



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**“AGENTES QUE CONTROLAN LAS CARACTERÍSTICAS
SEDIMENTOLÓGICAS DE LAS DUNAS COSTERAS Y
CONTINENTALES DE SONORA, MÉXICO A PARTIR DE
RASGOS TEXTURALES EN CUARZO”.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A:

INGRID VILLASEÑOR GUERRERO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN JOSÉ KASPER ZUBILLAGA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX



2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

“El pájaro rompe el cascarón. El cascarón es el mundo. Quien quiera nacer, tiene que destruir un mundo.”

— Hermann Hesse

Agradecimientos:

A mis padres, por haberme inculcado el amor al estudio y por haberme dado el privilegio, el sustento y los cimientos para llevar una buena educación desde niña. Pero, sobre todo, agradezco sus palabras de aliento, su paciencia y su apoyo para poder concluir mi carrera universitaria. Todo el esfuerzo y dedicación en mis años de estudiante no sólo han sido por mi parte, siéntanse orgullosos y parte de todo esto, porque juntos logramos concluir esta etapa, para mí la más bonita de todas. ¡Gracias!

A Rodrigo Kohler, gracias por ser mi motor estos últimos años, me ayudaste no sólo a ser mejor estudiante, sino a mejorar como persona. Gracias por ser parte de mi vida, por tu incondicional apoyo, tu confianza, tu motivación y tus consejos que día con día me alentaron para culminar este proyecto, siempre agradeceré todos los “tú puedes, ya falta poco” y los “te conecto la Lap para que avances”, pero ante todo agradezco tu cariño y tu amor inmesurable. Este trabajo está hecho con mucho corazón, gracias por llegar conmigo hasta aquí.

Al Doctor Kasper, a quien admiro y respeto muchísimo. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos conmigo y por recordarme lo que se puede lograr con la Geografía. Este proyecto es gracias a usted y lo que me enseñó y trabajamos juntos a lo largo de más de un año. Quiero que sepa que lo considero más que un profesor, un amigo, al que he llegado a tomarle aprecio y a quien siempre le estaré agradecida. ¡Gracias Doctor!

A mis sinodales; la Doctora María del Carmen Juárez, el Mtro. Frank García, el profesor José Luis Montoya y la Doctora Mary Frances, con quienes tuve la dicha de coincidir a lo largo de mi carrera y quienes también fueron mis maestros, gracias por todo el conocimiento, por su apoyo incondicional, por sus clases, que siempre fueron tan amenas, y por guiarme en esta última etapa de la licenciatura. Gracias a todos por su paciencia y dedicación, los recuerdo siempre con cariño y guardarán un lugar siempre en mi corazón.

A toda mi familia, por su confianza absoluta y por conceptuarme siempre como una persona inteligente, los amo a todos.

A todos mis profesores de la máxima casa de estudios, porque mi formación como profesionista la forjé gracias a ellos y a los conocimientos que me brindaron a lo largo de todos estos años, y porque también me han dado valiosas lecciones de vida. Siempre tendrán mi respeto y admiración, ¡gracias a todos!

A la UNAM, por ser mi segundo hogar, siempre me he sentido orgullosa de pertenecer a tan bonita institución. Gracias por todos estos años de educación y conocimientos, espero tener oportunidad de seguir formándome dentro de ella. Con orgullo siempre, ¡GOYA!



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
Objetivos particulares	8
Hipótesis de trabajo	8
Justificación	8
ANTECEDENTES	10
CAPÍTULO 1. Marco teórico-conceptual	11
1.1 Geomorfología costera de México	11
1.2 Principales características y clasificación de las Dunas.....	21
1.3 El cuarzo como mineral detrítico de las dunas.....	24
1.4 Cuarzo (SiO ₂), un mineral abundante en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. .	24
1.5 Compacidad	27
CAPITULO 2. Particularidades físicas del área de estudio	31
2.1 Geología.....	32
2.2 Clima.....	36
2.3 Fisiografía General.....	39
2.4 Dunas en Sonora.....	41
2.5 Vientos.....	41
CAPÍTULO 3. Características sedimentológicas de las dunas costeras y continentales de Sonora	43
3.1 Metodología y equipo.....	43
3.2 Áreas de muestreo	50
3.3 Sedimentología de arenas	52
3.4 Ambientes sedimentarios.....	57
RESULTADOS Y DISCUSION	62
CONCLUSIÓN	67
REFERENCIAS	69
ANEXOS:	76



RESUMEN

Las dunas son montículos de arena que se originan por acumulación que realiza el viento en los desiertos, litorales marinos arenosos y en las planicies contiguas o desecadas de ríos y lagos. El perfil longitudinal de las dunas es asimétrico: la ladera de sotavento alcanza hasta 35° , la de barlovento hasta 15° de pendiente. Se presentan en grupos y se desplazan según la dirección de los vientos dominantes; en el litoral hacia tierra firme.

En el presente estudio se llevó a cabo el análisis de los rasgos superficiales en los granos de cuarzo de diferentes arenas procedentes de las dunas costeras localizadas en el Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco, así como de dunas continentales procedentes de San Luis Río Colorado y El Pinacate.

El cuarzo fue separado manualmente a través de su observación bajo un Microscopio Binocular Estereoscópico con zoom Stereo *VE-S4* (4X) del laboratorio de Geoquímica del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, CDMX. Se recolectaron nueve granos de cuarzo por muestra, 4 portaobjetos por cada localidad, sumando un total de 144 granos. Los granos fueron observados a través de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) SEM-Jeol-JSM 6360LV en el Laboratorio de MEB del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, CDMX.

Las imágenes se usaron para determinar la compacidad del cuarzo, parámetro que mide en conjunto la convexidad y esfericidad de la partícula en el dominio digital. Para este propósito, se empleó el software JMicroVision y se determinó que tanto se acerca la partícula a ser un polígono con sus lados perfectamente regulares y así vincular los valores de compacidad obtenidos con los procesos eólicos y/o marinos (abrasión) que se llevan a cabo en la costa y desierto de Sonora. Los valores de compacidad mostraron que el cuarzo de las dunas de Sonora está por debajo de una compacidad alta ($C < 75$) y por lo tanto su transporte está dado por el transporte fluvial (i.e. Río Colorado) y corrientes marinas litorales con menor influencia eólica prolongada.



INTRODUCCIÓN

Dado que el cuarzo es el componente mayoritario de las arenas, sobre él se ha centrado desde hace tiempo el interés de los investigadores que han venido asociando a diversos ambientes un aspecto característico de los granos de cuarzo. El avance de las técnicas instrumentales ha permitido acercarse a los más pequeños detalles de la superficie de estos granos.

El estudio de microtexturas de granos de cuarzo con técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) ha demostrado ser un método válido en petrología sedimentaria para interpretar ambientes sedimentarios y mecanismos de transporte.

Las microtexturas proporcionan información útil sobre los diversos procesos que actúan en los granos durante el transporte y después de la deposición y los criterios para distinguir las características mecánicas y químicas y sus implicaciones han sido bien establecidas.

Por lo tanto, el estudio microtextural en granos de cuarzo es considerada como una poderosa herramienta en la identificación de procedencias, procesos de transporte e historia diagenética de los sedimentos detríticos.

El método se basa en el estudio por microscopía electrónica de barrido de las texturas superficiales de los granos de cuarzo, es decir, de las huellas de las acciones mecánicas y químicas que han actuado sobre cada grano en los sucesivos ambientes en que éste ha permanecido. Es, por lo tanto, un método idóneo para reconstruir su historia, cuyos episodios se han ido escribiendo unos sobre otros en la superficie de los granos.

Como mencionan Corbí y Martínez, en el contexto de las Ciencias de la Tierra, la arena es posiblemente una de las cosas más fascinantes para observar con el microscopio. Observar una arena puede suponer, por tanto, “descubrir un mundo nuevo” (to see a world in a grain of sand, aludiendo al poema de William Blake), en el que percibir distintas formas, texturas y colores en cada uno de los granos o clastos que conforman la arena.

De hecho, para una playa, la arena puede considerarse, de alguna forma, como la “huella geológica o sedimentaria” que nos cuenta la procedencia y origen de esta. Por tanto,



visualizar y examinar una arena bajo el microscopio constituye, no solo un placer estético, sino también una importante fuente de información geológica de vital importancia, por ejemplo, en la reconstrucción de ambientes sedimentarios.

En la historia geológica, el análisis de los sedimentos ha sido un fuerte fundamento para la comprensión de los sucesos que han alterado el planeta, como por ejemplo la temperatura y el cambio en procesos volcánicos y sísmicos; pero también han aportado al descubrimiento de sustancias económicamente valiosas y que han revolucionado el mundo actual, como lo son el gas, petróleo, piedra caliza, material para construcción y extracción de minerales (Tarbuck & Lutgens, 2005).



Objetivo general

Identificar los mecanismos de transporte dominante: fluvial, marino y/ o eólico que controlan la forma de los granos de cuarzo en las dunas costeras y continentales de Sonora a partir del concepto de compacidad de las partículas.

Objetivos particulares

- 1.- Discutir los agentes físicos que influyen en las formas del cuarzo y su emplazamiento en dunas del noroeste de México influidas por acción fluvial, marina y eólica y dominada por un clima árido.
- 2.- Establecer la importancia de la compacidad para cuantificar las formas del cuarzo como un rasgo textural y su relación a la dinámica de las dunas continentales y costeras de Sonora.

Hipótesis de trabajo

En Sonora, las dunas continentales y costeras posiblemente tuvieron su origen principal en la erosión del Delta del Río Colorado en los límites de Sonora y BC en la desembocadura del Río Colorado, México y en regiones distales al Delta en Estados Unidos. De ser así, el cristal de cuarzo tendría formas angulosas debido al transporte fluvial y/o marino y poco abrasionadas por el viento.

Justificación

Las Dunas desempeñan un papel importante para el país debido a los servicios ecosistémicos que brindan.-El Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM es el único espacio con una colección de arena de dunas en el país, lo cual brinda una herramienta para el análisis de dunas desde diferentes disciplinas. Por otro lado, trabajar con la medida de compacidad como herramienta para cuantificar formas en el cuarzo y su relación a dinámica sedimentológicas contribuye como un nuevo método en la investigación.



El presente trabajo se llevó a cabo a lo largo de poco más de un año, mediante el análisis de muestras de cuarzo proveniente de dunas continentales y costeras del estado de Sonora, mismas que fueron tomadas de la Arenoteca del laboratorio de Geoquímica, en el Instituto de Ciencias del Mar.

Está constituido de tres capítulos; el capítulo número uno contempla la geomorfología costera de México, así como los diferentes ambientes costeros presentes en el territorio mexicano, sus diversas unidades tectónicas morfológicas y contempla también, las variadas regiones costeras, además de los principales tipos de dunas y sus características predominantes. Asimismo, en el capítulo uno se integra un apartado del cuarzo (SiO_2), incluyendo sus propiedades y principales características, así como un apartado del parámetro de Compacidad y el propósito de utilizarlo en la presente investigación.

El capítulo 2 está compuesto por las particularidades físicas del área de estudio; incluyendo geología, clima, fisiografía, vientos y, si bien, las dunas se encuentran en casi todas las costas arenosas del país: Baja California, Baja California Sur, Sonora, Jalisco, Tamaulipas, Veracruz, Quintana Roo, Yucatán y Campeche, en este capítulo se plantea un apartado de las Dunas en Sonora, específicamente.

El capítulo 3 consta de las características sedimentológicas de las dunas costeras y continentales de Sonora, en este capítulo se incluye la metodología y equipo, entrando en detalle con la microscopía electrónica de barrido y abarca también, una descripción de las áreas de estudio, así como la sedimentología de arenas, pues bien, el papel de la sedimentología como ciencia es el de poder interpretar la historia de los depósitos sedimentarios, en este caso, depósitos de cuarzo en arenas de dunas.



ANTECEDENTES

La investigación sobre dunas en México es un tema relativamente reciente. Aunque se registraron publicaciones desde principios de 1960, no fue hasta 1982 que se incrementaron las publicaciones y se ha mantenido la producción. Las primeras publicaciones registradas fueron de investigadores extranjeros en el tema de dinámica vegetal y sedimentaria de dunas costeras.

El inicio de las investigaciones ecológicas en países latinoamericanos como México data de hace 50 años porque la formación de científicos naturales comenzó apenas a mediados del siglo XX. La formación de especialistas y grupos de investigación mexicanos sobre dunas costeras específicamente se refleja en las décadas 1990-2010, y la mayor producción se presenta en la última década (Jiménez-Orocio et al., 2015).

En el noroeste de México existen estudios mineralógicos, geoquímicos y texturales en arena eólica, tanto costera como desértica, donde se identifican composiciones referentes a rocas intrusivas (granito y granodiorita), fuentes sedimentarias (depósitos aluviales) y fuentes parcialmente metamorfoseadas (esquistos y líticos metamórficos presentes en depósitos de aluvión). Aunado a esto, se sugieren al viento, corrientes mareales y fluviales asociadas al delta del Río Colorado, ubicado al norte del Mar de Cortés, como medio de transporte (Lancaster, 1992; Muhs et al, 2003; Muhs, 2004; Kasper-Zubillaga et al., 2007).

Otros estudios involucran la distribución de tamaño de grano en dunas costeras y desérticas de Sonora y establecer diferencias con base a su tamaño de grano y composición el Estado de Sonora, (Kasper-Zubillaga and Carranza-Edwards, 2005), estudio de distribución de tierras raras (Kasper-Zubillaga et al, 2008) y microtexturas en granos de cuarzo en dunas de Sonora (Kasper-Zubillaga and Faustinos-Morales, 2007).



CAPÍTULO 1. Marco teórico-conceptual

1.1 Geomorfología costera de México

La República Mexicana posee 11 592.77 km de costas, de los cuales 8 475.06 corresponden al margen costero del Pacífico y 3 117.71 al del Golfo de México y mar Caribe, incluyendo las islas. Su plataforma continental es de aproximadamente 394 603 km², siendo mayor en el Golfo de México; además cuenta con 12 500 km² de sistemas costeros (inegi/sepesca, 1987; Castañeda y Contreras, 1997, citado por IGg, 2013).

Las costas mexicanas están limitadas por el Océano Pacífico, el Golfo de California, el Golfo de México y el Mar Caribe. De los 31 estados y la Ciudad de México que constituyen el territorio nacional, 17 de ellos tienen límites costeros. De estos estados ribereños 11 se ubican en el litoral del Océano Pacífico y Golfo de California, y los 6 restantes en el litoral del Golfo de México y el Mar Caribe como se muestra en la figura 1 (Álvarez y Gaitán, 1994).

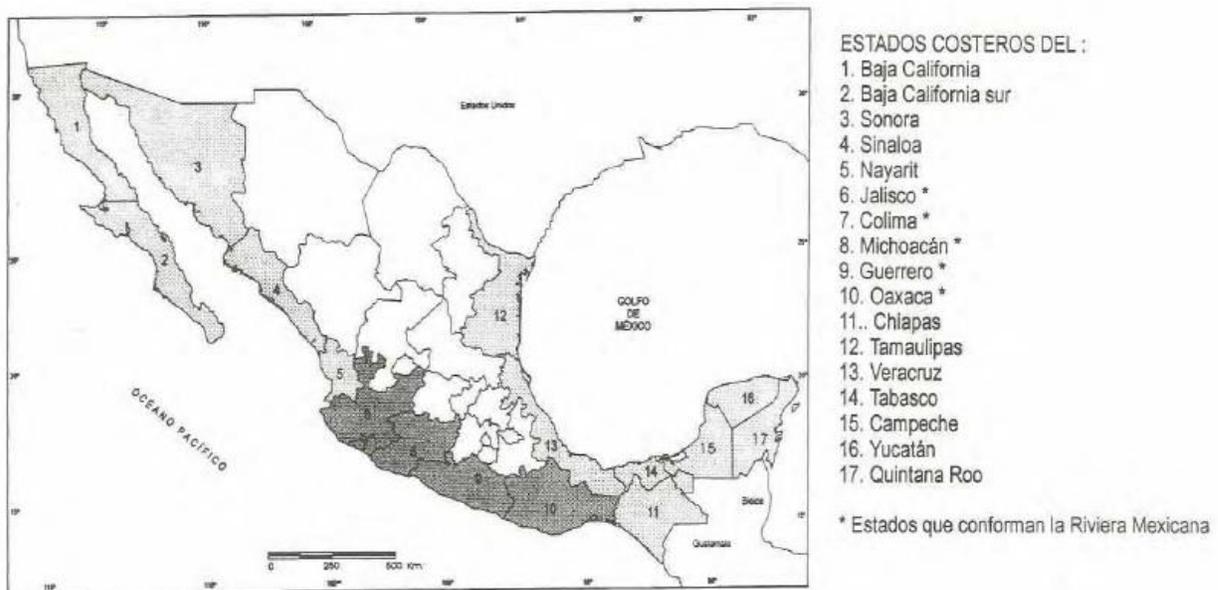


Figura 1. Estados con límites costeros en la República mexicana. (Padilla y Sotelo, 2000).



Ambientes costeros

La diversidad de condiciones en formas y dinámica del medio costero da lugar a ambientes claramente distinguibles entre sí, sea por el tipo de sus sedimentos, geoformas u otro tipo de variables oceanográficas.

- Playas:

Depósitos sedimentarios costeros que morfológicamente se pueden subdividir en: cara de playa y espalda de playa en relación con la posición que guarda la parte de la playa respecto al mar.

- Islas de barrera

Son depósitos de arena generalmente alargados y paralelos a la línea de costa que emergen en forma permanente sobre el nivel medio de marea alta. El proceso más importante en la formación de estos depósitos son los sistemas de oleaje generados por el viento. La altura de las olas, su periodicidad y longitud, así como la profundidad a la cual se remueven los sedimentos son directamente proporcionales a la velocidad del viento y a la extensión de la superficie del mar sobre la cual sopla. Consecuentemente, durante las tormentas la acción del oleaje es más efectiva como agente transportador de sedimentos

- Deltas

Los depósitos deltaicos resultan de la interacción de la energía del oleaje, el régimen de mareas, las corrientes y el clima que modifica y dispersa el material clástico transportado hacia el mar por grandes corrientes fluviales.

- Estuarios

Son cuerpos de agua de mar, marginales, semicerrados, en los que la salinidad es sensiblemente diluida por descargas fluviales. Los sedimentos estuarinos consisten en típicamente de arena fina bien seleccionada a lodos. La arena puede ser introducida principalmente por el mar, mientras que los lodos son aportados por la descarga del río.



- Planicies de marea

Las planicies de marea tienden a desarrollarse más en costas abiertas de bajo relieve y relativamente baja energía. Casi siempre están asociadas a estuarios, lagunas y deltas. Otras condiciones que favorecen su formación son los amplios intervalos de marea y un oleaje muy reducido.

- Canales de marea

Los canales de marea son de dos tipos; los principales, que suministran agua y sedimentos a las planicies de marea con sedimentos arenosos en su fondo, y los secundarios, que están muy relacionados con los sedimentos de las planicies de marea y que, debido a sus cortos tirantes de agua y baja energía, dan lugar a depósitos de material fino en capas delgadas mal seleccionadas.

- Lagunas costeras

Suele definirse como un cuerpo de agua de mar somero cercano o en comunicación con el mar abierto y parcial o completamente separado de él por una franja de tierra emergida, que puede ser un arrecife, isla de barrera o banco de arena. Sin embargo, en el presente escrito se definirá como aquel cuerpo de agua de mar acumulado en una depresión de la zona costera con profundidades menores a los 50 metros, que mantiene comunicación con mar abierto a través de uno o varios canales y que está protegida por una porción de tierra emergida con forma, composición y origen variado.

- Dunas

Las dunas son depósitos de origen eólico en forma de colinas o montes bajos, generalmente asociados a climas cálidos y secos, aunque se llegan a observar campos de dunas en regiones de latitudes medias y altas. (De la Lanza y Cáceres, 1994).



La región costera de México tiene diferentes orígenes que se pueden distinguir por unidades tectónicas morfológicas (Fig. 2). Los accidentes geográficos tales como lagunas, estuarios, esteros, bahías, marismas con influencias marinas y terrestres son, por lo tanto, específicos y muy diversos, favoreciendo diferentes propiedades fisicoquímicas del agua, nichos y hábitats a escala local determinados por diferente composición de organismos, ya sea ya sea durante todo su ciclo de vida o parte de ella, como es el caso de algunos crustáceos y peces. Algunos de estos organismos son endémicos y son indicadores de la estructura ambiental, otros son cosmopolitas, es decir, están presentes en cualquier zona de aguas costeras (De la Lanza, 2004).



Figura 2. Unidades morfotectónicas costeras. (De la Lanza, 2004).



Dependiendo del origen, la zona costera se divide en siete regiones (Fig. 3) siguiendo la clasificación propuesta por Lankford en 1977, que pueden o no asociarse con descargas fluviales, individualizando aún más las características costeras como lagunas y otras depresiones de la línea de costa como lagunas y estuarios (De la Lanza, 2004).

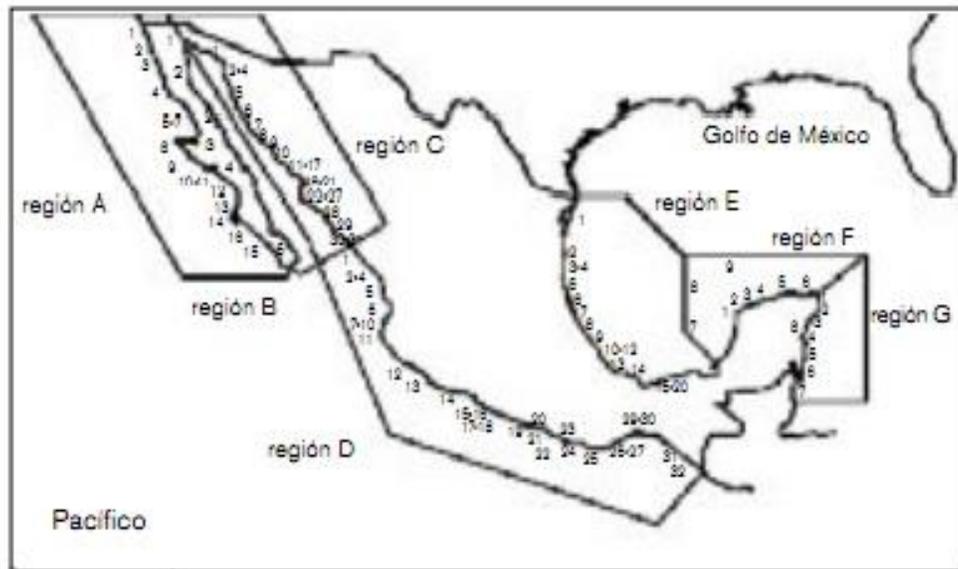


Figura 3. División geomorfológica de la zona costera de México.

La región A o costa occidental de California está formada por costas de colisión continental —choque de placas—, de dunas, de erosión por oleaje y playas-bahías o ganchos de barrera, cuenta con 16 rasgos costeros. Las regiones B y C o del Golfo de California constan de costas de arrastre de neoeje. En la costa occidental por erosión de oleaje y en la oriental son complejos deltáicos con dunas y planicies aluviales, cuenta con 36 ambientes acuáticos en ambas costas. En la región D o del Pacífico tropical predominan las costas con fallas y escarpes, en menor escala de erosión por oleaje y depositación marina, posee 32 rasgos costeros partiendo de Mazatlán al Río Suchiate.



En general, la mayoría de las regiones anteriores presentan una menor plataforma y, en algunos casos, una línea de costa rocosa o escarpada dado su origen tectónico, lo que propicia la colonización de algas incrustantes y crustáceos que requieren madrigueras. Sin embargo, las lagunas costeras, estuarios y bahías, que en total suman 83, reciben mayor diversidad de aguas continentales estacionales, en ocasiones con lluvias y sequías extremas, que incrementan el aporte de sedimentos y nutrimentos, transformando, por un lado, el marco geológico a sustratos suaves, y por el otro, los enriquecen desde el punto de vista pesquero.

En el Golfo de México, la región E es un mar marginal protegido. Del Río Bravo hasta Campeche, su parte más norteña, es de depositación por ríos y deltáica; frente a Veracruz es de flujos de lava, costas con arrecifes coralinos y dunas; y a la altura de Campeche, de depositación de ríos y complejos deltáicos, tiene 32 rasgos costeros. Esta región recibe aportes fluviales permanentes con alto contenido en nutrimentos, con lo que también es rica en pesquerías, pero con menor diversidad precisamente por su origen.

Las regiones F y G o plataforma de Yucatán y Quintana Roo son costas de mares marginales, de erosión terrestre, calcárea, de depositación marina, playas de barrera y arrecifes coralinos, cuentan con 17 sistemas costeros. Reciben escasas aguas continentales, a excepción de las subterráneas procedentes de los cenotes, que son de bajo contenido en nutrimentos, pero con la influencia de ascensiones de aguas marinas de mayor profundidad ricas en éstos. Lo más importante de esta región es la barrera arrecifal de la costa de Quintana Roo, parte de la del Caribe, considerada la segunda en tamaño a nivel mundial —después de la de Australia—, que es consecuencia de la fuente natural de carbonato de calcio y la temperatura tropical.

Como puede apreciarse, esta complejidad de origen y evolución geológica, asociada con la fluvial continental, más una variación y variabilidad climática, han condicionado una amplia diversidad de biotopos costeros, especialmente para especies endémicas de importancia ecológica y comercial. Dentro de la zona costera, y sobre todo en la plataforma, existen rasgos geomorfológicos importantes como son el insular, el arrecifal y arrecifes coralinos



que forman barreras asociadas directa e indirectamente con la línea de costa terrestre, y que son habitados por una gran diversidad de flora y fauna.

En los ecosistemas insulares se pueden registrar fenómenos de surgencia que incrementan la productividad acuática y a su vez alimentan peces, anfibios, aves, reptiles, entre otros organismos. En el mar territorial y la zona económica exclusiva hay islas, islotes, bancos, cayos y arrecifes. En el Pacífico —incluyendo el Golfo de California— existen aproximadamente 477 de estas geoformas y en el Golfo de México y el Mar Caribe 837 (De la Lanza, 2004).

1.2 Geomorfología eólica

Cuando el viento pierde su velocidad y con ello su capacidad para transportar las partículas de arena y de polvo que ha levantado de la superficie, éstas caen nuevamente sobre el terreno. Las partículas de arena acumuladas por el viento constituyen dunas que pueden tener tamaños desde algunos decímetros a enormes acumulaciones. Normalmente la disminución de la velocidad del viento se origina por la presencia de una superficie de desplazamiento rugosa o por un obstáculo.

En efecto, cualquier obstáculo que se interponga en la trayectoria del viento, desviará el aire en movimiento, creando del lado de sotavento una zona protegida o "sombra de viento", así como otra más pequeña del lado del viento inmediatamente enfrente del obstáculo. Dentro de cada sombra de viento el aire se mueve en remolinos con un movimiento medio menor que el del viento que pasa por fuera. Cuando las partículas de arena empujadas por el viento chocan con un obstáculo, se depositan en la sombra de viento que está inmediatamente enfrente de dicho obstáculo. Como la velocidad del viento es baja en esta sombra de viento, ocurre el depósito y se forma progresivamente un pequeño montículo de arena. Otras partículas superan el obstáculo y pasan a la zona de sombra de viento del lado de sotavento detrás del obstáculo. Aquí nuevamente las velocidades son bajas y hay depósito formando una acumulación en la zona a resguardo (fig. 4) (UCCL, 2023).

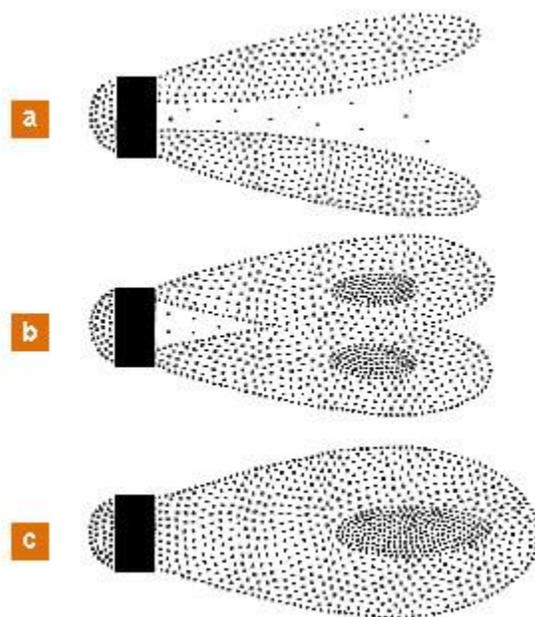


Figura 4. La secuencia muestra cómo la arena que cae en el área de la sombra de viento se concentra allí iniciando la formación de una duna.

Una duna actúa por sí misma como una barrera u obstáculo que corta al viento y, al interrumpir el flujo de aire, puede provocar el depósito de arena.

La forma básica de una duna originada por un viento de dirección única es la asimetría de su perfil transversal. Este tipo de duna tiene una larga cara del lado del viento (barlovento) y una pendiente suave (con un ángulo de 10 a 15°) y otra cara opuesta (sotavento) más corta y escarpada donde se desliza la arena grano a grano o en placas. Frente a la pendiente más pronunciada existe una sombra de viento en la que el depósito de arena es activo. El viento conduce los granos de arena sobre la cara de pendiente suave hasta la cresta de la duna y a continuación caen dentro del área de la sombra de viento. La cara de pendiente más abrupta, del lado de sotavento, se llama cara de deslizamiento de la duna, debido a los pequeños deslizamientos de arena que allí se producen, como se observa en la figura 5.

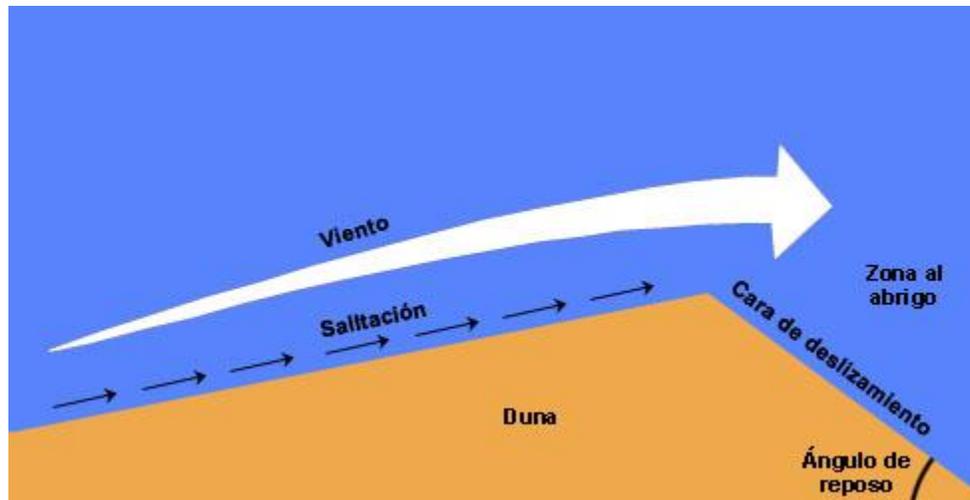


Figura 5. Componentes básicas del perfil transversal de una duna tipo.

¿Cómo se forma la cara de deslizamiento en una duna?

La presencia de un montículo de arena afecta al flujo del aire por encima de éste; el viento fluye sobre el montículo con trayectoria lineal como se observa en la figura 6. Estas líneas de flujo tienden a converger hacia la cima del montículo y divergen hacia sotavento. Las velocidades son menores en la zona donde diverge el flujo de aire que en la zona de flujo convergente. En consecuencia, la arena tiende a depositarse sobre la pendiente de sotavento y sobre la cima del montículo donde la velocidad comienza a disminuir. A causa del depósito, esta pendiente se hace más abrupta y eventualmente se desploma la arena bajo la influencia de la gravedad. El desplome normalmente ocurre cuando el frente alcanza un ángulo entre 30° y 35° con relación al horizonte. El depósito continuo y el desplome periódico a lo largo de la cara de deslizamiento es un factor importante en el crecimiento lento o en el movimiento de la duna en dirección del viento.

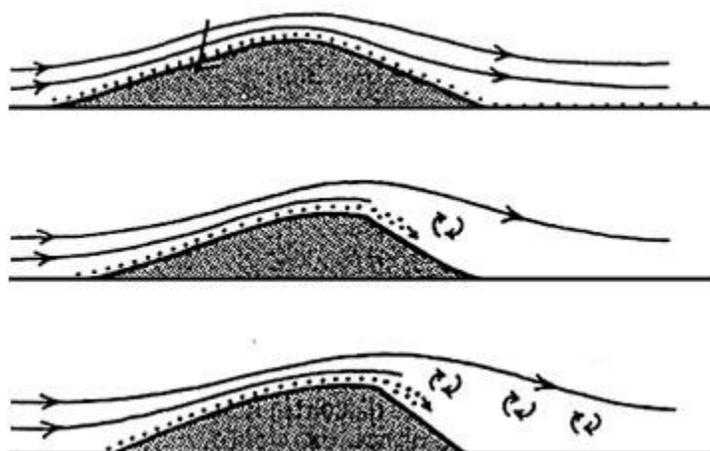


Figura 6. Desarrollo de una cara de deslizamiento y mecanismo de avance de una duna.

La estratificación de los sedimentos: las capas de arena de una duna normalmente están inclinadas. Las que están a lo largo de la cara de deslizamiento, capas frontales, tienen un ángulo de alrededor de 34° , mientras que las capas de la cara del lado del viento, capas traseras, tienen una pendiente más suave. Estas últimas, constituyen una gran parte del volumen total de una duna. Las capas superiores son estratos casi horizontales, dispuestos sobre la cima de las capas frontales o de las capas traseras, inclinadas. Por este motivo un depósito eólico tiene una estratificación entrecruzada característica (UCCL, 2023).



1.2 Principales características y clasificación de las Dunas

Las mayores acumulaciones de arenas son los erg y los mantos de arena. En la génesis y evolución de ambos tipos de acumulaciones, intervienen la disponibilidad de grandes volúmenes de arena, las condiciones climáticas de hiper aridez, una importante energía del viento y, topografía adecuada. Algunos ergs cubren decenas de miles de kilómetros cuadrados, como los grandes ergs saharianos.

Las acumulaciones eólicas más características son las dunas; ellas expresan la morfogénesis del viento en los dominios áridos y en las zonas costeras debido a la extensión de los espacios que recubren, la diversidad de tipos y las dimensiones que pueden alcanzar.

Las dunas pueden ser activas, o vivas, cuando no tienen vegetación por lo cual están cambiando constantemente de forma y a veces, de lugar bajo la acción del flujo de viento. Son inactivas o fijas cuando la cobertura vegetal impide el desplazamiento de las mismas y las estabiliza (UCCL, 2023).

Se diferencian varios tipos de dunas en función de su forma (ver figura 1). Los principales factores que influyen en la morfología de una duna son:

- ★ La dirección y velocidad del viento.
- ★ Disponibilidad de arena
- ★ Presencia de vegetación y/o un obstáculo topográfico.



Las dunas costeras de México representan un ecosistema de importancia, ya que son zonas de hábitats de flora y fauna, protegen del impacto de tormentas, así como del oleaje esporádico de alta energía y los tsunamis. Están íntimamente relacionadas a las condiciones del sitio en el que se forman y su composición es reflejo de éstas.

Las dunas son ambientes sedimentarios ampliamente expuestos en zonas continentales y costeras tropicales, desérticas, templadas y polares (Pye, 1983). Las dunas son promontorios geomorfológicos de arena producto del transporte y confinamiento de esta por acción del viento y barreras geográficas naturales y/o artificiales; la arena está compuesta por la acumulación de fracciones de minerales con diferentes densidades, composiciones y sistemas de cristalización (Folk 1971; Pye, 1983; Lancaster, 1995; Livingstone et al, 1999; Muhs et al, 2003; Kasper-Zubillaga et al, 2007; Garzanti et al., 2012).

De manera peculiar hay que resaltar la presencia de dunas en planetas como Marte y Venus y se infiere que es el viento un agente físico que controla de manera significativa la presencia de estos ambientes sedimentarios (Weitz et al, 1994; Chao and Zhibao, 2022). Las dunas se clasifican dependiendo de la dirección y la velocidad del viento en transversales, parabólicas, barján, longitudinales y estrella (Tsoar 2001; Fig.1).

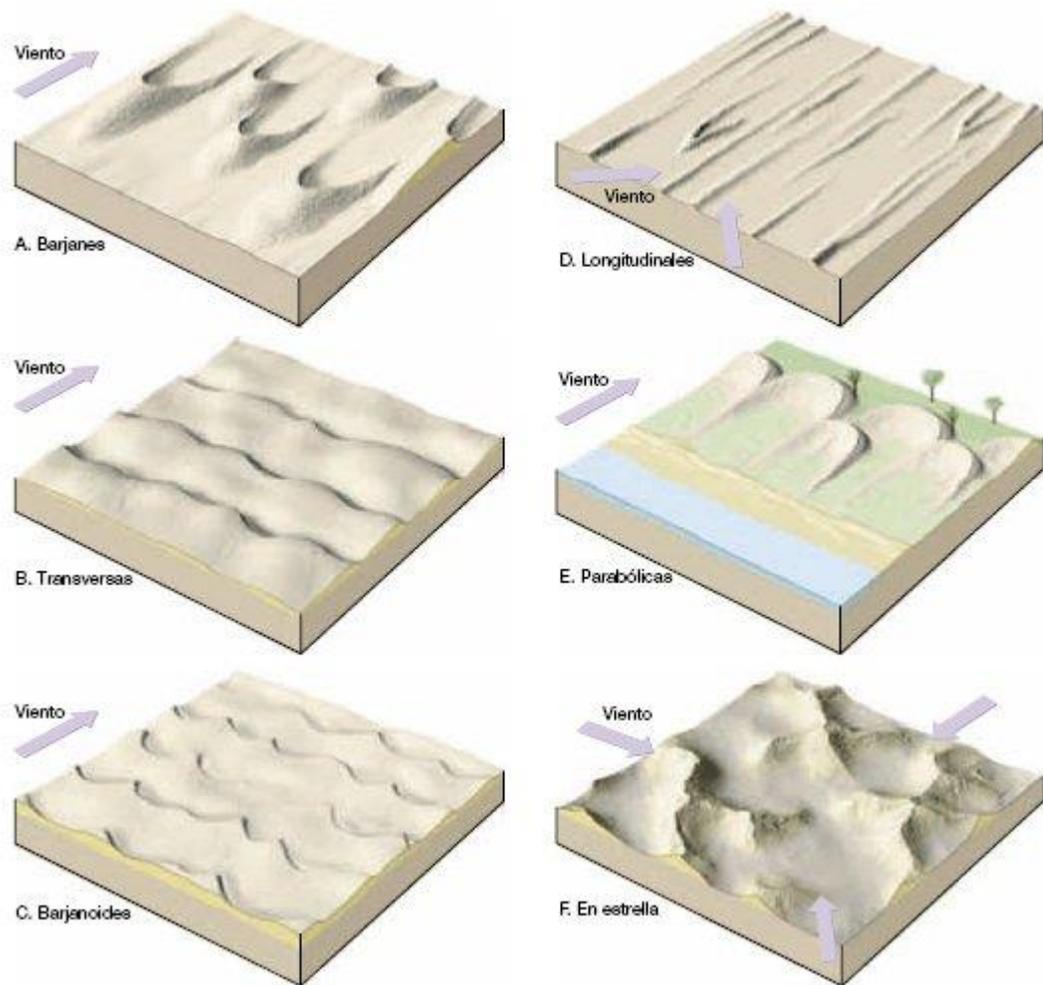


Figura 4. Tipos de Dunas.

Una duna está compuesta geomorfológicamente por tres regiones: barlovento, cresta y el sotavento; estas características se forman dependiendo de la velocidad del viento (Kasper-Zubillaga and Zolezzi-Ruiz, 2007; Mejía-Ledezma et al, 2020). Así, el barlovento es la región con influencia directa del golpe del viento, mientras que la cresta es la zona más alta del promontorio de arena. El sotavento es la zona de menor influencia directa del viento.

La diferencia composicional y en tamaño de grano entre las arenas de las dunas costeras y continentales es que en las primeras el viento tiene influencia del océano y la playa contribuye a alimentar la duna y viceversa. Las dunas continentales sólo dependen de las tormentas del



desierto, influencia fluvial y de elementos meteorológicos propios de la zona (Kasper-Zubillaga et al., 2007; Santillán y Gutiérrez, 2018;).

1.3 El cuarzo como mineral detrítico de las dunas

La arena de las dunas está formada predominantemente de minerales como el cuarzo, calcita y cantidades menores de fragmentos calcáreos de conchas. Las arenas feldespáticas son muy comunes, especialmente aquellas con una apreciable mezcla de fragmentos de roca. Las arenas de cuarzo forman el 80 % o más del material de silicatos detríticos (Williams et al., 1968; Carranza-Edwards et al., 1998).

La composición sedimentológica y textural, y las variaciones geoquímicas están sujetas a diversos acontecimientos meteorológicos como tormentas y huracanes que se presentan a lo largo de la costa (Kasper-Zubillaga y Carranza-Edwards, 2005).

1.4 Cuarzo (SiO₂), un mineral abundante en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

El cuarzo (SiO₂) es el mineral más común en la Tierra. Se encuentra en casi cada ambiente geológico y es por lo menos un componente de casi todos los tipos de roca. Es con frecuencia el mineral primario, el 98%; también el más variado en términos de variedades, colores y formas. Adicionalmente su estabilidad química, dureza, forma, variedades, fractura concoidal y presencia de microtexturas superficiales, lo hacen particularmente útil para estudios de procedencia y transporte de arena en ambientes sedimentarios modernos y antiguos (Krinsley & Doornkamp, 1968; Pettijohn et al. 1972; Dott, 2003; Madhavaraju et al., 2009; Garzanti et al, 2012; Vos et al., 2014).

Su estructura corresponde al de un tetraedro de silicio y oxígeno constituido por un armazón tridimensional en la que cada oxígeno es compartido entre dos silicios. No hay sustitución de otros iones en las posiciones del silicio. Su fórmula empírica: SiO₂, peso molecular: 60.08 g/mol, composición química corresponde a silicio 46.74 % y O 53.26 %.



El cuarzo cristaliza en dos sistemas cristalinos dependiendo de la temperatura: por encima de los 573°C en el sistema hexagonal; por ejemplo, con la forma típica de bipirámides hexagonales (Deer et al., 1998; Fig. 2).

Por debajo de los 573°C en el sistema trigonal (Fig. 3); por ejemplo, como cristal trigonal de habito columnar (Griem, 2015).

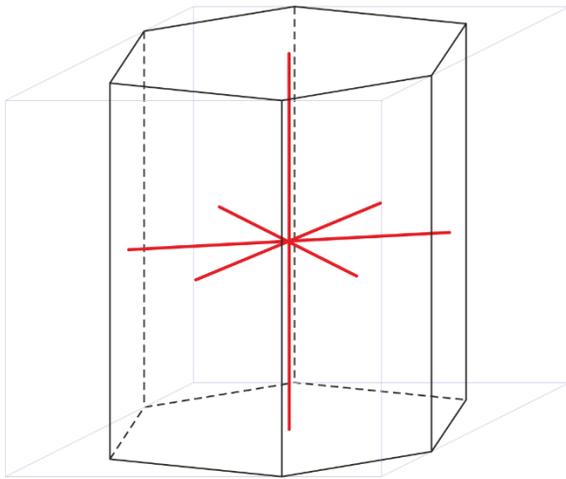


Figura 5. Sistema cristalino hexagonal. Periodni (2022)

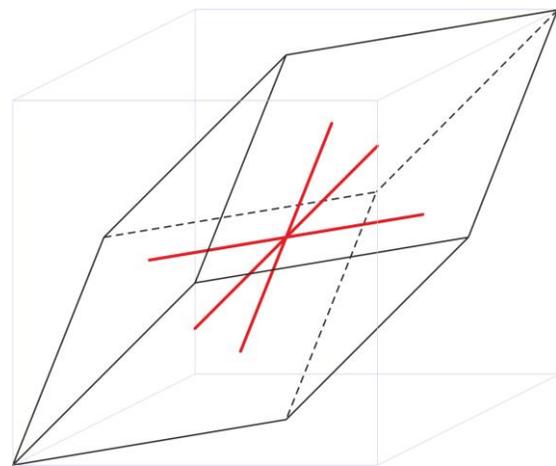


Figura 6. Sistema cristalino trigonal. Periodni (2022)

Entre las propiedades físicas del cuarzo se señalan: dureza: 7; densidad promedio = 2.62 g/cm^3 ; gravedad específica = 2.65; variable en minerales impuros y fractura concoidal, con propiedades organolépticas: color marrón, descolorido, violeta, gris, amarillo y brillo vítreo. El cuarzo es susceptible a cambiar su forma durante el transporte y depositación por agentes como el agua, hielo y viento.

El cuarzo puede redondearse por efectos de viento o romperse y mostrar bordes angulosos debido a transporte energético subacuático de alta energía por ríos y a lo largo de la costa por efecto de las corrientes litorales y oleaje (Kasper-Zubillaga et al, 2005; Vos et al., 2014; Mejía-Ledezma et al, 2020). Esta propiedad junto con algunos otros proxies (microtexturas, geoquímica) hacen que el estudio de las formas del cuarzo ayude a inferir posibles mecanismos de transporte en dunas costeras y continentales del noroeste de México (Kasper-Zubillaga et al., 2007).



Conservación de Dunas

La importancia de las dunas consiste en que aseguran las condiciones para el mantenimiento de ecosistemas. Desde hace unos 4.000 años, estas formaciones de arena son moldeadas por el viento y la vegetación formando una barrera que impide que se dispersen y atenúen los efectos de las tormentas.

Cabe destacar que las dunas facilitan el desarrollo de vegetación y fauna de gran relevancia ecológica; protege las aguas subterráneas al evitar el ingreso de agua salina y conserva un espacio de recreación y esparcimiento por excelencia como es la playa.

Medidas para colaborar en la preservación de las dunas:

Usar las bajadas y accesos habilitados para ingresar a la playa de manera de conservar las dunas y su vegetación.

No bajar con vehículos a la playa.

Proteger la vegetación costera y permitir que la arena se quede en la playa ya que es el hogar de muchas especies que solo viven en esos sitios. Cuidar el monte nativo contribuye a mantener el ecosistema costero. No utilizarlo como leña.

No contribuir con la proliferación de construcciones irregulares evitando comercializar con las casas ubicadas sobre playas y dunas ya que afectan seriamente la dinámica costera.

No retirar arena, cantos rodados o conchillas porque se acelera la erosión. Retirar arena está penalizado por ley (República oriental de Uruguay, 2016).



1.5 Compacidad

La compacidad como propiedad morfológica cuantificable de los objetos.

La medida de compacidad de una forma, también conocida como su índice de forma, es una cantidad numérica que representa el grado en que una forma es compacta (Montero y Bribiesca, 2009; Li et al., 2013).

La compacidad se calcula a partir del número de píxeles en la región digital del grano dividida entre el área del objeto asociada al perímetro de un círculo en el plano euclidiano (Roduit, 2007; 2019).

$$C = 4 \pi A / P^2$$

C = compacidad; A=área del objeto; P= perímetro

El parámetro de compacidad en este trabajo se utiliza para identificar qué tan cercano está cada grano de cuarzo a un polígono análogo a un círculo en los dominios digital y euclidiano respectivamente (Rosenfeld, 1974; Kasper-Zubillaga et al, 2023). Los atributos morfológicos en los granos de cuarzo se basan en el número de píxeles en forma de cuadrados que delimitan toda la superficie (Bribiesca; 1997; Montero and Bribiesca, 2009) y el contorno del mismo cristal para observar el grado de abrasión que ha sufrido el mismo a través de sus ciclos de transporte y depositación (Kasper-Zubillaga and Faustinos- Morales 2007; Vos et al., 2014; Mejía-Ledezma et al, 2020).



Los rangos de compacidad indican qué tan cerca de la redondez se encuentra un grano de cuarzo y están definidos en la siguiente tabla;

Tabla 1. Rangos de compacidad (Montero & Bribiesca, 2009; Li et al., 2013; Roduit, 2019).

<0.7	lejos de la redondez
>0.7	cercano a la redondez
9-1	bien redondeado

Compacidad en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Una medida de la compacidad de la forma es una cantidad numérica que representa el grado en que una forma es compacta. Aquí, la forma se refiere a los objetos geométricos que tienen una extensión bidimensional, como los objetos utilizados para describir un parque o una parcela de tierra, a diferencia de las características unidimensionales, como los enlaces de red, o las características tridimensionales, como un globo terráqueo.

La compacidad se reconoce como una de las propiedades más intrigantes e importantes de una forma y se usa ampliamente como descriptor en una variedad de tareas de dominio. Por ejemplo, la compacidad es un factor crítico en la definición y el análisis de regiones de hábitat homogéneas en ecología. Dentro de la visión por computadora, ha habido muchas aplicaciones de compacidad de forma para la coincidencia de objetos y el reconocimiento de patrones. Se ha prestado gran atención a la forma de proporcionar una medida precisa debido a su aplicación en una amplia gama de problemas SIG, como la detección de patrones de agrupación a partir de imágenes de teledetección, la comprensión de la expansión urbana y el rediseño de distritos electorales para evitar manipulaciones (Bogaert et al. 2000).

En la ciencia SIG, la cuantificación y el cálculo de la compacidad de la forma ha sido una cuestión de investigación fundamental y de larga data por varias razones. En primer lugar, una región compacta tiene propiedades atractivas porque la compacidad implica la máxima accesibilidad a todas las partes de la forma, y es probable que una forma compacta sea



homogénea y, por lo tanto, comparte atributos y propiedades comunes. En segundo lugar, la identificación de la forma tiene un gran impacto en la búsqueda y extracción de patrones espaciales, lo cual es esencial para analizar y comprender los fenómenos geográficos, así como para predecir patrones futuros. En tercer lugar, el mundo geográfico está poblado de objetos espaciales descritos a través de representaciones de área, lo que hace que la compacidad sea una parte importante de la comprensión de estos objetos.

Por lo tanto, se ha prestado gran atención a la comparación de formas debido a su aplicación en una amplia gama de problemas geográficos. Por ejemplo, ha habido una larga historia de uso de la compacidad dentro de la geografía política para evaluar la constitucionalidad de los distritos políticos en función de su forma. Más recientemente, la compacidad se ha convertido en un principio bien establecido que se utiliza para guiar la planificación urbana, evaluar los entornos urbanos y estudiar la expansión urbana. Además, la compacidad es un índice bien conocido para describir las propiedades hidrológicas de las cuencas de drenaje y formas de los objetos (Roduit, 2007, 2019; Li et al., 2013).

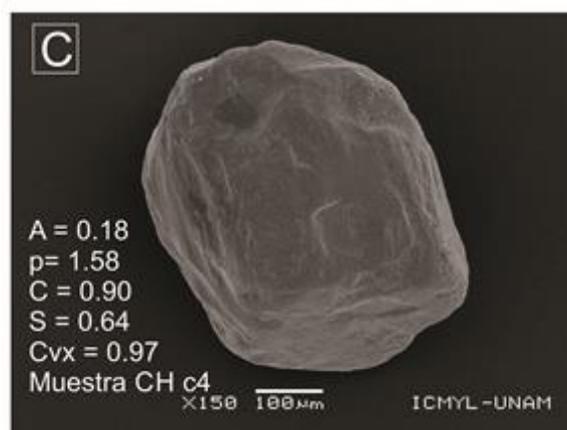
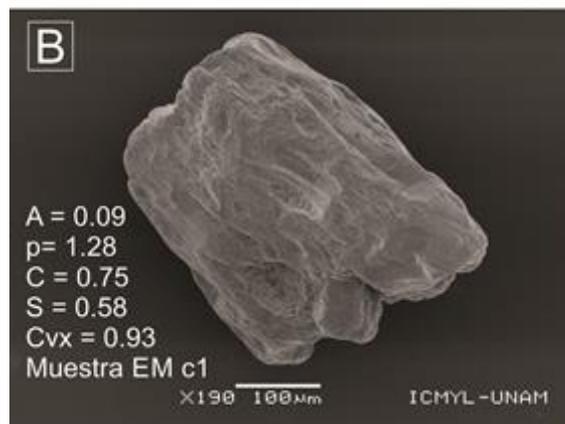
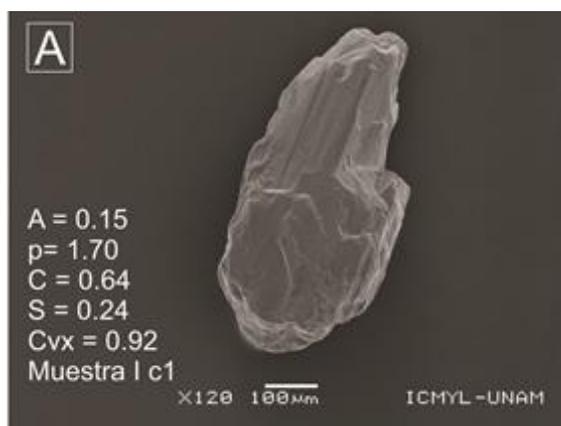
Compacidad aplicada a Ciencias de la Tierra

En las ciencias de la Tierra, la compacidad es un parámetro efectivo en cuantificar la forma de minerales detríticos o concentrados en sedimentos ya que es un descriptor de formas de las partículas que involucra la convexidad y la esfericidad de estas (Zhao and Wang, 2016). La compacidad está altamente correlacionada con la convexidad y en menor grado con la esfericidad (Kasper-Zubillaga et al, 2023).

La convexidad se define como el grado en que el mineral se acerca más a la forma de un polígono más que un círculo y la esfericidad se define como una partícula que se acerca a la forma de una esfera (Rosenfeld, 1974; Zhao and Wang, 2016). Por ejemplo, la compacidad se ha utilizado de manera significativa en cuantificar la morfología en granos de minerales pesados de piroxeno concentrado de dunas costeras de Veracruz, México (Kasper-Zubillaga et al, 2003; Fig. 7). Su aplicación a minerales ligeros con otro sistema cristalográfico diferente como el cuarzo, concentrado en dunas costeras y continentales del Desierto de



Sonora, México es una contribución importante en este trabajo para entender el grado de abrasión que ha sufrido el cuarzo durante su transporte y sus implicaciones geoambientales.



Figuras 7 A – C. Granos de piroxeno y sus respectivos parámetros de forma. A= área de la partícula; p =perímetro; C = compacidad; S = esfericidad, Cvx = convexidad. Nótese cómo aumentan los valores de C y Cvx mientras que S no tiene una mayor correspondencia directa con C (tomado de Kasper-Zubillaga et al, 2023).



CAPITULO 2. Particularidades físicas del área de estudio

El área de estudio está ubicada en el estado de Sonora, en el noroeste de México ($31\text{--}32^{\circ} 25'\text{N}$; y $113^{\circ} 85'$ a 115°W). Los sitios de muestreo están ubicados en El Pinacate, San Luis Río Colorado, Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco (Kasper-Zubillaga et al. 2007).

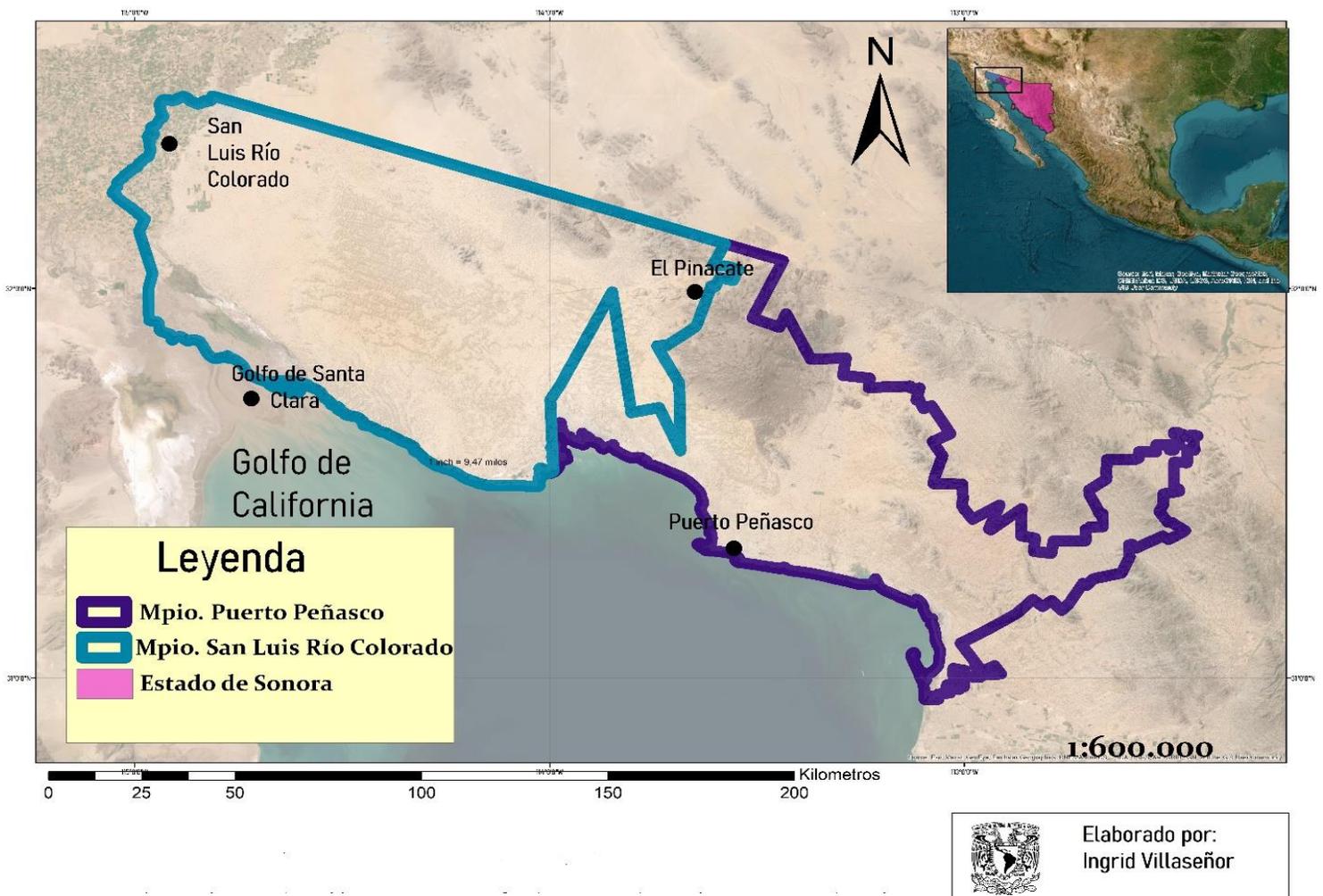


Fig. 8. Localización de áreas de muestreo.



El Pinacate y Gran Desierto de Altar, es considerado una de las regiones prioritarias de México debido a que se encuentra inmerso dentro del Desierto Sonorense, un desierto con un origen climático tropical–subtropical y un patrón de lluvias que permite una gran riqueza biológica (Houk, 2000, SEMARNAT 2018).

La Reserva cuenta con la mayor concentración de cráteres tipo “maar” en el mundo, además su escudo volcánico cuenta con más de 500 conos cineríticos, flujos de lava, lechos de arroyos, abanicos aluviales y macizos montañosos de basalto, toba y granito.

El gran desierto de Altar es el campo activo de dunas más grande de Norteamérica donde se forman las inusuales dunas estrella que solo existen en unas cuantas localidades del mundo. Las geoformas son muy variadas y contrastantes, lo que da como resultado una gran variedad de hábitats con la consecuente riqueza biológica y paisajística. Esta reserva forma parte del desierto Sonorense el cual es considerado el desierto más biodiverso del mundo (CONANP, 2023).

2.1 Geología

La historia geológica de Sonora comienza con la formación de su antigua corteza terrestre, hace aproximadamente 1,800 millones de años (Ma). Desde entonces y debido a los procesos de tectónica de placas, la región ha sido parte de diversas configuraciones continentales que van desde el antiguo continente Columbia, pasando por Rodinia, Pangea y hasta la actual Norte América. Las rocas más antiguas que forman su basamento son metamórficas de los bloques Caborca y Norte América que tienen edades entre 1600 y 1800 Ma (González, 2013). El territorio sonorense tiene una historia geológica bastante compleja. En él acontecieron varios eventos geológicos que dieron lugar a una diversidad de unidades litológicas, las cuales, por medio de los fenómenos endógenos (tectonismo y vulcanismo) y exógenos (erosión y depósito) sucedidos a través del tiempo, han transformado su estructura original y modelado el paisaje. En la entidad afloran rocas de origen ígneo, sedimentario y metamórfico, cuyas edades de formación comprenden desde el Precámbrico al Cuaternario, aunque algunos períodos sólo están representados en forma parcial Su composición litológica es variada, dominan las rocas anteriores al Terciario, las cuales en el este están cubiertas por efusiones volcánicas del Cenozoico.



Las llanuras son más amplias en el oeste, lugar donde se acumularon grandes cantidades de material de tipo eólico y aluvial. En esta provincia, desde el sur de Caborca hasta el noroeste del estado, afloran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias del Precámbrico. El Paleozoico por lo general está representado por calizas, ortocuarcitas y dolomías metamorfizadas. El Mesozoico por calizas y rocas detríticas de ambientes marino y continental; además de volcánicas (con predominio de composición andesítica) e ígneas intrusivas (granitos y granodioritas) que son las de mayor distribución en el Desierto Sonorense. Del Cenozoico se encuentran rocas volcánicas, entre las que predominan las de composición ácida.

Los afloramientos de conglomerados del Terciario tienen también una amplia distribución; sin embargo, la mayor parte de esta provincia se encuentra cubierta por depósitos sin consolidar del Cuaternario, localizados en las llanuras y bajadas (UNAM e INEGI, 2000).

La Sierra Madre Occidental abarca la parte oriental de la entidad, está constituida por una gran estructura ígnea orientada noroeste-sureste, presenta gran número de fallas de tipo normal que han formado fosas y pilares tectónicos. Las características estructurales y el depósito pseudohorizontal de su cubierta ignimbrítica le dan la forma de una extensa meseta. Su flanco occidental, del que se encuentra una parte en Sonora, es más abrupto que el oriental debido al fallamiento que presenta, lo cual originó escarpes (INEGI, 2000).

La Reserva engloba básicamente dos grandes componentes geológicos mayores que representan más del 95% de la superficie total: El campo de dunas móviles y fijas que cubre más de las tres cuartas partes y el Escudo volcánico El Pinacate que ocupa el otro cuarto restante. El resto, de menor importancia en superficie, se encuentra ocupado por los macizos cristalinos de granitoides, de esquistos y gneisses, las planicies costeras, llanuras aluviales y lechos de arroyos. Gran parte de los macizos cristalinos que forman el basamento del área son sierras formadas por rocas de naturaleza endógena con edades del Precámbrico al Terciario, predominando los del Precámbrico constituidos principalmente por granitos y rocas metamórficas (esquistos y gneisses). Estas formaciones representan las rocas más antiguas de la reserva y forman la parte dominante o completa de las sierras Blanca, Enterrada, Hornaday, El Choclo Duro, Los Alacranes, etc. La Sierra El Rosario que se encuentra aislada en el Gran Desierto (un excelente ejemplo de inselberg) está formada por



granitos de edad mesozoica (INEGI, 1982). El complejo montañoso de la Sierra de Los Tanques parece situarse entre el Cretácico y el Terciario (Haxel et al.,1984; Tosdal et al., 1990). El componente geológico dominante "campo de dunas" está situado en la parte occidental de la Reserva. Los campos de dunas del Gran Desierto de Altar forman un mar de arenas activas o Erg de más de 550 000 ha. (CONANP, 1995).

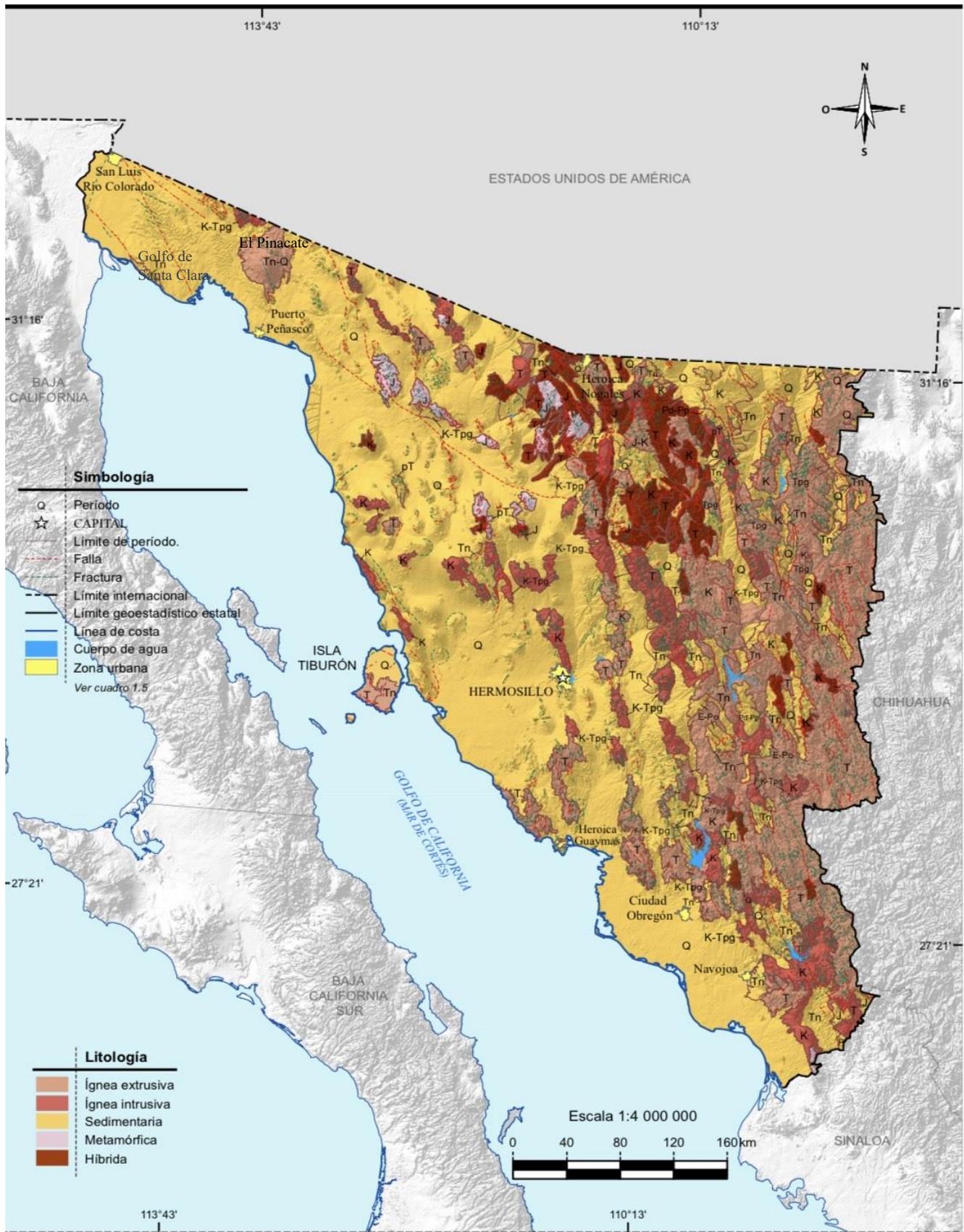


Fig. 9. Geología de Sonora (INEGI, 2005)



2.2 *Clima*

Aproximadamente en el 95.0% del territorio sonorense los climas son muy secos, secos y semisecos; se caracterizan por su alta temperatura y escasa precipitación (Fig.12). Como consecuencia de lo anterior es aquí donde se localiza la zona más árida del país: el Desierto de Altar (INEGI, 2007). El clima corresponde al clima seco desértico (BW). La región está caracterizada por una escasa precipitación pluvial, altas temperaturas en verano, intensa radiación solar, baja humedad relativa y alta evaporación. Las modificaciones del sistema climático de Köppen, propuestas por García (1981), colocan al clima como extremoso, muy árido o desértico, seco semicálido, con lluvias predominantes de invierno. La temperatura media anual se encuentra entre los 18 y 22°C y la precipitación promedio anual es menor a los 200 mm (CONANP, 1995).

La región en donde se localiza toda el área de la Reserva está caracterizada por una escasa precipitación pluvial, altas temperaturas en verano, intensa radiación solar, baja humedad relativa y alta evaporación. Las modificaciones del sistema climático de Köppen, propuestas por García (1981), colocan al clima como extremoso, muy árido o desértico, seco semicálido, con lluvias predominantes de invierno.

La temperatura media anual se encuentra entre los 18 y 22°C y la precipitación promedio anual es menor a los 200 mm. Algunos datos climatológicos en esta región provienen de tres estaciones oficiales como citó García (1981); adicionalmente el Centro de Estudios de Desiertos y Océanos, A.C. (CEDO), en Puerto Peñasco, tiene registros de temperatura, precipitación y vientos desde hace aproximadamente 15 años.

Las temperaturas de la región son de las más altas del hemisferio norte. May (1973) registró períodos continuos de temperaturas máximas por arriba de los 38°C durante tres meses en el verano de 1971-1972, destacando que los registros para junio y julio indicaron temperaturas máximas promedio de 49°C y una extrema máxima de 56.7°C para el mes de junio. De las tres estaciones meteorológicas citadas por García (1981), la de San Luis Río Colorado presenta la mayor temperatura promedio mensual con 34.3°C en junio, mientras que Puerto Peñasco registró la menor con 29.7°C. Para el invierno, los datos de May (1973), indican que la temperatura nocturna puede descender hasta -8.3°C. Estos datos indican el carácter



extremoso del clima regional. Respecto a la precipitación, ésta varía marcadamente en un gradiente del noreste hacia el suroeste. La mayor cantidad de lluvias se presenta en Sonoyta donde se han registrado 164 mm anuales, mientras que en Puerto Peñasco y San Luis Río Colorado la precipitación alcanza entre los 61 y 52 mm anuales respectivamente. También se observa que la cantidad esperada y frecuencia de las lluvias disminuye hacia el oeste (CONANP, 1995).

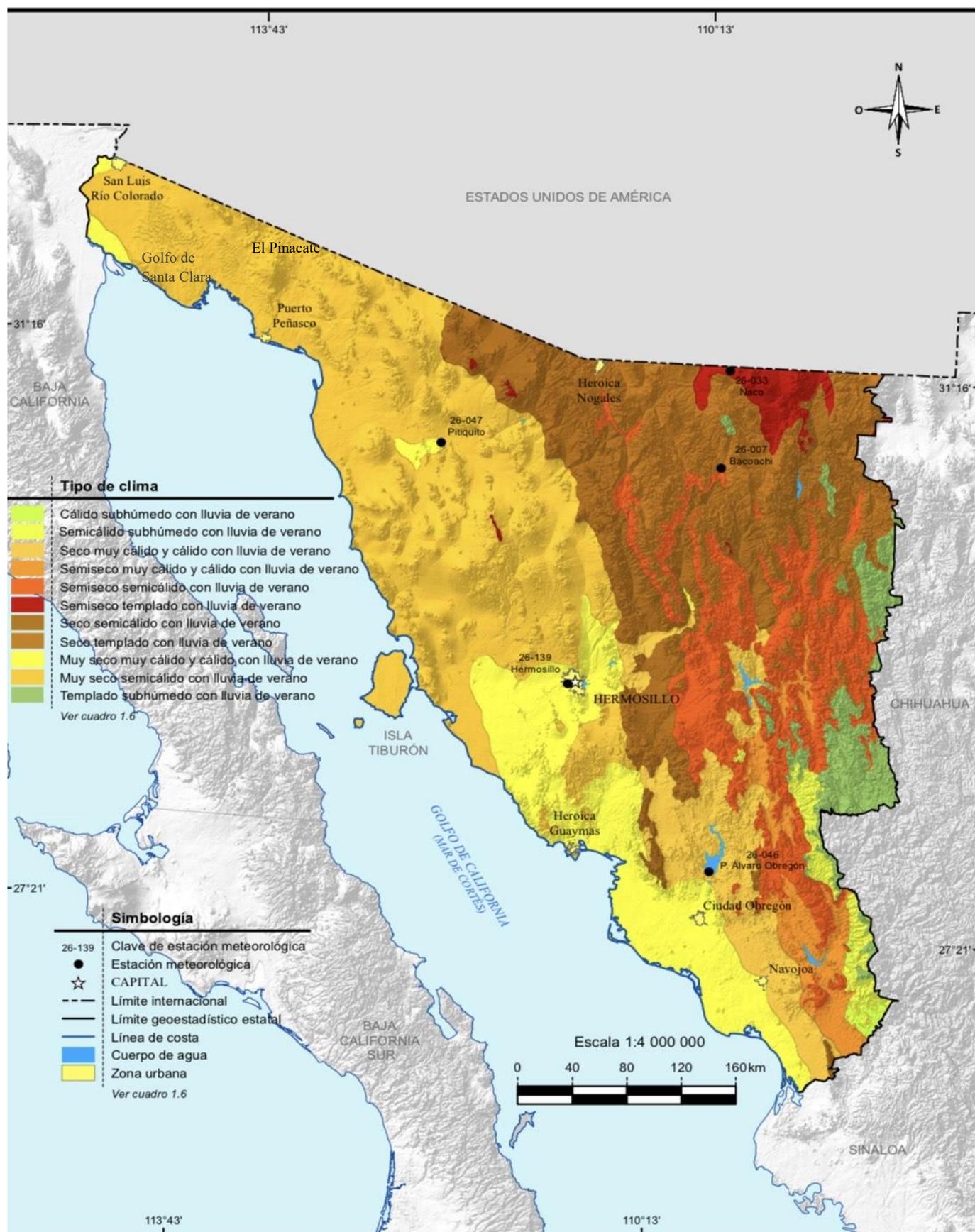


Fig. 10. Climas de Sonora (INEGI, 2005)



2.3 Fisiografía General

Está constituida en su mayoría por llanuras y sierras. El territorio es ancho en su parte septentrional y se va angostando poco a poco en su dirección al sur. Sonora es un Estado montañoso por encontrarse en la vertiente exterior de la Sierra Madre Occidental. De acuerdo con las características fisiográficas que presenta el estado, éste queda comprendido dentro de las provincias: Desierto Sonorense, Sierra Madre Occidental, Sierras y Llanuras del Norte y Llanura Costera del Pacífico. La porción occidental corresponde al Desierto Sonorense, que se caracteriza por la alternancia de sierras, bajadas y llanuras. En esta zona las sierras se formaron por procesos tectónicos, tienen una orientación noroeste sureste, están próximas unas de otras en el oriente y más separadas en el poniente (Fig. 9; INEGI, 2005). El río Sonoyta tiene influencia sobre la parte media del Alto Golfo de California drenando material hacia la costa. Actualmente el Río Colorado tiene nula influencia en el aporte de sedimentos al Alto Golfo de California (Vandivere and Vorster, 1984; Muhs et al. 2003; Kasper-Zubillaga et al, 2007).

En el oriente, el relieve se conforma por sierras y rocas de origen ígneo extrusivo o volcánico (se forman cuando el magma o roca derretida sale de las profundidades hacia la superficie de la Tierra), intrusivo (formadas debajo de la superficie de la Tierra), metamórfico (han sufrido cambios por la presión y las altas temperaturas) y sedimentario (se forman en las playas, los ríos, y océanos y en donde se acumulen la arena y barro), con elevaciones de 2 620 metros sobre el nivel del mar (msnm) como el cerro Pico Guacamayas, estas sierras están recortadas por valles que se encuentran entre serranías, el más amplio es el localizado al sur de la superficie estatal.

En la zona del occidente existe una llanura interrumpida por algunas elevaciones aisladas, como la sierra El Pinacate. La salida de los ríos ha formado llanuras en el noroccidente, centro y suroccidente de la costa, creando cuerpos de agua como el puerto de Yavaros.

En el noroccidente, frente a la isla Pelicano se encuentra el Desierto de Altar, conformado por campo de dunas (montañas de arena) (INEGI, 2020).

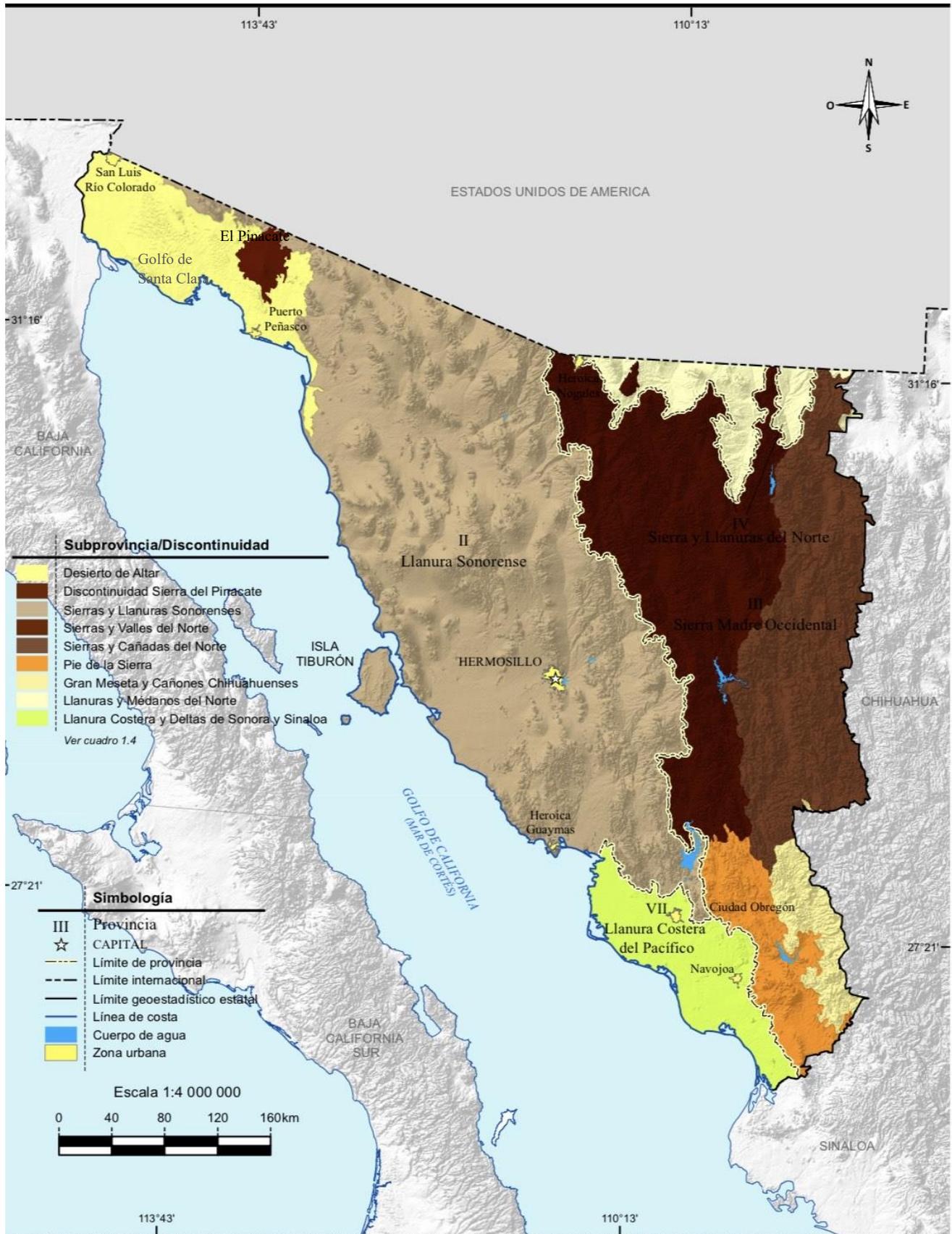


Fig. 11. Provincias fisiográficas de Sonora (tomado de INEGI, 2005)



2.4 Dunas en Sonora

Un extenso mar de arena de cinco mil kilómetros cuadrados, con tres fuentes de origen: a) los sedimentos fluviales y deltaicos del río Colorado, b) las playas del golfo de California y c) los abanicos fluviales y arroyos formados en la zona volcánica y en las sierras graníticas norteñas (Davis et al. 1990). Se trata del área más grande de dunas vivas en América, cuya fisiografía y dinámica adoptan tres formas: a) de medialuna (crecientes), localizadas hacia el este de la reserva, con una elevación de 10 a 80 metros; b) de estrella, hacia el oeste, con una elevación de 80 a 150 metros y c) las de alta reversión, ubicadas alrededor del sistema anterior, que se elevan de 10 a 20 metros. La misma fisiografía y dinámica de las dunas ha depositado la arena de mayor antigüedad en la parte central de las dunas en forma de estrella, mientras que la de menor edad se encuentra al norte de la bahía Adair (Garduño et al., 2012).

El componente geológico dominante "campo de dunas" está situado en la parte occidental de la Reserva. Los campos de dunas del Gran Desierto de Altar forman un mar de arenas activas de más de 550 000 ha.

Estas dunas pueden agruparse en dos tipos principales: dunas bajas, lineares en planicies arenosas, y dunas transversales, crecénticas y compuestas en forma de estrella. Aunque el primer tipo domina (aprox. 70%), las dunas crecénticas complejas y las dunas de estrella son de mayor importancia ya que sólo existen en unas cuantas localidades en el mundo (Breed et al., 1979) y consecuentemente existe muy poca información respecto a su génesis y comportamiento (CONANP, 1995).

2.5 Vientos

Como es sabido, la dinámica de las dunas está determinada por la intensidad y dirección del viento, el cual produce el fenómeno de "sedimentación eólica".

Los vientos proceden de tres direcciones: a) del norte, en invierno; b) del oeste, en primavera y c) del sur, en verano. La acción eólica transporta de 25 a 30 por ciento del material que se mueve en este mar de arena, y determina las formas de las dunas (Garduño, et al. 2012).



Las dunas de arena se forman debido a las fuerzas de erosión y deposición de la tierra. La arena que resulta en la formación de dunas de arena es erosionada de las rocas por procesos físicos y químicos como el viento y el agua. La erosión conduce a la acumulación de arena. Los fuertes vientos recogen la arena y la transportan (típicamente ligeramente por encima del suelo) a otro lugar.

El fuerte viento transporta arena en cualquiera de las tres direcciones:

★ Saltación

Aquí, la arena se mueve en un flujo turbulento o rebotando ligeramente por encima del suelo. Aproximadamente el 95% de los granos de arena que vuela el viento se mueven en esta dirección.

★ Suspensión

Aquí es donde los granos de arena se vuelan en el aire y luego se asientan. Aproximadamente el 1% de la arena que sopla el viento se mueve en esta dirección.

★ Arrastramiento

Es un proceso por el cual los granos de arena chocan con otros granos (grava o arcilla), lo que les incita a moverse. Aproximadamente el 45% del movimiento de la arena utiliza este tipo de movimiento.

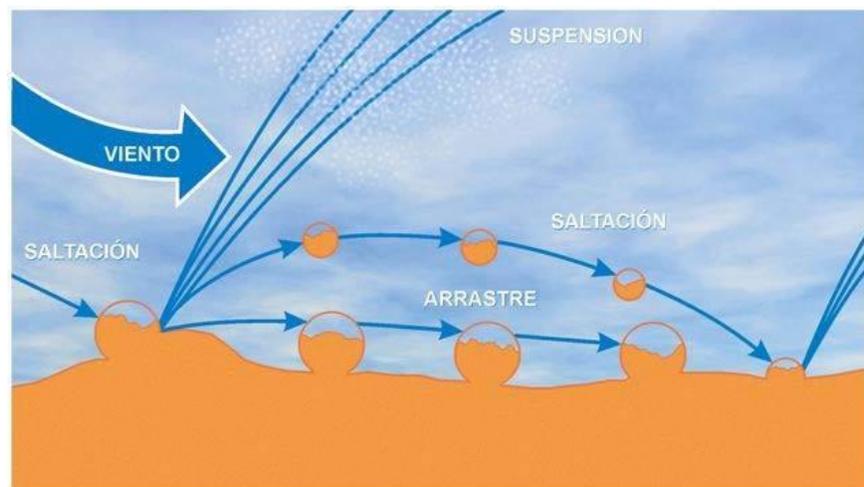


Fig. 12. Secuencia de erosión eólica. Fuente: Jaramillo, I. Miranda, A., 2003.



CAPÍTULO 3. Características sedimentológicas de las dunas costeras y continentales de Sonora

3.1 Metodología y equipo

a) Cartografía

Se elaboró la respectiva cartografía que incluye la geomorfología de las regiones de las dunas a analizar en el estado de Sonora ubicadas en San Luis Río Colorado, El Pinacate, Golfo de Santa Clara y áreas de Puerto Peñasco, utilizando el software QGIS 3.16.11 (Figs. 4 y 10).

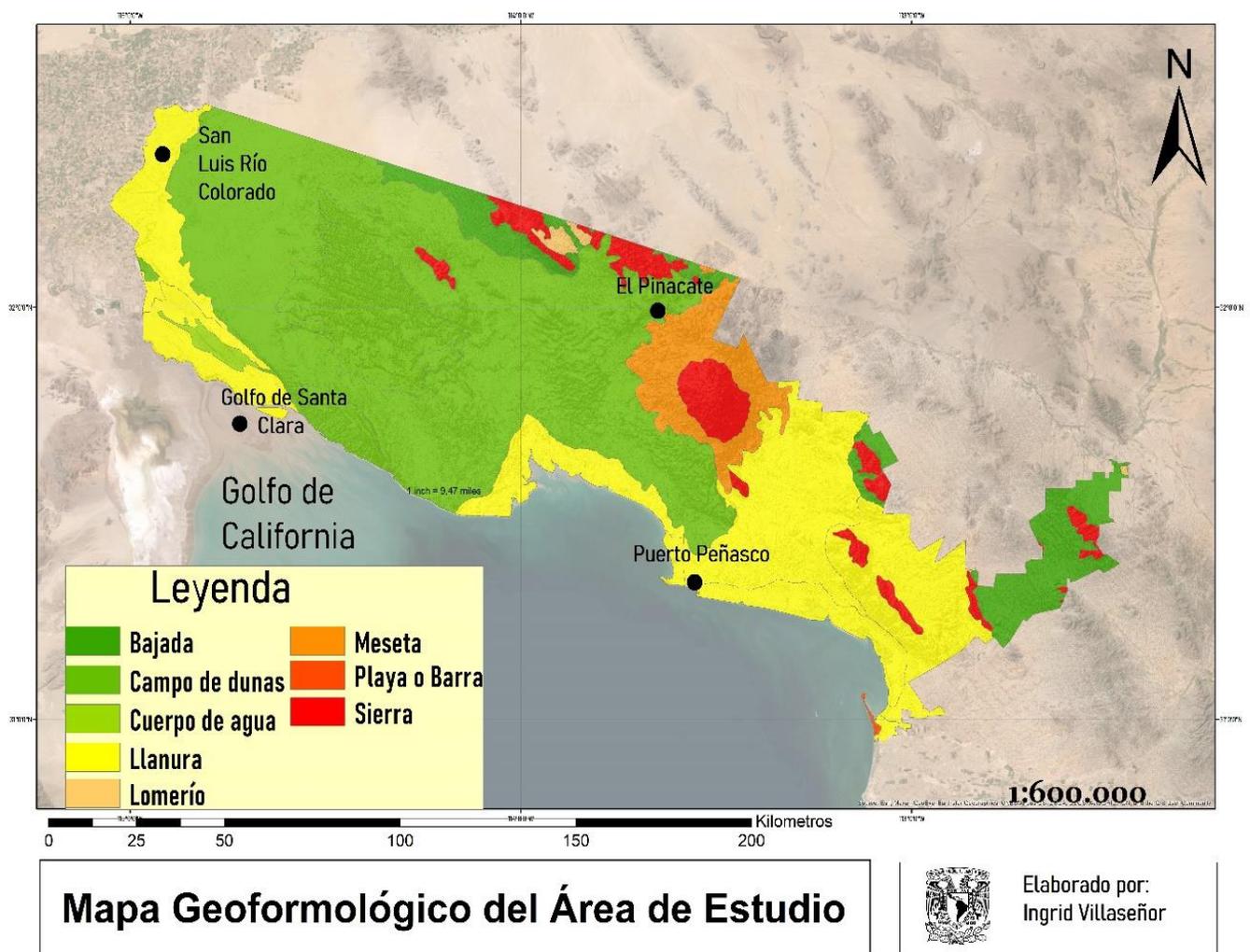


Fig. 13. Geomorfología de las áreas de estudio



b) Tamaño de grano, análisis modal y geoquímica de sedimentos

En un estudio previo, se realizaron determinaciones sedimentológicas, composicionales y geoquímicas en 54 muestras de arena de dunas costeras y desérticas para estudiar la procedencia de dunas costeras y desérticas del Desierto de Altar, Sonora, México (Kasper – Zubillaga et al, 2007).

c) Curaduría de la Arenteca del Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML) de la UNAM, sede CU.

A partir del trabajo de curaduría a cargo de Ingrid Villaseñor Guerrero de la Facultad de Filosofía y Letras / Colegio de Geografía UNAM se procedió a organizar las muestras de arena de dunas costeras y continentales de Sonora, México para el trabajo de separación de granos de cuarzo (Figs. 8 a, b). Estas mismas fueron organizadas en un periodo de seis meses, para esta tarea se proporcionaron publicaciones científicas, las cuales contenían la información adicional que debían indicarse en las etiquetas para los frascos donde se contienen las muestras, como localidad, coordenadas, tipo de duna, tipo de arena, características, asimetría y curtosis, etc. Posteriormente se procedió al etiquetado de los frascos con la información recabada.

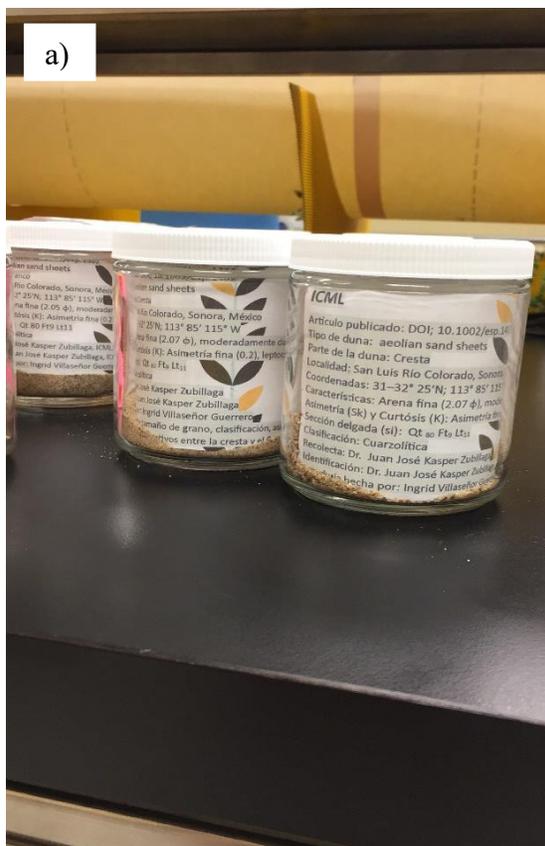


Figura 14. Arenoteca del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. a) Etiquetado de muestra de San Luis Río Colorado, Sonora. b) Vista general de los frascos con muestras de arena de duna.



d) Separación de cuarzo

Los minerales de cuarzo se separan de forma manual a través de su observación de un microscopio binocular Velab (10 X) (n = 36). El procedimiento consiste en identificar los cristales transparentes (cuarzo) y con un fino pincel separar y pegar el grano en un portaobjeto para su posterior pretratamiento y observación al Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) dentro del Laboratorio de Microscopía Electrónica del ICML de la UNAM (ver Mejía-Ledezma et al, 2020).

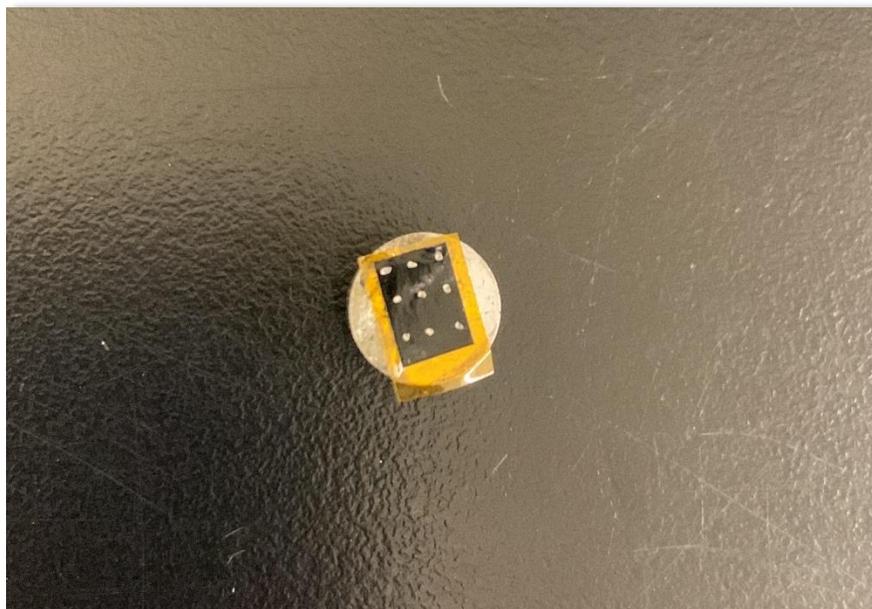


Figura 15. Portaobjetos con granos de cuarzo separados manualmente, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.



e) Microscopia Electrónica de barrido (**MEB**).

El MEB es una herramienta que se emplea para la obtención de imágenes superficiales de minerales u otros objetos que se deseen examinar mediante la incidencia de un haz de electrones sobre la muestra que permite la observación directa de los granos de cuarzo, lo que hace la técnica más eficaz, ya que, se obtienen imágenes tridimensionales óptimas en escala de grises de los granos debido a su gran enfoque, lo que facilita la identificación de micro texturas, recubrimientos y partículas adheridas.

Estos microscopios trabajan con un haz de electrones para generar la imagen y en condiciones de alto vacío (10^{-6} torr), las partes esenciales del microscopio son: columna de electrones, consola de controles y sistema de adquisición de imágenes.

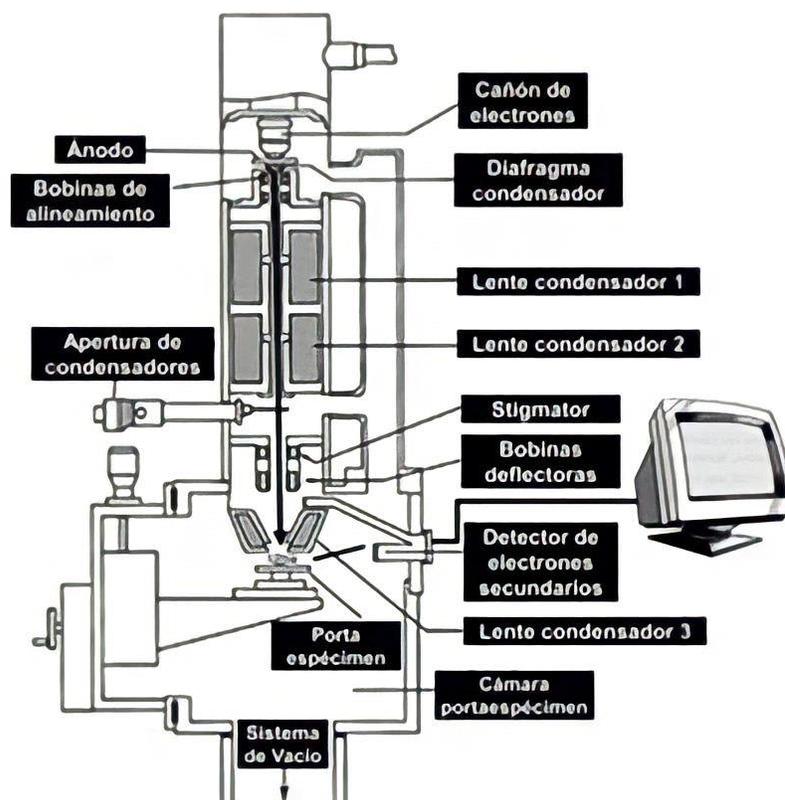


Figura 16. Estructura interna del MEB/SEM (tomada de UAM, (2018))



Se requieren dos condiciones para analizar muestras en un **MEB** que se encuentren libres de humedad y sean conductoras. En estos microscopios las muestras no conductoras (orgánicas, biológicas, vidrios, polímeros) necesitan una cubierta metálica para lograr su observación, generalmente una cubierta de oro, o con carbono cuando se quiere realizar análisis químico por Microsonda de Barrido.

Por otro lado, las muestras conductoras pueden ser revisadas sin ningún tipo de cubierta. La microscopía electrónica de barrido es una técnica que permite caracterizar una gran variedad de materiales, como nanoestructurados, aleaciones metálicas, polímeros, minerales, fibras, películas delgadas, biomateriales y en algunos casos muestras con alto contenido en humedad. Los materiales restrictivos para realizar análisis son aquellos con propiedades magnéticas, a menos, que se fijen apropiadamente en alguna matriz de contención (Hanako, 2021).

Así, para efecto del presente trabajo, los granos de cuarzo se recubren en oro y se montan en un carrusel para la observación por separado en un Microscopio Electrónico de Barrido SEM-Jeol-JSM6360LV. Un voltaje de 10KV se usa al alto vacío y el distanciamiento de 15 mm se usa para un aumento a 200X. Las imágenes son eventualmente editadas a través de Corel Photo Paint para su mejor resolución.



f) Procesamiento de las imágenes y datos observados.

Las imágenes del mineral en silueta se digitalizaron a través de imágenes 2D con el software JMicrovision v.1.3.4 (Roduit, 2007, 2019) para determinar la compacidad del cuarzo.

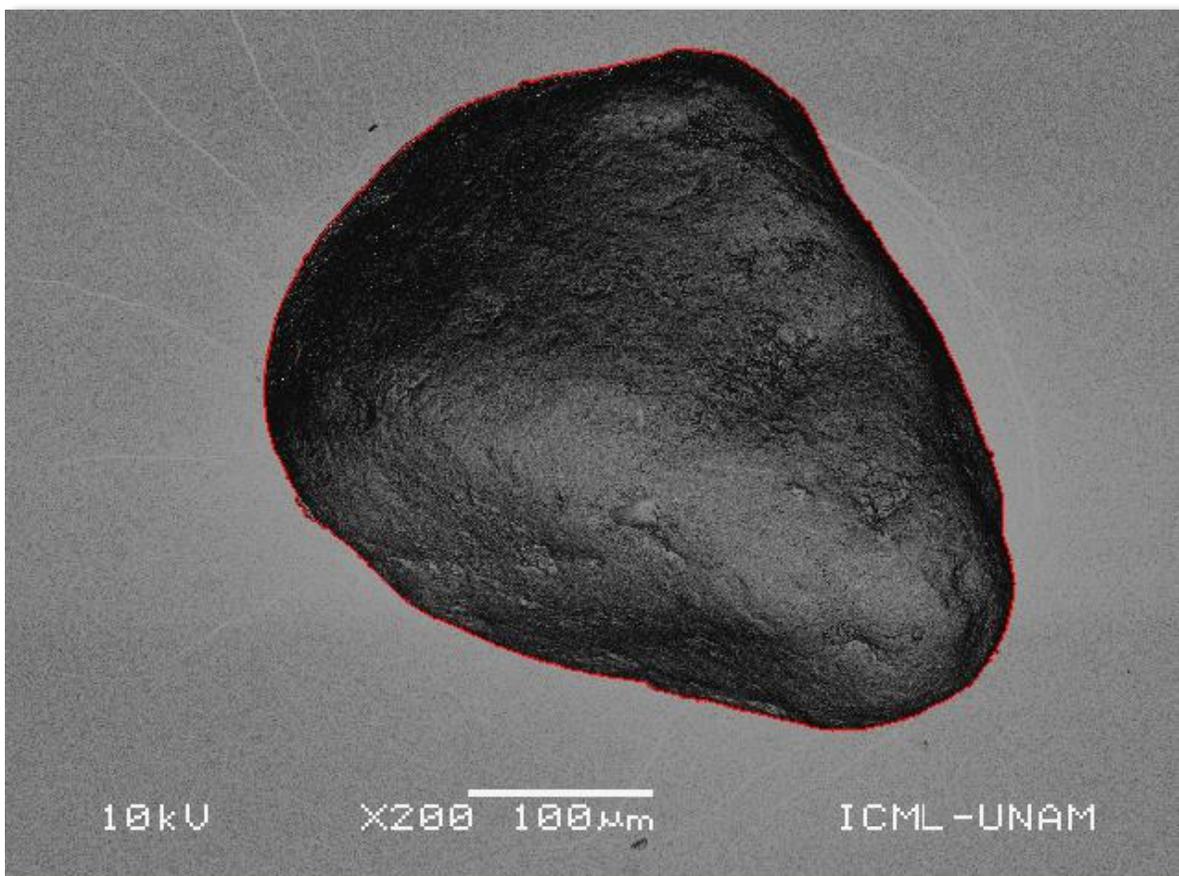


Figura 17. Mineral de cuarzo. El contorno rojo indica la compacidad obtenida a través del software JMicrovision v.1.3.4



3.2 Áreas de muestreo

San Luis Río Colorado

San Luis Río Colorado se localiza en la porción noroeste del Estado de Sonora, en la región noroeste de México. El municipio está ubicado en el extremo noroeste del estado de Sonora, su cabecera es la población de San Luis Río Colorado y se localiza en el paralelo 32° 30' de latitud norte y a los 114° 46' de longitud al oeste del meridiano de Greenwich, a una altura de 27 metros sobre el nivel mar.

La principal característica hidrogeográfica en la zona de SLRC es el Río Colorado. El río Colorado y sus tributarios fluyen a través de la Gran Cuenca y los desiertos de Sonora y Mojave, proveyendo líquido vital para el desarrollo de la vida de la población local y el ecosistema en esta zona árida (CONAGUA, 2014). Actualmente el Río Colorado no aporta sedimentos al Alto Golfo de California y su Delta es la principal fuente sedimentaria de las dunas del Desierto de Sonora (Muhs et al, 2003; Kasper-Zubillaga et al., 2007).

Clima

Clima muy seco semicálido con lluvias en verano e invierno. Temperatura media anual 18-24°C. Precipitación total anual menor a 100 mm (CONABIO, 2017).

Golfo de Santa Clara

Está ubicado sobre la costa del estado de Sonora dentro del Golfo de California en inmediaciones de la desembocadura del Río Colorado, en la zona de la comunidad Cucapa, pertenece al municipio de San Luis Río Colorado del estado mexicano de Sonora, y a una distancia de 250 Kms. de la Ciudad del mismo nombre San Luis Río Colorado (SEMAR, 2022).



Dinámica costera y vientos

En la costa influye una corriente litoral de aproximadamente 4 cm /s de velocidad (Fernandez-Eguiarte et al., 1990). Es importante el rango de marea de ~10 m amplitud (Thompson, 1968; Cupul, 1994) y los vientos dominantes del noroeste, suroeste y sureste con velocidades entre 2 a 6 m / s (Pérez-Villegas, 1990).

Puerto Peñasco

El municipio de Puerto Peñasco se encuentra situado en la porción Noroeste del Estado de Sonora, México, colinda al Norte con los Estados Unidos de Norteamérica y el municipio Gral. Plutarco Elías Calles, al Noroeste con San Luis Río Colorado, al Sureste con Caborca y su límite al Sur es el Golfo de California.

Clima

Presenta un clima seco semicálido, con una temperatura media máxima mensual de 28.7 °C en los meses de julio y agosto y una media mínima mensual de 12.1 °C en diciembre y enero, la temperatura anual es de 20.1 °C (SEMAR, 2022).

El Pinacate

Es un lugar de características geológicas notables. Es el campo activo de dunas más grande de Norteamérica y presenta las inusuales dunas en forma de estrella. En el área se encuentra un espectacular escudo volcánico, donde existen flujos de lava, conos cineríticos y los impresionantes cráteres gigantes.



Es una región terrestre prioritaria (RTP) derivada de la presencia de un escudo volcánico, así como por las extensas zonas de dunas activas que lo rodean. Corresponde a un ANP manejada por el INE y decretada en 1993. La gran variedad de asociaciones vegetales en las dunas y en los derrames de lava, presentan características especiales y un valor ecológico único. Contiene flora y ecosistemas propios de los desiertos, entre ellos, 560 especies de plantas vasculares divididas en 315 géneros y 85 familias, sobresaliendo las compuestas, las gramíneas, las leguminosas, las euforbiáceas, las quenopodiáceas y las cactáceas. Respecto a la fauna, se encuentran 53 especies de mamíferos, 222 de aves, 43 de reptiles y 5 de anfibios. La vegetación comprende matorrales xerófilos, chaparrales, mezquites y matorrales arborescentes, aunque genéricamente los tipos más representativos de acuerdo con su distribución en la RTP son la vegetación de desiertos arenosos y el matorral desértico micrófilo.

Muy árido, semicálido, temperatura entre 18° y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C; lluvias entre verano e invierno mayores al 18% anual (CONABIO, 2017).

3.3 Sedimentología de arenas

La arena en las playas, en los ríos, en las dunas, en los deltas, etc., son el resultado de la acumulación de pequeñas partículas desde un área fuente que se está erosionando, su transporte mediante los ríos, el viento, el hielo, etc., hasta un lugar más o menos deprimido y de ambiente tranquilo donde se sedimentan.

El área fuente de una arena hace referencia al entorno original de donde proceden los granos terrígenos del depósito. Es muy frecuente encontrar granos de cuarzo en un sedimento



arenoso; sin embargo, ¿de dónde procede ese cuarzo? Sin lugar a duda, ese cuarzo procede de una roca que estaba expuesta a la erosión, y que al disgregarse “liberó” un fragmento de cuarzo que fue modificando su forma hasta convertirse en el grano de arena que vemos actualmente. Por lo tanto, existe una relación directa entre los componentes minerales que vemos en el depósito y la naturaleza mineral del área fuente (Corbí y Martínez, 2015).

Madurez composicional y textural de un sedimento

Si nos imaginamos un sedimento procedente de un área fuente muy lejana, y que por tanto ha sufrido un transporte y retrabajamiento muy intenso, debemos pensar en unos granos muy abrasionados, muy esféricos y muy bien seleccionados, teniendo en cuenta lo que hemos visto anteriormente. Cuando se cumplen estas tres características decimos que un sedimento posee una madurez textural muy alta. En el caso contrario, un sedimento poco transportado poseerá granos angulosos, poco esféricos y con una gran variabilidad de tamaños. Es decir, será un sedimento con una madurez textural muy baja. Pero ¿cuál será la mineralogía predominante en uno u otro caso? La mineralogía final de un depósito depende en gran medida del tipo de rocas que afloran en el área fuente, pero a muy grandes rasgos podemos decir que cuanto mayor sea el porcentaje de minerales “duros” (cuarzo, y en menor medida feldespatos), mayor será la madurez composicional. Mientras que cuando predominen los minerales “blandos” (calcita, micas, etc.), menor será la madurez composicional.

Conociendo la madurez textural y composicional de un sedimento podemos deducir muchos aspectos del ambiente en el que se desarrolló un determinado depósito.

Una arena muy mal seleccionada, con granos angulosos y poco abrasionados y una mineralogía muy variada incluyendo minerales resistentes y menos resistentes (es decir, una arena inmadura) nos indica una zona tectónicamente activa, en la que existen relieves montañosos próximos y, por tanto, una región con bastante inestabilidad.



Por el contrario, una arena bien seleccionada, con granos abrasionados y una mineralogía donde predominan los minerales resistentes (una arena madura) nos indica que ha existido un largo e intenso transporte desde las áreas fuente hasta la zona de acumulación (las zonas montañosas están alejadas) y por tanto constituye una zona tectónicamente estable y poco activa.

Ciertos ambientes sedimentarios se caracterizan por una determinada energía del medio y por una determinada intensidad de transporte de sus partículas. Eso da lugar a que estos ambientes sedimentarios presenten habitualmente un determinado tamaño de grano, selección y/o redondez en sus granos. La figura 11 muestra un ejemplo de cómo suele ser la arena de una playa, de una duna, de un río y de una colada de barro según su tamaño de grano y su selección (Corbí y Martínez, 2015).

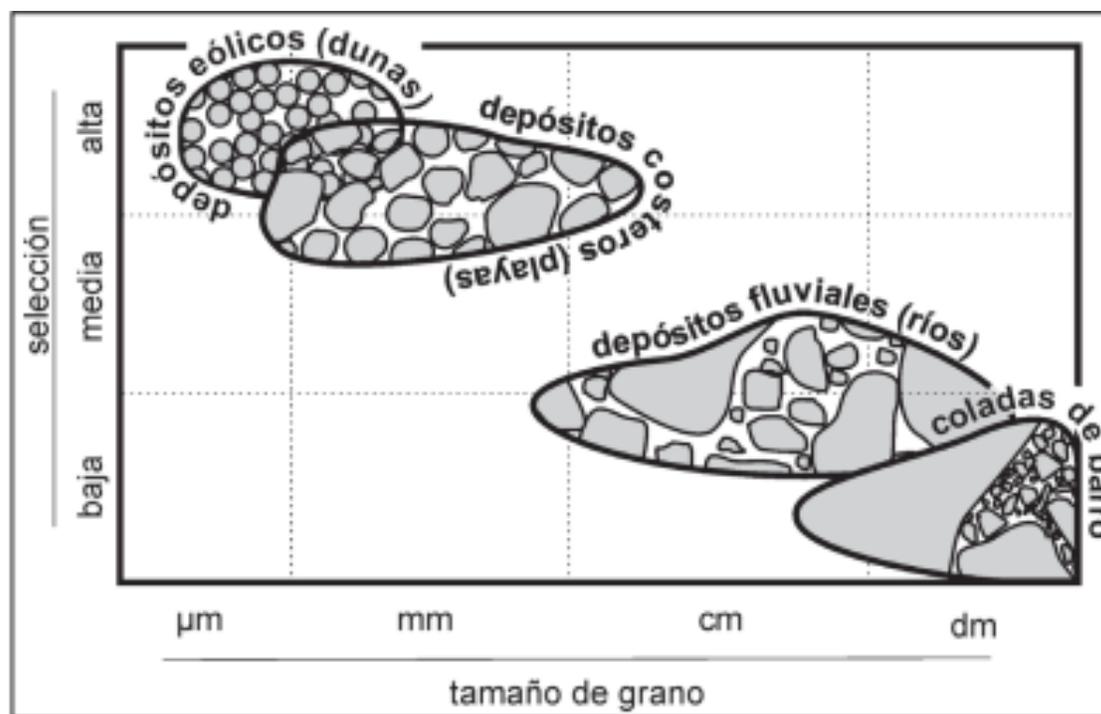


Figura 18. Ejemplos de distintas arenas de una playa, de una duna, de un río y de una colada de barro según su tamaño de grano y su selección. (Corbí y Martínez, 2015).



Tamaño de grano y selección

El término arena está dedicado para el conjunto de partículas de rocas disgregadas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 milímetros. El sorting o selección hace referencia al grado de similitud en el tamaño de grano de las partículas, de forma que se considera que el sedimento está bien seleccionado, si todas las partículas son del mismo tamaño, y mal seleccionado, si presenta grandes diferencias entre el tamaño de grano.

Composición

Cuando observas los granos de una muestra de arena, éstos pueden corresponder a bioclastos; restos de organismos con exoesqueletos duros como conchas, caparazones, espículas de esponja, radiolas de erizo, etc.) que al morir se descomponen y son transportados y acumulados por el mar, mezclándose con el resto de los sedimentos. Unas ocasiones podremos reconocer estructuras enteras. Otras, en cambio, únicamente lograremos ver pequeños fragmentos curvos y quizá nacarados que nos recuerdan a esas estructuras.

Por otro lado, tendremos los granos detríticos; aquellas partículas formadas por fragmentos de roca. En ocasiones, sobre todo cuando el tamaño de la arena es fino o muy fino, estos fragmentos son monominerales. Sin embargo, cuando el tamaño alcanza los varios milímetros de diámetro, o incluso el orden centimétrico/decimétrico, es poco frecuente que las partículas sean monominerales, sino que suelen constituir fragmentos de roca con características texturales y minerales reconocibles.

Las partículas monominerales más frecuentes en el sedimento son: cuarzo, feldspatos y calcita. El cuarzo se reconoce fácilmente en una muestra de arena por su gran transparencia. El color suele ser blanco o grisáceo, pero no es difícil encontrar granos de cuarzo con tonalidades rosadas, rojizas o más oscuras. Otra característica identificativa es la ausencia de maclas o planos de exfoliación, de forma que aparecen como masas más o menos homogéneas y masivas (Corbí y Martínez).



Forma

De acuerdo con Corbí y Martínez, para el análisis de la forma existen una serie de cartas de estimación visual del redondeamiento y la esfericidad que pueden presentar los granos (Fig. 19). El redondeamiento indica el grado de suavidad que presenta la superficie de un grano, o en sentido opuesto, la angulosidad de los contornos de la partícula. Por su parte, la esfericidad expresa la forma de la partícula por comparación con tres figuras geométricas simples: disco, esfera y prisma. Para analizar la forma de los granos se propone realizar la comparación visual con la figura 19. En primer lugar, se considerará toda la muestra, estableciendo la redondez y esfericidad del conjunto de la población de granos. Asimismo, y siempre que sea posible diferenciar dos o más poblaciones dentro del conjunto de granos (cuarzo, feldespatos y calcita normalmente), podrán establecerse distintos rangos de esfericidad y redondez para cada uno de estos componentes.

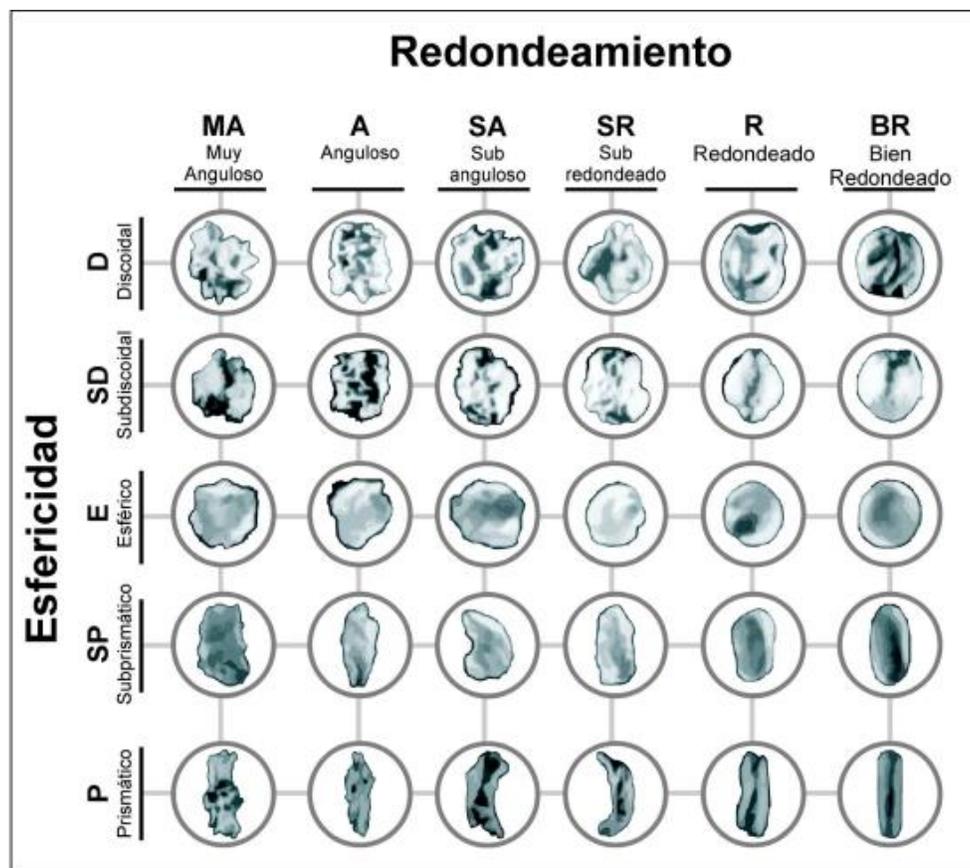


Figura 19. Tabla comparativa para la caracterización del grado de redondez y esfericidad que presenta un grano de arena basado en Powers, 1982. Corbí y Martínez (2015).



3.4 *Ambientes sedimentarios*

Son los Escenarios donde ocurren los procesos sedimentarios. Si los escenarios ocurren sobre el área continental son ambientes continentales, y si ocurren en los fondos marino son ambientes marinos.

De manera general, el término de ambiente sedimentario está definido como el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que se encuentran afectando la sedimentación (Fraser, 1989).

Un ambiente deposicional o ambiente sedimentario es simplemente un punto geográfico donde se acumulan los sedimentos. Cada lugar se caracteriza por una combinación de procesos geológicos (procesos sedimentarios) y condiciones ambientales (físicas, químicas y biológicas) que la diferencian de zonas adyacentes.

Algunos sedimentos, como los sedimentos químicos que precipitan en cuerpos de agua, son solo el producto de su ambiente sedimentario. Es decir, los minerales que los componen ser originaron y se depositaron en el mismo lugar. Otros sedimentos se forman lejos del lugar donde se acumulan y son transportados a grandes distancias de su origen por una combinación de gravedad, agua, viento y hielo.

En cualquier momento la situación geográfica y las condiciones ambientales de un ambiente sedimentario determinan la naturaleza de los sedimentos que se acumulan.

Por medio del estudio de los procesos y sedimentos depositados en ambientes actuales ayudan a interpretar sedimentos antiguos, ya que los tipos de estratificación también pueden observarse en rocas sedimentarias antiguas (USON, 2011).

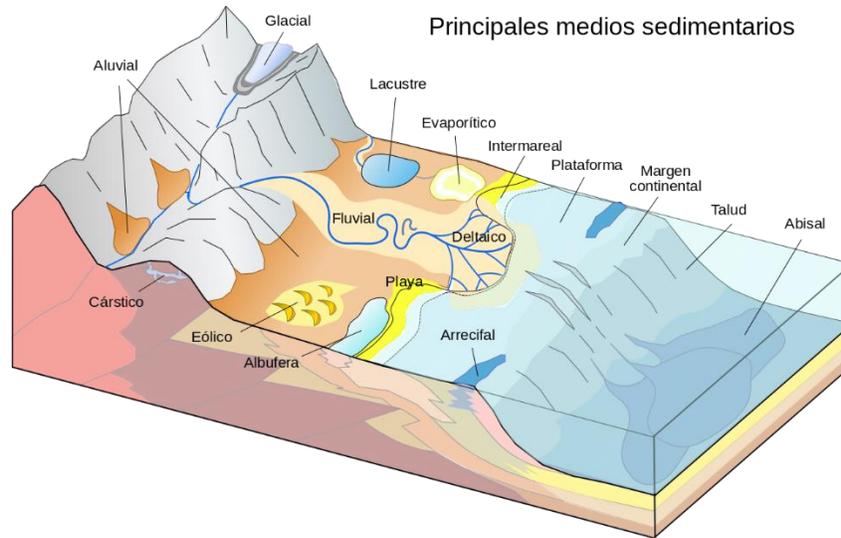


Figura 20. Principales medios sedimentarios (Geoenergía, 2014).

El balance de los procesos sedimentarios puede producir principalmente erosión y no dejar registro alguno o bien producir el depósito de sedimentos y rocas sedimentarias.

Un ambiente sedimentario es un sitio geográfico que se caracteriza por:

- + Una morfología tal que favorece la acumulación de sedimentos
- + Estar dominado por un medio (subaéreo o subacuoso) y un agente de erosión-transporte
- + En el que habitan organismos que pueden controlar o modificar el tipo de depósito
- + Estar en un cierto tipo de clima
- + Encontrarse en un determinado marco tectónico

Este conjunto de condiciones ambientales y procesos geológicos resultado de ellas, determina el tipo de sedimento depositado, cuyo conjunto de características específicas se denomina facies sedimentaria.

Elementos generales para interpretar el ambiente y origen/naturaleza de los sedimentos

- Tamaño y redondez-angulosidad de los granos



En un sedimento, dependen en parte de la intensidad de erosión e intemperismo al momento de depositarse y en parte de la composición química, sistema cristalino y dureza de los granos minerales.

En general entre más grandes y angulosos los granos el depósito ocurrió más cerca de la fuente de aporte.

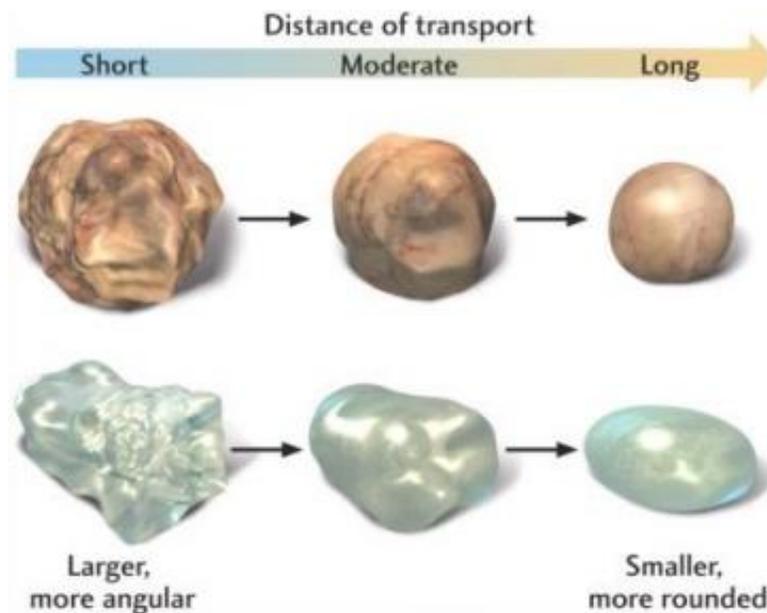


Figura 21. Tamaño y redondez-angulosidad de los granos (Caballero, 2023).

- Selección

La selección refleja la energía del flujo del medio de transporte al momento de depositarse el sedimento.

El término alude además al proceso por el cual los sedimentos de tamaño similar son segregados naturalmente durante el transporte y la depositación, de acuerdo con la velocidad y el medio de transporte. Los sedimentos con buena selección son de tamaño similar (tal como la arena del desierto), en tanto que los sedimentos pobremente seleccionados poseen un amplio rango de tamaños de granos (como sucede en el aluvión glaciar). Una arenisca bien seleccionada tiende a tener mayor porosidad que una arenisca



pobremente seleccionada debido a la falta de granos suficientemente pequeños para rellenar sus poros. Los conglomerados tienden a ser rocas pobremente seleccionadas, con partículas oscilantes entre el tamaño del canto rodado y el de la arcilla (Schumberger, 2023).

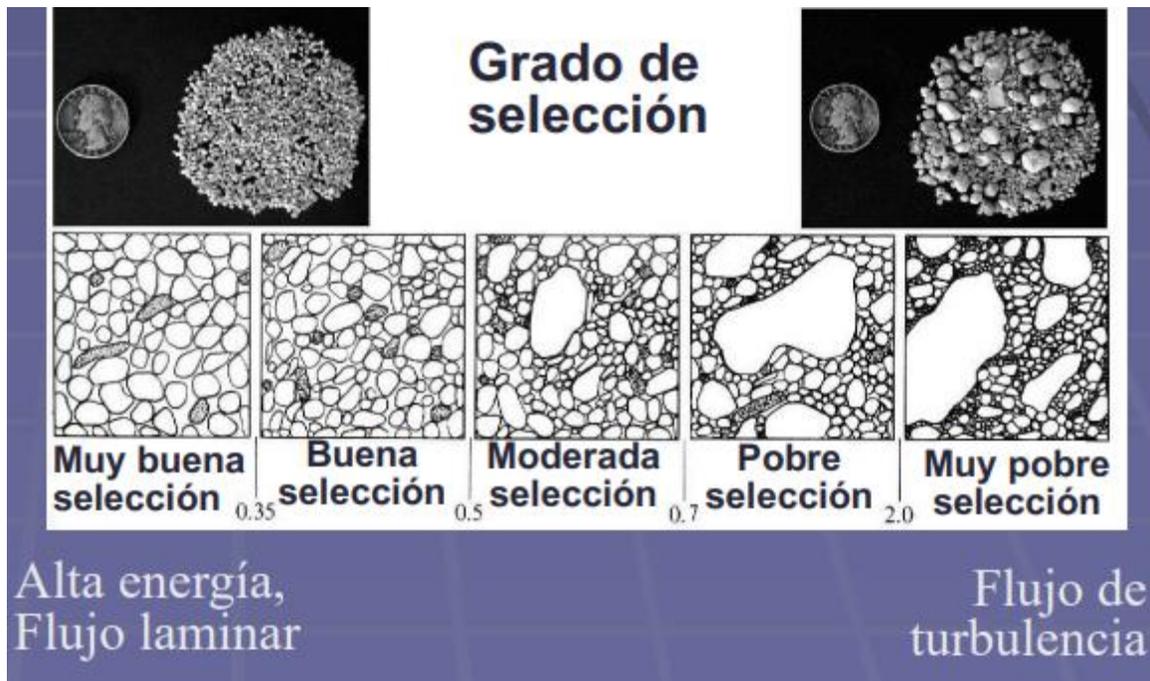


Figura 22. Grado de selección en granos de arena (Caballero, 2023).

Depósitos y secuencias sedimentarias

Se trata de las fracciones más finas de arcillas, limos y arenas disgregadas de las rocas por intemperismo o erosión y, que son transportadas y acumuladas por el viento, sobre todo en regiones bajas donde sopla con fuerza y en dirección constante.

Los más frecuentes: depósitos eólicos

- Transporte eólico: suspensión, saltación o arrastre superficial
- Sábanas eólicas: extensos depósitos arenosos, viento de alta v, superficies planas, granulometría heterogénea
- Dunas: arena, diferentes formas



- Mares de arena o “ergs”
- Campos de dunas

Sedimentación eólica

Comúnmente, la sedimentación eólica se da después de que las partículas sedimentarias han perdido energía al cesar el viento. Generalmente los sedimentos transportados por suspensión viajan largas distancias para luego ser depositados por efectos de la gravedad y por la pérdida de energía de transporte, mientras que, para los sedimentos o partículas transportadas por arrastre y saltación tienden a viajar pequeñas distancias, y su tamaño tiende a ser más grande que las transportadas en suspensión. La acumulación de estos depósitos y, por tanto, el aumento de presión y el paso de los años da lugar a rocas sedimentarias cuya estructura interna es muy característica y fácilmente identificable.

Ejemplos del tipo de deposito

Loess: acumulaciones espaciadas entre 5 cm y 2 m, con alturas de 0,1 a 5 centímetro



Dunas: pueden estar separadas entre 3 y 600 m y presentar alturas entre 0,1 y 15 metros.





RESULTADOS Y DISCUSION

De acuerdo con los resultados de compacidad obtenidos a través del análisis de cada muestra/grano de cuarzo (véase Anexo), en el área de estudio de El Pinacate, San Luis Río Colorado, Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco se observaron compacidades de 0.66, 0.70, 0.47 y 0.68 respectivamente (Fig.23)

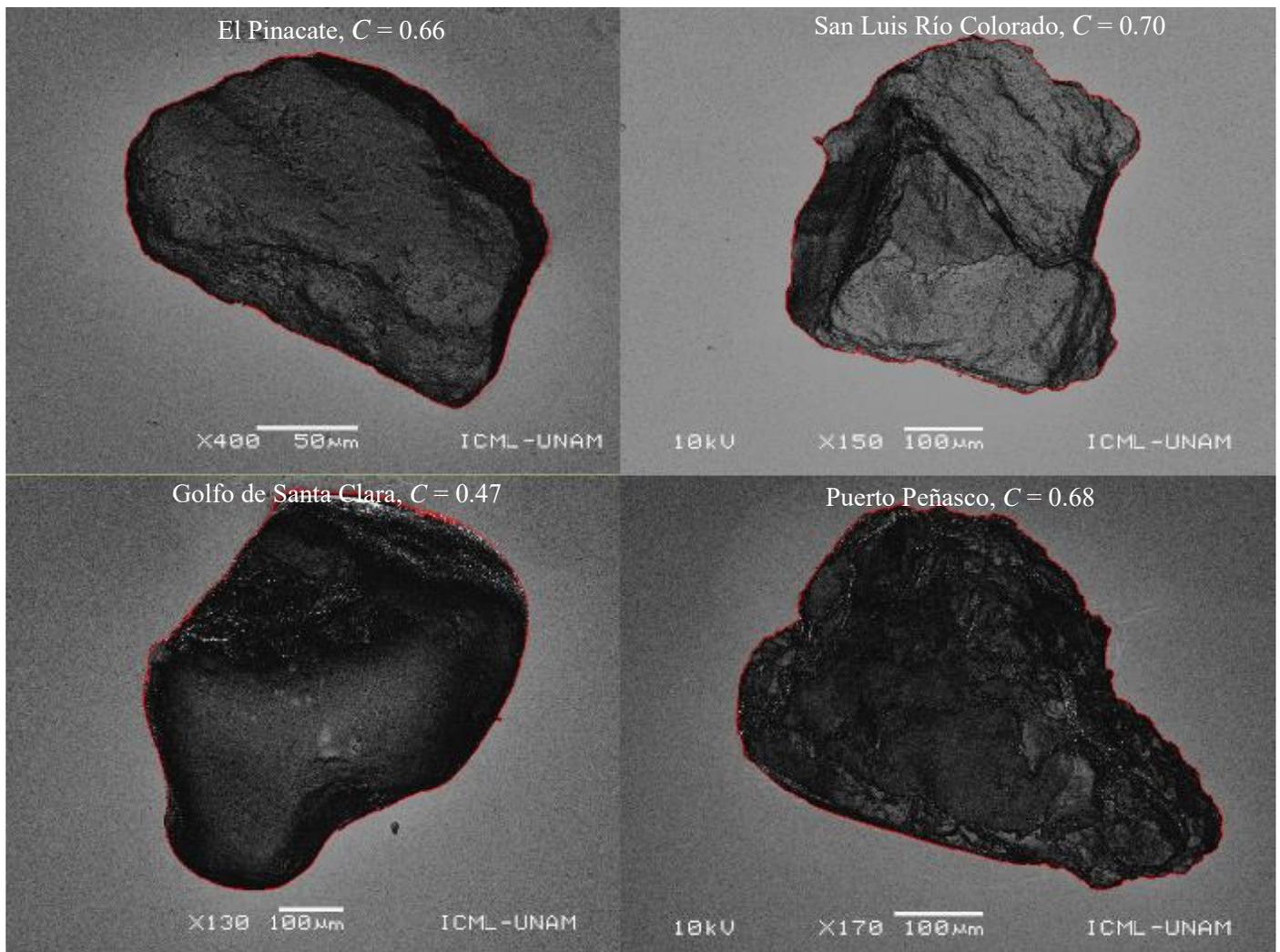


Fig. 23. Compacidad promedio de las zonas de muestreo



La compacidad promedio de las 4 áreas de muestreo fue de 0.63 ± 0.10 , es decir, que los granos de cuarzo se encuentran morfológicamente lejos de la esfericidad, en conformidad con la Tabla 1 de compacidad. La figura 25 y el gráfico 1 representan un ejemplo del resultado anterior.

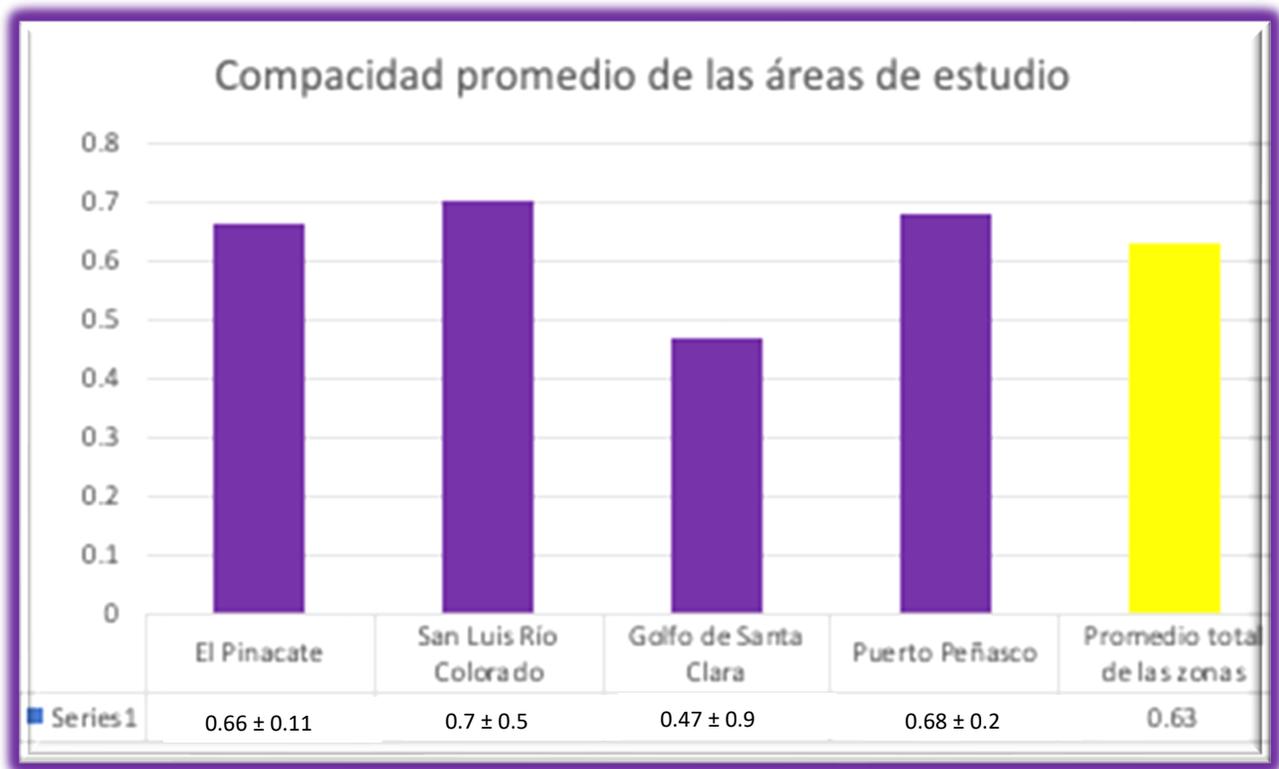


Gráfico 1. Compacidad promedio y desviación estándar de las áreas de estudio; El Pinacate, San Luis Río Colorado, Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco.

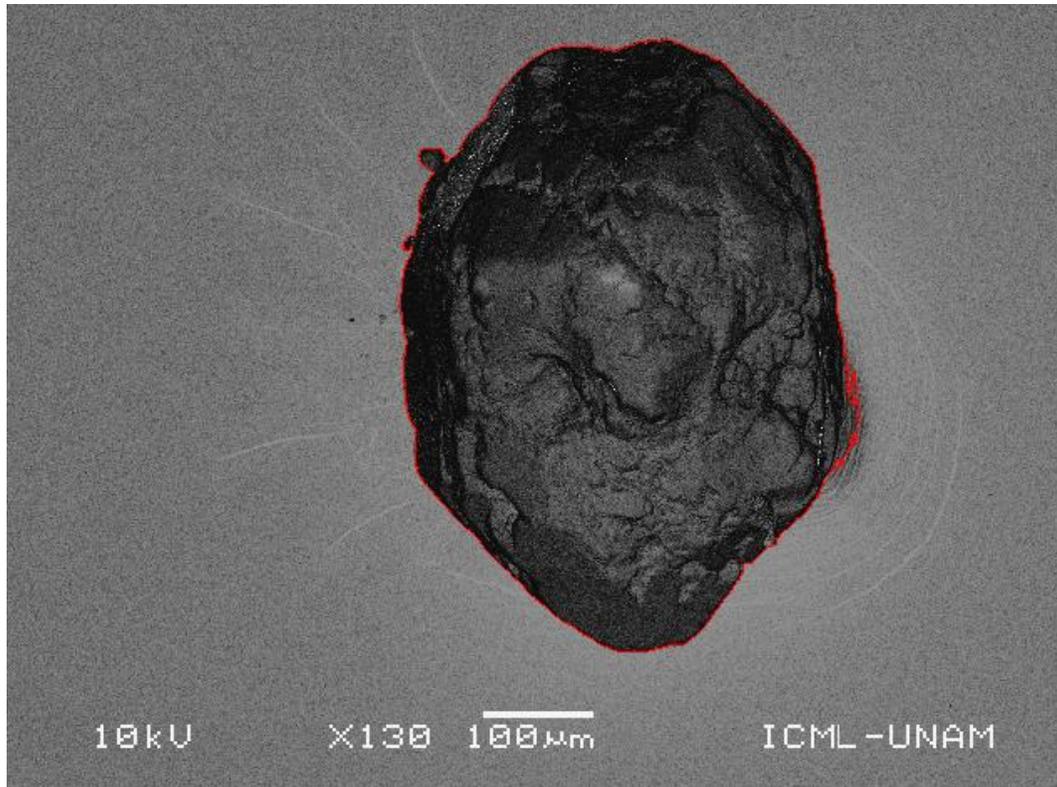


Fig. 25. Compacidad promedio de las 4 zonas de estudio ($C = 0.63$). La muestra de cuarzo representa dicho valor de compacidad.

El transporte eólico y selectividad del viento produce arena de grano fino moderadamente a bien clasificada en San Luis Río Colorado y El Pinacate, mientras que para Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco la arena es media y moderadamente clasificada lo cual indica mezcla de procesos eólicos/marinos que generan diferentes tamaños de grano (Kasper-Zubillaga et al, 2007, 2023).

Los valores de compacidad obtenidos sugieren los siguientes escenarios para el transporte espacial del cuarzo sobre las dunas del desierto de Sonora: a) la baja compacidad del cuarzo en San Luis Río Colorado y El Pinacate indica un dominante transporte fluvial del Delta del Río Colorado; b) esto puede estar seguido de un transporte eólico rápido que se refleja en la formas más angulosas y cercanas a polígonos irregulares más que a un polígono regular (Kasper-Zubillaga et al, 2023); c) es posible que la cercanía de la fuente que origina el cuarzo (Delta del Río Colorado) (Muhs, et al. 1995; Muhs et al. 2003) y el rápido transporte eólico hacia las dunas originen cuarzoes con bordes más



angulosos que no han sido retrabajados ni abrasionados por acción del viento porque retienen su forma original derivada del transporte por el Río Colorado (Lancaster et al., 1987; Kasper- Zubillaga, 2009).

Así, se pueden observar algunos granos de cuarzo de los sitios de Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco angulosos y abrasionados debido a la mezcla de procesos eólicos y marinos. De manera similar, las muestras de las localidades Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco están dominadas por valores de compacidad bajos lo cual indica que el transporte del mineral en la zona costera no se diferencia de los cuarzos depositados en dunas continentales (localidades San Luis Río Colorado y El Pinacate).

Lo anterior sugiere que el cuarzo sigue manteniendo su señal original de transporte fluvial con alternancia de transporte litoral y menor transporte eólico prolongado al ser el viento un agente que propicia la abrasión de los minerales durante su transporte y aumenta sus valores de compacidad (Garzanti et al., 2012, 2015; Costa et al., 2013; Kasper-Zubillaga et al, 2023). La compacidad es un parámetro que contribuye de manera significativa a cuantificar la forma de los minerales y establecer su vínculo a procesos generados por agentes físicos como el agua y el viento.

Contribución de la compacidad como parámetro morfológico en el cuarzo y su relación a esfericidad y redondez.

En el caso particular de este trabajo se puede observar que la compacidad contribuyó de manera significativa en entender las formas del cuarzo y de esta forma agrupar los procesos físicos por los cuales las partículas llegaron a depositarse en las dunas del noroeste de México.

Es importante también comparar la compacidad como variable para medir las formas de las partículas en relación con otros parámetros morfológicos tradicionalmente utilizados

Por ejemplo, hay numerosos estudios que han descrito de manera universal, la morfología de los minerales con parámetros como la esfericidad y la redondez (Vos et al, 2014; Zhao and



Wang, 2016; Resentini et al. 2018). La esfericidad, por ejemplo, se define como el radio de una esfera circunscrito a una partícula (ancho de la partícula) sobre el índice de máxima longitud de la misma partícula (Mo, 2020). En contraste, la redondez únicamente evalúa el grado de irregularidades que tiene una partícula en sus bordes (Zhao and Wang, 2016).

Es importante mencionar que la única correlación significativa observada entre la compacidad y el resto los parámetros anteriormente descritos, se establece entre la compacidad y la esfericidad en granos de piroxeno. En contraste, no existe una correlación significativa entre la compacidad y la redondez quizá porque la redondez es un parámetro difícil de cuantificar de manera objetiva y que no tiene relación con la morfología del mineral en su totalidad sino más bien describe los bordes de este (Resentini et al., 2018; Kasper-Zubillaga et al., 2023).

Compacidad y convexidad

En este trabajo se aporta con un parámetro que cuantitativamente no solo involucra la esfericidad sino también otro parámetro poco considerado en estudios de la morfología de los granos como la convexidad de la partícula (Zhang and Wang, 2016). La convexidad se define como el grado en que el mineral presenta bordes cóncavos y convexos producto de su transporte y abrasión en ambientes acuáticos y eólicos (Zhao and Wang, 2016; Kasper-Zubillaga et al., 2023). Más aún, la compacidad en el dominio digital, se acerca más la morfología del grano a la naturaleza misma, ya que ninguna partícula suele tomar la forma de una esfera perfecta, sino que más bien se acerca a la forma de un polígono regular como un cubo en donde la convexidad define la morfología de la misma partícula (Rosenfeld, 1974; Roduit, 2007; Montero and Bribiesca, 2009; Zhao and Wang, 2016).



CONCLUSIÓN

La importancia del análisis granulométrico en los diferentes estudios realizados en dunas de playas y desiertos es de gran relevancia. Gracias al tamaño de componentes mineralógicos y evidencias texturales se puede determinar el tipo de transporte que sufrieron estos elementos, su duración y el tipo de relieve por el cual fueron arrastrados.

Una herramienta de gran ayuda para observar las características superficiales de los granos de arena (en este caso granos de cuarzo) es la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), logrando diferenciar mediante rasgos texturales el tipo de agente al que se sometieron los granos, ya sea un medio acuoso (ríos) o eólico.

A través de un meticuloso estudio de cada grano de cuarzo y dados los resultados obtenidos a lo largo del mismo, se puede concluir que la hipótesis del presente escrito es aceptada; los rasgos superficiales en granos de cuarzo presentan como principales rasgos característicos formas angulosas y poco redondeadas, atributos de agentes de transporte mayoritariamente subacuáticos y en menor escala subaéreos, respectivamente.

Si bien el promedio de compacidad indicó que dominaron rasgos superficiales poco redondeados, es decir, con una compacidad por debajo de 0.7, se observaron también muestras de cuarzo con compacidad por encima de 0.7, es decir, cercanos a una mayor abrasión por el viento. La compacidad es un parámetro que debe tomarse en cuenta para cuantificar los rasgos superficiales del cuarzo (forma) porque incluye dos parámetros significativos que son la convexidad y la esfericidad de los granos.

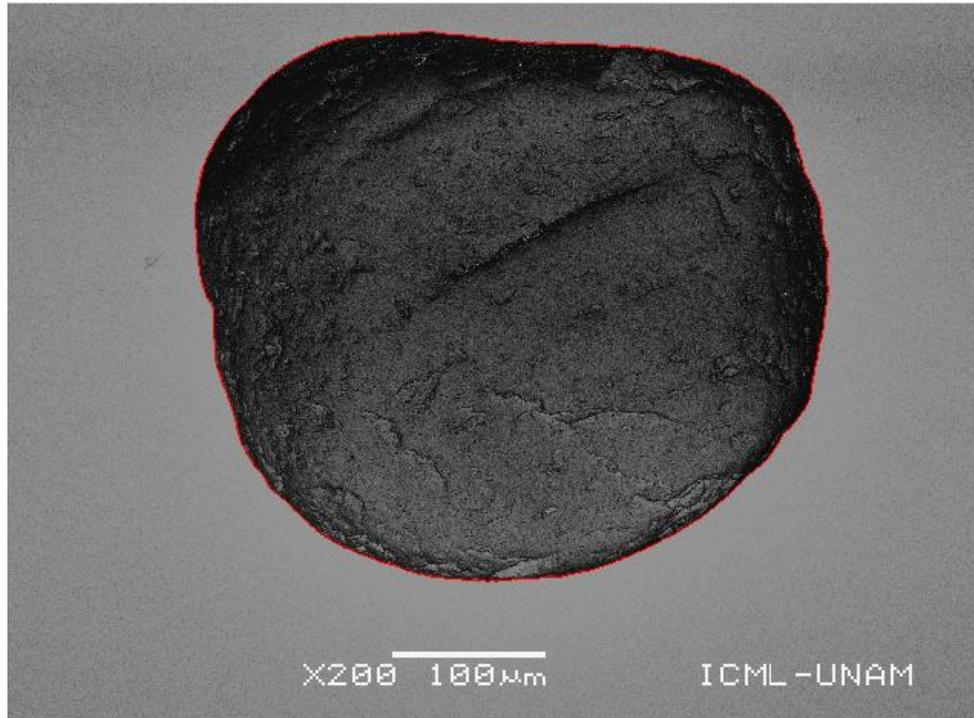


Fig. 26. Muestra de cuarzo C6C (5) de San Luis Rio Colorado. La muestra representa un caso de compacidad alta, bien abrasionado.

El presente estudio integra el concepto de compacidad como un nuevo método para la investigación, y en combinación con la microscopía electrónica de barrido (MEB) es capaz de crear un análisis completo de las características texturales de granos de cuarzo provenientes de dunas costeras y continentales.



REFERENCIAS

Bogaert, J., Rousseau, R., Van Hecke, P. & Impens, I. (2000). Alternative area-perimeter ratios for measurement of 2D shape compactness of habitats. *Applied Mathematics and Computation*, 11, 71- 85 [https://doi.org/10.1016/S0096-3003\(99\)00075-2](https://doi.org/10.1016/S0096-3003(99)00075-2)

Bribiesca, E., 1997. Measuring 2D shape compactness using the contact perimeter Computers 6 Mathematics with Applications 33, 1-9

Chao L. and Zhibao D. 2022. Distribution of Dune Landform on Mars. *Frontiers in Astronomical and Space Sciences* 9:811702. doi: 10.3389/fspas.2022.811702.

Costa, P. J. M., Andrade, C., Mahaney, W. C., Marques da Silva, F., Freire, P., Freitas, M. C., Janardo, C., Oliviera, M. A., Silva, T., Lopes, V. (2013). Aeolian microtextures in silica spheres induced in a wind tunnel experiment: comparison with aeolian quartz. *Geomorphology*, 180–181, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.011>

Cupul MAL. 1994. Flujos de Sedimentos en Suspensión y Nutrientes en la Cuenca Estuarina del Río Colorado, Ensenada, B.C., México. MSc Thesis, Facultad de Ciencias Marinas Universidad Autónoma de Baja California, México.

Deer, W.A., Howie, R. A.& Zussman, J. (1998). *Rock-forming Minerals*. New York, 696 pp.

Dott, R.H. (2003). The Importance of Eolian Abrasion in Supermature Quartz Sandstones and the Paradox of Weathering on Vegetation-Free Landscapes. *The Journal of Geology*, 111, 387-405 <https://doi.org/10.1086/375286>

Folk, R.L., 1971. Longitudinal dunes of the northwestern edge of the Simpson Desert, Northern Territory, Australia. 1 Geomorphology and grain size relationships. *Sedimentology* 16, 5–54. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1971.tb00217.x>

Garcés Ingrid (2012). Cuarzo (SiO₂). Universidad de Antofagasta: Chile. <https://intranetua.uantof.cl/salares/Fichas/Cuarzo.pdf>



Garduño Everardo, Landeros Alberto y Caccavari Eva (2012). Shuk Toak. Historia natural y cultural de un geosímbolo de Sonora. Región y sociedad vol.24 no.55 Hermosillo sep./dic. 2012.

Garzanti, E., Andò, S., Resentini, A., Vezzoli, G., Lustrino, M., Boni, M., Vermeesch, P., 2012. Petrology of the Namib Sand Sea: Long-distance transport and compositional variability in the wind-displaced Orange Delta. *Earth-Science Reviews* 112, 173–189.

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 and aeolian transport (Namibia and southern Angola). *Sedimentology*, 62, 971–996. <https://doi.org/10.1111/sed.12169>

Jiménez-Orocio, O., Espejel, I., & Martínez, M. L. (2015). Scientific research on coastal dunes of Mexico: Origin, evolution and challenges. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86(2), 486–507. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.04.022>

Kasper-Zubillaga J.J & Carranza-Edwards A. (2005). Grain size discrimination between sands of desert and coastal dunes from northwestern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 22, núm. 3, p. 383-390.

Kasper-Zubillaga J.J., Dickinson WW, Carranza Edwards A., Hornelas-Orozco, Y. 2005. Petrography of quartz grains in beach and dune sands of Northland, North Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* V 48 649-660.

Kasper-Zubillaga J.J. and Faustinos-Morales R., 2007. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis of quartz grains in dune sands, NW Mexico. *Ciencias Marinas*. V.33 (1), 11-22

Kasper-Zubillaga J.J., Zolezzi-Ruiz H., Carranza Edwards A., Girón García, P. Ortiz-Zamora, G.V. and Palma, M. 2007. Sedimentological, modal analysis and geochemical studies of desert and coastal dunes, Altar Desert, NW México. *Earth Surface Processes and Landforms*. 32, 498-508. DOI: 101002/esp 1402



Kasper-Zubillaga J.J. and Zolezzi-Ruiz H., 2007. Grain size, mineralogical and geochemical studies of coastal and inland dune sands from the El Vizcaino Desert, B.C. México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. V24 (3), 423-438.

Kasper-Zubillaga J.J., Acevedo-Vargas, B., Morton-Bermea O. and Ortiz-Zamora, G. 2008. Rare earth elements of the Altar Desert dune and coastal sands, northwestern México. *Chemie Der Erde-Geochemistry*. V. 68, 45-59.

Kasper-Zubillaga JJ. 2009. Roundness in quartz grains from inland and coastal dune sands, Altar Desert, Sonora, Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. V. 61, 1-12.

Khisina, N. R., Khramov, D. A., Kolosov, M. V., Klesehev, A. A., & Lawrence A. Taylor, L. (1995). Formation of Ferriolivine and Magnesioferrite from Mg—Fe-Olivine: Reactions and Kinetics of Oxidation. *Physics and Chemistry of Minerals* 22, 241-250. doi: 10.1007/bf00202257

Krinsley, D. H. & Doornkamp, J. C. (1968). *Atlas of quartz sand surface textures*. Cambridge University Press, Cambridge, England 91.

Krinsley, D.H. & Marshall, J.R., (1987). Sand grain textural analysis: an assessment in: Marshal, John R. (Ed.), *Clastic Particles: Scanning Electron Microscopy and Shape Analysis of Sedimentary and Volcanic Clasts*. Van Nostand Reinhold Company; New York, New York.

Lancaster N, Greeley R, Christensen PR. 1987. Dunes of the Gran Desierto Sand Sea, Sonora, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms* 12: 277–288.

Lancaster N. 1992. Relations between dune generations in the Gran Desierto of Mexico. *Sedimentology* 39: 631–644.

Lancaster, N., 1995. Origin of the Gran Desierto Sand Sea: Sonora, Mexico: evidence from dune morphology and sediments. In: Tchakerian, V.P. (Ed.), *Chapman and Hall. Desert Aeolian Processes*, New York, pp. 11–36.



Livingstone, I., Bullard, J.E., Wiggs, G.F.S., Thomas, D.S.G., 1999. Grain-size variation on dunes in the Southwest Kalahari, Southern Africa. *Journal of Sedimentary Research* 69, 546–552.

Madhavaraju, J., García y Barragan, J.C., Hussain, S.M., Mohan, S.P., 2009. Microtextures on quartz grains in the beach sediments of Puerto Peñasco and Bahía Kino, Gulf of California, Sonora, Mexico. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 26 (2), 367–379.

Montero, R.S., Bribiesca, E., 2009. State of the Art of Compactness and Circularity Measures. *International Mathematical Forum*, 4, 1305 – 1335.

Muhs DR, Bush CA, Cowherd SD, Mahan S. 1995. Geomorphic and geochemical evidence for the source of sand in the Algodones Dunes Colorado Desert, Southeastern California. In *Desert Aeolian Processes*, Tchakerian VP (ed.). Chapman and Hall: New York; 37–74.

Muhs DR, Reynolds RL, 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 DR. 2004. Mineralogical maturity in dune fields of North America, Africa and Australia. *Geomorphology* 59: 247–269.

Pérez-Villegas G. 1990. Wind Sheet IV.4.2, Vientos Dominantes 1:4 000.000. Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México: México.

Pye, K., 1983. Coastal dunes. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 7 (4), 531–557. <https://doi.org/10.1177/030913338300700403>.

Thompson RW. 1968. Tidal flat sedimentation on the Colorado River delta, northwestern Gulf of California. *Bulletin of the Geological Society of America Memoir* 107.

Wenwen Li, Michael F. Goodchild & Richard Church (2013) An efficient measure of compactness for two-dimensional shapes and its application in regionalization problems, *International Journal of Geographical Information Science*, 27:6, 1227-1250, DOI: 10.1080/13658816.2012.752093



Mejía-Ledezma, R.O., Kasper-Zubillaga, J.J., Álvarez Sánchez, L.F., Mendieta-Lora, M Arellano-Torres, E., Tetlalmatzi-Marínez, A., González-Bermúdez, Patiño-Andrade, D. & Armstrong-Altrin, J.S., (2020). Surface textures of quartz and ilmenite grains from dune and beach sands of the Gulf of Mexico coast, Mexico: Implications for fluvial, aeolian and marine transport, *Aeolian Research*, 45, 100611 [doi:org/10.1016/j.aeolia.2020.100611](https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100611)

Montero, R.S. and Bribiesca, E. 2009. State of the art of compactness and circularity measures. *Int. Math. Forum* .4, 1305–1335.

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.

Roduit, N. (2007). JMicroVision: un logiciel d'analyse d'images pétrographiques polyvalent. Unpublished PhD Tesis, Université de Genève, Switzerland, 116.

Roduit, N. (2019). JMicroVision: Image analysis toolbox for measuring and quantifying components of high-definition images. Version 1.3.1. <https://jmicrovision.github.io>

Universidad Autónoma Metropolitana (2018). La Microscopía Electrónica de Barrido en la Biología.

<http://www.feriacienciasuami.com/semana/2018microa.pdf>

Rosenfeld, A. (1974) Compact figures in digital pictures. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, 4, 221–223.

Tsoar, H., 2001. Types of aeolian sand dunes and their formation. In: Balmforth, N.J., Provenzale, A. (Eds.), *Geomorphological Fluid Mechanics. Lecture Notes in Physics* 582. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 403–419. https://doi.org/10.1007/3-540-45670-8_17.

Vandivere WB, Vorster P. 1984. Hydrology analysis of the CR floods of 1983. *Geojournal* 9: 343–350



Velbel, M. A & Ranck, J. M. (2007). Etch pits on naturally altered olivine from dunites of the Appalachian Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA. *Mineralogical Magazine*. 72, 145–148 doi.[10.1180/minmag.2008.072.1.145](https://doi.org/10.1180/minmag.2008.072.1.145)

Velbel M A., McGuire, J. T. & Madden, A. S. (2007) Scanning electron microscopy of garnet from southern michigan soils: etching rates and inheritance of preglacial and pre-pedogenic grain-surface textures. *Developments in Sedimentology*, 58, 413–432 doi.org/[10.1016/S0070-4571\(07\)58004-0](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58004-0)

Vos, K., Vandenberghe, N., Elsen, J., (2014). Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation *Earth Science Reviews* 128, 93-104. doi.org/[10.1016/j.earscirev.2013.10.013](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.013)

Weitz, C.M., Plaut, J.J., Greeley, R., Saunders, R.S. 1994. Dunes and microdunes on Venus: Why Were So Few Found in the Magellan Data? *Icarus*, 112, 282-295, <https://doi.org/10.1006/icar.1994.1181>

Zhao, B. & Wang, J. (2016). 3D quantitative shape analysis on form, roundness, and compactness with μ CT. *Powder Technology*, 291, 262–275 <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.029>

REFERENCIAS EN LÍNEA:

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (1995). Programa de manejo 2. Áreas Naturales Protegidas. Reserva de la Biosfera de El Pinacate y Gran Desierto de Altar. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/24_libro_pm.pdf

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2023). Reserva de la Biosfera El Pinacate y Gran Desierto de Altar.

<https://elpinacate.com.mx/>

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2017). Gran Desierto de Altar-El Pinacate

Corbí De la Lanza Espino, Guadalupe. (2004). Gran escenario de la zona costera y oceánica de México. *Ciencias* 76, octubre-diciembre, 4-13. [En línea]



http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_014.pdf

González Carlos (2013). La Geología de Sonora: Una historia de 1800 millones de años.
<https://ugm.org.mx/wordpress/la-geologia-de-sonora-historia>

Hanako Greta (2021). Microscopía electrónica de barrido y microanálisis de elementos del Clúster Científico y Tecnológico BioMimic®.
<https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/723-microscopia-electronica-de-barrido-y-microanalisis-de-elementos-del-cluster-cientifico-y-tecnologico-biomimic>

Ingeniería Real (2014). Tipos de dunas de arena. [Imagen]. Recuperado de
<https://twitter.com/IngenieriaReal/status/837724460715290624/photo/1>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Relieve, Sonora.
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/son/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=26>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2007). La porcicultura en Sonora. Censo agropecuario 2007.
https://books.google.com.mx/books?id=Zb_ODwAAQBAJ&pg=PA12&dq=DESIERTO+DE+ALTAR+CLIMA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiT-9aM-dr2AhXkkWoFHYbfBh0QuwV6BAgEEAY#v=onepage&q=DESIERTO%20DE%20ALTAR%20CLIMA&f=false

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2005). Mapa de Provincias Fisiográficas de Sonora [Imagen].
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/son/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=26>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2000). Síntesis de Información geográfica del estado de Sonora.
http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223328/702825223328_4.pdf



Instituto de Geografía (2013) Diferenciación hidrogeomorfológica de los ambientes costeros del Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe. <https://www.elsevier.es/es-revista-investigaciones-geograficas-boletin-del-instituto-118-articulo-diferenciacion-hidrogeomorfolologica-ambientes-costeros-del-S0188461113727675>

Lugo Hubp J. (2011). Diccionario geomorfológico. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/32/32/95-1>

Padilla y Sotelo Lilia Susana (2000) La población en la región costera de México en la segunda mitad del siglo XX. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112000000100006

Periodni (2022). "Sistemas cristalinos y redes de Bravais." <https://www.periodni.com/es/sistemas-cristalinos-y-redes-de-bravais.html>

Pontificia Universidad Católica de Chile (2023). Geomorfología eólica. https://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/5_2_3.html

Santillán M. y Gutiérrez B. (2018). Conoce las dunas y cómo cuidarlas. UNAM: México. <https://ciencia.unam.mx/contenido/infografia/29/conoce-las-dunas-y-como-cuidarlas>

Secretaría de Marina (2022). Golfo de Santa Clara. <https://digaohm.semarmar.gob.mx/cuestionarios/cnarioSantaclara.pdf>

SOFTWARE

<https://jmicrovision.github.io>

ANEXOS:

A) Imágenes

El repertorio de las 144 muestras se encuentra disponible en línea en la plataforma de Google Drive, el archivo fotográfico contiene cada una de las muestras de cuarzo ordenadas por localidad.

Disponibles en <https://drive.google.com/drive/folders/1ij1hNghjsQkO2VS5gi0L9E3UW0LU0M5r>



B) Tablas y gráficos

El pinacate

Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
El Pinacate, Son.	P1C (1)	0.171	908.887	258.265	P1C (3)	0.141	0.50988889
El Pinacate, Son.	P1C (2)	0.444	822.13	152.471	P1C (1)	0.171	
El Pinacate, Son.	P1C (3)	0.141	1,172.23	323.184	P1C (5)	0.179	
El Pinacate, Son.	P1C (4)	0.813	1,224.89	137.585	P1C (2)	0.444	
El Pinacate, Son.	P1C (5)	0.179	911.76	253.118	P1C (7)	0.663	
El Pinacate, Son.	P1C (6)	0.704	653.785	108.045	P1C (6)	0.704	
El Pinacate, Son.	P1C (7)	0.663	982.392	136.486	P1C (9)	0.736	
El Pinacate, Son.	P1C (8)	0.738	689.807	108.386	P1C (8)	0.738	
El Pinacate, Son.	P1C (9)	0.736	210.57	59.976	P1C (4)	0.813	



Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
El Pinacate, Son.	P3C (1)	0.835	4,184.91	250.937	P3C (8)	0.242	0.66544444
El Pinacate, Son.	P3C (2)	0.635	1,439.73	168.784	P3C (9)	0.616	
El Pinacate, Son.	P3C (3)	0.656	5,069.82	311.573	P3C (2)	0.635	
El Pinacate, Son.	P3C (4)	0.697	3,230.75	241	P3C (3)	0.656	
El Pinacate, Son.	P3C (5)	0.729	3,347.72	240.187	P3C (4)	0.697	
El Pinacate, Son.	P3C (6)	0.754	2,406.88	200.339	P3C (5)	0.729	
El Pinacate, Son.	P3C (7)	0.825	3,435.31	228.742	P3C (6)	0.754	
El Pinacate, Son.	P3C (8)	0.242	3,133.800	403,328.90	P3C (7)	0.825	
El Pinacate, Son.	P3C (9)	0.616	5,890.74	346.696	P3C (1)	0.835	



Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
El Pinacate, Son.	P4F (1)	0.892	1,042.94	121.186	P4F (8)	0.685	0.803
El Pinacate, Son.	P4F (2)	0.704	1,578.91	167.905	P4F (2)	0.704	
El Pinacate, Son.	P4F (3)	0.903	1,049.12	120.843	P4F (6)	0.728	
El Pinacate, Son.	P4F (4)	0.776	4,232.62	261.767	P4F (4)	0.776	
El Pinacate, Son.	P4F (5)	0.817	961.37	121.626	P4F (5)	0.817	
El Pinacate, Son.	P4F (6)	0.728	1,418.96	156.553	P4F (7)	0.824	
El Pinacate, Son.	P4F (7)	0.824	1,158.95	132.922	P4F (1)	0.892	
El Pinacate, Son.	P4F (8)	0.685	1,062.63	171.432	P4F (9)	0.898	
El Pinacate, Son.	P4F (9)	0.898	1,058.02	121.685	P4F (3)	0.903	



Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
El Pinacate, Son.	P5C (1)	0.888	4,591.77	254.952	P5C (5)	0.285	0.65944444
El Pinacate, Son.	P5C (2)	0.778	3,445.93	235.958	P5C (8)	0.377	
El Pinacate, Son.	P5C (3)	0.744	5,822.97	313.675	P5C (7)	0.661	
El Pinacate, Son.	P5C (4)	0.785	2,669.30	205.394	P5C (9)	0.682	
El Pinacate, Son.	P5C (5)	0.285	3,500.78	393.121	P5C (6)	0.735	
El Pinacate, Son.	P5C (6)	0.735	193.54	57.505	P5C (3)	0.744	
El Pinacate, Son.	P5C (7)	0.661	2,501.55	218.022	P5C (2)	0.778	
El Pinacate, Son.	P5C (8)	0.377	625.78	144.488	P5C (4)	0.785	
El Pinacate, Son.	P5C (9)	0.682	2,903.09	231.201	P5C (1)	0.888	





Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
El Pinacate, Son.	P6F (1)	0.584	4,637.54	315.873	P6F (6)	0.405	0.579
El Pinacate, Son.	P6F (2)	0.475	1,528.50	201.042	P6F (9)	0.471	
El Pinacate, Son.	P6F (3)	0.566	4,136.69	303.053	P6F (2)	0.475	
El Pinacate, Son.	P6F (4)	0.566	1,242.70	166.126	P6F (7)	0.554	
El Pinacate, Son.	P6F (5)	0.807	3,612.18	237.15	P6F (3)	0.566	
El Pinacate, Son.	P6F (6)	0.405	4,556.31	376.227	P6F (4)	0.566	
El Pinacate, Son.	P6F (7)	0.554	1,115.24	159	P6F (1)	0.584	
El Pinacate, Son.	P6F (8)	0.783	3,880.20	249.472	P6F (8)	0.783	
El Pinacate, Son.	P6F (9)	0.471	1,282	184.918	P6F (5)	0.807	



Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
El Pinacate, Son.	P8F (1)	0.706	1,209.39	146.76	P8F (3)	0.705	0.763
El Pinacate, Son.	P8F (2)	0.911	1,180.13	127.576	P8F (1)	0.706	
El Pinacate, Son.	P8F (3)	0.705	1,040.55	136.197	P8F (4)	0.722	
El Pinacate, Son.	P8F (4)	0.722	639.562	105.498	P8F (6)	0.749	
El Pinacate, Son.	P8F (5)	0.782	899.402	120.186	P8F (8)	0.757	
El Pinacate, Son.	P8F (6)	0.749	1,545.82	161.087	P8F (9)	0.767	
El Pinacate, Son.	P8F (7)	0.774	2,780.94	212.45	P8F (7)	0.774	
El Pinacate, Son.	P8F (8)	0.757	1,301.60	147.006	P8F (5)	0.782	
El Pinacate, Son.	P8F (9)	0.767	1,063.33	131.975	P8F (2)	0.911	



San Luis Río Colorado

Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
San Luis Río Colorado, Son.	C1C (1)	0.624	3,021.40	246.603	C1C (6)	0.359	0.664
San Luis Río Colorado, Son.	C1C (2)	0.768	4,518.53	271.932	C1C (9)	0.394	
San Luis Río Colorado, Son.	C1C (3)	0.731	3,441.03	243.266	C1C (1)	0.624	
San Luis Río Colorado, Son.	C1C (4)	0.789	2,982.64	217.891	C1C (8)	0.666	
San Luis Río Colorado, Son.	C1C (5)	0.785	3,837.05	247.866	C1C (3)	0.731	
San Luis Río Colorado, Son.	C1C (6)	0.359	5,455.42	436.766	C1C (2)	0.768	
San Luis Río Colorado, Son.	C1C (7)	0.865	4,321.33	250.619	C1C (5)	0.785	
San Luis Río Colorado, Son.	C1C (8)	0.666	3,956.29	273.245	C1C (4)	0.789	
San Luis Río Colorado, Son.	C1C (9)	0.394	3,180.94	318.558	C1C (7)	0.865	



Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
San Luis Río Colorado, Son.	C4F (1)	0.717	2,510.10	209.812	C4F (9)	0.537	0.759
San Luis Río Colorado, Son.	C4F (2)	0.888	3,592.89	225.513	C4F (5)	0.67	
San Luis Río Colorado, Son.	C4F (3)	0.848	4,743.12	275.077	C4F (1)	0.717	
San Luis Río Colorado, Son.	C4F (4)	0.778	2,357.38	195.162	C4F (7)	0.753	
San Luis Río Colorado, Son.	C4F (5)	0.67	3,939.65	271.816	C4F (6)	0.761	
San Luis Río Colorado, Son.	C4F (6)	0.761	3,571.04	242.799	C4F (4)	0.778	
San Luis Río Colorado, Son.	C4F (7)	0.753	5,871.00	313.092	C4F (3)	0.848	
San Luis Río Colorado, Son.	C4F (8)	0.883	6,627.26	307.162	C4F (8)	0.883	
San Luis Río Colorado, Son.	C4F (9)	0.537	3,860.97	300.556	C4F (2)	0.888	





Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perimetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
San Luis Río Colorado, Son.	C6C (1)	0.361	3,462.38	347.268	C6C (1)	0.361	0.641
San Luis Río Colorado, Son.	C6C (2)	0.554	3,835.39	295.005	C6C (4)	0.418	
San Luis Río Colorado, Son.	C6C (3)	0.828	3,652.65	235.418	C6C (2)	0.554	
San Luis Río Colorado, Son.	C6C (4)	0.418	0.221	2.578	C6C (7)	0.597	
San Luis Río Colorado, Son.	C6C (5)	0.928	4,882.08	257.07	C6C (9)	0.617	
San Luis Río Colorado, Son.	C6C (6)	0.751	4,130.05	262.797	C6C (8)	0.72	
San Luis Río Colorado, Son.	C6C (7)	0.597	4,987.66	324.106	C6C (6)	0.751	
San Luis Río Colorado, Son.	C6C (8)	0.72	3,221.93	237.177	C6C (3)	0.828	
San Luis Río Colorado, Son.	C6C (9)	0.617	3,481.02	266.316	C6C (5)	0.928	



Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perimetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
San Luis Río Colorado, Son.	C7F (1)	0.703	3,612.41	254.047	C7F (6)	0.43	0.737
San Luis Río Colorado, Son.	C7F (2)	0.805	3,960.04	248.66	C7F (9)	0.641	
San Luis Río Colorado, Son.	C7F (3)	0.84	4,886.18	270.29	C7F (1)	0.703	
San Luis Río Colorado, Son.	C7F (4)	0.781	4,830.12	278.749	C7F (4)	0.781	
San Luis Río Colorado, Son.	C7F (5)	0.789	5,773.54	303.248	C7F (5)	0.789	
San Luis Río Colorado, Son.	C7F (6)	0.43	4,064.68	344.604	C7F (2)	0.805	
San Luis Río Colorado, Son.	C7F (7)	0.837	3,155.47	217.611	C7F (8)	0.811	
San Luis Río Colorado, Son.	C7F (8)	0.811	4,976.31	277.702	C7F (7)	0.837	
San Luis Río Colorado, Son.	C7F (9)	0.641	3,617.01	266.344	C7F (3)	0.84	



Golfo de Santa Clara

Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perimetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
Golfo de Santa Clara, Son.	G1C (1)	0.695	3,016.04	233.461	G1C (3)	0.415	0.577
Golfo de Santa Clara, Son.	G1C (2)	0.539	4,559.05	326.107	G1C (2)	0.539	
Golfo de Santa Clara, Son.	G1C (3)	0.415	2,661.98	283.824	G1C (8)	0.558	
Golfo de Santa Clara, Son.	G1C (4)	0.588	3,721.81	282.044	G1C (6)	0.581	
Golfo de Santa Clara, Son.	G1C (5)	0.605	1,917.22	199.528	G1C (4)	0.588	
Golfo de Santa Clara, Son.	G1C (6)	0.581	3,079.63	258.004	G1C (7)	0.594	
Golfo de Santa Clara, Son.	G1C (7)	0.594	3,200.26	260.27	G1C (5)	0.605	
Golfo de Santa Clara, Son.	G1C (8)	0.558	4,266.11	309.919	G1C (9)	0.618	
Golfo de Santa Clara, Son.	G1C (9)	0.618	12,796.52	509.928	G1C (1)	0.695	



Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perimetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
Golfo de Santa Clara, Son.	G2C (1)	0.605	3,093.16	353.555	G2C (2)	0.083	0.387
Golfo de Santa Clara, Son.	G2C (2)	0.083	4,628.61	837.183	G2C (5)	0.179	
Golfo de Santa Clara, Son.	G2C (3)	0.471	4,303.31	338.941	G2C (8)	0.323	
Golfo de Santa Clara, Son.	G2C (4)	0.4	3,854.34	348.055	G2C (4)	0.4	
Golfo de Santa Clara, Son.	G2C (5)	0.179	2,907.71	451.759	G2C (6)	0.415	
Golfo de Santa Clara, Son.	G2C (6)	0.415	3,515.75	326.159	G2C (7)	0.455	
Golfo de Santa Clara, Son.	G2C (7)	0.455	3,982.51	331.804	G2C (3)	0.471	
Golfo de Santa Clara, Son.	G2C (8)	0.323	4,036.32	396.255	G2C (9)	0.552	
Golfo de Santa Clara, Son.	G2C (9)	0.552	5,255.36	345.857	G2C (1)	0.605	





Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
Golfo de Santa Clara, Son.	G3F (1)	0.532	4,224.31	315.77	G3F (4)	0.166	0.538
Golfo de Santa Clara, Son.	G3F (2)	0.735	4,488.66	276.981	G3F (8)	0.206	
Golfo de Santa Clara, Son.	G3F (3)	0.541	16,506.92	619.442	G3F (5)	0.429	
Golfo de Santa Clara, Son.	G3F (4)	0.166	2,561.56	440.362	G3F (1)	0.532	
Golfo de Santa Clara, Son.	G3F (5)	0.429	3,225.30	307.422	G3F (3)	0.541	
Golfo de Santa Clara, Son.	G3F (6)	0.849	4,595.16	260.856	G3F (7)	0.644	
Golfo de Santa Clara, Son.	G3F (7)	0.644	3,564.96	263.773	G3F (2)	0.735	
Golfo de Santa Clara, Son.	G3F (8)	0.206	3,673.58	473.48	G3F (9)	0.741	
Golfo de Santa Clara, Son.	G3F (9)	0.741	3,564.93	245.912	G3F (6)	0.849	



Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
Golfo de Santa Clara, Son.	G5F (1)	0.271	2,379.43	332.177	G5F (7)	0.042	0.403
Golfo de Santa Clara, Son.	G5F (2)	0.375	3,412.43	338.074	G5F (3)	0.212	
Golfo de Santa Clara, Son.	G5F (3)	0.212	3,825.31	475.95	G5F (1)	0.271	
Golfo de Santa Clara, Son.	G5F (4)	0.448	3,969.24	333.715	G5F (2)	0.375	
Golfo de Santa Clara, Son.	G5F (5)	0.524	13,079.24	560.093	G5F (4)	0.448	
Golfo de Santa Clara, Son.	G5F (6)	0.637	4,763.77	306.443	G5F (5)	0.524	
Golfo de Santa Clara, Son.	G5F (7)	0.042	3,200.63	983.547	G5F (8)	0.55	
Golfo de Santa Clara, Son.	G5F (8)	0.55	3,960.34	300.758	G5F (9)	0.575	
Golfo de Santa Clara, Son.	G5F (9)	0.575	3,056.14	258.431	G5F (6)	0.637	



Puerto Peñasco

Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
Puerto Peñasco, Son.	Pe1f (1)	0.622	2,356.22	218.257	Pe1f (5)	0.53	0.662
Puerto Peñasco, Son.	Pe1f (2)	0.689	5,228.46	308.895	Pe1f (8)	0.58	
Puerto Peñasco, Son.	Pe1f (3)	0.67	9,151.20	414.416	Pe1f (1)	0.622	
Puerto Peñasco, Son.	Pe1f (4)	0.758	2,862.17	217.883	Pe1f (7)	0.626	
Puerto Peñasco, Son.	Pe1f (5)	0.53	22,274.88	726.768	Pe1f (3)	0.67	
Puerto Peñasco, Son.	Pe1f (6)	0.816	3,726.40	239.616	Pe1f (9)	0.675	
Puerto Peñasco, Son.	Pe1f (7)	0.626	2,479.16	223.013	Pe1f (2)	0.689	
Puerto Peñasco, Son.	Pe1f (8)	0.58	14,648.16	563.475	Pe1f (4)	0.758	
Puerto Peñasco, Son.	Pe1f (9)	0.675	93,425.25	1,318.48	Pe1f (6)	0.816	



Localidad	Muestra	Compacidad	Área	Perímetro	Muestra	Compacidad	PROMEDIO
Puerto Peñasco, Son.	Pe5f (1)	0.626	3,127.05	250.549	Pe5f (6)	0.604	0.703
Puerto Peñasco, Son.	Pe5f (2)	0.848	4,743.97	265.129	Pe5f (9)	0.615	
Puerto Peñasco, Son.	Pe5f (3)	0.79	3,565.55	238.166	Pe5f (1)	0.626	
Puerto Peñasco, Son.	Pe5f (4)	0.764	10,046.31	406.37	Pe5f (7)	0.681	
Puerto Peñasco, Son.	Pe5f (5)	0.716	4,021.68	265.687	Pe5f (8)	0.691	
Puerto Peñasco, Son.	Pe5f (6)	0.604	2,693.59	236.807	Pe5f (5)	0.716	
Puerto Peñasco, Son.	Pe5f (7)	0.681	4,480.13	287.56	Pe5f (4)	0.764	
Puerto Peñasco, Son.	Pe5f (8)	0.691	2,927.27	230.693	Pe5f (3)	0.79	
Puerto Peñasco, Son.	Pe5f (9)	0.615	2,749.67	236.974	Pe5f (2)	0.848	

