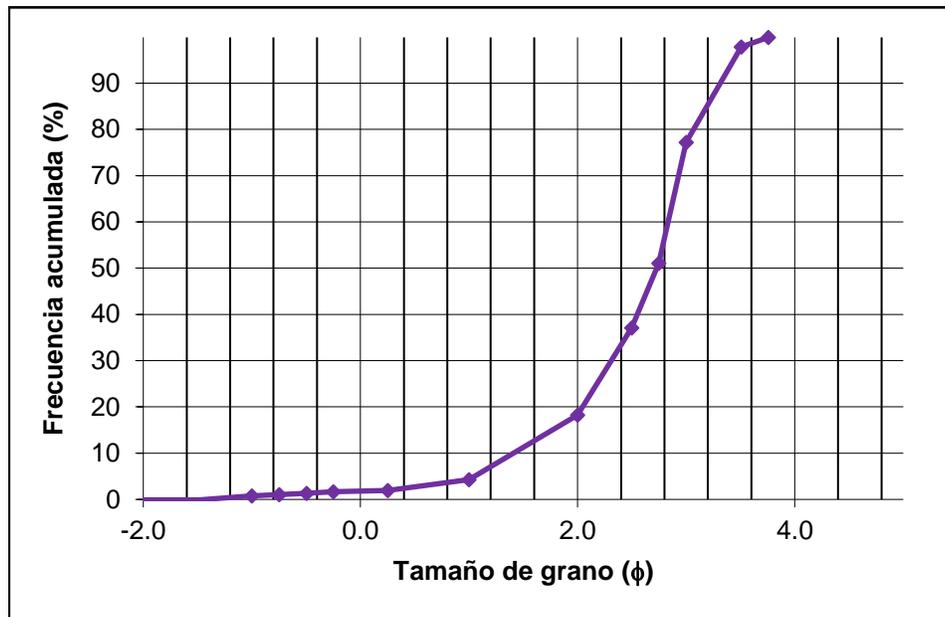


Figura 23. Representación gráfica de la distribución granulométrica de la muestra PN 2

El primer parámetro obtenido fue la media (M_z), este parámetro expresa las condiciones energéticas que predominan durante el transporte y la depositación; cuando hay predominio de partículas gruesas indica un alto nivel de energía durante su transporte, y por el contrario, cuando abundan las partículas finas, el nivel de energía menor (Estrada Omaña, 2007; Habib Galindo, 2017). Los resultados obtenidos fueron: Playa Norte (Tabla 12) tiene una media de 2.78ϕ , con un intervalo de 2.53 a 3.07 . Tamiahua (Tabla 13) presentó una media de 2.82ϕ y un intervalo de 2.66 a 2.9 ; de acuerdo a la clasificación de Folk y Ward (1957), las dos playas se clasifican como arenas finas, lo que simboliza que el dinamismo en las zonas es bajo.

La desviación estándar (σ) indica el grado de homogeneidad del sedimento respecto su grado de transporte, si la clasificación del sedimento va de buena a muy buena indica que la interacción entre la playa y las corrientes marinas son constante (Carranza-Edwards et al., 2009); cuando la clasificación es mala, es porque existen fluctuaciones en la interacción. Sin embargo, también influye el transporte eólico (Kasper-Zubillaga, 2009) y el largo tiempo del transporte (Tapia Fernández, 2013) para obtener arenas de grano fino bien clasificadas.

Los sedimentos de Playa Norte entregan una desviación de 0.58, así que se encuentran moderadamente clasificados, este resultado indica que han tenido un transporte moderado, mientras que los sedimentos de Tamiahua tienen una desviación de 0.37, es decir, están bien clasificados y han tenido un transporte prolongado.

El grado de asimetría (S_k) representa el exceso de material (fino o grueso) que presentan los sedimentos. Playa Norte presenta un promedio de $S_k = -0.27$, mientras que Tamiahua tiene un $S_k = -0.20$, estos resultados indican que las dos playas tienden hacia los tamaños gruesos.

Por último, la curtosis (K_G) es un parámetro que mide el ángulo de la curva de frecuencia, es decir, muestra cómo están distribuidos los tamaños de grano en toda la muestra. Para playa Norte se obtuvo un valor de $K_G = 1.15$, mientras que para Tamiahua fue de $K_G = 1.51$, estos resultados indican que tanto Playa Norte como Playa Tamiahua son muy leptocúrticas.

De acuerdo con estudios de granulometría realizados anteriormente en Playa Norte (Carranza-Edwards et al., 2014), indicaron que la desviación estándar de la playa varía entre mal clasificada a moderadamente clasificada debido a que es común encontrar fragmentos de conchas de moluscos provenientes de la Laguna de Términos y cuyo tamaño hacen que las partículas resulten más gruesas obteniendo una asimetría negativa, estos estudios concuerdan con los resultados obtenidos en este trabajo. Por otro lado, en Playa Tamiahua también se analizó la granulometría de los sedimentos, y de acuerdo con Tapia Fernández (2013) el arena se clasifica como fina bien clasifica, lo que implica que el dominio del transporte del sedimento es eólico y litoral. Este análisis también concuerda con los resultados mostrados en este trabajo.

Tabla 12. Parámetros texturales (en unidades phi) de los sedimentos costeros de Playa Norte

Muestra	Mz ¹	mm	σ^2	S _K ³	K _G ⁴	Mz	σ	S _K	K _G
1	2.53	0.17	0.68	-0.21	0.90	Fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Platicúrtica
2	2.57	0.17	0.68	-0.31	1.37	Fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad muy gruesa	Leptocúrtica
3	2.70	0.15	0.58	-0.34	1.02	Fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad muy gruesa	Leptocúrtica
4	2.83	0.14	0.52	-0.27	1.23	Fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
5	2.73	0.15	0.62	-0.25	1.08	Fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Mesocúrtica
6	2.92	0.13	0.58	-0.19	1.43	Fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
7	2.88	0.14	0.48	-0.29	0.82	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Platicúrtica
8	2.55	0.17	0.48	-0.68	1.23	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad muy gruesa	Leptocúrtica
9	2.73	0.15	0.52	-0.26	1.02	Fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Mesocúrtica
10	2.87	0.14	0.48	-0.16	1.13	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
11	2.88	0.14	0.45	-0.15	1.19	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
12	2.67	0.16	0.65	-0.14	0.98	Fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Mesocúrtica
13	2.82	0.14	0.61	-0.22	1.12	Fina	Muy bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Muy platicúrtica
14	2.88	0.14	0.53	-0.26	0.97	Fina	Muy bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Muy platicúrtica
15	2.95	0.13	0.55	-0.08	1.05	Fina	Moderadamente bien sorteado	Cercanamente simétrico	Mesocúrtica
16	2.80	0.14	0.63	-0.36	1.28	Fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad muy gruesa	Leptocúrtica
17	2.83	0.14	0.52	-0.27	1.23	Fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
18	2.68	0.16	0.62	-0.22	1.26	Fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
19	2.63	0.16	0.85	-0.43	1.36	Fina	Moderadamente sorteado	Oblicuidad muy gruesa	Leptocúrtica
20	3.07	0.12	0.51	-0.26	1.38	Muy fina	Moderadamente bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica

¹ Media

² Desviación estándar

³ Asimetría

⁴ Curtosis

Tabla 13. Parámetros texturales (en unidades phi) de los sedimentos costeros de Playa Tamiahua

Muestra	Mz ⁵	mm	σ^6	S _K ⁷	K _G ⁸	Mz	σ	S _K	K _G
1	2.80	0.14	0.36	-0.11	1.64	Fina	Bien sorteado	Cercanamente simétrico	Extremadamente leptocúrtica
2	2.87	0.14	0.36	-0.08	1.98	Fina	Bien sorteado	Cercanamente simétrico	Extremadamente leptocúrtica
3	2.85	0.14	0.38	-0.27	1.49	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
4	2.87	0.14	0.42	-0.20	1.46	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
5	2.80	0.14	0.43	-0.29	1.64	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Extremadamente leptocúrtica
6	2.78	0.15	0.38	-0.16	1.49	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
7	2.77	0.15	0.39	-0.18	1.28	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
8	2.77	0.15	0.40	-0.17	1.54	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Extremadamente leptocúrtica
9	2.85	0.14	0.33	-0.04	1.64	Fina	Bien sorteado	Cercanamente simétrico	Extremadamente leptocúrtica
10	2.80	0.14	0.37	-0.16	1.49	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
11	2.90	0.13	0.37	-0.16	1.49	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
12	2.88	0.14	0.37	-0.18	1.64	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Extremadamente leptocúrtica
13	2.77	0.15	0.41	-0.36	1.24	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad muy gruesa	Leptocúrtica
14	2.82	0.14	0.34	-0.22	1.46	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
15	2.88	0.14	0.30	-0.14	1.29	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica
16	2.82	0.14	0.38	-0.31	1.14	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad muy gruesa	Leptocúrtica
17	2.80	0.14	0.38	-0.27	1.70	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Extremadamente leptocúrtica
18	2.83	0.14	0.35	-0.14	1.71	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Extremadamente leptocúrtica
19	2.82	0.14	0.35	-0.24	1.52	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Extremadamente leptocúrtica
20	2.67	0.16	0.41	-0.29	1.32	Fina	Bien sorteado	Oblicuidad gruesa	Leptocúrtica

⁵ Media

⁶ Desviación estándar

⁷ Asimetría

⁸ Curtosis

El diagrama de media vs. la desviación estándar relativa (Figura 24) se utiliza para definir ambientes sedimentarios, ya sea de playa o de duna. Este diagrama fue propuesto por Moiola (1968), sin embargo, más tarde fue modificado por Carranza-Edwards et al. (2001), esto con el fin de hacer una clasificación más fina en la arena de playa, dividiéndola en infraplaya, mesoplaya y supraplaya. Para el caso de las dos playas en estudio, se indica que ambas están dentro del ambiente de duna; es decir, las arenas de las playas derivan principalmente de procesos eólicos, no obstante, también existe el aporte de sedimentos por medio de los ríos y los ambientes deltaicos. Estos resultados concuerdan con los parámetros anteriormente descritos, puesto que, como ya se mencionó antes las arenas finas bien clasificadas se rigen por mecanismos de transporte eólicos.

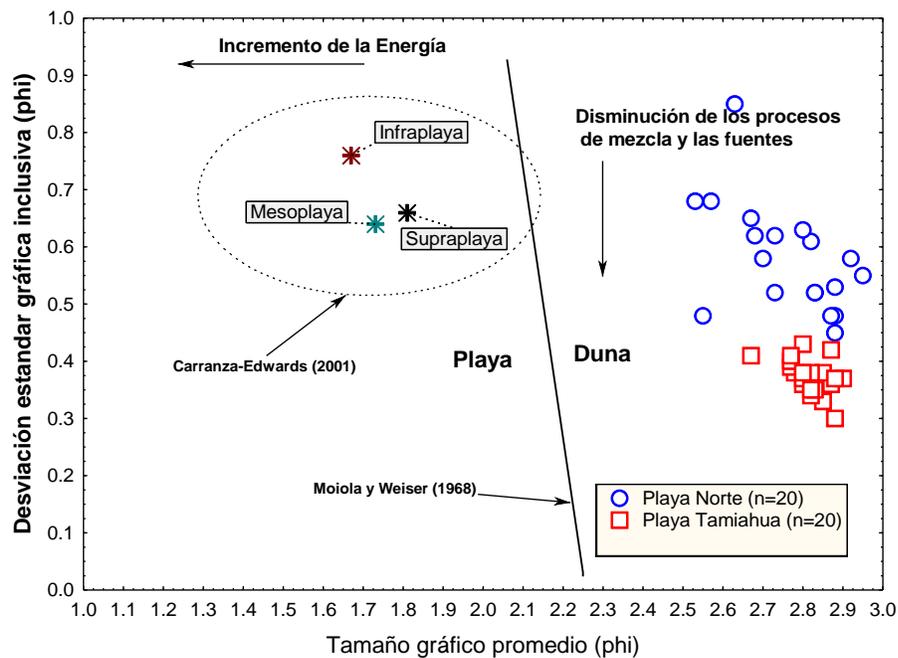


Figura 24. Diagrama de media vs. desviación estándar relativa para clasificar entre arena de playa o de duna (Moiola, 1968; Carranza-Edwards et al., 2001)

5.2 MINERALOGÍA

5.2.1 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM-EDS)

Los estudios de microscopia electrónica de barrido se realizaron para identificar algunas fases minerales y especies de óxidos presentes en cada playa, además de conocer las similitudes y diferencias entre cada muestra. Primeramente se hizo un análisis de barrido a una sección de la muestra para conocer su composición general y posteriormente se analizaron granos específicos para determinar su composición.

En Playa Norte, los óxidos de Ca predominan en el sedimento, esto se puede atribuir a los minerales como la calcita o la aragonita. En segundo lugar abunda el SiO_2 representando al cuarzo y el resto de los óxidos que se encuentran en menor proporción, tales como Al_2O_3 , K_2O y Na_2O pudieran ser feldespatos.

Por otro lado, en las fotomicrografías (Figura 25) se puede observar que los tamaños de los granos son variados, así como se dijo en los resultados de granulometría están moderadamente clasificados. Los granos más grandes y de formas angulares con baja esfericidad son fragmentos de caliza, mientras que, los granos pequeños de forma subredondeada con baja esfericidad son cuarzos, también se pueden apreciar algunos restos orgánicos.

En general, las muestras analizadas presentaron porcentajes similares de óxidos de calcio, con un rango de 57.6-66.6 % y de óxidos de silicio con un rango de 24.2 a 28.6%, a excepción de la muestra PN12, la cual presenta un 84.6% de CaCO_3 y solo un 6.3% de SiO_2 . La gran cantidad de fragmentos en la muestra demuestra que es un sedimento que ha tenido un transporte medio o corto debido a la baja resistencia de la caliza al transporte.

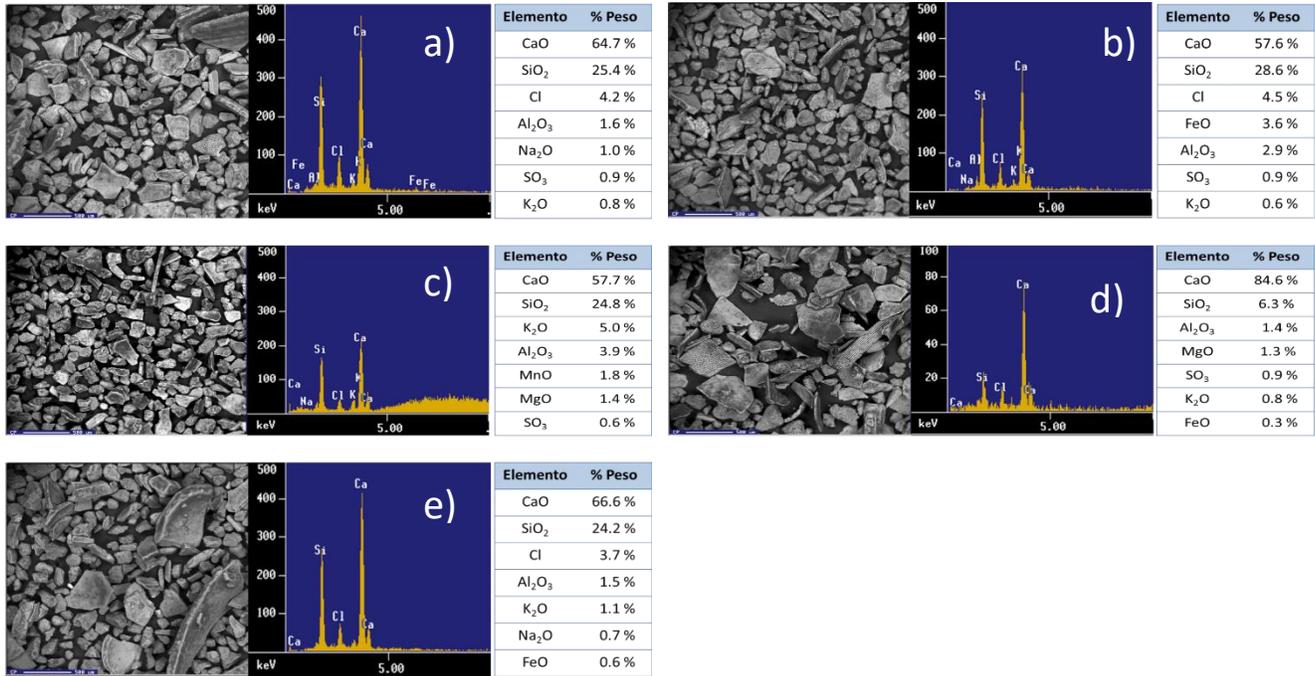


Figura 25. Fotomicrografía, espectro y análisis semicuantitativo de las fases minerales de las muestras: a) PN 4, b) PN 7, c) PN 9, d) PN 12 y e) PN 18

De igual forma, se realizó el análisis a granos específicos (Figura 26) para conocer su composición. En este análisis se encontraron granos de cromitas, feldespatos potásicos y circones.

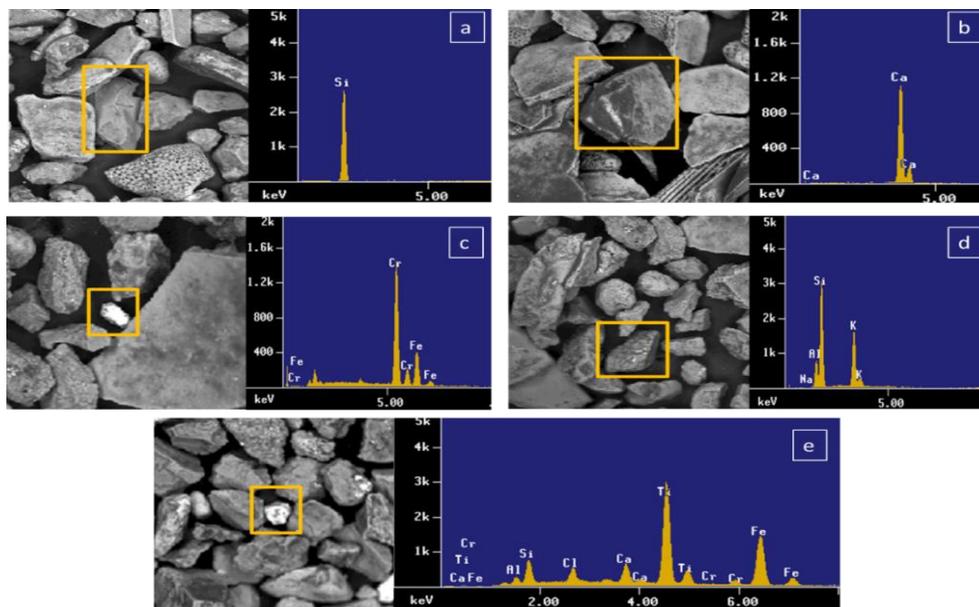


Figura 26. Fotomicrografía y espectro de las fases minerales de Playa Norte: a) Cuarzo, b) Calcita, c) Cromita, d) Feldespato potásico, e) Ilmenita

Para la Playa Tamiahua se encontró que el SiO_2 es la especie de óxido predominante en el sedimento que representa al cuarzo, después le siguen CaCO_3 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O y FeO que pueden representar a la calcita, feldespatos y plagioclasas, sin embargo, estas especies minerales se definirán con los resultados de DRX. No obstante, estos datos concuerdan con lo descrito en los estudios de Tapia Fernández (2013), donde revela que Playa Tamiahua está dominado por sedimentos de cuarzo y plagioclasas.

Por el lado de la morfología de los granos del sedimento de Playa Tamiahua (Figura 27) se puede ver que presentan una mejor clasificación que Playa Norte. Los granos muestran una morfología subredondeada de baja esfericidad de acuerdo a la clasificación de Pettijohn et al. (1973).

Un aspecto relevante es que las arenas ricas en cuarzo proceden de procesos de alto intemperismo provocado en este caso por el clima húmedo y tropical de la zona. El diagrama de Goldich (1938) muestra la estabilidad de distintos minerales ante el intemperismo. El cuarzo es de los minerales con una velocidad de intemperismo baja, por tanto, se puede afirmar que los sedimentos de Playa Tamiahua han pasado por un transporte prolongado y un intemperismo alto sin beneficiar la preservación de los minerales menos estables y altamente intemperizables.

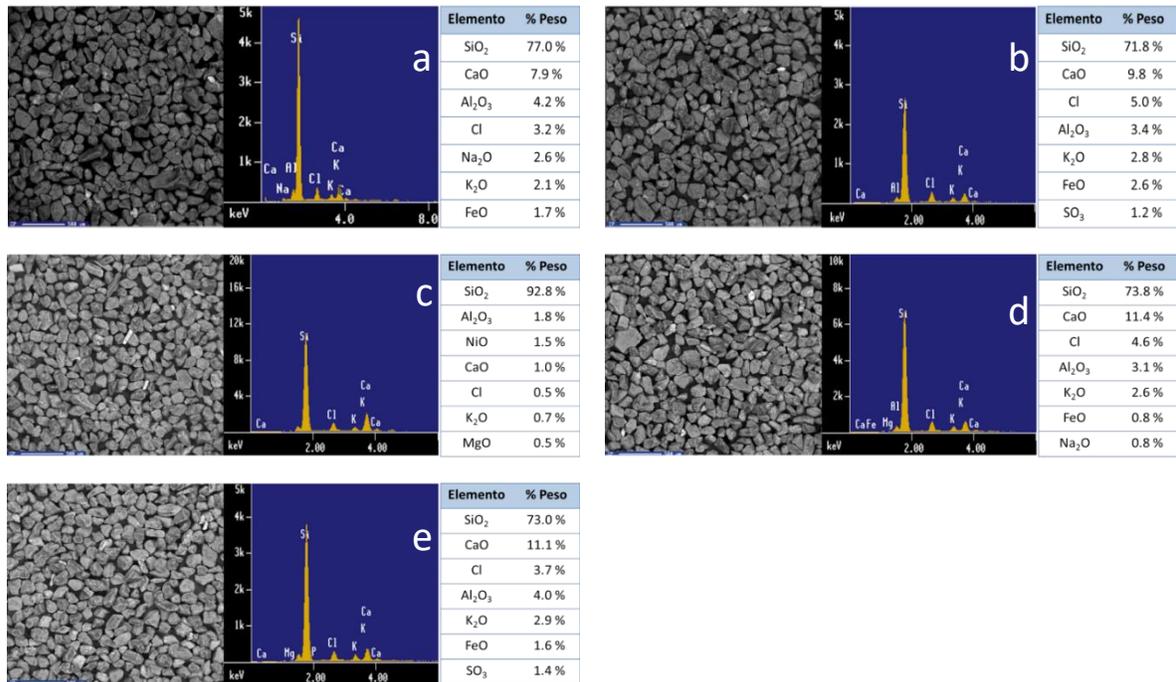


Figura 27. Fotomicrografía, espectro y análisis semicuantitativo de las fases minerales de las muestras: a) T 1, b) T 5, c) T 11, d) T 14 y e) T 18

En el análisis de granos específicos (Figura 28) se encontró mayor cantidad de minerales pesados como circones, titanomagnetitas, e ilmenitas, además de cuarzos y plagioclasas.

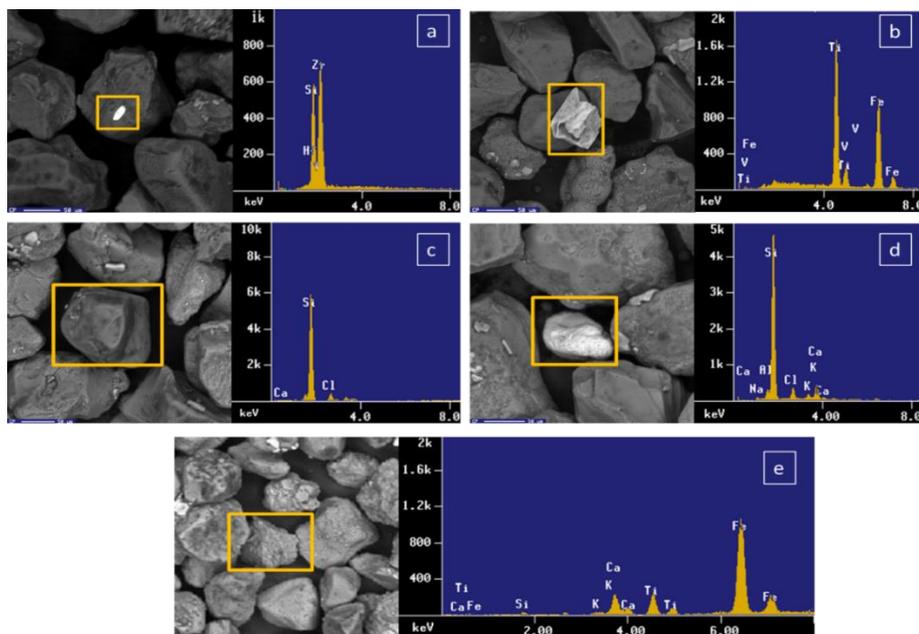


Figura 28. Fotomicrografía y espectro de las fases minerales de Playa Tamiahua: a) Circón, b) Ilmenita, c) Cuarzo, d) Plagioclasa, e) Titanomagnetita

5.2.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

El análisis de Difracción de Rayos X se utilizó para identificar las fases cristalinas de los sedimentos (Anexo 1).

Los resultados de Playa Norte indican la presencia de calcita (CaCO_3) principalmente, cuarzo (SiO_2), aragonita (CaCO_3), andesita (SiO_2), filosilicatos tipo mica-ilita ($(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$) y feldespato potásico tipo ortoclasa (KAlSi_3O_8) en todas la muestras. Como el porcentaje de calcita era muy alto, se optó por eliminarla con HCl al 10% para encontrar fases cristalinas en menor proporción que eran opacadas por la calcita. Con los difractogramas (Figura 29) se encontraron pequeñas proporciones de fases cristalinas como anfíboles tipo actinolitas (PN 5, PN 11, PN 15 y PN 7), filosilicatos tipo cloritas (PN 5, PN 15) y piroxenos tipo enstatitas (PN 7).

Las altas cantidad de calcita y aragonita se debe a la región geológica de la Plataforma de Yucatán, la cual se constituye en su mayoría por rocas sedimentarias carbonatadas del Cenozoico. Los sedimentos siliciclásticos que están representados por el cuarzo y los feldespatos son provenientes de la Sierra Madre Oriental y de la Orogenia Laramide formada a principios del Paleoceno (Zavala-León, 2018).

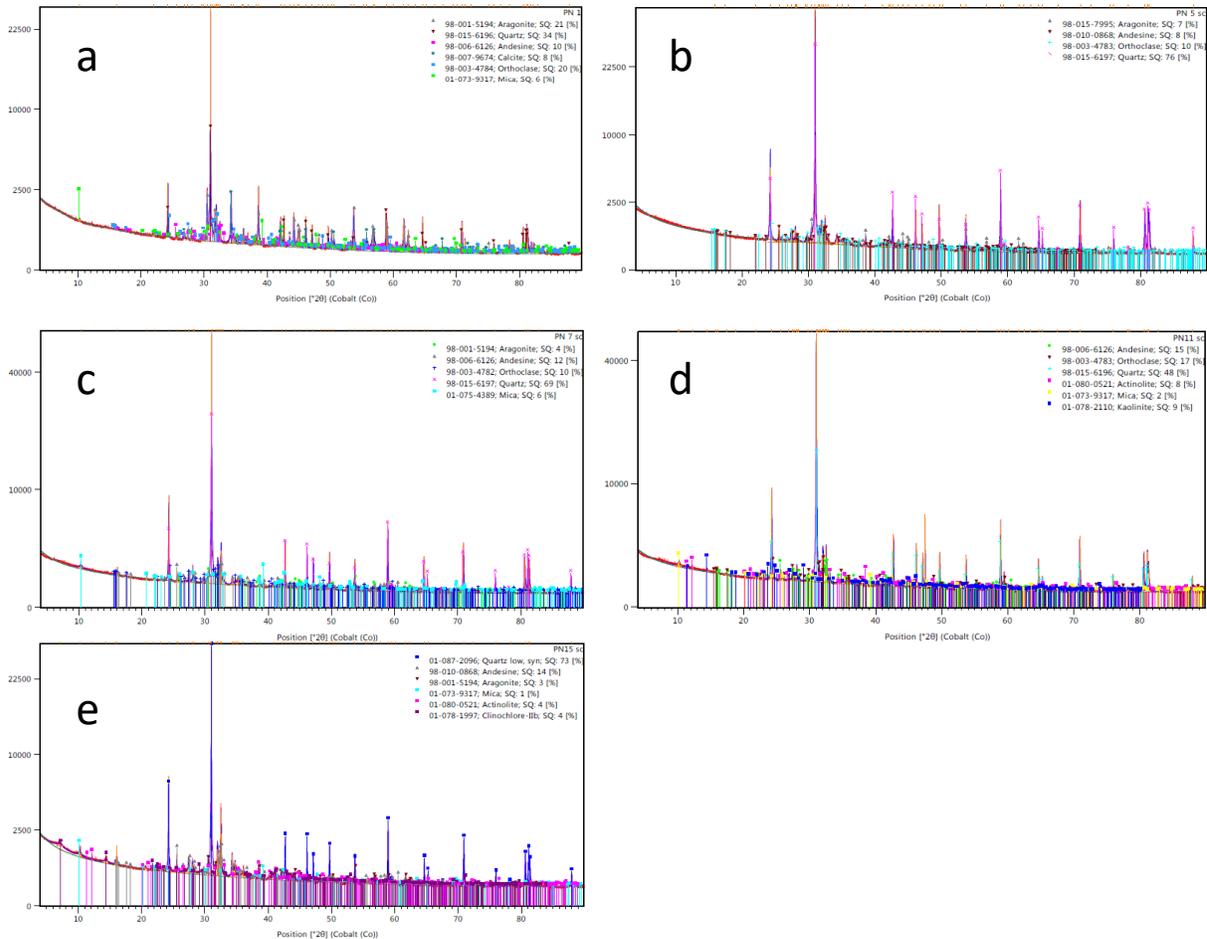


Figura 29. Difractogramas de la muestras: a) PN 1, b) PN 5 (sin carbonatos), c) PN 7 (sin carbonatos), d) PN 11 (sin carbonatos) y e) PN 15 (sin carbonatos). Representación de la intensidad (ordenadas) en función del ángulo de difracción (abscisas)

Para el caso de Playa Tamiahua, se encontró la presencia dominante de cuarzo (SiO_2) seguido por calcita (CaCO_3), plagioclasa de composición intermedia ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), ortoclasa (KAlSi_3O_8) y actinolita ($\text{Ca}_2(\text{Mg}_{4.5-2.5}\text{Fe}^{2+}_{0.5-2.5})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})$) (Anexo, Figura 30).

Para la muestra THA 4 se hizo una separación magnética por Frantz (Figura 30 b), esto con el fin de ver los minerales magnéticos que se opacan por las grandes cantidades de cuarzo, con este procedimiento se encontraron minerales pesados como: piroxenos de tipo augita (6 %), enstatita (28 %) y magnetita (1 %).

De acuerdo con diversos autores (Komar y Wang, 1984; Zavala-León, 2018), la distribución de los minerales pesados se relaciona con el tamaño, densidad y forma de grano del mineral. Por otro lado, en la zona costera, la mayor densidad de estos minerales se encuentra en la mesoplaya debido al oleaje que transporta mar adentro los minerales pesados, por ende, las muestras estudiadas presentan pocos minerales de este tipo. Sin embargo, la densidad de los minerales pesados puede cambiar a lo largo del año, esto por la fuerza de las corrientes marinas. De igual manera, las proporciones de los minerales ligeros cambian respecto a las corrientes de aire.

La provincia litológica de la cual proceden los sedimentos de Playa Tamiahua es la Sierra Madre Oriental, la cual está compuesta por rocas sedimentarias formadas en ambientes marinos, están representadas por el cuarzo, la calcita y la plagioclasa. También hay aporte de la Provincia Alcalina Oriental Mexicana que está constituida por areniscas calcáreas y caliza arenosa (Sour-Tovar et al., 2018). El alto contenido de cuarzo se debe al transporte eólico que acarrea los sedimentos desde los campos de dunas que se encuentran alrededor de la Laguna de Tamiahua.

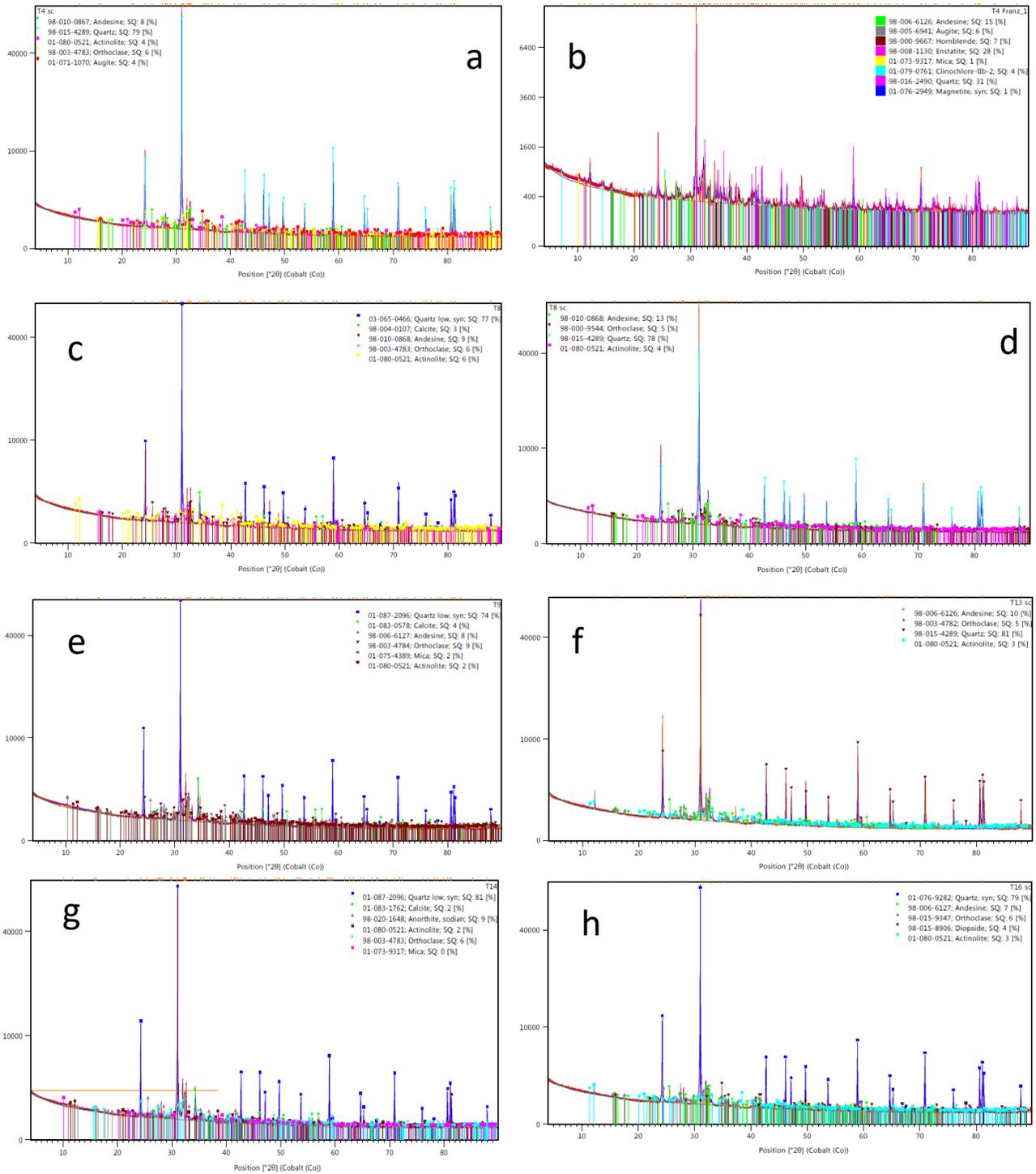


Figura 30. Difractograma de las muestras: a) THA 4 (sin carbonatos), b) THA 4 (con separación magnética), c) THA 8, d) THA 8 (sin carbonatos), e) THA 9, f) THA 13 (sin carbonatos), g) THA 14, h) THA 16 (sin carbonatos)

5.3 GEOQUÍMICA

La composición química de los sedimentos clásticos se usa comúnmente como un indicador sensible para inferir la procedencia, para identificar las condiciones climáticas y el entorno tectónico de la cuenca (Nagarajan et al., 2007, Armstrong-Altrin, 2009; Ramos-Vázquez et al., 2018; Lin et al., 2019). Además, la composición química de los sedimentos clásticos depende principalmente de la roca madre, aunque factores como la clasificación hidráulica y la meteorización pueden afectar la composición original de los sedimentos (Cullers, 1994 a, b; Concepción et al., 2012; Garzanti et al., 2018; Ramírez-Montoya et al., 2018). Las concentraciones de elementos principales y oligoelementos de sedimentos terrígenos se consideran una herramienta valiosa para identificar la procedencia (Zhang et al., 2011; Armstrong-Altrin et al., 2013; Srivastava et al., 2013; Galindo-Ruiz et al., 2018; Toyin y Adekeye, 2019). Los oligoelementos como La, Y, Sc, Cr, Th, Zr, Hf, Nb y Ti son los más adecuados para las determinaciones de procedencia y tectónica, debido a su movilidad relativamente baja durante los procesos sedimentarios. Estos elementos se producen preferentemente en los minerales resistentes y no se liberan durante la intemperie y el transporte y, por ende, pueden reflejar mejor la firma de los materiales originales (Park et al., 2010; Madhavaraju, J. et al., 2017; Armstrong-Altrin et al., 2018). Consecuentemente, se espera que sean más útiles para discriminar entornos tectónicos y composiciones de roca fuente que los elementos principales (LaMaskin et al., 2008; Armstrong-Altrin y Verma, 2005; Armstrong-Altrin, 2015).

Distintos autores como Pettijohn et al. (1973) y Herron (1988) utilizaron los elementos mayores para clasificar los sedimentos con base en sus concentraciones. Bhatia (1983) utilizó los elementos mayores para clasificar sedimentos finos de acuerdo con el ambiente tectónico en el que se depositan y la procedencia de estos. En cuanto a Nesbitt y Young (1982) utilizan los elementos mayores para definir el grado de madurez y la diagénesis de los sedimentos. Taylor y McLennan (1985) analizaron las relaciones entre el ambiente tectónico y la procedencia con el estudio de la geoquímica.

5.3.1 ELEMENTOS MAYORES

Las concentraciones de los elementos mayores de Playa Norte y Playa Tamiahua se encuentran en las tablas 14 y 15, respectivamente. Las diferencias más notables entre playas se reflejan en los compuestos de FeO, MgO, K₂O, P₂O₅ y CaO que se encuentran en mayor concentración en Playa Norte que en Playa Tamiahua. Para el caso de Al₂O₃, MnO y Na₂O las concentraciones de estos compuestos son muy similares en ambas playas y la diferencia significativa entre playas es que Playa Tamiahua está dominada por el cuarzo mientras que la calcita domina en Playa Norte.

De acuerdo con las proporciones de los elementos encontrados en Playa Norte, SiO₂ se encuentra en mayor concentración (66.52-87.06 %), seguido de CaO (0.34-11.94%), Al₂O₃ (4.36-6.61 %), K₂O (1.53-2.08 %) y Na₂O (1.05-1.54 %), el resto de los elementos se encuentran en proporciones menores al 1 %.

En Playa Tamiahua las proporciones de los elementos en forma descendiente son: SiO₂ (87.80-88.91 %), Al₂O₃ (4.38-5.27 %), K₂O (1.39-1.80 %) y Na₂O (1.08-1.29 %), el resto de los elementos están en proporciones menores al 1 %.

Tabla 14. Concentración de elementos mayores en % de los sedimentos costeros de Playa Norte

Muestra	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
SiO ₂	85.86	87.06	77.15	79.47	81.49	82.62	66.52	69.06	84.82	80.92
TiO ₂	0.25	0.21	0.19	0.18	0.19	0.16	0.13	0.21	0.24	0.19
Al ₂ O ₃	4.65	4.86	4.36	4.90	4.62	5.32	4.96	6.61	5.05	5.35
Fe ₂ O ₃	0.86	0.72	0.83	0.98	0.81	0.93	1.16	1.92	0.91	1.02
MnO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
MgO	0.40	0.27	0.50	0.57	0.46	0.50	0.76	1.15	0.45	0.52
CaO	1.28	0.34	6.76	4.61	3.89	2.51	11.94	8.04	1.45	3.45
Na ₂ O	1.10	1.17	1.05	1.21	1.11	1.22	1.22	1.54	1.20	1.27
K ₂ O	1.62	1.75	1.53	1.75	1.65	1.90	1.76	2.08	1.78	1.87
P ₂ O ₅	0.05	0.03	0.06	0.07	0.05	0.06	0.09	0.09	0.05	0.06
LOI	1.46	0.68	6.06	4.53	3.68	2.71	10.71	8.11	1.62	3.38
Total	97.53	97.10	98.50	98.27	97.96	97.93	99.26	98.84	97.58	98.03
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	18.60	23.14	22.95	27.22	24.32	33.25	38.15	31.48	21.04	28.16
K ₂ O/Na ₂ O	1.47	1.50	1.46	1.45	1.49	1.56	1.44	1.35	1.48	1.47

Estudios realizados por Tapia Fernández (2013) en la zona, indicaron el mismo porcentaje de sílice en los sedimentos, así se afirma que no hubo variación de sílice desde el 2013 en la zona, aunque no se puede decir lo mismo del Al_2O_3 , el cual si disminuyó al menos un 30 %, paso de 6 % a 4 % aproximadamente, esta variación puede ser debido a la estacionalidad en la cual se llevo a cabo el muestreo. De marzo a julio es la temporada de secas, durante este tiempo es más factible que los elementos pesados se encuentren en mayor concentración debido a las bajas velocidades de vientos y corrientes, Por el contrario, de agosto a noviembre es la temporada de lluvias y huracanes, durante esta temporada los fuertes vientos pueden arrastrar a los elementos más pesados (PRONANP 2005; Ignacio, 2009).

De acuerdo con Girty et al. (1996), la relación Al_2O_3/TiO_2 da información acerca del origen de la roca madre siempre y cuando esta sea ígnea, por lo tanto, si la diferencia de la relación es menor a 14 indica el origen de rocas máficas, si la diferencia se encuentra entre 19 y 28 la roca madre es ígnea intermedia y si la diferencia es mayor a 28 la procedencia de la roca madre es de origen félsico. Analizando los resultados con las referencias se encuentra que Playa Norte presenta valores entre 18.60 y 38.15, lo que indica dos tipos de roca madre: una intermedia y una de tipo félsico. Para Playa Tamiahua sucede exactamente lo mismo, ya que sus valores van de 13.24 a 37.64. Sin embargo, en este análisis no se toman en cuenta las rocas sedimentarias ni las metamórficas, por lo que, esta procedencia no se puede tomar como precisa.

Tabla 15. Concentración de elementos mayores en % de los sedimentos costeros de Playa Tamiahua

Muestra	2	3	4	8	10	11	13	14	16	19
SiO ₂	88.66	88.49	88.36	87.80	88.19	88.91	88.00	88.27	87.29	88.17
TiO ₂	0.18	0.29	0.29	0.28	0.34	0.21	0.19	0.20	0.14	0.15
Al ₂ O ₃	4.65	4.38	4.46	4.87	4.50	4.50	4.60	4.59	5.27	4.97
Fe ₂ O ₃	0.40	0.57	0.55	0.60	0.62	0.39	0.45	0.45	0.37	0.35
MnO	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
MgO	0.25	0.21	0.21	0.20	0.24	0.18	0.18	0.16	0.16	0.24
CaO	0.50	0.54	0.54	0.54	0.57	0.50	0.50	0.48	0.47	0.48
Na ₂ O	1.18	1.09	1.12	1.16	1.11	1.08	1.16	1.16	1.29	1.23
K ₂ O	1.55	1.39	1.40	1.50	1.40	1.41	1.50	1.53	1.80	1.63
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
LOI	0.37	0.46	0.47	0.53	0.36	0.38	0.45	0.47	0.48	0.41
Total	97.77	97.45	97.44	97.52	97.37	97.58	97.06	97.35	97.31	97.66
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	25.83	15.10	15.38	17.39	13.24	21.43	24.21	22.95	37.64	33.13
K ₂ O/Na ₂ O	1.31	1.28	1.25	1.29	1.26	1.31	1.29	1.32	1.40	1.33

Posteriormente, se trazó un diagrama de comparación entre los elementos mayores de cada playa y los valores normalizados de la Corteza Continental Superior (UCC, por sus siglas en inglés, Taylor y McLennan, 1985), esto con el fin de identificar algún enriquecimiento o empobrecimiento de los elementos respecto a la UCC. El diagrama también sirve para identificar si algún elemento es proveniente de la corteza terrestre o tiene otro origen. En la Figura 31 se observa claramente que la mayoría de los elementos de las dos playas se encuentran por debajo de los valores de la UCC, excepto para SiO₂, los cuales están ligeramente por encima del contenido de la UCC. Para CaO, 4 de las 10 muestras de Playa Norte tienen valores superiores a la UCC y 6 valores están por debajo.

Por otro lado, cabe destacar que la Playa de Tamiahua se comporta homogéneamente en todos sus elementos; (existe una ligera variación en el rango de las concentraciones de TiO₂ y Fe₂O₃) lo cual no ocurre en Playa Norte, donde se ve una gran variación para MgO, CaO y P₂O₅. Estas variaciones pueden significar que los sedimentos poseen distintas procedencias. Adicionalmente la correlación

TiO_2/Al_2O_3 indica la presencia de minerales pesados, lo cual no ocurre en ninguna de las dos muestras ya que sus correlaciones son muy bajas; $r = 0.015$ para PN y $r = -0.613$ para PT.

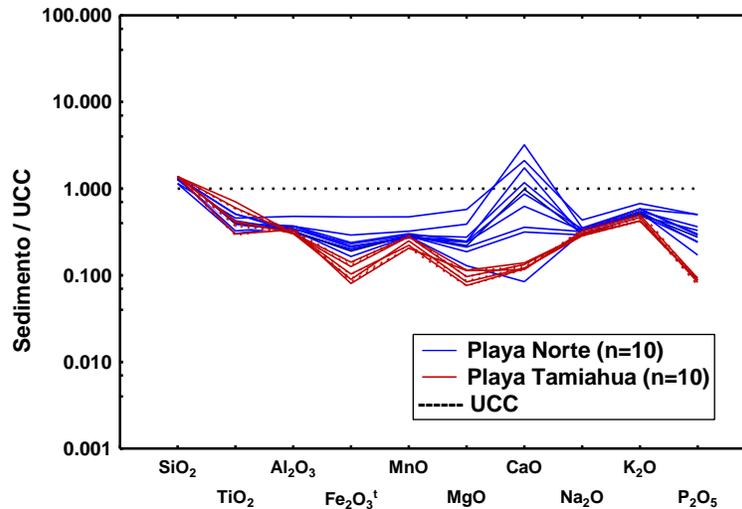


Figura 31. Diagrama normalizado con el promedio de la corteza continental superior (UCC) para elementos mayores de las Playas Norte y Tamiahua (Taylor y McLennan, 1985).

El diagrama de Pettijohn (1975) es ampliamente utilizado para clasificar los sedimentos de acuerdo a la geoquímica de elementos mayores, relaciona el $\log SiO_2/Al_2O_3$ vs. $\log Na_2O/K_2O$ y expresa la cantidad de cuarzo, arcilla y feldespato que presenta la muestra.

Al graficar las dos playas (Figura 32), se tiene que ambas pertenecen al grupo de las subarcosas, las cuales se caracterizan por tener una cantidad de feldespatos comprendida entre el 25 % y el 5 %. La muestra 15 de Playa Norte cae dentro de las arenas líticas, es decir, tiene un porcentaje mayor al 25 % de fragmentos de roca, sin embargo, se puede tomar como una muestra anómala ya que es la única en su tipo de todas las muestras recolectadas.

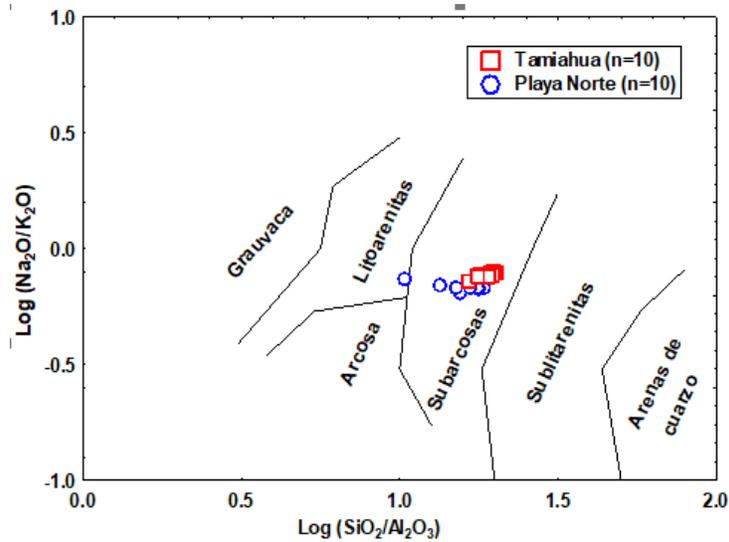


Figura 32. Diagrama de clasificación química de arenas (Pettijohn, 1975)

El diagrama de Herron (1988) es una modificación al diagrama de Pettijohn (1975), en este caso se grafica el log SiO₂/Al₂O₃ vs. log Fe₂O₃/K₂O (Figura 33). La relación SiO₂/Al₂O₃ sirve para clasificar el sedimento de acuerdo con la cantidad de cuarzo frente a la cantidad de arcilla o feldespato, mientras que la relación Fe₂O₃/K₂O se utiliza para diferenciar entre sedimentos ricos o pobres en feldespatos.

Respecto a los resultados obtenidos en Playa Norte y Playa Tamiahua se concluye que las dos muestras se clasifican como subarcosas, la misma conclusión que en el diagrama de Pettijohn.

Como ya se había mencionado, la muestra 15 de Playa Norte está clasificada como litoarenita dentro del diagrama de Pettijohn, es decir, está compuesta mayoritariamente por fragmentos de roca, pero en el diagrama de Herron, la muestra se clasifica como arcosa, es decir, presenta abundancia en feldespatos. Para poder definir de qué tipo es, se tomaron en cuenta los análisis de DRX, en los cuales, la muestra presenta un porcentaje considerable de feldespato; así que, al final se considera como arcosa.

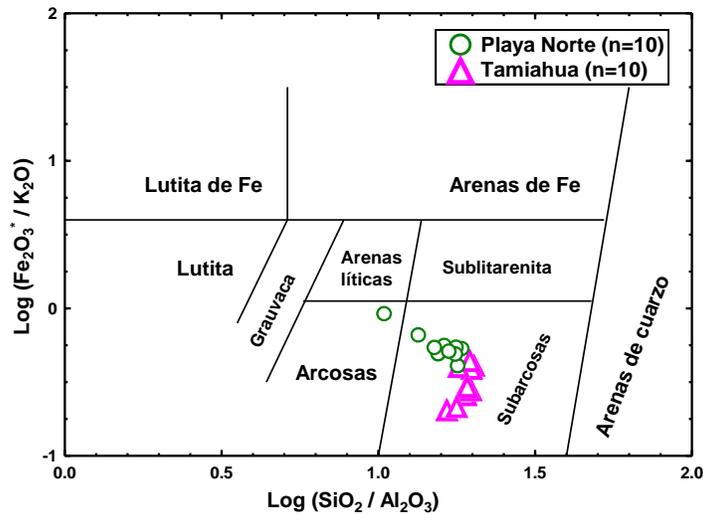


Figura 33. Diagrama de la clasificación geoquímica de areniscas, limolitas y lutitas (Herron, 1988).

5.3.2 ELEMENTOS TRAZA

En general, los sedimentos conservan su composición elemental, sin embargo, esta composición va variando dependiendo de la constitución de las partículas que se van integrando a lo largo del transporte, de las características granulométricas, de la materia orgánica y de los procesos de intemperismo (Rodríguez Figueroa, 2010). En particular, los elementos traza brindan mucha información acerca de la procedencia, ambiente, contaminación e intemperismo.

En las Tabla 16 Tabla 17 se presentan los contenidos de elementos traza de Playa Norte y Playa Tamiahua, respectivamente. La diferencia más significativa entre las dos playas es el alto contenido, en Playa Norte, de elementos traza y las altas concentraciones de ciertos elementos como: As (3.55-25.70 ppm), Ba (242.67-1151.29 ppm), Cr (61.51-406.7 ppm), Cu (29.45-207.57 ppm), Mn (42.25-240.21 ppm), Rb (26.64-115.19 ppm), Sr (117.06-621.46 ppm) y Zr (13.57-59.79 ppm). Por el contrario, Playa Tamiahua solo presenta altos contenidos en 4 elementos: As (0.8-2.1 ppm), Ba (38.4-49.7 ppm), Mn (15-40 ppm) y Sr (10.4-14.9 ppm), valores que están muy por debajo de los obtenidos en Playa Norte.

Elementos como Ca, Mg, Ba y Sr están asociados al intemperismo de rocas carbonatadas como calcitas y aragonitas (Rodríguez Meza, 1999; Habib Galindo, 2017). Por otra parte, se ha reportado que altas concentraciones de Cr, Cu Pb, Zn, Ni y Mn provienen de actividades industriales como la refinera, los pesticidas y eliminación de desechos (Rodríguez Figueroa, 2010; Vazquez Botello et al., 2014). Por último, el As puede provenir de fuentes naturales (minerales de sulfuro, gases volcánicos y manantiales geotermales) o antropogénicas (pesticidas, minería y combustibles), pero este elemento se considera importante por la toxicidad hacia el ambiente y la bioacumulación en organismos. Sin embargo, para poder definir con mayor precisión el origen de estos elementos se podrían utilizar relaciones isotópicas, las cuales tienen valores bien definidos para cada proceso.

Tabla 16. Concentración de elementos trazas (ppm) de los sedimentos costeros de Playa Norte

Muestra	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
As	10.93	6.02	7.40	25.70	8.52	16.95	17.01	11.55	8.80	3.55
B	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Ba	674.87	532.51	472.50	503.45	643.67	1,151.29	387.44	733.43	671.36	242.67
Be	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Bi	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Cd	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Co	4.95	2.91	3.52	3.26	4.35	6.97	2.99	8.05	4.70	1.64
Cr	406.70	357.94	112.70	399.24	171.25	284.24	150.68	315.93	331.64	61.51
Cs	14.35	10.16	10.59	9.85	15.10	24.10	8.45	16.85	14.52	5.47
Cu	138.26	84.90	3.30	117.56	64.24	207.57	3.34	74.95	76.01	29.45
Ga	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Hf	1.79	1.92	1.43	1.45	1.39	2.22	1.17	2.26	2.00	1.25
Li	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Mn	143.98	88.25	92.01	81.19	114.23	156.29	80.90	240.21	126.83	42.25
Mo	0.32	0.22	0.40	0.18	0.36	0.62	0.33	0.43	0.20	0.76
Nb	8.25	5.67	5.57	4.60	6.40	8.27	3.08	3.12	4.62	2.99
Ni	28.14	19.10	21.23	22.10	25.37	46.14	22.51	61.01	28.07	10.00
Pb	13.12	9.47	8.84	10.72	12.73	20.42	7.94	16.29	12.26	4.37
Rb	66.76	54.45	50.64	57.01	69.00	115.19	43.11	92.37	70.92	26.64
Sb	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sc	2.46	2.47	2.24	2.42	2.79	3.52	1.20	5.04	3.33	0.70
Sn	8.26	3.59	1.43	6.87	4.00	7.61	1.24	2.07	4.99	2.27
Sr	224.23	129.57	417.25	302.70	370.24	473.47	471.79	621.46	230.44	117.06
Ta	11.59	11.17	11.52	11.12	11.53	11.62	10.94	10.90	11.22	9.04
Th	3.14	2.68	2.74	2.84	3.02	4.23	2.26	5.63	3.94	1.40
Tl	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
U	1.49	1.04	1.37	1.36	1.41	2.00	1.31	2.32	1.49	0.71
V	32.58	23.73	20.56	68.23	28.17	48.51	38.09	39.06	38.82	15.92
Y	7.44	6.02	8.56	6.07	7.17	11.55	4.97	13.04	8.49	2.91
Zn	41.10	28.35	16.52	26.89	27.75	56.09	11.75	40.35	31.02	8.10
Zr	43.91	49.08	34.29	34.88	31.61	59.79	24.88	57.94	52.86	13.57
Th/Sc	1.28	1.09	1.22	1.17	1.08	1.20	1.88	1.12	1.18	2.00
Cr/Ni	14.45	18.74	5.31	18.07	6.75	6.16	6.69	5.18	11.81	6.15
Cr/V	12.48	15.08	5.48	5.85	6.08	5.86	3.96	8.09	8.54	3.86
Zr/Sc	17.85	19.87	15.31	14.41	11.33	16.99	20.73	11.50	15.87	19.39

Tabla 17. Concentración de elementos trazas (ppm) de los sedimentos costeros de Playa Tamiahua

Muestra	2	3	4	8	10	11	13	14	16	19
As	2.1	1.8	1.1	1.3	1	0.8	1.4	1	1.7	1.4
B	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1
Ba	38.4	44.9	47.5	54.2	40.6	40.4	49.7	46	43.6	43
Be	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Bi	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Cd	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Co	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4
Cr	2	3	3	4	3	3	3	3	3	3
Cs	0.33	0.35	0.36	0.4	0.36	0.32	0.35	0.38	0.39	0.36
Cu	1.1	1.1	1.3	1.3	0.9	0.7	0.9	9.9	0.8	0.6
Ga	0.76	0.86	0.86	0.99	0.79	0.73	0.89	0.85	0.76	0.8
Hf	< 0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Li	1.1	1.2	1.1	1.5	1.1	1.1	1.3	1.3	1.3	1.2
Mn	20	36	36	40	39	22	25	24	15	17
Mo	0.18	0.18	0.16	0.18	0.17	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14
Nb	0.4	0.6	0.4	0.6	0.6	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3
Ni	0.6	0.8	1.5	1	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.6
Pb	0.8	1	1	1.1	0.9	0.8	1	1	1	0.8
Rb	3.3	3.6	3.8	4.4	3.2	3.2	4.1	4	3.8	3.7
Sb	0.11	0.11	0.1	0.14	0.1	0.11	0.09	0.1	0.09	0.08
Sc	0.5	0.8	0.8	0.9	0.9	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6
Sn	0.29	0.34	0.33	0.38	0.37	0.28	0.31	0.33	0.28	0.26
Sr	10.4	12.6	13.6	14.9	12.1	10.6	13.2	12.2	11.2	11.4
Ta	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Th	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Tl	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
U	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
V	5	8	8	8	8	6	6	6	5	5
Y	1.41	1.89	1.81	2.08	2.03	1.44	1.66	1.6	1.33	1.34
Zn	2.1	3.6	3.7	4.2	2.9	2	2.8	8.3	2.3	2
Zr	2.9	3.6	3.5	4.6	3.8	2.9	3	3.5	2.9	3.2
Th/Sc	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Cr/Ni	3.33	3.75	2.00	4.00	4.29	5.00	4.29	4.29	3.75	5.00
Cr/V	0.40	0.38	0.38	0.50	0.38	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60
Zr/Sc	5.80	4.50	4.38	5.11	4.22	4.83	4.29	5.00	4.83	5.33

Con los datos obtenidos de elementos traza se realizó un diagrama normalizado con los valores de la corteza continental superior (Figura 34) para poder ver anomalías en los elementos y definir el tipo de roca madre.

Todas las muestras de Playa Tamiahua presentan concentraciones muy por debajo de la UCC y no se observa gran variabilidad entre las concentraciones de cada elemento. No obstante, se detectó una anomalía en la muestra T 14, puesto que presenta concentraciones altas en Cu, Zn y Au. En Cu se tiene 9.9 ppm, mientras que el resto de las muestras están en un rango de 0.6 a 1.3 ppm; para el caso de Zn, contiene 8.3 ppm y las otras muestras están entre 2-4.6 ppm, por último, presenta 5.5 ppm de Au y el resto de las muestras están entre 0.7 y 2.2 ppm. Estos elementos se pueden vincular a una procedencia de yacimientos minerales en particular a menas metálicas no ferrosas, las cuales se componen de Au, Ag, Cu, Pb y Zn que se encuentran en la parte sureste del país, más específicamente en la región Batolito de Chiapas, (SGM, 2020; Canet Miquel y Camprubi i Cano, 2006), y que pueden llegar hasta el Golfo de México por medio de los ríos circundantes, otra posible procedencia es de la industria petroquímica. Para el caso de Playa Norte se observa un enriquecimiento de Cr y Cu, estos elementos se pueden relacionar con sedimentos provenientes de rocas ultramáficas o de contaminación antrópica. Para el caso de Sr y Ba, son elementos relacionados con rocas cálcicas.

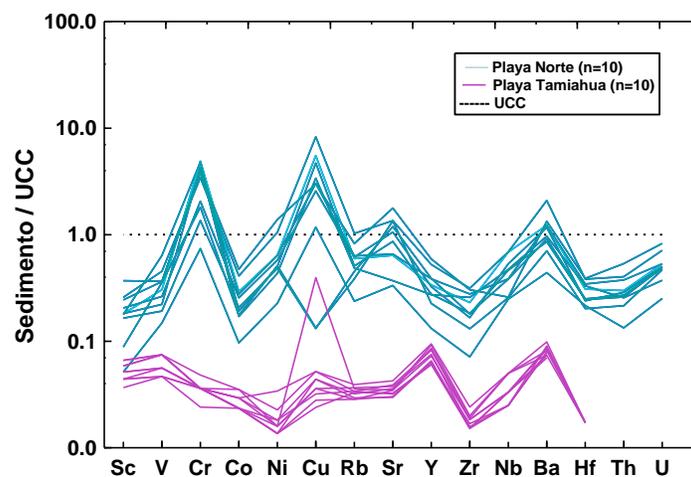


Figura 34. Diagrama normalizado para elementos traza de los sedimentos costeros de Playa Norte, normalizados con el promedio de la Corteza Continental Superior (UCC) (Taylor y McLennan, 1985)

5.3.3 TIERRAS RARAS

Con el estudio de las concentraciones de tierras raras en los sedimentos costeros y marinos se puede definir la procedencia, los procesos de circulación oceánica y las interacciones con otros sistemas (Rodríguez Figueroa, 2010). Para inferir estos procesos, las concentraciones obtenidas se normalizan con los valores de condrita obtenidos por Taylor y McLennan (1985).

Las tablas 18 y 19 muestran las concentraciones de REE de Playa Norte y Playa Tamiahua, respectivamente. En general, Playa Norte registra concentraciones más altas que Tamiahua. Los rangos para Playa Norte van desde 25.5 hasta 84.5 ppm de tierras raras totales, de éstas hay un rango de 19.27 a 74.28 ppm que pertenecen a LREE y un rango de 5.05 a 10.75 ppm que son de HREE, por lo tanto, abundan las LREE.

Los sedimentos de Playa Tamiahua tienen entre 12.24 y 18.35 ppm de tierras raras totales; de LREE tiene entre 11.34 y 16.95 ppm y de HREE el rango va de 0.8 a 1.4 ppm, aunque las concentraciones de esta playa son más bajas respecto a Playa Norte, la variación entre las concentraciones de las muestras es pequeña.

Estudios realizados en Playa Tamiahua indican que las concentraciones de tierras raras totales oscilan entre 25 y 32 ppm (Tapia Fernández, 2013), por lo tanto, hubo una disminución en la concentración de estos elementos desde el 2013 a la fecha. Esta disminución de tierras raras se puede adjudicar al incremento de intensidad y velocidad en los vientos, esto ha ocurrido por el calentamiento de la superficie de los océanos, lo que causa mayor humedad y energía que originan la formación de huracanes de mayor magnitud (Knutson et al., 2010; Lin, 2019). Entre tanto, la temperatura del Golfo de México está en aumento por consecuencia de las actividades humanas que emiten gases de efecto invernadero. Al tener temperaturas mayores en los océanos se produce una expansión térmica del océano, por consiguiente, aumenta el nivel del mar y la intensidad del oleaje también incrementa (Singh et al., 2017; GMAO, 2019).

Estos fenómenos han hecho que disminuya la cantidad de REE, puesto que, los huracanes y el oleaje golpean con mayor energía la zona costera, desplazando a

los elementos más pesados como La y Ce. Otra posibilidad es la época del año en la que se tomaron las muestras de los distintos estudios, ya que durante el año cambia el oleaje y los vientos; y por ende puede o no arrastrar a los elementos pesados.

Tabla 18. Concentración de tierras raras (ppm) de los sedimentos costeros de Playa Norte

Muestra	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
La	11.69	10.09	9.66	9.07	11.50	17.00	6.35	15.74	14.21	4.50
Ce	22.82	19.17	18.90	18.15	22.45	33.59	12.92	32.18	28.04	8.23
Pr	2.66	2.13	2.19	2.16	2.62	4.01	1.48	3.74	3.25	1.28
Nd	10.96	8.63	9.23	9.09	10.85	16.29	6.56	15.17	13.15	4.08
Sm	2.36	1.82	2.09	2.08	2.35	3.39	1.63	3.31	2.74	1.18
Eu	0.65	0.47	0.48	0.55	0.65	1.09	0.37	0.86	0.73	0.76
Gd	2.53	2.04	2.34	2.24	2.57	3.62	1.86	3.58	2.93	1.23
Tb	0.32	0.26	0.32	0.31	0.32	0.48	0.24	0.49	0.37	0.48
Dy	1.59	1.27	1.66	1.37	1.54	2.38	1.12	2.57	1.80	1.26
Ho	0.35	0.28	0.37	0.32	0.34	0.50	0.25	0.54	0.38	0.49
Er	0.85	0.67	0.92	0.73	0.82	1.33	0.57	1.45	0.97	0.83
Tm	0.16	0.14	0.17	0.18	0.16	0.23	0.12	0.25	0.18	0.51
Yb	0.93	0.78	0.99	0.83	0.89	1.37	0.68	1.54	1.06	0.92
Lu	0.24	0.22	0.25	0.26	0.24	0.31	0.21	0.33	0.27	0.51
LREE ⁹	50.49	41.84	42.07	40.55	49.77	74.28	28.94	70.14	61.39	19.27
HREE ¹⁰	6.97	5.66	7.02	6.24	6.88	10.22	5.05	10.75	7.96	6.23
ΣREE ¹¹	57.46	47.5	49.09	46.79	56.65	84.5	33.99	80.89	69.35	25.5
Eu/Eu* ¹²	0.81	0.74	0.66	0.77	0.80	0.95	0.65	0.76	0.78	1.90
(Gd/Yb) _{CN} ¹³	2.20	2.12	1.92	2.19	2.34	2.14	2.22	1.88	2.24	1.08
(La/Sm) _{CN}	3.12	3.49	2.91	2.74	3.08	3.16	2.45	2.99	3.26	2.40

⁹ LREE = La + Ce + Pr + Nd + Sm

¹⁰ HREE = Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu

¹¹ ΣREE = Total de tierras raras

¹² Eu/Eu* = $Eu_{CN} / [(Sm_{CN} + Gd_{CN})^{1/2}]$

¹³ CN = valores normalizados con condrita

Tabla 19. Concentración de tierras raras (ppm) de los sedimentos costeros de Tamiagua

Muestra	2	3	4	8	10	11	13	14	16	19
La	3	3.4	3.3	3.9	3.7	2.6	3.4	3.3	2.8	2.7
Ce	5.95	6.8	6.59	7.83	7.31	5.31	6.64	6.39	5.37	5.1
Pr	0.7	0.8	0.8	1	0.9	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7
Nd	2.6	3.2	3.18	3.62	3.57	2.43	3.14	3.03	2.45	2.49
Sm	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.3	0.5	0.6	0.3	0.4
Eu	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0	0
Gd	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4
Tb	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Dy	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3
Ho	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Er	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2
Tm	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Yb	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1
Lu	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
LREE ¹⁴	12.75	14.8	14.47	16.95	16.08	11.34	14.48	14.12	11.62	11.39
HREE ¹⁵	0.9	1.3	1.3	1.4	1.4	0.9	1.2	1.2	0.8	1
∑REE ¹⁶	13.65	16.1	15.77	18.35	17.48	12.24	15.68	15.32	12.42	12.39
Eu/Eu* ¹⁷	0	0.54	0.54	0.5	0.5	0	0.66	0.54	0	0
(Gd/Yb) _{CN} ¹⁸	3.24	2.03	2.03	2.43	2.43	2.43	1.62	2.03	2.43	3.24
(La/Sm) _{CN}	3.78	3.57	3.46	4.09	3.88	5.46	4.28	3.46	5.87	4.25

La relación LREE/HREE se utiliza para distinguir entre sedimentos derivados de rocas de composición félsica o máfica. Cuando la relación es alta la procedencia es félsica y si la relación es baja, su origen es máfico (Zavala-León, 2018). Para el caso de las dos playas, la relación es alta y, por tanto, se puede inferir que la fuente de ambas playas es de afinidad félsica.

¹⁴ LREE = La + Ce + Pr + Nd + Sm

¹⁵ HREE = Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu

¹⁶ ∑REE = Total de tierras raras

¹⁷ $Eu/Eu^* = Eu_{CN} / [(Sm_{CN} + Gd_{CN})^{1/2}]$

¹⁸ CN = valores normalizados con condrita

Los datos se graficaron con los valores de condrita (normalización) para comparar y detectar anomalías con las cuales se puede inferir la procedencia de los sedimentos (Figura 35).

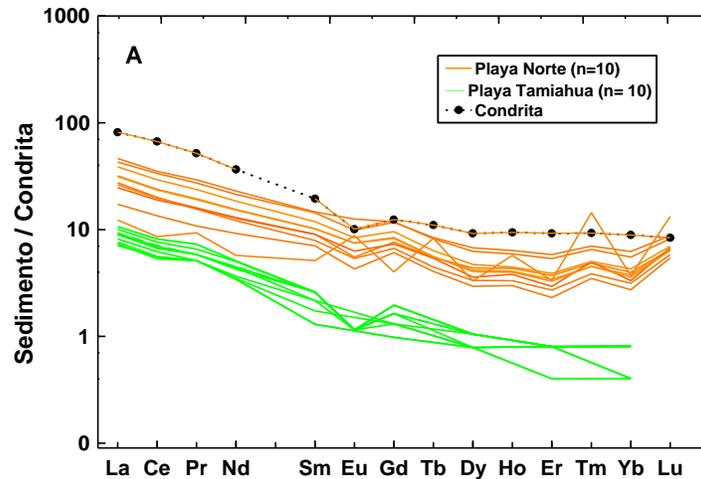


Figura 35. Diagrama normalizado para tierras raras con los valores de condrita (Taylor y McLennan, 1985).

Para el caso específico del europio (Eu), existen ciertas anomalías que funcionan para interpretar la procedencia de la roca madre. Si la anomalía (Eu/Eu^*) es negativa (<1), indica que proviene de una fuente ígnea de composición félsica, si la anomalía es positiva (>1), deriva de una fuente máfica y si no existe anomalía ($= 1$) es porque pertenece al grupo de las andesitas (Nakamura, 1974; Verdecchia et al., 2014). Esta anomalía también se puede interpretar como la relación con la evolución de los fundidos magmáticos que por cristalización dieron lugar a cuerpos plutónicos (Figuerola & Mesa, 2002) . Esta anomalía se obtiene con la fórmula:

$$\frac{Eu}{Eu^*} = \frac{Eu_{CN}}{[(Sm_{CN} + Gd_{CN})^{1/2}]}$$

CN= elemento normalizado con condrita

Ecuación 8. Anomalía de europio (Taylor y McLennan, 1985)

En la (Figura 35) se muestra que las dos playas presentan anomalías negativas de europio, de manera que tanto Playa Norte (0.65-0.95 ppm) como Playa Tamiahua

(0.5-0.66 ppm) provienen de rocas félsicas. Solo la muestra 19 de Playa Norte muestra un valor de Eu/Eu^* de 1.9, con lo cual se clasifica como procedencia de roca intermedia o máfica.

5.3.4 PROCEDENCIA

Para determinar una probable procedencia de sedimentos se utilizan los diagramas de Roser and Korsch (1988), estos diagramas utilizan funciones discriminantes para inferir entre cuatro grupos posibles de composición de la fuente: ígneas félsicas, ígneas máficas, ígneas intermedias y sedimentarias cuarzosas.

$$FD\ 1 = (-1.773 TiO_2) + (0.607 Al_2O_3) + (0.760 Fe_2O_3) + (-1.500 MgO) \\ + (0.616 CaO) + (0.509 Na_2O) + (-1.224 K_2O) + (-9.090)$$

$$FD\ 2 = (0.445 TiO_2) + (0.070 Al_2O_3) + (-0.250 Fe_2O_3) + (-1.142 MgO) \\ + (0.438 CaO) + (1.475 Na_2O) + (-1.426 K_2O) + (-6.681)$$

Ecuación 9. Funciones discriminantes 1 y 2 (Roser y Korsch, 1988)

De acuerdo con el diagrama obtenido (Figura 36), se puede estimar la composición de la roca madre de ambas playas. Las muestras de Playa Tamiahua caen dentro de las rocas sedimentarias cuarzosas, y probablemente debido a su entorno, provienen de rocas detríticas y depósitos litorales antiguos, no obstante, no se descarta la posibilidad de una procedencia de rocas metamórficas como las cuarcitas o gneis (Tapia Fernández, 2013). En el caso de Playa Norte, se presentan dos tipos de procedencia: la mayoría de las muestras caen dentro de las sedimentarias cuarzosas, 2 muestras caen del lado de las ígneas félsicas y 1 está entre ígnea félsica e intermedia. Sin embargo, para precisar la composición de la roca madre y definir ambientes, se utilizan las REE, ya que presentan baja movilidad y baja alteración ante los procesos de transporte e intemperismo.

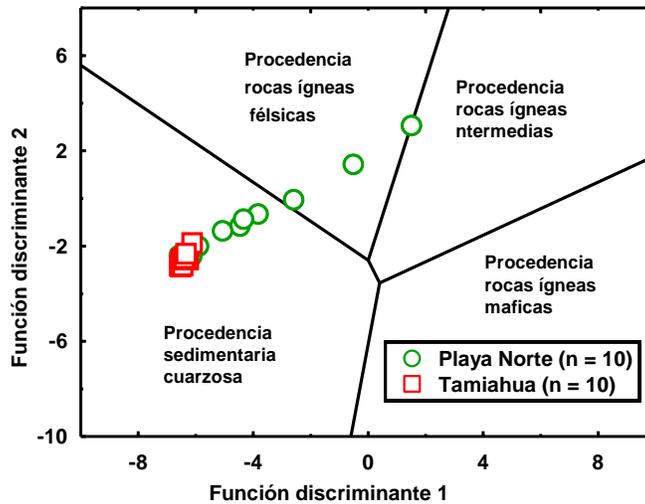


Figura 36. Diagrama de procedencia de sedimentos (Roser y Korsch, 1988)

Los elementos de REE, Th y Sc son bastante útiles para inferir composiciones corticales, porque su distribución no se ve afectada significativamente por procesos secundarios como la diagénesis y el metamorfismo, también se ven menos afectados por el fraccionamiento de minerales pesados que elementos como Zr y Hf (Armstrong-Altrin, 2009; Tapia Fernández, 2013; Tawfik et al., 2017; Wang et al., 2018). De manera similar, las abundancias de REE y Th son más altas en rocas de origen ígneo félsico que en rocas ígneas máficas y en sus productos degradados (Tapia Fernández, 2013). Además, estos elementos son relativamente inmóviles durante la intemperie y se cree que se transportan exclusivamente en la componente terrígena del sedimento y, por lo tanto, reflejan la química de sus rocas fuente (Armstrong-Altrin, et al., 2015a, b; Greggio et al., 2018; Tawfik et al., 2018).

Garver et al. (1996) definieron niveles de Cr y Ni para inferir una posible procedencia de sedimentos. Propusieron que los sedimentos que tienen una concentración elevada de Cr (> 150 ppm) y Ni (> 100 ppm), y una relación alta entre ambos elementos ($Cr / Ni \Rightarrow 1.4$) revelan que la composición de la roca fuente es ultramáfica (Tapia Fernández, 2013).

El contenido de Cr y Ni en los sedimentos de Tamiahua varía de 2 a 4 ppm y de 0.6 a 1.5 ppm, respectivamente, estos valores son más bajos que en los sedimentos de Playa Norte (61-406 ppm y 10-61 ppm, respectivamente). La relación entre Cr y Ni para los sedimentos de Tamiahua y Playa Norte es de 3.97 y 9.91,

respectivamente, lo cual es significativo. Con base en lo estipulado por Garver et al., (1996), el contenido de Cr, Ni y la relación entre ambos elementos en Playa Norte revelan que los sedimentos proceden de una fuente ultramáfica, esto coincide con las localidades cercanas (Sierra de Chiapas y Sierra de Guatemala) que presentan este tipo de material. Por el contrario, Playa Tamiahua se deriva de la contribución de rocas de origen félsico, puesto que las concentraciones de Cr y Ni son muy bajas (Armstrong-Altrin et al., 2012; Hernández-Hinojosa et al., 2018; Lin et al., 2019).

Del mismo modo, las concentraciones de V y Sc también se pueden utilizar para interpretar las rocas fuente. Según McCann (1991), la concentración de V en los sedimentos es de aproximadamente 20 ppm. Los contenidos de V y Sc en los sedimentos de Playa Norte varían ampliamente (16-68 y 0.7-5.14 ppm, respectivamente), que son más altos que en los sedimentos de Tamiahua (5-8 y 0.5-0.9, respectivamente). Esta diferencia en el contenido de V y Sc entre los sedimentos de las dos playas indica una mayor proporción de detritos derivados de rocas intermedias o magnetita mineral detrítica en los sedimentos de Playa Norte.

5.3.5 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON

El coeficiente de correlación de Pearson es una prueba estadística utilizada para conocer si dos variables presentan alguna correlación o no. Cuando el valor obtenido es 0 indica que no hay asociación alguna entre las variables, cuando el valor es positivo indica que si existe correlación y cuando el valor es negativo revela que existe una asociación negativa, en otras palabras, es que a medida que una variable aumenta, la otra disminuye. Esta prueba se aplica para medir la magnitud y dirección de la asociación de elementos entre las áreas de Playa Tamiahua y Playa Norte. Las correlaciones de SiO₂ vs. Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, CaO, MgO y TiO₂, que reflejan el efecto de abundancia de cuarzo no son estadísticamente significativa para Playa Tamiahua ($r = -0.919, 0.130, 0.230, 0.220, 0.033$ y 0.280 , respectivamente; $n = 10$) ni para Playa Norte ($r = -0.659, -0.804, -0.714, -0.960, -0.930$ y 0.41 , respectivamente; $n = 10$). Del mismo modo, una correlación negativa

para SiO₂ con K₂O y Na₂O en Tamiahua (r = -0.804 y -0.845, respectivamente) y Playa Norte (r = -0.635 y -0.727, respectivamente) indican una similitud en las proporciones relativas de K-feldespato y plagioclasa entre las dos zonas de playa. Esto también se revela en la similitud en los contenidos de K₂O y Na₂O entre Playa Tamiahua (~ 1.39-1.80% en peso y ~ 1.08-1.29 % en peso, respectivamente) y Playa Norte (~ 1.526-2.081% en peso y ~1.04-1.538 % en peso, respectivamente). Una correlación significativa entre Al₂O₃ y K₂O para los sedimentos de Playa Tamiahua (r = 0.936) y Playa Norte (r = 0.969) indica que una proporción considerable de K está asociada con sedimentos o filosilicatos de grano fino. Al₂O₃ vs TiO₂ revela una correlación negativa para los sedimentos de Playa Tamiahua (r = -0.607, n = 10) y Playa Norte (r = -0.018, n = 10), lo que indica que TiO₂ no está asociado con arcillas aluminosas o que hay asociación con titanomagnetita e ilmenita, las cuales si se encontraron en los análisis de MEB.

Las correlaciones entre Al₂O₃ y Zr, Y, Sc, Co y Ni no son estadísticamente significativas para los sedimentos de Playa Tamiahua (r = 0.11, -0.45, -0.32, -0.27 y -0.13, respectivamente; n = 10), sin embargo, la correlación es positiva para los sedimentos de Playa Norte (r = 0.30, 0.50, 0.53, 0.57 y 0.72, respectivamente; n = 10). Esta variación en el coeficiente de correlación indica que los contenidos de Zr, Y, Sc, Co y Ni en los sedimentos de Playa Tamiahua están asociados con aluminosilicatos, mientras que en la Playa Norte estos elementos están asociados con minerales accesorios.

Las correlaciones de \sum REE con SiO₂, Al₂O₃, K₂O y Na₂O no son estadísticamente significativas para Playa Tamiahua (r = 0.052, -0.383, -0.532 y -0.446, respectivamente), ni para Playa Norte (r = 0.057, 0.373, 0.310 y 0.267, respectivamente), por lo tanto, no hay asociación de REE con cuarzo, aluminosilicatos ni feldespatos. Además, la correlación de \sum REE versus Cr, Co, Ni, U, V, Zn, Zr e Y es significativa para Playa Tamiahua (r = 0.509, 0.905, 0.411, 0.842, 0.840, 0.414, 0.845 y 0.961, respectivamente) y Playa Norte (r = 0.494, 0.942, 0.875, 0.894, 0.360, 0.897, 0.909 y 0.941, respectivamente), esto representa la asociación de REE con minerales accesorios.

Adicionalmente, se compararon los patrones REE de las rocas fuente probables ubicadas más cerca de las áreas costeras del sur del Golfo de México con los patrones REE de los sedimentos de Playa Tamiahua y Playa Norte (Figura 37). Los datos geoquímicos de rocas fuente como la andesita basáltica, la andesita, la dacita y la riolita se compilaron a partir de los artículos discutidos sobre terrenos como el Complejo Macizo de Chiapas, el Complejo Chuacús, el Complejo Oaxaqueño, el Terreno Cuicateco, el Cinturón Volcánico Mexicano y la Provincia Alcalina Oriental Mexicana (Figura 38). Los patrones de REE normalizados de la condrita de las arenas de la playa tienen una anomalía de Eu negativa distinta y son comparables con la UCC, pero las abundancias de REE se agotan en relación con la UCC. Esta comparación revela que los sedimentos de Playa Tamiahua y Playa Norte están dominados por detritos derivados de las rocas ígneas félsicas (dacita y riolita) y con poca influencia de las rocas de origen intermedio (andesita y andesita basáltica).

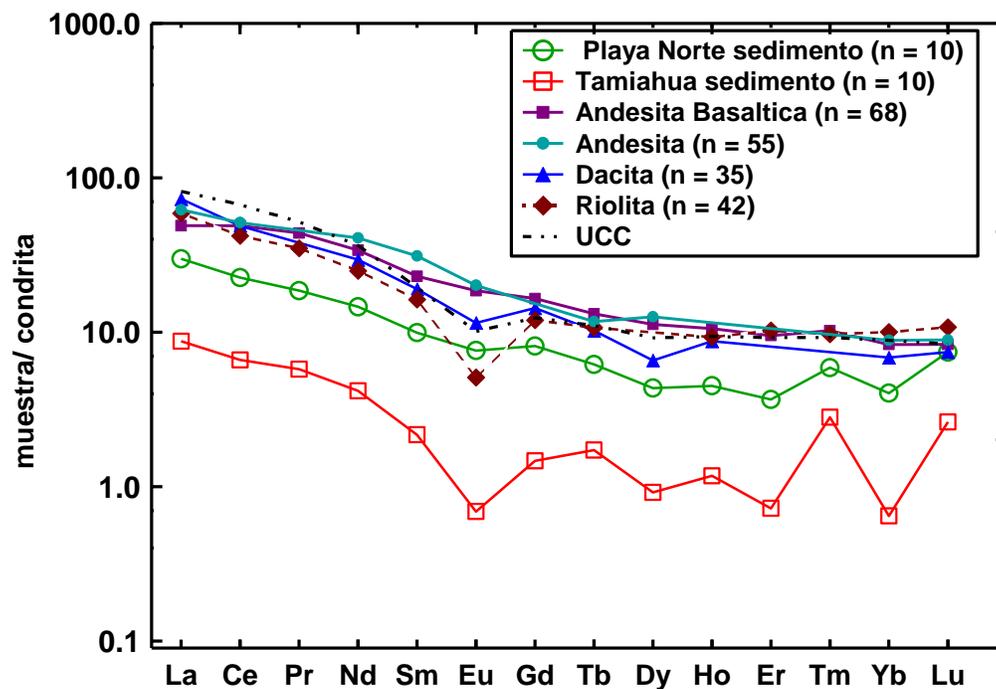


Figura 37. Comparación de los patrones de REE normalizados de condrita de las arenas de Playa Norte y Tamiahua con rocas fuente probables (andesita, andesita basáltica, dacita y riolita). Los datos de la geoquímica de las rocas son una compilación de diferentes regiones de los alrededores de las áreas de estudio, estas son: Complejo Macizo de Chiapas (datos de Weber et al., 2006, 2009; Witt et al., 2012), Complejo Chuacús (Solari et al., 2011), Complejo Oaxaqueño (Ortega-Obregón et al., 2014), Terreno Cuicateco (Pérez-Gutiérrez et al., 2009), Cinturón volcánico mexicano y Provincia alcalina oriental (Cantegrel y Robin, 1979; Ferrari et al., 2005; Nelson y Gonzales-Caver, 1992). UCC = corteza continental superior; n = número de muestras.

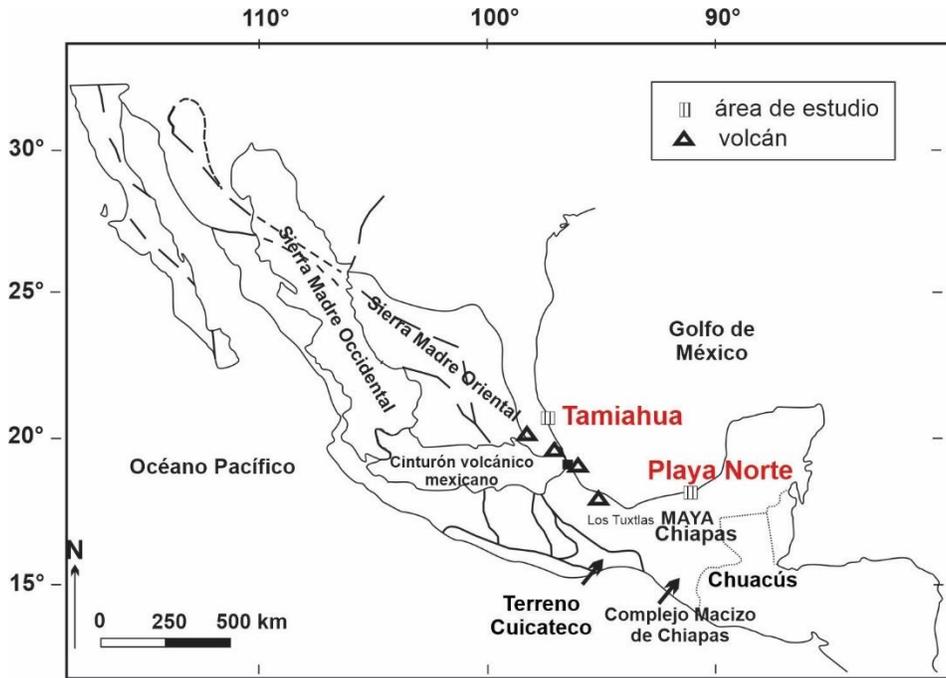


Figura 38. Mapa que muestra la ubicación de las áreas de playa y terrenos de México (Campa y Coney, 1983)

5.3.6 INTEMPERISMO

Los sedimentos al igual que los materiales sufren una respuesta adversa al ser expuestos a las condiciones climáticas, lo cual se refleja en cambios en su composición mineralógica y química. Estos cambios dependerán de la resistencia de los elementos al intemperismo. Para evaluar el grado de alteración de los materiales se ocupan distintos índices como son:

5.3.6.1 ÍNDICE DE ALTERACIÓN QUÍMICA (CIA)

Es un índice que mide la proporción de Al_2O_3 frente a los óxidos lábiles, es decir, interpreta el grado de conversión de feldspatos (los cuales predominan en la corteza superior) a arcillas como la caolinita.

$$CIA = \left[\frac{Al_2O_3}{(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)} \right] \times 100$$

Ecuación 10. CIA (Nesbitt y Young, 1982)

5.3.6.2 ÍNDICE QUÍMICO DE ALTERACIÓN (CIW)

Este índice fue propuesto por Harnois (1988) y al igual que la CIA, mide el grado de conversión de feldespatos a arcillas, sin embargo, la diferencia entre los dos parámetros es que en este índice no se toma en cuenta el K_2O , puesto que, el autor indica que este compuesto limita su aplicación a suelos y paleosuelos en los que el potasio ha sido lixiviado. De manera que, los resultados pueden arrojar valores muy altos para rocas ricas en feldespatos potásicos, independientemente de si están químicamente erosionadas o no (Price and Velbel, 2003).

$$CIW = \left[\frac{Al_2O_3}{(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)} \right] \times 100$$

Ecuación 11. CIW (Harnois, 1988)

5.3.6.3 ÍNDICE DE ALTERACIÓN DE PLAGIOCLASA (PIA)

Fedo et al. (1995) propusieron el índice de alteración de plagioclasa como una alternativa a la CIW. Debido a que la plagioclasa es abundante en rocas de silicato y se disuelve relativamente rápido, el PIA puede usarse cuando se necesita monitorear la meteorización por plagioclasa (Price and Velbel, 2003). Los valores de interpretación son similares a los de CIA: valores de 50 son para minerales poco alterados y valores cercanos a 100 son para minerales arcillosos como la caolinita, illita y gibbsita.

$$PIA = \left[\frac{Al_2O_3 - K_2O}{(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)} \right] \times 100$$

Ecuación 12. PIA (Fedo et al., 1995)

Para el caso de estos índices, el valor de CaO^* representa la cantidad solo en silicatos ya que, se considera que el contenido de Ca en los sedimentos de aguas marinas se deriva del contenido inorgánico de carbono y de sodio, que está

asociado con la sal marina. Para calcular el contenido de CaO* en la fracción de silicato se utiliza la ecuación:

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

$$CaO^* = CaO_{trg} = Al_2O_3 * (CaO / Al_2O_3)UCC$$

t = la abundancia total en la muestra

trg = terrígenos

Ecuación 13. Carbonatos en sedimentos marinos (Murray y Leinen, 1996)

En la Tabla 20 se muestran los valores de CIA, PIA y CIW para las dos playas. De acuerdo con los niveles de CIA para Playa Norte, el grado intemperismo es bajo, puesto que, los valores obtenidos van de 31.85 hasta 59.85, de modo que puede haber minerales como feldspatos potásicos, anortita y albita; además el amplio rango de CIA se debe a la variación de los granos. Playa Tamiahua presenta intemperismo un poco más alto con valores de CIA que van desde 58.98 hasta 60.39 y de acuerdo con estos valores, las muestras pueden presentar minerales de tipo anortita.

Tabla 20. Índices de intemperismo

Muestra	CIA	CIW	PIA
P1	53.82	66.24	56.11
P3	59.85	76.32	67.33
P5	31.85	35.85	26.65
P7	39.32	45.72	35.16
P9	41.03	48.06	37.32
P11	48.64	58.83	47.92
P13	24.96	27.38	19.58
P15	36.18	40.83	32.10
P17	53.31	65.63	55.31
P19	44.83	53.16	42.47
T2	58.98	73.45	64.82
T3	59.23	72.92	64.78
T4	59.30	72.87	64.82
T8	60.39	74.17	66.53
T10	59.40	72.89	64.93
T11	60.14	74.06	66.25
T13	59.28	73.48	65.13
T14	59.14	73.67	65.10
T16	59.69	74.91	66.33
T19	59.77	74.40	66.10

Los resultados de CIW son muy similares a los de CIA, sin embargo, están ligeramente por encima del CIA, esto es porque las muestras contienen feldespatos potásicos los cuales aumentan el valor de CIW. Por último, el PIA también presenta valores parecidos a los del CIA, con lo cual se confirma el intemperismo bajo-medio de las muestras, esto indica que posiblemente la fuente de los sedimentos de Playa Norte sea entre medio y cercana, mientras que los sedimentos de Playa Tamiahua sean ligeramente más lejanos.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por DRX, los cuales indican minerales como feldespatos potásicos, plagioclasas y anfíboles en las muestras de Playa Norte. Para Playa Tamiahua ocurre lo mismo, puesto que se encontraron cuarzos, plagioclasas, feldespatos potásicos, anfíboles e illitas.

5.3.7 CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS

Los estudios de acumulación, enriquecimiento y contaminación en los sedimentos por metales pesados son de importancia ya que ofrecen información sobre la dinámica, transporte e interacción del contaminante con el medio. Para evaluar el estado de los sedimentos se utilizan diversos factores que indican una posible acumulación o contaminación por algún metal.

El factor de enriquecimiento (FE) es uno de los parámetros más utilizados, puesto que denota la relación entre la concentración del elemento respecto al promedio de dicho elemento en la corteza terrestre. En la Tabla 21 se presentan los FE de las dos playas en estudio. Playa Norte presenta 4 elementos con enriquecimiento: arsénico, cromo, cobre y estroncio de los cuales arsénico y cromo presentan los valores más altos mientras que Playa Tamiahua solo presenta 2 enriquecimientos, arsénico y cadmio.

Diversos estudios (Villanueva y Vazquez Botello, 1992; Hansen et al., 1995) hablan de que el Cd se puede encontrar de manera natural en minerales como la grenoquita (CdS) la cual está asociada a la esfalerita (ZnS), sin embargo, este mineral es muy

poco probable encontrarlo. La fuente antropogénica de este elemento proviene de industrias como la minería, plásticos, electrónica, fertilizantes de fosfato y depuración de lodos.

El arsénico proviene principalmente de minerales de sulfuro como la arsenopirita, arsenolita, gases volcánicos y manantiales geotermales, su fuente antropogénica viene de la industria metalúrgica, petrolera y pesticidas principalmente (Hansen et al., 1995).

La presencia natural del cromo en la corteza terrestre se encuentra como cromita (FeCr_2O_4) y eskolaita (Cr_2O_3). Industrialmente se utiliza en la industria metalurgia, de pinturas, cerámicos, textiles, fungicidas y refinería (Vazquez Botello et al., 2014).

El cobre está presente en minerales como bornita (Cu_5FeS_4), calcopirita (CuFeS_2), calcocita (CuS_2), covelita (CuS) y enargita (Cu_3AsS_4), también se encuentra en aguas naturales como elemento traza; como fuente antropogénica proviene de la minería, pesticidas, pirometalurgia y microeléctrica (Estrada Omaña, 2007).

De manera natural se puede encontrar al estroncio en minerales como la celestita (SrSO_4), y la estroncianita (SrCO_3) y dentro de la industria se utiliza en pirotecnia, pinturas, electrónica y minería (Hansen et al., 1995).

De acuerdo con los resultados obtenidos en Playa Norte para As, el enriquecimiento por este metal es muy variado, el rango va desde 6.70 hasta 53.05 ppm, lo cual muestra la diversidad de procedencia de los sedimentos; los valores bajos de 6.70 hasta 17.67 ppm indican un enriquecimiento moderado, los valores a partir de 20 hasta 34.69 ppm muestran un alto enriquecimiento y el valor de 53.05 ppm denota un enriquecimiento extremo, este último valor es de riesgo para la zona y sus alrededores. Para Cr y Cu los valores son más bajos, mostrando un enriquecimiento moderado en todas las muestras. Sr es el elemento menos enriquecido, puesto que sus valores van de 0.95 a 4.15 ppm, lo cual indica un enriquecimiento pobre. Los factores de enriquecimiento de estos valores sugieren una combinación de procedencia natural y antropogénica, sin embargo, As y Cu apuntan a una mayor concentración provenientes de actividades antropogénicas.

Tabla 21. Valores del factor de enriquecimiento en sedimentos de Playa Norte (izquierda) y Playa Tamiahua (derecha) en ppm

Muestra	As	Cr	Cu	Sr	Muestra	As	Cd
PN1	23.76	15.61	18.04	2.09	T2	4.57	13.32
PN3	12.53	13.15	10.6	1.16	T3	4.16	17.67
PN5	17.16	4.61	0.46	4.15	T4	2.49	17.36
PN7	53.05	14.54	14.56	2.68	T8	2.7	19.09
PN9	18.64	6.61	8.43	3.47	T10	2.25	20.63
PN11	32.22	9.53	23.67	3.86	T11	1.8	13.76
PN13	34.69	5.42	0.41	4.12	T13	3.08	16.82
PN15	17.67	8.53	6.88	4.08	T14	2.2	13.48
PN17	17.62	11.72	9.13	1.98	T16	3.26	11.74
PN19	6.7	2.05	3.34	0.95	T19	2.85	12.47

En Playa Tamiahua, los únicos elementos que presentaron enriquecimiento fueron arsénico y cadmio. As presentó valores relativamente bajos (1.80-4.57 ppm) y, por lo tanto, un enriquecimiento pobre. Para Cd se presenta un enriquecimiento moderado con un rango de 11.74 a 20.63 ppm.

El índice de geoacumulación es otro parámetro utilizado para determinar el grado de contaminación en sedimentos respecto a la concentración de metales presentes. En lo que respecta al índice de geoacumulación (I_{geo}) los valores para Playa Norte se muestran en la Tabla 22. Acorde a lo descrito por Müller (1969), Sr, Pb y Ni presentan una contaminación baja dado que sus valores se encuentran por debajo de 1 ppm; Cu y Cr muestran una moderada contaminación puesto que el rango va de 0-3.98 ppm para Cu y 0.45-3.38 ppm para Cr; por último, la contaminación por As es muy alta debido a que se encontraron valores de hasta 5.14 ppm.

Los I_{geos} encontrados en Playa Tamiahua fueron para los elementos arsénico y cadmio (igual que en FE). El As tiene valores desde 0.26 hasta 1.61 ppm, dichos valores denotan una contaminación baja, mientras que para Cd el rango es de 2.97-3.79 ppm, por lo que representa una alta contaminación en la zona.

La variabilidad de los rangos en el I_{geo} puede corresponder a factores como el clima, la disolución-precipitación y la erosión, los cuales permiten la reducción o concentración de ciertos elementos (Castro-González et al., 2019).

Tabla 22. Valores del índice de geoacumulación para Playa Norte (izquierda) y Playa Tamiahua (derecha) en ppm

Muestra	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Sr	Muestra	As	Cd
PN1	3.99	3.38	3.59	0.48	0.75	0.48	T2	1.61	3.15
PN3	3.06	3.13	2.82	0	0.21	0	T3	1.47	3.56
PN5	3.52	1.62	0	0.16	0.27	1.47	T4	0.73	3.53
PN7	5.14	3.28	3.28	0.05	0.38	0.84	T8	0.85	3.67
PN9	3.64	2.14	2.49	0.33	0.71	1.21	T10	0.58	3.78
PN11	4.42	2.67	3.98	0.99	1.19	1.36	T11	0.26	3.2
PN13	4.53	1.85	0	0.06	0	1.46	T13	1.04	3.49
PN15	3.56	2.51	2.2	1.09	0.55	1.44	T14	0.55	3.17
PN17	3.55	2.97	2.61	0.35	0.53	0.4	T16	1.12	2.97
PN19	2.16	0.45	1.15	0	0	0	T19	0.93	3.06

Con el fin de evaluar los efectos biológicos adversos de los metales en los sedimentos para los organismos acuáticos, se utilizaron SQG (Sediment Quality Guidelines). Esta guía categoriza el impacto en: efectos de rango bajo (ERL), cuando se producen efectos biológicos adversos en menos del 10% de los organismos y efectos de rango medio (ERM) donde se considera una toxicidad para los organismos en más del 75% de la población (Long et al., 1995; Zhang et al., 2016).

Por otro lado, en la normatividad mexicana no existen límites máximos permisibles para metales en sedimentos, de manera que, los resultados obtenidos se compararon con la Guía Canadiense de Calidad de los Sedimentos para la Protección de la vida Acuática (CEQG, por sus siglas en inglés, CCME, 2001) y con los límites establecidos por Long et al., 1995 (Tabla 23). Dentro de la guía canadiense existen dos niveles: efecto umbral (TEL) y efecto probable (PEL). Por debajo del TEL, los efectos adversos ocurren rara vez, entre el TEL y el PEL los efectos adversos son ocasionales y por encima del PEL los efectos adversos ocurren de manera frecuente. Para el caso de las concentraciones de Long, es el

mismo principio, hay 2 rangos: efecto de rango bajo (ERL) y efecto de rango medio (ERM).

Tabla 23. Límites de metales en sedimentos en ppm (Long et al., 1995; CCME, 2001)

Elemento	CEQG		Long	
	TEL	PEL	ERL	ERM
As	7.24	41.6	8.2	70
Cd	0.07	4.2	1.2	9.6
Cr	52.3	160	81	370
Cu	18.7	108	34	270
Pb	30.2	112	46.7	218
Zn	124	271	150	410

Considerando los valores de SQG y de CEQG se cotejaron con los valores obtenidos en las muestras de sedimentos de las dos áreas de estudio (Tabla 24). El As en Playa Norte se encuentra en el rango de TEL y ERL de las dos guías, esto es, que los efectos adversos a la biota son poco probables y la toxicidad sería baja; para los casos de Cd, Pb y Zn no existen concentraciones considerables para una posible toxicidad; del lado contrario, las concentraciones del Cr y Cu son bastante altas (62-407 ppm), la mayoría de ellas se encuentran clasificadas como PEL y ERM de acuerdo a las guías, la toxicidad en la zona por estos metales es alta y la probabilidad de que ocurran efectos adversos en los organismos de la zona es muy probable. Adicionalmente, existen diversos estudios toxicológicos realizados en la fauna marina, los cuales demuestran la contaminación por estos elementos (Veléz & Botello, 1992; Botello, 2005; De la Cruz et al., 2013; Aguilar-Ucán et al., 2014).

Todos los elementos anteriormente mencionados, en Playa Tamiahua se encontraron en muy bajas concentraciones, lo cual indica que no existe toxicidad ni probabilidad de efectos adversos a la biota en la zona de estudio.

Tabla 24. Concentraciones de metales en sedimentos de Playa Norte y Playa Tamiahua (ppm)

Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
PN1	10.9	< 0.01	407	138.3	13.1	41.1
PN3	6.0	< 0.01	358	84.9	9.5	28.4
PN5	7.4	< 0.01	113	3.3	8.8	16.5
PN7	25.7	< 0.01	399	117.6	10.7	26.9
PN9	8.5	< 0.01	171	64.2	12.7	27.8
PN11	17.0	< 0.01	284	207.6	20.4	56.1
PN13	17.0	< 0.01	151	3.3	7.9	11.8
PN15	11.6	< 0.01	316	75.0	16.3	40.4
PN17	8.8	< 0.01	332	76.0	12.3	31.0
PN19	3.5	< 0.01	62	29.5	4.4	8.1
T2	2.1	0.4	0.3	0.8	0.8	2.1
T3	1.8	0.5	0.4	0.9	1.0	3.6
T4	1.1	0.5	0.4	0.9	1.0	3.7
T8	1.3	0.6	0.4	1.0	1.1	4.2
T10	1.0	0.6	0.4	0.8	0.9	2.9
T11	0.8	0.4	0.3	0.7	0.8	2.0
T13	1.4	0.5	0.4	0.9	1.0	2.8
T14	1.0	0.4	0.4	0.9	1.0	8.3
T16	1.7	0.4	0.4	0.8	1.0	2.3
T19	1.4	0.4	0.4	0.8	0.8	2.0

Por último Long (1995) también creó un índice que relaciona la concentración de todos los metales para conocer su toxicidad en conjunto, en la Tabla 25, se muestran los resultados obtenidos. Los sedimentos de Playa Tamiahua presentan baja probabilidad de toxicidad hacia los organismos, mientras que 8 de las 10 muestras de Playa Norte tienen una alta probabilidad de toxicidad adversa en los organismos residentes en la zona.

Tabla 25. Valores de m-ERM-Q obtenidos en los sedimentos de Playa Norte y Playa Tamiahua

Muestra	m- ERM- Q
PN1	2.3
PN3	1.9
PN5	0.9
PN7	2.5
PN9	1.8
PN11	2.4
PN13	1.9
PN15	2.0
PN17	1.6
PN19	0.4
T2	0.1
T3	0.1
T4	0.1
T8	0.1
T10	0.1
T11	0.1
T13	0.1
T14	0.1
T16	0.1
T19	0.1

5.4 GEOQUÍMICA Y GEOCRONOLOGÍA U-Pb EN CIRCONES

5.4.1 GEOQUÍMICA DE CIRCONES

El análisis de los circones detríticos sirve de aporte en los estudios de procedencia, puesto que, presentan una alta resistencia al intemperismo químico y se encuentran en casi todos los depósitos sedimentarios, además, el análisis de circones por el método de geocronología U-Pb se considera confiable para la determinación de la procedencia de sedimentos, especialmente para la identificación de regiones fuente a gran escala. Adicionalmente este mineral puede incorporar a su estructura elementos traza como el Ti, Y, Nb, Hf, Pb, Th y U los cuales se consideran indicadores potenciales de las rocas madres (Tapia-Fernández et al., 2017; Cheng et al., 2017).

En el Anexo 3 se muestran los valores obtenidos de elementos traza y tierras raras de Playa Norte. Al analizar los datos se puede observar que hay mayor concentración de tierras raras pesadas (HREE: Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu) que ligeras (La, Ce, Pr y Nd) y medias (MREE: Sm, Eu, Gd y Tb), este enriquecimiento de HREE es característico de circones de origen ígneo (Hoskin y Ireland, 2000).

Por otro lado, Hoskin y Schaltegger (2003) reportaron que concentraciones menores a 50 ppm para Ce representan a los circones ígneos; al cotejar los valores obtenidos para este elemento en los sedimentos de Playa Norte se observa que la mayoría de los circones presentan concentraciones menores al establecido.

Otra forma de evaluar el origen de los circones es con la relación Th/U vs la edad del circón. Rubatto (2002) propone que si la relación es mayor a 0.1 el origen será ígneo y, por el contrario, si la relación es menor a este valor el origen es metamórfico. La Figura 39 muestra la relación Th/U de los circones de Playa Norte, en ella se puede ver que existen circones tanto ígneos como metamórficos, sin embargo, la mayoría son de origen ígneo.

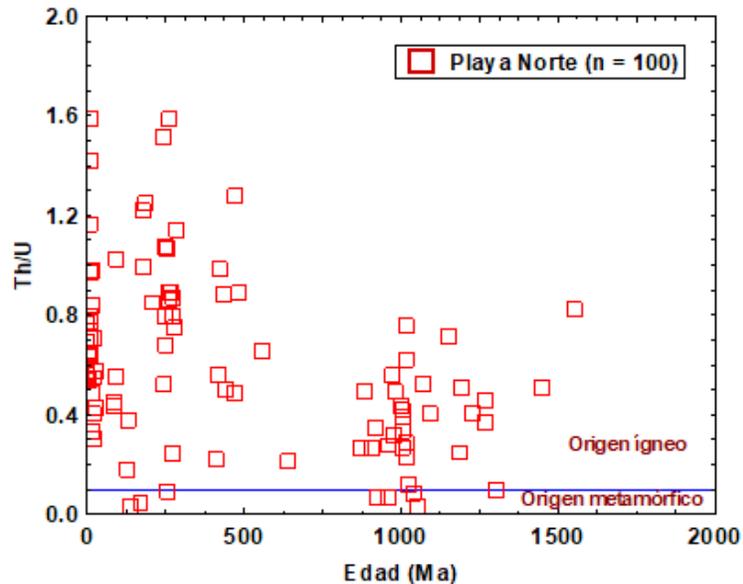


Figura 39. Relación Th/U contra edades de circones detríticos de Playa Norte (Rubatto, 2002)

Los resultados de la geoquímica de los circones detríticos de Playa Norte se normalizaron con condrita para ver el comportamiento de cada elemento. Estos se separaron de acuerdo con su edad y era, por lo que se obtuvieron 4 gráficas correspondientes a las eras Cenozoica, Mesozoica, Paleozoica y Proterozoica (Figura 40). La era con el mayor número de circones fue la Proterozoica con 35 circones, después le siguió la Cenozoica con 27, Paleozoica con 21 y Mesozoica con 1.

Por otro lado, como ya se había mencionada anteriormente, el contenido de HREE es mayor que el de LREE, lo cual se observa claramente en las gráficas. Al mismo tiempo se denota la anomalía negativa de Eu, que de acuerdo con distintos autores (Hoskin y Ireland, 2000; Zavala-León, 2018) es indicio de condiciones reductoras durante la cristalización del circón a partir del magma y la anomalía positiva de Ce es característica de circones ígneos inalterados (Hoskin y Schaltegger, 2003).

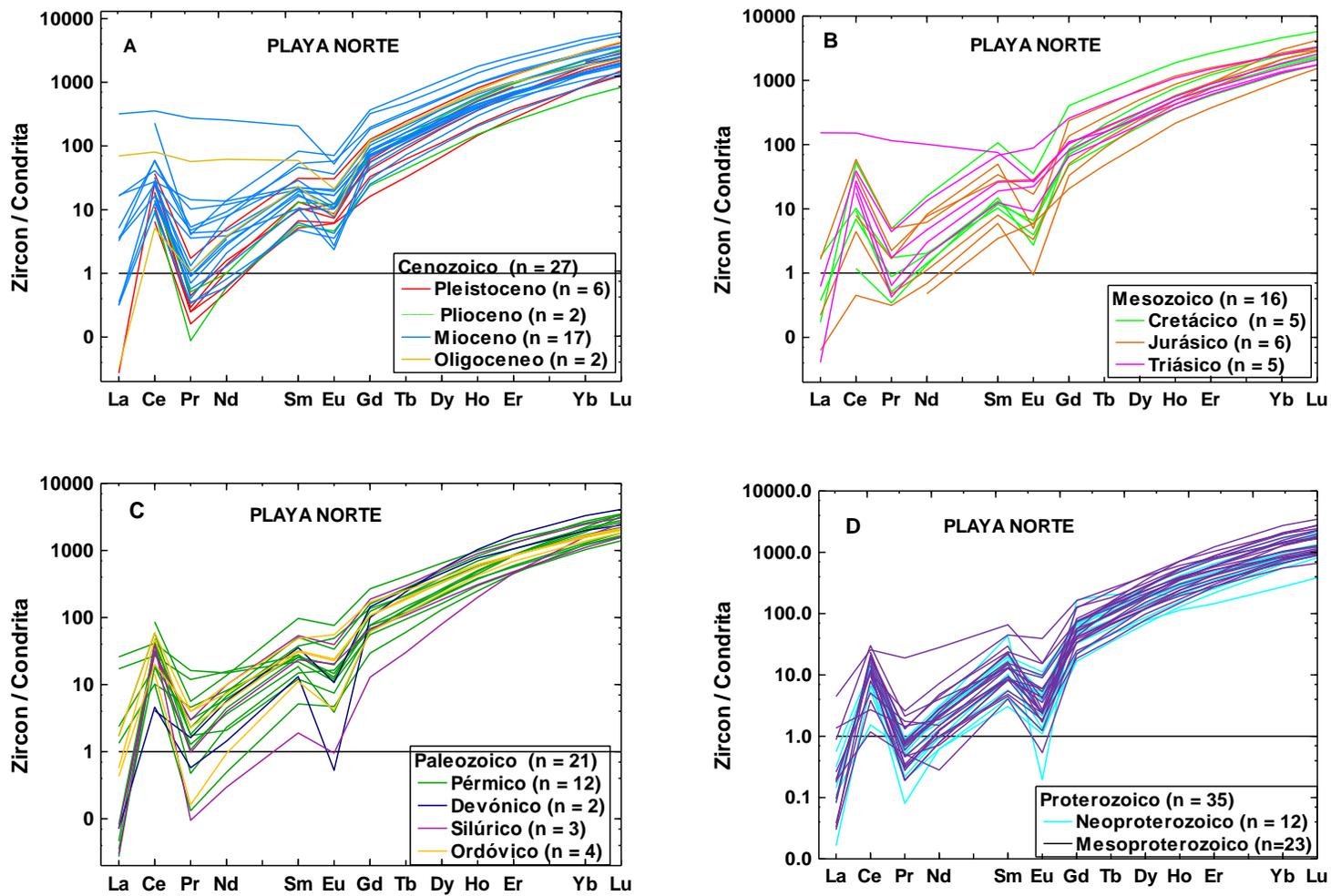


Figura 40. Diagrama multielemental de elementos traza normalizados con condrita de los circones detríticos de Playa Norte (Taylor y McLennan, 1985)

Al graficar Th/U vs la edad (Figura 41) para Playa Tamiahua, se muestra claramente que todos los circones son de origen ígneo, a excepción de un circón que tiene procedencia metamórfica.

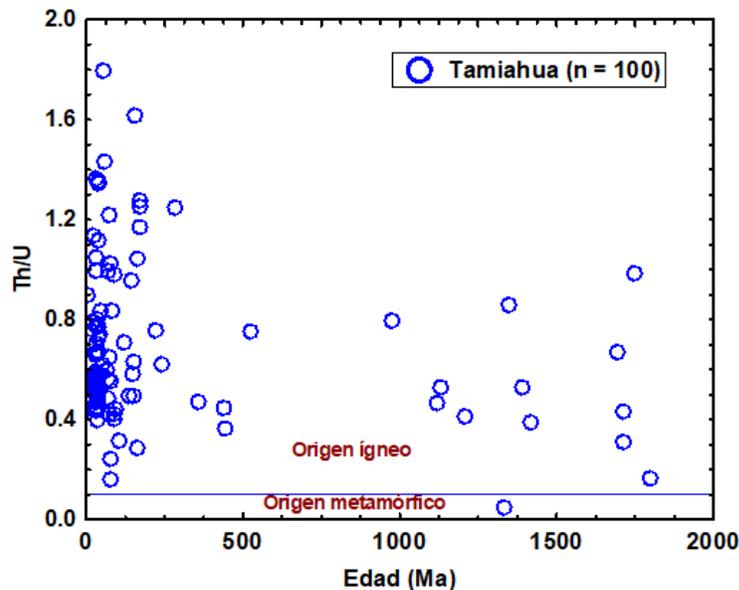


Figura 41. Relación Th/U contra edades de circones detríticos de Playa Tamiahua Rubatto, 2002)

Comparando el origen de los circones de las dos playas de estudio, se puede ver claramente que Playa Tamiahua presenta una distribución más uniforme mientras que Playa Norte exhibe una mayor dispersión.

Por otra parte, los resultados de la geoquímica de los circones de Playa Tamiahua se presentan en el Anexo 4. Al igual que Playa Norte, la concentración de HREE es mayor que la de LREE, lo que representa el origen ígneo de los circones. En los diagramas de normalización con condrita para Playa Tamiahua (Figura 42) se aprecia que la mayor concentración de circones está en el Cenozoico con 51 circones, después está el Mesozoico con 31 circones, Proterozoico con 13 y Paleozoico con 5, esto indica que los circones de edad cenozoica son los que aportan la mayor cantidad de detrítos. Las anomalías negativas de Eu y las positivas de Ce que se muestran en los diagramas son distintivas de circones ígneos sin alteraciones (Armstrong-Altrin et al., 2018).

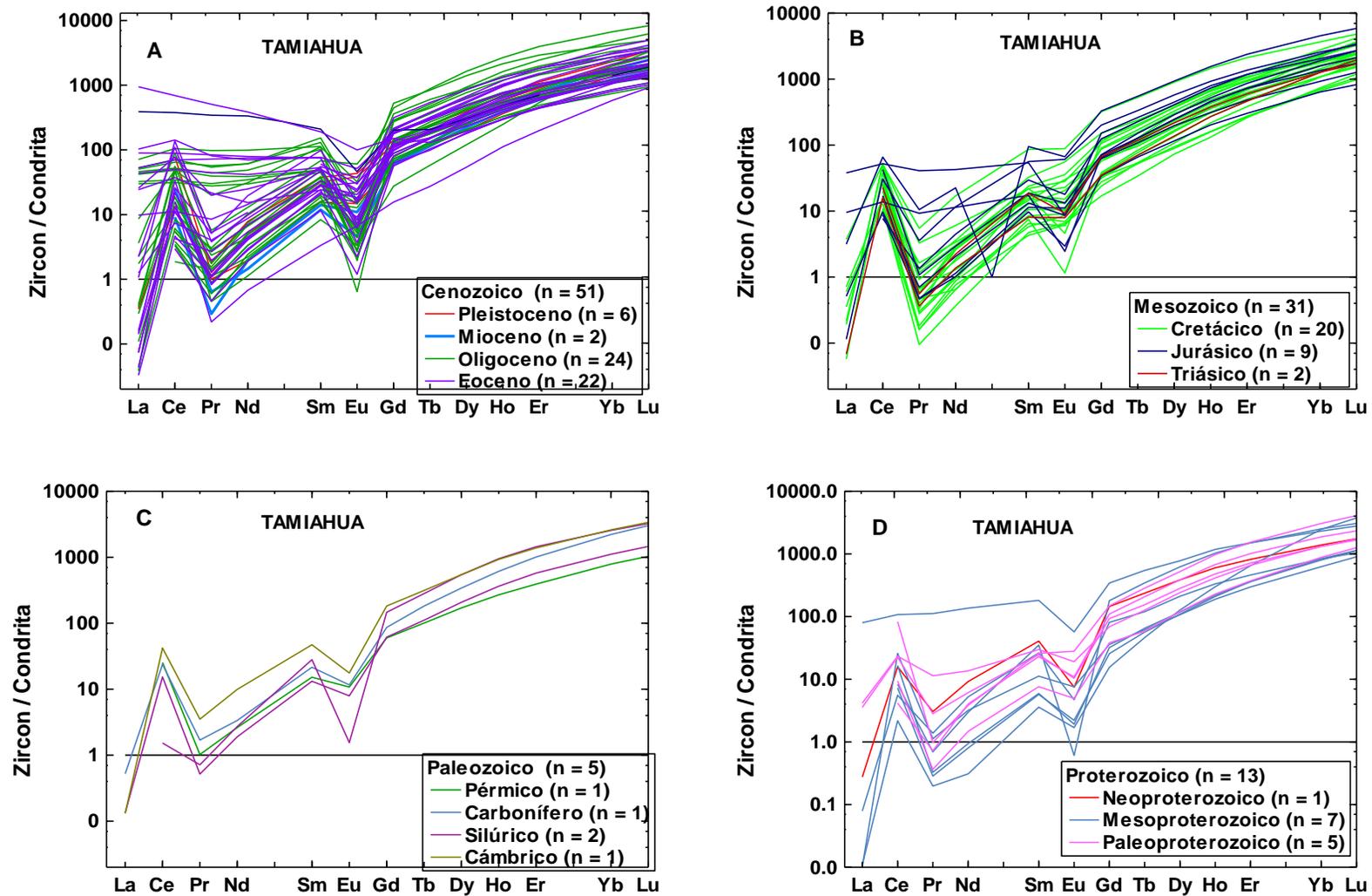


Figura 42. Diagrama multielemental de elementos traza normalizados con condrita de los circones detríticos de Playa Tamiahua (Taylor y McLennan, 1985)

5.4.2 GEOCROLOGÍA U-Pb DE CIRCONES

Para determinar la edad de las muestras se analizaron 100 circones de cada playa, sin embargo, algunos circones fueron descartados por su alta discordancia (< 30%), en específico, 18 circones de Playa Norte y 21 de Playa Tamiahua fueron descartados. Autores como Guillong et al., (2014) y Gong et al., (2016) sugieren descartar los circones con una discordancia mayor al 30%, esto con el fin de disminuir la incertidumbre de la edad corregida. En el Anexo 5 se muestran los resultados de los análisis; en la parte izquierda de la tabla se indican las relaciones $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ y $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, las cuales se utilizaron para crear los diagramas de concordia; en la parte derecha de la tabla se muestran las edades de los circones junto con la desviación estándar y el porcentaje de discordancia. Todos los diagramas obtenidos se construyeron sin los circones discordantes.

Con los resultados obtenidos se trazó el diagrama de concordia (Figura 43) y el histograma de distribución de edades (Figura 44).

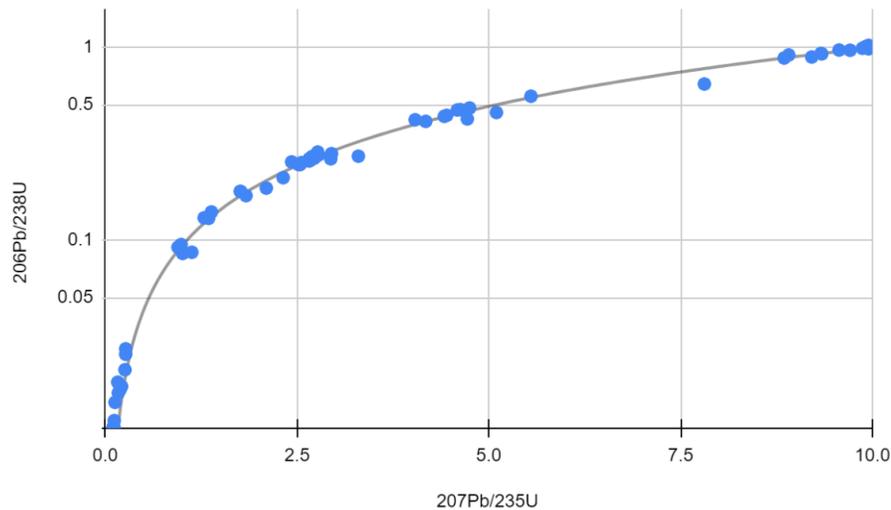


Figura 43. Diagrama de concordia de circones detríticos de Playa Norte

Adicionalmente, las edades de los circones se separaron de acuerdo con la escala temporal geológica y se obtuvo lo siguiente: 47 circones pertenecen al Eón Fanerozoico, de los cuales 11 son de la Era Cenozoica (<66 Ma), 16 de la Era Mesozoica (<252 Ma) y 20 de la Era Paleozoica (<541 Ma); y los 35 circones restantes corresponden al Eón Precámbrico y a la Era Proterozoica (<2500 Ma).

Para encontrar las áreas fuentes probables de los sedimentos su curva de probabilidad se comparó con datos reportados en la literatura, estos se presentan a continuación:

Los circones más jóvenes encontrados en Playa Norte fueron aquellos con un rango de edad de 10.55-27.05 Ma, estos pueden relacionarse con el Macizo de Chiapas. En esta región abundan rocas intrusivas y volcánicas cenozoicas con estas edades (Molina-Garza et al., 2015).

Circones con edades entre 216 y 286 Ma son afines con intrusiones de granitoides del Pérmico y rocas metasedimentarias pertenecientes al Macizo de Chiapas (Weber et al., 2008). Además, hay información de circones con edades de 230 a 270 Ma también del CMC (Witt et al., 2012). Por otro lado, cabe destacar que el río Grijalva se origina en el estado de Chiapas y el cual aporta importantes cantidades de sedimentos a la Laguna de Términos y por ende, a Playa Norte (Tapia-Fernández et al., 2017; Zavala-León, 2018).

En cuanto a los circones más longevos, con edades entre 554 a 1552 Ma son abundantes en los intrusivos del Macizo de Chiapas y pertenecen a los periodos ordovícios y silúricos. Sin embargo, algunos de estos pueden ser parte de sedimentos reciclados que se derivan del Complejo Chuacús, los cuales probablemente fueron transportados por medio del río Usumacinta (Estrada-Carmona, 2009, 2012; Weber et al., 2008; Tapia Fernández, 2017). Los circones con edades entre 950 y 1250 Ma se pueden asociar a las rocas sedimentarias cenozoicas del cinturón plegado de Chiapas, los cuales contienen circones con estas edades (Ortega-Flores et al, 2018).

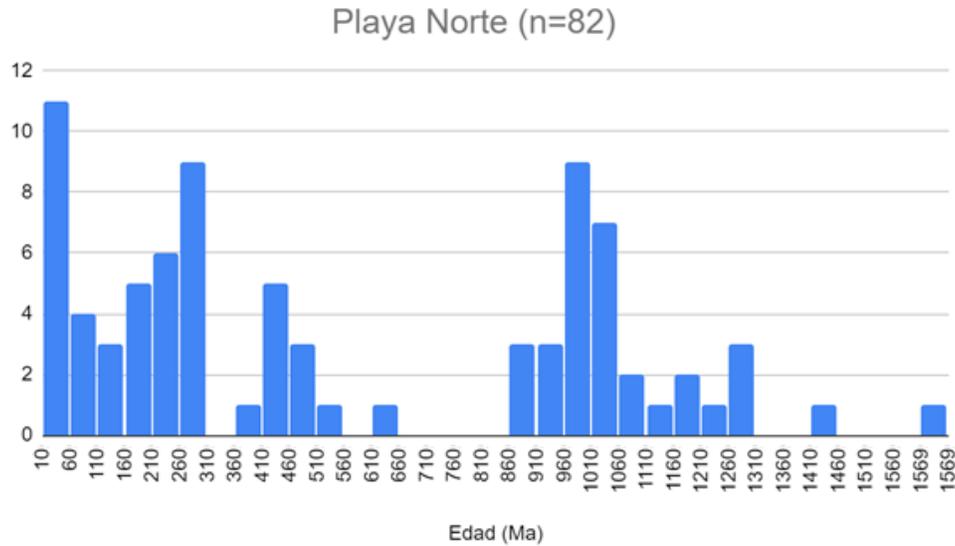


Figura 44. Histograma de distribución de edades para los sedimentos de Playa Norte,

Para el caso de Playa Tamiahua, los resultados de las edades y las relaciones U-Pb se presentan en el Anexo 6, en ella se observan algunas muestras en rojo, las cuales indican que al poseer un porcentaje elevado de discordia no se tomaron en cuenta (21 circones). Igualmente, se presenta el diagrama de concordia (Figura 45) y el histograma de distribución de edades (Figura 46). A diferencia de Playa Norte, esta playa se distingue por tener más circones cenozoicos y menos poblaciones con edades más viejas.

De los 79 circones, se encontró que 66 pertenecen al Eón Fanerozoico, dentro de este, 30 circones con edades entre 22.09 y 37.8 Ma pertenecen a la era Cenozoica, 31 son de la era Mesozoica con edades entre 72.51 y 240.4 Ma y 5 son de la era Paleozoica con edades de 283.9 a 524.5 Ma. El resto de los circones pertenecen a Eón Precámbrico y a la era Proterozoica (n=13), las edades de estos circones van desde 976 hasta 1714 Ma.

Los resultados también revelan una baja diversidad de edades con un pico significativo en el histograma de 30 Ma y tres picos de menor tamaño en los rangos de 60-80 Ma, 1100-1300 Ma y 1600-1700 Ma.

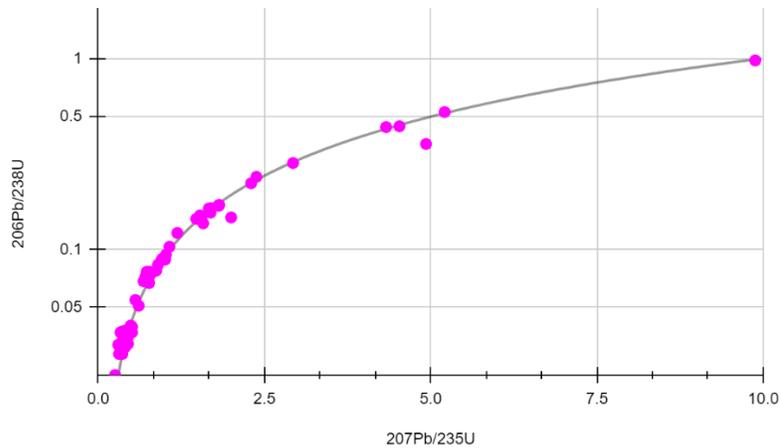


Figura 45. Diagrama de concordia de circones detríticos de Playa Tamiahua

Para evaluar la procedencia de los circones de Playa Tamiahua se compararon las edades obtenidas con circones registrados en la literatura, a continuación, se muestran los resultados:

Los circones de menor edad se pueden adjudicar a la Provincia Alcalina Oriental Mexicana (PAOM) que se ubica en la parte central de Tamaulipas, puesto que los circones de esta región presentan edades muy jóvenes pertenecientes al Cenozoico (Armstrong-Altrin et al., 2018). Adicionalmente, algunos estudios realizados en circones de Playa Miramar, localizada al norte de Tamaulipas, revelan edades entre 27 y 45.9 Ma en la mayoría de ellos, de los cuales proponen una procedencia de la PAOM (Paulín Zavala, 2020). Por otro lado, Ferrari et al., (2005), registró circones cenozoicos en el área de Cerro Azul, Veracruz, al oeste de Playa Tamiahua con rangos de edad de 5 a 23.03 Ma, correspondientes a roca volcánica de la Sierra Madre Oriental.

Por último, diversos estudios (Stewart et al., 1999; Rubio-Cisneros y Lawton, 2011; Trainor et al., 2011) realizados en la zona de Ciudad Victoria y el Valle de Huizachal, Tamaulipas revelan circones con edades de 1018 a 1300 Ma, correspondientes a granos Grenvillianos derivados de Gondwana (Novillo Gneiss), granos paleozoicos de edades entre 300-450 Ma que provienen de rocas peri-Godwánicas acrecionadas, granos permo-triásicos de edades de 200 a 300 Ma correspondientes

a rocas volcánicas y plutónicas del arco oeste de Pangea; y granos jurásicos procedentes del arco de Naza con edades de 199-164 Ma.

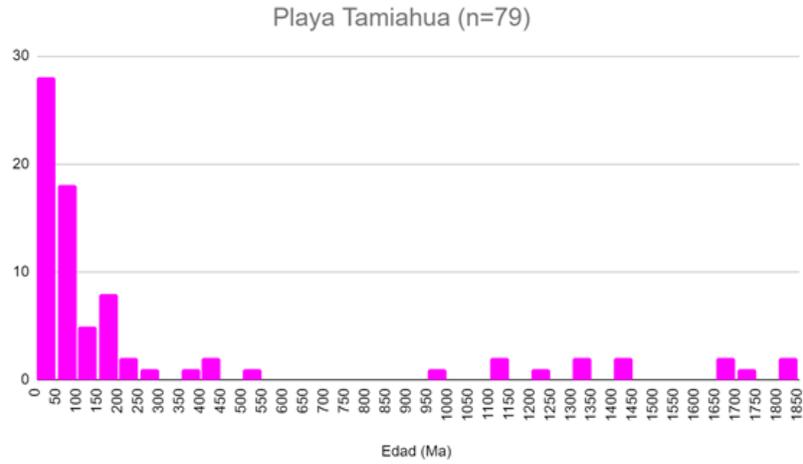


Figura 46. Histograma de distribución de edades para los sedimentos de Playa Tamiahua.

VI. CONCLUSIONES

Los resultados granulométricos de Playa Norte indicaron que los sedimentos presentan bajo dinamismo por las partículas finas, también se muestra que están moderadamente clasificadas y por tanto su transporte ha sido moderado, además existe exceso de material grueso por los fragmentos de conchas y moluscos provenientes de la zona carbonatada. En Playa Tamiahua se encontraron que las arenas son finas bien clasificadas, con esto se expone un nivel bajo de energía en la zona, pero con un prolongado transporte de los sedimentos. Además, se encontró que los sedimentos tienden hacia las partículas gruesas, al igual que Playa Norte, esto se debe a los fragmentos carbonatados provenientes de los arrecifes cercanos.

En los resultados de Microscopía Electrónica de Barrido, Playa Norte mostró tamaños de granos muy variados de formas angulares y de baja esfericidad; en el análisis de granos específicos se encontraron cuarzos, calcitas, cromitas, feldespatos potásicos y restos orgánicos. Por su lado, en Playa Tamiahua se encontraron granos de circones, titanomagnetitas, plagioclasas e ilmenita; además, en las fotomicrografías se observó que los granos presentan una morfología subredondeada de baja esfericidad.

En los análisis de DRX, los resultados de Playa Norte muestran la presencia de minerales como cuarzo, calcita, aragonita, andesita, filosilicatos tipo mica-illita y feldespato potásico tipo ortoclasa y en menor proporción actinolitas, filosilicatos tipo cloritas y piroxenos de tipo enstatitas. De acuerdo con la literatura, los sedimentos siliciclásticos resultan principalmente del Macizo de Chiapas y Guatemala y algunos de la Sierra de Chuacús, los cuales fueron arrastrados por medio del río Usumacinta. Para el caso de Playa Tamiahua, se encontró cuarzo, calcita, plagioclasa de composición intermedia, ortoclasa y actinolita. La provincia litológica de la cual proceden los sedimentos es la Sierra Madre Oriental, la Provincia Alcalina Oriental Mexicana y el Novillo de Gneis.

De acuerdo con los elementos mayores, Playa Norte está compuesta principalmente de carbonatos y con bajas concentraciones de minerales pesados. Por otro lado, la procedencia de los sedimentos es una combinación entré félsica y cuarzosa de acuerdo con la relación Al_2O_3/TiO_2 . En el caso de los elementos traza, la playa posee diversos elementos como el As, Ba, Cr, Cu, Mn, Rb y Sr en altas concentraciones, los cuales se asocian a la aportación antropogénica de diferentes industrias (minera, petrolera, plásticos, aguas residuales), sin embargo, Cr y Cu también se relacionan con sedimentos provenientes de rocas ígneas intermedias, otra posibilidad del enriquecimiento de Cr es por la presencia del mineral magnetita; mientras que el Ba y Sr se relacionan con rocas cálcicas.

Playa Tamiahua está constituida mayoritariamente por SiO_2 seguido de Al_2O_3 , K_2O y Na_2O , mientras que la cantidad de minerales pesados es baja. La relación Al_2O_3/TiO_2 indicó dos tipos de roca madre félsica e intermedia. Las correlaciones entre $\sum REE$ con Cr, Co, Ni, U, V, Zn, Zr e Y proponen la asociación de minerales accesorios en las dos playas. El diagrama de Roser y Korsch indicó 2 composiciones de rocas madre probables en Playa Norte: cuarzosa y félsica. En el caso de Playa Tamiahua su roca madre más probable es del grupo de las cuarzosas.

Para evaluar el grado de alteración de los materiales se utilizaron los índices CIA, CIW y PIA. En los 3 índices, Playa Norte presenta bajo intemperismo y Playa Tamiahua, aunque tiene valores un poco más altos se interpreta como intemperismo intermedio.

Para el estudio de la contaminación por metales se obtuvieron distintos factores, tales como el FE, el I_{geo} y la comparación de las concentraciones con valores de SQG y de CEQG. Playa Norte presento 4 elementos con FE: As, Cr, Cu y Sr, mientras que Playa Tamiahua solo presento 2: As y Cd, de todos estos elementos el As y el Cr son los más preocupantes por su toxicidad al ambiente. En lo que respecta al I_{geo} en Playa Norte se encontró que el Pb y Ni muestran una baja contaminación, Cu y Cr una media y el As una alta contaminación. En Playa Tamiahua el As es de baja contaminación y el Cd es alta contaminación. Para evaluar los efectos biológicos de los metales hacia los organismos acuáticos se

compararon las concentraciones obtenidas con las SQG, los resultados mostraron que en Playa Norte el As presenta una baja toxicidad, Cd, Pb y Zn una media y Cr y Cu una muy alta toxicidad y probabilidad de efectos adversos a la biota. Las concentraciones de Playa Tamiahua son bajas, por lo tanto, no existe toxicidad alguna ni probabilidad de efectos adversos a los organismos de la zona.

Dentro del análisis de las REE y edades los circones detríticos de Playa Norte se encontraron que la mayor concentración de los circones pertenecen a la era Proterozoica y Cenozoica; y solo algunos circones fueron de la era Paleozoica Mesozoica. Por su parte, en Playa Tamiahua hay mayor densidad de circones Cenozoicos y Mesozoicos, y pocos del Proterozoico y en el Paleozoico. Con las concentraciones mayores de HREE en ambas playas, se sugiere un origen ígneo de los circones.

Por último, para encontrar las áreas fuentes probables de los sedimentos se relacionaron las edades de los circones con algunos circones reportados en la literatura. Playa Norte se relaciona con el Macizo de Chiapas y el Complejo Chuacús. Por el contrario, en Playa Tamiahua se encontraron procedencias de la Sierra Madre Oriental, el Valle de Huizachal y la Provincia Alcalina Oriental Mexicana.

VII. REFERENCIAS

- Aguilar, J., Dorronsoro, C., Galán, E., & Gómez, L. 1999. Criterios y estándares para declarar un suelo como contaminado. Public. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Aguilar-Ucán, C. A., Montalvo-Romero, C., Cerón-Bretón, J. G., & Anguebes-Fransesch, F. 2014. Niveles de Metales pesados en especies marinas: Ostión (*Crassostrea virginica*), Jaiba (*Callinectes sapidus*) y Camarón (*Litopenaeus setiferus*), de Ciudad del Carmen, Campeche, México. *Rev Lat Rec Nat*, 10(1), 9-17.
- Arias-Madrid, Daniela, López-Paz, Oscar A., & Jiménez-Builes, Jovani A. 2012. Análisis de Sedimentos Utilizando un Enfoque de la Programación Estructurada. *Tecnológicas*, (29), 49-67
- Armstrong-Altrin, J.S. 2009. Provenance of sands from Cazonos, Acapulco, and Bahía Kino beaches, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, 764-782.
- Armstrong-Altrin, J.S. and Verma, S.P. 2005. Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data for Neogene sediments from known tectonic setting. *Sedimentary Geology*, 177(1-2), 115-129.
- Armstrong-Altrin, J. S., & Natalhy-Pineda, O. 2013 a. Microtextures of detrital sand grains from the Tecolutla, Nautla, and Veracruz beaches, western Gulf of Mexico, Mexico: implications for depositional environment and paleoclimate. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(10), 4321–4333.
- Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Rosalez-Hoz, L., Lee, Y.I., Balaram, V., Cruz-Martinez, A. and Avila-Ramirez, G. 2013 b. Geochemistry of the Jurassic and upper Cretaceous shales from the Molango Region, Hidalgo, Eastern Mexico: Implications of source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Comptus Rendus Geosciences*, 345, 185-202.
- Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Sanchez-Cabeza, J.A. and Ruiz-Fernández, A.C. 2015 a. Provenance and

depositional history of continental slope sediments in the Southwestern Gulf of Mexico unraveled by geochemical analysis. *Continental Shelf Research*, 95, 15-26.

Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Balaram, V. and Natalhy-Pineda, O. 2015 b. Petrography and geochemistry of sands from the Chachalacas and Veracruz beach areas, western Gulf of Mexico, Mexico: constraints on provenance and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 64 (1), 199-216.

Armstrong-Altrin, J.S. 2015 c. 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. *International Geology Review*, 57 (11-12), 1446-1461.

Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J. and 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. and Montiel-García, P.C. 2018. Provenance discrimination between Atasta and Alvarado beach sands, western Gulf of Mexico, Mexico: Constrains from detrital zircon chemistry and U-Pb geochronology. *Geological Journal*, 53, 2824-2848.

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., 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 and U–Pb geochronology. *Geological Journal*, 53, 2824–2848.

Bahloul, M., Baati, H., Amdouni, R. y Azri, C. 2018. Assessment of heavy metals contamination and their potential toxicity in the surface sediments of Sfax Solar

- Saltern, Tunisia. *Environmental Earth Sciences*, 77.
- Barbieri, M. 2016. The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination. 5, 1–4.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. y Zanettin, B. 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745–750.
- Bhatia, M.R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, 91, 611–627.
- Boggs, S.J. 2009. *Petrology of Sediments Rocks*.
- Botello, A. V. 1978. Variación de los parámetros hidrológicos en las épocas de sequía y lluvia (mayo y noviembre de 1974), en la Laguna de Términos, Campeche, México. *Anuario Centro Ciencias del Mar y Limnología*, 15, 160–175.
- Calva B., L.G. y Torres Alvarado, R. 2000. Distribucion De Carbohidatos, Carbono Y Nitrogeno orgánico en sedimentos de tres lagunas costeras del Golfo de México. *Hidrológica*, 10, 101–114.
- Canet, C. M. y Camprubi i C. A. 2006. *Yacimientos Minerales: los tesoros de la tierra*. Fondo de Cultura Económica
- Canovas Picón, F. 2006. *Física nuclear y partículas.*, 46pp.
- Carranza-Edwards, A., Centeno-García, E., Rosales-Hoz, L. y Cruz, R.L.S. 2001. Provenance of beach gray sands from western México. *Journal of South American Earth Sciences*, 14, 291–305.
- Carranza-Edwards, A., Kasper Zubillaga, J.J., Rosales-Hoz, L., Morales de la Garza, E.A. y Lozano Santa Cruz, R. 2009. Beach sand composition and provenance in a sector of the southwestern Mexican Pacific. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, 433–447.
- Carranza-Edwards, A., Márquez-García, A.Z., Tapia-Gonzalez, C.I., Rosales-Hoz,

- L. y Alatorre-Mendieta, M. ángel 2014. Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noroeste. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67, 21–43.
- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L., Caso Chávez, M. y Morales de la Garza, E. 2005. Environmental geology of the coastal zone. Encyclopedia of Earth Sciences Series, 14, 535–541.
- Castro-González, N.P., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Rojas, R., Tamariz-Flores, J.V. and Reyes-Cervantes, E. 2019. Nivel de contaminación de metales y arsenico en aguas residuales y suelos en la subcuenca del alto Balsas en Tlaxcala Puebla, México. Revista Internacional de Contaminacion Ambiental, 35, 335–348.
- CCME 2001. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Longman Higher Education. Otawwa, Canada
- Cedar Lake Ventures, I. 2019. WeatherSpark
- Cheng, F., Hong, H., Bae, C.J., Li, Z., Algeo, T.J., Huang, S., Cheng, L. and Fang, Q. 2017. Geochemical and detrital zircon U-Pb geochronological constraints on provenance of the Xiaomei red earth sediments (Bose Basin, Guangxi Province, southern China). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.
- CONAGUA. 2014. Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. Organismo de cuenca Frontera Sur.
- CONAGUA. 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tampico-Misantla, Estado de Veracruz.
- Córdoba Saldaña, L.P. 2011. Análisis granulométrico y geoquímico de arenas recientes en tres playas de México (Tecolutla, Bahía Kino y San Carlos): implicación de procedencia. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Dalrymple, G. B. 1991. The Age of the Earth, Stanford University Press.
- Dana, J.D.H. 1970. Manual de Mineralogía.

- De La Cruz-Landero, N., Chávez, Á. A., & Leal, S. L. 2013. Acumulación de metales pesados en sedimentos del ecosistema manglar en Laguna de Términos, Campeche, México. *Foresta Veracruzana*, 15(1), 25-30.
- EPA 2017. Radioactive Decay. Available at <https://www.epa.gov/radiation/radioactive-decay>
- Estrada-Carmona, J., Weber, B., Hecht, L., & Martens, U. 2009. P-T trajectory of metamorphic rocks from the central Chiapas Massif Complex: the Custepec Unit, Chiapas, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 243-259.
- Estrada-Carmona, J., Weber, B., Martens, U., & López-Martínez, M. 2012. Petrogenesis of Ordovician magmatic rocks in the southern Chiapas Massif Complex: relations with the early Palaeozoic magmatic belts of northwestern Gondwana. *International Geology Review*, 54(16), 1918-1943.
- Estrada Omaña, J.C. 2007. Características granulométricas y geoquímicas de arena de playa de Tecolutla, Veracruz, México: Implicaciones de procedencia y ambientes sedimentarios de depósito. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Farah, T., Souli, H., Jean-Marie, F., Kermouche, G., Fry, J.-J., Girard, B., Denis, A., Lambert, J. and Harkes, M. 2008. Durability of Bioclogging Treatment of Soils Tahani. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineer*, 137, 1–8.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W. and Young, G.M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary-rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. 921–924.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S. 2005. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378.
- Figuroa, L. M., & Mesa, A. 2002. Estudio geoquímico de Elementos de Tierras Raras (REE) en las fluoritas de las minas Palestina (Municipio de Cepitá) y el

- Llanito (Municipio de Los Santos) en el Departamento de Santander: aporte al conocimiento del modelo genético. *Boletín de Geología*, 24(39), 29-36.
- Folk, R.L. and Ward, W.C. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3–27.
- Galindo-Ruiz, J., Madhavaraju, J., Grijalva-Noriega, F.J., Monreal, R., Espinoza-Maldonado, I.C., 2018. Geoquímica de rocas siliciclásticas de la Formación Corral de Enmedio y Arenisca Camas, cuenca Cabullona, Sonora: paleometeorización y procedencia. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35, 188-202.
- García-Rico, L., Soto-Cruz, M.S., Jara-Marini, M.E. and Gómez-Álvarez, A. 2004. Fracciones geoquímicas de Cd, Cu y Pb en sedimentos costeros superficiales de zonas ostrícolas del estado de Sonora, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20, 159–167.
- Girty, G.H., Ridge, D.L., Knaack, C., Johnson, D. and Al-Riyami, R.K. 1996. Provenance and Depositional Setting of Paleozoic Chert and Argillite, Sierra Nevada, California. *Journal of Sedimentary Research*, 66, 107–118.
- GMAO 2019. Global Modeling y Assimilation Office. Available at <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>
- Goldich, S.S. 1938. A study in rock weathering. *Journal of Geology*, 46, 17–58.
- Gong, H., Nie, J., Wang, Z., Peng, W., Zhang, R. y Zhang, Y. 2016. A comparison of zircon U-Pb age results of the Red Clay sequence on the central Chinese Loess Plateau. *Scientific Reports*. 6 (1).
- Gonzalez-Jáuregui, M., Valdespino-Quevedo, C. y Rendón von Osten, J. 2014. Residuos de contaminantes orgánicos persistentes del Río Campotón y de la Reserva de la Biosfera de los Petenes, Campeche. *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental, Diagnóstico y Tendencias*, 323–336.
- González-León, C.M., Solari, L., Madhavaraju, J., 2017. Stratigraphy, Geochronology and regional tectonic setting of the Late Cretaceous (ca. 82 –

- 70 Ma), Cabullona Basin, Sonora, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 80, 494-511.
- González Marín, V. del C. 2019. Geoquímica y geocronología de U-Pb en zircones de la Playa Montepío, San Andrés Tuxtla, sureste del Golfo de México, México: Implicación de procedencia. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- González, O. y Millán, Z. 2016. Fluvial sediments granulometry of the main channel and alluvial plain of Portuguesa river, Venezuela. *Revista de Investigación*, 40.
- Guillong, M., von Quadt, A., Sakata, S., Peytchevaa, I. y Bachmanna, O. 2014. LA-ICP-MS Pb–U dating of young zircons from the Kos–Nisyros volcanic centre, SE Aegean arc. *J. Anal. At. Spectrom.* 29, 963–970.
- Habib Galindo, A.D. 2017. Análisis sedimentológico, petrográfico y geoquímico en playas de la Riviera Maya. UNAM.
- Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control A sedimentological approach. *Water Research*, 14, 975–1001.
- Hansen, A.M., Zavala, A.L. and Inclan, L.B. 1995. Fuentes de contaminación y enriquecimiento de metales en sedimentos de la cuenca Lerma-Chapala. *Ingeniería Hidráulica en México*, 10, 55–69.
- Harnois, L. 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55, 319–322.
- 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. UNAM.
- Hernández Coronado, C.J. 2015. Petrografía y geoquímica de arenas de playas del suroeste del Golfo de México: implicación de procedencia. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Herron, M.M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Research*, 58, 820–829.

- Hoskin, P.W.O. and Ireland, T.R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28, 627–630.
- Hoskin, P.W.O. and Schaltegger, U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Zircon*, 27–62.
- Ignacio, V. De, Llave, D., Ignacio, V. De and Llave, D. 2009. *Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Tamiahua.
- INAFED 2018. *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Estado de Campeche, Ciudad del Carmen. Available at <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM04campeche/municipios/04003a.html>
- INEGI 2009. *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Carmen, Campeche. http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/04/04003.pdf
- Karikalan, R., Sathasivam, R. y Rakkiannan, S. 2020. Grain size distribution studies in Gundar river estuary and beach sediments of Mookaiyur area, Gulf of Mannar Coast, Ramanathapuram District, Tamil Nadu, India. *Aegaeum Journal*, 8(4), 1120-1127.
- Kasper-Zubillaga, J.J. 2009. Roundness in quartz grains from inland and coastal dune sands, Altar desert, Sonora, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61, 1–12.
- Keppie, J.D., Dostal, J., Cameron, K.L., Solari, L.A., Ortega-Gutiérrez, F. and Lopez, R. 2003. Geochronology and geochemistry of Grenvillian igneous suites in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: Tectonic implications. *Precambrian Research*, 120, 365–389.
- Knutson, T.R., McBride, J.L., Chan, J., Emanuel, K., Landsea, C., Held, I., Kossin, J.P., Srivastava, A.K. and Sugi, M. 2010. Tropical Cyclones and Climate

- Change. *Nature Geoscience*, 1–28.
- Komar, P.D. and Wang, C. 1984. Processes of Selective Grain Transport and the Formation of Placers on Beaches. *The Journal of Geology*, 92, 637–655.
- Lara-Domínguez, A.L., J.L.-P.A.Á.-Á. y A.D.V.-L. 2009. Caracterización del sitio de manglar Pueblo Viejo – El Chairel, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). CONABIO, 1–17.
- Lin, N. 2019. Tropical cyclones and heatwaves. *Nature Climate Change*, 9, 579–580.
- Long, E.R., Macdonald, D.D., Smith, S.L. and Calder, F.D. 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 19, 81–97.
- 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. *Journal of South American Earth Sciences*, 76, 397-411.
- Madhavaraju, J., Saucedo-Samaniego JC, 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. *Geological Journal*, 54, 2621-2645.
- Magallanes-Ordóñez, V.R., Marmolejo-Rodríguez, A.J., Rodríguez-Figueroa, G.M., Sánchez-González, A., Aguíñiga-García, S., Arreguín-Sánchez, F., Zetina-Rejón, M., Tripp-Valdez, A. and Romo-Ríos, J.A. 2015. Characterization of lithogenic and biogenic zones and natural enrichment of nickel in sediments of the Terminos Lagoon, Campeche, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 156, 116–123.
- Markwitz, V. and Kirkland, C.L. 2018. Source to sink zircon grain shape: Constraints

- on selective preservation and significance for Western Australian Proterozoic basin provenance. *Geoscience Frontiers*, 9, 415–430.
- McKinney, T.F. and Friedman, G.M. 1970. Continental shelf sediments of Long Island, New York. *Journal of Sedimentary and Petrology*, 40, 213–248.
- McLennan, S.M. 1989. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influences of Provenance and Sedimentary Processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21, 169–200.
- Mendoza Ardilla, V., Loza Aguirre, I. and Peña Alonso, T.A. 2018. Petrografía, geoquímica y geocronología de la porción oriental de la Sierra de Tamaulipas, Tamaulipas, México. *Jóvenes en la Ciencia*, 3386–3389.
- Moiola, R.J., D.W. 1968. Textural Parameters: An Evaluation. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 38, 45–53.
- Molina-Garza, R. S., Geissman, J. W., Wawrzyniec, T. F., Peña Alonso, T. A., Iriundo, A., Weber, B., & Aranda-Gómez, J. 2015. Geology of the coastal Chiapas (Mexico) Miocene plutons and the Tonalá shear zone: Syntectonic emplacement and rapid exhumation during sinistral transpression. *Lithosphere*, 7(3), 257–274.
- Müller, G. 1969. Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2, 108–118.
- Murray, R.W. y Leinen, M. 1996. Scavenged excess aluminum and its relationship to bulk titanium in biogenic sediment from the central equatorial Pacific Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 3869–3878.
- Nakamura, N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in Carbonaceous and Ordinary Chondrites. *Geochimica et Cosmochimica*, 38, 757–775.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M. 1982. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715–717.
- Ocaña-Luna, A., Sánchez-Ramírez, M. 2016. Estructura de la comunidad ictioplanctónica en la laguna de Tamiahua, Veracruz, México. *Revista Mexicana*

de Biodiversidad, 87, 123–132.

Ortega-Flores, B., Martini, M., Guerrero-Moreno, S., Colás, V., Solari, L., Centeno-García, E., Silva-Romo, G., Grajales-Nishimura, M. 2019 Provenance analysis of Oligocene sandstone from the Cerro Pelón area, southern Gulf of Mexico, *International Geology Review*, 61:8, 915-935.

Paulín Zavala, T.S. 2020. Geoquímica y geocronología de U-Pb en circones de la playa Miramar Sur, estado de Tamaulipas, Golfo de México, México: implicación de procedencia. Universidad Nacional Autónoma de México, 139pp.

Pettijohn, F.J. 1975. *Sedimentary Rocks.*, 628pp.

Pettijohn, F.J., Potter, P.E. and Siever, R. 1973. *Sand and Sandstones.* Springer Verlag.

Phleger, F.B. and Ayala-Castañares, A. 1971. Processes and History of Términos Lagoon, Mexico. *Bulletin American Association of Petrology Geology*, 12, 2130–2140.

Plank, T. and Langmuir, C.H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, 145, 325–394.

Price, J.R. and Velbel, M.A. 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*, 202, 397–416.

PRONANP 2005. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR)-Laguna de Tamiahua. *Wetlands*, 1–12.

Ramírez-Montoya, E., Madhavaraju, J., Monreal, R., González-León, C.M., Grijalva-Noriega, F.J., Saucedo-Samaniego J.C., Espinoza-Maldonado, I.C., 2018. Meteorización y marco tectónico de rocas siliciclásticas de la Formación Morita, noreste de Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35, 103-115.

- 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. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 110, pp. 650-675.
- Rodríguez Figueroa, G.M. 2010. Niveles de contaminación por metales pesados en la zona costera de Santa Rosalía: sedimentos y macroalgas. Instituto Politécnico Nacional, 179pp.
- Rodríguez Meza, G.D. 1999. Elementos mayores y traza en los sedimentos superficiales de la Laguna de La Paz B. C. S., México. Instituto Politécnico Nacional.
- Roser, B.P. and Korsch, R.J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67, 119–139.
- Rubatto, D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184, 123–138.
- Rubio-Cisneros, I. I., Lawton, T. F. 2011. Detrital zircon U-Pb ages of sandstones in continental red beds at Valle de Huizachal, Tamaulipas, NE Mexico: Record of Early-Middle Jurassic arc volcanism and transition to crustal extension. *Geosphere*, 7(1), 159-170.
- Rudnick, R.L. and Gao, S. 2013. *Composition of the Continental Crust*. Elsevier Ltd., 1–51pp.
- SAIG 2016. Geografía de Campeche. Available at <https://www.campeche.gob.mx/campeche-sp-10517/geografia/clima>
- Sánchez Palencia, Y., Llamas Borrajo, J., Torres Pérez-Hidalgo, T., Ortiz Menéndez, J., Higuera Higuera, P. and Esbrí Víctor, J. 2016. Origen y distribución de Tierras Raras (REEs) en el agua y en los sedimentos de la Laguna de El Hito (Cuenca, España Central). *Geogaceta*, 75–78.

- Schoene, B. 2013. U-Th-Pb Geochronology., 341–378pp.
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social en México). 2009. Programa director urbano del centro de población. Ciudad del Carmen, Campeche.
- SEMAR (Secretaría de Marina) 2015. Isla del carmen, Campeche. Datos generales del Puerto., 1–19pp.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano). 2020. Carta Geológico-Minera D15-2, Yacimiento mineral Batolito de Chiapas, escala: 1:2,311,162.
- Singh, M.S., Kuang, Z., Maloney, E.D., Hannah, W.M., Kuang, Z., Maloney, E.D., Hannah, W.M. and Wolding, B.O. 2017. Increasing potential for intense tropical and subtropical thunderstorms under global warming. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 115, E342.
- Solari, L.A., Gómez-Tuena, A., Tanner, M., Bernal, J.P. and Pérez-Arvizu, O. 2009. U-Pb Zircon Geochronology with an Integrated LA-ICP-MS Microanalytical Workstation: Achievements in Precision and Accuracy. Geostandards and Geoanalytical Research, 34, 5–18.
- Solís-Castillo, Berenice, Ortiz-Pérez, Mario Arturo, Solleiro-Rebolledo, Elizabeth. 2014. Unidades geomorfológico-ambientales de las Tierras Bajas Mayas de Tabasco-Chiapas en el río Usumacinta: Un registro de los procesos aluviales y pedológicos durante el Cuaternario. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 66(2), 279-290.
- Sour-Tovar, F., Quiroz-Barroso, S.A. and Torres-Martínez, M.Á. 2018. Presencia de *Plagiobrissus grandis* (Gmelin, 1788) (Echinoidea: Spatangoida) en la Formación Tuxpan, Mioceno (Langhiano) del norte del Estado de Veracruz, México. Consideraciones Biogeográficas. Boletín de la Sociedad Geologica Mexicana, 70, 797–807.
- Stewart, J. H., Blodgett, R. B., Boucot, A. J., Carter, J. L., López, R., Ramos, V. A., & Keppie, J. D. 1999. Exotic Paleozoic strata of Gondwanan provenance near Ciudad Victoria, Tamaulipas, Mexico. Special Papers-Geological Society of

America, 227-252.

Tapia-Fernández, H.J., Armstrong-Altrin, J.S. and Selvaraj, K. 2017. Geochemistry and U–Pb geochronology of detrital zircons in the Brujas beach sands, Campeche, Southwestern Gulf of Mexico, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 76, 346–361.

Tapia Fernández, H.J. 2013. Análisis composicional de sedimentos recientes en las playas de Tamiahua y Tuxpan, Golfo de México: implicación sobre su procedencia. UNAM.

Tapia Fernández, H.J. 2017. Sedimentología, petrografía y geoquímica de sedimentos del litoral sur del Golfo de México: implicaciones sobre el ambiente de depósito y procedencia. Universidad Nacional Autónoma de México, 209pp.

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

Torres Rodríguez, V., Márquez García, A., Bolongaro Crevenna, A., Chavarría Hernández, J., Expósito Díaz, G. and Márquez García, E. 2010. Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático. *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*, 325–344.

Trainor, R. J.; Nance, R. D, y Keppie, J. D. 2011. Tectonothermal history of the Mesoproterozoic Novillo Gneiss of eastern Mexico: support for a coherent Oaxaquia microcontinent. *Rev. mex. cienc. geol.* Vol.28, n.3, pp.580-592.

Tripaldi, A., Ciccioli, P.L., Alonso, M.S. and Forman, S.L. 2010. Petrography and geochemistry of late Quaternary dune fields of western Argentina: Provenance of aeolian materials in southern South America. *Aeolian Research*, 2, 33–48.

Vazquez Botello, A., Von Osten, J.R., A. Benítez, J. and Gold-Boucht, G. 2014. Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. UAC, UNAM-ICMYL, CINVESTAV-Unidad Mérida, 1174pp.

Vazquez Botello, A., Soto, L.A., Ponce-Vélez, G. and Susana Villanueva, F. 2015.

- Baseline for PAHs and metals in NW Gulf of Mexico related to the Deepwater Horizon oil spill. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 156, 124–133.
- Velázquez Aguirre, Luis; Ordaz Ayala, Anselmo. 2015. Provincias hidrogeológicas de México. *Tecnología y ciencias del agua*, [S.l.], p. 36-55.
- Vélez, G. P., & Botello, A. V. 1992. Aspectos geoquímicos y de contaminación por metales pesados en la Laguna de Términos, Campeche. *Hidrobiológica*, 1(2), 1-10.
- Verdecchia, S.O., Murra, J.A., Baldo, E.G., Casquet, C., Pascua, I. and Saavedra, J. 2014. Geoquímica de las rocas metasedimentarias del Cámbrico medio al Ordovícico temprano de la sierra de Los Llanos (Sierras Pampeanas, Argentina): Fuente de sedimentos, correlación y ambiente geotectónico. *Andean Geology*, 41, 380–400.
- Villanueva, S. and Vazquez Botello, A. 1992. Metales Pesados En La Zona Costera Del Golfo De Mexico Y Caribe Mexicano: Una Revision. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 8, 47–61.
- Wang, Z., Wang, J., Fu, X., Zhan, W., Armstrong-Altrin, J.S., Yu, F., Feng, X., Song, C. and Zeng, S. 2018. Geochemistry of the Upper Triassic black mudstones in the Qiangtang Basin, Tibet: Implications for paleoenvironment, provenance, and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160, 118–135.
- Weber, B., Valencia, V.A., Schaaf, P., Pompa-Mera, V. and Ruiz, J. 2008. Significance of provenance ages from the chiapas massif complex (Southeastern Mexico): Redefining the paleozoic basement of the maya block and its evolution in a peri-gondwanan realm. *Journal of Geology*, 116, 619–639.
- Wetherill, G.W. 1956. Discordant uranium-lead ages. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 37, 320–326.
- Witt, C., Brichau, S. and Carter, A. 2012. New constraints on the origin of the Sierra Madre de Chiapas (south Mexico) from sediment provenance and apatite thermochronometry. *Tectonics*, 31, 1–15.

- Yáñez Correa, A. 1971. 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-León, A.C. 2018. Geoquímica y datación de zircones detríticos de playa “Atasta” del suroeste del Golfo de México, México: implicaciones de procedencia. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 96pp.
- Zhang, Z., Wang, J.J., Ali, A. and DeLaune, R.D. 2016. Heavy metals and metalloid contamination in Louisiana Lake Pontchartrain Estuary along I-10 Bridge. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 44, 66–77.

ANEXOS

Anexo 1. Identificación de fases cristalinas de las muestras de Playa Norte

Muestra	Fases Identificadas	Fichas PDF	Semi Cuantit. (RIR) ¹⁹	Observaciones
PN 1	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	35	Importante proporción de carbonato
	Calcita: CaCO ₃	ICSD 98 001 8165	8	
	Aragonita: CaCO ₃	ICSD 98 015 7995	21	
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	10	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	20	
	Filosilicatos de ≈10Å ppb de tipo mica-ilita	ICDD 01 073 9317	6	
PN 5	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	73	Se eliminó el carbonato con HCl
	Aragonita: CaCO ₃	ICDD 98 015 7995	3	
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	14	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	4	
	Filosilicatos de ≈14 Å y ≈7Å probablemente de tipo clorita	ICDD		
	Filosilicatos de ≈10Å ppb de tipo mica-ilita	ICDD 01 073 9317	4	
PN 7	Cuarzo: SiO ₂			Se eliminó el carbonato con HCl
	Aragonita: CaCO ₃	ICDD 01 087 2096	69	
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 015 7995	4	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 002 9361	12	
	Filosilicatos de ≈10Å ppb de tipo mica-ilita	ICSD 98 003 4784	10	
		ICDD 01 073 9317	6	

¹⁹ RIR = Relación de Intensidad de Referencia

Anexo 1. Continuación

Muestra	Fases Identificadas	Fichas PDF	Semi Cuantit. (RIR)	Observaciones
PN 11	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	48	Se eliminó el carbonato con HCl
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	15	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	17	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	8	
	Filosilicatos de ≈7Å probablemente de tipo caolinita o serpentina	ICDD 01 078 2110	9	
	Filosilicatos de ≈10Å ppb de tipo mica-ilita	ICDD 01 073 9317	2	
PN 15	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	73	Se eliminó el carbonato con HCl
	Aragonita: CaCO ₃	ICSD 98 015 7995	3	
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	14	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	4	
	Filosilicatos de ≈14 Å y ≈7Å probablemente de tipo clorita	ICDD 01 078 1997	4	
	Filosilicatos de ≈10Å ppb de tipo mica-ilita	ICDD 01 073 9317	2	
PN 17	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	52	Se eliminó el carbonato con HCl
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	17	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	8	
	Piroxeno tipo enstatita o similar	ICDD 98-008 1130	12	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	8	
	Filosilicatos a ≈10Å ppb de tipo mica-ilita	ICDD 01 073 9317	3	

Anexo 2. Identificación de fases cristalinas de las muestras de Playa Tamiahua

Muestra	Fases Identificadas	Fichas PDF	S.Cuant (RIR) ²⁰	Observaciones
THA 3	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	72	Predominio de cuarzo
	Calcita: CaCO ₃	ICSD 98 001 8165	2	
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	13	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	5	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	4	
THA 4	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	79	Predominio de cuarzo
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	8	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	6	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	4	
	Piroxeno de tipo augita o similar: Mg ₂ Si ₂ O ₆	ICDD 01 071 107	4	
THA 4 (frantz)	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	31	La proporción de cuarzo bajo del 79% al 31%. En cursiva las fases observadas con el separador magnético.
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	15	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	0	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	7	
	<i>Piroxeno de tipo augita o similar: (Ca, Mg, Fe) Si₂O.</i>	ICSD 98 005 6941	6	
	<i>Piroxeno de tipo enstatita o similar: Mg₂Si₂O₆</i>	ICSD 98 008 1130	28	
	<i>Magnetita: Fe₃O₄</i>	ICDD 01 076 2949	1	
<i>Filosilicatos de ≈10Å ppb de tipo mica-ilita</i>	ICDD 01 071 1070	1		

²⁰ RIR = Relación de Intensidad de Referencia

Anexo 2. Continuación

Muestra	Fases Identificadas	Fichas PDF	Semi Cuantit. (RIR)	Observaciones
THA 8	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	78	Similar a TH3. Se detectó únicamente un 3% de calcita
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	13	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	5	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	4	
THA 9	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	74	Primera muestra con micas
	Calcita: CaCO ₃	ICSD 98 001 8165	4	
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	8	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	9	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	2	
	Filosilicatos a ≈10Å ppb de tipo mica-ilita	ICDD 01 075 4389	2	
THA 13	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	81	Similar a TH3 y TH8 sin carbonatos
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	10	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	5	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	3	

Anexo 2 . Continuación

Muestra	Fases Identificadas	Fichas PDF	Semi Cuantit. (RIR)	Observaciones
THA 14	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	81	Similar a T3
	Calcita: CaCO ₃	ICSD 98 001 8165	2	
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	9	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	6	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	3	
	Filosilicatos a ≈10Å ppb de tipo mica-ilita	ICDD 01 075 4389	2	
THA 16	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	79	
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	7	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa: KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	6	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	4	
	Piroxeno de tipo augita o similar: (Ca, Mg, Fe) Si ₂ O ₆	ICSD 98 015 8906	4	
THA 17	Cuarzo: SiO ₂	ICDD 01 087 2096	81	Similar a T3
	Calcita: CaCO ₃	ICSD 98 001 8165	2	
	Plagioclasa de composición intermedia: NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	ICSD 98 002 9361	8	
	Feldespato potásico tipo ortoclasa KAlSi ₃ O ₈	ICSD 98 003 4784	5	
	Anfíbol tipo actinolita o similar: Ca ₂ (Mg _{4.5-2.5} Fe ²⁺ _{0.5-2.5})Si ₈ O ₂₂ (OH)	ICDD 01 080 0521	4	

Anexo 3. Concentración de elementos traza y tierras raras de circones detríticos de Playa Norte (ppm)

Zircón	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Nb	Hf	Th	U
PN_01	-4.3E-07	1.13	0.047	0.95	3.43	0.236	26	11.89	158.4	64.9	303	612	121.9	1.56	12260	74.3	413
PN_02	-4.1E-07	22.1	0.088	2.13	4.37	1.94	24.9	8.89	105.8	42	188	385	79.9	2.1	9380	47.47	91
PN_03	0.49	9.7	0.63	5.8	5.9	1.27	23.6	8.5	99	38.1	208	467	122	12.1	11300	81.3	887
PN_04	-4E-07	46.8	0.145	3.17	5.9	1.71	37.8	12.5	149	59.4	263	529	107.4	4.03	8650	119	133.4
PN_05	-4.6E-07	17.4	0.096	1.97	4.43	1.46	22.3	7.88	91.2	37.8	173	366	77.6	1.38	9790	96.3	153
PN_06	0.206	12	0.095	1.66	4.61	0.97	20.3	7.66	88.5	35.4	163	352	72.9	2.08	10330	140.7	443
PN_07	6	39.3	1.4	8.6	4.75	1.45	22.5	7.49	89.9	35.7	164	359	77.8	1.84	9040	161	166
PN_08	-5E-07	13.6	0.118	1.75	3.98	0.8	19.3	6.39	69.5	25.6	105.5	202	41.1	2.16	10430	47	95
PN_09	25.7	77	7.8	44	13.7	1.85	37.4	12.7	155	63.7	317	753	165	1.81	9040	264	455
PN_10	0.04	1.47	0.085	2.15	10	0.017	51.3	11.86	76.9	17.2	63.6	160	36.5	1.94	13040	125.9	1793
PN_11	-3.7E-07	82.5	0.77	9.7	22.4	6.62	82	24	247	83.7	357	634	128	3.76	8400	455	286.2
PN_12	1.89	55.7	0.59	3.3	4.88	0.95	24.4	9.48	117.8	49.5	247	562	117.8	8.11	11640	644	906
PN_13	0.014	19.8	0.079	2.26	4.66	0.41	25.2	9.03	108.2	42.2	186	331	60.6	6.24	8760	68.8	169.6
PN_14	0.13	12	0.122	2.12	4.03	0.67	26.9	9.42	103.7	38.9	177	331	67.7	1.59	11660	143.8	204.2
PN_15	0.5	2.6	0.2	1.33	1.95	0.152	17.2	9.1	135	61.2	305	679	132	1.91	12400	36.6	372.2
PN_16	-2.3E-07	9.65	0.018	0.35	1.19	0.41	8.99	3.5	49.9	21.2	112.3	306	63.6	4.89	12810	183	752
PN_17	-2.3E-07	33.2	0.306	5.45	6.26	2.48	31.8	10.4	121	48.5	229	525	109	3.13	9600	299.4	240.1
PN_18	0.012	4.89	0.146	2.73	5.42	0.71	36.6	12.88	152.9	58.3	250	453	87.6	2.01	7890	180.4	421
PN_19	-2.4E-07	15.6	0.081	1.73	5.37	0.202	25.3	8.9	108	40.5	191	365	66.5	7.39	10640	226.2	562.1
PN_20	1.28	15.5	0.49	2.77	2.41	0.204	16.8	6.63	83.3	34.5	165.3	356	71.5	3.67	10460	338	1009
PN_21	0.63	56.1	0.239	1.48	2.78	0.65	19.3	7.71	101.7	42.8	215	500	100.8	11.58	10360	560	651
PN_22	-1.8E-07	17.4	0.04	0.97	3.06	0.75	17.1	6.51	80.2	34	164	392	84.2	1.41	9670	243.4	407.6
PN_23	-1.6E-07	17	0.058	1.35	2.88	0.79	19.9	6.59	78.2	31.4	149	324	66.8	1.41	9380	83.8	98.9
PN_24	0.069	1.13	0.07	0.2	0.94	0.047	6.7	3.05	46.3	20.3	108.6	323	70.3	0.93	11580	21.1	592.9
PN_25	-1.5E-07	35.1	0.236	3.6	7.15	2.66	38.6	14.11	170	69.3	325	747	159.2	3.24	8910	469.4	680

Anexo 3. Continuación (ppm)

Zircón	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Nb	Hf	Th	U
PN_27	0.011	38	0.013	0.21	0.44	0.083	3.94	1.75	30.4	17	114.6	399	95.9	21.2	11450	434	871
PN_28	0.013	17.5	0.176	2.58	4.3	0.336	19	6.68	79	31.7	148	322	69.7	3.87	8710	136	171
PN_29	0.072	10.21	0.354	5.15	10.39	3.42	49.7	14.97	154.9	51.9	206	344	63.2	3.25	8520	146.3	288
PN_30	0.011	3.65	0.042	0.83	2.22	0.221	15.6	6.01	75.3	30.9	153	321	66.4	2.56	9850	163.1	657
PN_31	-7.3E-08	13.35	0.045	0.72	1.12	0.163	5.69	2.13	30.1	12.64	68.1	182	37.3	1.46	8660	125.9	246.1
PN_32	-8E-08	3.71	-1.2E-05	0.68	1.04	0.107	10.4	4.47	66.5	29.7	151	392	85.5	0.87	11600	33	271
PN_33	0.01	30.7	0.248	4.78	8.68	4.25	41.7	12.2	135	49.7	213	406	77.2	4.22	8630	86.8	97.2
PN_34	-5.2E-08	20	0.126	1.72	3.56	0.327	14.9	5.66	66.9	23.8	110	241	48.2	3.35	8580	314	641
PN_35	-4.9E-08	10.98	0.115	1.94	3.78	0.203	22.3	8.16	91.9	32.6	129.7	206	35.4	3.5	10030	33.8	148.3
PN_36	56	145	15.8	72	17.4	2.27	33.7	9.09	98.8	36.3	164.5	338	66	1.93	8400	169.8	214.1
PN_37	0.03	37.9	0.314	5.49	11.7	2.93	48.8	15.9	188	70.6	317	678	133.3	2.55	8660	298.4	279
PN_38	0.6	56.3	0.68	4.4	7.9	1.47	41.6	15.4	191	74.1	330	664	127	16.7	8130	591	484
PN_39	0.137	6.66	0.12	1.39	3.05	0.5	21.5	7.94	100.2	42.3	194	413	84.4	1.25	8890	159.2	351.3
PN_40	0.063	50.3	0.67	11.2	24.7	3.06	123.3	39.7	438	160	659	1142	218	8.62	6380	1750	1707
PN_41	0.065	11.39	0.064	0.51	1.27	0.208	7.6	2.63	37.6	14.6	75	195	39.9	2.1	11520	241	897
PN_42	0.017	40.3	0.065	1.64	3.43	1.43	19.7	7.47	93.5	41.2	214.5	551	131.1	4.29	10070	285	418
PN_43	0.006	6.27	0.123	2.24	4.48	0.45	21.4	6.99	74.5	25.3	107	193	35.9	1.68	8150	87.3	133
PN_44	0.0045	18	0.034	0.74	2.48	0.64	18.7	7.71	100.6	43.7	213.2	501	110.3	1.75	9320	275.3	483.5
PN_45	1.63	24.6	2.59	19.9	15.21	1.36	39.2	10.56	119	46.5	201.5	432	87.6	1.17	8880	113.5	137.9
PN_46	5.74E-08	22.5	0.18	5.33	12.3	5.04	60.2	19.8	220	83.2	372	726	143.7	1.4	7330	139.1	142.6
PN_47	6.96E-08	9.25	0.012	0.43	1.32	0.401	7.3	2.54	31.2	12.98	61.5	146.5	31.7	0.806	7350	68.4	107
PN_48	0.005	30.1	0.134	2.81	5.41	1.77	20.9	6.28	70.4	26.3	120.4	275	59.6	1.68	9210	295	334
PN_49	1.32	24.1	0.65	5.6	6.67	1.07	31.2	10.83	144.2	55.2	249	484	95.9	2.32	7170	120.3	151
PN_50	0.01	25.1	0.061	1.13	2.25	1.07	13.1	5.23	71.7	30.7	161.3	443	97.9	2.67	8500	322.9	421
PN_51	0.026	4.41	0.079	1.02	3.04	0.046	30.6	14.03	204	88	422	818	156.2	3.98	10340	159.6	727.6

Anexo 3. Continuación (ppm)

Zircón	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Nb	Hf	Th	U
PN_52	1.37E-07	1.18	0.0022	0.34	0.8	0.517	6.3	2.76	38.2	18.3	92.6	244.6	58.4	0.393	5730	7.57	20.02
PN_53	1.68E-07	5.16	0.027	0.44	0.71	0.095	6.68	2.68	29	9.68	36.2	68.1	14.7	8.3	6190	7.83	114.4
PN_54	0.21	45	0.315	3.87	7.12	1.98	32.8	10.66	127	48	208	418	81.3	4.66	8770	384	433
PN_55	0.03	19.9	0.186	3.15	6.85	0.234	37.9	13.45	161	61.2	259	499	92.6	8.55	9450	396	755
PN_56	1.82E-07	9.01	0.07	1.01	2.73	0.57	23.5	8.98	118.1	49.5	226	443	89.6	3.23	7760	92.1	211
PN_57	1.76E-07	22.51	0.108	2.01	5.03	0.356	23.2	7.84	90.1	33.9	143.1	252.6	46.6	3.43	9280	101.1	133.5
PN_58	0.096	4.85	0.241	1.07	2.16	0.21	13	6.79	100	45	218	521	103.3	19.2	13550	199	2418
PN_59	0.031	15.03	0.072	1.51	3.08	0.209	15.3	5.64	67.9	26.5	118	256	51	3.71	10780	328.1	1188
PN_60	0.87	17.8	0.41	4.39	6.43	1.12	32	11.3	126	48.5	211	425	84	2.57	8180	202	232
PN_61	2.25E-07	11.33	0.063	1.05	2.94	0.52	11.66	4	46.2	16.52	69.4	137.2	25.3	1.64	8500	38.9	88.6
PN_62	0.63	57	0.55	5.28	7.4	2.09	32.7	11.32	125.4	48.4	208	408	77.4	4.21	7040	236	116.6
PN_63	2.68E-07	9.46	0.046	0.58	1.11	0.31	7.7	3.01	39.8	17.5	85.7	217.4	51	1.16	9460	179.7	369.7
PN_64	2.72E-07	22.1	0.105	1.57	2.99	0.78	17.4	5.56	68.9	25.8	109.4	224	43.9	3.15	7910	57.6	80.6
PN_65	0.323	28.8	0.292	2.85	3.03	0.47	15.7	5.83	73.5	32.9	150	363	75.6	5.41	10540	116.6	408
PN_66	2.54E-07	6.49	0.04	0.66	2.38	0.116	16.6	7.65	101.6	42	197.7	425	79.4	5.03	10300	83.66	392.6
PN_67	2.84E-07	7.56	0.229	5.83	11.49	0.43	72	23.5	272	99.2	392	622	113.1	3.44	6160	731	733
PN_68	0.66	9.77	0.238	1.45	2.37	0.343	14.5	5.55	72.2	31.1	143.8	315	66	1.63	8410	95.1	172
PN_69	0.035	18.4	0.18	3.41	5.51	1.33	22.5	7.16	81	29.8	127	258	49	2.18	6990	46.6	74.9
PN_70	0.027	27.6	0.407	7.03	12.4	3.43	57.2	17.44	201	76.5	324	609	116.7	4.33	9250	206.8	210
PN_71	0.227	37.3	0.604	9.53	15.7	7.71	78.6	24.9	261	92.8	372	626	124.4	1.93	7010	134.5	88.8
PN_72	0.023	0.432	0.043	0.49	1.37	0.081	10.04	5.12	79	36	186	525	109.3	1.56	12050	28.95	1019
PN_73	3.58E-07	13.77	0.048	0.87	2.13	0.308	12.7	4.46	50.6	20.72	92.7	191.8	37.9	2.73	9920	143.4	343
PN_74	3.59E-07	10.3	0.03	0.69	1.31	0.187	6.9	2.77	33.1	13.34	64.9	187.2	40	3.64	11160	152.1	570
PN_75	0.053	14.19	0.067	0.91	1.84	0.46	10	3.41	44.5	17.26	81.5	187.3	41.2	2.42	9570	55.7	209
PN_76	3.93E-07	218	0.552	9.9	19.2	6.17	112.3	36	404	150.9	631	1187	228	17.6	7090	2540	1600

Anexo 3. Continuación (ppm)

Zircón	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Nb	Hf	Th	U
PN_77	4.07E-07	3.93	0.221	4.03	8.2	0.93	44.1	15.2	173	65.5	263	492	91.4	1.34	8300	137	245
PN_78	4.22E-07	13.14	0.147	2.62	5.17	1.69	26.5	8.34	97	38.4	168.7	359	75.1	0.99	6840	140.7	167.1
PN_79	0.115	27.1	0.126	2.44	5.1	1.8	34.8	12.18	143.3	59	256	529	106.3	2.51	7880	438	376
PN_79	0.115	27.1	0.126	2.44	5.1	1.8	34.8	12.18	143.3	59	256	529	106.3	2.51	7880	438	376
PN_80	3.98E-07	9.27	0.038	0.91	1.97	0.52	12.46	4.24	58.3	22.8	104.2	212	41.5	1.73	8950	80.1	175
PN_81	4.53E-07	10.63	0.034	0.45	1.19	0.53	4.95	1.87	25.8	12.44	68	220	57.9	1.09	7620	147.9	264.6
PN_82	0.015	25.9	0.24	3.35	6.02	2.36	31.6	10.88	121.1	47.7	217	458	97.3	1.63	7770	137.6	128.2
PN_83	4.9E-07	31	0.055	1.48	3.78	0.91	20.4	7.62	98.9	42.5	203	444	93.3	3	9750	242	376
PN_84	0.081	4.24	0.065	0.79	1.85	0.29	15.3	6.92	92.2	41.8	225	747	160	3.03	11250	84	1680
PN_85	0.157	19.3	0.545	7.04	11.2	4.82	52.2	14.8	148	52.8	213	387	76.3	1.45	7440	99.8	78.1
PN_86	0.014	7.6	0.093	1.43	3.4	0.147	15.5	5.9	76	31.8	150	316	65	3.14	6600	72	215.7
PN_87	6.3	25.8	1.63	11.1	6.3	1.04	23.1	6.84	82.6	32.7	141	299	61	1.66	9190	165	220
PN_88	0.012	17.74	0.1	1.5	3.6	0.856	22.6	8.47	106.2	45.2	217.5	488	106.3	3.01	8530	190.4	518
PN_89	0.117	8.55	0.048	0.43	1.45	0.37	9.21	4.19	54.7	25.3	128.6	339	75.6	1.47	9240	234.7	584
PN_90	9.5	39.4	2.22	10.6	5.06	0.97	17	5.47	61.3	25.4	117	255	53.2	2.25	8690	237	208
PN_91	117	340	37.4	182	47.5	4.53	98.5	27.7	305	119.2	525	1021	205.6	7.74	7150	1640	2129
PN_92	6.61E-07	13.49	0.07	0.71	3.02	1.05	21.4	8.07	110.6	47	235	544	125	1.96	5920	277.6	426
PN_93	6.6E-07	13.92	0.022	0.67	2.56	0.363	18.9	6.7	86.4	36.5	171	342	69.8	3.38	8140	147	302
PN_94	5.56E-07	10.54	0.026	0.56	1.93	0.375	10.31	3.84	45.6	18.4	82.4	166.2	34	2.39	8260	44.1	112.2
PN_95	1.18	57.2	0.73	6.59	10.7	3.15	56.1	18.3	210	81.3	352	680	137	4.08	6370	870	612
PN_96	5.98E-07	6.24	0.022	0.36	1.54	0.54	10.13	3.61	43	18.4	93.4	212	48.3	0.65	6760	24.94	46.1
PN_97	6.31E-07	7.96	0.011	0.44	0.96	0.107	5.1	1.99	25.9	10.97	54.1	136.5	31	2.08	8880	189	537
PN_98	5.7E-07	15.79	0.078	0.92	2.35	0.89	14.2	5.77	74.2	31.1	156	348	75.8	1.97	7260	148.6	270.5
PN_99	0.116	11.3	0.102	1.18	2.15	0.41	14.1	4.53	54.5	20.2	89.3	170.6	35.2	1.8	6870	68.2	122
PN_100	6.2	26.4	1.96	9.7	5.3	0.235	21.6	7.09	88	33	143.4	270	54.4	4.7	9340	178.3	587

Anexo 4. Concentración de elementos traza y tierras raras de circones detríticos de Playa Tamiahua (ppm)

Zircón	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Nb	Hf	Th	U
TA_01	-1.3E-06	79.3	0.134	2.73	6	2.43	45.3	16.5	199	83	383	759	156.2	10.08	9910	299.4	446.4
TA_02	0.15	53.3	0.363	4.9	7.7	1.28	34.3	10.4	115	42.2	184	391	78.2	12.7	8370	980	719
TA_03	0.0042	29.1	0.126	1.93	3.59	1.13	17.5	6.01	74.7	30.4	143.7	322	69.7	3.57	8720	553	851
TA_04	11.9	32.8	4.12	24.6	11.3	0.59	35	10.46	112	40.1	170	272	50.9	1.4	8290	80.9	152.3
TA_05	37.7	136	11.1	49.7	17.7	4.48	54.6	17.4	204	81.4	373	781	158	3.94	7950	302	224.3
TA_06	0.027	22.5	0.253	5.56	8.7	3.76	43.3	14.1	151	59.2	279	576	129.2	1.37	9950	233.6	260.2
TA_07	0.049	14.68	0.071	1.35	3.05	0.69	18.8	6.43	79	31	143.1	275	55.5	2.94	10680	154.1	346
TA_08	32.9	85	11.5	56.1	17.4	0.54	41.2	12.1	123	46.1	193	332	65.1	4.13	8990	101.5	201.9
TA_09	3.6	10.7	1.16	10.2	11.7	2.12	57.7	17.9	184	63.5	257	420	82.5	1.79	7990	110.7	132.7
TA_10	-1.3E-06	9.69	0.022	0.46	1.74	0.1	11.7	4.85	63.7	26.3	124	269	57.4	2.33	12260	105.2	335
TA_11	-1.5E-06	1.46	0.098	1.93	6.48	0.135	44.8	16.3	207	80.9	359	632	123	1.26	12120	60.9	166.4
TA_12	0.143	18.13	0.152	1.57	3.63	1.11	22.2	7.62	93	37.7	177.4	370	81.2	2.31	9480	340	298.6
TA_13	0.0028	23.7	0.079	2.04	4.3	1.99	20.2	6.41	71.3	27	121.6	268	60.4	2.07	9170	109.5	454
TA_14	1.31	21.5	0.387	4.36	5.7	0.9	28.4	8.95	107.4	40.8	178	326	63.5	3.55	10290	196.9	200
TA_15	13.9	50	5.6	30.3	12.5	0.74	46.4	15.2	171	67.5	293	506	103.4	5.64	12100	765	611
TA_16	15.4	46.4	5.39	27.5	11.3	0.72	39.1	11.4	130	48.1	201	356	67.2	2.2	10340	202.9	343.1
TA_17	3.5	13.2	1.27	8.1	4.01	0.213	21.5	7.4	93.7	39.2	180	334	65.9	2.7	10820	214.2	749
TA_18	1.53	22.3	1.56	9.7	6.9	1.66	21	7.34	92.1	35.3	164	326	65.9	4.55	12590	230.4	535.4
TA_19	-1.2E-06	15.9	0.045	0.67	1.37	0.167	9.8	3.77	44.8	18.7	89.6	208	43.4	4.5	11480	232	439
TA_20	0.007	5.14	0.212	4.94	8.5	0.52	43.3	13.1	139	47.3	203	291	55.7	1.98	8690	104	199.1
TA_21	-1.4E-06	6.96	0.039	0.57	1.32	0.192	7.85	3.28	41.5	17.8	90.6	198	42.9	1.83	11780	151	391
TA_22	-1.4E-06	21.8	0.076	1.58	4.27	0.81	20.5	6.85	82.7	32.1	149	315	64.5	2.3	10740	264	348
TA_23	-1E-06	7.98	0.095	2.12	8.1	0.053	55	20	237	87.5	374	623	117	3.48	11970	263	567
TA_24	0.016	5.85	0.195	3.47	6.7	0.45	41.6	13.5	158	56.6	237	375	73.6	1.88	11200	118.3	212
TA_25	0.006	28.4	0.038	0.68	2.45	0.92	19.5	7.49	110.8	47.7	240	556	124	11.8	12900	194	461

Anexo 4. Continuación (ppm)

Zircón	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Nb	Hf	Th	U
TA_26	0.016	12.5	0.146	2.89	6.39	2.7	33	11	138	54	236	455	92.6	1.48	8230	89.8	134.3
TA_27	0.079	48.5	0.75	12.1	19.9	7.69	98	30.6	342	124	528	908	183	3.46	9200	350	286.7
TA_29	26.1	100	13.4	70.3	26.1	0.169	83.1	27.3	325	119	490	828	145.1	21.6	10980	1047	1818
TA_30	0.64	10.4	0.39	4.7	8.8	0.24	45.1	14.1	157	57.9	246	376	70.2	2.44	9190	156.3	295
TA_31	0.004	2.09	0.027	0.22	0.83	0.147	4.75	2.68	48.5	25.5	162	610	143	3.06	11090	30.2	619
TA_32	-1.1E-06	15.5	0.022	0.54	0.99	0.536	7.31	3.14	40.9	18.5	95.2	265	66.3	2.77	9690	153.4	381
TA_33	-1.1E-06	19.2	0.055	0.97	1.9	0.6	8.47	3.03	35.9	13.73	68.3	174	40	1.9	9130	228.5	412
TA_34	0.028	12.7	0.119	1.99	5.12	0.79	24.7	8.6	108	38.5	190	377	77.8	2.62	10600	91.4	122.7
TA_35	-9.1E-07	8.96	0.05	1.05	1.76	0.43	11.7	3.39	45.7	19.5	92.7	219	47.8	1.22	9790	47.7	291.7
TA_36	1.37	49.4	0.45	4.3	5	0.86	27.6	9.92	125	51	230	440	90	5.21	9500	422	429.3
TA_37	0.0038	24.7	0.154	2.27	2.59	0.66	11	3.58	40.8	16.1	74	155	34.3	1.86	10090	81.8	95.1
TA_38	3.15	45.8	2.72	22.2	25.7	2.79	135.8	51.1	624	227	988	1660	316	34.1	15300	1750	3950
TA_39	19.4	68	7.4	43.5	35.4	1.45	161	48.6	534	183	728	1042	188	7.03	8950	697	664.6
TA_40	-1.1E-06	3.34	0.082	1.45	3.65	0.254	20.5	6.83	76	28.1	122.1	211	41	2.45	9470	66.3	133.8
TA_41	-9.7E-07	24.3	0.14	1.87	3.51	0.94	18.3	5.83	64.9	22.9	97.6	195	39.4	3.44	10340	526.5	421.5
TA_42	0.46	7.1	0.55	6.2	10.8	0.72	54.9	16.7	182	65.2	262	412	77.3	2.45	9200	136	203
TA_43	0.0039	75	0.174	3.54	7.4	3.33	37.2	11.59	132	50.4	225	497	105.7	3.18	9840	546	768
TA_44	-1.1E-06	40.7	0.148	2.09	4.32	1.15	21.9	8.76	110.2	44.2	215	471	101.7	4.42	9930	379.1	363.3
TA_45	0.012	4.44	0.157	3.06	6.8	0.557	34.5	11.05	120	42.1	180	301	60.4	2.86	10710	71.8	152.5
TA_46	-1E-06	1.79	0.193	2.97	7.6	0.49	35.6	10.2	108	37.7	164	264	49.9	0.89	8410	53.5	100.5
TA_47	0.108	14.9	0.239	5.3	11.06	0.23	64.3	20.9	247	86	358	581	105	5.53	9990	324.9	557.2
TA_48	0.262	14.8	0.224	2.41	3.33	2.61	18.8	5.59	71	32.3	172	531	141	1.22	7200	186	223
TA_49	0.0059	15.2	0.03	0.48	0.77	0.58	4.77	1.58	20.6	9.5	49.6	144	34.9	0.92	7990	269.8	150.2
TA_50	0.127	12.81	0.137	1.4	3.59	1.29	19.1	6.72	76.4	30.9	147.7	339	77	1.74	13620	130.7	295.4
TA_51	-9.7E-07	3.69	0.122	2.36	4.6	0.54	22.2	7.25	79	27.8	112	184	36	1.14	9510	43.1	82.9

Anexo 4. Continuación (ppm)

Zircón	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Nb	Hf	Th	U
TA_52	-1E-06	10.57	0.013	0.26	1.09	0.57	5.18	1.97	27.8	11.25	65	182	45.5	1.42	10770	66.74	158.6
TA_53	16.9	50	6	34.5	23.6	0.63	87	25.6	292	102	423	669	128	4.8	12300	218.9	330.9
TA_54	0.188	9.22	0.096	1.46	3.06	0.75	19.8	7.38	93.1	38.5	182	392	80.6	2.56	10080	72.4	146.7
TA_55	0.13	14.6	0.094	0.92	1.96	0.79	10.1	3.13	33.9	13.5	67	165	37.4	1.77	11800	59	369
TA_56	0.029	5.32	0.189	3.73	6.08	0.41	24.7	6.93	80.2	28.3	114.5	207	39.7	3.12	9300	15.78	38.2
TA_57	0.39	131	0.72	7.7	14	2.58	61.8	22	235	87.8	379	675	130	12.2	8150	946	698
TA_58	18.5	61.8	7.8	43.3	30.2	1.27	110	34.8	340	112	465	668	125	5.18	9200	206.8	294
TA_59	19.4	67	9.9	53	17.3	0.63	35.3	8.9	89	32.8	147	274	55.5	3.19	9000	72.4	181.2
TA_60	0.055	31.7	0.113	2.1	4.83	1.33	29.6	11.8	145	59	294	617	131	4.83	11730	244	336
TA_61	0.042	29.3	0.489	8.25	13	5.29	61.4	19.4	219	78.9	340	637	125.8	1.79	7530	158.3	97.8
TA_62	-8.9E-07	3.17	0.063	1.72	4.29	0.18	23.7	8.9	96	36	153	274	52.6	1.6	11000	59.8	124.4
TA_63	-9.2E-07	24.3	0.087	1.03	2.74	0.4	18	6.66	84.7	33.1	147.9	304	60.3	4.09	9760	314.2	570
TA_64	1.33	85	0.78	9.2	15.7	5.26	88	29.5	355	138	610	1170	237	5.43	8980	287	289
TA_65	-8.6E-07	5.31	0.152	3.71	8.9	0.287	40.7	14.1	163	56.4	242	396	74.9	2	10170	135.8	238
TA_66	143	361	47.1	238	48.3	4.01	62	12	115	40.5	175	349	72.3	2.33	10400	86.6	148.7
TA_67	0.048	40.3	0.482	7.07	10.9	1.53	55.7	18.2	207	79.1	344	644	128.9	9.38	9450	192.7	256
TA_68	9.4	74.5	2.74	17.7	11.5	1.98	54.7	18.5	214	84.1	371	679	131	11.9	12220	268	492
TA_69	-8.8E-07	8.73	0.04	1.39	3.25	0.95	20.1	7.53	95.6	41.9	199	435	93.8	1.76	8620	72.4	91.5
TA_70	-9.8E-07	8.45	0.065	0.81	2.63	0.97	19.2	6.28	75.3	26.5	120	229	48.3	1.47	10400	32.57	56.1
TA_71	1.16	63	1.44	16	22	5.8	100.9	31.9	356	132	592	1124	224	4.87	8700	1142	892.7
TA_72	-7.1E-07	3.98	0.099	2.87	5.31	0.95	33.6	12	147	57.7	252	464	89.1	1.03	8180	53.9	174.5
TA_73	8.9	35.7	2.97	10.9	5.53	0.195	19.1	5.73	70	25.1	109.6	198	38.4	2.29	8720	62.3	138.8
TA_74	0.07	50	0.16	2.16	5.07	2.45	32.5	11.31	142.3	58.4	288	687	160.2	6.96	11770	663	647
TA_75	0.0044	7.36	0.185	3.18	6.85	1.56	38.1	13.1	156	62.4	293	596	131	1.54	9000	95.8	151.7
TA_76	-9E-07	2.84	0.063	1.36	2.69	0.104	17.3	6.01	68.1	25.8	114	211	41.5	1.71	9100	43.1	98.6

Anexo 4. Continuación (ppm)

Zircón	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Nb	Hf	Th	U
TA_77	0.22	9.79	0.064	0.46	1.5	0.52	11.1	4.46	61	26.7	142	355	80.8	1.5	9440	74.2	150.2
TA_78	-7.6E-07	22	0.078	1.85	5.49	3.1	37.1	12	141	56.1	261	580	139	2.57	9140	353	498
TA_79	11	30	3.8	21.2	10.3	0.38	34.3	10.3	117	43.6	175	299	59.5	2.03	8970	86.4	171.9
TA_79	11	30	3.8	21.2	10.3	0.38	34.3	10.3	117	43.6	175	299	59.5	2.03	8970	86.4	171.9
TA_80	0.059	24.9	0.7	13.9	22.6	1.37	96	31.3	325	113	452	755	141	7.7	6950	250	401
TA_81	-7.4E-07	28.7	0.09	1.25	2.96	1.78	19.3	7.01	89.2	36.6	173	391	90	4.82	9810	151.2	341.9
TA_82	0.027	21	0.267	3.84	6.49	1.78	31.1	10.71	134.5	50.8	236	524	109.1	3.74	8660	238.8	214.3
TA_83	0.014	45.3	0.118	2.39	3.69	2	26.9	8.93	106.4	43.9	213	487	104.2	4.45	10450	253.7	380
TA_84	0.04	8.01	0.416	7.31	12.2	0.58	57.9	17.6	191	65.8	260	403	74.1	2.84	9290	138.6	249.6
TA_85	29.3	103	15.3	97	41.9	4.95	105	31.6	296	100.5	375	573	106.2	5.88	9780	125	237
TA_86	-6.6E-07	43	0.178	2.56	7.5	4.86	46.3	13.87	154	55.9	239	450	95.2	2.86	8320	248.8	249.6
TA_87	-6.1E-07	24.7	0.046	1.86	3.98	0.4	34.6	13.4	152	61.9	271	485	93.5	4.53	10040	274	287
TA_88	0.052	10.74	0.179	3.23	5.6	1.58	27.3	8.9	100	35.4	150	281	53.8	1.74	8640	70.6	88.2
TA_89	-6.3E-07	16.4	0.064	0.72	2.25	0.255	10.5	3.82	44.1	17.2	75.6	158	31.4	1.7	9470	80.1	68.4
TA_90	0.192	22.8	0.232	2.39	4.97	1.01	26.4	10.54	130	52.1	251	549	114.9	5.47	10350	265.6	561
TA_91	347	661	69.5	274	43.9	8.68	46	7.54	73.7	25.5	113	261	61	1.87	9000	170.7	119.1
TA_92	-5.5E-07	4.06	0.37	4.95	7.69	1.53	37.2	10.85	110.8	40.5	161	277	56.2	1.08	7480	27.9	49.4
TA_93	0.025	15.3	0.05	0.97	1.87	0.69	10.7	4.09	52.4	23	115.3	313	74.9	1.5	10200	255	410.9
TA_94	0.135	47.6	0.062	0.8	1.93	0.289	8.4	3.35	45.7	21.1	134	491	125.1	9.84	13660	493	634
TA_95	16	48	6.1	29.6	12.3	0.32	35.1	10.7	109	38.3	158	268	50.4	2.04	7310	81	160.3
TA_96	0.82	104.7	0.52	6.97	12.8	3.23	65.9	22	256	100.4	455	947	188	13.4	11450	607	788
TA_97	0.101	15.1	0.417	6.55	9.4	0.65	44.3	13.7	147	51.2	204	344	66.7	4.47	9180	71.4	89.6
TA_98	0.83	17.5	0.322	3.16	7.8	0.056	43.3	15.6	171	62.3	261	441	81	20.9	10600	229.6	448
TA_99	0.021	36.5	0.041	0.72	4.33	1.16	26.6	9.03	115	41.5	186	405	81.9	8.58	11300	265	445
TA_100	-4.9E-07	12.28	0.025	0.62	1.33	0.75	9.59	4.05	50.8	23.2	115.6	313	79.2	3.53	10310	154.8	318.8

Anexo 5. Resultados de geocronología U-Pb en circones de Playa Norte

CIRCÓN	RELACIONES CORREGIDAS						EDADES CORREGIDAS (Ma)						Edad (Ma)	±2σ	Disc %
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ			
PN_01	0.0481	0.0037	0.1408	0.0110	0.0202	0.0004	128.8	2.8	134.8	9.8	140.0	180.0	128.8	2.8	4.5
PN_02	0.0542	0.0073	0.2870	0.0370	0.0387	0.0014	245.0	8.4	252.0	27.0	430.0	260.0	245.0	8.4	2.8
PN_03 ²¹	0.0909	0.0049	0.4970	0.1200	0.0404	0.0095	256.0	57.0	409.0	64.0	1440.0	110.0	256.0	57.0	37.4
PN_04	0.0518	0.0050	0.3110	0.0290	0.0421	0.0010	265.5	5.9	273.0	22.0	290.0	210.0	265.5	5.9	2.7
PN_05	0.0650	0.0320	0.0120	0.0076	0.0018	0.0002	11.5	1.1	11.8	7.6	-340.0	940.0	11.5	1.1	2.5
PN_06	0.0742	0.0039	1.6680	0.0950	0.1634	0.0033	976.0	18.0	995.0	35.0	1043.0	110.0	976.0	18.0	1.9
PN_07	0.0640	0.0340	0.0165	0.0083	0.0017	0.0002	11.2	1.0	16.3	8.2	100.0	830.0	11.2	1.0	31.3
PN_08	0.0709	0.0048	1.4480	0.0990	0.1472	0.0023	885.0	13.0	921.0	38.0	960.0	140.0	885.0	13.0	3.9
PN_09	0.0468	0.0100	0.0268	0.0057	0.0040	0.0001	25.4	0.8	26.7	5.6	70.0	360.0	25.4	0.8	4.9
PN_10	0.0701	0.0034	1.5010	0.0730	0.1541	0.0016	923.8	8.6	933.0	29.0	929.0	98.0	923.8	8.6	1.0
PN_11	0.0578	0.0200	0.3360	0.1500	0.0415	0.0016	262.3	9.6	294.0	81.0	640.0	270.0	262.3	9.6	10.8
PN_12	0.0730	0.0150	0.0185	0.0039	0.0019	0.0001	12.0	0.4	18.6	3.8	1160.0	300.0	12.0	0.4	35.5
PN_13	0.0809	0.0051	2.3600	0.1900	0.2101	0.0110	1229.0	59.0	1244.0	67.0	1263.0	130.0	1229.0	59.0	1.2
PN_14	0.2220	0.0830	0.1140	0.4600	0.0035	0.0045	22.7	28.0	107.0	170.0	2880.0	340.0	22.7	28.0	78.8
PN_15	0.0929	0.0045	2.8410	0.1400	0.2239	0.0030	1302.0	16.0	1366.0	38.0	1483.0	95.0	1302.0	16.0	4.7
PN_16	0.0629	0.0037	0.3810	0.0260	0.0429	0.0018	270.6	11.0	330.0	18.0	730.0	120.0	270.6	11.0	18.0
PN_17	0.0541	0.0730	0.2310	1.3000	0.0291	0.0110	184.8	64.0	210.0	280.0	390.0	430.0	184.8	64.0	12.0
PN_18	0.0460	0.0100	0.0268	0.0058	0.0042	0.0001	27.1	0.9	26.7	5.7	-70.0	370.0	27.1	0.9	-1.3
PN_19	0.0731	0.0038	1.8940	0.1000	0.1851	0.0028	1094.0	15.0	1078.0	33.0	1011.0	98.0	1094.0	15.0	-1.5
PN_20	0.0564	0.0071	0.0195	0.0028	0.0026	0.0001	16.7	0.5	19.6	2.8	460.0	260.0	16.7	0.5	14.9
PN_21	0.0517	0.0033	0.3000	0.0190	0.0415	0.0006	262.4	3.8	266.0	15.0	266.0	140.0	262.4	3.8	1.4
PN_22	-0.0100	0.7500	0.0028	0.0029	0.0001	0.0000	0.4	0.2	2.8	2.9	-2500.0	9300.0	0.4	0.2	86.8
PN_23	0.0558	0.0060	0.2520	0.0260	0.0330	0.0010	209.3	6.4	232.0	21.0	400.0	230.0	209.3	6.4	9.8
PN_24	0.0782	0.0041	1.9010	0.1100	0.1777	0.0020	1054.5	11.0	1081.0	34.0	1161.0	99.0	1054.5	11.0	2.5
PN_25	0.9000	0.7700	0.0025	0.0023	0.0001	0.0000	0.4	0.1	2.5	2.4	-1600.0	5200.0	0.4	0.1	84.4

²¹ Los valores en rojo fueron descartados por su alto % de discordancia

Anexo 5. Continuación

CIRCÓN	RELACIONES CORREGIDAS						EDADES CORREGIDAS (Ma)								
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ	Edad (Ma)	±2σ	Disc %
PN_26	0.5880	0.8100	17.2000	2.7000	0.1750	0.0380	1020.0	240.0	2890.0	170.0	4420.0	1900.0	1020.0	240.0	64.7
PN_27	0.0560	0.0030	0.5480	0.0290	0.0708	0.0007	440.8	4.4	445.1	19.0	458.0	110.0	440.8	4.4	1.0
PN_28	0.0516	0.0047	0.3000	0.0260	0.0427	0.0007	269.9	4.0	270.0	21.0	240.0	190.0	269.9	4.0	0.0
PN_29	0.0912	0.0046	3.1100	0.1600	0.2483	0.0026	1429.0	13.0	1437.0	39.0	1446.0	97.0	1446.0	97.0	0.6
PN_30	0.0788	0.0039	2.2110	0.1100	0.2029	0.0021	1190.9	11.0	1184.0	34.0	1174.0	98.0	1190.9	11.0	-0.6
PN_31	0.0774	0.0042	2.1730	0.1200	0.2033	0.0027	1193.0	14.0	1171.0	37.0	1133.0	110.0	1193.0	14.0	-1.9
PN_32	0.0775	0.0042	1.8590	0.1200	0.1719	0.0038	1022.0	21.0	1066.0	40.0	1129.0	100.0	1022.0	21.0	4.1
PN_33	0.0507	0.0062	0.3090	0.0340	0.0416	0.0011	262.4	6.6	271.0	27.0	310.0	230.0	262.4	6.6	3.2
PN_34	0.0724	0.0037	1.6440	0.0850	0.1645	0.0017	981.8	9.4	987.0	31.0	992.0	100.0	981.8	9.4	0.5
PN_35	0.0730	0.0041	1.7220	0.0900	0.1705	0.0025	1015.0	14.0	1016.0	34.0	1031.0	110.0	1015.0	14.0	0.1
PN_36	0.0526	0.0044	0.2880	0.0230	0.0397	0.0007	250.7	4.4	256.0	18.0	270.0	180.0	250.7	4.4	2.1
PN_37	0.0520	0.0052	0.2930	0.0290	0.0404	0.0009	255.5	5.7	266.0	23.0	250.0	190.0	255.5	5.7	3.9
PN_38	0.0487	0.0039	0.1880	0.0150	0.0280	0.0004	177.9	2.2	176.0	13.0	140.0	160.0	177.9	2.2	-1.1
PN_39	0.0620	0.0580	0.1180	0.2900	0.0134	0.0025	85.9	16.0	113.0	140.0	590.0	430.0	85.9	16.0	24.0
PN_40	0.0499	0.0065	0.0981	0.0140	0.0142	0.0002	91.2	1.4	94.9	13.0	202.0	210.0	91.2	1.4	3.9
PN_41	0.0717	0.0035	1.6700	0.0860	0.1684	0.0028	1003.2	15.0	997.1	31.0	976.0	110.0	1003.2	15.0	-0.6
PN_42	0.0472	0.0031	0.2720	0.0200	0.0400	0.0010	252.7	6.2	243.0	16.0	100.0	140.0	252.7	6.2	-4.0
PN_43	0.0589	0.0039	0.7340	0.0550	0.0897	0.0038	554.0	22.0	555.0	33.0	520.0	160.0	554.0	22.0	0.2
PN_44	1.1000	0.5300	0.0051	0.0028	0.0001	0.0000	0.3	0.2	5.2	2.8	600.0	6200.0	0.3	0.2	99.7
PN_45	0.0967	0.0053	3.6900	0.2000	0.2755	0.0059	1569.0	28.0	1566.0	45.0	1552.0	100.0	1552.0	100.0	-0.2
PN_46	0.2710	0.0540	0.0750	0.0240	0.0023	0.0003	15.0	1.6	73.0	21.0	3170.0	290.0	15.0	1.6	79.5
PN_47	0.3800	0.3200	0.0300	0.0170	0.0008	0.0002	4.9	1.0	30.0	16.0	1200.0	3200.0	4.9	1.0	83.8
PN_48	0.0564	0.0037	0.5480	0.0350	0.0699	0.0010	435.6	5.9	442.0	22.0	440.0	140.0	435.6	5.9	1.4
PN_49	0.0680	0.0490	0.0129	0.0081	0.0013	0.0002	8.1	1.0	12.7	8.1	-200.0	1100.0	8.1	1.0	36.5
PN_50	0.8500	0.4900	0.0089	0.0082	0.0001	0.0001	0.9	0.4	9.0	8.0	1800.0	2000.0	0.9	0.4	89.7

Anexo 5. Continuación

CIRCÓN	RELACIONES CORREGIDAS						EIDADES CORREGIDAS (Ma)								
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	Edad (Ma)	$\pm 2\sigma$	Disc %
PN_51	0.0570	0.0030	0.5090	0.0270	0.0657	0.0008	410.3	5.0	417.8	18.0	482.0	120.0	410.3	5.0	1.8
PN_52	0.0620	0.0300	0.1460	0.0740	0.0203	0.0013	129.6	8.4	129.0	67.0	-260.0	840.0	129.6	8.4	-0.5
PN_53	0.0732	0.0051	1.6100	0.1200	0.1605	0.0030	959.0	17.0	971.0	45.0	1020.0	140.0	959.0	17.0	1.2
PN_54	0.0557	0.0031	0.5970	0.0340	0.0775	0.0012	481.3	7.1	475.0	21.0	429.0	120.0	481.3	7.1	-1.3
PN_55	0.0742	0.0037	1.8570	0.0920	0.1804	0.0021	1069.0	12.0	1068.0	34.0	1043.0	100.0	1069.0	12.0	-0.1
PN_56	0.0563	0.0076	0.1050	0.0140	0.0132	0.0004	84.7	2.4	101.0	13.0	490.0	260.0	84.7	2.4	16.1
PN_57	0.0720	0.0042	1.6990	0.0980	0.1704	0.0024	1014.0	13.0	1006.0	37.0	968.0	120.0	1014.0	13.0	-0.8
PN_58	0.0734	0.0035	1.7850	0.0830	0.1746	0.0029	1038.0	16.0	1039.9	30.0	1022.0	97.0	1038.0	16.0	0.2
PN_59	0.0705	0.0035	1.5620	0.0750	0.1609	0.0020	961.6	11.0	956.6	29.0	938.0	100.0	961.6	11.0	-0.5
PN_60	0.0535	0.0047	0.3170	0.0270	0.0435	0.0008	274.5	5.2	278.0	21.0	330.0	190.0	274.5	5.2	1.3
PN_61	0.0716	0.0043	1.6620	0.0990	0.1679	0.0027	1000.0	15.0	991.0	38.0	956.0	130.0	1000.0	15.0	-0.9
PN_62	0.0626	0.0058	0.6350	0.0590	0.0733	0.0017	456.0	10.0	510.0	37.0	710.0	200.0	456.0	10.0	10.6
PN_63	0.0510	0.0280	0.0157	0.0150	0.0025	0.0002	16.0	1.2	17.1	14.0	140.0	590.0	16.0	1.2	6.4
PN_64	0.0767	0.0049	2.0900	0.1400	0.1951	0.0032	1149.0	17.0	1145.0	46.0	1104.0	130.0	1149.0	17.0	-0.3
PN_65	0.0750	0.0040	1.7560	0.0980	0.1708	0.0032	1016.0	17.0	1028.0	35.0	1057.0	110.0	1016.0	17.0	1.2
PN_66	0.0792	0.0043	1.1600	0.1100	0.1045	0.0064	641.0	36.0	781.0	45.0	1200.0	110.0	641.0	36.0	17.9
PN_67	0.0495	0.0032	0.1905	0.0120	0.0279	0.0004	177.3	2.5	176.8	11.0	170.0	140.0	177.3	2.5	-0.3
PN_68	0.0512	0.0077	0.1040	0.0150	0.0147	0.0006	94.2	3.7	99.0	14.0	190.0	290.0	94.2	3.7	4.8
PN_69	0.0702	0.0045	1.6580	0.1000	0.1709	0.0034	1017.0	19.0	995.0	39.0	920.0	130.0	1017.0	19.0	-2.2
PN_70	0.0637	0.0048	0.5950	0.0410	0.0677	0.0014	422.3	8.3	472.0	27.0	710.0	170.0	422.3	8.3	10.5
PN_71	0.0541	0.0069	0.2810	0.0400	0.0387	0.0011	244.9	6.7	254.0	31.0	270.0	270.0	244.9	6.7	3.6
PN_72	0.0476	0.0031	0.1465	0.0110	0.0218	0.0005	139.0	3.0	138.5	9.6	88.0	140.0	139.0	3.0	-0.4
PN_73	0.0722	0.0040	1.6620	0.0920	0.1682	0.0022	1002.0	12.0	992.0	35.0	981.0	110.0	1002.0	12.0	-1.0
PN_74	0.0693	0.0036	1.3920	0.0680	0.1452	0.0016	873.9	9.2	885.0	30.0	902.0	110.0	873.9	9.2	1.3
PN_75	0.0676	0.0036	1.4090	0.0740	0.1511	0.0018	906.9	9.8	891.0	31.0	847.0	110.0	906.9	9.8	-1.8

Anexo 5. Continuación

CIRCÓN	RELACIONES CORREGIDAS						EDADES CORREGIDAS (Ma)								
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$ abs	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	Edad (Ma)	$\pm 2\sigma$	Disc %
PN_76	0.0520	0.0086	0.0118	0.0020	0.0016	0.0001	10.5	0.4	11.9	2.0	140.0	250.0	10.5	0.4	11.4
PN_77	0.0535	0.0036	0.4910	0.0370	0.0670	0.0021	418.0	12.0	404.0	26.0	310.0	150.0	418.0	12.0	-3.5
PN_78	0.0390	0.0240	0.0130	0.0070	0.0022	0.0002	14.3	1.2	12.8	6.9	-420.0	750.0	14.3	1.2	11.7
PN_79	0.1180	0.0560	0.0203	0.0160	0.0013	0.0002	8.3	1.2	20.3	15.0	1850.0	390.0	8.3	1.2	58.9
PN_80	0.0819	0.0046	2.4520	0.1400	0.2173	0.0030	1268.0	16.0	1256.0	41.0	1243.0	120.0	1268.0	16.0	-1.0
PN_81	1.7000	1.8000	0.0094	0.0048	0.0001	0.0000	0.5	0.3	9.4	4.8	40000.0	9700.0	0.5	0.3	95.0
PN_82	0.0528	0.0060	0.2870	0.0310	0.0390	0.0010	246.9	6.3	254.0	25.0	310.0	230.0	246.9	6.3	2.8
PN_83	0.0490	0.0200	0.0101	0.0042	0.0016	0.0001	10.6	0.8	10.1	4.2	20.0	660.0	10.6	0.8	-4.5
PN_84	0.0533	0.0032	0.1984	0.0150	0.0266	0.0013	168.9	8.2	183.6	13.0	362.0	140.0	168.9	8.2	8.0
PN_85	0.0547	0.0048	0.5720	0.0530	0.0757	0.0019	470.0	11.0	459.0	34.0	370.0	180.0	470.0	11.0	-2.4
PN_86	0.0848	0.0050	1.9650	0.1100	0.1685	0.0026	1004.0	14.0	1101.0	39.0	1290.0	120.0	1004.0	14.0	8.8
PN_87	0.0553	0.0057	0.3330	0.0350	0.0442	0.0009	278.9	5.7	295.0	25.0	440.0	200.0	278.9	5.7	5.5
PN_88	0.0829	0.0041	2.4740	0.1200	0.2174	0.0033	1268.0	18.0	1266.0	38.0	1263.0	98.0	1268.0	18.0	-0.2
PN_89	0.0440	0.0073	0.0162	0.0026	0.0028	0.0001	18.2	0.7	16.3	2.6	-100.0	310.0	18.2	0.7	11.8
PN_90	0.0513	0.0046	0.3160	0.0290	0.0451	0.0009	284.4	5.6	277.0	22.0	300.0	200.0	284.4	5.6	-2.7
PN_91	0.0765	0.0110	0.0183	0.0026	0.0018	0.0000	11.3	0.3	18.4	2.6	990.0	270.0	11.3	0.3	38.6
PN_92	0.8100	0.1000	0.0610	0.0320	0.0006	0.0003	3.6	1.8	59.9	28.0	4930.0	260.0	3.6	1.8	93.9
PN_93	0.0557	0.0034	0.5800	0.0360	0.0760	0.0012	472.2	7.1	463.0	23.0	432.0	140.0	472.2	7.1	-2.0
PN_94	0.0716	0.0045	1.6610	0.1000	0.1693	0.0029	1008.0	16.0	995.0	39.0	948.0	130.0	1008.0	16.0	-1.3
PN_95	0.0680	0.0160	0.0140	0.0031	0.0016	0.0001	10.3	0.5	14.7	3.1	570.0	450.0	10.3	0.5	30.3
PN_96	2.0000	1.8000	0.0440	0.0290	0.0004	0.0002	2.6	1.4	40.0	27.0	20000.0	13000.0	2.6	1.4	93.5
PN_97	0.0710	0.0036	1.5130	0.0780	0.1532	0.0020	919.0	11.0	934.0	31.0	975.0	100.0	919.0	11.0	1.6
PN_98	0.0600	0.0170	0.0215	0.0061	0.0027	0.0001	17.3	0.9	21.4	6.1	280.0	530.0	17.3	0.9	19.1
PN_99	0.0781	0.0047	1.7530	0.0960	0.1627	0.0029	972.0	16.0	1031.0	38.0	1150.0	120.0	972.0	16.0	5.7
PN_100	0.0630	0.0140	0.0258	0.0065	0.0033	0.0002	21.1	0.9	25.8	6.3	660.0	360.0	21.1	0.9	18.2

Anexo 6. Resultados de geocronología U-Pb en circones de Playa Tamiahua

CIRCÓN	RELACIONES CORREGIDAS						EDADES CORREGIDAS (Ma)						Edad (Ma)	±2σ	Disc %
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ			
TA_01	0.1040	0.0049	4.2740	0.2000	0.3013	0.0033	1698.0	16.0	1688.0	39.0	1694.0	90.0	1694.0	90.0	-0.6
TA_02	0.0460	0.0055	0.0304	0.0034	0.0050	0.0001	31.8	0.7	30.3	3.4	50.0	230.0	31.8	0.7	-5.1
TA_03	0.0474	0.0034	0.0728	0.0049	0.0113	0.0002	72.5	1.0	71.3	4.6	60.0	150.0	72.5	1.0	-1.7
TA_04	0.0570	0.0170	0.0363	0.0110	0.0051	0.0003	33.0	1.8	36.0	11.0	570.0	410.0	33.0	1.8	8.3
TA_05	0.0970	0.0130	0.0840	0.0120	0.0060	0.0002	38.6	1.2	81.0	11.0	1490.0	290.0	38.6	1.2	52.3
TA_06	0.4200	0.4000	0.0136	0.0053	0.0006	0.0001	4.2	0.5	13.6	5.3	1200.0	1600.0	4.2	0.5	69.3
TA_07	0.0551	0.0034	0.5340	0.0330	0.0702	0.0010	437.5	5.8	433.0	22.0	422.0	140.0	437.5	5.8	-1.0
TA_08	0.0870	0.0130	0.0610	0.0100	0.0054	0.0003	34.9	1.6	63.0	9.1	1220.0	300.0	34.9	1.6	44.6
TA_09	0.2680	0.0320	0.2610	0.0360	0.0070	0.0004	44.7	2.6	232.0	28.0	3260.0	180.0	44.7	2.6	80.7
TA_10	0.0519	0.0068	0.1120	0.0140	0.0162	0.0004	103.6	2.3	107.3	13.0	270.0	250.0	103.6	2.3	3.4
TA_11	0.0578	0.0040	0.5650	0.0390	0.0709	0.0011	441.7	6.8	453.0	25.0	500.0	160.0	441.7	6.8	2.5
TA_12	0.0750	0.0160	0.0369	0.0078	0.0039	0.0002	24.9	1.3	36.7	7.6	870.0	400.0	24.9	1.3	32.2
TA_13	0.0455	0.0042	0.0747	0.0067	0.0120	0.0002	76.6	1.5	73.0	6.3	-30.0	180.0	76.6	1.5	-4.9
TA_14	0.1072	0.0056	4.4200	0.2300	0.2989	0.0036	1692.0	18.0	1714.0	42.0	1748.0	94.0	1748.0	94.0	1.3
TA_15	0.0537	0.0038	0.1940	0.0130	0.0267	0.0004	170.1	2.7	181.0	12.0	350.0	170.0	170.1	2.7	6.0
TA_16	0.0680	0.0092	0.0462	0.0063	0.0049	0.0002	31.7	1.1	45.8	6.1	710.0	290.0	31.7	1.1	30.8
TA_17	0.0507	0.0031	0.1781	0.0110	0.0258	0.0004	164.1	2.3	166.3	9.4	215.0	140.0	164.1	2.3	1.3
TA_18	0.1051	0.0051	4.3880	0.2000	0.3023	0.0032	1703.0	16.0	1713.0	37.0	1713.0	89.0	1713.0	89.0	0.6
TA_19	0.0880	0.0043	3.0330	0.1500	0.2510	0.0026	1443.0	13.0	1415.0	37.0	1391.0	95.0	1391.0	95.0	-2.0
TA_20	0.0700	0.0130	0.0530	0.0085	0.0052	0.0003	33.1	1.6	52.0	8.1	860.0	350.0	33.1	1.6	36.3
TA_21	0.0899	0.0044	3.0450	0.1500	0.2478	0.0025	1427.0	13.0	1425.0	41.0	1419.0	93.0	1419.0	93.0	-0.1
TA_22	0.0535	0.0050	0.2550	0.0230	0.0351	0.0005	222.5	3.3	230.0	18.0	300.0	190.0	222.5	3.3	3.3
TA_23	0.0763	0.0039	2.0330	0.1200	0.1896	0.0038	1119.0	21.0	1126.0	38.0	1098.0	100.0	1119.0	21.0	0.6
TA_24	0.0770	0.0140	0.0540	0.0110	0.0051	0.0002	32.7	1.4	53.0	10.0	840.0	290.0	32.7	1.4	38.3
TA_25	0.0503	0.0044	0.0816	0.0074	0.0117	0.0003	74.8	2.1	79.4	6.9	250.0	190.0	74.8	2.1	5.8

Anexo 6. Continuación

CIRCÓN	RELACIONES CORREGIDAS						EIDADES CORREGIDAS (Ma)								
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ	Edad (Ma)	±2σ	Disc %
TA_26	0.0560	0.0130	0.0440	0.0110	0.0058	0.0003	37.5	1.8	44.0	10.0	230.0	410.0	37.5	1.8	14.8
TA_27	0.0502	0.0059	0.0795	0.0092	0.0116	0.0003	74.4	2.1	77.3	8.7	220.0	240.0	74.4	2.1	3.8
TA_28	0.0471	0.0070	0.0700	0.0110	0.0107	0.0003	68.4	2.0	68.2	10.0	30.0	290.0	68.4	2.0	-0.3
TA_29	0.0508	0.0044	0.0353	0.0029	0.0051	0.0001	32.7	0.7	35.2	2.8	200.0	180.0	32.7	0.7	7.1
TA_30	0.0650	0.0110	0.0411	0.0065	0.0048	0.0002	30.9	1.2	40.7	6.3	550.0	360.0	30.9	1.2	24.1
TA_31	0.0842	0.0041	2.6430	0.1300	0.2292	0.0021	1330.4	11.0	1312.0	35.0	1294.0	99.0	1330.4	11.0	-1.4
TA_32	0.0511	0.0050	0.0981	0.0097	0.0140	0.0003	89.6	1.9	96.5	9.0	260.0	210.0	89.6	1.9	7.2
TA_33	0.0499	0.0043	0.0791	0.0064	0.0120	0.0003	76.6	2.1	77.2	6.1	180.0	190.0	76.6	2.1	0.8
TA_34	0.2320	0.0330	0.1970	0.0420	0.0066	0.0005	42.1	3.4	181.0	33.0	3000.0	190.0	42.1	3.4	76.7
TA_35	0.1092	0.0054	4.9500	0.2700	0.3296	0.0060	1836.0	29.0	1810.0	43.0	1798.0	94.0	1798.0	94.0	-1.4
TA_36	0.0542	0.0066	0.1045	0.0120	0.0139	0.0003	88.7	1.8	100.7	11.0	360.0	220.0	88.7	1.8	11.9
TA_37	0.0861	0.0051	2.7700	0.1600	0.2327	0.0040	1348.0	21.0	1344.0	43.0	1340.0	110.0	1348.0	21.0	-0.3
TA_38	0.0522	0.0035	0.0314	0.0019	0.0044	0.0001	28.5	0.4	31.4	1.9	260.0	140.0	28.5	0.4	9.3
TA_39	0.0522	0.0071	0.0357	0.0055	0.0050	0.0002	32.1	1.0	35.6	5.3	270.0	260.0	32.1	1.0	9.8
TA_40	0.0550	0.0190	0.0370	0.0130	0.0050	0.0003	32.0	2.0	36.0	13.0	110.0	630.0	32.0	2.0	11.1
TA_41	0.0528	0.0037	0.3360	0.0240	0.0450	0.0007	283.9	4.2	293.0	18.0	390.0	140.0	283.9	4.2	3.1
TA_42	0.0530	0.0350	0.0400	0.0340	0.0053	0.0003	34.1	2.1	39.0	33.0	200.0	570.0	34.1	2.1	12.6
TA_43	0.0710	0.0380	0.0038	0.0015	0.0004	0.0000	2.4	0.2	3.8	1.5	400.0	860.0	2.4	0.2	36.6
TA_44	0.0514	0.0041	0.1820	0.0150	0.0259	0.0005	165.0	2.9	170.0	13.0	230.0	170.0	165.0	2.9	2.9
TA_45	0.1000	0.0300	0.0720	0.0290	0.0054	0.0004	34.9	2.3	70.0	25.0	1540.0	350.0	34.9	2.3	50.1
TA_46	0.0880	0.0260	0.0530	0.0190	0.0050	0.0004	32.2	2.4	52.0	17.0	1210.0	490.0	32.2	2.4	38.1
TA_47	0.0530	0.0590	0.0366	0.1200	0.0050	0.0011	32.4	7.2	36.4	80.0	220.0	440.0	32.4	7.2	11.0
TA_48	0.0536	0.0110	0.0940	0.0200	0.0130	0.0005	83.3	3.1	90.0	18.0	290.0	340.0	83.3	3.1	7.4
TA_49	0.0490	0.0100	0.0570	0.0120	0.0085	0.0004	54.6	2.4	56.0	11.0	140.0	390.0	54.6	2.4	2.5
TA_50	0.0950	0.0460	0.0067	0.0033	0.0006	0.0001	3.9	0.4	6.7	3.4	100.0	1000.0	3.9	0.4	41.9

Anexo 6. Continuación

CIRCÓN	RELACIONES CORREGIDAS						EIDADES CORREGIDAS (Ma)						Edad (Ma)	±2σ	Disc %
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ			
TA_51	0.0700	0.0220	0.0460	0.0150	0.0050	0.0003	32.2	2.0	45.0	15.0	700.0	500.0	32.2	2.0	28.4
TA_52	0.0521	0.0068	0.0990	0.0130	0.0138	0.0005	88.1	3.0	95.0	12.0	270.0	270.0	88.1	3.0	7.3
TA_53	0.0870	0.0170	0.0578	0.0140	0.0049	0.0002	31.3	1.4	56.9	13.0	1320.0	280.0	31.3	1.4	45.0
TA_54	0.0504	0.0064	0.1670	0.0210	0.0236	0.0008	150.0	4.9	156.0	18.0	220.0	250.0	150.0	4.9	3.8
TA_55	0.0547	0.0049	0.0900	0.0078	0.0121	0.0002	77.7	1.5	87.3	7.2	380.0	190.0	77.7	1.5	11.0
TA_56	0.0797	0.0054	2.2270	0.1400	0.2057	0.0051	1206.0	27.0	1191.0	45.0	1160.0	140.0	1206.0	27.0	-1.3
TA_57	0.0590	0.0120	0.0495	0.0120	0.0062	0.0002	40.1	1.1	49.0	11.0	560.0	230.0	40.1	1.1	18.2
TA_58	0.0750	0.0220	0.0490	0.0170	0.0049	0.0002	31.3	1.4	48.0	15.0	940.0	300.0	31.3	1.4	34.8
TA_59	0.0900	0.0310	0.0630	0.0290	0.0055	0.0004	35.4	2.7	62.0	25.0	1100.0	230.0	35.4	2.7	42.9
TA_60	0.0457	0.0200	0.0354	0.0190	0.0058	0.0003	37.2	1.9	35.2	18.0	80.0	460.0	37.2	1.9	-5.7
TA_61	0.0538	0.0086	0.1800	0.0280	0.0245	0.0006	156.2	3.8	169.0	25.0	280.0	330.0	156.2	3.8	7.6
TA_62	0.0550	0.0420	0.0400	0.0430	0.0053	0.0004	34.3	2.6	40.0	38.0	380.0	490.0	34.3	2.6	14.3
TA_63	0.0538	0.0076	0.0255	0.0035	0.0034	0.0001	22.1	0.5	25.5	3.4	230.0	280.0	22.1	0.5	13.4
TA_64	0.0570	0.0110	0.0362	0.0071	0.0046	0.0002	29.7	1.2	35.9	7.0	310.0	400.0	29.7	1.2	17.3
TA_65	0.0700	0.0130	0.0510	0.0092	0.0051	0.0002	32.7	1.4	50.0	8.8	870.0	370.0	32.7	1.4	34.6
TA_66	0.1480	0.0790	0.1180	0.2900	0.0067	0.0021	43.0	13.0	112.0	150.0	2090.0	380.0	43.0	13.0	61.6
TA_67	0.0568	0.0031	0.6710	0.0360	0.0848	0.0012	524.5	7.0	521.0	21.0	486.0	110.0	524.5	7.0	-0.7
TA_68	0.0700	0.0095	0.0500	0.0062	0.0053	0.0002	34.1	0.9	49.4	6.0	810.0	280.0	34.1	0.9	31.0
TA_69	0.1280	0.0430	0.0500	0.0150	0.0028	0.0003	17.9	1.9	49.0	15.0	1200.0	610.0	17.9	1.9	63.5
TA_70	0.0750	0.0110	0.2210	0.0330	0.0231	0.0011	147.4	7.0	200.0	26.0	820.0	320.0	147.4	7.0	26.3
TA_71	0.0532	0.0038	0.1959	0.0130	0.0267	0.0004	169.7	2.3	181.4	11.0	340.0	140.0	169.7	2.3	6.4
TA_72	0.1053	0.0053	4.6820	0.2300	0.3245	0.0038	1812.0	19.0	1767.0	40.0	1714.0	92.0	1714.0	92.0	-2.5
TA_73	0.0630	0.0260	0.0450	0.0200	0.0054	0.0003	34.4	2.1	44.0	19.0	430.0	560.0	34.4	2.1	21.8
TA_74	0.0483	0.0042	0.0771	0.0069	0.0118	0.0002	75.6	1.5	75.3	6.5	90.0	180.0	75.6	1.5	-0.4
TA_75	0.0508	0.0082	0.1640	0.0270	0.0237	0.0008	150.9	5.1	153.0	23.0	160.0	280.0	150.9	5.1	1.4

Anexo 6. Continuación

CIRCÓN	RELACIONES CORREGIDAS						EIDADES CORREGIDAS (Ma)						Edad (Ma)	±2σ	Disc %
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ abs	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ abs	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ			
TA_76	0.0590	0.0190	0.0450	0.0160	0.0057	0.0004	36.4	2.4	44.0	16.0	580.0	500.0	36.4	2.4	17.3
TA_77	0.0549	0.0140	0.1700	0.0430	0.0215	0.0007	137.3	4.7	158.0	36.0	460.0	350.0	137.3	4.7	13.1
TA_78	0.0473	0.0037	0.1247	0.0099	0.0191	0.0003	122.2	1.8	119.1	9.0	70.0	170.0	122.2	1.8	-2.6
TA_79	0.0620	0.0140	0.0430	0.0100	0.0052	0.0003	33.5	1.8	43.0	10.0	560.0	460.0	33.5	1.8	22.1
TA_80	0.0580	0.0069	0.0620	0.0074	0.0079	0.0002	50.9	1.3	61.0	7.0	460.0	240.0	50.9	1.3	16.6
TA_81	0.0522	0.0061	0.1060	0.0120	0.0147	0.0004	94.2	2.6	102.0	11.0	260.0	230.0	94.2	2.6	7.6
TA_82	0.0437	0.0100	0.0340	0.0082	0.0058	0.0003	36.9	1.9	33.6	8.0	-160.0	380.0	36.9	1.9	-9.8
TA_83	0.0590	0.0094	0.0354	0.0053	0.0044	0.0002	28.5	1.0	35.1	5.0	340.0	300.0	28.5	1.0	18.8
TA_84	0.0570	0.0130	0.0381	0.0085	0.0050	0.0002	32.4	1.4	37.7	8.3	350.0	420.0	32.4	1.4	14.1
TA_85	0.0799	0.0043	2.0760	0.1200	0.1916	0.0052	1129.0	28.0	1138.0	38.0	1186.0	110.0	1129.0	28.0	0.8
TA_86	0.0495	0.0076	0.0780	0.0120	0.0108	0.0003	69.4	2.0	76.0	11.0	150.0	310.0	69.4	2.0	8.7
TA_87	0.0503	0.0049	0.1570	0.0130	0.0227	0.0004	144.9	2.8	147.5	11.0	190.0	180.0	144.9	2.8	1.8
TA_88	0.0570	0.0150	0.0410	0.0110	0.0054	0.0004	34.8	2.3	40.0	11.0	170.0	510.0	34.8	2.3	13.0
TA_89	0.0504	0.0076	0.2000	0.0270	0.0270	0.0010	171.6	6.1	182.0	23.0	260.0	300.0	171.6	6.1	5.7
TA_90	0.0802	0.0047	0.6270	0.1100	0.0569	0.0072	357.0	43.0	493.0	56.0	1194.0	100.0	357.0	43.0	27.6
TA_91	0.3980	0.0560	0.5180	0.1100	0.0093	0.0009	59.6	5.9	417.0	62.0	3920.0	170.0	59.6	5.9	85.7
TA_92	0.0510	0.0330	0.0470	0.0280	0.0061	0.0005	39.5	3.1	51.0	26.0	110.0	700.0	39.5	3.1	22.5
TA_93	0.0507	0.0036	0.2650	0.0190	0.0380	0.0006	240.4	3.7	238.0	15.0	200.0	160.0	240.4	3.7	-1.0
TA_94	0.0579	0.0081	0.0391	0.0046	0.0049	0.0001	31.6	0.9	38.9	4.5	460.0	250.0	31.6	0.9	18.8
TA_95	0.0670	0.0440	0.0520	0.0910	0.0057	0.0011	36.9	6.8	51.0	62.0	590.0	570.0	36.9	6.8	27.6
TA_96	0.0488	0.0049	0.0410	0.0041	0.0059	0.0001	37.8	0.9	40.7	4.0	210.0	210.0	37.8	0.9	7.1
TA_97	0.0734	0.0046	1.6440	0.1000	0.1635	0.0031	976.0	17.0	988.0	39.0	1004.0	130.0	976.0	17.0	1.2
TA_98	0.0560	0.0170	0.0366	0.0120	0.0044	0.0002	28.5	1.1	36.4	11.0	440.0	350.0	28.5	1.1	21.7
TA_99	0.0567	0.0073	0.0790	0.0130	0.0104	0.0003	66.9	2.0	76.7	12.0	370.0	250.0	66.9	2.0	12.8
TA_100	0.0480	0.0056	0.0724	0.0079	0.0107	0.0003	68.6	1.6	70.7	7.5	110.0	240.0	68.6	1.6	3.0

