



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERIA

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

**“Dinámica eólica en dunas costeras del centro del estado de
Veracruz, México”**

T E S I S

Para obtener el título de:

INGENIERO GEÓLOGO AMBIENTAL

Presenta:

ROBERTO OMAR MEJÍA LEDEZMA

Director Externo

Dr. Juan José Kasper Zubillaga

Director Interno

Dr. Enrique Cruz Chávez

Mineral de la Reforma, Hgo., septiembre de 2018



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Institute of Basic Sciences and Engineering
Dirección
Dean

Mineral de la Reforma, Hgo., a 25 de julio de 2018

Número de control: ICBI-D/644/2018
Asunto: Autorización de tesis.

**M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado al pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental **Roberto Omar Mejía Ledezma**, quien presenta el trabajo de "**Dinámica eólica en dunas costeras del centro del estado de Veracruz, México**", después de revisar el trabajo ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE: Ing. José Alfredo Meneses Lugo

PRIMER VOCAL: Dr. Enrique Cruz Chávez

SEGUNDO VOCAL: Dr. Juan José Kasper Zubillaga

TERCER VOCAL: M. en C. Héctor Jesús Tapia Fernández

SECRETARIO: Ing. Xenia Uribe López

PRIMER SUPLENTE: Dr. Edgar Misael Uribe Alcántara

SEGUNDO SUPLENTE: Dr. Jesús David Quiroz Jiménez

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Oscar Rodolfo Suárez Castillo
Director del ICBI

ORSC/IVL



Ciudad del Conocimiento
Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5
Colonia Carboneras
Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184
Tel. +52 771 7172000 exts 2231, Fax 2109
direccion_icbi@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx

A mi mamá, abuela y tía.

Agradecimientos

A todos los profesores de quienes tuve la oportunidad de aprender, tanto académica como personalmente.

Al laboratorio de Geoquímica del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, por el apoyo brindado al facilitar el equipo usado en este trabajo.

Al Dr. Juan José Kasper Zubillaga por todo el apoyo brindado, por confiar en mí y darme la oportunidad de seguir adelante en mi formación académica.

Al Dr. Enrique Cruz Chávez por sus consejos y apoyo durante todo este proceso.

A los miembros del jurado: Ing. José Alfredo Meneses Lugo, M. en C. Héctor Jesús Tapia Fernández, Ing. Xenia Uribe López, Dr. Edgar Misael Uribe Alcántara y Dr. Jesús David Quiroz Jiménez, gracias por sus observaciones, consejos, correcciones, tiempo y paciencia.

A toda mi familia por su confianza y apoyo.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
CAPÍTULO 1.....	3
1.1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4. HIPÓTESIS.....	5
1.5. ANTECEDENTES.....	5
CAPÍTULO 2.....	8
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. SEDIMENTOS.....	8
2.1.1. TERRÍGENOS	8
2.1.2. ALOQUÍMICOS	8
2.1.3. ORTOQUÍMICOS	8
2.2. AMBIENTES SEDIMENTARIOS	9
2.3. AMBIENTES EÓLICOS	9
2.3.1. DUNAS BARJÁN.....	11
2.3.2. DUNAS PARABÓLICAS.....	12
2.3.3. DUNAS TRANSVERSALES	12
2.4. AMBIENTES LITORALES.....	13
2.5. VIENTOS.....	14
CAPÍTULO 3.....	16
GENERALIDADES	16
3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	16
3.2. HIDROLOGÍA.....	17
3.2.1. GOLFO DE MÉXICO.....	17
3.2.2. CONTINENTAL.....	17
3.2.2.1. CUENCA DEL RÍO NAUTLA	18
3.2.2.2. CUENCA DEL RÍO ACTOPAN.....	18

3.3. GEOLOGÍA	19
3.4. CLIMA	21
CAPÍTULO 4.....	22
METODOLOGÍA Y EQUIPO	22
4.1. TRABAJO DE CAMPO.....	22
4.1.1. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	22
4.1.2. MEDICIÓN DE VIENTOS	23
4.2. TRABAJO DE LABORATORIO	24
4.3. PARÁMETROS TEXTURALES.....	25
4.3.1. TAMAÑO DE GRANO (ϕ).....	25
4.3.2. DESVIACIÓN ESTÁNDAR/CLASIFICACIÓN (σ).....	26
4.3.3. SKEWNESS (SK_1).....	26
4.3.4. KURTOSIS (K_G)	27
4.4. DIAGNÓSTICO EÓLICO EN DUNAS.....	28
4.5. REDONDEZ	28
4.6. CONTEO DE MINERALES	29
4.7. ANÁLISIS CLÚSTER	29
4.8. IMÁGENES SATELITALES	30
CAPÍTULO 5.....	31
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
5.1. VIENTOS.....	31
5.2. ANÁLISIS TEXTURAL.....	33
5.3. REDONDEZ	38
5.4. ANÁLISIS CLÚSTER DE MINERALES LIGEROS Y PESADOS.....	42
CAPÍTULO 6.....	44
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
REFERENCIAS.....	46
GLOSARIO	53
ANEXOS	54
ARTÍCULO	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Clasificación de ambientes sedimentarios, tomada de Arche (2010).....	9
Fig. 2. Ondulitas en la localidad de Villa Rica, Veracruz, México. Fotografía tomada en campo.	10
Fig. 3. Duna vegetada en la localidad de Lechuguillas. Fotografía tomada en campo.....	10
Fig. 4. Dunas tipo Barján, la flecha indica la dirección del viento.....	11
Fig. 5. Dunas Parabólicas, la flecha indica la dirección del viento.	12
Fig. 6. Dunas Transversales, la flecha indica la dirección del viento.	13
Fig. 7. Partes de la playa en la localidad de El Morro.	14
Fig. 8. Tipos de transporte eólico, modificado de Pye (1987).	15
Fig. 9. Cuencas hidrológicas en el centro del estado de Veracruz. Modificado de Priego et al. (2007).....	19
Fig. 10. Mapa Geológico del área del centro del estado de Veracruz. Modificado de Servicio Geológico Mexicano (2002 y 2004).....	20
Fig. 11. Mapa de climas dominantes en la región, modificado de García (1998).	21
Fig. 12. Mapa topográfico de la zona de estudio.	22
Fig. 13. Geomorfología de dunas barján con sus componentes en la localidad El Farallón (izquierda) y zonas de infra y mesoplaya en la localidad El Morro (derecha).	23
Fig. 14. Tamices de la ASTM usados para el trabajo	24
Fig. 15. Tabla de tamaño de grano, modificado de Udden (1914) y Wentworth (1922).	25
Fig. 16. Escala de Angulosidad (Modificada de Powers 1953)	29
Fig. 17. Rosa de Vientos, elaborada con datos de campo.	32
Fig. 18. Gráficas de análisis textural en dunas del norte y sur de Veracruz. El tamaño de grano (ϕ) y la clasificación (σ) están en escala (ϕ , ver Folk, 1968). Los demás parámetros son adimensionales.	36
Fig. 19. Gráfica de análisis textural en playas del norte y sur de Veracruz. El tamaño de grano (ϕ) y la clasificación (σ) están en escala (ϕ , ver Folk, 1968). Los demás parámetros son adimensionales.	37
Fig. 20. Minerales opacos en Lechuguillas y lítico volcánico en Palma Sola. Escala 500 μm	37
Fig. 21. Diagramas ternarios de redondeo de cuarzo en localidades del norte y sur del centro de Veracruz.	40
Fig. 22. Granos de cuarzo monocristalino en la localidad de Chachalacas. Escala 500 μm	41
Fig. 23. Dendrograma de correlación entre las localidades del centro de Veracruz.	43
Fig. 24. Mapa de climas en hoja completa.	60
Fig. 25. Mapa de geología en hoja completa.	61
Fig. 26. Mapa de climas en hoja completa.	62
Fig. 27. Campo de dunas en la localidad Cangrejo.	63
Fig. 28. Campo de dunas en la localidad Lechuguillas.	63
Fig. 29. Campo de dunas en la localidad El Morro.	64
Fig. 30. Campo de dunas en la localidad Palma Sola.	64
Fig. 31. Campo de dunas en la localidad Boca Andrea.	65
Fig. 32. Campo de dunas en la localidad Villa Rica.	65
Fig. 33. Campo de dunas en la localidad El Farallón.	66
Fig. 34. Campo de dunas en la localidad La Mancha.	66
Fig. 35. Campo de dunas en la localidad Chachalacas.	67
Fig. 36. Distribución de minerales pesados.	68
Fig. 37. Distribución de granos de cuarzo.	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de las localidades	16
Tabla 2. Escala de Clasificación para sedimentos.	26
Tabla 3. Escala de Skewness para sedimentos.....	27
Tabla 4. Escala de Kurtosis para sedimentos.....	27
Tabla 5. Velocidad del viento.....	31
Tabla 6. Parámetros granulométricos de playas y dunas de Veracruz	33
Tabla 7. Redondez en granos de cuarzo monocristalino en arena de playa y duna n= 43	38
Tabla 8. Tabla completa de mediciones de velocidad del viento.	54
Tabla 9. Tabla completa de resultados del análisis textural	56

RESUMEN

Se realizaron estudios texturales, de redondez y distribución a sedimentos de dunas en costas del centro del Estado de Veracruz, México, para determinar sus características, comportamiento y evidencias de acción del viento, además de toma de mediciones de velocidades de viento en cada localidad como referencia de intensidad y dirección. Se muestrearon sedimentos de nueve localidades distribuidas a lo largo de la costa, tomando un total de $n=82$ muestras de sedimento pertenecientes a cresta, barlovento y sotavento, además de los subambientes de mesoplaya e infraplaya en cada localidad. Los resultados del análisis textural muestran que los sedimentos de las nueve localidades tienen tamaño de grano entre 2.726ϕ y 1.739ϕ y sedimentos en su mayoría moderadamente bien clasificados, con solo ligeras variaciones en las localidades ubicadas en la zona donde la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) divide a la región. En la misma zona, la distribución en la cantidad de minerales pesados comienza a decrecer, evidencia de pérdida de intensidad del viento para transportarlos, y las mediciones de velocidad del viento muestran una disminución en la velocidad, por lo cual la FVTM funge como barrera natural al dividir la región en dos zonas. El análisis de redondez mostró que los granos de cuarzo de las nueve localidades se encuentran fracturados en su mayoría, por lo cual los resultados no se consideran útiles para determinar transporte, pero sí como un indicativo de un ambiente de alta energía.

ABSTRACT

Textural, roundness and distribution studies were made to determine characteristics, behavior and wind activity evidences of coastal dunes sediments in the center section of the State of Veracruz, Mexico, also, wind speed meditions were taken to be use as a reference, Nine locations were sampled along the coast, with a total of n=82 sand samples from the stoss slope, crest and slipface, also foreshore and inshore samples were taken. Granulometric results indicates a grain size between 2.726 ϕ and 1.739 ϕ and a classification Moderately Well Sorted with just little varaitions in the locations where the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB) divide the region. In the same locations, wind speed and the amount of heavy minerals decrease as an evidence of the influence of the TMVB all over the region as a natural barrier. Roundness analysis shows that the quartz grains of the nine localities are fractured, reason why they cant be used to determine the transport distance, but give information about a high energy enviroment.

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUCCIÓN

Una duna es una acumulación de arena generada por acción del viento y el suministro de arena generada por erosión de terrenos sedimentarios y/o denudación de rocas cristalinas, formadas en desiertos o en el litoral (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2007a). Se forman bajo condiciones específicas como una fuente potencial de suministro de arena procedente de la erosión de materiales frágiles como rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas; principalmente areniscas, calizas, granitos, basaltos, así como ambientes sedimentarios expuestos en la superficie de la tierra como planicies aluviales, deltas antiguos, dunas móviles y estabilizadas, playas y ríos (Lancaster, 1988). Cada ambiente eólico cuenta con sus propias características en tamaño de grano y clasificación de sedimentos, los cuales son indicativos de procesos por los cuales han pasado los sedimentos (Langford *et al.*, 2015), en el caso de las dunas, se ha determinado que el transporte de los sedimentos por largas distancias da como resultado arenas de tamaño de grano fino y una buena clasificación (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2007b).

El clima seco y/o húmedo, el viento, el suministro de arena por parte de ambientes sedimentarios adyacentes por transporte fluvial y/o marino y erosión de rocas cristalinas, ej. volcánicas, sedimentarias, plutónicas y metamórficas, la geomorfología del área de depósito de las dunas son factores que contribuyen al establecimiento y preservación de dunas en zonas continentales y costeras (Muhs *et al.*, 2001, 2003). Los tipos de dunas se clasifican dependiendo de su forma, la cual está determinada por la dinámica eólica, geomorfología y aporte de sedimento (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2008; Muhs 2017).

En la costa del centro del estado de Veracruz, México, se observan dunas de tipo barján, parabólicas y transversales de diversos tamaños (Kasper-Zubillaga y Dickinson, 2001), formadas debido a la dirección e intensidad del viento, el cual varía dependiendo de factores como la fecha del año, ya que este suele ser más intenso durante la temporada de nortes. La ubicación del área dentro de la FVTM da como resultado que el material de aporte sea de

origen volcánico (Ferrari *et al.*, 2005; Gomez-Tuena *et al.*, 2007; Armstrong-Altrin *et al.*, 2012).

1.2. JUSTIFICACIÓN

Los estudios de tamaño, morfología y componentes del sedimento permiten conocer su relación con el viento. La región centro del estado de Veracruz es un ejemplo de un ambiente sedimentario óptimo, en donde el viento define la geomorfología del lugar y en donde también, en conjunto con otros factores, determina la morfología de los sedimentos que componen las dunas, razón por la cual, estudiar los sedimentos de la región aporta mucha información sobre la dinámica eólica de la misma, además de servir como estudios preliminares para un proyecto de aprovechamiento energético.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar a través de estudios granulométricos, morfológicos y petrográficos, además de observación de imágenes satelitales y datos de velocidad de viento, la relación entre los sedimentos y la dinámica eólica en las dunas costeras del centro del estado de Veracruz, México. Con la finalidad de tener un panorama del comportamiento del viento a través de los sedimentos, que pueda ser usado como antecedente para un proyecto de aprovechamiento energético.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características texturales de los sedimentos en dunas y playas del centro del estado de Veracruz.

- Establecer la relación entre la intensidad del viento, el tamaño de las dunas y la extensión de los campos de dunas, en las distintas localidades del centro del estado de Veracruz.
- Establecer la relación entre la intensidad del viento y la distribución de minerales pesados a lo largo de las costas del estado de Veracruz.

1.4. HIPÓTESIS

A lo largo de la región central del estado de Veracruz, se pueden encontrar campos de dunas a orilla de la playa, indicativo de constante aporte de sedimento y de acción del viento. Las dunas muestran un aumento en su tamaño y distribución en dirección hacia el sur, por lo cual es preciso pensar que la intensidad del viento es mayor en la misma dirección. Del mismo modo, la presencia de minerales ligeros y pesados (cuarzo-ilmenita), puede indicar alta energía eólica a lo largo de la costa.

1.5. ANTECEDENTES

Se han realizado diversos estudios en el estado de Veracruz, México, sobre viento, mineralogía y dinámica de dunas, que, en conjunto con trabajos similares en otras regiones del mundo, permiten tener un panorama amplio sobre la zona de estudio. Entre los trabajos antes mencionados se encuentran los siguientes:

Para la medición de vientos, la UNAM, por medio del Instituto de Geografía publicó en el año de 1992 la carta de Viento Dominante Durante el Año, en donde describe vientos multidireccionales con velocidades de 4 a 6 m/s en dirección norte- noreste en la región central del estado (Pérez-Villegas, 1992).

Bahena-Majarrez *et al.* (2002) observaron variaciones sedimentológicas y químicas estacionales mediante el muestreo de sedimentos superficiales en las cercanías de la

desembocadura del Río Coatzacoalcos, Veracruz, en donde determinaron que existen concentraciones altas en Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn.

Abuodha (2003) realizó un estudio de distribución de tamaño de grano y su composición en dunas y sedimentos de playa en la costa de Malindi, Kenia. Mediante un análisis granulométrico y de contenido de minerales pesados, determinó que los sedimentos estaban caracterizados por una clasificación de buena a muy buena y por un tamaño de grano de arena fina a mediana, además de que la concentración de minerales pesados decrece a medida que se alejan de los ríos.

Wang *et al.* (2003) describieron las características de tamaño de grano en dunas del desierto de Taklimakan, China; en donde se determinó que los sedimentos tienen un tamaño entre 2 y 4 ϕ . Además, señalan que, debido a los regímenes de viento, tiempo y sedimentos retrabajados, existen variaciones en el tamaño de grano dependiendo del tipo de duna en el que se encuentren: 3.08 ϕ en dunas crecientes; 3.21 ϕ en dunas de domo; 2.63-3.41 ϕ en dunas lineales y 2.81 ϕ en dunas de estrella.

Kasper-Zubillaga (2009) realizó un estudio de redondez en granos de cuarzo y de granulometría en dunas continentales y costeras en el desierto de Altar, Sonora, México. Con la ayuda de un microscopio óptico, contó 54 granos de cuarzo procedentes de dunas de las localidades de San Luis Río Colorado, El Pinacate, Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco, comparando su angulosidad y forma con la escala propuesta por Powers (1953). Los resultados demostraron que las dunas en San Luis Río Colorado y El Pinacate son generadas por transporte eólico y selectividad del viento, debido a lo bien clasificadas que se encuentran; mientras que las dunas del Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco son de origen mixto entre procesos eólicos y marinos.

Kasper-Zubillaga *et al.* (1999; 2013) determinaron en las dunas cercanas a la región de Palma Sola y en Miramar y zonas al norte en Veracruz y Tamaulipas que estas se enriquecen en cuarzo ya que el viento tiene influencia en la sedimentología (granos bien clasificados) por la selectividad del viento en transportar granos ligeros, reciclados por acción del oleaje y transporte litoral hacia la duna. En Tamaulipas se determinó la presencia de ilmenita en las dunas y que esta, posiblemente, sea un reflejo de la corriente litoral que transporta a estos minerales pesados (gravedad específica $> 4.00 \text{ gcm}^{-1}$) por alta energía, del mismo modo, se

determinó que los vientos, por medio de la deflación, remueven los minerales ligeros como el cuarzo dejando una capa de minerales pesados sobre la arena (Kasper-Zubillaga *et al.*, 2016).

Armstrong-Altrin *et al.* (2012, 2015) realizaron la petrografía en arena de las playas de Chachalacas en el municipio de Úrsulo Galván y Veracruz, en donde determinaron que en las playas de Veracruz existen altas concentraciones de cuarzo y baja concentración de feldespatos y fragmentos líticos en comparación con las playas de Chachalacas, además de que presentan características geoquímicas importantes en valores de CIA y PIA, en donde se demostró que la arena de ambas playas proviene de rocas moderadamente alteradas.

Navarro *et al.* (2015) realizaron la caracterización de la dinámica eólica en la región de Valdevaqueros en Tarifa, España; construyendo una rosa de vientos con datos de un anemómetro, además de colocar trampas de arena en dunas, con la finalidad de medir la tasa de sedimentación y realizar un análisis granulométrico. Los resultados que obtuvieron revelan que las dunas en la localidad cuentan con una gran movilidad gracias a la intensidad de los vientos, los cuales alcanzan velocidades de hasta 25 m/s en dirección sureste.

Hernández-Hinojosa *et al.* (2018) realizaron un estudio textural y geoquímico de las localidades Esmeralda (EM) y La Mancha (LM), en el cual compararon sus características con la finalidad de determinar su procedencia. Texturalmente, determinaron que el sedimento tiene un tamaño de grano de entre 1.02ϕ a 1.98ϕ en la localidad La Mancha y de 0.62ϕ a 1.37ϕ en Esmeralda gracias al ambiente de margen pasivo y la selectividad del viento, además de contar con una buena clasificación por acción del oleaje.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. SEDIMENTOS

Los sedimentos son partículas sólidas que se transportan por medio de la acción del viento, agua y glaciares hasta una cuenca de depósito, y que, al pasar por el proceso de litificación, se convierten en rocas sedimentarias. Folk (1968) define tres tipos de componentes sedimentarios:

2.1.1. TERRÍGENOS

Derivados de la erosión de rocas fuera de la cuenca de depósito y posteriormente transportados a esta.

2.1.2. ALOQUÍMICOS

Son aquellos formados en la misma cuenca de depósito y que cuentan con un grado superior de organización que un simple precipitado químico, como, por ejemplo: conchas, oolites y pellets fecales.

2.1.3. ORTOQUÍMICOS

Son precipitados químicos formados dentro de la misma cuenca de depósito, ejemplo: calcita y dolomita.

2.2. AMBIENTES SEDIMENTARIOS

Es una parte de la superficie terrestre donde se acumulan sedimentos y que cuenta con condiciones física, química y biológicamente diferentes de zonas adyacentes (Selley, 1970). Dependiendo de la zona de la corteza en la que se encuentren, se clasifican en: continentales, marinos y de transición, los últimos resultantes de los procesos continentales que se extienden al mar y viceversa. Así mismo, las condiciones anteriormente mencionadas subdividen los ambientes dependiendo de las características propias de cada región (Fig. 1) (Arche, 2010).

Continental:	Subaéreo:	Eólico
		Glacial
	Subacuático:	Fluvial
		Lacustre
De transición:		Deltaico
		Playero
		Estuarino
		Isla barrera-lagoon
Marino:		Plataforma
		Talud
		Borde precontinental
		Llanura abisal

Fig. 1. Clasificación de ambientes sedimentarios, tomada de Arche (2010).

2.3. AMBIENTES EÓLICOS

Son, como su nombre lo indica, aquellos ambientes en donde el viento es el encargado de transportar y depositar los sedimentos. Se presentan en cualquier lugar donde los sedimentos sean adecuados para el transporte por viento, además de contar con un suministro continuo para su acumulación. Las estructuras en este tipo de ambientes son: ondulitas (hasta 20 cm de altura y 3 m de longitud) (Fig. 2) y las dunas, que no tienen un límite en sus dimensiones (Wilson, 1972).



Fig. 2. Ondulitas en la localidad de Villa Rica, Veracruz, México. Fotografía tomada en campo.

Las dunas son las estructuras principales en este tipo de ambientes y se definen como una estructura sedimentaria formada por acción del viento sobre los sedimentos, son generalmente móviles, pero pueden anclarse por un obstáculo topográfico o por vegetación (Fig. 3).



Fig. 3. Duna vegetada en la localidad de Lechuguillas. Fotografía tomada en campo.

Comúnmente se presentan en grupos llamados campos de dunas, en los cuales pueden existir diferentes tipos de dunas formadas por variaciones en la dirección e intensidad del viento. La forma y tamaño de los campos de dunas es determinado por: el viento, características geomorfológicas de la zona, cantidad de sedimento disponible y recientemente por la creciente actividad humana, la cual frena la acumulación de sedimento en las costas con construcciones enfocadas en el aprovechamiento económico de las playas (Nordstrom, 2001).

Se clasifican de acuerdo con su forma, la cual está dada por la dirección del viento y el suministro de sedimento, y por la dirección de sus caras (Wasson y Hyde, 1983). Algunos tipos de dunas son:

2.3.1. DUNAS BARJÁN

Se forman por acción del viento con una sola dirección dominante y un aporte bajo de sedimentos. Tienen forma similar a la letra U, en donde el viento golpea sobre el frente de la duna formando el barlovento y estirando los flancos de esta (Fig. 4).

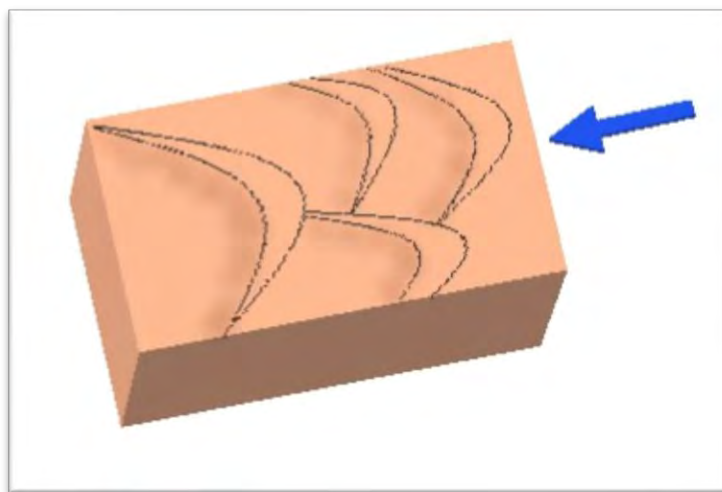


Fig. 4. Dunas tipo Barján, la flecha indica la dirección del viento.

2.3.2. DUNAS PARABÓLICAS

Son similares en su forma y formación a las de tipo Barján, sin embargo, requieren de mayor energía por parte del viento, para que, al golpear el frente de la duna, no sean los flancos los que se estiren, sino que sea el barlovento el que sea empujado, formando por así decirlo, una duna Barján al revés (Fig. 5).

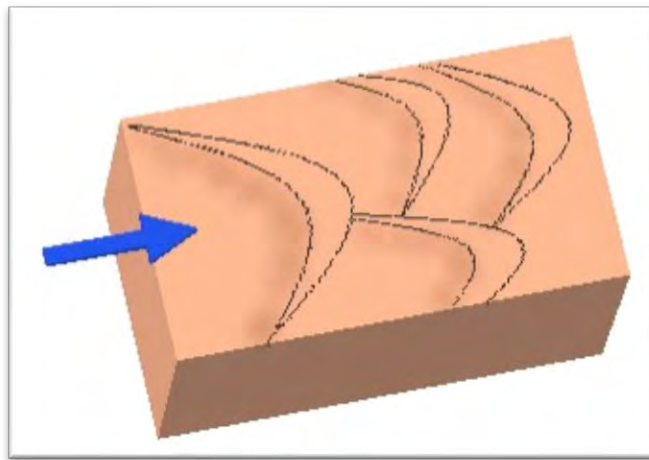


Fig. 5. Dunas Parabólicas, la flecha indica la dirección del viento.

2.3.3. DUNAS TRANSVERSALES

Se forman por la unión de un conjunto de crestas cuando el suministro de arena es abundante y el viento tiene intensidad variable. En ellas, el viento golpea de forma perpendicular a la línea de crestas alargando la duna, y al tener velocidades y direcciones variables, golpea de forma irregular obteniendo una forma ondulada (Fig. 6).

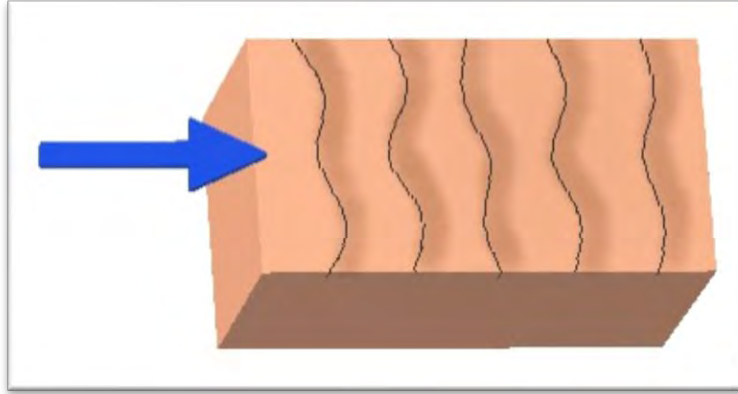


Fig. 6. Dunas Transversales, la flecha indica la dirección del viento.

2.4. AMBIENTES LITORALES

Es la zona que separa los ambientes continentales de los marinos, está sujeta a la acción de diversos agentes dinámicos y a sus cambios. La dinámica costera y procesos sedimentarios están condicionados a corto plazo por factores como la orientación de la costa y condiciones oceanográficas como la anchura y pendiente de la plataforma frente a la costa. A largo plazo, los factores implicados son: la disponibilidad de sedimento, es decir, el aporte de material para la acumulación; contexto tectónico; cambios en el nivel del mar, que determinan qué zonas quedan expuestas a la atmósfera y la creciente acción antropogénica (Arche, 2010).

Las zonas de los ambientes litorales se diferencian en función de los rasgos de mareas que las afectan, dividiendo a la playa en: infrapaya, la parte cubierta por el mar y delimitada por el nivel de base del oleaje; mesoplaya, parte expuesta a la atmósfera, delimitada por el nivel del oleaje y la berma; supraplaya, la parte posterior a la berma, regularmente seca (Fig. 7) (Cartaya *et al.*, 2005).



Fig. 7. Partes de la playa en la localidad de El Morro, Veracruz, México. Fotografía tomada en campo.

2.5. VIENTOS

El viento es el movimiento del aire con respecto a la superficie terrestre y es generado por variaciones horizontales en la presión atmosférica y el efecto Coriolis. Los vientos pueden ir de periodos de calmas, con velocidades no superiores a 1 km/h, hasta velocidades de más de 118 km/h en huracanes. Se miden con la ayuda de anemómetros y se clasifican con la escala de Beaufort, la cual los clasifica dependiendo de su intensidad en niveles del 1 al 12 y con denominaciones que van de calmas a huracanes, respectivamente.

En el estado de Veracruz, debido a su ubicación, las mediciones del viento se ven afectadas a lo largo del año por los “nortes” en los meses entre septiembre y abril; y los ciclones tropicales entre junio y noviembre (Appendini *et al.*, 2013).

Un ambiente eólico es en donde el viento determina la acumulación de sedimento y formación de estructuras sedimentarias de diversos tipos y tamaños, en donde, debido a las características de viscosidad baja densidad del viento como fluido, hace que sea un agente de transporte muy eficaz. La selectividad del viento hace que el material transportado se pueda

clasificar en: partículas de tamaño mayor a la arena de grano fino, transportadas por saltación o arrastre; y las inferiores a la arena de grano fino, transportadas por suspensión (Fig. 8).

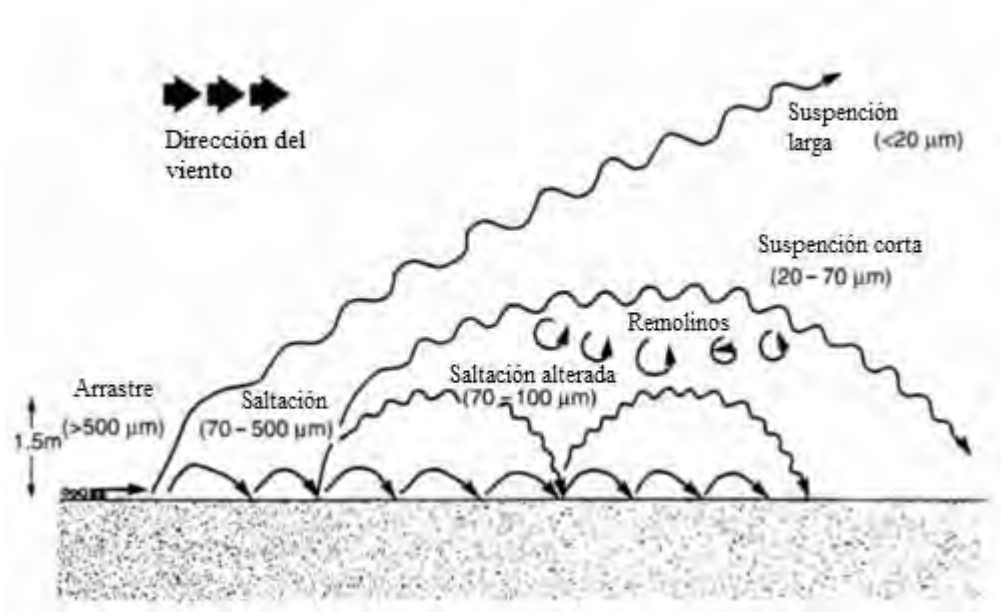


Fig. 8. Tipos de transporte eólico, modificado de Pye (1987).

CAPÍTULO 3

GENERALIDADES

3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en la parte central del estado de Veracruz, México, en donde se abarcaron 9 playas: Istirinchá/Cangrejo en el municipio de Nautla; Lechuguillas en Vega de Alatorre; El Morro, Palma Sola y Boca Andrea en Alto Lucero de Gutiérrez Barrios; Villa Rica, El Farallón y La Mancha en Actopan y Chachalacas en el municipio de Úrsulo Galván. Las playas fueron clasificadas por su ubicación geográfica y morfología como: región norte las playas Istirinchá (PCJ), Lechuguillas (LCH), El Morro (EMR), Palma Sola (PS) y Boca Andrea (BA) y como región sur las playas Villa Rica (VR), El Farallón (EF), La Mancha (LM) y Chachalacas (CH), abarcando un total de 101 km sobre la línea de costa (Tabla 1). Esta separación arbitraria se basa en la morfología de las dunas del norte y sur, así como en la extensión de los campos de dunas (Consultar en anexos para imágenes satelitales de cada localidad).

Tabla 1. Coordenadas de las localidades

Localidad	Municipio	Latitud (N)	Longitud (W)
Istirinchá	Nautla	20° 10' 56.66" N	96° 43' 38.83" W
Lechuguillas	Vega de Alatorre	20° 00' 42.96" N	96° 34' 55.86" W
El Morro	Alto Lucero de Gutiérrez Barrios	19° 51' 20.50" N	96° 27' 23.01" W
Palma Sola	Alto Lucero de Gutiérrez Barrios	19° 46' 18.68" N	96° 25' 16.95" W
Boca Andrea	Alto Lucero de Gutiérrez Barrios	19° 45' 33.59" N	96° 24' 57.05" W
Villa Rica	Actopan	19° 40' 44.02" N	96° 23' 44.85" W
El Farallón	Actopan	19° 37' 49.74" N	96° 23' 19.50" W
La Mancha	Actopan	19° 35' 14.09" N	96° 22' 40.75" W
Chachalacas	Úrsulo Galván	19° 27' 11.81" N	96° 19' 09.52" W

3.2. HIDROLOGÍA

3.2.1. GOLFO DE MÉXICO

El Golfo de México es un gran cuerpo de agua que abarca de los 12° de latitud a 18° a 30°N y 17° de longitud a 81° a 98°W, atravesado por el Trópico de Cáncer. Pertenecer en su mayor parte a la región subtropical y cuenta con una precipitación anual por encima de 1000 mm, exceptuando al norte de México y Texas. La mayor parte del Golfo se encuentra bordeado por planicie costera, con excepción de Cuba y algunas regiones cercanas al estado de Veracruz (Green y Short, 2003).

El oleaje en el Golfo rara vez sobrepasa un metro de altura y tiene periodos de entre 3 y 8 segundos, sin embargo, se ve afectado por vientos intensos generados por dos sistemas meteorológicos: sistemas anticiclónicos, mejor conocidos en México como “nortes” debido a su dirección y los sistemas de baja presión provenientes del Caribe, conocidos como “Ciclones Tropicales” (Appendini *et al.*, 2013).

3.2.2. CONTINENTAL

Existen seis ríos perenes: al norte, cerca de las localidades Istirichá (I) y Lechuguillas (LE) y al sur, rodeando la localidad de Chachalacas (CH). El resto de los arroyos son intermitentes y se localizan al sur de Lechuguillas (LCH), El Morro (EM) y La Mancha (LM). La composición de ciertos arroyos cercanos a Palma Sola y Chachalacas se describe anteriormente (Kasper-Zubillaga *et al.*, 1999).

Debido a la cantidad de ríos que desembocan al Golfo de México, en la región se encuentran las cuencas de los ríos Nautla y Actopan (Fig. 9), mapa en hoja completa en anexos (Fig. 24):

3.2.2.1. CUENCA DEL RÍO NAUTLA

Se encuentra situada entre las coordenadas 19°29' y 20°15'N, y 96°46' y 97°27'W, con un área aproximada de 2376 km² (CONAGUA, 2005). Nace en el Cofre de Perote a 4150 msnm y es alimentado por los arroyos: Tenexpanoya, El Sauce, El Suspiro, Las Ánimas, Borregos y el Río Puerco. Los ríos convergen en la presa hidroeléctrica Las Minas, en donde el agua es drenada al Río Trinidad, que en cierto tramo pasa a ser conocido como Río Bobos y recibe aporte de los arroyos Xoxotla y Tepanapa. Finalmente, cambia su nombre a Río Nautla conforme se acerca a dicha comunidad y desemboca en el Golfo de México formando la Barra de Nautla (Pereyra *et al.*, 2005).

3.2.2.2. CUENCA DEL RÍO ACTOPAN

Se encuentra situada geográficamente entre los 19°20' y 19°46'N, y entre 96°20' y 97°08'W, con un área aproximada de 2000 km². Nace en las faldas del Cofre de Perote a 3000 msnm; durante su recorrido se le conoce primero como Río Sedeño, hasta que recibe aportes del Río Acatlán y cambia su nombre a Río Actopan, posteriormente recibe afluencia del Río Ídolos y termina formando meandros hasta desembocar en la Barra de Chachalacas (Pereyra *et al.*, 2005).

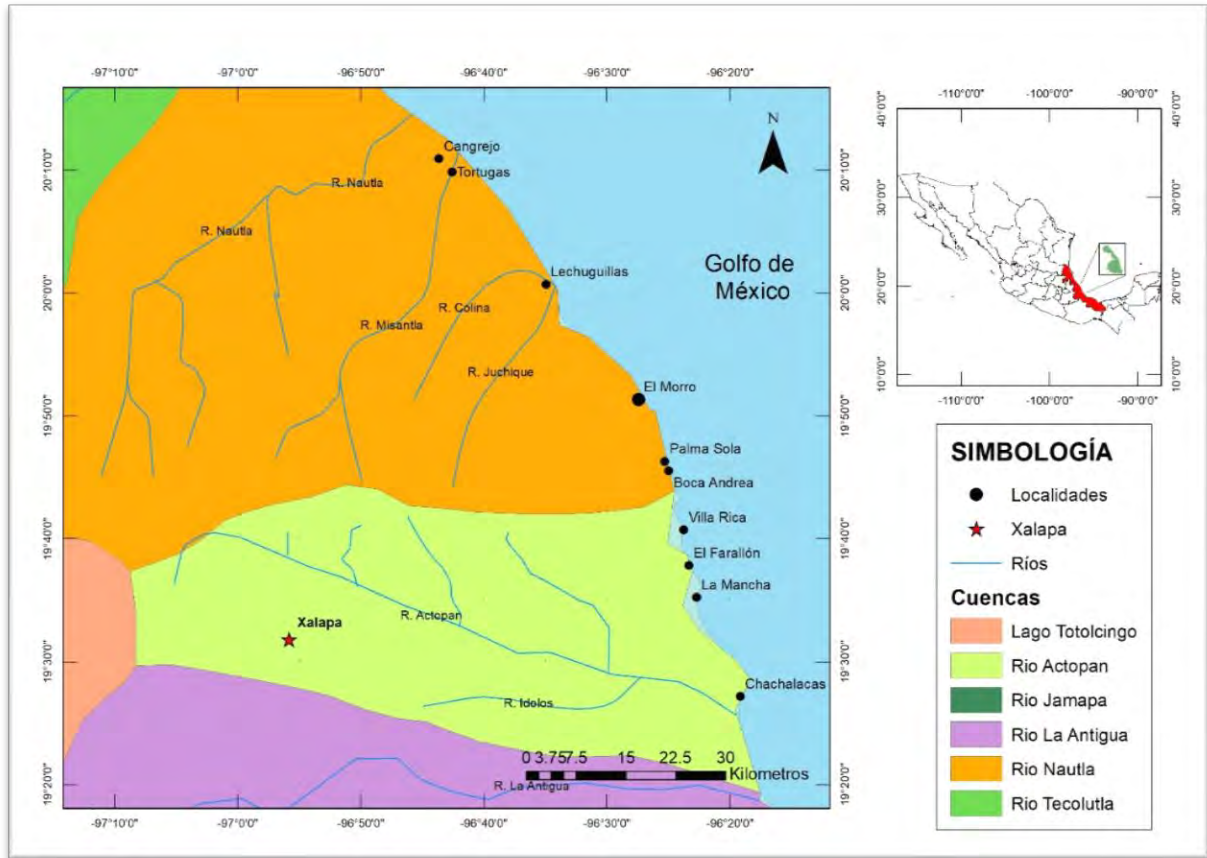


Fig. 9. Cuencas hidrológicas en el centro del estado de Veracruz. Modificado de Priego et al. (2007).

3.3. GEOLOGÍA

La zona de estudio se ubica dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), la cual abarca aproximadamente 1000 km de longitud y una amplitud de entre 80 y 203 km, atravesando la República Mexicana en dirección E-W en su parte central, y WNW-ESE en su parte occidental, cubriendo desde las costas del pacífico: San Blas, Nayarit y Bahía de Banderas; hasta Palma Sola, Veracruz, en el Golfo de México (Demant, 1978; Gómez-Tuena *et al.*, 2005). La FVTM es un arco continental con grandes variaciones en la composición y estilo de vulcanismo, la cual suele ser dividida en tres sectores: occidental, central y oriental. En la costa oeste del Golfo de México (WGM), la FVTM está caracterizada por vulcanismo de tipo máfico (calco-alcalino) (Gómez-Tuena *et al.*, 2007), con rocas del Mioceno (7.5 Ma)

al Plioceno (3 Ma), y emplazado en grandes estratovolcanes, calderas y domos; con solo una pequeña fracción de volcanes monogénéticos de composición basáltica (Ferrari, 2000).

El área de Palma Sola es de composición principalmente calco-alcalina del Cuaternario, sin embargo, también en esa región se encuentran las rocas alcalinas sódicas más antiguas de la FVTM, en donde a partir del Mioceno tardío hasta el Plioceno temprano, los magmas emplazados fueron casi exclusivamente de esta composición (Fig. 10) (Arculus, 2003; Gómez-Tuena *et al.*, 2003; Gómez-Tuena *et al.*, 2005) Mapa en hoja completa en anexos (Fig. 25).

Tectónicamente, el Golfo de México se considera como una cuenca oceánica inactiva con basamento de corteza oceánica en la que no existen procesos de subducción ni de expansión (Allen y Allen, 2005).

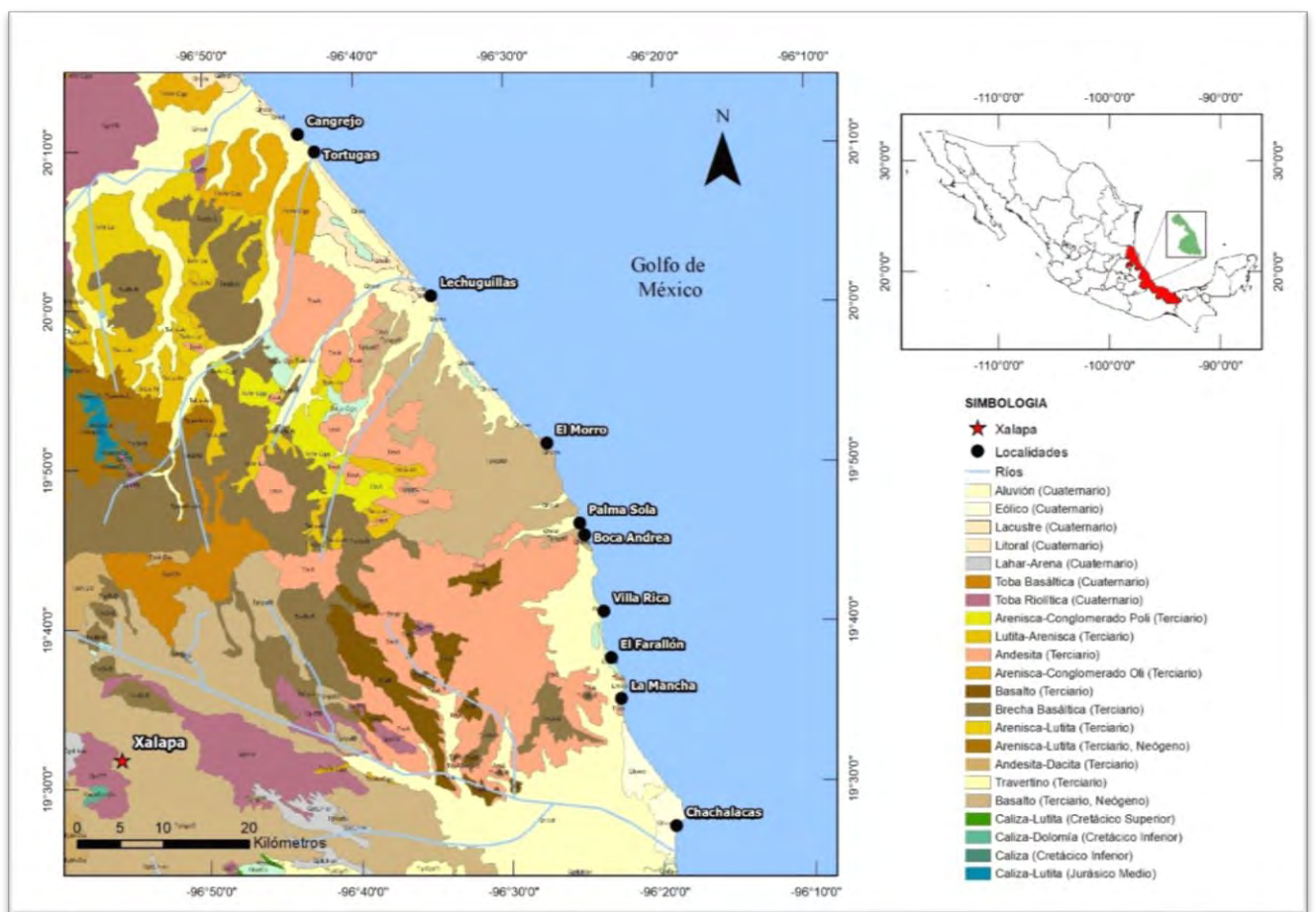


Fig. 10. Mapa Geológico del área del centro del estado de Veracruz. Modificado de Servicio Geológico Mexicano (2002 y 2004)

3.4. CLIMA

En la región el clima dominante es cálido subhúmedo con temperatura promedio de 22°C, precipitación menor a 60 mm en el mes más seco, existiendo solo una ligera variación en la precipitación invernal, en donde el clima Aw1, predominante en la región norte, es descrito con un porcentaje máximo de lluvia invernal de 10.2 % del total anual, comparado con el clima Aw1(x¹), predominante en la región norte, que cuenta con lluvias invernales que sobrepasan el 10.2 % del total anual (Fig. 11) (García, 1998). Mapa en hoja completa en anexos (Fig. 26).

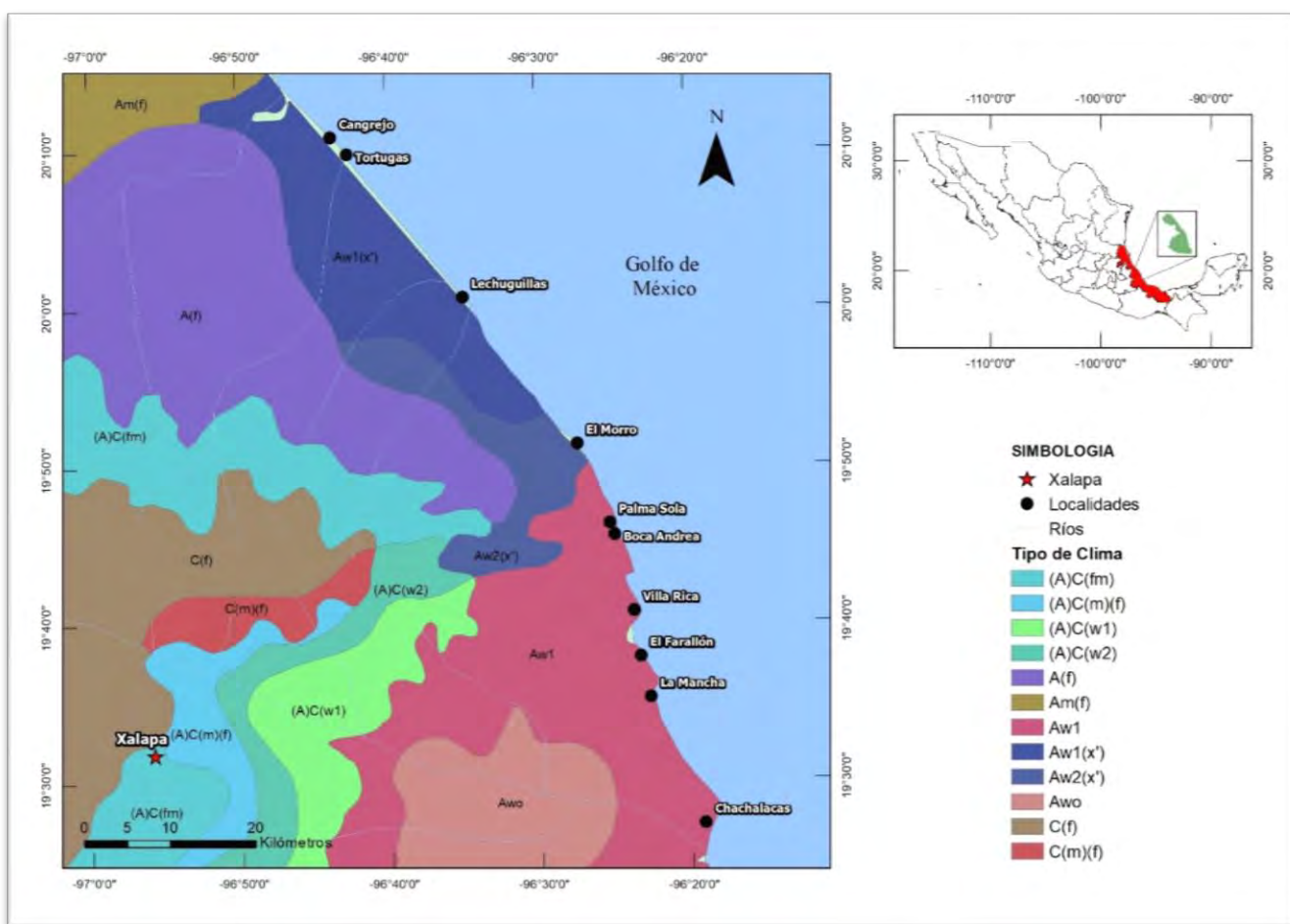


Fig. 11. Mapa de climas dominantes en la región, modificado de García (1998).

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA Y EQUIPO

4.1. TRABAJO DE CAMPO

La recolección de muestras y toma de mediciones de viento se llevó a cabo del 24 al 27 de abril del año 2017, siguiendo la línea de costa de norte a sur y tomando muestras de playa y dunas de un total de 9 localidades (Fig. 12).

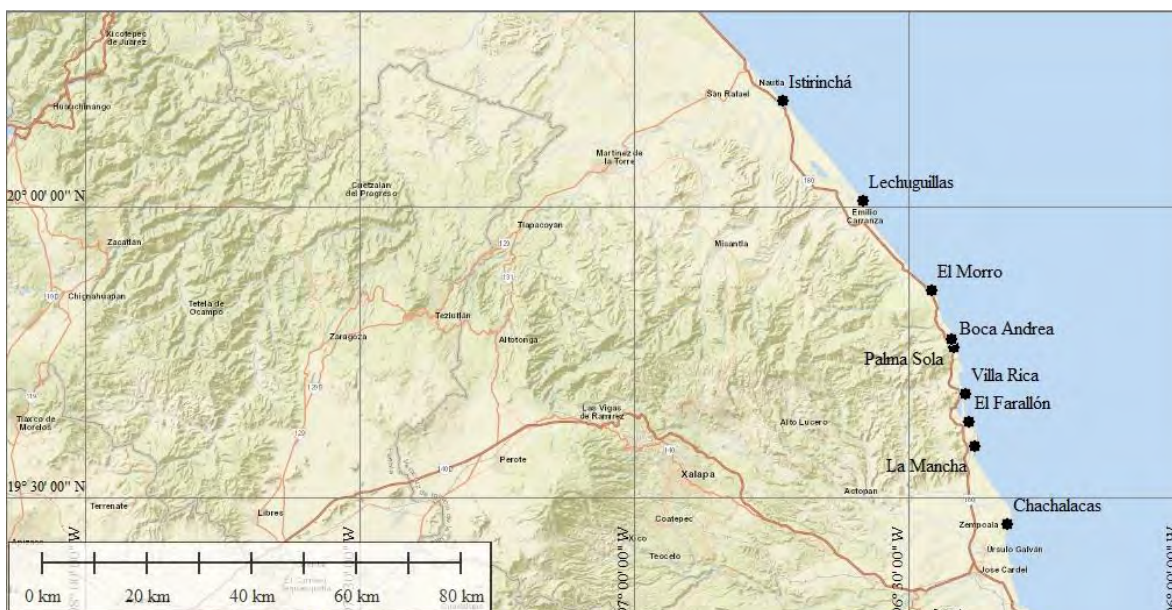


Fig. 12. Mapa topográfico de la zona de estudio.

4.1.1. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Se recolectaron un total de $n= 82$ muestras de arena: $n= 43$ de la zona norte y $n= 39$ de la zona sur del centro de estado de Veracruz, de las cuales $n= 21$ muestras pertenecen a las zonas de infraplaya y mesoplaya y $n= 61$ a dunas. Las muestras de playa se recolectaron para servir como un control granulométrico y mineralógico que influye en el transporte de arena hacia la duna y viceversa.

Se tomaron muestras del barlovento (B), cresta (C) y sotavento (S) de las dunas y de la infraplaya (I) y mesoplaya (M) de la playa (Fig. 13). Cada muestra fue tomada de la parte superficial (1 cm) con la finalidad de evitar el fenómeno de la heterogeneidad en la laminación de la arena, el cual afecta el valor de la clasificación (sorting) (Pettijohn *et al.*, 1972; Emery, 1978; Kasper-Zubillaga *et al.*, 1999). Las muestras fueron tomadas con la ayuda de una cuchara de plástico para evitar la contaminación, colocadas en bolsas de plástico y etiquetadas para su posterior análisis en el laboratorio. Cada muestra pesó entre 200 y 300 gramos, con la finalidad de que el restante sirviera como material repositario.

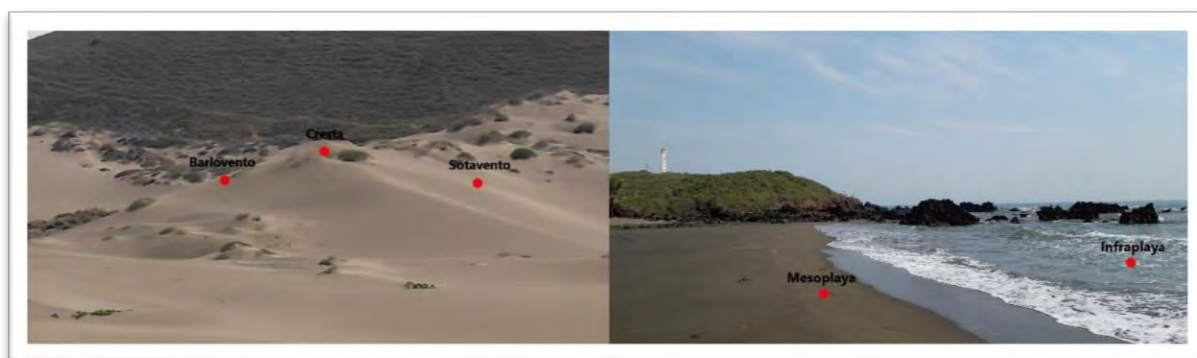


Fig. 13. Geomorfología de dunas barján con sus componentes en la localidad El Farallón (izquierda) y zonas de infra y mesoplaya en la localidad El Morro (derecha).

4.1.2. MEDICIÓN DE VIENTOS

Para la medición de vientos se utilizó un anemómetro de la marca STEREN modelo HER-440, el cual proporciona la información en valores de metros por segundo (ms^{-1}) o bien en datos de flujo en cm^3 . Para el objetivo de este trabajo se tomaron 126 mediciones en la playa para cada localidad: Istirinchá $n= 27$, Lechuguillas $n= 11$, El Morro $n= 10$, Palma Sola $n= 10$, Boca Andrea $n= 10$, Villa Rica $n= 12$, El Farallón $n= 11$, La Mancha $n= 11$ y Chachalacas $n= 14$.

Los datos fueron recolectados de manera aleatoria a la par que se tomaban las muestras de arena para posteriormente vaciarlos a una hoja de cálculo y mediante el software WRPLOT,

elaborar una rosa de vientos para observar de mejor manera su comportamiento y efecto sobre los campos de dunas.

4.2. TRABAJO DE LABORATORIO

Las muestras de arena fueron llevadas al laboratorio de geoquímica del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, en donde fueron lavadas para eliminar partículas de sal y posteriormente puestas a secar por medio de una mufla modelo H-62 de la marca Riossa. El tamizado en seco se realizó a un intervalo de 500 μm a 75 μm en tamices de la American Standard Test Sieve Series perteneciente a la American Society for Testing and Materials (ASTM) con una muestra inicial de 50 gramos (Fig. 14) por medio de un Ro-Tap Tyler RX-29 por 15 minutos. Posteriormente, se pesaron las fracciones que quedaron en cada tamiz y se vaciaron los datos a una hoja de cálculo para su posterior análisis (datos del proceso de tamizado en Tabla 6 en Anexos).



Fig. 14. Tamices usados para el trabajo.

4.3. PARÁMETROS TEXTURALES

Cada ambiente eólico cuenta con sus propias características a nivel textural, lo cual resulta importante cuando no se cuenta con características morfológicas para definir el ambiente de interés. Folk (1968) define los parámetros texturales como:

4.3.1. TAMAÑO DE GRANO (ϕ)

Es el diámetro medio del total de los granos de una muestra. Para ser medido es necesaria una escala como referencia, siendo la escala propuesta por Udden (1914) y Wentworth (1922) con base al diámetro de los sedimentos en milímetros la más aceptada (Fig. 15). El tamaño de grano se mide mediante el uso de un tamiz con un tamaño de malla definido.

Tamaño de Grano		Término Descriptivo	
phi	mm		
-10	1024	Muy Grande	} Bloque
		Grande	
-9	512	Mediano	
-8	256	Pequeño	
-7	128	Muy Pequeño	
-6	64	Muy Grueso	} Grava
-5	32	Grueso	
-4	16	Mediano	
-3	8	Fino	
-2	4	Muy Fino	
-1	2	Muy Grueso	} Arena
0	1	Grueso	
1	microns 500	Mediano	
2	250	Fino	
3	125	Muy Fino	
4	63	Muy Grueso	} Limo
5	31	Grueso	
6	16	Mediano	
7	8	Fino	
8	4	Muy Fino	
9	2	Arcilla	

Fig. 15. Tabla de tamaño de grano, modificado de Udden (1914) y Wentworth (1922).

El tamaño de grano puede llegar a ser un indicativo sobre el ambiente de depósito y transporte al cual ha estado expuesto el grano, sin embargo, antes de declarar una relación, es necesario comparar las características de varias muestras de la zona de estudio para observar variaciones y determinar si existe relación entre ambos (Folk, 1968).

4.3.2. DESVIACIÓN ESTÁNDAR/CLASIFICACIÓN (σ)

Es el grado de homogeneidad morfológica de los granos de sedimento. Está determinado por al menos tres parámetros: cantidad de sedimento aportado al ambiente de depósito, tipo de deposición y las características momentáneas del ambiente, como la intensidad de la marea y la velocidad del viento (Tabla 2) (Folk, 1968; Kasper-Zubillaga y Carranza Edwards, 2005).

Tabla 2. Escala de Clasificación para sedimentos.

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

4.3.3. SKEWNESS (SK_1)

Se refiere al grado de asimetría que se presenta en una curva de frecuencias. Folk y Ward (1957) demostraron que un valor negativo es indicativo de una mezcla entre material grueso

y fino, en donde predomina el material fino; mientras que, si el material grueso predomina, el valor será positivo (Tabla 3).

Tabla 3. Escala de Skewness para sedimentos.

Muy asimétrico en tamaños finos	0.3 a 1.0
Asimétrico en tamaños finos	0.1 a 0.3
Simétrico	0.1 a -0.1
Asimétrico en tamaños gruesos	-0.1 a -0.3
Muy asimétrico en tamaños gruesos	-0.3 a -1.0

4.3.4. KURTOSIS (K_G)

La kurtosis mide la angulosidad y la forma de la curva de frecuencia, indica la cantidad de datos cercanos a la media (Tabla 4) (Folk, 1968).

Tabla 4. Escala de Kurtosis para sedimentos.

Muy platicúrtico	<0.67
Platicúrtico	0.67 a 0.90
Mesocúrtico	0.90 a 1.11
Leptocúrtico	1.11 a 1.50
Muy leptocúrtico	1.50 a 3.00
Extremadamente leptocúrtico	>3.00

4.4. DIAGNÓSTICO EÓLICO EN DUNAS

La arena en ambientes de aluvión, litoral y eólicos tienen variaciones en la porosidad y permeabilidad, lo cual está relacionado al tamaño de grano y clasificación, mientras que los valores de skewness y kurtosis en ambientes eólicos son muy variables y no se consideran diagnósticos para la determinación puntual del ambiente de duna (McKee, 1979).

Para obtener los parámetros texturales se utilizó el software GRADISTAT 8.0, el cual, por medio de Microsoft Excel, calcula los resultados de tamaño de grano, grupo textural, media, clasificación, skewness y kurtosis mediante el método de momentos o bien, en parámetros del método de Folk y Ward (1957). Para este trabajo se utilizaron los datos del método de Folk y Ward debido a su amplia distribución.

4.5. REDONDEZ

La redondez de una partícula es una propiedad física de todos los sedimentos, depende de la angulosidad de sus bordes y esquinas, y es independiente de la forma de la partícula. Es un indicativo del transporte al que la partícula ha sido sometida antes de su depósito (Powers, 1953) y en el cuarzo, debido a su resistencia y abundancia, es usada para inferir el transporte y abrasión al cual se han visto sometidas las partículas en diferentes ambientes sedimentarios (Basu *et al.*, 1975; Pettijohn *et al.*, 1972; Folk, 1978; Kasper-Zubillaga, 2009).

El transporte eólico es más efectivo para redondear granos de cuarzo siempre y cuando estos sean de diámetro menor a 0.25 mm, del mismo modo, en partículas más grandes el transporte por un medio acuático es más efectivo (Twenhofel, 1945; Costa *et al.*, 2013).

Para este estudio se contaron 100 granos de cuarzo de 35 láminas delgadas por medio de un microscopio de polarización de la marca VelaQuin VE-148P, y se clasificaron los granos con relación a la escala propuesta por Powers (1953) (Fig. 16).

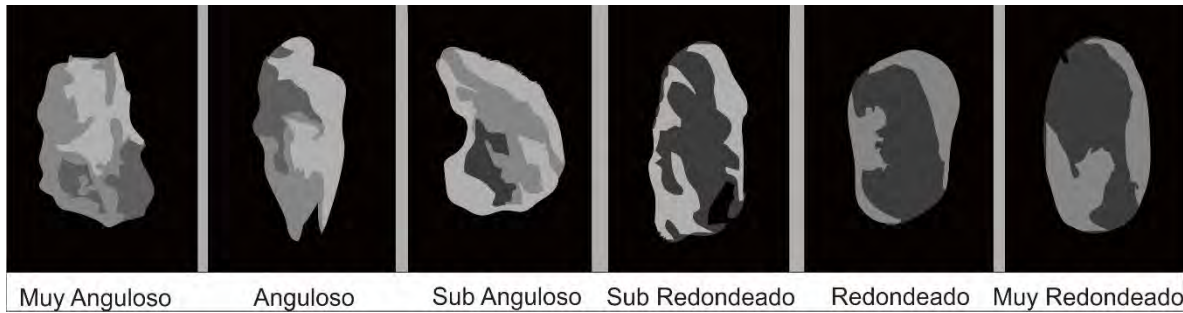


Fig. 16. Escala de Angulosidad (Modificada de Powers 1953)

4.6. CONTEO DE MINERALES

Mediante el uso de un microscopio de polarización de la marca VelaQuin modelo VE-148P se realizó un análisis modal basado en Garzanti *et al.*, 2013 y Marsaglia *et al.*, 2016 para determinar la abundancia de minerales ligeros y pesados y determinar los mecanismos de transporte de la arena por deflación del viento y transporte litoral. Esto identifica los patrones que el viento y la energía de las corrientes y oleaje influyen en el movimiento de los minerales dependiendo de su gravedad específica. El trabajo en equipo de este proyecto se encuentra integrado en una publicación científica, sin embargo, las gráficas que muestran la distribución de minerales pesados y cuarzo se pueden encontrar en la sección de anexos (Fig. 36 y Fig. 38) (Mendieta-Lora *et al.*, 2018).

4.7. ANÁLISIS CLÚSTER

Es una técnica de análisis estadística multivariable que agrupa variables con relación a su semejanza, buscando la mayor homogeneidad posible en cada grupo. Para este trabajo se buscó observar si las localidades muestreadas cuentan con la semejanza suficiente para ser agrupadas con relación a la distribución de minerales pesados presentes en cada una. Los datos usados fueron los tomados en el conteo de minerales antes mencionado, los cuales fueron depositados en el software Minitab 18 para su análisis.

4.8. IMÁGENES SATELITALES

Son, como su nombre lo indica, imágenes tomadas por satélites, que permiten la observación de terrenos y su monitoreo con distintos fines. La disponibilidad y resolución de imágenes, las ha convertido en una herramienta imprescindible para el conocimiento y seguimiento de fenómenos naturales y acciones antrópicas, y sus impactos en el planeta (Ferreira, 2016).

Para este trabajo se usaron imágenes tomadas de LANDSAT 8, a través de World Imagery de ESRI.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. VIENTOS

Los valores de vientos se colocaron en una tabla para facilitar su análisis y elaborar una rosa de vientos (Fig. 17). En la Tabla 5 se muestran los valores máximos, mínimos y promedio de la velocidad del viento en cada playa, así como la dirección del viento predominante (Datos completos en Tabla 8 en Anexos). En las mediciones de vientos se encuentran las tomadas en la localidad de Tortugas, la cual, por la cercanía con la localidad de Istirinchá, se optó por tomarlas como la misma localidad en el resto del trabajo.

Tabla 5. Velocidad del viento

Playa	Dirección del Viento	Velocidad Mínima del Viento (m/s)	Velocidad Máxima del Viento (m/s)	Velocidad Promedio del Viento (m/s)
Istirinchá (PCJ)	Noreste/Este	1.29	3.89	2.34
Tortugas (TO)	Noreste/Este	2.71	11	4.89
Lechuguillas (LCH)	Este	7.25	10.98	8.61
El Morro (EM)	Norte/Noreste	1.11	1.86	1.57
Palma Sola (PS)	Este	5.18	8.11	6.66
Boca Andrea (BA)	Este	3.24	7.42	5.17
Villa Rica (VR)	Noreste	1.17	4.12	2.4
El Farallón (EF)	Noreste	1.15	3.77	2.08
La Mancha (LM)	Norte	1.43	2.89	2.13
Chachalacas (CH)	Norte	1.86	5.7	3.13

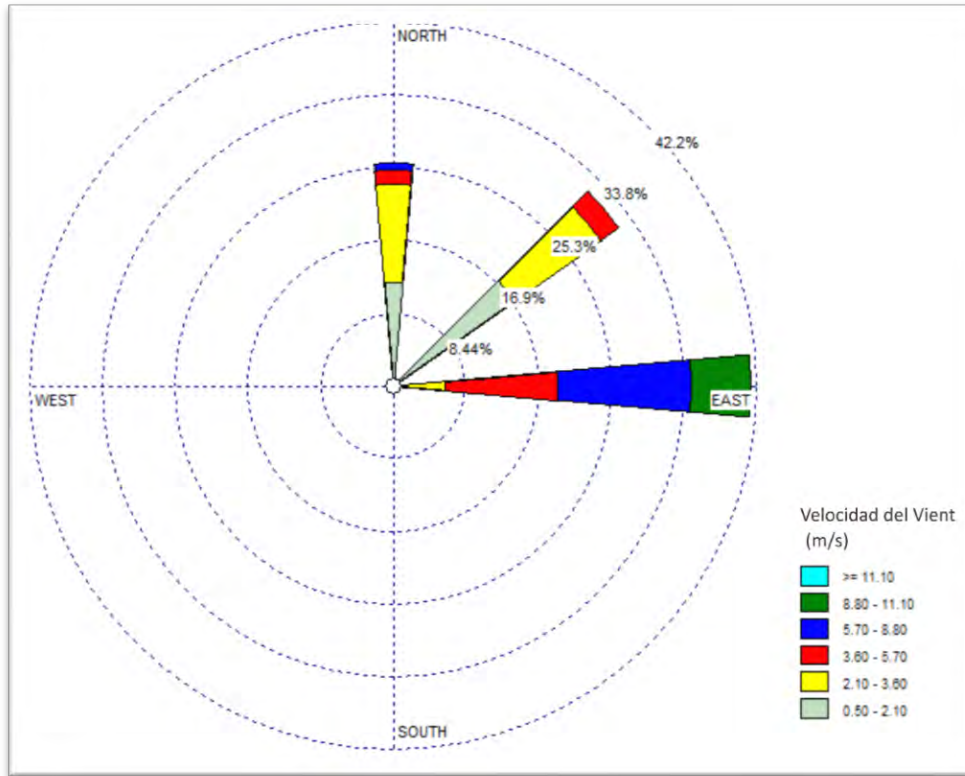


Fig. 17. Rosa de Vientos, elaborada con datos de campo.

Además, la observación de las imágenes satelitales tomadas de cada una de las localidades estudiadas (Consultar Anexos), muestra diferencias significativas entre el tamaño de las dunas y los campos de dunas en ambas regiones, siendo los campos de las localidades de El Farallón (Fig. 32), Villa Rica (Fig. 33), La Mancha (Fig. 34) y Chachalacas (Fig. 35) en la zona sur más grandes en extensión y tamaños de dunas que los campos de Cangrejo (Fig. 27), Lechuguillas (Fig. 28), El Morro (Fig. 29), Palma Sola (Fig. 30) y Boca Andrea (Fig. 31) en la zona norte, además de contar con menos barreras antropogénicas que limiten su movimiento hacia el continente. Ante esto, es difícil entender la movilidad neta de los campos de dunas parabólicas y barján del sur, y únicamente se diagnostica su dinámica con base en los estudios granulométricos, petrológicos e incluso geoquímicos para determinar la pérdida o ganancia de ciertos elementos químicos asociados a minerales ligeros y pesados.

5.2. ANÁLISIS TEXTURAL

Los parámetros texturales de las playas y dunas del centro del estado de Veracruz muestran que ambos ambientes tienen sedimentos de tamaño de arena de media a fina, moderadamente bien clasificada con promedios $Mz= 2.10 \phi \pm 0.2$ y clasificación $\sigma= 0.56 \pm 0.11$ y $Mz= 2.20 \phi \pm 0.27$ y clasificación $\sigma= 0.50 \pm 0.10$ respectivamente. En la Tabla 6 se muestran los valores obtenidos por el análisis granulométrico (Datos completos en Tabla 9 en Anexos).

Tabla 6. Parámetros granulométricos de playas y dunas de Veracruz

Muestra	Tamaño de grano	Clasificación	Skewness	Kurtosis
PCJ-I-1	1.848	0.512	-0.055	0.798
PCJ-B-1	2.468	0.491	-0.093	1.185
PCJ-C-1	2.255	0.536	-0.119	1.368
PCJ-S-1	2.171	0.574	-0.130	1.274
PCJ-M-2	2.360	0.559	-0.009	1.333
PCJ-B-2	2.164	0.573	-0.132	1.289
PCJ-C-2	2.385	0.515	-0.026	1.303
PCJ-S-6	2.152	0.578	-0.145	1.149
LCH-I-1	1.860	0.472	-0.212	0.727
LCH-M-1	1.682	0.453	0.119	0.868
LCH-B-1	2.131	0.593	-0.147	1.004
LCH-C-1	2.388	0.464	-0.026	1.303
LCH-S-1	2.436	0.492	-0.001	1.270
LCH-I-2	1.765	0.472	0.013	0.742
LCH-M-2	2.312	0.621	-0.070	1.218
LCH-B-2	2.238	0.530	-0.172	1.292
LCH-C-2	2.285	0.489	-0.136	1.328
LCH-S-2	2.369	0.447	-0.047	1.302
EMR-I-1	2.138	0.559	-0.216	0.981
EMR-B-1	2.606	0.397	-0.149	1.062
EMR-C-1	2.470	0.455	-0.140	1.193
EMR-S-1	2.478	0.455	-0.151	1.177
EMR-M-2	1.658	0.823	-0.166	0.893
EMR-B-2	2.502	0.426	-0.148	1.126
EMR-C-2	2.535	0.471	-0.174	1.147
EMR-S-2	2.459	0.454	-0.100	1.199
EMR-I-3	2.000	0.513	-0.287	0.890
EMR-B-3	2.247	0.501	-0.176	1.322

Muestra	Tamaño de grano	Clasificación	Skewness	Kurtosis
EMR-C-3	2.716	0.317	-0.176	1.176
EMR-S-3	2.726	0.337	-0.040	1.221
PS-M-1	2.276	0.467	-0.169	1.327
PS-I-1	2.226	0.495	-0.201	1.340
PS-B-1	2.500	0.326	-0.022	0.868
PS-C-1	2.404	0.290	0.097	0.859
PS-S-1	2.613	0.324	-0.110	1.052
PS-I-2	1.867	0.507	-0.151	0.778
PS-B-2	1.890	0.508	-0.297	0.783
PS-C-2	2.001	0.565	-0.199	0.890
PS-S-2	2.447	0.428	-0.147	1.154
BA-M-1	2.079	0.539	-0.233	1.058
BA-I-1	2.378	0.382	-0.042	1.228
BA-B-1	2.549	0.329	-0.100	0.860
BA-C-1	2.378	0.450	-0.129	1.222
VR-I-1	2.228	0.547	-0.243	1.132
VR-M-1	2.162	0.636	-0.204	0.961
VR-B-1	1.777	0.536	0.108	0.826
VR-C-1	1.798	0.648	0.085	0.989
VR-S-1	1.921	0.538	-0.169	0.807
VR-B-2	1.876	0.527	-0.199	0.790
VR-C-2	1.917	0.526	-0.180	0.813
VR-S-2	1.743	0.496	0.094	0.813
EF-I-1	2.164	0.555	-0.215	1.053
EF-B-1	2.312	0.462	-0.157	1.288
EF-C-1	2.235	0.513	-0.186	1.309
EF-M-2	2.165	0.530	-0.225	1.256
EF-B-2	2.175	0.529	-0.208	1.285
EF-C-2	1.739	0.472	0.063	0.771
EF-S-2	2.012	0.527	-0.241	0.919
EF-B-3	2.451	0.424	-0.048	1.174
EF-C-3	2.361	0.504	-0.159	1.203
EF-S-3	2.370	0.398	-0.048	1.283
LM-M-1-O	1.646	0.838	0.013	0.971
LM-C-1	2.435	0.434	-0.115	1.172
LM-B-2	2.526	0.439	-0.148	1.110
LM-C-2	2.196	0.574	-0.185	1.080
LM-S-2	2.496	0.430	-0.132	1.108
LM-M-3	2.140	0.615	-0.269	0.936
LM-B-3	2.510	0.461	-0.047	1.179

Muestra	Tamaño de grano	Clasificación	Skewness	Kurtosis
LM-C-3	2.472	0.405	-0.074	1.120
LM-S-3	2.387	0.442	-0.096	1.240
CH-I-1	1.561	0.955	-0.061	0.671
CH-B-2	2.154	0.603	-0.258	0.973
CH-C-2	2.223	0.541	-0.236	1.197
CH-S-2	2.175	0.598	-0.274	0.992
CH-B-4	2.057	0.554	-0.209	0.928
CH-C-4	1.785	0.508	0.060	0.795
CH-S-4	1.943	0.619	-0.103	0.812
CH-B-5	2.186	0.575	-0.229	1.030
CH-C-5	2.086	0.613	-0.177	0.855
CH-S-5	2.011	0.685	-0.157	0.827

Con la finalidad de observar tendencias significativas de una relación con el viento e incluso transporte litoral, los resultados fueron graficados separando las muestras de duna (Fig. 18) y las de playa (Fig. 19). Las variaciones del tamaño de grano y homogeneidad en los parámetros de clasificación (asimetría y kurtosis) muestran tendencias características de ambientes eólicos. En las muestras de dunas, se pueden observar variaciones en tamaño de grano, skewness y kurtosis, comenzando en la localidad de El Morro, debido a la acción de la FVTM. El tamaño de grano está influido por las fracciones de grano de medio a fino derivadas de fragmentos biógenos y minerales opacos respectivamente, estos últimos depositados por acción de la deflación eólica y transporte de alta energía en las playas del norte. Esto se sustenta también con la presencia de fragmentos de roca volcánica en el sur, debido a la deflación por parte del viento y menor energía en el transporte litoral que deja a los volcánicos en esta zona (White y Schultz, 1977; Kasper-Zubillaga, 2009; Carranza-Edwards *et al*, 2018). Esto se debe a la gravedad específica de ambos componentes de la arena en donde los minerales opacos exceden en gravedad específica a los líticos volcánicos (Fig. 20).

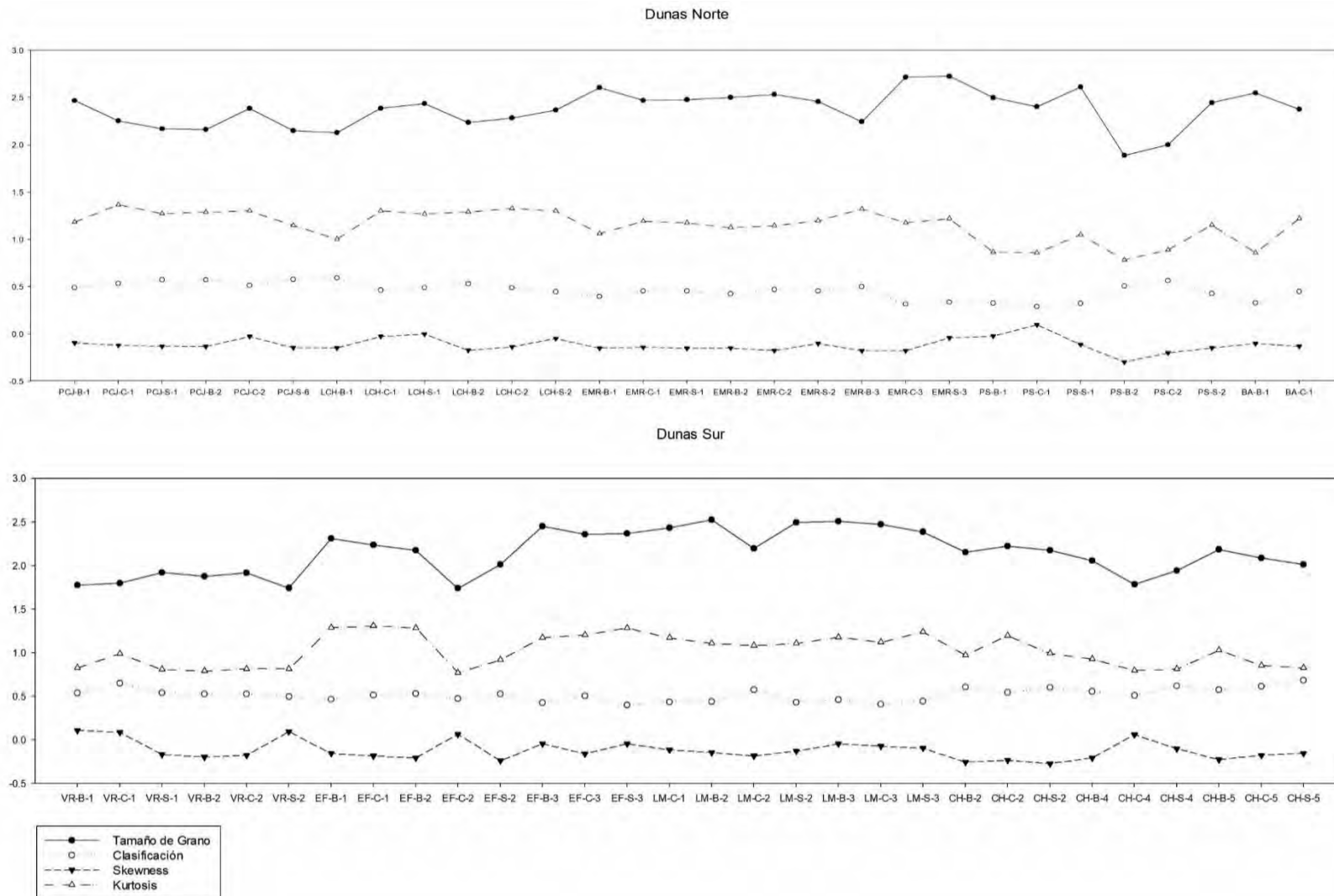


Fig. 18. Gráficas de análisis textural en dunas del norte y sur de Veracruz. El tamaño de grano (ϕ) y la clasificación (σ) están en escala (ϕ , σ , ver Folk, 1968). Los demás parámetros son adimensionales.

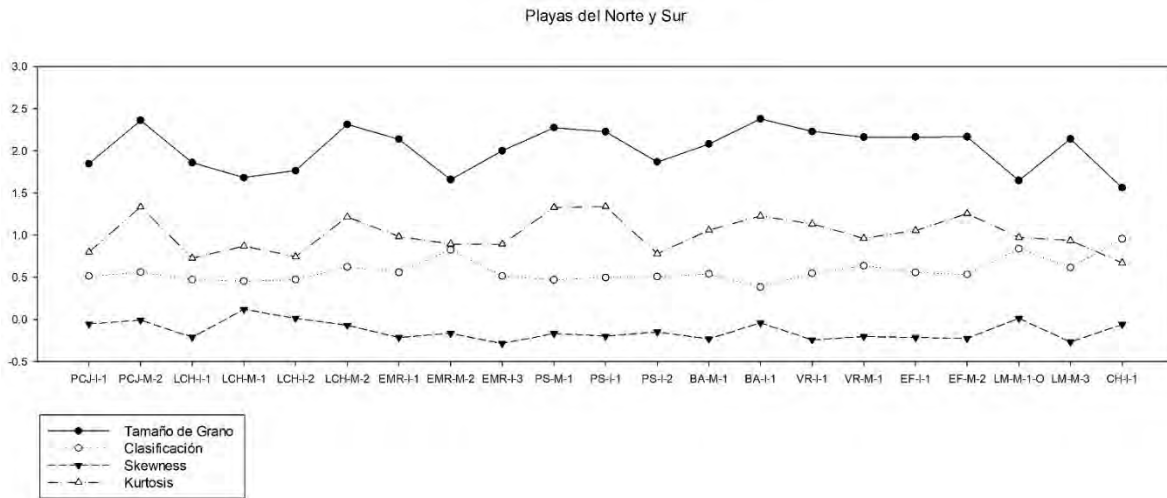


Fig. 19. Gráfica de análisis textural en playas del norte y sur de Veracruz. El tamaño de grano (ϕ) y la clasificación (σ) están en escala (ϕ ϕ , ver Folk, 1968). Los demás parámetros son adimensionales.

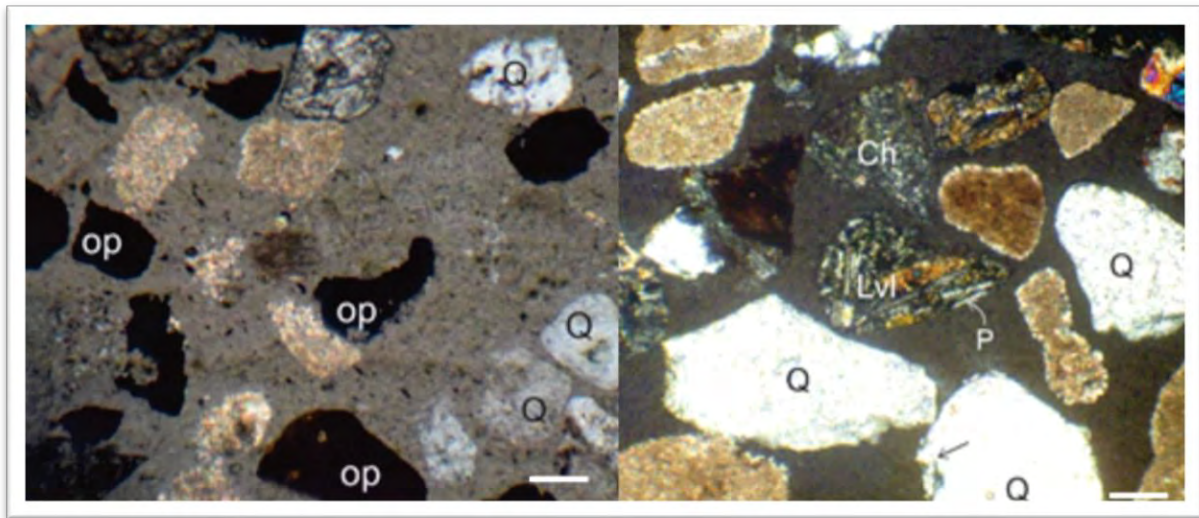


Fig. 20. Minerales opacos en Lechuguillas y lítico volcánico en Palma Sola. Escala 500 μ m.

5.3. REDONDEZ

Los resultados del conteo en cuarzo monocristalino en los sedimentos fueron vaciados a una tabla con los parámetros: Muy Anguloso (VA), Anguloso (A), Sub Anguloso (SA), Sub Redondeado (SR), Redondeado (R) y Muy Redondeado (VR) (Tabla 7). Los datos fueron normalizados a 100% de la misma forma que la normalización de análisis modal para poder ser graficados mediante diagramas ternarios.

Tabla 7. Redondez en granos de cuarzo monocristalino en arena de playa y duna n= 43

Playa	Lámina	Parámetros Redondeo						Total
		VR	R	SR	SA	A	VA	
Istirinchá/ Cangrejos	PCJ-I-1	1	15	19	30	13	22	100
	PCJ-B-1	1	18	24	44	6	7	100
Lechuguillas	PCJ-C-1	2	27	22	30	9	10	100
	PCJ-S-1	1	19	37	29	10	4	100
	LCH-M-1	1	9	43	34	10	3	100
	LCH-B-2	2	14	46	31	6	1	100
El Morro	LCH-C-2	2	12	40	30	14	2	100
	LCH-S-2	1	13	39	28	13	6	100
	EMR-I-3	3	13	35	28	13	8	100
	EMR-B-3	1	14	35	27	14	9	100
Palma Sola	EMR-C-3	2	12	45	23	12	6	100
	EMR-S-3	3	20	38	24	12	3	100
	PS-M-2	1	8	44	24	16	7	100
	PS-B-1	2	8	31	30	22	7	100
Boca Andrea	PS-C-1	1	12	34	27	19	7	100
	PS-S-1	1	5	35	26	25	8	100
	BA-I-1	3	20	27	20	23	7	100
	BA-B-1	1	12	28	31	23	5	100
Villa Rica	BA-C-1	2	12	34	26	21	5	100
	VR-M-1	3	10	24	36	21	6	100
	VR-B-2	2	9	28	34	18	9	100
	VR-C-1	1	8	25	31	25	10	100
El Farallón	VR-S-2	1	5	25	28	31	10	100
	EF-I-1	1	7	23	37	22	10	100
	EF-B-3	1	5	30	30	27	7	100
	EF-C-3	1	6	27	33	23	10	100

	EF-S-3	2	9	24	25	29	11	100
La Mancha	LM-M-3	2	10	25	23	30	10	100
	LM-B-3	1	9	30	27	23	10	100
	LM-C-2	2	5	31	30	24	8	100
	LM-S-3	1	3	38	30	21	7	100
Chachalacas	CH-I-1	1	5	39	33	19	3	100
	CH-B-4	1	6	38	25	23	7	100
	CH-C-5	1	9	37	36	14	3	100
	CH-S-5	1	5	39	32	16	7	100

Los diagramas se realizaron con las variables VA/A, SA/SR y R/VR, uno para las playas del norte y otro para las del sur (Fig. 21). No se discriminaron los datos de subambientes de playa (infraplaya y mesoplaya), debido a que se considera que el oleaje es determinante para el moldeado de los granos de cuarzo, además de que el material aportado por la playa es el mismo que el viento aporta a las dunas.

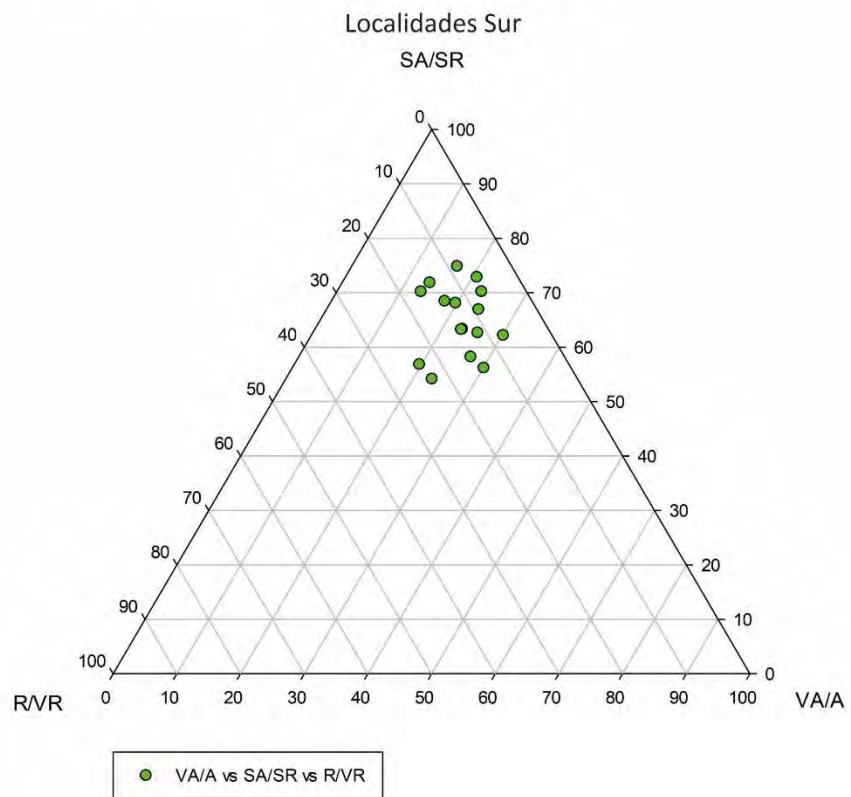
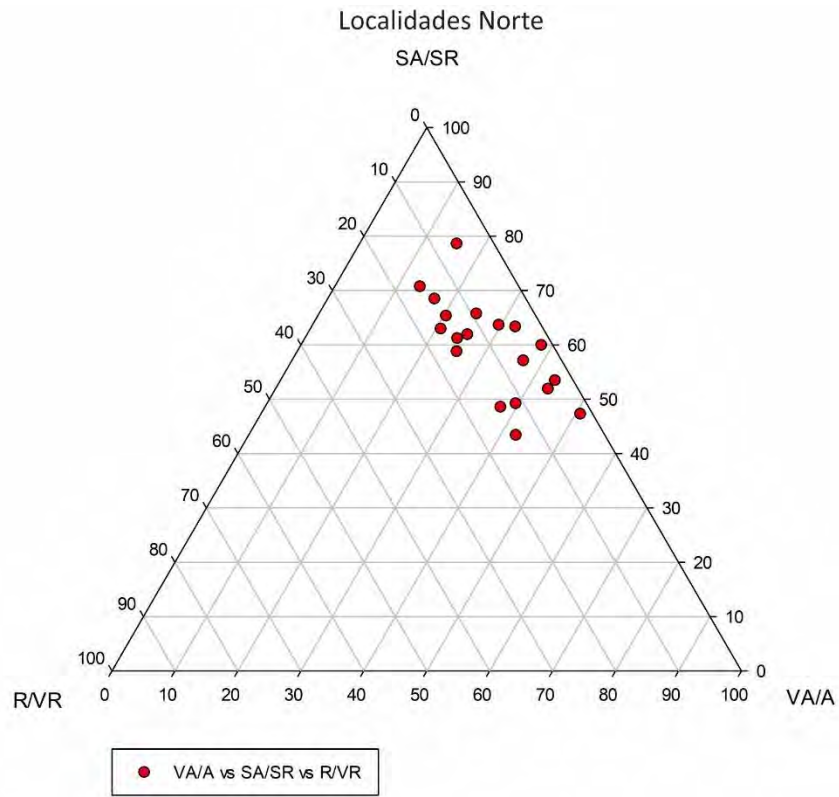


Fig. 21. Diagramas ternarios de redondeo de cuarzo en localidades del norte y sur del centro de Veracruz.

Las gráficas muestran una interpolación entre la mayor parte de puntos de las playas del norte con las playas del sur, ambas con una tendencia hacia los parámetros de muy anguloso y anguloso, indicativo de que la morfología de los granos de cuarzo es similar en ambas zonas, lo cual también fue posible ver por medio del microscopio al momento de realizar el conteo (Fig. 22). En el caso de las playas del norte, existe una ligera tendencia hacia redondeado y muy redondeado en la minoría de puntos, sin embargo, no se considera que esta ligera variación pueda ser indicativo de transporte eólico por largo tiempo y espacio debido al alto intemperismo químico de la zona que se observa, el cual influye en la textura y forma del cuarzo monocristalino (Dutta *et al.*, 1993; Dott, 2003; Garzanti *et al.*, 2013). En las playas del sur, la homogeneidad en la redondez de los granos aumenta, agrupándose en un rango de entre 50 % y 80 % hacia sub anguloso y sub redondeado, lo cual es un indicativo de menor transporte, ya sea por la acción del viento, o bien, por una rápida deposición. Adicionalmente, el cuarzo muestra tamaños ligeramente gruesos, lo cual sostiene el poco transporte y retrabajo al que se ha visto sometido.

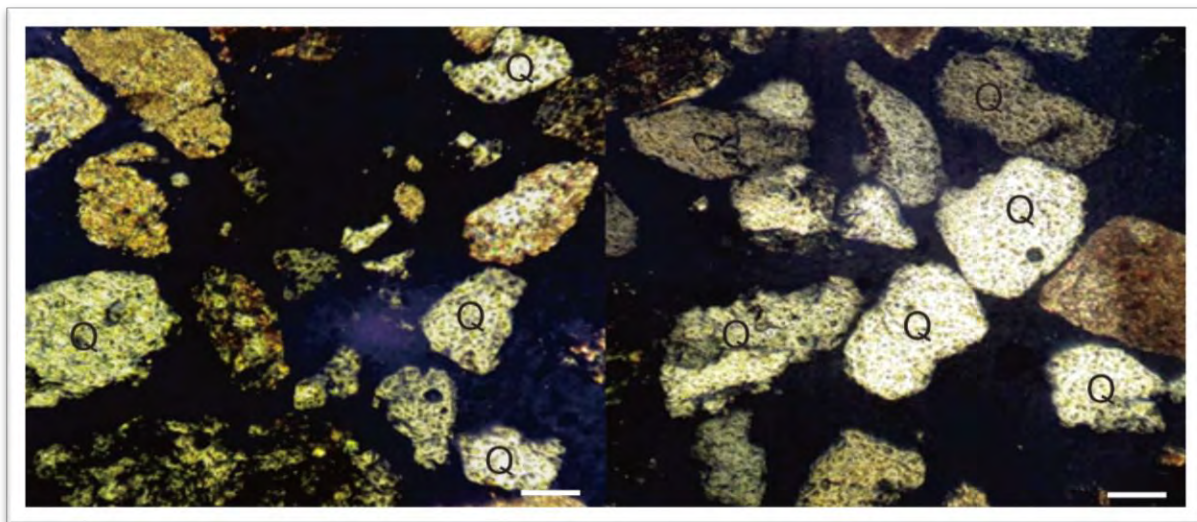


Fig. 22. Granos de cuarzo monocristalino en la localidad de Chachalacas. Escala 500 μm .

5.4. ANÁLISIS CLÚSTER DE MINERALES LIGEROS Y PESADOS

El análisis clúster permite medir la similitud entre objetos mediante una serie de variables y agruparlos de forma homogénea. Para este caso, el análisis clúster se realizó para medir la similitud existente entre las localidades, para demostrar gráficamente la homogeneidad entre las localidades del norte y sur.

Los datos utilizados para el análisis fueron, cuarzo monocristalino y biógenos para los minerales ligeros, y líticos volcánicos, además de minerales opacos para el grupo de minerales pesados. Los campos se diferencian de acuerdo con la similitud del análisis, obteniendo como resultado la división en dos campos bien diferenciados con una similitud de 70.76 % en el campo A y de 47.10 % en el B, el cual a su vez se divide en 2 subcampos: B1, con una similitud de 74.43 % y el B2, con 70.08 % (Fig. 23). El campo A indica mayor concentración de opacos y menor concentración de líticos volcánicos, esto sugiere que los vientos dominantes locales y energía en la zona norte es mayor que en la zona sur. La deflación del cuarzo por ser ligero se transporta hacia el sur dejando una capa de minerales pesados en el norte que no pueden ser transportados eólicamente. Sin embargo, las corrientes sí depositan estos minerales pesados en la playa que eventualmente es denudada por la misma acción del viento. El campo B es una zona de mezcla de procesos eólicos y litorales que no definen de manera tan puntual la concentración de minerales ligeros y pesados, sin embargo, se observa un aumento en la cantidad de granos de cuarzo en el subcampo B2, lo que genera la división con el campo B1. Del mismo modo, la acumulación de líticos volcánicos en el sur a partir de Palma Sola está documentado en el análisis modal efectuado en la arena de duna y playa de toda el área de estudio (Mendieta-Lora *et al.*, 2018). Esto sugiere: a) la barrera geográfica de FVTM impide un transporte regional de viento por deflación de minerales ligeros ej. cuarzo hacia el sur. b) los vientos del este y norte ejercen una mayor influencia local en la zona sur que está sustentada por la geomorfología de los campos de dunas hacia el sur de La Mancha. c) la acumulación de los líticos volcánicos en el sur indican reciclamiento de arena de varios ciclos procedente de la FVTM por parte de la corriente litoral a nivel local y deflación del cuarzo. Hipotéticamente las dunas del sur de Chachalacas deberían tener una mayor concentración de cuarzo.

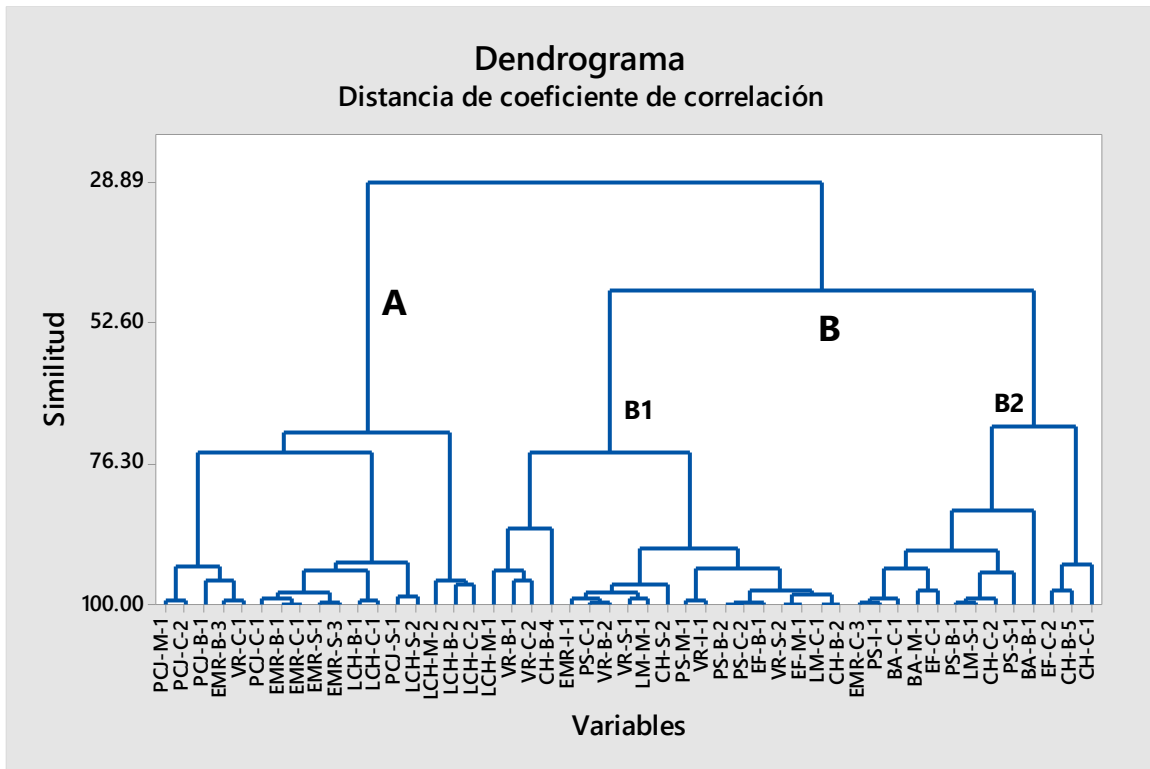


Fig. 23. Dendrograma de correlación entre las localidades del centro de Veracruz.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos del análisis textural, redondeo, análisis clúster y observación de imágenes satelitales, así como la medición de vientos, permiten determinar que en el centro del estado de Veracruz existen dos zonas bien diferenciadas de ambientes eólicos separadas por la FVTM en zona Norte y Sur, en donde la faja juega un papel fundamental en la dinámica eólica y el aporte de sedimentos.

El análisis textural muestra homogeneidad en sus parámetros en las muestras de playa, sin embargo, en las muestras de duna se pueden observar variaciones en los parámetros texturales, esto debido a la presencia de la FVTM, la cual, además de aportar sedimentos, funge como barrera geomorfológica para el paso del viento proveniente del norte, lo cual explica que las velocidades de vientos medidas en campo sean mayores en las localidades del norte que en las del sur. El aumento en el tamaño de grano en la localidad de Villa Rica (Primera después de la FVTM) y su clasificación moderadamente buena indican disminución en la energía del medio, que, en conjunto con la geomorfología de la localidad, no permite que el sedimento sea trabajado lo suficiente.

La presencia de minerales pesados distribuidos de forma homogénea en las localidades del norte y su posterior decrecimiento hacia el sur, indican que el viento pierde la capacidad para continuar transportándolos conforme se avanza hacia el sur, sin embargo, cuenta aún con la energía necesaria para seguir transportando minerales ligeros como el cuarzo y fragmentos de conchas.

Las observaciones en campo y de imágenes satelitales muestran que el tamaño de los campos de dunas del sur es mayor que en los campos del norte, lo cual está relacionado directamente con la presencia de campos de cultivo y construcciones, las cuales detienen el avance de las dunas hacia el continente. La diferencia en los tamaños de campos de dunas también permite que las dunas sean de mayor tamaño, lo que se explica con el aumento en la cantidad de granos de cuarzo, los cuales, al ser más ligeros, permiten una mayor distribución por parte del viento.

Los resultados de redondez en granos de cuarzo muestran homogeneidad en ambas zonas, lo cual debería ser un indicativo de poco transporte y rápida deposición, sin embargo, debido a la alta energía de la zona, los granos de cuarzo se encuentran fracturados, por lo cual se consideran poco confiables los resultados obtenidos de este conteo.

Con base en todo lo anteriormente presentado, se sugiere que, aunado a una toma de datos de viento más detallada y representativa, los análisis texturales y petrografía son de utilidad para proyectos de implementación de energía eólica, al ser indicativos de la efectividad del viento y permitir una visión más detallada de la dinámica eólica y todas sus implicaciones. Se recomienda especial atención a la región norte, en donde de manera indirecta, pero cuantitativa con la acumulación de minerales pesados, se determinó que el viento cuenta con mayor eficacia para su transporte.

REFERENCIAS

- Abuodha J. O. Z., 2003, Grain size distribution and composition of modern sand dune and beach sediments, Malandi Bay coast, Kenya. *Journal of African Earth Sciences*. 36, 41-45.
- Allen, P. A. y Allen, J. R., 2005, *Basin Analysis: principles and applications*. Blackwell Scientific Publication. 2, 549.
- Appendini, C., T.-F. A., Fernando, O., Paulo, S., Jose, L., and Tonatiuh, M., 2013, Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind reanalyses assessment. *Applied Ocean Research*. 39, 20–30.
- Arche, A., 2010. *Sedimentología: Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 1287.
- Arculus, R. J., 2003, Use and Abuse of the Terms Calcalkaline and Calcalkalic. *Journal of Petrology*. 44, 929–935.
- Armstrong-Altrin, J. S., Lee, Y. I., Kasper-Zubillaga, J. J., Nelson Eby, G. Daniel Garcia ,D. Carranza-Edwards, A., Balaram, V., Cruz-Ortiz, N. L. 2012. Geochemical composition of beach sands from the western Gulf of Mexico, Mexico: Implication for provenance. *Chemie Der Erde. Geochemistry*. 72, 345-362.
- Armstron-Altrin, J. S., Nagarajan, R., Balaram, V., Natalhy-Pineda, O. 2015. Petrography and geochemistry of sands from the Chachalacas and Veracruz beach areas, western Gulf of Mexico, Mexico: Constrains on provenance and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences*. 64, 199-216.
- Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), 2017. *El Viento en Números*.

- Bahena-Manjarrez, J., Rosales-Hoz, L. Carranza-Edwards, A., 2002. Spatial and temporal variation of heavy metals in a tropical estuary. 42 (6), 575-582.
- Basu, A., Young, S.W., Suttner, L.J., James, W.C., Mack, G.H., 1975, Reevaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation. *Journal of Sedimentary Petrology*. 45, 873-882.
- Cartaya, S., Méndez, W., González, L., 2005. Geomorfología y sedimentología de los ambientes depositacionales recientes del complejo estuarino de los ríos Hueque y Curarí, Estado Falcón, Venezuela. *Investigaciones geográficas*. 58, 7-33.
- Costa, P.J.M., Andrade, C., Mahaney, W.C., Marques da Silva, F., Freire, P., Freitas, M.C., Janardo, C., Oliveira, M.A., Silva, T., Lopes, V., 2013, Aeolian microtextures in silica spheres induced in a wind tunnel experiment: Comparison with aeolian quartz: *Geomorphology*. 120-129.
- Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista Instituto de Geología*. 2, 172-187.
- Dott, R.H. (2003). The importance of eolian abrasion in supermature quartz sandstones and the paradox of weathering on vegetation-free landscapes. *Journal of Geology*. 111, 387-405.
- Dutta P.K., Zhou, Z, dos Santos, P.R., 1993 A theoretical study of mineralogical maturation of eolian sand. *Geological Society of America Special Paper*. 284, 203-209.
- Emery, K. O., 1978, Grain size in laminae of beach sand. *Journal of Sedimentary Petrology*. 48, 1203-1212.
- Ferrari, L. 2000. Avances el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. LIII, 84-92.

- Ferrari, L., Tagami, T., Eguchib, M., Orozco-Esquivel, M.T., Petrone, C.M., Jacobo-Albarrán, J.J., López-Martínez, M. 2005. Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: The Eastern Alkaline Province revisited. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 146, 284-306.
- Folk, R. L. y Ward, W. C., 1957. Brazos River bar – A study in the significance of grain-size parameters. *Jour. Sed. Petrology*. 27 (1), 3-27.
- Folk, R. L., 1968. *Petrology of sedimentary rocks*. Austin, Hemphill. 170.
- Garzanti, E., Padoan, M., Ando, S., Resentini, A., Vezzoli, G., and Lustrino, L., 2013. Weathering and relative durability of detrital minerals in equatorial climate. Sand petrology and geochemistry in the East African Rift. *The Journal of Geology*. 121, 547-580.
- Gómez-Tuena, A., LaGatta, A., Langmuir, C., Goldstein, S., OrtegaGutiérrez, F., Carrasco-Núñez, G., 2003. Temporal control of subduction magmatism in the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: mantle sources, slab contributions and crustal contamination. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 4(8), 1-33.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, Ma. T., Ferrari, L., 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 3, 227-283.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, Ma. T., and Ferrari, L., 2007. Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt, in Alaniz-Álvarez, S.A., and Nieto-Samaniego, Á.F., eds., *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*. Geological Society of America Special Paper. 422, 129-181.
- Green, E.P. and Short, F.T., 2003. *World Atlas of Seagrasses*. University of California Press, Berkeley, USA. 324.

- Hernández-Hinojosa, V., Montiel-García P.C., Armstrong-Altrin J.S., Nagarajan, R., Kasper-Zubillaga, J.J., 2018. Textural and geochemical characteristics of beach sands along the Western Gulf of Mexico, Mexico. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 13, 161-174.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2018. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2015.
- Kasper-Zubillaga J.J., Carranza Edwards A. and Rosales-Hoz L., 1999. Petrography and geochemistry of Holocene sands in the western Gulf of Mexico: implications for provenance and tectonic setting: *Journal of Sedimentary Research*. 69, 1002-1010.
- Kasper-Zubillaga J.J. and Dickinson W.W., 2001. Discriminating depositional environments of sands from modern source terranes using modal analysis. *Sedimentary Geology*. 143, 149-167.
- Kasper-Zubillaga, J. J. and Carranza-Edwards, A., 2005. Grain size discrimination between sands of desert and coastal dunes from northwestern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 22, 383-390.
- Kasper-Zubillaga J.J., Zolezzi-Ruiz H., Carranza Edwards A., Girón García, P. Ortiz-Zamora, G.V. and Palma, M. 2007a. Sedimentological, modal analysis and geochemical studies of desert and coastal dunes, Altar Desert, NW México. *Earth Surface Processes and Landforms*. 32, 498-508.
- Kasper-Zubillaga J.J., Ortiz-Zamora, G.V., Dickinson WW, Urrutia-Fucugauchi J. and Soler-Arrechalde AM 2007b. Textural and compositional controls on modern beach and dune sands, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*. 32, 366-389.

- 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.
- McKee, E., 1979. A study of global sand seas. United States Geological Survey, Professional Paper. 1052, 429.
- Lancaster N., 1988. Control of eolian dune size and spacing. *Geology*. 16, 972-975.
- Langford R. P., Gill T. E., Jone S. B., 2015. Transport and mixing of eolian sand from local sources resulting in variations in grain size in a gypsum dune field, white sands, New Mexico, US. *Sedimentary Geology*. 333, 184-197.
- Livingstone I., 1987. Grain-size variation on a 'complex' linear dune in the Namib Desert. In *Desert Aeolian Processes*, Frostick L, Reid I(eds). Geological Society of London, Special Publication: Oxford. 281-291.
- Mendieta-Lora, M., Mejía-Ledezma, R.O., Kasper-Zubillaga, J.J., Arellano-Torres, E. and Álvarez Sánchez, L.F. Mineralogical and geochemical implications of the weathering rates in coastal dunes and beach sands close to a volcanic rock source in the Western Gulf of Mexico, Mexico. *Chemie Der Erde Geochemistry* (sometido).
- Muhs D.R. and Holliday, V.T., 2001. Origin of late Quaternary dune fields on the Southern High Plains of Texas and New Mexico. *Geological Society of America*. 113, 75-87.
- Muhs, D.R., Reynolds, R.L., Been, J. Skipp, G., 2003. Eolian sand transport pathways in the southwestern United States: importance of the Colorado River and local sources. *Quaternary International*. 104, 3-18.

- Muhs, D., 2017. Evaluation of simple geochemical indicators of aeolian sand provenance: Late Quaternary dune fields of North America revisited. *Quaternary Science Reviews*. 171, 260-296.
- Navarro M., Muñoz-Pérez J. J., Román-Sierra J., Ruiz-Cañavate A., Gómez-Pina G., 2015. Characterization of wind-blow sediment transport with height in a highly mobile dune (SW Spain). *Geological Acta*. 13, 155-166.
- Nordstrom, K. F. y Mauriello N. M., 2001. Restoring and Maintaining Naturally-Functioning Landforms and Biota on Intensively Developed Barrier Islands Under a No-Retreat Alternative. *Shore and Beach*. 69 (3), 19-28.
- Pereyra, D. y Pérez, J.A., 2005. Hidrología de superficie y precipitaciones intensas 2005 en el estado de Veracruz. In: Tejeda Martínez, A. and Welsh Rodriguez, C., Eds., *Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz*. Universidad Veracruzana. Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología, Xalapa. 81-99.
- Pérez-Villegas, G., 1992. Clima: Atlas Nacional de México (Hoja IV.4.2). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pettijohn, F. J., Potter, P.E., and Siever, R., 1972. *Sand and Sandstones*. New York, Springer-Verlag. 618.
- Pettijohn, F.J., 1975. *Sedimentary Rocks*. New York, Harper & Row. 628.
- Powers, M.C., 1953. A new roundness scale for sediment particles. *Journal of Sedimentology Petrology*. 32 (2), 117-119.

- Priego A. G., Insunza E., Luna N. y Perez J. L., 2007. Cuencas Hidrográficas de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- Pye, K., 1987. Aeolian dust and dust deposits. Academic Press, London.
- Secretaría de Energía (SENER), 2017. Balance Nacional de Energía 2016.
- Selley, R. C., 1970. Ancient Sedimentary Environments. Chapman Hall, London.
- Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta geológico-minera: Veracruz E14-13.
- Servicio Geológico Mexicano, 2004. Carta geológico-minera: Poza Rica F14-12.
- Twenhofel, W.H., 1945. The rounding of quartz grains. *Journal of Sedimentary Research*. 15, 59-71.
- Wang X., Dong Z., Zhang J., Qu J., Zhao A., 2003. Grain size of dune sands in the central Taklimakan Sand Sea. *Sedimentary Geology*. 161, 1-14.
- Wasson R. J., Hyde R., 1983. Factors determining desert dune type. *Nature*. 304, 337-339.
- White, B. R., Schulz, J.C., 1977. Magnus effect in saltation. *J. Fluid Mech*. 81, 497-512.
- Wilson, I. G., 1972. Aeolian bedforms-their development and origin. *Sedimentology*. 19, 173-210.

GLOSARIO

Anemómetro: Instrumento usado para medir la velocidad del viento.

Barlovento: Parte de la duna donde golpea el viento.

Berma: Parte subhorizontal de la playa, formada por acumulación de sedimento por acción del oleaje.

Cresta: Parte superior de la duna, se ubica entre el barlovento y el sotavento.

Cuarzo monocrystalino: Cristal individual de cuarzo.

Deflación: Erosión en la cual el viento se lleva a los sedimentos más pequeños, dejando a los de mayor peso.

Duna: Estructura sedimentaria formada por acción del viento, pueden tener diferentes formas.

FVTM: Faja Volcánica Transmexicana.

Granulometría: Medida del tamaño de los granos de sedimento.

Ilmenita: Mineral oxido de titanio, de formula FeTiO_3 .

Infraplaya: Parte de la playa que siempre está cubierta por agua.

Mesoplaya: Parte de la playa, cubierta periódicamente del agua, dependiendo del oleaje.

Mineralogía: Ciencia que estudia los minerales de forma aislada o en conjunto.

Mufla: Horno utilizado para calcinación, secado o fundición de sustancias.

Norte: Vientos de baja temperatura con dirección predominantemente norte.

Redondez: Propiedad de los sedimentos. Indica el grado de angulosidad de los granos.

Sotavento: Parte de la duna, contraria al Barlovento.

Supraplaya: Parte de la playa, se considera comienza después de la berma.

Tamiz: Utensilio usado para separar granos de acuerdo con su tamaño.

ANEXOS

Tabla 8. Tabla completa de mediciones de velocidad del viento.

Playa	Dirección	Velocidad (m/s)	Playa	Dirección	Velocidad (m/s)
PCJ-1	NE	1.72	BA-1	E	5.53
PCJ-2	NE	1.29	BA-2	E	4.82
PCJ-3	NE	1.86	BA-3	E	3.24
PCJ-4	NE	1.72	BA-4	E	5
PCJ-5	NE	1.57	BA-5	E	7.42
PCJ-6	E	2.36	BA-6	E	4.82
PCJ-7	E	2	BA-7	E	5.18
PCJ-8	E	3	BA-8	E	3.77
PCJ-9	E	3.24	BA-9	E	5.7
PCJ-10	E	3.89	BA-10	E	6.22
PCJ-11	E	2.72	VR-1	NE	3.94
PCJ-12	E	2.81	VR-2	NE	2.45
TOR-1	NE	2.89	VR-3	NE	2.18
TOR-2	NE	2.89	VR-4	NE	1.17
TOR-3	NE	2.71	VR-5	NE	1.29
TOR-4	NE	2.89	VR-6	NE	2
TOR-5	NE	3	VR-7	NE	1.72
TOR-6	E	3.77	VR-8	NE	1.29
TOR-7	E	3.59	VR-9	NE	2.51
TOR-8	E	5	VR-10	NE	4.12
TOR-9	E	4.3	VR-11	NE	3.46
TOR-10	E	4.47	VR-12	NE	2.71
TOR-11	E	5.7	EF-1	NE	1.15
TOR-12	E	5.18	EF-2	NE	3.77
TOR-13	E	6.04	EF-3	NE	2.89
TOR-14	E	11	EF-4	NE	2.54
TOR-15	E	10	EF-5	NE	1.57
LCH-1	E	8.11	EF-6	NE	1.43
LCH-2	E	7.25	EF-7	NE	2.57
LCH-3	E	7.59	EF-8	NE	1.29
LCH-4	E	7.76	EF-9	NE	2.63
LCH-5	E	8.8	EF-10	NE	1.29
LCH-6	E	8.11	EF-11	NE	1.79
LCH-7	E	8.8	LM-1	N	2.89
LCH-8	E	10.98	LM-2	N	2.71
LCH-9	E	9.31	LM-3	N	2.36

Playa	Dirección	Velocidad (m/s)	Playa	Dirección	Velocidad (m/s)
LCH-10	E	8.97	LM-4	N	2.18
LCH-11	E	9.11	LM-5	N	1.72
EMR-1	NE	1.72	LM-6	N	1.86
EMR-2	NE	1.86	LM-7	N	1.43
EMR-3	NE	1.72	LM-8	N	1.86
EMR-4	NE	1.29	LM-9	N	2.71
EMR-5	NE	1.11	LM-10	N	2
EMR-6	N	1.72	LM-11	N	1.72
EMR-7	N	1.72	CH-1	N	2
EMR-8	N	1.29	CH-2	N	3.06
EMR-9	N	1.57	CH-3	N	1.86
EMR-10	N	1.72	CH-4	N	3.42
PS-1	E	5.18	CH-5	N	2.89
PS-2	E	6.22	CH-6	N	3.24
PS-3	E	6.39	CH-7	N	3.02
PS-4	E	5.53	CH-8	N	2.18
PS-5	E	7.25	CH-9	N	2
PS-6	E	7.59	CH-10	N	3
PS-7	E	8.11	CH-11	N	3.42
PS-8	E	7.08	CH-12	N	5.7
PS-9	E	7.25	CH-13	N	4.12
PS-10	E	6.04	CH-14	N	3.94

Tabla 9. Tabla completa de resultados del análisis textural

Sedimento		Parámetros Texturales				Descripción			
		MEAN	SORTING	SKEWNESS	KURTOSIS	MEAN:	SORTING:	SKEWNESS:	KURTOSIS:
PCJ-I-1	Arena	1.848	0.512	-0.055	0.798	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Symmetrical	Platykurtic
PCJ-B-1	Arena	2.468	0.491	-0.093	1.185	Fina	Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
PCJ-C-1	Arena	2.255	0.536	-0.119	1.368	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
PCJ-S-1	Arena	2.171	0.574	-0.130	1.274	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
PCJ-M-2	Arena	2.360	0.559	-0.009	1.333	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
PCJ-B-2	Arena	2.164	0.573	-0.132	1.289	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
PCJ-C-2	Arena	2.385	0.515	-0.026	1.303	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
PCJ-S-6	Arena	2.152	0.578	-0.145	1.149	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
LCH-I-1	Arena	1.860	0.472	-0.212	0.727	Media	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic
LCH-M-1	Arena	1.682	0.453	0.119	0.868	Media	Bien Clasificado	Fine Skewed	Platykurtic
LCH-B-1	Arena	2.131	0.593	-0.147	1.004	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
LCH-C-1	Arena	2.388	0.464	-0.026	1.303	Fina	Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
LCH-S-1	Arena	2.436	0.492	-0.001	1.270	Fina	Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
LCH-I-2	Arena	1.765	0.472	0.013	0.742	Media	Bien Clasificado	Symmetrical	Platykurtic
LCH-M-2	Arena	2.312	0.621	-0.070	1.218	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
LCH-B-2	Arena	2.238	0.530	-0.172	1.292	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
LCH-C-2	Arena	2.285	0.489	-0.136	1.328	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
LCH-S-2	Arena	2.369	0.447	-0.047	1.302	Fina	Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
EMR-I-1	Arena	2.138	0.559	-0.216	0.981	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
EMR-B-1	Arena	2.606	0.397	-0.149	1.062	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
EMR-C-1	Arena	2.470	0.455	-0.140	1.193	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
EMR-S-1	Arena	2.478	0.455	-0.151	1.177	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
EMR-M-2	Arena	1.658	0.823	-0.166	0.893	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic

Sedimento		Parámetros Texturales				Descripción			
		MEAN	SORTING	SKEWNESS	KURTOSIS	MEAN:	SORTING:	SKEWNESS:	KURTOSIS:
EMR-B-2	Arena	2.502	0.426	-0.148	1.126	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
EMR-C-2	Arena	2.535	0.471	-0.174	1.147	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
EMR-S-2	Arena	2.459	0.454	-0.100	1.199	Fina	Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
EMR-I-3	Arena	2.000	0.513	-0.287	0.890	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic
EMR-B-3	Arena	2.247	0.501	-0.176	1.322	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
EMR-C-3	Arena	2.716	0.317	-0.176	1.176	Fina	Muy Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
EMR-S-3	Arena	2.726	0.337	-0.040	1.221	Fina	Muy Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
PS-M-1	Arena	2.276	0.467	-0.169	1.327	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
PS-I-1	Arena	2.226	0.495	-0.201	1.340	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
PS-B-1	Arena	2.500	0.326	-0.022	0.868	Fina	Muy Bien Clasificado	Symmetrical	Platykurtic
PS-C-1	Arena	2.404	0.290	0.097	0.859	Fina	Muy Bien Clasificado	Symmetrical	Platykurtic
PS-S-1	Arena	2.613	0.324	-0.110	1.052	Fina	Muy Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
PS-I-2	Arena	1.867	0.507	-0.151	0.778	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic
PS-B-2	Arena	1.890	0.508	-0.297	0.783	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic
PS-C-2	Arena	2.001	0.565	-0.199	0.890	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic
PS-S-2	Arena	2.447	0.428	-0.147	1.154	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
BA-M-1	Arena	2.079	0.539	-0.233	1.058	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
BA-I-1	Arena	2.378	0.382	-0.042	1.228	Fina	Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
BA-B-1	Arena	2.549	0.329	-0.100	0.860	Fina	Muy Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic
BA-C-1	Arena	2.378	0.450	-0.129	1.222	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
VR-I-1	Arena	2.228	0.547	-0.243	1.132	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
VR-M-1	Arena	2.162	0.636	-0.204	0.961	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
VR-B-1	Arena	1.777	0.536	0.108	0.826	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Fine Skewed	Platykurtic
VR-C-1	Arena	1.798	0.648	0.085	0.989	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Symmetrical	Mesokurtic
VR-S-1	Arena	1.921	0.538	-0.169	0.807	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic
VR-B-2	Arena	1.876	0.527	-0.199	0.790	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic

Sedimento		Parámetros Texturales				Descripción			
		MEAN	SORTING	SKEWNESS	KURTOSIS	MEAN:	SORTING:	SKEWNESS:	KURTOSIS:
VR-C-2	Arena	1.917	0.526	-0.180	0.813	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic
VR-S-2	Arena	1.743	0.496	0.094	0.813	Media	Bien Clasificado	Symmetrical	Platykurtic
EF-I-1	Arena	2.164	0.555	-0.215	1.053	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
EF-B-1	Arena	2.312	0.462	-0.157	1.288	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
EF-C-1	Arena	2.235	0.513	-0.186	1.309	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
EF-M-2	Arena	2.165	0.530	-0.225	1.256	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
EF-B-2	Arena	2.175	0.529	-0.208	1.285	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
EF-C-2	Arena	1.739	0.472	0.063	0.771	Media	Bien Clasificado	Symmetrical	Platykurtic
EF-S-2	Arena	2.012	0.527	-0.241	0.919	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
EF-B-3	Arena	2.451	0.424	-0.048	1.174	Fina	Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
EF-C-3	Arena	2.361	0.504	-0.159	1.203	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
EF-S-3	Arena	2.370	0.398	-0.048	1.283	Fina	Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
LM-M-1	Arena	1.646	0.838	0.013	0.971	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Symmetrical	Mesokurtic
LM-C-1	Arena	2.435	0.434	-0.115	1.172	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
LM-B-2	Arena	2.526	0.439	-0.148	1.110	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
LM-C-2	Arena	2.196	0.574	-0.185	1.080	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
LM-S-2	Arena	2.496	0.430	-0.132	1.108	Fina	Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
LM-M-3	Arena	2.140	0.615	-0.269	0.936	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
LM-B-3	Arena	2.510	0.461	-0.047	1.179	Fina	Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
LM-C-3	Arena	2.472	0.405	-0.074	1.120	Fina	Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
LM-S-3	Arena	2.387	0.442	-0.096	1.240	Fina	Bien Clasificado	Symmetrical	Leptokurtic
CH-I-1	Arena	1.561	0.955	-0.061	0.671	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Symmetrical	Platykurtic
CH-B-2	Arena	2.154	0.603	-0.258	0.973	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
CH-C-2	Arena	2.223	0.541	-0.236	1.197	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Leptokurtic
CH-S-2	Arena	2.175	0.598	-0.274	0.992	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
CH-B-4	Arena	2.057	0.554	-0.209	0.928	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic

Sedimento		Parámetros Texturales				Descripción			
		MEAN	SORTING	SKEWNESS	KURTOSIS	MEAN:	SORTING:	SKEWNESS:	KURTOSIS:
CH-C-4	Arena	1.785	0.508	0.060	0.795	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Symmetrical	Platykurtic
CH-S-4	Arena	1.943	0.619	-0.103	0.812	Media	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic
CH-B-5	Arena	2.186	0.575	-0.229	1.030	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Mesokurtic
CH-C-5	Arena	2.086	0.613	-0.177	0.855	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic
CH-S-5	Arena	2.011	0.685	-0.157	0.827	Fina	Moderadamente Bien Clasificado	Coarse Skewed	Platykurtic

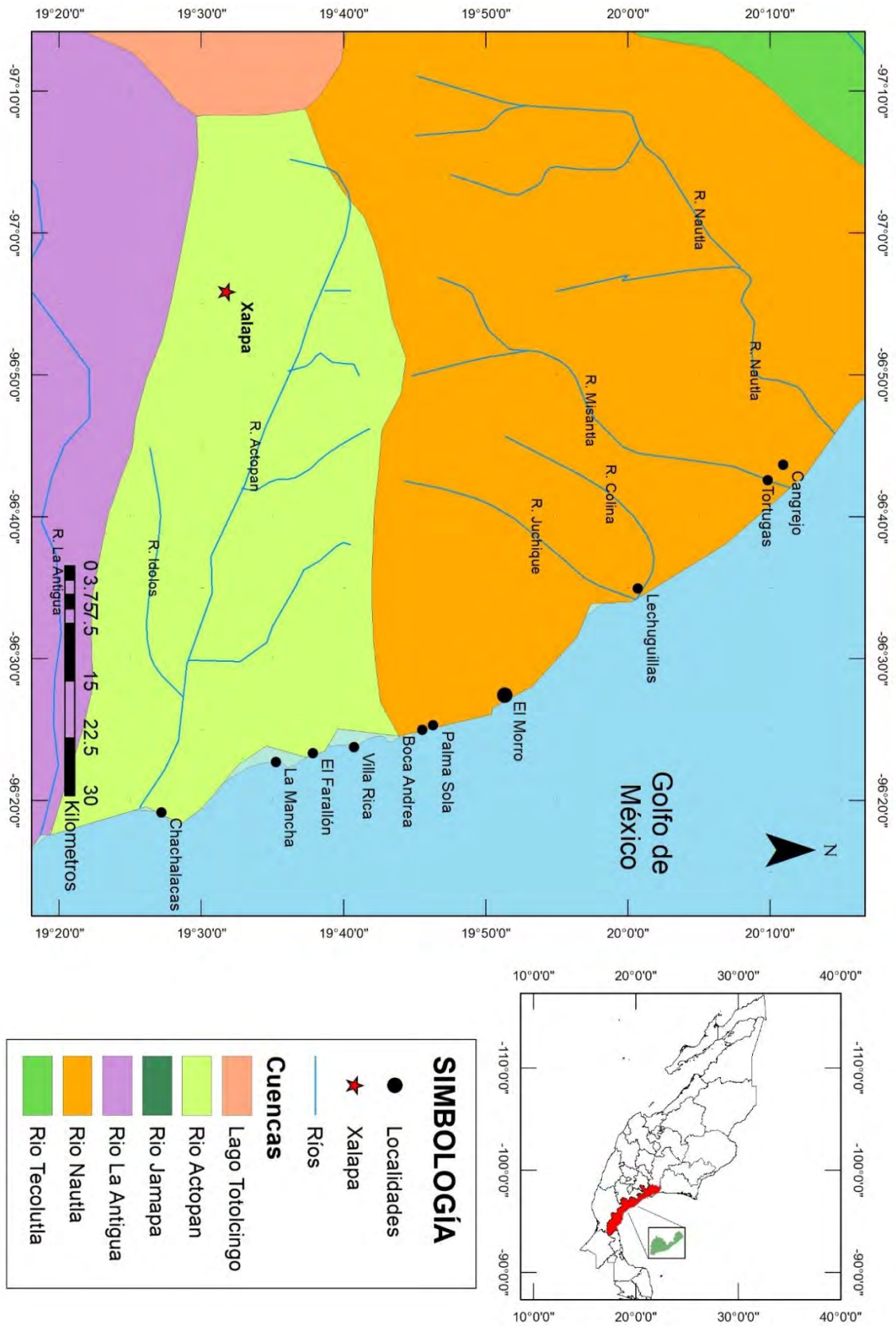
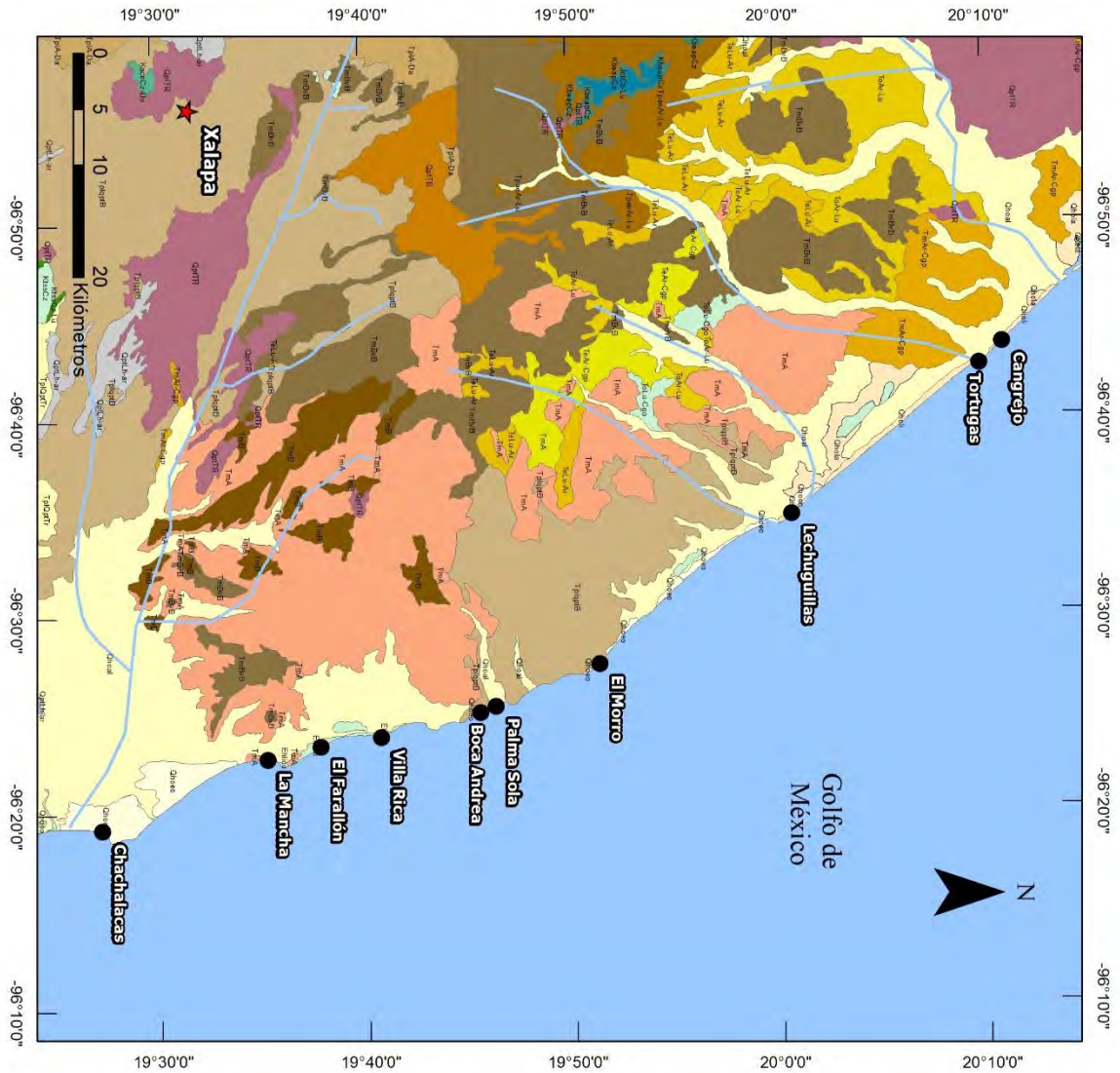


Fig. 24. Mapa de climas en hoja completa.



- SIMBOLOGIA**
- ★ Xalapa
 - Localidades
 - Ríos
 - Aluvión (Cuaternario)
 - Edilco (Cuaternario)
 - Lacustre (Cuaternario)
 - Litoral (Cuaternario)
 - Lahar-Arena (Cuaternario)
 - Toba Basáltica (Cuaternario)
 - Toba Riolítica (Cuaternario)
 - Arenisca-Conglomerado Poli (Terciario)
 - Lutita-Arenisca (Terciario)
 - Andesita (Terciario)
 - Arenisca-Conglomerado Oll (Terciario)
 - Basalto (Terciario)
 - Brecha Basáltica (Terciario)
 - Arenisca-Lutita (Terciario)
 - Arenisca-Lutita (Terciario, Neógeno)
 - Andesita-Dacita (Terciario)
 - Travertino (Terciario)
 - Basalto (Terciario, Neógeno)
 - Caliza-Lutita (Cretácico Superior)
 - Caliza-Dolomita (Cretácico Inferior)
 - Caliza (Cretácico Inferior)
 - Caliza-Lutita (Jurásico Medio)

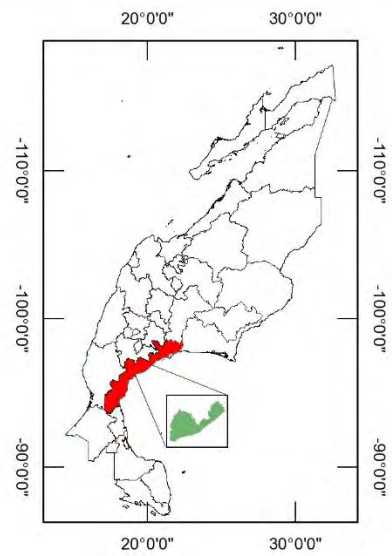
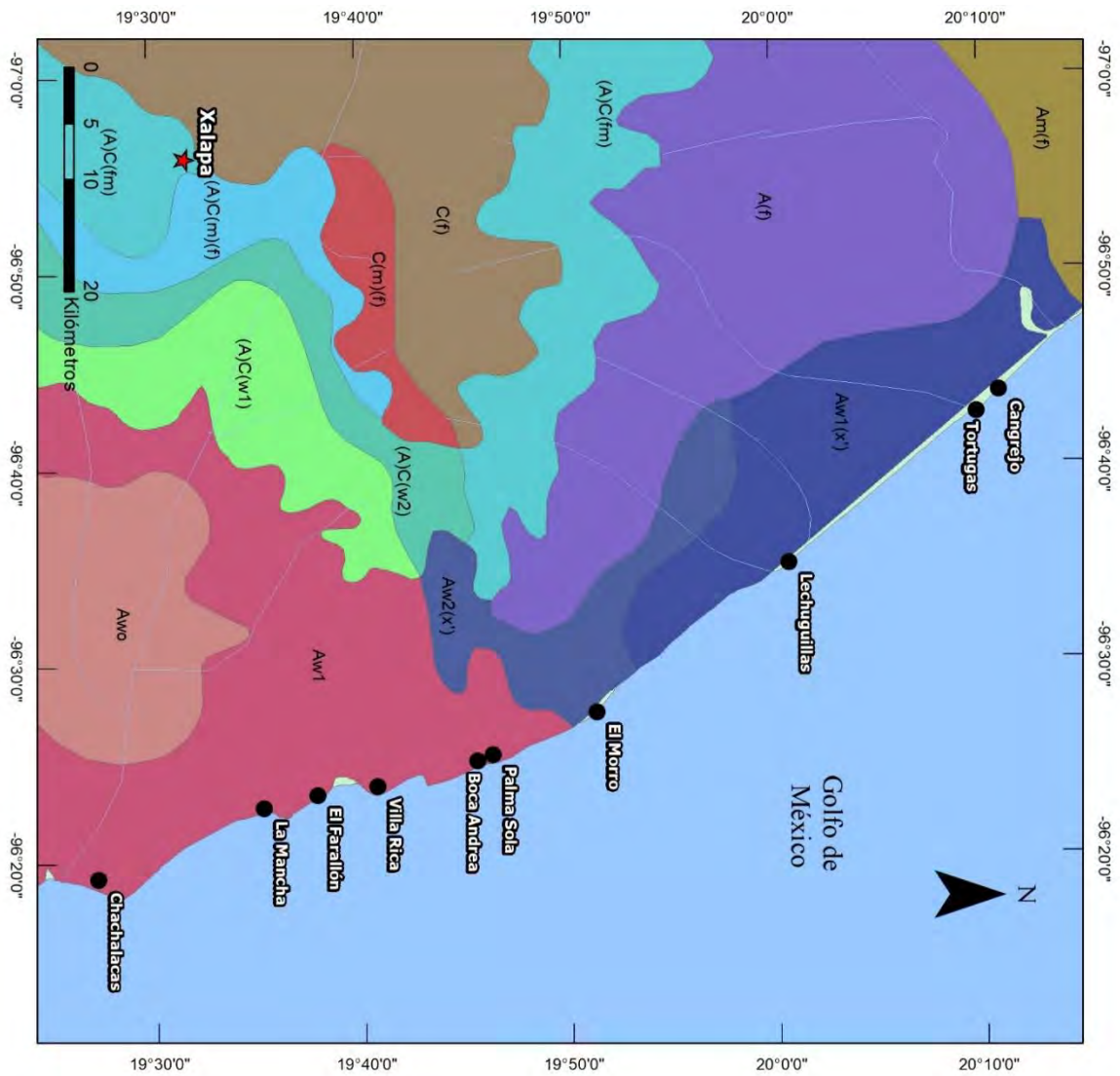


Fig. 25. Mapa de geología en hoja completa.



- SIMBOLOGIA**
- ★ Jalapa
 - Localidades
 - Ríos
- Tipo de Clima**
- (A)C(fm)
 - (A)C(m)(f)
 - (A)C(w1)
 - (A)C(w2)
 - Af
 - Am(f)
 - Aw1
 - Aw1(x')
 - Aw2(x')
 - Awo
 - C(f)
 - C(m)(f)

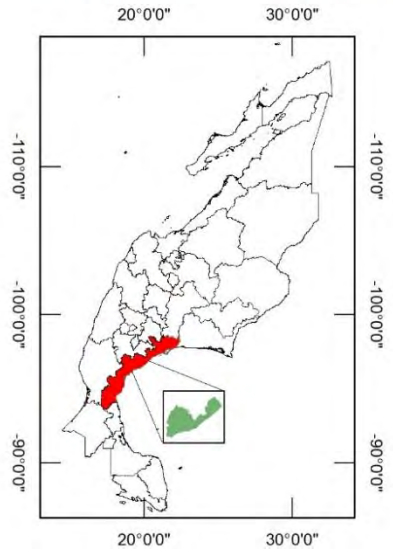


Fig. 26. Mapa de climas en hoja completa.



Fig. 27. Campo de dunas en la localidad Cangrejo.



Fig. 28. Campo de dunas en la localidad Lechuguillas.



Fig. 29. Campo de dunas en la localidad El Morro.



Fig. 30. Campo de dunas en la localidad Palma Sola.



Fig. 31. Campo de dunas en la localidad Boca Andrea.



Fig. 32. Campo de dunas en la localidad Villa Rica.



Fig. 33. Campo de dunas en la localidad El Farallón.



Fig. 34. Campo de dunas en la localidad La Mancha.



Fig. 35. Campo de dunas en la localidad Chachalacas.

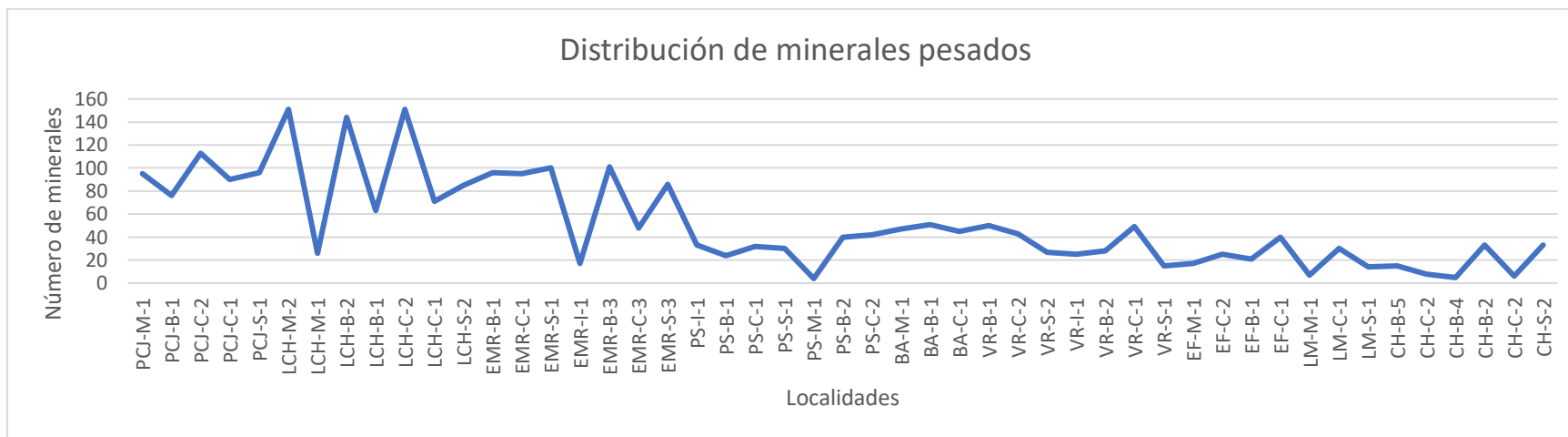


Fig. 36. Distribución de minerales pesados.

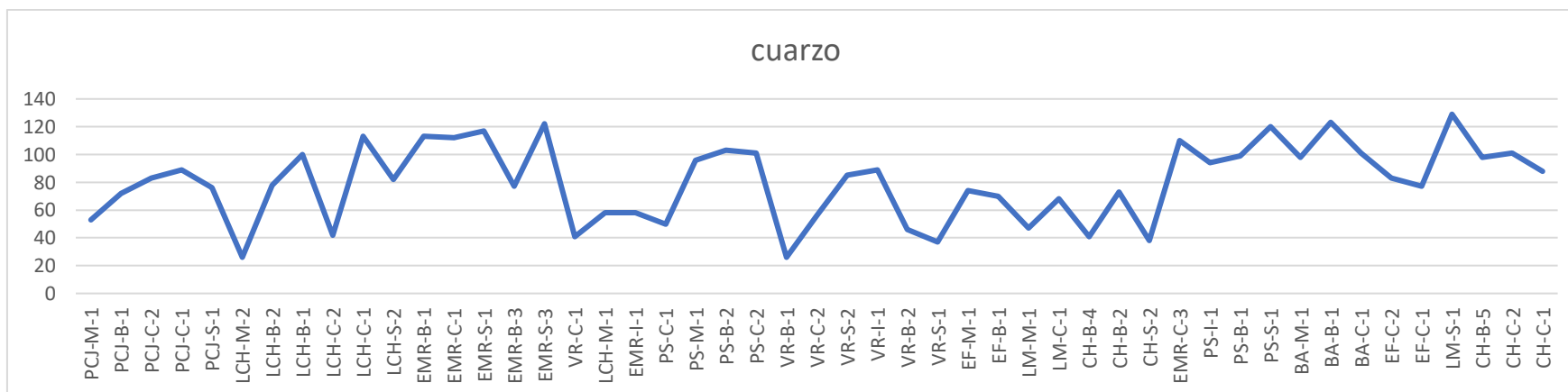


Fig. 37. Distribución de granos de cuarzo.

ARTÍCULO



Contents lists available at ScienceDirect

Chemie der Erde

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

Mineralogical and geochemical implications of weathering rates in coastal dunes and beach sands close to a volcanic rock source in the western Gulf of Mexico, Mexico

Mendieta-Lora M.^a, Mejía-Ledezma R.O.^a, Kasper-Zubillaga J.J.^{b,*}, Arellano-Torres E.^c,
Álvarez Sánchez L.F.^d

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ingeniería en Geología Ambiental, Carretera Pachuca-Actopan Km. 4.5, Campo de Tiro, 42039, Pachuca de Soto, Hgo, México

^b Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica de Procesos Oceánicos y Costeros, UNAM, Ciudad Universitaria s/n, 04510, CDMX, México

^c Facultad de Ciencias, Departamento de Ecología y Recursos Naturales, UNAM Ciudad Universitaria s/n, 04510, CDMX, México

^d Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad de Informática Marina UNAM, Ciudad Universitaria s/n, 04510, CDMX, México

ARTICLE INFO

Keywords:

Coastal dune
Beach
Mineralogy
Chemical weathering
Volcanic rocks

ABSTRACT

Coastal dune (CD) and beach sand samples were mineralogically and chemically studied to assess the weathering rates in a coastal area surrounded by the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB). The study area is a narrow coastal plain with sub-humid warm weather and vigorous coastal dynamics located in the Western Gulf of Mexico (WGM). Our results show that the grain size parameters remain homogeneous along nine CD and beach sites, probably due to the hydrodynamic mechanisms prevailing in the area, i.e. wind deflation, longshore currents, and waves. The minerals found in the CD and beach sands are enriched in recycled, highly corroded monocrystalline quartz (Qm), with loss of plagioclase (P) and olivine (ol), with ilmenite fractions (op) especially in the northern sites. The geochemical data show that the sands are controlled by the exhumation of the TMVB rocks composed of a high volcanic lithic content with lathwork, microlithic, and negligible vitric textures. These volcanic fractions are in agreement with the presence of lavas of calc alkaline, andesite, Na-alkaline lavas, and rhyolite tuffs derived from the TMVB. Significant Spearman Rank Correlations (SRCs) resulted from high silica, titanium, iron, magnesium, calcium, vanadium, chromium, cobalt, associated with the presence of Qm, ilmenite, clinopyroxene, shell fragments, and volcanic lithics. Monocrystalline quartz enrichments, compared to a quartz dilution effect ($< Q_m$; $< Q_m$) at the northern and southern beach sites, reflect the vigorous coastal dynamics. The presence of ilmenite lag deposits in the northern sites indicate that high energy hydrodynamic conditions prevail at the site. The rare earth element (REE) patterns support the mineralogical and compositional framework of the CD and beach sands as part of the TMVB exhumation. We used various chemical indices such as the Chemical Index of Alteration (CIA), the Chemical Index of Weathering (CIW), the Plagioclase Index of Alteration (PIA), and the Weathering Index of Plagioclase (WIP). The WIP values reflect the depletion of mobile elements such as Ca, Na, K, and enrichment of Qm at the northern beach sites, e.g. the Istirinchíá site. The CIA/WIP ratio of 2.13 indicates intermediate weathering under warm climatic conditions and recycling of CD and beach sands.

1. Introduction

Chemical weathering rates have proven to be a useful quantitative approach for discussion of the associations among climate, relief, and coastal dynamics controlling the composition of old and modern continental and coastal sediments with different parent rocks (Honda and Shimizu, 1998; Dott, 2003; Garzanti et al., 2015; Muhs, 2017). In warm and humid regions, few studies have considered the mineralogical

composition and weathering rates in coastal basins close to volcanic rock exposures (Marsaglia, 1993; Kasper-Zubillaga et al., 2007; Garzanti et al., 2013a, 2013b; Alappat et al., 2016). In the WGM, the CD and beach sands should reflect a compositional similarity to the TMVB, due to the proximity of the volcanic rocks

- Conversion(M.E.)

* Corresponding author.

E-mail address: kasper@cmarl.unam.mx (J.J. Kasper-Zubillaga).

<https://doi.org/10.1016/j.chemer.2018.06.004>

Received 26 March 2018; Received in revised form 26 May 2018; Accepted 26 June 2018

0009-2819/ © 2018 Elsevier GmbH. All rights reserved.

to the coastal plain. However, it is unknown how the recycling, abrasion, and chemical loss of the sands' main components are controlled by climate and hydrodynamic conditions. In this study, we aimed to resolve the exogenous processes induced by various mechanisms that can modify the sand composition (Arth, 1981). We propose the use of the CIA, CIW, PIA, and WIP to measure and determine the role of weathering conditions in the minerals (Parker, 1970; Nesbitt and Young, 1982; Fedo et al., 1995; Price and Velbel, 2003; Fiantis et al., 2010; Garzanti et al., 2013a, 2013b). Our paper contributes to the establishment of the mineralogical framework and weathering rates in a confined sedimentary basin surrounded by the TMVB under warm and humid climate (Cantagrel and Robin, 1979; Negendank et al., 1985; Gómez-Tuena et al., 2007; Ferrari et al., 2011).

2. Study area

The study area is located in the WGM (between 20°12' and 19°24' N; 96°45' and 96°19' W). The area is part of a physiographic region described as part of the Gulf of Mexico Coastal Plain (Tamayo, 2013). Climate and chemical weathering processes affecting the coastal area are determined by the sub-humid warm weather conditions with a summer rainfall regime in a tropical geographic setting; i.e. Am (warm-humid with maxima summer rainfall), Aw (sub-humid with summer rainfall) (Kottek et al., 2006). Hurricanes are common from June to November (Tamayo, 2013). Minimum temperatures are 17–25 °C and maximum temperatures are 22–30 °C, while average precipitation ranges from 370 mm to 60 mm in summer and winter, respectively. The annual average humidity is about 80% (<https://weather-and-climate.com>).

Coastal dunes and beach sites in the study area are: Istirinchá (I), Lechuguillas (Le), El Morro (EM), Palma Sola (PS), Boca Andrea (BA), Villa Rica (VR), Farallón (F), La Mancha (LM), and Chachalacas (CH). The topography is more prominent in the central part than in the northern and southern coastal areas near the TMVB (Figs. 1 and 2). The coastal dune systems are characterized by transverse mobile and vegetated systems with average heights of 2–8 m in the northern area, and transverse-vegetated and dominant parabolic-barchanoid dunes in the southern area with average heights of ~ 10 m (Figs. 3A–C). A transgressive, low relief, narrow coastal plain (on average 1.25 km) with accretionary and wave-dominated beaches is observed along the coast of the WGM (Ortiz-Pérez and Espinosa, 1991).

The fluvial network includes ten perennial rivers located between Istirinchá (I) in the north and Chachalacas (CH) in the south (Fig. 2). The rest of the rivers are of intermittent character as shown in the Digital Elevation Model Map (DEM) (Servicio Geológico Mexicano, 2017) (Fig. 2). Some previous petrographic data are available for rivers close to the PS and CH sites (Kasper-Zubillaga et al., 1999).

The physical oceanography of the longshore currents shows a northward component in spring-summer with average velocities of 5.75 cm s⁻¹ (3.5 to 8.0 cm s⁻¹) (Fernández-Eguiarte et al., 1992). Multi-directional winds are present as follows: a) northeasterly and easterly winds with average velocities of 4–6 m s⁻¹ in summer, and b) northerly winds with average velocities of 8 m s⁻¹ in the fall (Perez-Villegas, 1990). Waves average 0.90 m in height with 3–8 s periods. Tides are of diurnal and mixed-diurnal types with an average tidal range of 0.30 m.

2.1. Geology

The TMVB is the largest Neogene volcanic arc in North America, encompassing 160,000 km², with a length of almost 1000 km in central Mexico. It is a continental arc that exhibits significant variation in composition and volcanic style, with intra-arc extensional tectonics in the eastern part of continental Mexico close to the WGM coastal area. Here, the TMVB is characterized by mafic volcanism (Ferrari et al., 2011) (Figs. 1,2). Rocks are late Miocene (ca. 7.5 Ma) to early Pliocene

(ca. 3 Ma) volcanic fields of Na-alkaline character with small volumes compared to volcanic contemporaneous calc alkaline (subalkaline) rocks close to the WGM coast (Cantagrel and Robin, 1979; Negendank et al., 1985; Gómez-Tuena et al., 2007). The coastal area is exposed by the volcanic fields near the Nautla and Chachalacas beach sites comprising andesites, andesites-dacites, basalts, volcanic tuffs, and basaltic breccias (Servicio Geológico Mexicano, 2017). In the northern area of the WGM, outcrops of rhyolite tuffs and pumice are exposed. Quaternary volcanic rocks are mainly calc-alkaline (subalkaline), although associated Na-alkaline lavas of basanitic to mugearitic intermediate composition (Fig. 2), e.g. clinopyroxene, Fe-rich olivine, oligoclase and opaque Ti-Fe-bearing minerals have also been reported (Muir and Tilley, 1961; Trumbull et al., 2003; Nonnotte et al., 2011). Quaternary sedimentary units are represented by alluvial and aeolian sands exposed along the coastal area.

3. Sampling, equipment, and analytical procedure

3.1. Sampling

Nine beach sites with CDs were sampled along the WGM coast. From north to south, the sites are known as Istirinchá (I), Lechuguillas (LE), El Morro (EM), Palma Sola (PS), Boca Andrea (BA), Villa Rica (VR), Farallón (F), La Mancha (LM), and Chachalacas (CH). Samples were taken from the stoss face (s; n = 14), the crest (c; n = 16), and the lee face (l = 9) of the coastal dunes, from the inshore (i = 3) and foreshore (f = 7) of the beach (total n = 49; Table 1). Our sampling avoided a bias effect by collecting sands in which heavy mineral lag deposits were observed, i.e. mainly opaque fractions. Only the upper part of the CD and beach sands were collected with a trowel (~ 140 g) to ensure that the sample corresponded to recent sediments, to avoid mixing with deep sand laminae deposits. Beach sands were sampled to determine the physical and chemical mechanisms that characterize the CD sands; this is documented in several papers where wind deflation, wave regime, and heavy mineral concentration from the beach influence the composition of CD sand (Kasper-Zubillaga et al., 2007; Garzanti et al., 2015).

3.2. Grain size parameters

Approximately 10 g of CD and beach sands was used for grain size determination. A Ro-Tap sieve shaker and American Standard Test Sieve Series (ASTM) were used with 0.5 ϕ intervals for size separation. Gradistat software was used to perform the grain-size calculations in the Microsoft Excel version 8.0 2000–2003 (Blott and Pye, 2001) (<http://www.kpal.co.uk/gradistat.html>). Grain-size statistical parameter intervals were used to assess grain size patterns in the CD sands and some beach sands (Folk, 1980) (Table 1).

3.3. Wind speed measurements

A total of 126 wind speed measurements in m s⁻¹ performed during field sampling by a Steren HER-440 handheld anemometer were carried out for each beach site: Istirinchá n = 37, Lechuguillas n = 11, El Morro n = 10, Palma Sola n = 10, Boca Andrea n = 10, Villa Rica = 12, El Farallón n = 11, La Mancha n = 11, and Chachalacas n = 14. Wind measurements began in the foreshore of the beach and continued progressively in the dune and back to the foreshore during beach and CD sand sampling.

3.4. Modal analysis

A Velab VE-148 P polarized microscope with 10 x objective was used for modal analysis. Five hundred points were counted in thin sections previously prepared with epoxy resin without cover slips for the CD and beach sands, using Gazzidickinson's point counting method

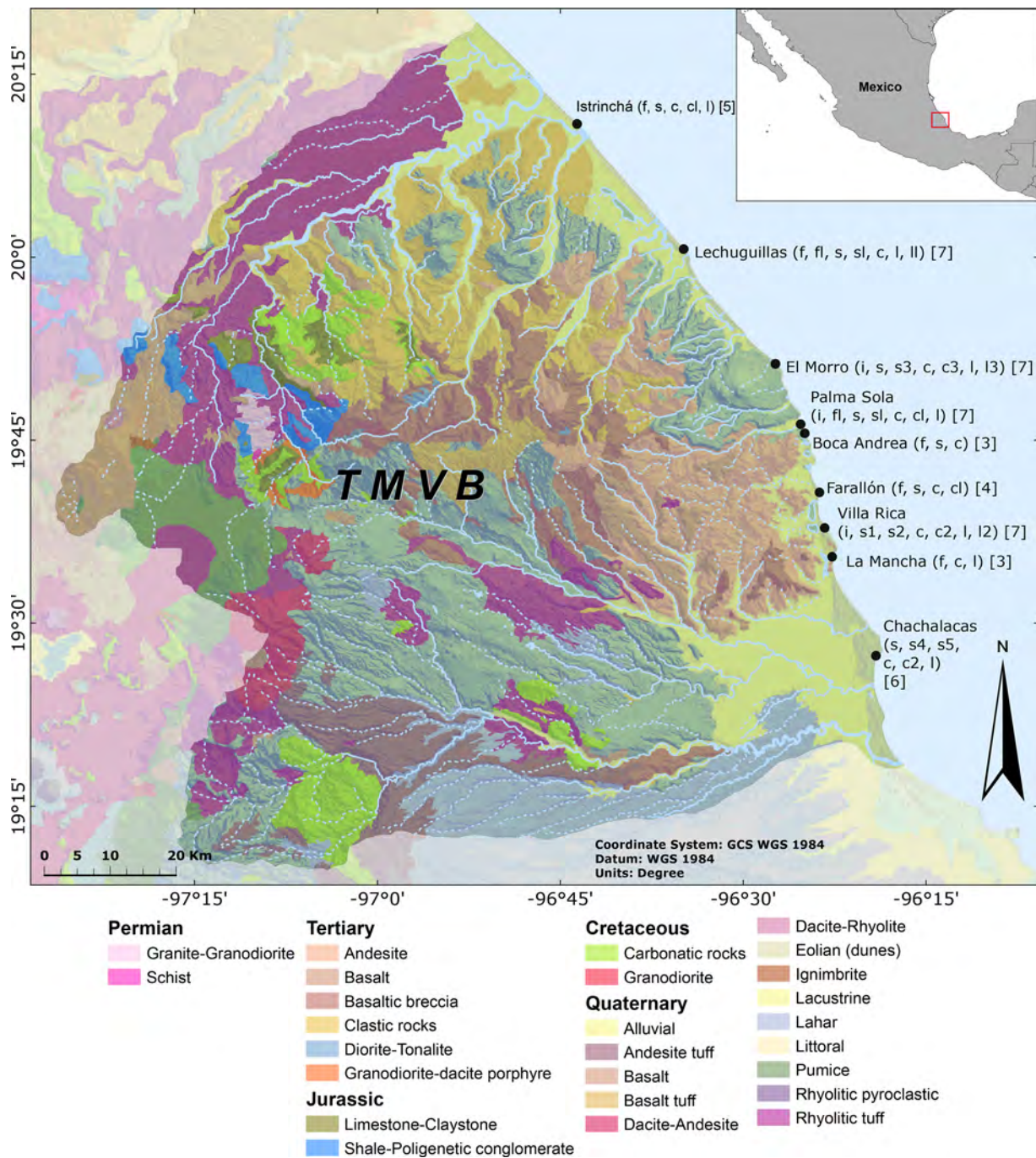


Fig. 1. Study area, sampling sites, and geology (modified from the Servicio Geológico Mexicano, 2017).

(Marsaglia, 1993; Garzanti et al., 2013a, 2013b). The first category ($n = 250$ grains per slide) included total quartz i.e. Q = all quartz grains, including single-crystal and polycrystalline quartz, total feldspar F = potash feldspar, plagioclase (P), and total lithics (L, volcanic and sedimentary; absence of metamorphic outcrops is observed). The second category ($n = 250$ grains per slide) included volcanic lithics with lathwork (Lvl), microlithic (Lvm), and vitric textures (Lvv), sedimentary lithics (Ls, including sandstones, siltstones, chert), heavy minerals (HM, including clinopyroxene (px), olivine (ol), amphibole (a), opaque minerals (op = mainly ilmenite), and biogenic components (B = calcite-composed shell fragments and foraminifera) (Marsaglia et al., 2016). Point counts were recalculated to percentages for each category. Ternary diagrams were constructed with the following poles a) Q-F-L; b) Lvl-Lvm-Lvv; c) ol-px-op. These diagrams were prepared to

show: (a) general mineralogical composition, relief, parent rock, and the influence of coastal dynamics; (b) provenance of CD sands linked mainly to rapidly cooling lavas (Lvl, Lvv), andesitic-Na-alkaline lavas (Lvm), and probably rhyolitic tuff; (c) labile heavy-mineral loss associated with sub-humid warm weather and the influence of coastal dynamics (Table 2; Fig. 4A–C).

3.5. Geochemical analysis

We analyzed 30 sand samples for major and trace elements based on the aim of our work which considers mostly CD but also some beach sands to discuss the importance of the coastal dynamic processes controlling the sand composition. Sand samples were crushed in a Fritsch Pulverisette Grinding Mill Model 2, micro-milling from medium-hard to

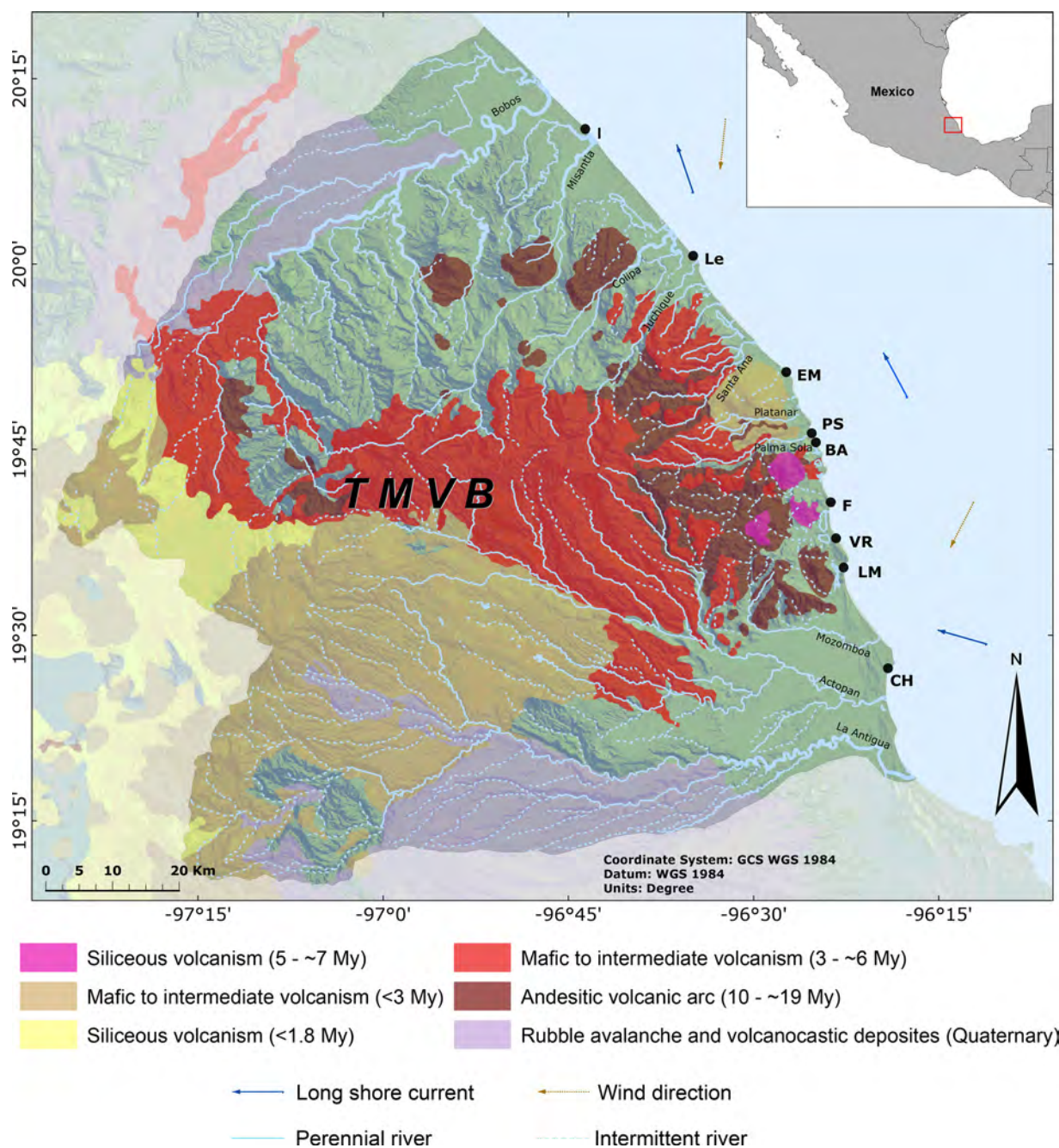


Fig. 2. Geomorphological map showing inferred intermittent and perennial rivers, dominant littoral currents, and wind direction in dark and dotted arrows. Beach sampling locations are shown in Table 1 for beach names, coordinates, and wind speeds. (modified from the Servicio Geológico Mexicano, 2017).

soft-brittle samples to obtain fine powders (particle size < 75 μm) to further analyze major and trace elements.

X-ray fluorescence analyses were performed with the powdered samples. After drying the samples at 110 $^{\circ}\text{C}$ for 6 h, they were heated in a muffle furnace at 1000 $^{\circ}\text{C}$ for 2 h to obtain a stable mass by LOI (loss on ignition). Fused beads were prepared from each calcined sample using a lithium tetraborate flux. Final analyses were carried out using a Rigaku model RIX-3000 equipped with Rh tube at the Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Calibration curves were determined using international reference materials, i.e. IGLA-1 andesite close to the composition of the CD and beach sands (Lozano and Bernal, 2005). The resulting chemical analyses for major elements show precisions better than 5%. Major element data were recalculated on an anhydrous (LOI-free) basis and adjusted to 100%. Highly variable values of LOI values are shown in Table 3. Major

and trace elements were normalized against the Upper Continental Crust (UCC) (Taylor and Mc Lennan, 1985) (Tables 3 and 4). Absolute error (%) of major and trace elements for certified values are shown in Table 5.

3.6. Rare earth elements

Approximately 0.2 grams of sand samples were crushed to add HF and HClO_4 . Samples were stored to permit evaporation and total sand dryness, and then we added 100 mL of HCO_3 (2%). The REE analysis was performed in an inductively-coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) model iCAP Qc Thermo Scientific at the Instituto de Geofísica, UNAM. Samples were digested with 2.5 ml HF ml in 0.5 g of crushed samples. They were stored with 4 ml of HClO_4 until desiccation was completed, followed by dilution with 50 ml of HNO_3 (2%). We weighed

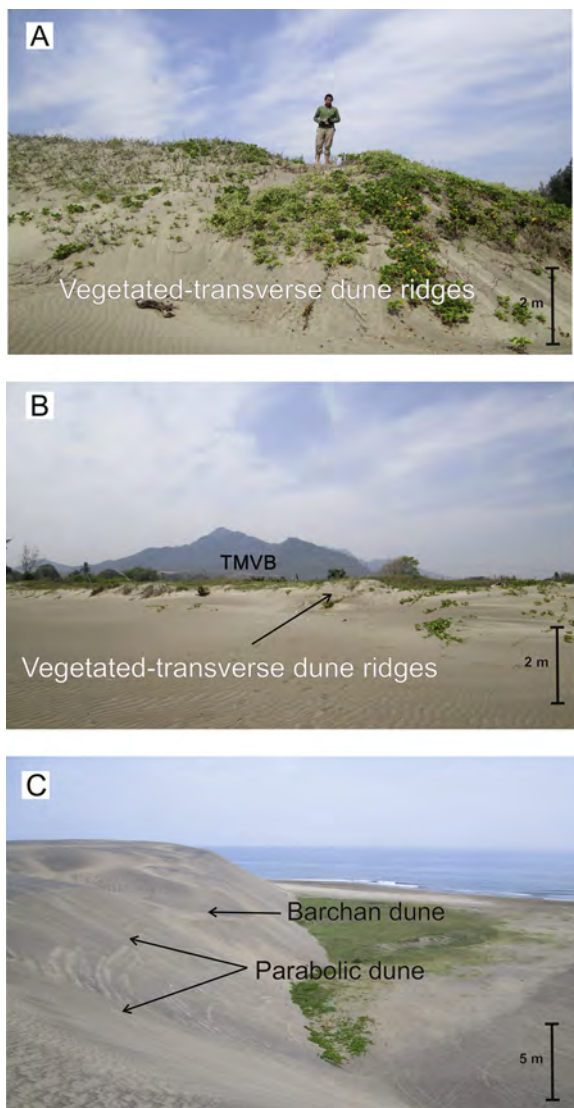


Fig. 3. (A, B). Vegetated transverse dune ridges at the Palma Sola (PS) and Boca Andrea (BA) sites (PS); (C) barchan and parabolic dunes at the Chachalacas site “(CH) height is m.

0.2 g of samples and a mixed them with HF and HClO₄. Samples were dried and we added 100 ml of HNO₃ (2%). The ICP-MS instrument was optimized with a certified High-Purity Standard (SM-1595-143) solution with a broad range of Li, Co, In, Ba, Bi, Ce, and U of 1 µg/L. The calibration curve was plotted for 14 points (0, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 25, 50, 75, and 100 µg/L) starting with a multi-elemental stock of 10 mg/l of an additional High-Purity Standard (ICP-MS-B). Instrumental drift correction was performed using 10 µg/L of an internal standard. Detection limits (DLs) were calculated with the following formula: $DL = 3 (SD \text{ int BCO}) / (\text{conc STD} / (\text{int STD} - \text{aver int BCO}))$; where SD int BCO is the standard deviation of the blank intensity, conc STD is the standard solution concentration, int STD is the standard solution intensity, and aver int BCO is the mean blank intensity. A basalt reference BCU-3 was used as a reference quality material for the ICP-MS analysis.

3.7. Normalization of REE and Ce/Ce*, Eu/Eu* anomalies

Normalization against the UCC of REE data in ppm was performed following the values indicated in Taylor and Mc Lennan (1985) (Fig. 7). Cerium and europium anomalies were calculated with $Ce/Ce^* = 3$ (

$Ce_N / 2(La_N + Nd_N)$ and $Eu/Eu^* = Eu_N / [(Sm_N)(Gd_N)]^{1/2}$; where subscript N is the normalized value for each element inserted into the equations (Table 5).

3.8. Weathering rates of CD and beach sands

To evaluate these chemical weathering rates and plagioclase depletion in CD and beach sands from the WGM coast, four estimations were applied: (1) The Chemical Index of Alteration (CIA), $CIA = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$, which evaluates weathering intensity in rocks and old and modern sands and has proven to be a reliable indicator of chemical weathering in CD and beach sands (Nesbitt and Young, 1982; Kasper-Zubillaga et al., 2007; Carranza-Edwards et al., 2009; Carranza-Edwards et al., 2018); (2) The Plagioclase Index of Alteration (PIA), $PIA = [Al_2O_3 - K_2O / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] \times 100$, where CaO* is part of the silicate fraction determined by the plagioclase depletion of the sands that is associated with climatic conditions in a sedimentary basin (Fedó et al., 1995; Fiantis et al., 2010). The CaO* was calculated using the equation $CaO^* = 0.35 \times 2 \text{ mol (wt\% of } Na_2O / Na_2O \text{ atomic molecular weight} = 62)$ (McLennan, 1993); (3) The Chemical Index of Weathering (CIW), $CIW = 100 \times [(Al_2O_3 / Al_2O_3 + CaO + Na_2O)]$, which measures the degree of feldspars converting into clay minerals (Fiantis et al., 2010); (4) The Weathering Index of Parker (WIP), $WIP = 100 (2Na_2O / 0.35 + (Mg / 0.9) + 2K_2O / 0.25) + (Ca / 0.7)$, which is a suitable index for studying the mobility of alkaline and alkaline earth metals, although it overestimates the degree of weathering in polycyclic quartzose sands due to the quartz dilution effect (Parker, 1970; Price and Velbel, 2003) (Table 6).

3.9. X-ray powder diffraction analysis

The mineralogy of four samples (I (s), PS (l), LM (l), and CH (c)) was determined by an Empyrean diffractometer (XRD). Samples were ground with an agate pestle and mortar to a fine powder in preparation for powder X-ray diffraction analysis. Diffractograms were recorded in step-scan mode of 0.003°, from a start angle of (2θ) 5.0° to an end angle of (2θ) 70.0°, with a time per step of 40 s. Diffraction data were stored after the initial X-ray exposure. Samples showed no significant evidence of degradation within the X-ray beam (Table 7).

4. Results

4.1. Grain size and sorting

Textural parameters showed that the CD and beach sands are medium-to-fine moderately-well-sorted sands with average values of $Mz = 2.20 \phi \pm 0.27$, sorting $\sigma = 0.50 \pm 0.10$, and $Mz = 2.10 \phi \pm 0.25$, sorting $\sigma = 0.56 \pm 0.11$ respectively. The average sand sizes are medium in Villa Rica with $1.89 \phi \pm 0.16$, while average sand sizes in El Morro and Palma Sola are 2.45 ± 0.24 , 0.25. Average sorting values (σ ; ϕ) are 0.43 ± 0.07 in El Morro and Palma Sola but 0.62 ± 0.05 in Chachalacas. Northern sands from Istirinchia to Boca Andrea are fine sizes between $2.26 \phi \pm 0.11$ to $2.34 \phi \pm 0.19$. In contrast, a slight sand size coarsening was observed in Villa Rica, i.e. 1.89 ± 0.55 , and in Chachalacas 2.20 ± 0.13 . Well-sorted, moderately-well-sorted to moderately-sorted CD and beach sands defined the overall granulometric characteristics.

4.2. Modal analysis

The CD sand samples extend their fields towards the Q and L poles while the beach sand group is in the middle sector of the diagram, e.g. beach sands I (f), Le (f), Le (f1), PS (i), PS (f1), BA (f), VR (i), and F (f) with the exceptions of beach sands EM (i) and LM (f). Angular to sub-rounded single-crystal altered quartz with some overgrowths was

Table 1
Sampling sites, grain size and sorting of CD and beach sands (n = 49).

Sample	Environment	Longitude	Latitude	Average <i>in situ</i> wind speed (ms ⁻¹)	Mz (φ)	Sorting (φ)	Mz (φ)	Sorting (φ)
I (f)	Beach	96° 43' 38.8320" W	20° 10' 56.6580" N	2.87 ± 2.46	2.36	0.55	Fine sand	Moderately well sorted
I (s)	Dune				2.16	0.57	Fine sand	Moderately well sorted
I (c)	Dune				2.39	0.51	Fine sand	Moderately well sorted
I (c1)	Dune				2.25	0.54	Fine sand	Moderately well sorted
I (l)	Dune				2.15	0.58	Fine sand	Moderately well sorted
Le (f)	Beach	96° 42' 37.7972" W	20° 09' 50.6080" N	8.61 ± 1.03	1.68	0.45	Medium sand	Well sorted
Le (f1)	Beach				2.31	0.62	Fine sand	Moderately well sorted
Le (s)	Dune				2.24	0.53	Fine sand	Moderately well sorted
Le (s1)	Dune				2.13	0.59	Fine sand	Moderately well sorted
Le (c)	Dune				2.29	0.49	Fine sand	Well sorted
Le (c1)	Dune				2.39	0.46	Fine sand	Well sorted
Le (l1)	Dune				2.37	0.45	Fine sand	Well sorted
EM (i)	Beach	96° 27' 23.0100" W	19° 51' 20.5040" N	1.57 ± 0.25	2.00	0.51	Medium sand	Moderately well sorted
EM (s)	Dune				2.50	0.43	Fine sand	Well sorted
EM (s3)	Dune				2.25	0.50	Fine sand	Moderately well sorted
EM (c)	Dune				2.53	0.47	Fine sand	Well sorted
EM (c3)	Dune				2.72	0.32	Fine sand	Very well sorted
EM (l)	Dune				2.46	0.45	Fine sand	Well sorted
EM(l3)	Dune				2.73	0.34	Fine sand	Very well sorted
PS (i)	Beach	96° 25' 16.9500" W	19° 46' 18.6830" N	6.64 ± 0.94	2.23	0.50	Fine sand	Well sorted
PS (f1)	Beach				2.28	0.47	Fine sand	Well Sorted
PS (s)	Dune				1.89	0.51	Medium sand	Moderately well sorted
PS(s1)	Dune				2.50	0.33	Fine sand	Very well sorted
PS (c)	Dune				2.00	0.56	Fine sand	Moderately well sorted
PS(c1)	Dune				2.40	0.29	Fine sand	Very well sorted
PS (l)	Dune				2.45	0.43	Fine sand	Well sorted
BA (f)	Beach	96° 25' 16.9500" W	19° 46' 18.6830" N	5.17 ± 1.18	2.08	0.54	Fine sand	Moderately well sorted
BA (s)	Dune				2.55	0.33	Fine sand	Very well sorted
BA (c)	Dune				2.38	0.45	Fine sand	Well sorted
VR (i)	Beach	96° 23' 44.8500" W	19° 40' 44.0220" N	2.40 ± 1.00	2.23	0.55	Fine sand	Moderately well sorted
VR(s1)	Dune				1.88	0.53	Medium sand	Moderately well sorted
VR (s2)	Dune				1.78	0.54	Medium sand	Moderately well sorted
VR (c)	Dune				1.80	0.65	Medium sand	Moderately well sorted
VR(c2)	Dune				1.92	0.53	Medium sand	Moderately well sorted
VR (l)	Dune				1.92	0.54	Medium sand	Moderately well sorted
VR (l2)	Dune				1.74	0.50	Medium sand	Well sorted
F (f)	Beach	96° 23' 19.5000" W	19° 37' 49.7410" N	2.08 ± 0.84	2.17	0.53	Fine sand	Moderately well sorted
F (s)	Dune				2.17	0.53	Fine sand	Moderately well sorted
F (c)	Dune				1.74	0.47	Medium sand	Well sorted
F (c1)	Dune				2.24	0.51	Fine sand	Moderately well sorted
LM (f)	Beach	96° 22' 42.5300" W	19° 35' 27.1500" N	2.13 ± 0.47	1.65	0.84	Medium sand	Moderately sorted
LM (c)	Dune				2.20	0.57	Fine sand	Moderately well sorted
LM (l)	Dune				2.50	0.43	Fine sand	Well sorted
CH (s)	Dune	96° 19' 06.6600" W	19° 27' 20.8030" N	3.13 ± 1.02	2.06	0.55	Fine sand	Moderately well sorted
CH (s4)	Dune				1.94	0.62	Medium sand	Moderately well sorted
CH (s5)	Dune				2.19	0.58	Fine sand	Moderately well sorted
CH (c)	Dune				2.09	0.61	Fine sand	Moderately well sorted
CH (c2)	Dune				1.82	0.69	Medium sand	Moderately sorted
CH (l)	Dune				2.01	0.68	Fine sand	Moderately well sorted

See text for names of each location shown by capital letters. Longitude and latitude is shown for the first site sampled. Subenvironment sites are beach: i = inshore, f = foreshore, dune: s = stoss, c = crest, l = lee face. Numbers after subenvironment sites represent progressive sampling along the coast. Wind speed in ms⁻¹ are average *in situ* measurements; see subsection Wind speed measurements for further explanation.

preserved over polycrystalline quartz (Figs. 4A, Figure 5A– F). A grouping of CD and beach sand samples is presented in Fig. 4A. Some northern samples tend towards the Q pole, such as samples from Istirinchía, Lechugillas, El Morro, and Boca Andrea.

Plagioclase was scarce and only preserved as a single crystal within volcanic lithics with lathwork texture (Fig. 5C). The volcanic lithic compositions are Lvl₇₈Lvm₁₀Lvv₁₂ and Lvl₈₅Lvm₇Lvv₈ for the CD and beach sands respectively. The Lvl-Lvm-Lvv shows that the CD sand samples are irregularly distributed towards the Lvl and Lvm poles whereas the beach sands are concentrated towards the Lvl pole with the exception of sample Le (f). Volcanic lithics with lathwork textures were dominant in the whole bulk composition of the CD and beach sands i.e. Lvl < Lvm < Lvv (Figs. 4 B, Figure 5B, C). Volcanic lithics dominate the CD and beach sand composition compared to Ls as we report the average Lvl + Lvm + Lvv = 84 ± 36 and Ls = 61 ± 29 (Table 2). The Lvl-Lvm-Lvv showed little grouping of CD and beach sand samples with some dispersed samples from the northern sites such as Istirinchía,

Lechugillas, and Chachalacas, close to the Lvl fractions pole. Our interpretation suggests that the high concentration of the samples towards the Lvl poles corresponds to high energy environments with dynamic longshore currents.

The heavy mineral associations are ol₂px₅₈op₄₀ for the CD, and ol₂px₆₁op₃₇ for the beach sands. The ol-px-op ternary diagram shows a trend for the northern CD and beach sand samples towards the op-pole while subordinate olivine was scarce as a single crystal in the whole bulk CD and beach sands (Figs. 4C, Figure 5B, D). Sub-rounded ilmenite was abundant in the northern locations (I, Le, and EM) (Figs. 4C, Figure 5A). The HM associations group opaque minerals in the Istirinchía, Lechugillas and El Morro sites, while the rest of the minerals, i.e. px and ol, tend towards the rest of the localities (Fig. 4C). Biogenic fractions were abundant in the whole bulk composition and some foraminifera were present in the beach sands, i.e. sample PSm2 (Fig. 5B).

Table 2
Modal analysis of CD and beach sands from the WGM (= 49).

Sample	Qm	Qp	Fk	P	Lt	HM	B	Total	Lvl	Lvm	Lvv	Ls	ol	px	a	op	Total
I (f)	53	1	0	1	35	84	76	250	53	4	8	19	0	69	2	95	250
I (s)	72	0	0	0	20	54	104	250	35	2	18	34	1	80	4	76	250
I (c)	89	4	0	2	35	77	43	250	39	5	18	29	1	67	1	90	250
I (c1)	83	0	0	0	28	37	102	250	63	1	9	23	6	35	0	113	250
I (l)	76	6	0	3	30	88	47	250	13	4	9	52	1	70	5	96	250
Le (f)	58	3	0	2	49	24	114	250	44	9	19	65	0	80	7	26	250
Le (f1)	26	0	0	0	15	181	28	250	22	2	1	6	0	68	0	151	250
Le (s)	100	2	1	0	29	57	61	250	25	4	7	38	2	107	4	63	250
Le (s1)	78	0	0	0	39	72	61	250	31	3	3	14	1	54	0	144	250
Le (c)	113	0	1	2	36	46	52	250	36	4	10	37	1	83	8	71	250
Le c(1)	42	0	0	0	37	88	83	250	48	2	1	15	0	33	0	151	250
Le (l1)	82	1	0	2	25	79	61	250	27	4	13	40	0	78	3	85	250
EM (i)	58	2	0	2	95	6	87	250	87	7	4	117	2	16	0	17	250
EM (s)	113	0	0	0	35	57	45	250	29	3	9	34	2	75	2	96	250
EM (s3)	77	2	0	0	29	19	123	250	73	0	0	25	0	51	0	101	250
EM (c)	112	0	1	0	21	72	44	250	19	0	6	25	0	96	9	95	250
EM (c3)	110	0	0	2	24	72	42	250	93	1	3	31	1	73	0	48	250
EM (l)	117	0	1	0	30	69	33	250	47	1	12	27	1	60	2	100	250
EM (l3)	122	1	0	1	18	75	33	250	38	2	4	44	3	72	1	86	250
PS (i)	94	2	0	5	56	56	37	250	83	2	13	17	0	94	8	33	250
PS (f1)	96	0	0	1	50	11	92	250	161	19	2	58	0	6	0	4	250
PS (s)	99	2	1	1	69	24	54	250	83	12	11	25	0	86	9	24	250
PS(s1)	103	0	0	0	46	11	90	250	135	0	1	18	0	53	3	40	250
PS (c)	50	1	0	0	90	15	94	250	95	6	13	36	0	56	12	32	250
PS(c1)	101	0	0	0	43	8	98	250	131	6	5	36	0	30	0	42	250
PS (l)	120	2	0	3	57	17	51	250	82	8	46	24	2	57	1	30	250
BA (f)	98	0	0	0	42	43	67	250	92	12	3	36	0	59	1	47	250
BA (s)	123	6	0	2	35	54	30	250	46	8	21	41	1	79	3	51	250
BA (c)	101	3	1	2	54	56	33	250	111	4	8	5	1	71	5	45	250
VR (i)	89	0	0	0	79	10	72	250	141	9	13	26	1	31	4	25	250
VR(s1)	26	5	0	2	29	33	155	250	82	1	10	49	2	56	0	50	250
VR (s2)	46	5	0	6	76	42	75	250	80	9	4	17	2	91	19	28	250
VR (c)	41	0	0	0	52	83	74	250	46	0	3	18	4	130	0	49	250
VR (c2)	56	3	0	2	55	29	105	250	84	15	2	34	1	61	0	53	250
VR (l)	37	3	0	2	74	43	91	250	103	5	5	29	0	82	11	15	250
VR (l2)	85	3	0	2	57	17	86	250	94	9	8	36	3	64	6	30	250
F (f)	74	2	1	3	41	62	67	250	73	1	6	45	6	101	1	17	250
F (s)	70	1	0	1	57	56	65	250	90	7	3	24	0	94	11	21	250
F (c)	77	0	0	2	56	74	41	250	50	5	5	21	2	121	6	40	250
F (c1)	83	0	1	1	42	38	85	250	38	6	4	75	14	87	1	25	250
LM (f)	47	0	0	0	96	36	71	250	99	6	3	27	5	96	7	7	250
LM (c)	68	0	0	0	65	36	81	250	76	13	4	38	0	79	10	30	250
LM (l)	129	1	0	0	24	26	70	250	100	15	4	37	1	75	4	14	250
CH (s)	73	0	0	0	77	19	81	250	45	25	3	70	4	86	0	17	250
CH (s4)	41	17	0	2	89	15	86	250	54	42	9	98	3	39	0	5	250
CH (s5)	98	0	0	1	49	28	74	250	48	16	14	128	5	24	0	15	250
CH (c)	88	0	0	0	61	24	77	250	38	42	7	130	3	24	0	6	250
CH(c2)	101	0	0	0	71	7	71	250	87	2	9	100	0	34	10	8	250
CH (l)	38	11	0	0	79	56	66	250	80	25	8	51	2	51	0	33	250
Average	80.27	1.82	0.16	1.12	49	46.65	70.98	250	68.35	7.92	8.18	41.31	1.71	67.02	3.67	51.84	250
Standard deviation	27.71	3.11	0.37	1.36	21.66	31.69	26.45	0	34.31	9.29	7.5	29.28	2.44	26.63	4.34	39.47	0

Qm = monocrystalline quartz; Qp = polycrystalline quartz; Fk = K-feldspar; P = Ca-Na plagioclase; Lt = total lithics (volcanic and sedimentary, absence of metamorphic lithics is observed); HM = heavy minerals (opaque and translucent); B = biogenic fractions (rest of mollusks, foraminifera); Lvl = lathwork volcanic fragments; Lvm = microlithic volcanic fragments; Lvv = vitric volcanic fragments; Ls = sedimentary lithics (sandstones, siltstone, chert); ol = olivine (fayalite); px = clinopyroxene; a = amphibole; op = opaque (ilmenite). Point counts are 250 grains per sample in two categories (Gazzi-Dickinson Method, see text for details). See Table 1 for abbreviations and sampling codes.

4.3. Major and trace elements of CD and beach sands

The major element data showed that CD and beach sands are superimposed with high content near/above the UCC line of SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, and MgO. Depletion of CaO and an increase below the UCC line for Na₂O and K₂O was observed. Trace elements increased their concentrations above the UCC for V, Cr, Co, and Ni in both CD and beach sands (Fig. 6A, B). Homogeneous major element trends were observed in all localities. Trace elements show a conspicuous trend towards V, Cr, Co values above the UCC line, especially at the Istirichí and Villa Rica sites.

4.4. Spearman rank correlation (SRC; r_s) of mineralogy and major element data

A SRC was performed for CD and beach sand samples. Significant positive and negative correlations for an r_s with $\rho < 0.05$ and n-2 = 28 showed r_s values < 0.37. Significant correlations based on direct relationships between modal mineralogy and geochemistry of major and trace elements were as follows: Qm vs. SiO₂, r_s = 0.60; HM vs. TiO₂, r_s = 0.61; HM vs. Fe₂O₃, r_s = 0.57; B vs. CaO r_s = 0.42; op vs. HM, r_s = 0.66; py vs. Mg, r_s = 0.47; HM vs. V, r_s = 0.62; HM vs. Cr, r_s = 0.47; HM vs. Co, r_s = 0.42. A significant correlation of r_s = 0.92 was found between LOI and CaO.

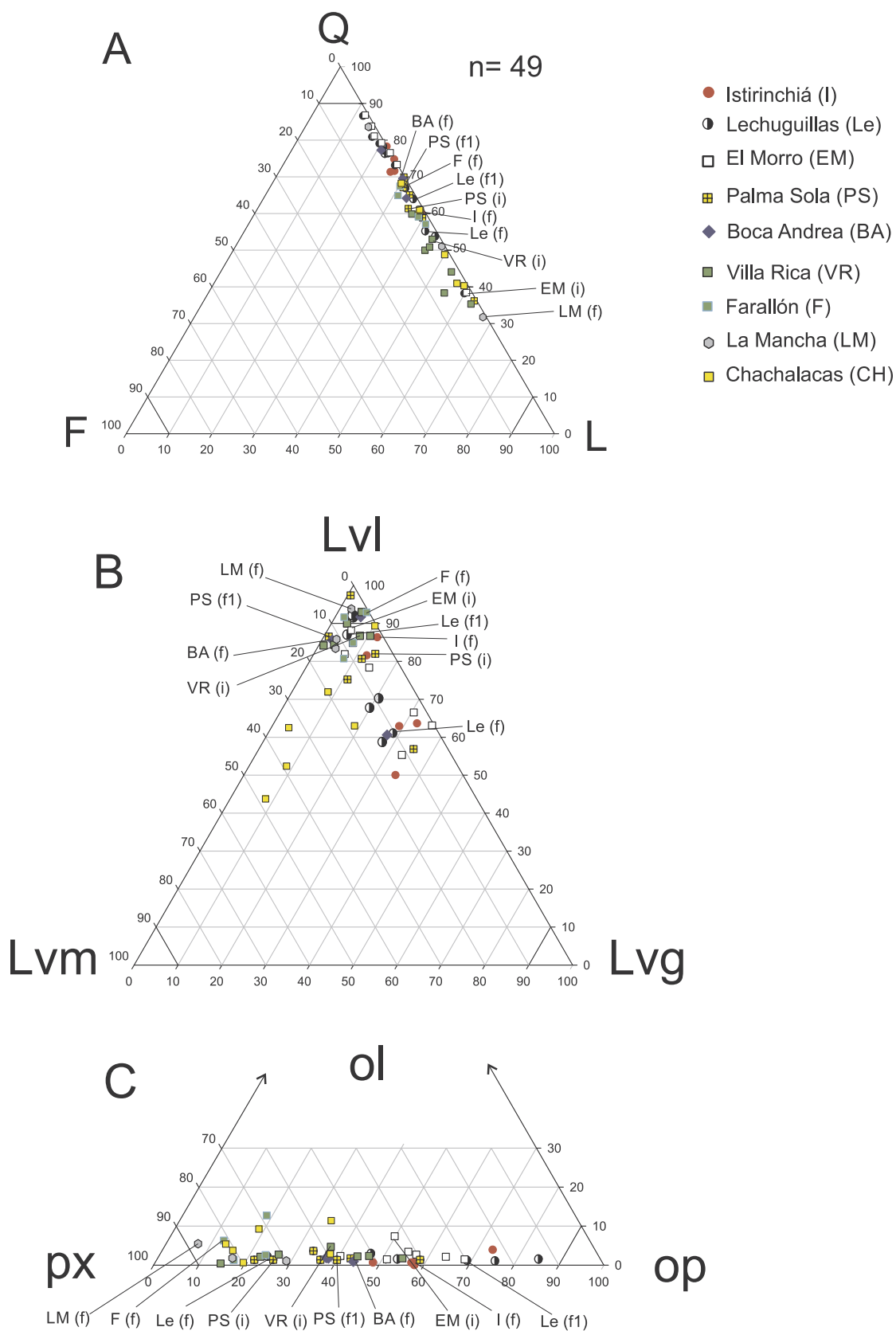


Fig. 4. Ternary plots showing (A) Q-F-L; (B) Lvl-Lvm-Lvg; and (C) ol-py-op modal analyses. See text for explanation of the samples shown in the diagrams.

Table 3
Major element concentration in weight % for the CD and beach sands (n = 30).

Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total (%)
I (s)	38.95	1.28	5.27	7.77	0.15	3.11	24.51	0.9	0.64	0.14	17.07	99.77
I (c)	46.41	2.33	5.64	12.63	0.18	3.46	16.86	1	0.73	0.14	10.52	99.89
I (l)	40	1.96	5.3	11.35	0.19	3.84	21.51	0.85	0.61	0.16	14.08	99.84
Le (f)	43.74	0.76	7.04	5.37	0.12	3.79	22.12	1.38	0.91	0.17	14.48	99.88
Le (s)	55.2	1.15	7.05	6.85	0.12	3.09	14.62	1.43	1.02	0.14	9.2	99.88
Le (c)	57.74	1.15	7.41	6.41	0.11	3.04	13.33	1.51	1.05	0.14	7.99	99.88
Le (l)	57.12	1.25	7.12	6.79	0.12	3.23	13.6	1.44	1.01	0.14	8.06	99.88
EM (i)	50.37	0.43	7.04	2.87	0.07	1.58	19.94	1.53	1.09	0.12	14.85	99.88
EM (s)	55.88	1.01	6.28	5.38	0.1	2.79	15.76	1.21	0.97	0.12	10.38	99.77
EM (c)	56.76	1.09	6.2	6.14	0.1	2.7	14.77	1.24	1.02	0.12	9.65	99.88
EM (l)	58.51	0.71	6.69	4.33	0.08	2.3	14.73	1.4	1.1	0.12	9.91	99.8
PS (i)	50.61	0.53	6.27	3.44	0.08	1.93	19.94	1.33	0.99	0.11	14.64	99.87
PS (s)	41.53	0.5	6.75	3.71	0.09	2.23	24.42	1.36	1.02	0.14	18.03	99.78
PS (c)	46.45	0.51	6.94	3.54	0.08	2.12	21.71	1.4	1.06	0.13	15.94	99.88
PS (l)	62.71	0.41	7.51	2.6	0.06	1.54	12.82	1.6	1.31	0.1	9.23	99.87
BA (s)	73.44	0.44	6.72	2.69	0.05	1.88	7.5	1.49	1.28	0.08	4.31	99.88
BA (c)	74.69	0.51	7.4	2.2	0.04	1.4	6.57	1.66	1.32	0.09	4.02	99.88
VR (i)	58.83	0.46	7.45	2.42	0.06	1.31	14.95	1.62	1.35	0.11	11.34	99.88
VR (s)	52.35	0.65	7.55	4.67	0.09	3.52	17.55	1.52	1.05	0.14	10.98	99.78
VR (c)	40.09	1.22	6.09	8.51	0.14	5.78	23.16	1.02	0.67	0.14	13.07	99.88
VR (l)	54.15	0.67	7.55	4.25	0.09	3.13	16.73	1.54	1.08	0.14	10.56	99.87
F (f)	47.19	0.71	5.96	4.32	0.09	2.84	21.61	1.11	0.87	0.12	15.06	99.87
F (s)	40.67	0.63	5.91	5.12	0.11	4.93	25.1	1.03	0.69	0.12	15.59	99.88
F (c)	47.09	0.68	6.09	4.93	0.11	4.14	21.34	1.14	0.84	0.13	13.4	99.88
LM (f)	50.48	0.83	8.15	5.51	0.1	5.18	17.68	1.58	1.03	0.18	9.16	99.88
LM (c)	42.58	0.82	5.44	4.65	0.1	3.01	24.23	0.96	0.75	0.12	17.22	99.88
LM (l)	57.68	0.56	6.18	3.17	0.07	2.04	16.17	1.22	1.09	0.1	11.6	99.88
CH (s)	54.83	0.93	9.53	5.37	0.09	3.4	13.89	1.92	1.34	0.2	8.39	99.88
CH (c)	53.9	0.88	9.4	5.1	0.09	3.02	14.67	1.87	1.31	0.18	9.46	99.87
CH (l)	55.99	0.64	9.67	4.16	0.08	2.35	13.98	1.97	1.44	0.17	9.44	99.88
Average	52.20	0.86	6.92	5.21	0.10	2.96	17.53	1.37	1.02	0.13	11.59	99.86
Standard deviation	8.94	0.44	1.15	2.42	0.03	1.10	4.82	0.29	0.23	0.03	3.59	0.04

See Table 1 for abbreviations; LOI = Loss on Ignition.

Table 4
Trace elements in ppm for the CD and beach sands (n = 30).

Sample	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
I (s)	20	436	200	25	118	12	104	106	29	26	6	71	7	10
I (c)	21	328	105	24	359	27	217	137	54	26	4	101	7	12
I (l)	18	379	106	26	269	19	176	149	42	29	4	94	7	11
Le (f)	25	481	299	25	88	8	78	107	22	40	10	54	6	9
Le (s)	28	372	343	21	169	11	117	125	24	30	8	59	6	9
Le (c)	26	494	318	25	109	11	73	185	24	33	8	48	7	9
Le (l)	28	356	341	20	168	12	125	129	23	32	9	63	5	8
EM (i)	32	495	365	22	76	10	42	41	21	20	8	39	5	8
EM (s)	29	369	374	20	135	12	97	167	31	28	7	51	5	6
EM (c)	30	361	370	20	176	13	116	175	25	29	7	54	4	10
EM (l)	31	380	386	20	104	10	75	116	20	25	7	43	5	7
PS (i)	29	446	376	21	90	9	51	179	18	23	6	38	4	8
PS (s)	29	527	336	24	75	7	49	84	20	26	9	44	5	9
PS (c)	30	490	348	24	78	9	49	66	19	25	8	42	5	8
PS (l)	37	375	436	19	84	13	42	43	22	18	6	33	5	9
BA (s)	36	283	442	15	80	8	53	64	13	22	6	27	5	9
BA (c)	38	298	510	14	87	13	47	60	21	18	6	27	4	7
VR (i)	40	419	417	20	81	11	40	26	20	19	7	36	6	8
VR (s)	28	435	427	20	87	12	74	223	27	38	9	46	5	8
VR (c)	19	418	350	18	133	11	138	635	34	58	11	62	6	9
VR (l)	31	427	396	20	89	8	71	168	21	34	10	43	6	7
F (f)	26	438	337	22	85	9	64	152	20	30	6	42	5	9
F (s)	20	457	340	21	62	7	71	343	24	48	8	41	3	8
F (c)	25	423	334	22	73	9	74	216	24	40	8	45	4	9
LM (f)	26	442	439	18	93	11	93	362	26	52	13	47	6	9
LM (c)	27	341	354	20	144	10	106	115	20	29	7	54	5	7
LM (l)	33	380	355	20	88	9	53	72	19	24	7	35	5	9
CH (s)	36	467	471	21	126	14	95	174	24	41	13	50	6	8
CH (c)	36	473	441	22	120	12	86	144	20	37	12	50	6	8
CH (l)	39	476	446	22	114	10	71	87	18	32	12	45	8	9
Average	29.10	415.53	358.73	21.03	118.67	11.23	84.90	155.00	24.17	31.07	8.07	49.47	5.43	8.57
Standard deviation	6.05	61.55	91.26	2.76	62.23	3.84	40.57	119.39	7.85	9.80	2.38	16.47	1.10	1.22

Table 5

Recovery (%) for Mv average measured samples (this study) compared to certified standards (Cv).

Major elements	Recovery %	Trace elements	Recovery %
SiO ₂	100.39	Rb	98.50
TiO ₂	100.13	Sr	99.22
Al ₂ O ₃	99.38	Ba	100.14
Fe ₂ O _{3t}	100.31	Y	97.58
MnO	102.09	Zr	98.45
MgO	103.24	Nb	95.52
CaO	100.24	V	92.41
Na ₂ O	103.77	Cr	103.13
K ₂ O	100.33	Co	110.89
P ₂ O ₅	99.89	Ni	92.48
		Cu	102.45
		Zn	92.66
		Th	111.78
		Pb	101.66

Cv = IGLA-1 certified standards; R% recovery = Mv average measures samples [(Mv-Cv)*100].

4.5. REE for CD and beach sand samples

The REE analyses for the three sites are given in Table 5 and the UCC normalized patterns are presented in Fig. 6C. The REE/UCC horizontal patterns are similar to those observed in beach sands near volcanic rock input, i.e. Tacaná volcano in southeastern Mexico (Carranza-Edwards et al., 2018). There is a depletion of light REE concentration compared to heavy REEs. Negative and positive Ce ~ 0.61–0.67 and Eu ~ 1.14–1.40 anomalies were determined for the CD and beach sands (Fig. 6c). Most of the samples showed similar trends regardless of the sampling settings.

4.6. Weathering rates of the CD and beach sands: the CIA, PIA, CIW, and WIP indices

Results obtained from the CIA, PIA, CIW, and WIP indices are shown in Table 6. The CIA indicates the extent of conversion of feldspar to clays such as kaolinite expressed in molar concentrations. The CIA shows the leaching of alkalis in poles $CN = Ca^{+2}$; Na^+ ; $K = K^+$ and $A = Al^+$ and concentration of Al and Si in the residue (Goldberg and

Table 6

REE elements in ppm for the CD and beach sands (n = 21).

Sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Tb	Gd	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ce/Ce*	Eu/Eu*
I (s)	19.26	35.97	4.92	20.57	4.13	1.02	0.53	3.82	3.30	0.64	1.78	0.24	1.58	0.23	0.63	1.21
I (c)	22.74	43.30	5.75	23.36	4.61	1.07	0.59	4.00	3.44	0.67	1.87	0.25	1.69	0.25	0.65	1.17
I (l)	26.30	53.14	6.99	28.28	5.44	1.23	0.65	4.69	3.91	0.74	2.06	0.28	1.86	0.28	0.67	1.14
Le (f)	15.32	29.65	4.18	18.08	3.92	1.03	0.60	3.69	3.08	0.59	1.64	0.22	1.40	0.20	0.63	1.27
Le (s)	14.78	28.79	3.90	15.90	3.37	0.92	0.49	3.07	2.56	0.49	1.38	0.19	1.18	0.17	0.65	1.34
Le (ll)	13.59	25.50	3.59	14.59	3.16	0.84	0.47	2.92	2.42	0.46	1.27	0.18	1.11	0.15	0.62	1.29
EM (i)	13.69	24.39	3.38	13.68	2.86	0.78	0.46	2.65	2.24	0.43	1.21	0.16	1.04	0.15	0.61	1.21
EM (c)	12.93	23.70	3.31	13.28	2.89	0.76	0.45	2.64	2.23	0.43	1.18	0.16	1.02	0.15	0.62	1.30
PS (i)	12.57	22.91	3.18	12.72	2.68	0.74	0.45	2.56	2.16	0.42	1.15	0.16	0.99	0.14	0.62	1.17
PS (l)	12.64	23.31	3.14	12.72	2.61	0.76	0.36	2.36	1.95	0.38	1.04	0.14	0.92	0.13	0.63	1.14
BA (c)	10.62	19.68	2.64	10.57	2.18	0.67	0.31	1.91	1.53	0.30	0.83	0.12	0.74	0.11	0.64	1.27
VR (s)	13.91	26.08	3.60	14.97	3.23	0.90	0.50	3.04	2.53	0.48	1.36	0.18	1.17	0.16	0.63	1.34
F (f)	14.14	26.24	3.56	14.51	3.12	0.84	0.50	3.05	2.46	0.49	1.32	0.18	1.17	0.16	0.63	1.29
F (s)	12.85	23.95	3.35	14.47	3.27	0.90	0.57	3.26	2.71	0.52	1.44	0.19	1.22	0.17	0.62	1.29
F (c)	12.68	24.46	3.35	14.00	3.02	0.80	0.56	2.89	2.39	0.45	1.25	0.17	1.08	0.15	0.64	1.27
LM (f)	13.78	26.28	3.58	15.03	3.21	0.92	0.54	3.06	2.50	0.47	1.32	0.18	1.13	0.16	0.64	1.38
LM (c)	13.23	23.97	3.42	14.17	3.20	0.83	0.53	3.11	2.53	0.50	1.38	0.19	1.16	0.16	0.61	1.23
LM (l)	11.90	21.85	2.97	12.06	2.55	0.71	0.42	2.41	1.99	0.39	1.07	0.15	0.94	0.13	0.63	1.35
CH (s)	15.82	30.16	4.11	16.60	3.50	0.98	0.51	3.18	2.55	0.49	1.35	0.18	1.15	0.16	0.64	1.38
CH (c)	16.43	30.80	4.25	16.86	3.48	1.01	0.51	3.28	2.66	0.51	1.40	0.19	1.22	0.18	0.63	1.40
CH (l)	16.94	31.91	4.25	17.01	3.45	0.99	0.45	3.17	2.52	0.49	1.36	0.19	1.19	0.17	0.64	1.41
Average	15.50	28.38	3.88	15.88	3.33	0.89	0.50	3.08	2.56	0.49	1.36	0.19	1.19	0.17	0.63	1.28
Standard deviation	3.72	7.76	0.99	4.04	0.73	0.14	0.08	0.61	0.53	0.10	0.28	0.04	0.26	0.04	0.01	0.08

Anomalies are $Ce/Ce^* = 3(Ce_N/2(La_N + Nd_N))$ and $Eu/Eu^* = Eu_N/[([Sm_N](Gd_N))]^{1/2}$ subscript N = normalized values (Taylor and Mc Lennan, 1985).

Table 7

Chemical Indices of CD and beach sands for the WGM.

Sample	A	CN	K	PIA	CIW	WIP
I (s)	70.81	19.89	9.30	64.53	67.69	23.79
I (c)	69.85	20.37	9.78	63.44	66.86	26.59
I (l)	72.03	19.00	8.97	66.14	69.05	24.99
Le (f)	68.38	22.06	9.56	61.09	64.60	33.15
Le (s)	67.09	22.40	10.51	59.80	63.82	32.69
Le (c)	67.17	22.53	10.30	59.78	63.71	33.68
Le (ll)	67.28	22.39	10.33	59.96	63.89	33.10
EM (i)	65.56	23.45	10.99	57.81	62.21	30.23
EM (s)	67.38	21.36	11.26	60.73	65.00	29.06
EM (c)	66.35	21.84	11.81	59.52	64.14	29.58
EM (l)	65.69	22.62	11.69	58.43	63.09	30.87
PS (i)	65.80	22.96	11.24	58.31	62.78	28.16
PS (s)	66.88	22.18	10.94	59.76	63.97	29.59
PS (c)	66.79	22.17	11.04	59.68	63.94	30.04
PS (l)	64.96	22.78	12.26	57.67	62.68	32.73
BA (s)	63.65	23.23	13.12	56.16	61.74	32.22
BA (c)	64.01	23.63	12.36	56.27	61.46	33.08
VR (i)	64.35	23.03	12.62	56.95	62.20	32.65
VR (s)	67.48	22.36	10.16	60.15	63.99	35.11
VR (c)	71.70	19.76	8.54	65.30	68.11	32.69
VR (l)	67.09	22.52	10.39	59.72	63.69	34.51
F (f)	68.28	20.93	10.79	61.80	65.76	27.26
F (s)	70.77	20.29	8.94	64.20	67.24	30.62
F (c)	68.62	21.14	10.24	61.92	65.65	30.91
LM (f)	68.69	21.92	9.39	61.44	64.86	40.17
LM (c)	69.47	20.17	10.36	63.30	66.97	25.08
LM (l)	65.98	21.43	12.59	59.45	64.44	28.12
CH (s)	67.40	22.35	10.25	60.09	63.97	41.58
CH (c)	67.65	22.15	10.20	60.43	64.27	39.74
CH (l)	66.82	22.41	10.77	59.57	63.72	40.08
Average	67.47	21.84	10.69	60.45	64.52	31.74
Standard deviation	47.68	26.24	26.08	2.53	1.91	4.49

See text for explanation of acronyms. A = aluminum; CN = calcium, sodium; K = potassium.

Humayun, 2010). The mean CIA value for the CD and beach sands of the WGM is 67.46 ± 2.13 . The CIW measures weathering rates without considering the K₂O concentration as in the CIA. The PIA only monitors plagioclase depletions in the sands. In our study, both weathering measurements are useful as a result of the aim and assumed hypothesis in the expected weathering results of the CD and beach sands. The WIP

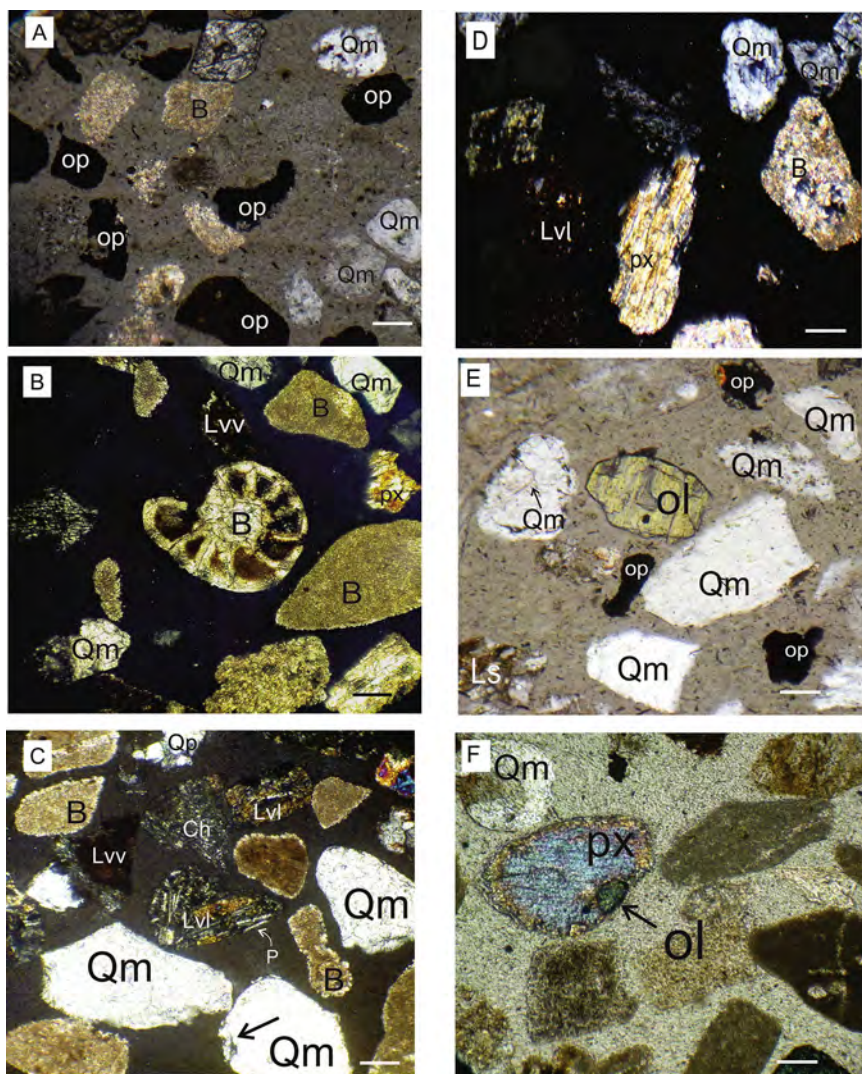


Fig. 5. Photomicrographs of (A) monocrystalline quartz (Qm) and opaque minerals (op), sample Le (1); (B) monocrystalline quartz (Qm), biogenic fractions (B), pyroxene (px), and volcanic lithics with vitric texture (Lvv), sample Le m (2); (C) angular-to-subrounded monocrystalline quartz (Qm) with slight overgrowth (arrow), volcanic lithic with lathwork texture (Lvl) with embedded plagioclase (P), volcanic lithic with vitric textures (Lvv) and chert (Ch), sample PS c (1); (D) monocrystalline quartz (Qm), volcanic lithic with lathwork texture (Lvl), pyroxene (px), sample PS c1 (1); (E) angular to subrounded monocrystalline quartz with cracks (arrow) (Qm), sedimentary lithic (Ls), free-olivine (ol), opaque minerals (op), and clinopyroxene (px) with embedded olivine crystal (ol) sample BA c 1 (1); (F) monocrystalline quartz (Qm) and clinopyroxene (px) with embedded olivine crystal (ol) sample VR (s2). Bar scale 500 μm .

index applies to acid, intermediate, and basic rocks. In our study we included the WIP as a measurement of the relative mobility of sodium, potassium, magnesium, and calcium to observe the weathering effect by warm conditions and coastal dynamics. The mean PIA, CIW, and WIP values for the CD and beach sands are 60.44 ± 2.53 , 64.51 ± 1.91 , and 31.74 ± 4.50 , respectively (Figs. 7A–C). In the following section, we discuss some weathering indices in CD sands in arid areas in NW Mexico. In Fig. 7A, we show the weathering values for most of the sand samples grouped near the 70 mark in the A-CN-K. The CIW vs. PIA plot shows a close and inconspicuous variation in the geographical distribution of sands studied in the WGM, where a differentiated subgrouping of sand samples cannot be established (Fig. 7B). The WIP vs. CIA plot shows a poor significance regarding the geographical distribution of the CD and beach sands when visualizing low WIP values compared to the intermediate CIA values (Fig. 7C).

4.7. X-ray diffractograms

The most abundant minerals detected with the diffractograms were quartz followed by calcite, clinocllore, ilmenite, andesine, albite, augite, and fayalite. X-ray powder diffraction analysis showed that the southernmost CD and beach sands concentrate albite but they were depleted in ilmenite i.e. samples LM and CH (Figs. 8A–D). Peak maxima for quartz calcite, andesine, and ilmenite were identified for the Istinchiá site (I s). Main peaks for the Palma Sola site (PS 1) were observed

for quartz, augite, ilmenite, and calcite. The southern sites show XRD peaks of quartz, calcite, and andesine i.e. the La Mancha site (LM 1) whereas the peak maxima for the Chachalacas location (CH c) were identified for quartz, calcite, chlorite, and albite. The modal analysis and the XRD results are in concordance with the mineralogical framework of the CD and beach sands.

5. Discussion

5.1. Grain size and sorting

Medium-to-fine moderately-well-sorted sands were observed in this study. Similar granulometry patterns from coastal dune sands distributed globally have been previously reported (Ahlbrandt, 1979; Kasper-Zubillaga et al., 2007). The fine-grained and well-sorted sands are controlled by the presence of heavy minerals and fine-grained volcanic lithics concentrated in fine fractions ($< 2.0 \phi$), while the medium-to-fine, moderately-sorted sands are most likely controlled by the large-size quartz, volcanic lithics, and biogenic fractions deposited in the foreshore of the beach and the stoss face, the crest, and the lee face of the CD sands. Variations in sand size values have been documented elsewhere (Abuodha, 2003; Kasper-Zubillaga and Zolezzi-Ruiz, 2007; Carranza-Edwards et al., 2018). No significant changes in grain size nor in sorting parameters were observed throughout the CD and beach sand sampling from the northern locality of Istinchiá to the

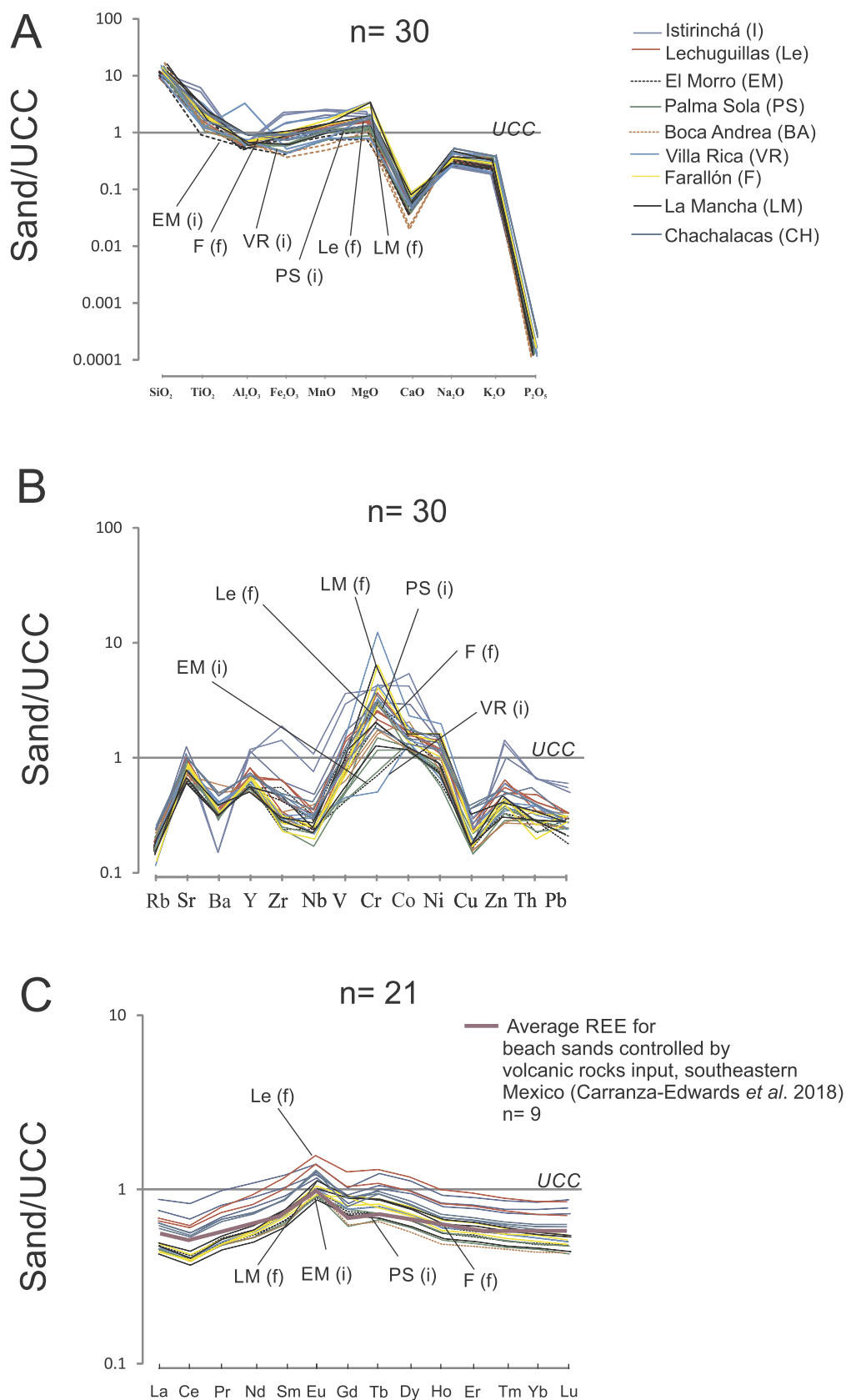


Fig. 6. UCC-normalized (A) major; (B) trace; and (C) rare earth element data (Taylor and Mc Lennan, 1985).

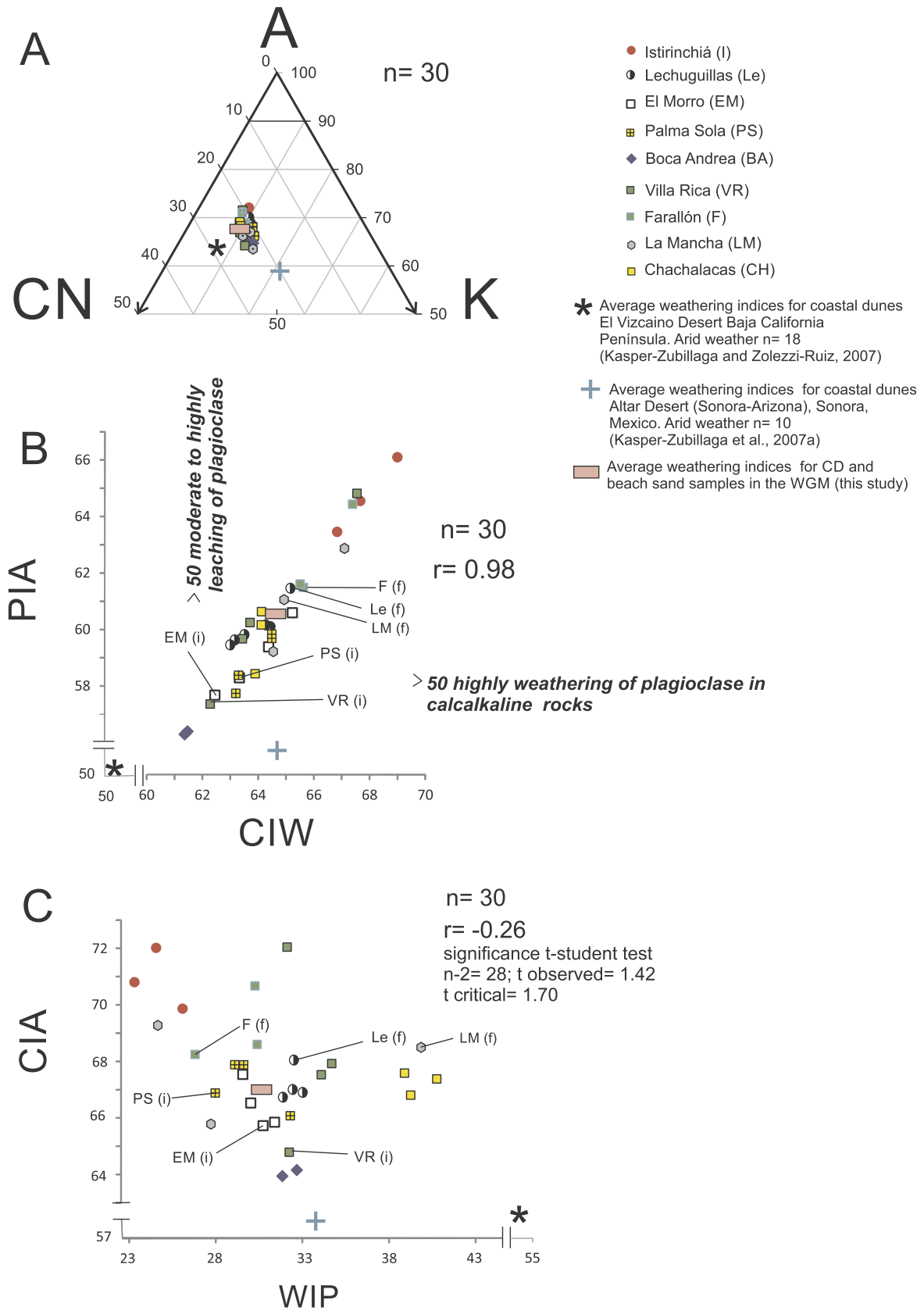


Fig. 7. (A) A-CN-K ternary diagram where A = aluminum, CN = calcium, sodium, and K = potassium; (B) CIW vs. PIA plot; (C) WIP vs. CIA. Scale break is shown in Figs. 7B and 7C.

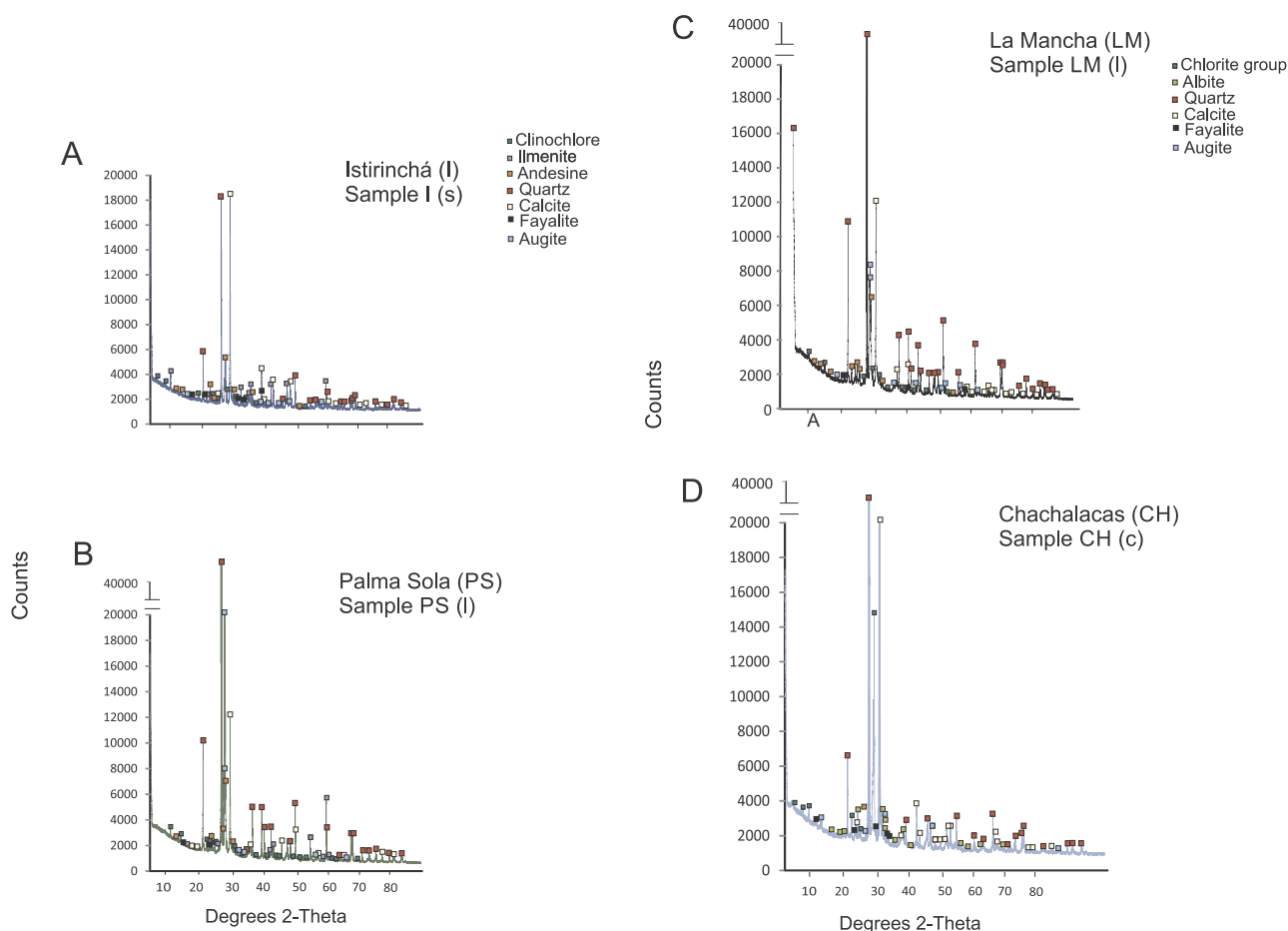


Fig. 8. X-ray diffractograms of samples (A) I (s); (B) PS (l); (C) LM (l); (D) CH (c).

Chachalacas site (Table 1). Wind selectiveness may participate in the control of homogenous granulometry considering the whole bulk composition of the sands.

5.2. Modal analysis in the CD and beach sands of the WGM

The CD and beach sands are quartzolithic i.e. $Q_{63}F_{1}L_{36}$ and $Q_{56}F_{1}L_{43}$ respectively (Dickinson and Gehrels, 2000). Some studies performed in beach sands in humid and temperate climates have evaluated the role of volcanic rocks as part of the weathering conditions of modern sands (Marsaglia, 1993; Critelli et al., 1997; Morrone et al., 2016). Even with the proximity of the TMVB to the beach sites studied, monocrystalline quartz is one of the main mineralogical frameworks of the whole bulk composition of the CD and beach sand samples. Corroded angular to sub-rounded monocrystalline quartz with some overgrowths was concentrated in the CD and beach sands (Figs. 5B, C). This suggests that vigorous coastal dynamics enhance quartz enrichment input when recycling of monocrystalline quartz occurs. The presence of alluvial deposits in the WGM coastal plain contributes to the quartz enrichment of recycled sands in geographical settings with sub-humid warm weather such as that of the WGM region (Muhs, 2004; Garzanti et al., 2013a, 2013b). Concentration of monocrystalline quartz in the CD and beach sands is also produced by the disaggregated polycrystalline quartz fractions in coarse-grained sizes (e.g. $< 2.0 \phi$) which increase the content of corroded single quartz grains in fine-grained CD and beach sands, as documented elsewhere in high-energy sedimentary environments (Harrel and Blatt, 1978). Concentration of monocrystalline quartz in the CD and beach sands suggests longshore transport i.e. angular and sub-rounded quartz and vigorous high wave energy in the beach areas. These are concentrated in the northern sites where

longshore currents with a northwesterly direction transport and deposit Q_m to the Istirinchá, Lechiguillas, and El Morro CD and beach sites (Fig. 4A).

The CD and beach sands in the WGM are depleted in single-crystal Ca-Na plagioclase which is only observed as isolated elongated grains within dominant volcanic lithics with lathwork texture in the whole bulk composition of the CD and beach sands (Fig. 5C). Plagioclase is derived from the denudation of mafic basaltic lavas with calc-alkaline and Na-alkaline lavas emplaced as part of the eastern TMVB (Negendank et al., 1985). Depletion in plagioclase is due to a) high rainfall rates in the area with sub-humid warm weather, and b) mechanical abrasion of plagioclase produced by longshore transport/waves and wind deflation, according to several studies performed in ancient and modern sedimentary environments (Dutta et al., 1993; Nesbitt et al., 1997; Muhs et al., 2003; Carranza-Edwards et al., 2018).

High L concentrations in the CD and beach sands were characterized by the following abundances: $L_{v1} < L_{vm} < L_{vv} < L_s$. This compositional proportion of volcanic lithics or $L_{v1} + L_{vm} + L_{vv}$ is produced by the denudation of calc-alkaline basalts, andesites, Na-alkaline lavas and most probably rhyolite tuffs. The concentration of volcanic lithics in the CD and beach sands is associated with high-energy coastal dynamics exerted by vigorous wave energy and wind deflation of light minerals i.e. quartz as it is observed in CD and beach sands from Mexico (Carranza-Edwards et al., 2018). The L_{v1} are preserved due to the longshore currents and probably to wind transport, which produces a high concentration of volcanic lithic i.e. L_{v1} southwards as it is supported by the trends shown in Fig. 4A i.e. samples from Villa Rica (VR), Farallon (F), La Mancha (LM), and Chachalacas (CH). A lower concentration of L_s composed of sandstone and chert fractions derived from the alluvial deposits concentrates in the CD and beach sands. Most of

the calc-alkaline type basalts concentrate towards the Lvl pole due to the dominant mafic basalt fragments in the CD and beach sand samples (Fig. 4B). Our interpretation relies only on the high concentration of the samples towards the Lvl poles which agrees with the high energy environment and dynamic longshore currents.

5.3. Heavy minerals in the CD and beach sands of the WGM

Most of the concentration of opaque minerals is derived from calc-alkaline basalts and it is located in the northern area of the WGM. Opaque minerals in the CD and beach sands are also concentrated near the Sierra Madre Oriental in northeastern Mexico. In our study, ilmenite is identified as the major component of opaque minerals (Fig. 8 a) < 50% TiO₂ mark and also corresponds to the composition of basalts from India (Nawesgara-Rao et al., 2012). Ilmenite lag deposits are probably a mixture of coastal marine and wind processes with vigorous wave energy and longshore surficial current velocities of 8.0 cm s⁻¹, close to the northern CD and beach sites (i.e. the I, Le, and EM sites). In contrast, removal of light fractions such as quartz and biogenic detritus from the CD and beach sands reduces the ilmenite lag deposits at the southern sites (i.e. Palma Sola to Chachalacas) (Fig. 4C) (Fernández-Eguiarte et al., 1992; Abuodha, 2003). This last statement is evidenced by (a) the *in situ* wind speed measurements together with the seasonally average winds observed in charts (Pérez-Villegas, 1990) compiled for all beach localities, and (b) wind deflation seems to be stronger at the northern beach sites (Table 1). Clinopyroxene (augite) is present as phenocrysts concentrated homogeneously in the whole bulk composition of the CD and beach sands. Olivine (fayalite) coexists as part of the clinopyroxenitic phenocrysts, suggesting a possible influence of Na-alkaline lava and/or rhyolitic origin (Grebennikov and Maksimov, 2006) (Fig. 5d). Depletion of single crystals of fayalite was observed due to vigorous coastal dynamics and also to the sub-humid warm weather in the region (Meysman and Montserrat, 2017). Grouping of HM data in the ternary diagram (Fig. 4C) supports the major concentration of op minerals in the CD and beach sands due to vigorous long shore currents, waves and wind deflation. Moderately-well-sorted sediment may also be responsible, evidenced by the ilmenite grain lag deposits at the northern beaches (Istirinchia, Lechuguillas, and El Morro sites) along with periods of high erosion of light minerals and deposition of heavy minerals on the beach as a result of vigorous coastal dynamic processes (Gujar et al., 2010; Sengupta and Van Gosen, 2016).

5.4. Major and trace elements in the CD and beach sands of the WGM

High concentrations in the CD and beach sands of SiO₂, TiO₂, Fe₂O₃, MnO, and MgO above the UCC are a result of volcanic rocks of calc-alkaline to alkaline composition in the form of quartz (SiO₂), ilmenite (FeTiO₃), augite (Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al)₂O₆, and fayalite (Fe₂SiO₄). MnO is derived from basaltic rocks (Weber et al., 2008) while a decrease in CaO concentration in terrigenous fractions is associated with depletion of single-crystal of plagioclase in the whole bulk composition of the sands. Significant correlations between Qm vs. SiO₂, HM vs. TiO₂, HM vs. Fe₂O₃, px vs. Mg support a high concentration of particular major elements and their mineral associations, i.e. monocrystalline quartz-silica, opaque-titanium-iron, and pyroxene-magnesium. Allochthonous shells i.e. mollusks and foraminifera are composed of Calcite detected by the X-ray diffraction spectra which is typical in tropical seas (25 to 30 °C) (Figs. 5A, Figure 6A, Figure 8A–D). Highly variable LOI values of are probably related to the water content in siliciclastic fractions, i.e. plagioclase and carbonate content in the CD and beach sands. However, the significant correlation between LOI and CaO is probably due to the high biogenic content in the CD and beach sands.

5.5. Trace elements in the CD and beach sands of the WGM

The Co abundance is linked to the concentration of Lvl, Lvm, and

Lvv in basalts and andesites (Marsaglia et al., 2016; Morrone et al., 2016). Concentrations of Ni are associated with the presence of ferromagnesian minerals, detrital primary Fe and Mn oxides, and most likely with the olivine content in Lvl fractions (Wedepohl, 1969; Lynn et al., 2017). Trace elements are in agreement with the modal, major element, and X-ray diffraction analyses performed.

5.6. REEs in the CD and beach sands of the WGM

Homogeneous flat-type trends without any enrichment of heavy rare earth elements (HREE, Gd-Lu) compared to light rare earth elements (LREE, La-Sm) were observed in the WGM sands. These patterns indicate a volcanic source for the CD and beach sands similar to the REE concentration trends observed in mafic volcanic rocks, neovolcanic rocks, basalt lavas, and tuffs of mild alkaline character (Shimokawa and Masuda, 1972; O'Nions et al., 1973). Lavas and/or andesites with phenocrysts of plagioclase contain positive Eu anomalies (Eu/Eu* of up to 1.2) (Arth, 1981). However, during transport from the rock source to the coastal plain, the labile minerals such as plagioclase are lost, while the positive Eu/Eu* values only reflect the remaining plagioclase crystal embedded in the volcanic lithic fractions (Fig. 5C). The results of the normalized REE diagram for the CD and beach sands is < 1.0 from the UCC line, suggesting depletion and fractionation of REEs during weathering and aeolian and marine transport. The REE patterns of the CD and beach sands are similar to those observed in SE Mexico beach sands controlled by volcanic rock sources (Carranza-Edwards et al., 2018) (Fig. 6C). The slightly negative Ce anomalies may be related to the nature of basalts and a possible but reduced influence of rhyolite tuffs in the sand composition (Wedepohl, 1969).

5.7. Provenance and weathering rates in the CD and beach sands

The CIA, PIA, CIW, and WIP estimations showed high values, indicating high depletion of single-crystal plagioclase and low concentrations of Ca, Na, and K during sand recycling caused by the vigorous coastal dynamics and sub-humid warm conditions in the WGM. We observed that the CD and beach sand samples are grouped in the CIA diagram described as intermediate weathering, regardless of the geographical location. This indicates that the local climate exerts a major control over the weathering rates of the samples regardless of the heterogeneity of the parent rock near the study area, i.e. calc-alkaline andesites, andesites-dacites, basalts, volcanic tuffs, and basaltic breccias. This is also supported by the concentration/depletion of the existing minerals. For instance, major compositional fractions such as Qm are recycled mineral fractions, while P are depleted due to warm humid conditions and vigorous coastal dynamics. Subordinate concentration/depletion of fractions such as Lvl, Lvm, Lvv, Ls, and semi unstable and unstable ol, px, a and op depend on coastal dynamic transport and warm climate conditions (Figs. 4–7).

Undifferentiated groupings of CD and beach sands are observed in the CIW vs. PIA plot suggesting that climate and recycling/depletion of mineral fractions by vigorous coastal dynamics produce relatively homogeneous intermediate weathering rates along the coast (Fig. 7B). The WIP and CIA plot reported in an area controlled by volcanic provenance does not support uniformity in the weathering rates related specifically to the geographical distribution of the CD and beach sands. This suggests that highly recycled detrital mineral fractions in the sands in a predominantly warm sub-humid climate produce plagioclase depletion and quartz enrichment, mainly at the Istirinchia site (Fig. 4A and C).

The average value of the CIA/WIP ratio suggests intermediate weathering conditions of recycled coastal sands in the CD and beach sands. We compared our results to those observed in sedimentary basins in central Africa where warm humid conditions have experienced intermediate to intense weathering rates markedly controlled by the quartz dilution effect (Garzanti et al., 2013a, 2013b).

In addition, when we compared sands from the WGM to other regions with a dry and temperate climate such as the El Vizcaino and Altar deserts in NW Mexico, the CIA values for CD sands were 65.68 ± 1.54 and 58.53 ± 2.06 (Kasper-Zubillaga and Zolezzi-Ruiz, 2007; Kasper Zubillaga et al., 2007). The Vizcaino CD sands showed the following mean values on the chemical weathering indices: PIA = 50.00 ± 5.85 , CIW = 52.74 ± 5.77 , and WIP = 54.03 ± 2.08 . The Altar Desert CD sands had the following mean values for the chemical weathering indices: PIA = 53.29 ± 4.62 , CIW = 65.04 ± 4.25 , and WIP = 33.88 ± 7.63 . The CIA/WIP ratio for the CD and beach sands of the WGM was 2.13 (Garzanti et al., 2013a). Therefore, under dry weather conditions, the CD sands showed lower values for average CIA, PIA, CIW, and WIP estimations compared to the WGM sands (Kasper-Zubillaga and Zolezzi Ruiz, 2007; Kasper-Zubillaga et al., 2007; Muhs, 2017). Our interpretation of the weathering rates in the CD and beach sands is evidenced by (a) the modal analysis in which single-crystal plagioclase is nearly absent in most of the CD and beach sands, (b) the mineralogical assessment of low abundances of single-crystal olivine in the sands, (c) the high and low volcanic lithic and ilmenite content associated with a combination of longshore transport and wind deflation in medium-to-fine-grained sizes concentrated at the PS, VR, LM, and CH localities (Kasper-Zubillaga et al., 2007; Carranza-Edwards et al., 2018), and (d) the decrease in CaO* concentration in the silicate fractions determined by geochemical analyses. Despite the fact that the exhumation of the TMVB exposed near a narrow coastal plain should determine the composition of the CD and beach sands, this study shows that CD and beach sands do not completely reflect the whole composition exerted by the TMVB.

6. Conclusions

The CD and beach sands close to the TMVB are determined by the heterogeneity of several hydrodynamic processes such as wind deflation, longshore currents, and waves, producing medium-to-fine moderately-well-sorted sands. Recycled and highly-corroded monocrystalline quartz and plagioclase as well as olivine depletion as single minerals in the sands suggest a mix of vigorous coastal dynamic mechanisms and warm humid weather prevailing in the coastal area close to the TMVB. Volcanic lithic textures i.e. lathwork, microlithic and vitric are in agreement with the geological framework of the TMBV denudation, which is composed of calc-alkaline lavas, andesites, Na-alkaline lavas, and rhyolite tuffs. Direct relationships between mineralogical and geochemical data explain the high content of silica, titanium, iron, magnesium, biogenic calcium, vanadium, chromium and cobalt with minerals associated with recycled monocrystalline quartz, opaque minerals (ilmenite), clinopyroxene (augite), shell fragments, calc alkaline and alkaline basalts and andesites. The XRD analysis reinforced the mineralogical and modal analyses. Quartz enrichment ($> Q_m$) and dilution effects ($< Q_m$) seem to control the mineralogy in the northern (i.e. less volcanic lithic input) and southern sites (i.e. high volcanic lithic input). Although ilmenite lag deposits in the northern sites reflect extreme hydrodynamic conditions and wind deflation, in contrast, depletion of quartz occurs as a consequence of the removal of light minerals.

Acknowledgments

We wish to thank Rufino Lozano-Santa Cruz, Elizabeth Hernández Álvarez, and Dr. Teresa Pi I-Puig for major, trace, rare earth element, and X-ray diffraction analyses performed at the Instituto de Geología and Geophysics, Universidad Nacional Autónoma de México. We would also like to recognize Patrick Weill for his assistance with the English language. This work was funded through the institutional project “Estudio de Procedencia en Ambientes Sedimentarios Recientes mediante el uso de los Minerales Ligeros y Pesados (Proyecto Interno del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología No. 109,” Instituto de

Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary material related to this article can be found, in the online version, at doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemer.2018.06.004>.

References

- Abuodha, J.O.Z., 2003. Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, Malindi Bay coast, Kenya. *J. Afr. Earth Sci.* 36, 41–54.
- Ahlbrandt, T.S., 1979. Textural parameters of eolian deposits. In: McKee, E.D. (Ed.), *A Study of Global Sand Seas*. Geological Survey Professional Paper 1052, Washington, D.C, pp. 21–58.
- Alappat, L., Joseph, S., Tsukamoto, S., Kauffhold, S., Frechen, M., 2016. Chronology and weathering history of red dunes (Teri Sands) in the southwest coast of Tamil Nadu, India. *German J. Geosci.* 168, 183–198.
- Arth, J.G., 1981. Rare-earth element geochemistry of the island-arc volcanic rocks of Rabaul and Talasea, New Britain. *Geol. Soc. Am. Bull.* 92, 858–863. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1981\)92<858:REGOTTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1981)92<858:REGOTTI>2.0.CO;2).
- Blott, S.J., Pye, K., 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 1237–1248.
- Cantagrel, J.M., Robin, C., 1979. K-Ar dating on Eastern Mexican volcanic rocks—relations between the andesitic and the alkaline provinces. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 5, 99–114.
- Carranza-Edwards, A., Kasper-Zubillaga, J.J., Martínez-Serrano, R., Cabrera-Ramírez, M., Rosales-Hoz, L., Alatorre-Mendieta, M.A., Márquez-García, A.Z., Lozano-Santa Cruz, R., 2018. Provenance inferred through modern beach sands from the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geol. J.* 1–12. <https://doi.org/10.1002/gj.3205>.
- Critelli, S., Pera, E., Ingersoll Raymond, V., 1997. The effects of source lithology, transport, deposition and sampling scale on the composition of southern California sand. *Sedimentology* 44, 653–671.
- Dickinson, W.R., Gehrels, G.E., 2000. Sandstone petrofacies of detrital zircon samples from Paleozoic and Triassic strata in suspect terranes of northern Nevada and California. In: Soreghan, M.J., Geherls, G.E. (Eds.), *Paleozoic and Triassic Paleogeography and Tectonics of Western Nevada and Northern California*. Geological Society of America Special Paper 347, Boulder Colorado, pp. 151–171.
- Dotz, R.H., 2003. The importance of eolian abrasion in supermature quartz sandstones and the paradox of weathering on vegetation-free landscapes. *J. Geol.* 111, 387–405.
- Dutta, P.K., Zhou, Z., dos Santos, P.R., 1993. A theoretical study of mineralogical maturation of eolian sand. In: Johnsson, M.J., Basu, A. (Eds.), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Geological Society of America. Special Paper 284, pp. 203–209.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleo-weathering conditions and provenance. *Geology* 23, 921–924.
- Fernández-Eguiarde, A., Gallegos-García, A., Zavala-Hidalgo, J., 1992. Oceanografía Física (Masas de Agua y Mareas de los Mares Mexicanos) IV.9.1, escala 1: 4000.000, Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 1 Chart, Mexico.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2011. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics* 522–523, 122–149. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>.
- Fiantis, D., Nelson, M., Shamshuddin, J., Goh, T.B., Van Ranst, E., 2010. Determination of the geochemical weathering indices and trace elements content of new volcanic ash deposits from Mt. Talang (West Sumatra) Indonesia. *Eur. Soil Sci.* 43, 1477–1485.
- Folk, R.L., 1980. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publications, Austin, Texas.
- Garzanti, E., Padoan, M., Andò, S., Resentini, A., Vezzoli, G., Lustrino, M., 2013a. Weathering and relative durability of detrital minerals in Equatorial climate: Sand petrology and geochemistry in the East African Rift. *J. Geol.* 121, 547–580.
- Garzanti, E., Vermeesch, P., Andò, S., Vezzoli, G., Valagussa, M., Allen, K., Kadi, K.A., Al-Juboury, A.I.A., 2013b. Provenance and recycling of Arabian desert sand. *Earth Sci. Rev.* 120, 1–19.
- Garzanti, E., Resentini, A., Andò, S., Vezzoli, G., Preira, A., Vermeesch, P., 2015. Physical controls on sand composition and relative durability of detrital minerals during ultra-long distance littoral an aeolian transport (Namibia and southern Angola). *Sedimentology* 62, 971–996.
- Goldberg, K., Humayun, M., 2010. The applicability of the chemical index of alteration as a paleoclimatic indicator: an example from the Permian of the Paraná Basin, Brazil. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 293, 175–183.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L., 2007. Igneous petrogenesis of the trans-Mexican volcanic belt. In: Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, Á.F. (Eds.), *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*. Geological Society of America Special Paper 422, pp. 129–181.
- Grebennikov, A.V., Maksimov, S.O., 2006. Fayalite rhyolites and a zoned magma chamber of the Paleocene Yakutinskaya volcanic depression in Primorye, Russia. *J. Miner. Petrol. Sci.* 101, 69–88.
- Gujar, A.R., N.V. Ambre, P.G. Mislankar, Iyer, S.D., 2010. Ilmenite, magnetite and chromite beach placers from South Maharashtra, Central West Coast of India. *Resour. Geol.* 60, 71–86.
- Harrel, J., Blatt, H., 1978. Polycrystallinity; Effect on the durability of detrital quartz. *J. Sediment. Res.* 48, 25–30.

- Honda, M., Shimizu, H., 1998. Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands. *Sedimentology* 45, 1125–1143.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza Edwards, A., Rosales-Hoz, L., 1999. Petrography and geochemistry of Holocene sands in the western Gulf of Mexico: implications for provenance and tectonic setting. *J. Sediment. Res.* 69, 1002–1010.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Zolezzi-Ruiz, H., Carranza-Edwards, A., Girón-García, P., Ortiz-Zamora, G., Palma, M., 2007. Sedimentological, modal analysis and geochemical studies of Desert and coastal dunes, Altar Desert, NW Mexico. *Earth Surf. Process. Landforms* 32, 489–508.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Zolezzi-Ruiz, H., 2007. Grain size, mineralogical and geochemical studies of coastal and inland dune sands from the El Vizcaino Desert, B.C. México. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 24, 423–438.
- Kotttek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* 15, 259–263.
- Lozano, R., Bernal, J.P., 2005. Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 22, 329–344.
- Lynn, K.J., Shea, T., García, M.O., 2017. Nickel variability in Hawaiian olivine: evaluating the relative contributions from mantle and crustal processes. *Am. Mineral.* 102, 507–518.
- Marsaglia, K.M., 1993. Basaltic island sand provenance. In: Johnsson, M.J., Basu, A. (Eds.), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp. 284.
- McLennan, S.M., 1993. Weathering and global denudation. *J. Geol.* 101, 295–303.
- Meysman, F.J.R., Montserrat, F., 2017. Negative CO₂ emissions via enhanced silicate weathering in coastal environments. *Biol. Lett.* 13, 20160905.
- Morrone, C., De Rosa, R., Le Pera, E., Marsaglia, K.M., 2016. Provenance of volcanoclastic beach sand in a magmatic-arc setting: an example from Lipari island (Aeolian archipelago, Tyrrhenian Sea). *Geol. Mag.* 154, 804–828.
- Muhs, D.R., 2017. Evaluation of simple geochemical indicators of aeolian sand provenance: late quaternary dune fields of North America revisited. *Quat. Sci. Rev.* 171, 260–296.
- Muhs, D.R., Reynolds, R.L., Been, J., Skipp, G., 2003. Eolian sand transport pathways in the southwestern United States: importance of the Colorado River and local sources. *Quat. Int.* 104, 3–18.
- Muir, I.D., Tilley, C.E., 1961. Mugearites and Their Place in Alkali Igneous Rock Series. *J. Geol.* 69, 186–203.
- Nawesgara-Rao, P.V., Swaroop, P.C., Karimulla, S., 2012. Mineral chemistry of Pangidi basalt flows from Andhra Pradesh. *J. Earth Syst. Sci.* 121, 525–536.
- Negendank, J., Emmermann, R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H., Wehrle, D., 1985. Geological and geochemical investigations on the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Int.* 24, 477–575.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715.
- Nesbitt, H.W., Fedo, C.M., Young, G.M., 1997. Quartz and feldspar stability, steady and non steady state weathering, and petrogenesis of siliciclastic sands and muds. *J. Geol.* 105, 173–192.
- Nonnotte, P., Benoit, M., Le Gall, B., Hémond, C., Rolet, J., Cotten, J., Brunet, P., Makoba, E., 2011. Petrology and geochemistry of alkaline lava series, Kilimanjaro, Tanzania: New constraints on petrogenetic processes. In: Beccaluva, L., Bianchini, G., Wilson, M. (Eds.), *Volcanism and Evolution of the African Lithosphere*. Geological Society of America.
- O’Nions, R.K., Pankhurst, R.J., Fridleifsson, I.B., Jakobsson, S.P., 1973. Strontium isotopes and rare earth elements in basalts from the heimaey and surtsey volcanic eruptions. *Nature* 243, 213.
- Ortiz-Pérez, M.A., Espinosa, R.L.M., 1991. Clasificación geomorfológica de las costas de México. *Geogr. Desarrollo* 2, 2–9.
- Parker, A., 1970. An index of weathering for silicate Rocks. *Geol. Mag.* 107, 501–504.
- Pérez-Villegas, G., 1990. Clima: Atlas Nacional De México (Hoja IV.4.2). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Price, J.R., Velbel, M.A., 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chem. Geol.* 202, 397–416.
- Sengupta, D., Van Gosen, B.S., 2016. In: In: Verplanck, Philip L., Hitzman, Murray W. (Eds.), *Placer-Type Rare Earth Elements Deposits In Reviews in Economic Geology* 18. Society of Economic Geologists, Inc., pp. 81–100.
- Servicio Geológico Mexicano, 2017. Cartografía Geología De La República Mexicana Formato SHP Escala 1:250,000. C.f.S., escala 1:250,000. .
- Shimokawa, T., Masuda, A., 1972. Rare-earths in Icelandic neovolcanic rocks. *Contr. Miner. Petrol.* 37, 39–46.
- Tamayo, J.L., 2013. *Geografía Moderna de México*. Trillas, México. 390 pages. .
- Taylor, S.R., Mc Lennan, S.M., 1985. *The Continental Crust, Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific. Publication, Oxford.
- Trumbull, R.B., Bühn, B., Romer, R.L., Volker, F., 2003. The petrology of Basanite–Tephrite intrusions in the Erongo complex and implications for a plume origin of cretaceous alkaline complexes in Namibia. *J. Petrol.* 44, 93–112.
- Weber, B., Valencia, V.A., Schaaf, P., Pompa-Mera, V., 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. *J. Geol.* 116, 619–639.
- Wedepohl, K.H., 1969. *Handbook of Geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1970.