



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio de la caracterización de los
sedimentos del litoral mexicano y su
utilidad para la descripción de la
dinámica costera**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Rebeca Ramírez Alcázar

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Valeria Chávez Cerón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Agradecimientos

A mis padres Katy y Fco. Javier, por ser el motor en mi vida, mis maestros por excelencia, por ser las personas que me han enseñado a soñar y a que no hay imposibles, les agradezco por todos los sacrificios que hoy en día me han traído al lugar donde me encuentro. Simplemente gracias por su amor infinito e incondicional.

A mi hermano, por siempre sacarme una sonrisa, por ser mi guardia, por ser mi compañero de vida y enseñarme a ver al mundo con otros ojos.

A mis compañeros de desvelo durante toda mi vida, quienes a pesar de no formar parte desde el inicio de esta pareciera que siempre han estado conmigo, gracias por sacarme una sonrisa y enseñarme el amor más puro que existe.

A la UNAM, por ser un punto clave en mi formación tanto académica como personal, por permitirme conocer a personas increíbles que siempre me acompañaran, le agradezco los años que viví siendo parte de su comunidad estudiantil y de todas las experiencias adquiridas en dicho tiempo.

Al GICP, por abrirme sus puertas, enseñarme nuevas áreas de interés y ponerme en el camino de personas con gran talento como el Dr. Rodolfo y la Dra. Valeria, quienes fueron clave en la realización del presente trabajo.

Al CEMIE-Océano por el apoyo económico otorgado durante la realización de mi servicio social y que, gracias a lo aprendido durante este tiempo, se despertó en mí la inquietud de aprender más sobre el tema, surgiendo así la idea de iniciar con esta tesis.

A todos los profesores con los cuales tuve el gusto de tomar clases, gracias por traspasarme un cachito de su conocimiento, porque gracias al gusto y dedicación con el que ustedes nos enseñaban surgía en mí el gusto por materias que nunca creí me apasionarían tanto. Gracias al Dr. José Antonio, cuya mirada crítica, disposición, consejos enriquecedores y capacidad para inspirar, han sido fundamentales en mi proceso.

A Cinthya que a pesar de la distancia siempre la siento cerca, por siempre ser mi consejera de vida y regañarme cuando es necesario. Gracias Angie por cruzarte en mi camino desde el día uno de la licenciatura, porque ese día, sin saberlo, estaba conociendo a lo que sería una de mis mejores amigas y con quien viviría infinidad de aventuras. A Luis, quien a pesar de tener poco tiempo de conocernos se ha encargado de que me cuestione todo y me ha mostrado un lado de la vida que no conocía, gracias por apoyarme durante la realización de este trabajo. A Melanie y Enrique por ser durante mucho tiempo mi segunda casa. A la señora María de la Luz, por abrirme un espacio en su casa y adoptarme como una nieta más. Agradezco profundamente a Pablo, Roberto, Regina, Mario, Carlos, Roberto y Leopoldo por todas las risas, por las reuniones, por la comida compartida y por formar parte de mi estancia en la facultad, sin su apoyo la licenciatura no hubiera sido lo mismo.

A cada una de las personas que ha cruzado mi camino, gracias por aportar una tonalidad diferente a mi vida.

ÍNDICE

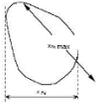
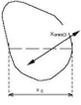
Introducción	1
• Justificación	3
• Hipótesis	3
• Objetivos.....	3
1. Origen y propiedades físicas de los sedimentos en las costas	4
1.1. Origen	4
1.2. Granulometría y Tamaño de las partículas	7
1.2.1. Granulometría y curva granulométrica	7
1.2.2. Tamaño de las Partículas.....	9
1.3. Propiedades de los sedimentos.....	14
1.4. Composición de los sedimentos marinos	24
1.4.1. Terrígenos	25
1.4.2. Biogénicos	26
1.5. Transporte de sedimentos.....	27
1.5.1. Tipos de transporte de sedimentos	27
1.5.2. Tasa de transporte de sedimentos	30
1.5.3. Erosión costera.....	32
1.6. Distribución del sedimento en las playas	36
2. Metodología.....	40
2.1. Muestras de sedimento en el litoral mexicano disponibles	40
2.2. Propiedades físicas	43
2.2.1. Pruebas en laboratorio	44
2.3. Agrupación y manejo de resultados.....	54
1º Criterio: Propiedades físicas a analizar.....	54
2º Criterio: Zonas de muestreo.....	54
3º Criterio: Estados con información completa.....	55
2.4 Caracterización de sitios a escala local	55
3. Resultados y discusión	56
3.1. Propiedades físicas de los sedimentos del litoral mexicano	56

Densidad Relativa	59
Diámetros característicos de la muestra	68
Redondez (Symm3) y Esfericidad (SPHT3)	76
3.2. Caracterización de sitios a escala local	83
Boca Camichín - NT	84
Zona Hotelera, Benito Juárez - QR	87
La Mancha - VZ.....	90
4. Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	93
Referencias	96

SIMBOLOGÍA UTILIZADA

Símbolo	Definición
D_{nom}	<p>Diámetro nominal; es el diámetro de una esfera de igual volumen que la partícula (V_p) de la que se trata</p> $D_{nominal} = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$
$D_{cribado}$	<p>Diámetro de cribado; es igual al tamaño de la abertura de la malla por la cual pasa la partícula</p> $D_{cribado} = 0.90D_n$
D_n	<p>Diámetro característico; es el diámetro donde el subíndice n hace referencia al porcentaje del peso de los sedimentos cuyas partículas tienen tamaños menores de D_n.</p> <p>Por ejemplo, si se tiene un $D_{90}=2.75$ mm, este se refiere a que el 90 por ciento del peso del material es conformado por partículas con tamaños inferiores a 2.75 mm.</p>
D_{50}	Es el diámetro para el cual el 50 por ciento de la muestra en peso tiene partículas menores que la mediana de esta.
D_{10}	Es el diámetro donde el 10 por ciento de la muestra en peso tiene partículas menores que el percentil 10.
D_{90}	Es el diámetro donde el 90 por ciento de la muestra en peso tiene partículas menores que el percentil 90.
$V_i; V_m; V_s; V_v;$ V_w	Volumen; volumen de la muestra; volumen de los sólidos; volumen de vacíos; Volumen de la fase líquida.
$W_i; W_m; W_s;$ $W_v; W_w$	Peso; Peso de la muestra; Peso de los sólidos; Peso del aire; Peso de la fase líquida.
w	<p>Contenido de agua o humedad; igual a la masa por la gravedad ($w=Mg$)</p> $w = \frac{W_w}{W_s} \quad w[\%] = \frac{W_w}{W_s} \times 100$
e	<p>Relación de vacíos; es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos.</p> $e = \frac{V_v}{V_s} \quad e = \frac{n}{1-n}$
n	<p>Porosidad; la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de la muestra.</p> $n = \frac{V_v}{V_m} \quad n[\%] = \frac{V_v}{V_m} \times 100$
v	<p>Volumen específico; es la relación inversa a la porosidad.</p> $v = \frac{V_m}{V_v}$
S_r o G_w	<p>Grado de saturación; es la relación entre el volumen del agua entre el volumen de vacíos.</p> $S_r = G_w = \frac{V_w}{V_v} \quad S_r[\%] = \frac{V_w}{V_v} \times 100$
γ	

	Peso específico; es la relación entre el peso (W) de una sustancia y su volumen (V). $\gamma = \frac{W}{V}$
ρ	Densidad; es la relación entre la masa de una sustancia (M) y su volumen (V). $\rho = \frac{M}{V}$
M	Masa; es la relación entre el peso y la gravedad. $M = \frac{W}{g}$
ρ_r	Densidad relativa del material; es la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad de otra sustancia tomada como referencia. $\rho_r = \frac{\rho}{\rho_o}$
γ_r	Peso específico relativo del material; es la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico de otra sustancia tomada como referencia. $\gamma_r = \frac{\gamma}{\gamma_o}$
Δ	Peso específico sumergido; es la diferencia entre el peso específico del agua (γ_w) y el peso específico de la muestra (γ_m), entre el peso específico del agua. $\Delta = \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w}$
SF	Factor de forma (shape factor); es un parámetro adimensional resultado de comparar la longitud (a), ancho (b) y grosor de una partícula (c). $SF = \frac{c}{\sqrt{ab}}$
ε	Esfericidad; parámetro con el cual se sabe que tan parecida es la partícula a una esfera.
P	Redondez; parámetro que considera los bordes y el con trono de la partícula y provee una idea de la abrasión a la que se ha sometido dicha partícula.
ω	Velocidad de caída; es un parámetro en cual se considera tanto la densidad del líquido como de las partículas, además del tamaño y forma de estas. Se puede definir como la velocidad a la que la partícula se mueve hacia el fondo de cualquier superficie debido a la atracción gravitacional.
τ_0	Esfuerzo tangencial de fondo; es la fuerza aplicada de manera paralela/tangencial al área de la superficie de aplicación. Es una de las condiciones críticas que delimita la frontera entre el movimiento incipiente o transporte de sedimentos.
u^*	Velocidad de corte; es la relación entre el esfuerzo cortante y la densidad del fluido, permite identificar el tipo de movimiento y también forma parte de las condiciones críticas para el transporte de sedimentos.
θ	Parámetro de Shields; es la relación entre el esfuerzo cortante que ejerce el flujo y las propiedades del material sólido. $\theta = \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d} = \frac{u_*^2}{g\Delta d}$
Re _*	

	<p>Número de Reynolds (de la partícula); es la relación entre la velocidad de corte por el diámetro de la partícula, entre la viscosidad cinemática del fluido.</p> $Re_* = \frac{u_* D}{\nu}$
ρ_{pic}	<p>Densidad relativa por picnómetro; es la densidad obtenida a través del picnómetro</p> $\rho_{pic} = 0.978 \frac{m}{V}$
rD	<p>Densidad relativa por CAMSIZER; es la densidad obtenida con el CAMSIZER</p>
b/l3	<p>Factor de forma (obtenida por el CAMSIZER), es la relación entre el $x_{c \text{ min}}$ y el $x_{Fe \text{ max}}$.</p>
SPHT ₃	<p>Esfericidad (obtenida por el CAMSIZER), considera el perímetro de la proyección de una partícula (P) y la superficie medida cubierta por la proyección de esta (A).</p> $SPHT3 = \frac{4\pi A}{P^2}$
Symm ₃	<p>Redondez (obtenida por el CAMSIZER), considera las distancias desde el centro de la superficie a los bordes en la dirección de medida (r_1 y r_2)</p> $Symm_3 = \frac{1}{2} \left(1 + \min \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \right)$
$X_{FE \text{ máx}}$	<p>Longitud de la partícula (parámetro obtenido por el CAMSIZER); Es el diámetro de Feret más largo del conjunto de diámetros de Feret.</p>  <p>Diámetro de Feret: es la distancia entre dos tangentes perpendiculares a la dirección de medida.</p>
$X_{Área}$	<p>Diámetro de la partícula (parámetro obtenido por el CAMSIZER); que se calcula con base a la superficie de proyección de la partícula.</p> $x_{Área} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$
$X_{c \text{ min}}$	<p>Ancho de la partícula (parámetro obtenido por el CAMSIZER); consiste en la cuerda más corta del conjunto de cuerdas máximas medidas de la proyección de una partícula, es el parámetro cuyo resultado tiene mayor similitud a los resultados obtenidos por medio del cribado.</p> 

INTRODUCCIÓN

La zona costera siempre ha sido foco de atención, por el conjunto de interacciones observables entre el océano, las aguas continentales, la atmósfera y la línea litoral, dando como resultado que muchas de las grandes ciudades de la antigüedad se desarrollaran en estas zonas, tanto por la diversidad del ecosistema (flora y fauna marina) que favorece actividades como la pesca, como por cuestiones estratégicas asociadas al transporte y las actividades portuarias.

No existe de manera unánime una definición de “zona costera”, este concepto varía entre autores y de un país a otro. Algunos autores lo definen como la “zona donde la tierra se encuentra con el mar” (Rodríguez, 2021), otros lo utilizan para hacer referencia a la “zona influenciada por los procesos que ocurren en la unión entre los principales sistemas naturales en la superficie de la tierra, como lo son la atmósfera, el océano y la superficie terrestre” (Davidson, 2009). Autores como Wright & Tohom (1977) definen a la costa como un sistema geomorfológico con entradas y salidas de energía y material, las cuales están relacionadas por las condiciones ambientales que rodean al sitio. A su vez, la ley estadounidense de Gestión de Zonas Costeras (1972) dice que “por zona costera se entiende las aguas costeras, incluida la tierra que forma parte de su lecho y subsuelo, y tierras costeras colindantes, incluye el agua...”, es decir, hace referencia a la interdependencia de la tierra y el mar. Finalmente, el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (2015), toma al litoral como la playa (la frontera conformada por material suelto no consolidado) que puede tener como límite desde unos cientos de metros hasta algunos kilómetros (al encontrar dunas o estuarios de marea) y a una zona que permanece cubierta de agua cuyo límite puede ser el borde de una placa continental.

A pesar de la importancia que poseen las zonas costeras, no fue hasta después de la Primera Guerra Mundial que el turismo en estos espacios comenzó a tomar relevancia, sobre todo con la creación de las primeras instalaciones turísticas cuyos principales o, mejor dicho, únicos consumidores eran los aristócratas británicos. Conforme se dio un aumento del nivel de vida y fue existiendo una mejora en el desarrollo tecnológico de los medios de transporte, en los años treinta del siglo XX se dio el inicio del turismo de masas en las vacaciones de verano. Ya para los años cincuenta es una práctica común que las personas busquen realizar actividades turísticas en las zonas costeras, provocando una expansión de los inmuebles con este fin y ocasionando una transformación urbana de la mayoría de las localidades costeras (Bensery, 2006).

México cuenta con una extensión litoral continental de 11,122 km sin considerar litorales insulares, dividiéndose entre dos océanos; 70.4% perteneciente al océano Pacífico y los 3,294 km restantes al océano Atlántico (SEMARNAT, 2018). Hoy en día, el turismo es una de las principales actividades que se realizan en las zonas costeras, aportando en el año 2021 un 7.5% al Producto Interno Bruto del país (INEGI, 2022). Debido a la demanda que se tiene sobre el turismo en las zonas costeras, el espacio litoral se ve afectado en lo que respecta al consumo del suelo, es decir, las costas sufren un proceso de degradación que termina afectando a ciertos tramos costeros de playa, mismos que requieren de observación y estudio para así conocer las acciones pertinentes para

estabilizar, proteger y o regenerar estos sistemas con alto valor ecológico, biológico y socioeconómico (Jiménez et al., 2021).

Acciones como la energía del oleaje, el viento, corrientes y mareas, o también conocidos como agentes hidrodinámicos, ocasionan que la geometría del perfil de la playa cambie, dotando así de características únicas a cada zona costera del mundo. La característica dominante de una costa puede ser el resultado de factores geológicos de gran escala, geología local, procesos superficiales y efectos debido a cambios recientes en el nivel relativo de la tierra y el mar (Rodríguez, 2021).

Las playas se pueden clasificar de acuerdo con varios criterios, algunos más específicos que otros y otros interrelacionando criterios más generales. La forma en que se pueden clasificar puede variar de acuerdo con el autor, por ejemplo, Bluck (1967) clasifica las playas con base a la distribución transversal del sedimento y la forma de la partícula. Otros autores como Masselink y Short (1993) discuten que las playas se pueden agrupar en función de la altura de la ola de rotura, el periodo, la velocidad de caída de los sedimentos y el rango de marea. Pye (2001) clasifica las playas según la proporción y distribución de arena en la playa., y esto por mencionar algunos autores.

De manera general, los tipos de costas que existen son: por tipo de erosión (plegamiento y colisión), según origen (costas de emersión e inmersión), en función del sustrato dominante (costas rocas, arenosas y fangosas) y según el grado de exposición al viento y a las olas (costas expuestas, semiexpuestas y protegidas) (López, 2016).

Resulta notorio que, al momento de llevar a cabo la clasificación de una playa, una de las características que más importa es el tamaño del sedimento, específicamente el tamaño medio del sedimento D_{50} , debido a que, a lo largo de la playa, existen diferencias en la distribución del tamaño del grano. “Los granos más grandes se encuentran generalmente mar adentro de la zona de interacción backwash/surf, una zona de gran turbulencia. La zona de la cresta de la berma de verano también contiene material grueso significativo debido a la dinámica del run-up. El material más fino se encuentra en la zona de dunas debido principalmente a los procesos del transporte del viento. Mar adentro, desde la bajamar media, los sedimentos comienzan a ser más finos a medida que aumenta la distancia mar adentro de la zona de rompiente” (López, 2016).

Justificación

Las playas están compuestas por granos o fragmentos de roca, los cuales suelen ser de diámetros tales para considerarse como arenas o gravas, estos sedimentos tienen un papel importante en la morfología de las costas, por lo que su caracterización tiene como utilidad:

- 1) Describir la dinámica costera, pues las playas no son elementos estáticos, éstas cambian su forma a lo largo del tiempo y están sujetas a diferentes acciones como la energía del oleaje, el viento, corrientes y mareas son causantes de mover los sedimentos y dotar de una distribución granulométrica variada del material que constituye a la playa.
- 2) Dar solución a problemas de ingeniería relacionados a la reconstrucción en la costa por cuestiones recreativas o por una erosión excesiva, donde, para dar soluciones, es necesario verificar la compatibilidad entre el material que se usará para rellenar contra el material que se tiene en el sitio, dónde el tamaño de la partícula es una de las propiedades físicas más importantes a tomar en cuenta.

Hipótesis

Las hipótesis que regirán el desarrollo del proyecto de caracterización de los sedimentos del litoral mexicano serán las siguientes:

- La mayoría de las playas se constituyen por granos gruesos como lo son arenas y gravas.
- El tamaño de la partícula es una de las características del sedimento con mayor importancia y más utilizada.
- Siempre y cuando se cuente con un material casi uniforme, el D_{50} se considerará el tamaño representativo del material.
- La redondez nos da una idea de la abrasión, madurez o desgaste que ha sufrido el sedimento debido al movimiento de traslado.
- La esfericidad refleja las condiciones de depositación, de la acumulación del material y de la porosidad del lecho.
- La distribución de los granos tiende a disminuir conforme se acerca a la plataforma continental debido a la disminución de la energía de los flujos de transporte.

Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es llevar a cabo la caracterización de los sedimentos del litoral mexicano, a partir de las muestras con las que cuenta el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con enfoque principal en los sedimentos de las playas arenosas.

Como objetivos específicos se analizará la distribución granulométrica que se tiene en algunas de las playas arenosas en México, los parámetros de forma de las partículas y el grado de madurez de sus granos.

1. ORIGEN Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS EN LAS COSTAS

La playa es un depósito de sedimentos no consolidados que pueden variar en gradientes de energía, desde cantiles, cantos rodados, gravas y guijarros, hasta de arenas gruesas a finas (Mariscal, s.f.). Cerca de la costa se cuenta con una gran variedad de sedimentos los cuales dependen de los hábitats biológicos, los procesos de erosión y deposición, así como de los mecanismos de transporte (Stanley & Swift 1976).

De manera genérica reciben el nombre de sedimentos las partículas que provienen de las rocas o suelos y que son arrastrados o acarreados por las aguas que escurren y o por los vientos (Maza & García, 1998).

1.1. Origen

El aire y el agua son los dos principales agentes de la intemperie que atacan a la superficie terrestre, provocando así una alteración de los materiales rocosos, es decir, las rocas sufren un conjunto de procesos, conocidos como intemperismo o meteorización, que causan la descomposición, desgaste, desintegración y destrucción de éstas (Maza & García, 1998).

Es complicado conocer con precisión todas las fuentes que producen sedimentos. Es esto por lo que en ocasiones se requiere de estudios petrográficos para conocer el origen de las partículas. Sin embargo, siendo consistentes con la definición expuesta al comienzo de este capítulo, los sedimentos son producto de procesos de meteorización química y física de las rocas preexistentes, depositándose a lo largo de cauces, lagos, lagunas, en las partes bajas de una cuenca y en el mar (Maza & García, 1998).

Los procesos de intemperización se dividen en dos grandes grupos: 1) desintegración mecánica o física, cuando la roca se transforma en trozos cada vez más pequeños, pero aun así conserva su composición química; 2) descomposición química, por causa de procesos como la oxidación, carbonatación, presencia de vegetación, etc., donde la constitución mineralógica o química de las rocas se ve modificada (Sánchez, 2015).

Desintegración mecánica

También llamada desintegración física, como su nombre indica, es el proceso de meteorización por agentes o procesos físicos:

- **Cambios de temperatura:** Se provoca la transformación de las rocas (desintegración, destrucción, desgaste) debido a los efectos térmicos o cambios de temperatura

calentamiento-enfriamiento de manera repetida y alternada, provocando así esfuerzos de tensión-compresión que terminan en que la roca ceda debido a la fatiga.

- **Congelación:** La roca es fracturada gracias a que el agua que se encuentra entre las fisuras y los poros de la roca se dilata al congelarse, fracturando la roca por tensión.
- **Flora y fauna:** Hace referencia a los efectos físicos que tanto la flora como la fauna tienen sobre las rocas, como podría ser el ejemplo de las raíces que fracturan bloques de roca o actividades específicas (perforantes y excavadoras) que llevan a cabo pequeños animales.

Cabe mencionar que el producto que se obtiene de este tipo de desintegración son sedimentos de tamaño correspondiente a gravas y arenas, y ocasionalmente sedimentos más pequeños, como en el caso de las arcillas.

Descomposición química

En este tipo de intemperización, los componentes originales de la roca sufren modificaciones en las estructuras internas de los minerales, creándose así nuevos minerales y liberando a su vez al medio compuestos y elementos que, como resultado, ocasionan un aumento en la actividad química del agua, la cual, dada su naturaleza de solvente casi universal, es el agente principal responsable de la descomposición química (Caballero, s.f).

Los principales procesos que contribuyen a la meteorización química son:

- **Oxidación/Reducción:** Proceso por el cual el oxígeno se combina con otros elementos o compuestos, es decir, existe una adición (oxidación) o pérdida (reducción) de iones de oxígeno a los minerales que componen las rocas.
- **Carbonatación:** Es la disolución de la roca que contiene una proporción considerable de dióxido de carbono (CO_2) por el contacto con el agua.
- **A causa de la vegetación:** La materia vegetal que se encuentra descompuesta o en proceso de descomposición suelta ácidos orgánicos que aumenta la posibilidad de disolución o corrosividad que posee el agua que en contacto con rocas solubles favorece la descomposición química de éstas.

A diferencia de los productos obtenidos (arenas y gravas) por la desintegración mecánica, en la descomposición química se tiene como resultado mayormente arcillas (Maza & García, 1998).

A pesar de que se hace una distinción entre los dos tipos de meteorización, en la naturaleza suele existir una combinación de ambos. Cabe mencionar que, dada la actividad del ser humano en el medio que lo rodea, éste igual interviene en la desintegración de las rocas, por lo que las fuentes del sedimento pueden ser: *naturales*, principalmente por efectos de la erosión, ya sea por acciones del viento o el agua, así como por movimientos naturales del terreno; *artificiales*, gracias a acciones como

la construcción de obras de ingeniería, explotación de minas, desechos y por destrucción de la vegetación (Maza & García, 1998).

Productos de la desintegración de rocas

La meteorización de las rocas da origen a la variedad de suelos que se conocen (suelos orgánicos, arcillas, limos, arenas y gravas). Éstos pueden ser de dos tipos según si han permanecido o no en el lugar donde se formaron, es decir, residuales o transportados.

Los agentes responsables de llevar lejos a los suelos de la roca de la cual se originaron y depositarlos en otro sitio son (Maza & García, 1998):

- **La gravedad:** Es el principal agente que ocasiona tanto los desgastes en el suelo como el transporte de éste, pues bien, la gravedad es la encargada de que el agua fluya de acuerdo con los desniveles del terreno. También es la encargada de que el material se transporte, ya sea de manera lenta y casi imperceptible o de manera abrupta como suelen ser los desprendimientos o deslizamientos del material que cubre (suelo, rocas, fragmentos rocosos) las laderas y que caen sobre un talud.

Como producto de este agente de transporte se tienen los suelos coluviales.

- **El agua:** Junto con el viento, el agua forma parte de los agentes atmosféricos que atacan a los suelos. El agua, proveniente de fuertes lluvias puede “lavar” el suelo y, a su vez, también es el agente responsable de transportar los sedimentos siguiendo caminos definidos sobre la superficie de acuerdo con las pendientes del terreno, acarreando los materiales desde puntos altos hasta la planicie donde la pendiente es débil y ya no puede continuar arrastrando el material, además, durante este curso hay sedimentos que se infiltran junto con el agua al subsuelo.

Principalmente se tiene como resultado los suelos aluviales o fluviales.

- **El viento:** Da origen a suelos eólicos como podrían ser las dunas de arena y el loess (depósitos sedimentarios limosos). Este agente ataca superficies grandes y transporta principalmente suelo suelto y fino, como polvo y arenas, además, de esculpir rocas y desgastarlas por fricción, ocasionando así lo que se conoce como erosión eólica, es decir, el viento, al igual que el agua, es un agente que no solo transporta a los sedimentos, si no, también provoca la erosión de los suelos.

Resulta evidente que los agentes mencionados no trabajan de manera aislada y, la mayoría de las veces, lo hacen conjuntamente los tres, sobre todo, porque la fuerza de gravedad siempre está presente (Maza & García, 1998).

1.2. Granulometría y Tamaño de las partículas

Los sedimentos juegan un papel importante en la morfología de las costas teniendo así, relevancia en la resolución de algunos de los problemas de la ingeniería costera, como los proyectos de rellenado de playas por cuestiones recreativas, para su protección o por temas como la erosión (USACE, 2008).

Tomando como ejemplo, nuevamente, el rellenado de playas, tal y como indica el Manual de Ingeniería Costera o por sus siglas en inglés *CEM (2008)*, para llevar a cabo proyectos de reconstrucción en la costa, se debe verificar la compatibilidad entre el material que se usará para rellenar y el material que se tiene en el sitio, para los cuales el tamaño de la partícula es una de las propiedades físicas más importantes a tomar en cuenta.

1.2.1. Granulometría y curva granulométrica

Conceptualmente, la granulometría es la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo, expresado como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra seca (Ramírez & de la Cruz, 2021). De igual manera, se puede decir que la granulometría es un tipo de estudio que se lleva a cabo para conocer el cómo se distribuyen los tamaños de las partículas que conforman una muestra.

En los comienzos de la investigación de las propiedades de los suelos, se creyó que las propiedades mecánicas dependían directamente de la distribución de las partículas constituyentes según sus tamaños; por ello era preocupación especial de los ingenieros la búsqueda de métodos adecuados para obtener tal distribución (Juárez & Rico, 1976).

Para poder conocer el tamaño de las partículas resulta necesario recolectar una serie de muestras cercanas al punto de interés y llevar a cabo un análisis de éstas a través de una separación de los diferentes tamaños de los granos por medio de un juego de mallas (ver Tabla 1.2.1.1), tamices o cribas a base de filamentos de acero inoxidable, identificadas por el tamaño de la abertura en pulgadas o por el número de hilos. Este método es aplicable para suelos gruesos, ya que cuando el tamaño de la partícula es muy pequeño, el procedimiento es diferente y se basa en la sedimentación de los granos, además de complementarse con otros tipos de estudios como ensayos que definan la plasticidad del material.

Tabla 1.2.1. 1. Mallas comúnmente utilizadas para la prueba granulométrica (Fuente: ¿?)

MALLA #	3"	2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	10	20	40	60	100	200
ABERTURA (mm)	76.2	50.8	25.4	19.1	12.7	9.52	4.76	2.00	0.84	0.42	0.25	0.149	0.074

Los suelos gruesos, que están conformados por una variedad de tamaños o, en otras palabras, bien graduados, son aquellos que presentan un comportamiento más favorable en cuanto a ingeniería se refiere. A simple vista se puede apreciar si un suelo está bien o mal graduado haciendo uso de la representación gráfica (siempre y cuando se cuente con suficiente número de puntos) obtenida como resultado del análisis granulométrico (Lizarzaburu, 2016).

La *curva granulométrica* (ver Figura 1.2.1.1) es la representación gráfica de los porcentajes acumulados vs el diámetro del grano. Badillo & Rico (1976) explican que el eje de las ordenadas hace referencia al porcentaje, en peso, de las partículas menores que el tamaño correspondiente, mientras que, en el eje de las abscisas, se expresan en escala semilogarítmica (debido a la amplitud que ofrece) los tamaños de las partículas.

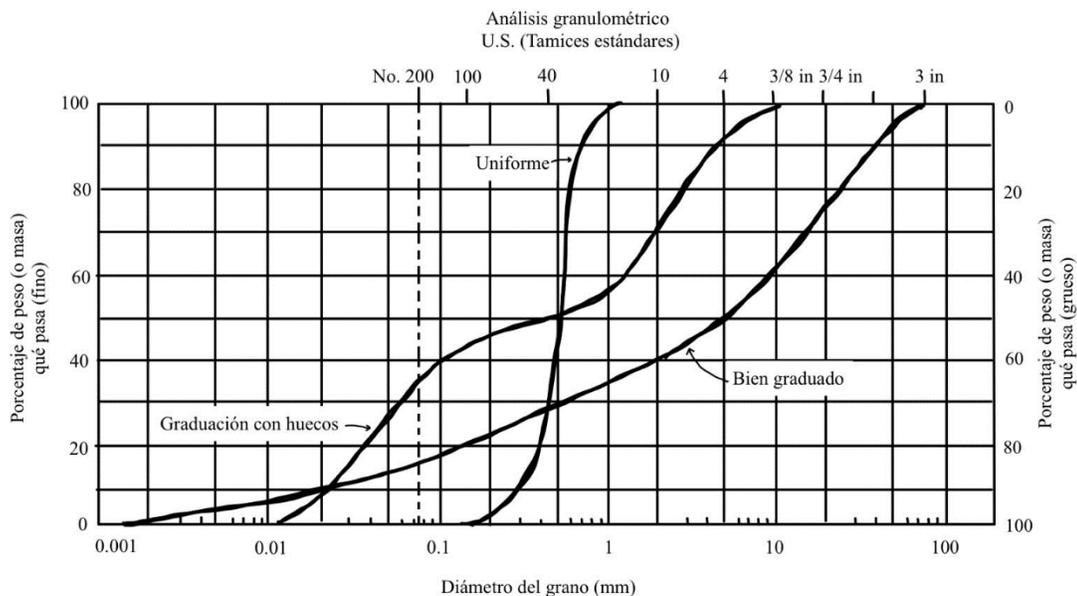


Figura 1.2.1. 1. Curvas Granulométricas: Bien, mal y uniformemente graduadas (modificado de Holtz & Kovacs, 1981)

La forma de la curva da, de forma inmediata, una idea sobre la distribución granulométrica del suelo; un suelo constituido por partículas de un solo tamaño estará representado por una línea vertical; una curva muy tendida indica gran variedad en tamaños (Badillo & Rico, 1976).

El uso de los tamices es el método más tradicional para la obtención de la granulometría de una muestra cuando ésta es mayor a 0.074 mm. Sin embargo, cuando la muestra es muy fina (limos y arcillas), se debe recurrir al uso del hidrómetro o densímetro, el cual ayuda a llevar a cabo el análisis de una suspensión del suelo a partir de la velocidad de sedimentación de las partículas.

1.2.2. Tamaño de las Partículas

Realizada la prueba de granulometría (cribado o sedimentación), se tiene como resultado la curva de distribución granulométrica que permite: (1) ubicar una muestra de sedimento dentro de alguna de las clasificaciones de suelos, (2) definir el diámetro asociado a la media y a la mediana de la distribución y (3) los diámetros característicos (D_x), entre otras medidas estadísticas de interés (Alcérreca, 2011).

Existen diversos sistemas de clasificación de suelos que toman como parámetro la granulometría. La primera clasificación, dado lo tardado de los procedimientos existentes para la separación por tamaños, únicamente contemplaba de tres a cuatro fracciones. Tal y como se expresa en el CEM (2008), hoy en día, la clasificación mayormente utilizada por los ingenieros es el SUCS, mientras que, por lo geólogos es la escala de Udden-Wentworth.

El Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS), publicado en 1952, toma como base la clasificación propuesta por Casagrande (1948). En este sistema, se designa el tipo de suelo de acuerdo con el componente de la tierra (grava, arena, limo, arcilla, suelo orgánico) y a las características plásticas o según la información de la curva granulométrica. La manera en la que se denomina a un suelo requiere de símbolos tal y como se observa en la Tabla 1.2.1.2. (Borselli, 2022)

Tabla 1.2.1. 2. Símbolos que utiliza como identificación el SUCS

Símbolo	Primera letra					Segunda letra			
	G	S	M	C	O	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos o arcillas orgánicas	Alta plasticidad	Baja Plasticidad	Bien Graduado	Mal Graduado

Se utiliza una serie de reglas para clasificar la muestra de suelo, las cuales se describen de manera detallada en la norma ASTM D 2487. En lo que respecta a la designación del tipo de suelo las reglas a seguir son dos: 1) Si menos del 50% del suelo pasa la malla No. 200, el suelo es de grano grueso, y la primera letra será G o S; 2) Si más del 50% pasa la malla No. 200, el suelo es de grano fino y la primera letra será M o C.

De manera detallada se presenta la clasificación de suelos propuesta por el SUCS y que se toma como base en la norma ASTM D 2487 en la Tabla 1.2.1.3.

Tabla 1.2.1. 3. Sistema Unificado de Clasificación SUCS - ASTM D 2487

GRUPOS		SIMBOLO DE GRUPO	NOMBRE DE GRUPO	CRITERIOS DE CLASIFICACION			
SUELOS DE GRANO GRUESO (más del 50 % es retenido en el tamiz No 200) > 50% Ret. N° 200	GRAVAS (más de la mitad de la fracción gruesa es mayor que el tamiz No 4)	Gravas Limpias (menos de 5% de finos)	GW	Grava bien gradada	Solo Granulometría	Cu > 4 y 1 < Cc < 3	
			GP	Grava pobremente gradada		Cu < 4 y/ó 1 > Cc > 3	
		Gravas con finos (más de 12% de finos)	GM	Grava limosa	Los finos se ubican en la zona de LIMOS (ML) en la Carta de Plasticidad de Casagrande		
			GC	Grava arcillosa	Los finos se ubican en la zona de ARCILLA (CL) en la Carta de Plasticidad de Casagrande		
		Gravas con 5 a 12% de finos (símbolo dual)	GC-GM	Grava limosa arcillosa	Símbolo dual: Finos se ubican en la zona de signo doble (CL-ML) de la carta de plasticidad de Casagrande.		
			GW-GM GW-GC GP-GM GP-GC	Grava bien gradada con limo Grava bien gradada con arcilla Grava pobremente gradada con limo Grava pobremente gradada con arcilla	Granulometría(Cc, Cu) y plasticidad (Carta de Plasticidad) Símbolo dual		
	ARENAS (más de la mitad de la fracción gruesa es menor que el tamiz No 4)	Arenas Limpias (poco o ningún fino)	SW	Arena bien gradada	Solo Granulometría	Cu > 6 y 1 < Cc < 3	
			SP	Arena pobremente gradada		Cu < 6 y/ó 1 > Cc > 3	
		Arenas con finos (más de 12% de finos)	SM	Arena limosa	Los finos se ubican en la zona de LIMOS (ML) en la Carta de Plasticidad de Casagrande		
			SC	Arena arcillosa	Los finos se ubican en la zona de ARCILLA (CL) en la Carta de Plasticidad de Casagrande		
		Arenas con 5 a 12 % de finos (símbolo dual)	SC-SM	Arena limosa arcillosa	Símbolo dual: Finos se ubican en la zona de signo doble (CL-ML) de la carta de plasticidad de Casagrande.		
			SW-SM SW-SC SP-SM SP-SC	Arena bien gradada con limo Arena bien gradada con arcilla Arena pobremente gradada con limo Arena pobremente gradada con arcilla	Granulometría(Cc, Cu) y plasticidad (Carta de Plasticidad) Símbolo dual		
	SUELOS DE GRANO FINO (50 % ó más pasa el tamiz No 200) ≥50% Pasa N° 200	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido < 50%	CL	Arcilla de baja plasticidad	IP >7 y cae en ó sobre la línea A		
			ML	Limo	IP < 4 ó cae bajo la línea A		
CL-ML			Arcilla limosa	4 ≤ IP ≤ 7, Símbolo dual: Finos se ubican en la zona de signo doble (CL-ML).			
OL			arcilla ó limo orgánico	Ubicar IP en Carta Plasticidad y verificar que : L.L (secado al horno) / L.L (sin secado al horno) < 0.75			
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido ≥ 50%		CH	Arcilla de alta plasticidad	IP cae en ó sobre la línea A			
		MH	Limo elástico	IP cae bajo de la línea A			
	OH	arcilla ó limo orgánico	Ubicar IP en Carta Plasticidad y verificar que : L.L (secado al horno) / L.L (sin secado al horno) < 0.75				
Suelos altamente orgánicos		Pt	Turba	Patrón principal de identificación: color oscuro a negro, olor orgánico, textura fibrosa a amorfa. No aplican ensayos			

Wentworth (1922) toma como base la clasificación granulométrica presentada por Udden (1898), pero parte de 1 mm y divide o multiplica por 2, ya sea en sentido decreciente o creciente de tamaño respectivamente, además de establecer nuevos límites. Se definen cuatro grupos básicos: arcillas ($< 4 \mu\text{m}$), limos ($4 \mu\text{m} - 63 \mu\text{m}$), arenas ($63 \mu\text{m} - 2 \text{mm}$) y gravas ($>2 \text{mm}$).

Existe una escala que también se puede utilizar al momento de clasificar los tamaños de las partículas, la escala ϕ , donde $\phi = -\log_2(d)$, con el diámetro (d) en milímetros.

La American Society for Testing and Materials (ASTM), una de las organizaciones internacionales destacada por el desarrollo de normas tomadas como base por muchos países, presenta una clasificación que toma en cuenta el SUCS, la escala de Udden-Wentworth y la escala ϕ , misma que se presenta a continuación.

Tabla 1.2.1. 4. Clasificación del sedimento de acuerdo con su tamaño (tabla modificada de Alcérreca, J.C., 2011)

ASTM	Malla	Tamaño [mm]	Tamaño [ϕ]	Clasificación de Wentworth		
Boleos	12 in (300 mm)	4096	-12.0	Grava	Boleos	
		1024	-10.0		Cantos grandes	
		256	-8.0		Cantos pequeños	
128	-7.0					
107.64	-6.8					
Cantos	3 in (75 mm)	90.51	-6.5		Grava	Cantos pequeños
		76.11	-6.3			
		64	-6.0			
Grava gruesa	3/4 in (19 mm)	53.82	-5.8		Grava	Guijarros muy grandes
		45.26	-5.5			
		38.05	-5.2			
		32.00	-5.0	Guijarros grandes		
		26.91	-4.8			
		22.63	-4.5			
Grava fina	2.5	19.03	-4.3	Grava	Guijarros medios	
		16.00	-4.0			
		13.45	-3.7			
		11.31	-3.5		Guijarros pequeños	
		9.51	-3.2			
		8.00	-3.0			
Arena gruesa	#4 (4.75 mm)	6.73	-2.8	Grava	Guijarros pequeños	
		6	3.36			-2.0
		7	2.83			-1.7
		8	2.38			-1.5
Arena gruesa	#10 (2.0 mm)	2.00	-1.0	Grava	Gránulos	
		12	1.68			-0.7
		14	1.41			-0.5
Arena media	16	1.19	-0.3	Arena	Arena muy gruesa	
		16	1.19			-0.3
		18	1.00			0.0

	20	0.84	0.3		
	25	0.71	0.5		
	30	0.59	0.8		
	35	0.50	1.0		
	#40 (0.425)	0.42	1.3		
	45	0.354	1.5		
	50	0.297	1.8		
	60	0.25	2.0		
	70	0.21	2.3		
Arena fina	80	0.177	2.5		Arena fina
	100	0.149	2.7		
	120	0.125	3.0		
	140	0.105	3.3		
	170	0.088	3.5		
	#200 (0.074)	0.074	3.8		
	230	0.0625	4.0		
		0.03125	5.0		
Finos		0.01563	6.0	Finos	Limo grueso
		0.00781	7.0		Limo medio
		0.00391	8.0		Limos finos
					Limos muy finos
					Arcilla

Si bien el tamaño de la partícula es una de las características del sedimento más utilizada y con mayor importancia, esta propiedad no se puede definir con una sola dimensión como se haría si fueran esferas, pues en la naturaleza las partículas poseen diferentes formas. El tamaño de una partícula suele definirse en términos de su volumen o de su velocidad de caída, o por el tamaño de la abertura de la malla de una criba o por sus dimensiones triaxiales (García & Maza, 1998).

De acuerdo con la dimensión que se mida y del procedimiento utilizado para la obtención de esta, será el tamaño de la partícula. Los principales criterios para definir el tamaño de una partícula son los siguientes:

- **Diámetro nominal:** Es el diámetro de una esfera de igual volumen que la partícula de la que se trata se expresa de la siguiente manera:

$$D_{nominal} = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 1- 1}$$

Dónde:

$D_{nominal}$; diámetro nominal
 V_p ; volumen de la partícula

Como se observa en la expresión previa no se toman en cuenta factores como la forma y la densidad, es decir, esta definición acepta que dos partículas con diferente forma y densidad tienen el mismo diámetro, razón por la cual es el diámetro menos utilizado en cuanto a estudio de transporte de sedimentos se trata.

- **Diámetro de sedimentación:** Es el diámetro de una esfera cuya densidad y velocidad de caída es igual que la partícula de que se trata.
- **Diámetro estándar de sedimentación:** Es uno de los diámetros más utilizados, sobre todo en el transporte de sedimentos y en la definición del tamaño de partículas como limos y arcillas. Este es el diámetro de una esfera que tiene como densidad relativa 2.65 y que tiene la misma velocidad de caída que la partícula considerada al caer en agua destilada a 24°C.
- **Diámetro de cribado:** Al igual que el diámetro estándar de sedimentación, es uno de los diámetros más utilizados, solo que se recurre a este para definir el tamaño de partículas como gravas y arenas. Como su nombre indica, el diámetro de cribado es igual al tamaño de la abertura de la malla por la cual pasa la partícula, sin considerar hacer una distinción entre la mayor y menor área transversal. Al igual que el diámetro nominal, este no considera ni la forma ni la densidad de la partícula, por lo que se llega a considerar que ambos diámetros son casi iguales, siendo ligeramente menor el diámetro de cribado.

$$D_{\text{cribado}} = 0.90D_n$$

Ec. 1-2

Cuando se ha realizado un correcto trabajo de cribado, el diámetro de cribado es igual al diámetro de sedimentación.

- **Dimensiones triaxiales:** Otra manera de definir el tamaño de una partícula es haciendo uso de sus dimensiones triaxiales (Figura 1.2.1.3), donde $a > b > c$, y estas son medidas en dirección de tres ejes ortogonales entre sí, siendo uno de ellos coincidente con la mayor dimensión de la partícula.

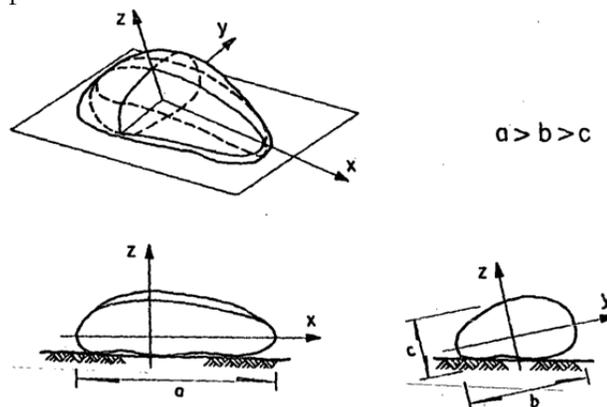


Figura 1.2.1. 2. Esquema de las dimensiones triaxiales de una partícula. (García & Maza, 1998)

1.2.2.1. Diámetros característicos

Los diámetros característicos se denotan como D_n , donde el subíndice n hace referencia al porcentaje del peso de los sedimentos cuyas partículas tienen tamaños menores de D_n (García, s.f). Por ejemplo, si se tiene un $D_{90}=2.75$ mm, este se refiere a que el 90 por ciento del peso del material es conformado por partículas con tamaños inferiores a 2.75 mm.

En el capítulo 7 del Manual de Ingeniería de Ríos, Maza & García (1998), explican que de los principales diámetros característicos se tiene tanto el D_m , también llamado diámetro medio ponderado, como el diámetro que representa la mediana de la muestra (D_{50}), es decir, donde el 50 por ciento de la muestra en peso tiene partículas menores que el D_{50} . Ambos diámetros, siempre y cuando se cuente con un material casi uniforme o con poca dispersión, representan el tamaño representativo del material o bien, ayudan a definir la granulometría de la muestra.

De igual manera, establecen que para la obtención de estos diámetros, se hace uso de la curva característica, la cual se obtiene de condensar una serie de curvas representativas a cada sección muestreada, por lo que la curva característica sería aquella que toma una “macromuestra” o que considera toda la línea de costa. Entre más muestras se tomen, más aproximado a la realidad será, sin embargo, con fines prácticos, y dado que las obras de ingeniería en ocasiones se limitan solo a un sector de la costa y no a toda la línea, basta con tomar muestras en los sitios deseados, efectuar el análisis granulométrico pertinente y a partir de la curva obtenida como resultado, extraer los diámetros de interés o característicos.

Además del uso de la curva característica, para garantizar la precisión, se analiza si esta ajusta a alguna distribución teórica, si es así, la obtención de los diámetros es más rápida y precisa. A pesar de que, en lo general, se presenta la inclinación hacia cierta distribución, los extremos de la curva suelen ser las partes que más se alejan de la distribución, pues suelen representar fracciones de suelos pequeñas y que son o muy gruesos o finos, por lo que en ocasiones se establecen intervalos donde el modelo teórico es válido o se acepta la validez de éste en toda la curva. Por lo que, para obtener los diámetros característicos, se puede recurrir a métodos gráficos o analíticos.

Cuando los diámetros se utilizarán para definir parámetros estadísticos que ayuden en la distribución de los tamaños de las partículas se denominan *diámetros característicos*, sin embargo, cuando serán usados para describir cierta ley, proceso o fenómeno se le llama *diámetro efectivo* (Maza & García, 1998).

1.3. Propiedades de los sedimentos

La costa es un ambiente diverso y dinámico. En ella ocurren ciertos procesos geológicos, biológicos y algunos otros ocasionados por la intervención del ser humano, que terminan por dotar de características únicas a cada zona costera y que, además, la mantienen en un constante cambio.

Los sedimentos naturales están constituidos por una gran variedad de partículas que difieren entre sí en tamaño, forma y densidad. Se puede hacer distinción entre los sedimentos según la

resistencia que éstos opongan a ser transportados y por su comportamiento al ser arrastrados, teniendo así sedimentos *cohesivos* y *no cohesivos*.

Maza & García (1998) definen ambos tipos de sedimentos: el sedimento cohesivo es aquel constituido por partículas muy finas conformadas principalmente por minerales de arcilla, los cuales provocan que dichas partículas se mantengan unidas gracias a las fuerzas electromagnéticas, evitando así que las partículas individuales sean separadas, es decir, la fuerza de unión es mayor que el peso de cada grano. Si la fuerza de cohesión es vencida, los sedimentos pueden comportarse como un suelo *no cohesivo*, aunque por lo general se mantendrán en suspensión con mayor facilidad.

Los sedimentos no cohesivos (friccionantes) o también llamados granulares son aquellos formados por partículas más gruesas o sueltas (gravas y arenas). En estos granos la fuerza de gravedad juega un papel importante el cual se traduce en que el peso de las partículas sea aquel que se oponga a las fuerzas de arrastre y sustentación.

En su mayoría las playas se conforman de granos más gruesos como lo son arenas, gravas y hasta rocas de un tamaño mayor que las gravas (López, 2016), por lo que las propiedades físicas que son de interés en la ingeniería costera son aquellas pertenecientes a los sedimentos friccionantes.

Las propiedades físicas de los sedimentos a estudiar dependerán de si se quieren conocer las características de las partículas que conforman una muestra, es decir, cada partícula de manera aislada, sin embargo, resulta evidente que en la costa existe una interacción entre las partículas de los sedimentos por lo que también interesa estudiar las propiedades de un conjunto de éstas (Alcérreca, 2011).

En lo que respecta a las características de manera aislada se tiene la densidad, peso específico, tamaño, la morfología del grano y velocidad de caída. Mientras que en las propiedades en volumen, principalmente, se estudian las relaciones entre pesos y volúmenes, ángulo de fricción interna, así como la distribución de los tamaños de las partículas (Alcérreca, 2011).

En la sección 1.2 del presente trabajo, se explicó que, entre las principales propiedades físicas de las arenas y gravas, se encuentra el tamaño de la partícula y a su vez la distribución de estos tamaños (granulometría). Es por esto que a continuación se entrará en detalle en relación con las demás características que juegan un papel importante en el campo de la ingeniería.

Relaciones entre pesos y volúmenes

El suelo está formado por tres fases: la fase sólida, constituida por las partículas minerales; la fase líquida, formada por agua con sales minerales disueltas y la fase gaseosa, conformada por aire, de la cual se puede despreciar su peso ($W_a=0$). Además, tal y como se observa en la *Figura 1.3.1* existe el volumen de los sólidos (V_s) el cual está constituido por la fase sólida, mientras que el volumen de vacíos (V_v) corresponde a la fase gaseosa y líquida.

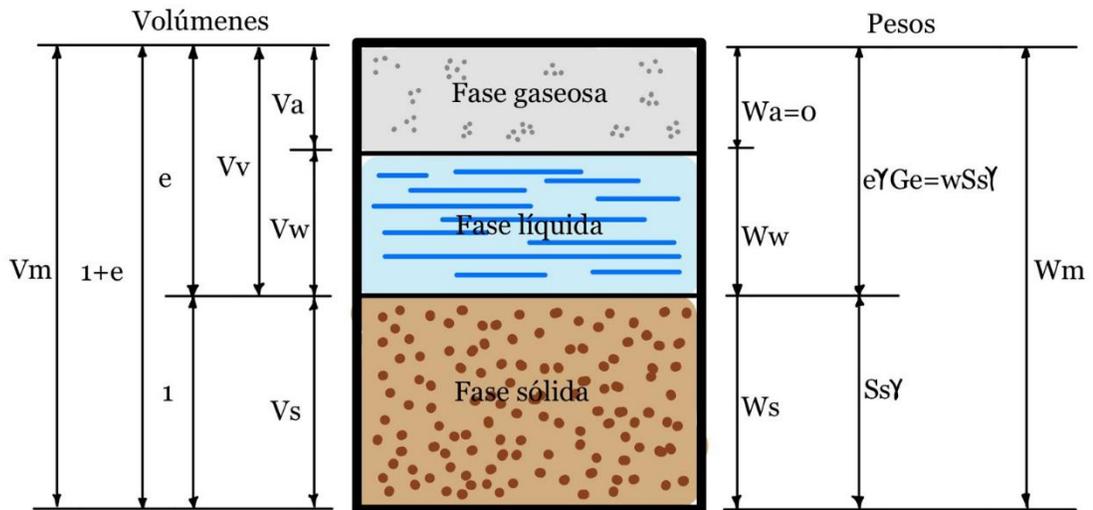


Figura 1.3. 1. Esquema de las fases de un suelo (modificado de Deméneghi & Puebla, 2019)

Apoyándonos del esquema antes presentado, podemos definir las llamadas propiedades índice de los suelos:

Contenido de agua o humedad,
 $w = M_g$

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad \text{Ec. 1-3}$$

$$w[\%] = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad \text{Ec. 1-4}$$

Relación de vacíos, e

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{Ec. 1-5}$$

$$e = \frac{n}{1-n} \quad \text{Ec. 1-6}$$

Porosidad, n

$$n = \frac{V_v}{V_m} \quad \text{Ec. 1-7}$$

$$n[\%] = \frac{V_v}{V_m} \times 100 \quad \text{Ec. 1-8}$$

Volumen específico, v	$v = \frac{V_m}{V_v}$	<i>Ec. 1- 9</i>
Grado de saturación, S_r o G_w	$S_r = G_w = \frac{V_w}{V_v}$	<i>Ec. 1- 10</i>
	$S_r[\%] = \frac{V_w}{V_v} \times 100$	<i>Ec. 1- 11</i>

Además, utilizando las relaciones entre pesos y volúmenes es posible describir el peso específico y el peso específico relativo.

Peso específico

El peso específico o también llamado peso volumétrico es la relación entre el peso de una sustancia (W) y su volumen (V), es decir: $\gamma = \frac{W}{V}$.

Uno de los pesos específicos con mayor importancia es el del agua, muchas veces siendo tomado como referencia o incluso participando en la descripción de diferentes fenómenos. De manera general, se considera que el valor de éste es $\gamma = 1000 \frac{kgf}{m^3}$, cabe mencionar que este valor corresponde al agua destilada a 4°C de temperatura y en una presión atmosférica a nivel del mar. Sin embargo, pese a que el agua en condiciones de trabajo difiera de estas características, la variación del peso específico es mínimo por lo que se puede tomar el mismo valor, ya si se requiriera mayor exactitud solo basta con referirse a la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{W_w}{V_w} \quad \text{Ec. 1- 12}$$

Mientras que, para la obtención del peso específico de la masa de sedimentos, se toma la relación peso-volumen, es decir:

$$\gamma = \frac{W_m}{V_m} = \frac{(W_w + W_s)}{V_m} \quad \text{Ec. 1- 13}$$

Densidad

A la relación que existe entre la masa de una sustancia (M_s) y su volumen (V), se le conoce como densidad (ρ). A diferencia del peso específico, esta propiedad no depende de la gravedad, por lo que su expresión se puede obtener de dividir la aceleración de la gravedad del peso específico.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \text{Ec. 1- 14}$$

Además, se sabe que:

$$M = \frac{W}{g} \quad ; \quad \gamma = \frac{W}{V} \quad \text{Ec. 1- 15}$$

Por lo que:

$$\rho = \frac{\frac{W}{g}}{V} = \frac{W}{gV} = \frac{\gamma}{g} \quad \text{Ec. 1- 16}$$

La densidad dependerá de la composición mineralógica de las partículas. Y al igual que sucede con el peso específico, se tienen valores de densidad para el agua destilada ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$), para el agua en condiciones de trabajo y para la masa de sedimentos.

Para obtener la densidad relativa del material (ρ_r) de una muestra de suelo en el laboratorio haciendo uso de un matraz se toma en cuenta el peso del material seco (W_s), el peso del matraz con agua (W_{fw}) y el peso del material sumergido en el agua del matraz (W_{fsw}).

$$\rho_r = \frac{W_s}{W_s + W_{fw} - W_{fsw}} \quad \text{Ec. 1- 17}$$

Peso/Densidad específico y sumergido relativo

Esta propiedad es la relación entre el peso del volumen de un material a cierta temperatura y el peso del volumen de agua a la misma temperatura, o en otras palabras se puede decir que es la comparación que existe entre el peso específico de una sustancia (γ) o material con el peso específico de otra conocida o referencia (γ_o), aplicando lo mismo para la *densidad relativa* (ρ_r).

$$\gamma_r = \frac{\gamma}{\gamma_o} \quad ; \quad \rho_r = \frac{\rho}{\rho_o} \quad \text{Ec. 1- 18}$$

Una vez conociendo el valor del peso específico, también se puede determinar el valor del peso específico sumergido (Δ), el cual se obtiene de la siguiente manera:

$$\Delta = \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w}$$

Ec. 1- 19

Morfología del grano

Morfología es la disciplina que estudia y describe las formas externas de un objeto. Al hablar de morfología del grano, de manera sencilla, se puede decir que se hace referencia justamente a la descripción de la geometría que tiene una partícula.

La importancia que tiene describir la forma de un grano radica en que ésta se ve relacionada con la interacción entre el sedimento y el fluido que actúa como medio de transporte. Ejemplos de estas interacciones son la separación del flujo y la formación de vórtices (Alcérreca, 2011; Göğüş, 2001).

Algunos de los conceptos más relevantes al momento de llevar a cabo un estudio morfológico del grano son el factor de forma, la esfericidad y la redondez (Alcérreca, 2011).

Factor de forma

También abreviado como SF por sus siglas en inglés, es un parámetro adimensional que establece una relación entre la longitud, ancho y grosor del grano (Maza & García, 1998).

Existen diversas consideraciones que varían según el autor, éstas van desde la forma en que se consideran los ejes para describir las tres longitudes hasta en la expresión utilizada para correlacionarlas (Alcérreca, 2011).

En este trabajo, seguiremos las dimensiones mostradas en la Figura 1.2.1.3, es decir, aquéllas donde el eje más largo es “a”, el intermedio es “b” y el más corto o grosor “c”, por lo que $a > b > c$.

El parámetro más adecuado para estudiar el efecto del factor de forma sobre la velocidad de caída de partículas elipsoidales es aquel presentado por Corey (1949), del cual si se tiene $SF=1$ se concluirá que la partícula es una esfera, mientras que cualquier valor menor a la unidad, se obtendrán otras formas y relaciones de estas dimensiones triaxiales, como establecer que tan plana (c/b), elongación (b/a) o equidimensional (c/a) es el grano.

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}}$$

Ec. 1- 20

Esfericidad

Este parámetro considera, a diferencia de la redondez que toma en cuenta los bordes y los ángulos que estos forman, que tan parecida la partícula es a una esfera sin importar justamente los ángulos entre sí (Wadell, 1933; Maza & García, 1998).

La esfericidad refleja las condiciones de depositación y de la acumulación del material (Basanta 1970), además de que se encuentra relacionada con la porosidad del lecho en el que se encontró el material (Jin, 2009). Por tanto, al aumentar la esfericidad del material, los huecos disminuyen.

De la misma manera que sucede con el factor de forma, existen diferentes expresiones que representan este parámetro dependiendo del autor que se consulta.

Wadell (1933) define la esfericidad a partir de la relación entre el área superficial de un cuerpo respecto a la que posee una esfera perfecta, proponiendo la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \left[\frac{V_p}{V_s} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 1- 21}$$

Retomando el concepto de diámetro nominal, incluido en la sección 1.2.2, si se conoce este valor y, además, la mayor de sus dimensiones triaxiales (a), la expresión presentada por Wadell se simplifica.

$$\varepsilon = \frac{D_{nominal}}{a} \quad \text{Ec. 1- 22}$$

Krumbein (1941) por su parte, hace uso de las dimensiones triaxiales para definir la esfericidad:

$$\varepsilon = \left[\left(\frac{b}{a} \right)^2 \frac{c}{b} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 1- 23}$$

En cualquiera de las expresiones presentadas, si $\varepsilon=1$, se considera que la partícula es esférica, mientras que $\varepsilon < 1$ indicará otras formas. La esfericidad promedio de las partículas naturales o sedimentarias varía entre 0.60 y 0.85 (Maza & García, 1998).

Redondez

Como se ha mencionado, la redondez considera los bordes y el contorno de la partícula, además de que es independiente de la forma pues, de acuerdo con Wadell (1933), ésta se obtiene del cociente del promedio los radios de curvatura (r_i) de los diferentes bordes o esquinas que delinean el contorno del área proyectada entre el radio del círculo máximo que puede inscribirse en dicha área (R).

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{R} \quad \text{Ec. 1- 24}$$

La redondez nos da una idea de la abrasión, madurez o desgaste que ha sufrido el sedimento debido al movimiento de traslado. Así, por ejemplo, se puede inferir que una partícula angulosa ha viajado poco.

Además de la expresión propuesta por Wadell, otra alternativa para la obtención de la redondez de una partícula sería a simple vista, pues en lugar de medir cada radio de curvatura de los bordes, basta con solo apreciar y comparar el grano con alguna escala visual.

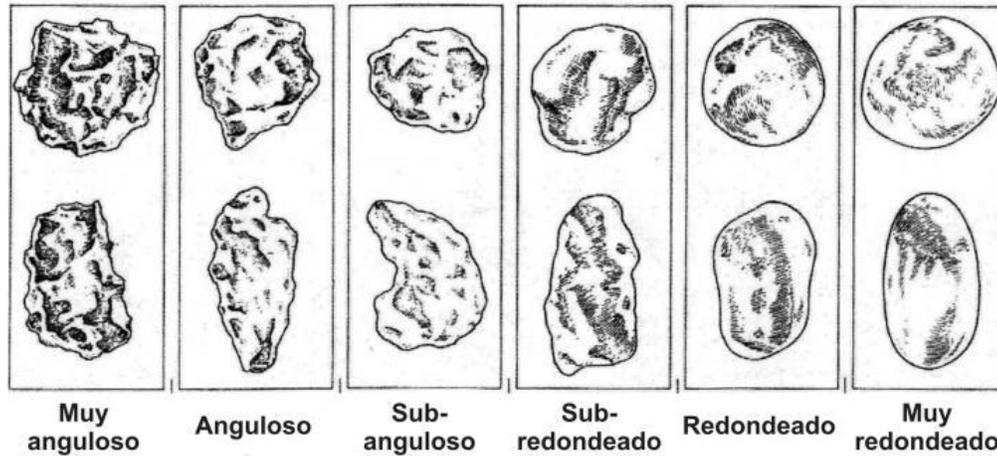


Figura 1.3. 2. Clasificación visual de redondez (Atlas Digital de Petrografía Sedimentaria, Universidad de Alicante, 2021)

La redondez de una esfera es 1 por definición, sin embargo, para las partículas naturales oscila entre 0.30 y 0.80 (Maza & García, 1998).

Velocidad de caída

Al momento de llevar a cabo una evaluación de los procesos necesarios para modelar el transporte de sedimentos uno de los elementos básicos es la velocidad de caída. (Alcérreca, 2011).

Este fenómeno está directamente asociado a la sedimentación de las partículas, donde las principales fuerzas que intervienen son la fuerza de arrastre, el peso propio de las partículas bajo la acción de la gravedad y el empuje de Arquímedes (Alcérreca, 2011).

Se han realizado diversas investigaciones para su predicción, actualmente existen varios tipos de métodos predictivos para determinar la velocidad de caída: la primera es la solución analítica propuesta por Stokes, la cual resulta ser aplicable para las partículas esféricas y con número de Reynolds de la partícula menores a la unidad, es decir, es aplicable cuando el líquido es muy viscoso o la partícula muy (muy) fina, según indica la Ec. 1-25:

$$\omega = \frac{1}{18\nu} \Delta g D^2 \quad \text{Ec. 1- 25}$$

Otro método se basa en fórmulas empíricas obtenidas a través de datos experimentales, de donde surge la expresión general para la obtención de la velocidad de caída (Maza & García, 1998).

La expresión surge de igualar la fuerza de roce definida por la Ley de Newton (F_R) y la fuerza resultante (F_i) de considerar la fuerza de flotación de la partícula (principio de Arquímedes) y la fuerza gravitacional que actúa sobre esta.

$$\omega = \left[\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} \Delta g D \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 1-26}$$

Dónde;

C_D ; coeficiente de arrastre que depende de $Re_\omega = \frac{\omega D}{\nu}$, se obtiene de manera iterativa y empleando la Figura 1.3.3

Δ ; peso sumergido relativo $\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$

D ; diámetro de la partícula en metros

g ; aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)

De entre las fórmulas empíricas, vale la pena mencionar la desarrollada por Rubey (1933) por sus amplios límites de aplicación en una gran variedad de escenarios, ya que resulta válida para cualquier número de Reynolds de la partícula.

$$\omega = \sqrt{\frac{2\Delta g D}{3} + \frac{36\nu^2}{D^2}} - \frac{6\nu}{D} \quad \text{Ec. 1-27}$$

La mejor manera de determinar la velocidad de caída de las partículas es por medio de pruebas de laboratorio, sin embargo, esto no siempre resulta posible y, por ello, es común utilizar expresiones como las antes presentadas. Para el caso de las arenas, al ser partículas más densas, aún no existen fórmulas empíricas que consideren el efecto de la turbulencia del flujo en la determinación de la velocidad de caída del sedimento.

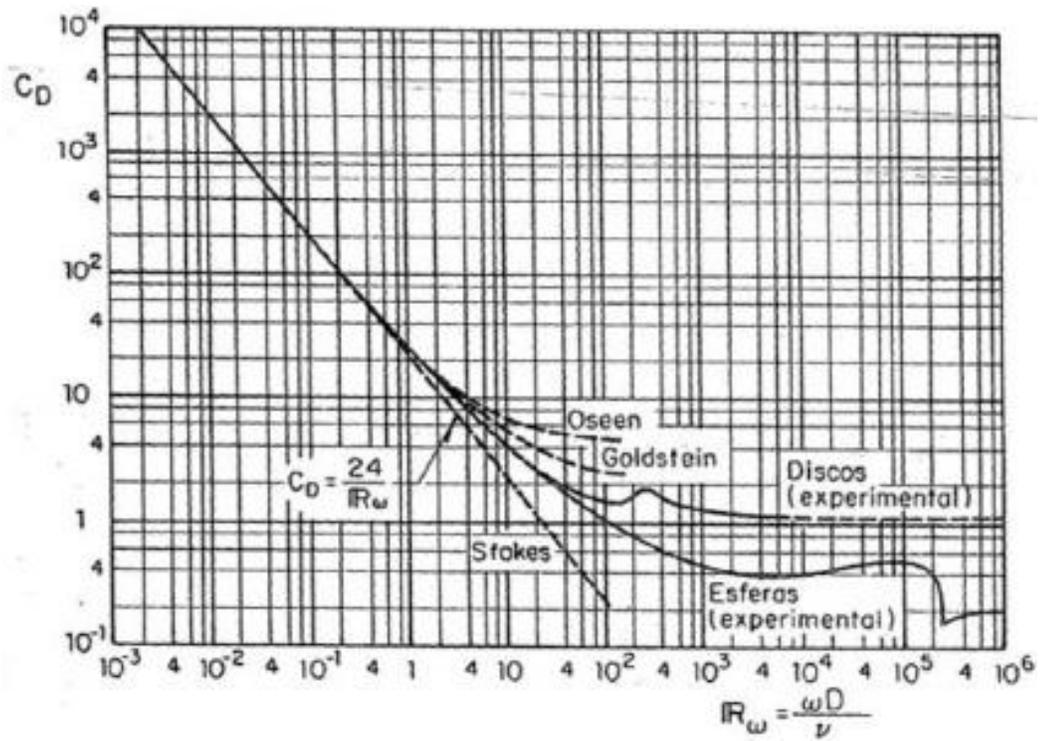


Figura 1.3. 3. Obtención del coeficiente de arrastre C_d para esferas y discos (García & Maza, 1998)

1.4. Composición de los sedimentos marinos

Como parte de la descripción y caracterización de los distintos ambientes sedimentarios, como por ejemplo lagunas, ríos, dunas, playas, plataformas continentales y cuencas oceánicas, además de las propiedades físicas de los sedimentos antes mencionadas, interviene también su composición.

En general, la composición de las partículas de sedimentación se puede clasificar en dos grandes grupos: clásticas o no clásticas (Pérez & Márquez, 2017).

Los sedimentos denominados clásticos (klastos=roto) o también llamados detríticos, son producto de la meteorización de las rocas preexistentes que, principalmente, están constituidas por partículas silicatadas, y tanto su textura como su estructura, son un indicador de las condiciones de transporte y depósito que han sufrido (Tucker, 2001).

Las partículas de sedimentación no clásticas, a diferencia de las detríticas cuyo origen está ligado a fenómenos físicos, dependen de factores químicos y/o bioquímicos. Son producto de la depositación de partículas disueltas ocasionadas gracias a la meteorización. Estas partículas pueden ser transportadas a través de cuerpos de agua o precipitarse de materiales biogénicos (Caballero, 2013).

Además de la clasificación antes mencionada, autores como Folk (1974), explican que la clasificación de la composición de los sedimentos tiene base en tres componentes: 1) terrígenos, los cuales son producto de la meteorización de las rocas, 2) aloquímicos, materiales tanto detríticos como producto de factores químicos y/o bioquímicos, los cuales son depositados por precipitación, y 3) ortoquímicos, materiales formados por precipitación química o bioquímica directa en la propia zona de sedimentación (Figura 1.4.1)

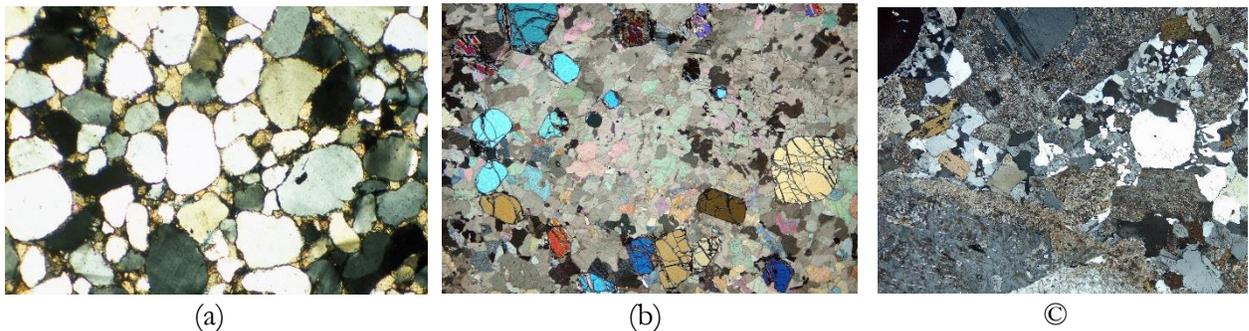


Figura 1.4. 1 (a) Componente terrígeno (arenisca). (b) Componente aloquímico (mármol). (c) Componente ortoquímico (granito), (Oxford Earth Sciences Image Store)

Los sedimentos marinos, por su parte, se pueden clasificar por su fuente de origen; 1) litógenos o terrígenos, 2) biogénicos, 3) hidrógenos, de reacciones químicas en el agua y 4) cosmógenos, es decir derivados de fuentes del espacio (MiraCosta Collage, 2013). Siendo los dos primeros los

principales, pues, los litógenos representan cerca del 45% del sedimento marino y los biogénicos el 55% restante.

1.4.1. Terrígenos

Los sedimentos terrígenos son producto de la erosión de material ubicado fuera de la zona de depositación. Son aquellos formados y depositados en “tierra” (Alcérreca, 2011).

Son materiales productos de la meteorización de un material y cuyo depósito ocurre en un lugar diferente a donde se llevó a cabo este proceso. A partir de los granos detríticos se forman conglomerados, areniscas, fragmentos de roca, etc. Dependiendo de si se encuentren unidos entre sí gracias a un cementante o estén sueltos, se consideran como rocas sedimentarias o como sedimentos.

Los principales compuestos químicos que integran a los sedimentos terrígenos son el cuarzo (Q), el feldespato (F) y los fragmentos líticos (R) y, de acuerdo con el porcentaje que contenga de cada compuesto mencionado, será la clasificación del material terrígeno (Sánchez & Centeno, 2015). Para poder considerar si los sedimentos son o no terrígenos, basta con que el material se componga de al menos 50% de los materiales antes mencionados.

En el contexto de los sedimentos marinos, los sedimentos terrígenos también se pueden denominar alóctonos dado que su procedencia está ligada, ya sea con el continente o con la costa (Universidad de las Palmas de Gran Canaria [ULPGC], 2017). El mayor aporte proviene de los ríos, los cuales a su vez proporcionan también nutrientes (minerales disueltos no consumidos por procesos biológicos como el cloro y sodio). Este material terrígeno es transportado a través de los océanos debido a procesos como los flujos gravitatorios, el viento, por el desprendimiento y deshielo de bloques congelados, y también por la actividad volcánica. Una vez en el océano, una parte del material se almacena inicialmente en lagunas, estuarios y en parte de las plataformas continentales, mientras el material fino como las arcillas, es depositado en aguas más profundas y a su vez estas contribuyen a la mineralización de los océanos (ver Figura 1.4.1.1).

Los sedimentos litogénicos se pueden clasificar, como ya se ha mencionado, de acuerdo con su tamaño: gravas, arenas, limos y arcillas. En los océanos se pueden encontrar gravas en los arrecifes de coral o en los glaciares, aunque los materiales más comunes son arenas, limos y arcillas. Los granos gruesos se transportan en flujos turbulentos y tienden a depositarse primero que los granos finos dado que muchos de estos últimos se mantienen en suspensión por más tiempo (López, 2010).

Las arenas comúnmente están constituidas por minerales como cuarzo (dado que es el más resistente a la abrasión y a la disolución), feldespato, micas y aluminosilicatos. Las arenas a su vez se encuentran con facilidad en los depósitos costeros y de plataforma., los limos se localizan en el talud y la elevación continental, mientras que las arcillas se caracterizan por depositarse en las plataformas, el talud y el mar profundo (López, 2010).

Dentro de los sedimentos litogénicos, también se encuentran aquellos que son de origen volcánico, ya sea, aquellos formados como resultado de explosiones aéreas, los que son fragmentos de rocas volcánicas y los que se formaron sobre el piso oceánico. Además de estos sedimentos, se tienen de igual manera aquellos denominados glaciales, que como su nombre indica son la fuente de material glacial provenientes tanto de la zona Ártica como la Antártica (ULPGC, 2017).

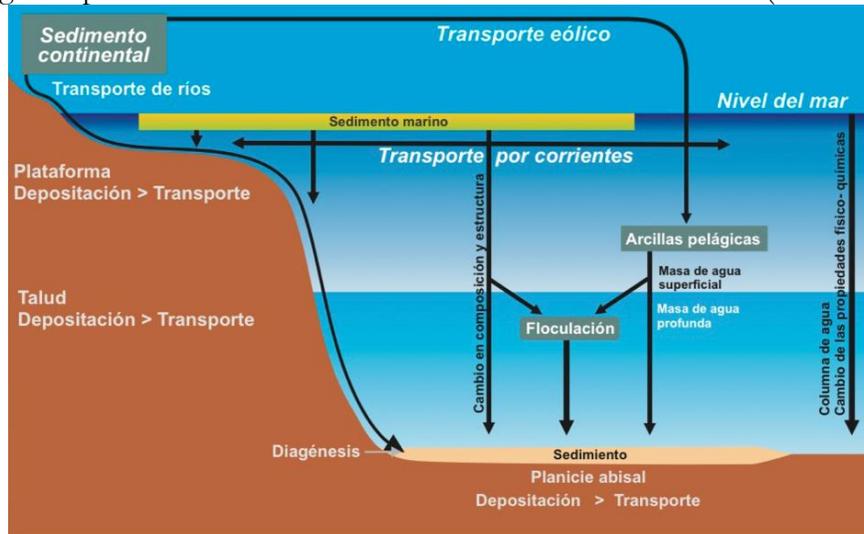


Figura 1.4.1. 1. Principales factores involucrados en el proceso de sedimentación marina (Valdés, s.f.)

1.4.2. Biogénicos

Estos sedimentos tienen su origen en los restos de organismos vivos que son depositados cuando éstos mueren (sedimentos autóctonos). En sí, el término “sedimento biogénico” es usado para referirse a las partes duras capaces de contribuir a la formación de estos materiales, tales como conchas, esqueletos, dientes, etc., teniendo como resultado sedimentos ricos en carbonato de calcio, sílice y fosfato (ULPGC, 2017).

En cuanto a su distribución en el medio marino, en la plataforma se depositan materiales calcáreos cuyo origen son restos y esqueletos de organismos, mientras que en el talud y hacia fuera de la línea costera los materiales depositados tienen un origen en restos de organismos planctónicos. Si un sedimento está compuesto por más del 30% de restos de esqueletos microscópicos y por ende su cantidad de carbonato de calcio o sílice es la predominante, se les denomina oozes, siendo los oozes calcáreos aquellos que cubren alrededor del 48% del fondo del océano (López, 2010).

Las zonas de afloramientos, de divergencia oceánica y aquellas zonas de baja profundidad o poco definidas, donde la termoclina (una capa que evita el flujo de nutrientes) es de baja profundidad o poco definida, son las zonas más ricas en nutrientes (ULPGC, 2017).

1.5. Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos es un proceso de la naturaleza que se presenta de manera continua, a simple vista puede no resultar visible pero este fenómeno se ve reflejado a través del tiempo en los cambios morfológicos tanto de ríos como en formaciones costeras. El transporte se puede llevar a cabo por diferentes agentes, principalmente por acciones del viento y del agua.

Acciones como las corrientes, el oleaje o la acción de ambos (oleaje-corriente) son causantes de mover las arenas (Chávez, 2011). El movimiento que resulta más importante en temas de transporte de sedimentos es aquel generado por la rotura del oleaje, pues con cada ola que rompe se transportan pequeñas cantidades de arena perpendicular a la playa y paralelo de ella, crosshore y longshore, respectivamente (Cerde, 2016).

De acuerdo con la estación del año, se presentan distintas variaciones del transporte perpendicular de sedimentos, siendo en otoño e invierno cuando se presenta un oleaje más brusco y por lo tanto el transporte es mayor, mientras que verano el oleaje es menos energético lo que estabiliza la playa nuevamente al engrosarla y suavizar su pendiente (Cerde, 2016).

1.5.1. Tipos de transporte de sedimentos

El transporte se divide en tres etapas: inicio de movimiento, transporte (de fondo o en suspensión) y la sedimentación o fin del movimiento.

Inicio de movimiento

También llamado inicio de arrastre es cuando el sedimento se encuentra bajo condiciones críticas y estas son superadas. Los procesos por los cuales esto sucede son diversos y su descripción depende de cada autor, sin embargo, de manera general, se coincide que el movimiento se genera cuando la velocidad del fluido es mayor o altera a las condiciones de reposo de una partícula al fondo de un cuerpo de agua, las cuales dependen de las características del sedimento (tamaño y distribución del material en el fondo).

Los criterios más utilizados para evaluar las condiciones críticas (en flujos uniformes o bajo corriente) tienen sus bases en el estudio del esfuerzo tangencial en el fondo ($\tau_0 = \gamma h S_0$) y en la velocidad de corte crítica cerca del fondo ($u_* = \sqrt{ghS}$), de igual manera, ésta se puede expresar de la siguiente manera:

$$u_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Ec. 1-28

En cuanto al inicio de movimiento en suelos friccionantes, el criterio más utilizado es el Parámetro de Shields (1936), el cual establece una relación entre el esfuerzo cortante y las

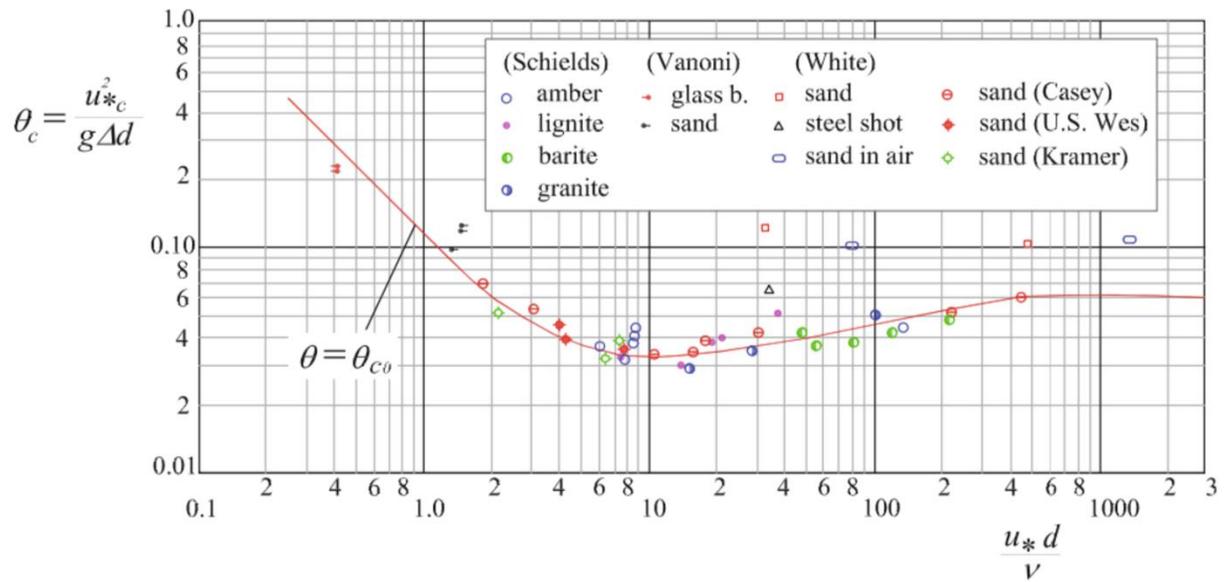
propiedades del material sólido (peso específico y tamaño de la partícula), según se muestra en la Ec. 1-29:

$$\theta = \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d} = \frac{u_*^2}{g\Delta d} \quad \text{Ec. 1-29}$$

Dónde;

- τ_0 ; esfuerzo cortante (N/m²)
- ρ ; densidad del agua (a 20°; 998.29 kg/m³)
- ρ_s ; densidad del sedimento (kg/m³)
- u_* ; velocidad de cortante (m/s)
- d ; diámetro de la partícula en metros (m)
- Δ ; peso específico relativo
- g ; aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

El cual además se puede expresar en función del número de Reynolds de la partícula:



$$Re_* = \frac{u_* D}{\nu} \quad \text{Ec. 1-30}$$

Figura 1.5.1. 1. Diagrama de Shields (Armanini, 2005)

Si el parámetro de Shields calculado con la expresión antes presentada es $\theta < 0.03$ no existe movimiento de las partículas, pero si $0.03 \leq \theta \leq 0.06$ se deberá verificar si existe el movimiento con

ayuda del número de Reynolds y con la *Figura 1.5.1.1*. Si el parámetro es mayor a 0.06, se considera que hay transporte sólido salvo en el caso de que el número de Reynolds fuese muy bajo (ver *Figura 1.5.1.1*).

Modos de transporte

Una vez que las condiciones críticas son excedidas y ocurre el movimiento, el transporte se divide en dos grandes grupos, el transporte de fondo (arrastre, rodamiento y salto) y el transporte en suspensión, en el cual intervienen factores como la velocidad de sedimentación y los parámetros de flujo (distribución de la velocidad y la turbulencia). Generalmente este último se da en partículas menores a los 0.2 mm, mientras que delante de 2 mm se considera el primer modo (Chávez, 2011). Otro modo de determinar el mecanismo de transporte es el propuesto por Rouse (1945), el cual, propone una expresión ($P = \frac{\omega}{ku_*}$) que permite conocer, de acuerdo con el valor obtenido el mecanismo de transporte de las partículas.

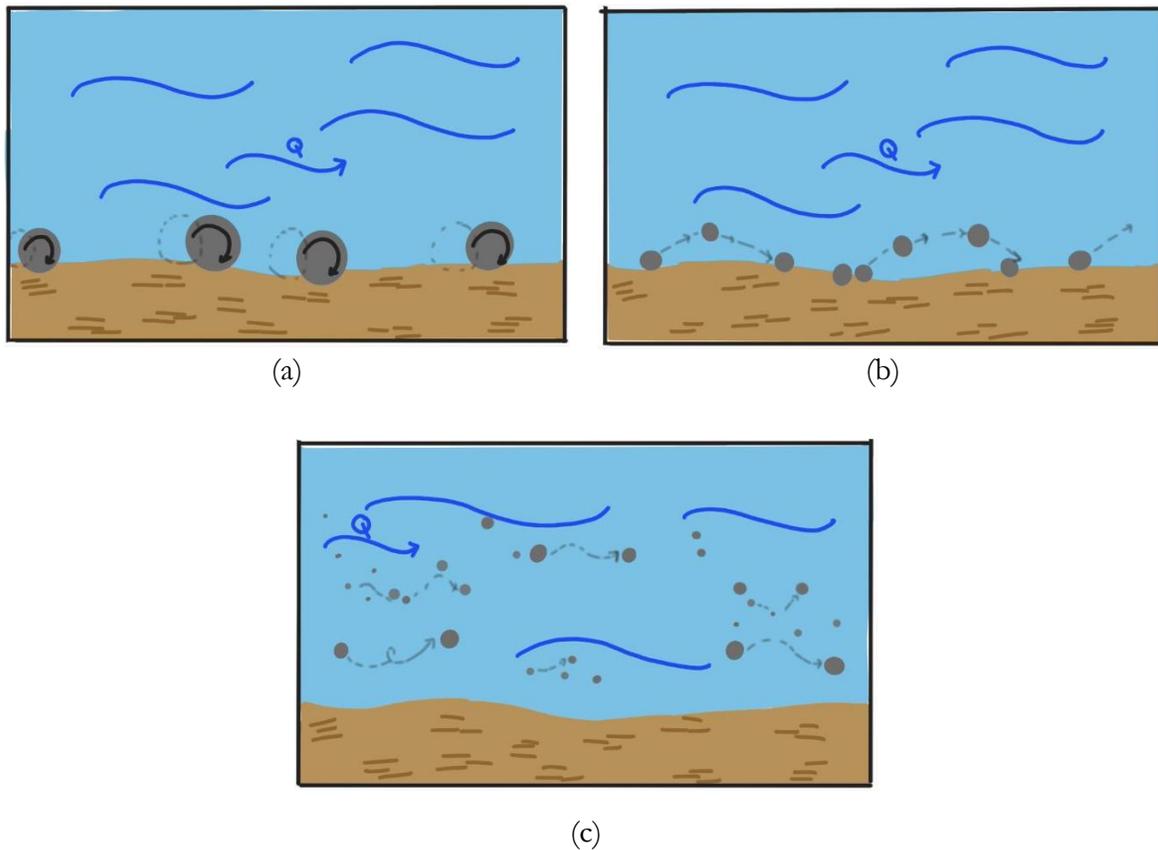


Figura 1.5.1. 2. (a) Rodamiento, cuando los sedimentos permanecen en constante contacto con el fondo. (b) Saltación, el grano, generalmente de menor medida que aquellos que ruedan, va siendo arrancado del fondo y deja por un instante el suelo, momento en el cual el flujo lo arrastra hasta ser depositado nuevamente. (c) Suspensión, no tiene contacto con el fondo.

Sedimentación

Es cuando las partículas dejan de moverse o de ser transportadas y se depositan sobre el fondo.

1.5.2. Tasa de transporte de sedimentos

Los cambios morfológicos y los cambios en el espacio (transversales y longitudinales) contribuyen a la evolución morfológica de una playa (López, 2016).

Morales, Winckler & Herrera (2019) explican que un parámetro para llevar a cabo el estudio de la evolución morfológica de las playas es la tasa de transporte de sedimentos, ya sea, de aporte o de pérdida de material. Si el aporte es mayor que la pérdida esto representa la acreción de la playa, si sucede lo contrario se encuentra en proceso de erosión y cuando existe un equilibrio aproximado entre el suministro de sedimento y la capacidad de transporte litoral, la línea costera se mantiene relativamente constante. La manera en la que esto se conoce es llevando a cabo un *balance sedimentológico*.

El balance sedimentológico es una técnica utilizada para evaluar los cambios en la costa, se basa en llevar una cuantificación entre las fuentes, los sumideros y las tasas de transporte, para así determinar la erosión o acreción de la playa. Usualmente esta técnica es utilizada para material grueso como arenas y gravas, mientras que para finos se hace uso de otras herramientas como podría ser la modelación numérica (Morales et. al, 2019). Para ejemplificar el balance sedimentológico se presenta la Figura 1.5.2.1.

La tasa de transporte de sedimento indica la cantidad de sedimento que atraviesa un plano vertical de ancho unitario, perpendicular a la dirección del flujo, por unidad de tiempo (Chávez, 2011).

De acuerdo con la manera en que esta tasa sea expresada será el nombre que recibirá: 1) tasa de transporte másica, si como su nombre indica, se maneja una unidad de masa por metro por día (ton/m/día, kg/m/día), y 2) tasa volumétrica de transporte, cuando en lugar de expresarse en función de masa se hace en volumen.

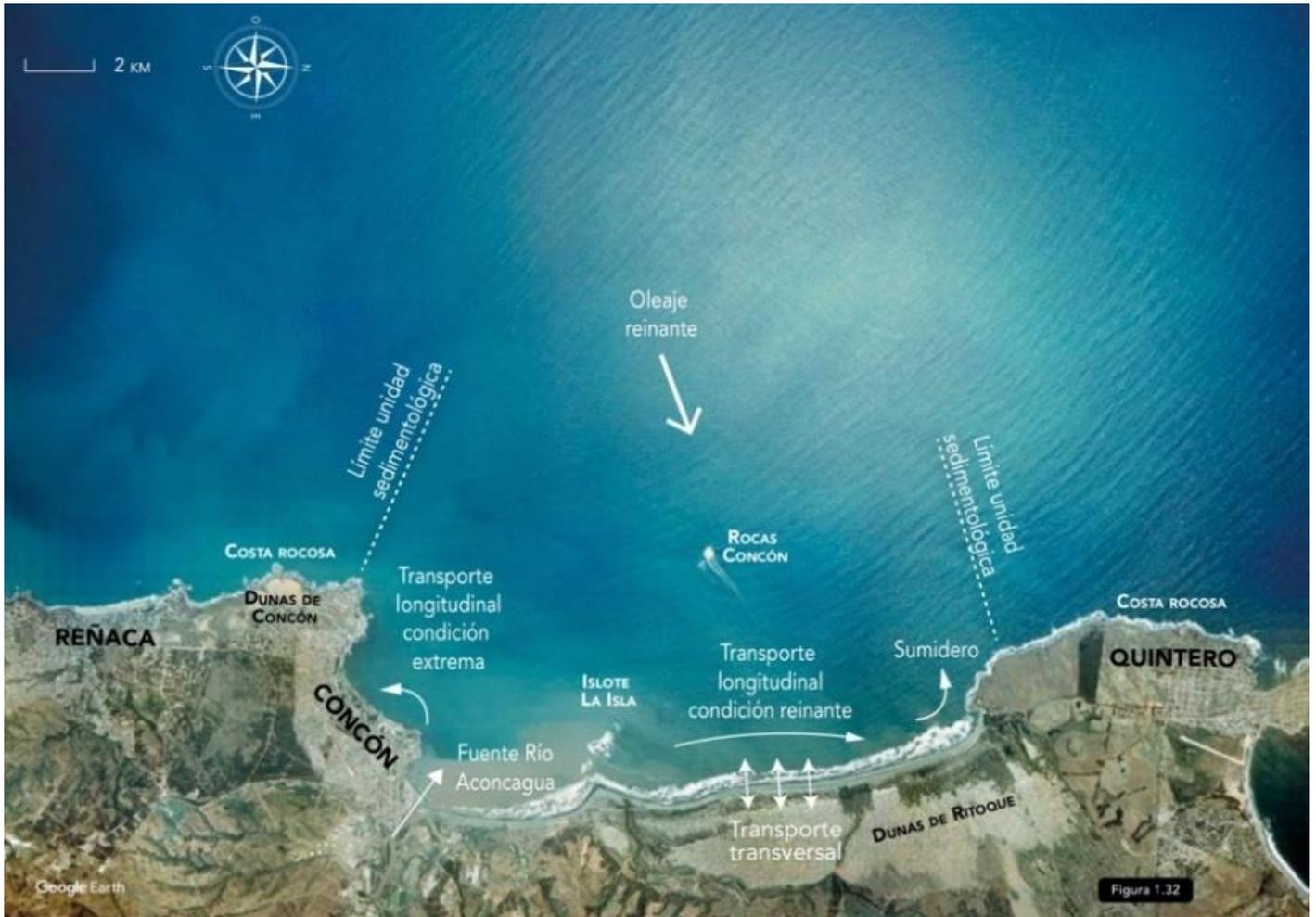


Figura 1.5.2. 1. Balance sedimentológico en la bahía de Concón y dunas de Ritoque, Región de Valparaíso (Morales et al., 2019)

1.5.3. Erosión costera

De manera general, la erosión costera se puede definir como el “retroceso” de la costa. Este es un proceso natural que origina cambios en los perfiles de la playa. Se puede explicar, como el cambio que existe de comparar una playa en dos instantes diferentes, en los cuales, la línea de costa se ha visto modificada al decrecer.

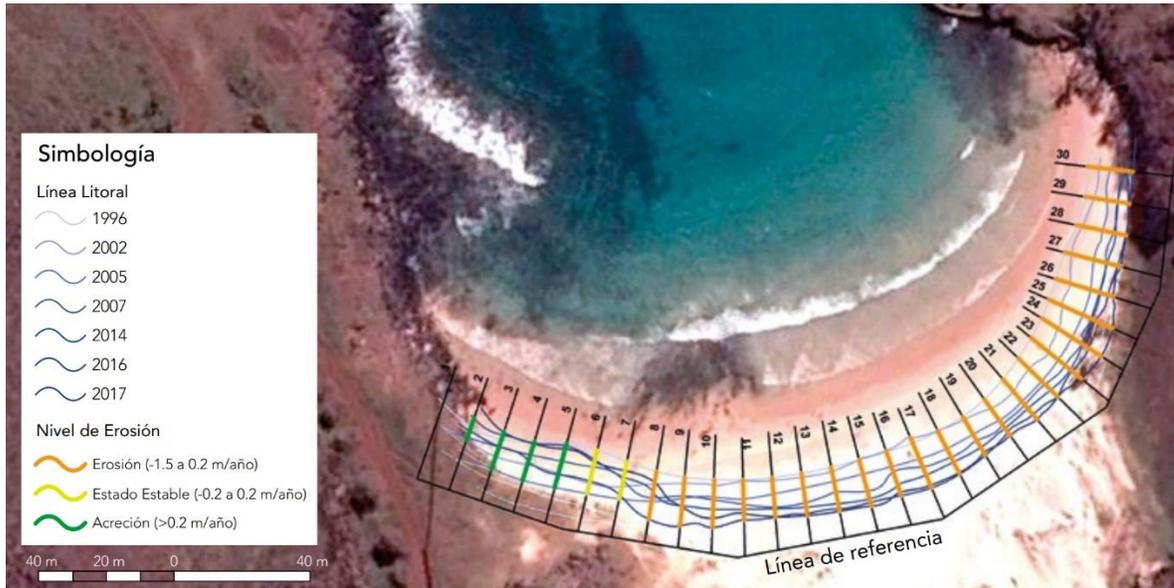


Figura 1.5.3. 1. Cambios en la línea de costa en la playa de Anakena (Rapa Nui), Chile. (Morales et al., 2019)

Para poder hablar de que existe o no erosión en la costa, la cantidad de arena que deja la costa debe ser menor a la que llega en el sistema litoral. La manera en que esto se puede conocer es llevando a cabo un balance sedimentario con base a la tasa de transporte de sedimentos (Ministerio De Medio Ambiente Y Recursos Naturales [MARN], s.f).

Para evaluar la erosión se debe responder de acuerdo con escalas espacio-temporales que abarquen el nivel de estudio que se requiere (López, 2016; Guillén, s.f). Las formas del relieve son resultado de un largo proceso de evolución geomorfológica. Las diversas modificaciones a las que se ve sometida la costa se deben a la interacción permanente de diferentes procesos y agentes de modelado con diversa intensidad y velocidad en el tiempo y en el espacio (Azus, s.f).

No es lo mismo medir la erosión en un tiempo muy corto, en el cual parecerá el medio se encuentra equilibrado, contra un periodo más largo que abarque un conjunto de años donde el cambio en la línea de costa sea notorio. De igual manera, el evaluar la erosión en un sector pequeño de la playa puede indicar que existe un desequilibrio únicamente en esa zona o por el contrario es el inicio de una erosión generalizada a lo largo de la costa. Es por esto que resulta importante establecer una escala geomorfológica adecuada para llevar a cabo un estudio de erosión (Rolando, 2007).

De acuerdo con Morales et al. (2019), son varios los métodos que hoy en día existen para llevar a cabo la medición de los cambios y el cálculo de las tasas de erosión. Algunos de estos son meramente visuales y se apoyan de imágenes satelitales o de levantamientos topográficos (para escalas definidas y únicamente en secciones transversales), resultandos sencillos, pero en ocasiones presentando algunas debilidades como podría ser la dificultad de reconocer algunos elementos de estas imágenes. Mientras que otra técnica es la cuantificación del volumen erosionado para el cual se hace uso del ya antes mencionado balance sedimentario.

Como resultado de las modificaciones naturales o de origen antropogénicos el suministro de sedimentos se reduce (Morales et al., 2019). El estudio de las causas de la erosión costera es el primer paso para la comprensión adecuada del fenómeno y la toma de medidas apropiadas de control, prevención y mitigación (PNIEC 2019).

Erosión Natural

La erosión natural es el resultado de la interacción que existe entre los sedimentos y los procesos hidrodinámicos de la costa. Se puede entender como aquel proceso geológico a través el cual se equilibran dichas interacciones (Morales et al, 2019). Si dicho equilibrio permanece “constante” se alcanza el llamado perfil de equilibrio.

Este perfil surge de manera teórica para definir aquel perfil de playa adoptado cuando se tienen condiciones de oleaje constantes y determinado tamaño de los granos que componen el perfil (Bernabeu, 2002). Esta situación se presenta durante períodos cortos en los cuales las condiciones oceanográficas experimentan variaciones poco significativas.

De acuerdo con el nivel del mar, ya sea que éste suba o baje, será la manera en que el movimiento de sedimentos se produzca en una playa. Cuando se experimenta que el nivel baja generalmente se ocasiona la acreción en la parte superior de la playa, mientras que cuando ésta baja, se tiende a erosionar la playa seca y a acrecentar la playa sumergida (Morales et al., 2019).

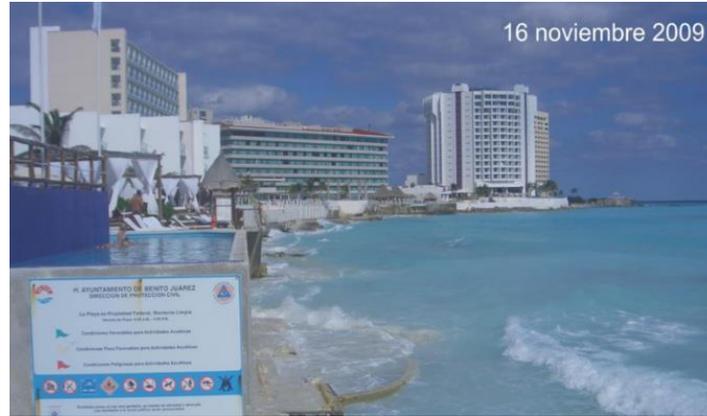
Además de las causas hidrodinámicas que ocasionan la erosión, la vegetación también juega un papel relevante en ese proceso. Se ha observado que los manglares, por ejemplo, reducen la erosión y ralentizan el transporte de sedimentos, además de brindar cierto grado de protección durante eventos extraordinarios como los tsunamis o huracanes. Sin embargo, no siempre la vegetación es sinónimo de una menor erosión, ya que existen casos en los cuales ésta propicia el fenómeno, sobre todo en sitios donde los sedimentos predominantes son finos.

Fenómenos naturales como huracanes y ciclones también conducen a una erosión en la línea de costa, misma que es compensada una vez que se restablecen las nuevas condiciones de equilibrio del sistema.

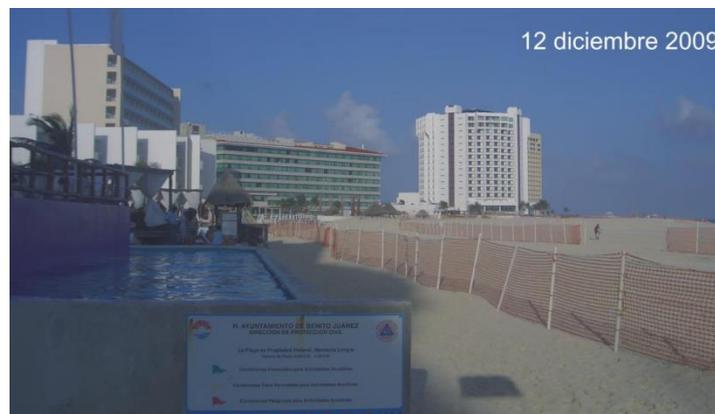
Erosión Antropogénica

Las acciones humanas pueden desencadenar o intensificar los procesos erosivos (Morales et al., 2019), dado que la mayor parte de las veces se interfieren los procesos costeros naturales. Un

ejemplo se muestra en la Figura 1.5.3.1., donde se observa la erosión y recuperación debida a un relleno de playa, en Cancún, Q.R.



(a)



(b)

Figura 1.5.3. 2. (a) Erosión y (b) recuperación de playas de Cancún (Cruz & Cervantes, 2016)

Actividades dentro de las cuencas litorales, por ejemplo, la construcción de presas, los sistemas de drenaje, o cualquier actividad que provoque cualquier cambio en la hidrología del sitio (Ibarra & Belmonte, 2017), tienen repercusiones en la tasa de transporte de sedimentos en los ríos que suministran material a una costa, favoreciendo así a la erosión de las playas.

Dentro de la zona litoral, acciones como la deforestación del suelo, la extracción de material para construcción, la construcción de obras costeras o la explotación forestal, son algunos de los causantes de la erosión en la costa. En cuanto a la deforestación, como se ha mencionado, la presencia de vegetación muchas veces previene precisamente la pérdida del material que conforma la costa, por lo que al eliminar de manera excesiva la materia vegetal deja expuestos los sedimentos

a diferentes agentes, tales como el viento, que originan un desequilibrio tal que favorece al retroceso de la playa.

La urbanización dentro de la zona costera altera de manera indiscriminada el perfil de la playa, pues todas las acciones que conlleva construir complejos inmobiliarios favorecen a la pérdida de sedimentos, ejemplo tal son las excavaciones que destruyen los revestimientos superficiales y dejan expuesto el material.

Contradictoriamente a lo que se podría pensar respecto a las obras de defensa para manejo y control de la erosión costera, muchas veces más que hacer su función, terminan contribuyendo a generar erosión aguas abajo de las mismas o socavación en sus entornos. De esto resulta la importancia de un correcto estudio y diseño de estas obras, intentando así mitigar cualquier efecto adverso. A pesar de llevar a cabo una “correcta” ejecución, cualquier alteración en la costa, por mínima que sea, trae consigo una respuesta morfológica.

1.6. Distribución del sedimento en las playas

Las playas cambian su forma (perfil y planta) a lo largo del tiempo, resultando no ser elementos estáticos de la costa. Los cambios a los que están expuestas dan como resultado un transporte de sedimentos que a su vez conllevan una distribución granulométrica variada del material que constituye a la playa (Medina et al., 1995).

En la costa, al ser un medio de transición entre el continente y el medio marino, intervienen una serie de procesos relacionados con el oleaje, el viento, las mareas, las corrientes litorales y la influencia de descargas fluviales, además de tener en cuenta la relación que se tiene tanto con el ecosistema biológico que coexiste en esta zona de transición como con la influencia antrópica.

La interacción entre los sedimentos, los flujos que actúan, la morfología y factores regionales dan origen a la configuración del perfil litoral. Hoy en día la evolución morfológica del litoral es uno de los temas más estudiados en cuanto a la evaluación de procesos de erosión y acreción respecta, dado que cerca del 70% de las playas alrededor del mundo padecen del desequilibrio entre la entrada y salida de sedimentos que favorecen la erosión costera.

Para facilitar el estudio y diferenciar espacialmente las diferentes áreas que conforman el perfil de playa, se ha optado por llevar a cabo una zonificación de ésta. Algunos de los términos utilizados no cuentan con traducción al español y su definición depende del autor. De acuerdo con Rodríguez (2021) la terminología queda según se muestra en la Tabla 1.6.1.

Tabla. 1.6. 1. Terminología utilizada para las zonas definidas dentro de la zona costera (Rodríguez, 2021)

Término	Definición
Offshore	Es la zona donde no hay un transporte de sedimentos significativo producido por la acción del oleaje
Litoral	Porción del perfil costero donde el sedimento puede ser transportado debido a la acción del oleaje.
Nearshore	Porción del perfil costero que se extiende desde el límite de la zona offshore hasta la línea de marea baja.
Shoreface	Zona denominada por la acción del oleaje desde el límite de la zona offshore hasta la línea de marea baja.
Shore	Porción del perfil costero sujeta a la acción del oleaje y que es expuesta por algunos lapsos. El límite con el mar se define con la línea de marea baja y el límite con la tierra usualmente es considerado en la línea con vegetación.

Foreshore	Porción de la playa sujeta a la acción del oleaje en condiciones sin tormenta.
Backshore	Porción de la playa sujeta a la acción del oleaje únicamente en condiciones de tormenta. Es el tramo de la playa utilizada con fines recreativos.
Surf-Zone	También llamada zona de resaca. Es la zona donde rompen las olas, se extiende desde la zona de rompimiento de las olas hasta la zona foreshore.
Swash-Zone	Es la zona de lavado, se presenta el wave run-up en la playa y después el agua retorna en forma de backwash. Esta varía dependiendo de las condiciones de oleaje y de la pendiente de la playa.
Intertidal	Es la zona entre la línea de marea alta y de la marea baja.
Shoreline	Es dónde se lleva a cabo la intercepción del nivel medio del agua a lo largo de la playa.

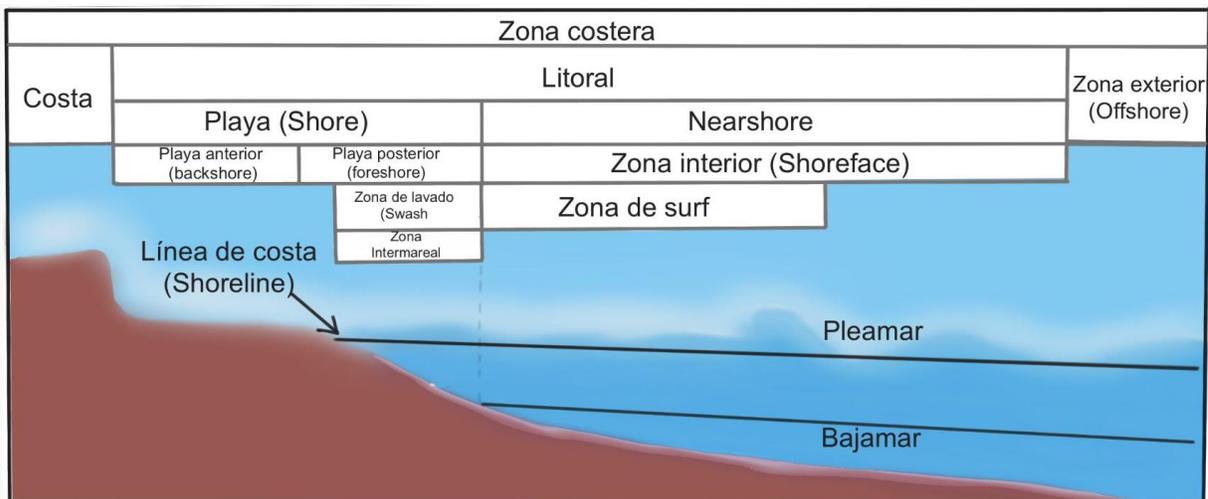


Figura 1.6. 1. Zonificación del litoral (Masselink et. al, 2003, como se citó en Rodríguez, 2021)

Existen varios criterios para clasificar las playas, que cambian un poco según el autor que se consulte. Algunos autores consideran factores únicamente relacionados con la distribución granulométrica, otros llevan a cabo esta clasificación según el estado morfodinámico y algunos más afirman que las playas se pueden agrupar en función de la altura de ola en rotura, el periodo, la velocidad de caída del sedimento y el rango de marea.

Las playas se pueden clasificar de acuerdo con los sedimentos que las componen, es decir, se basa en la distribución transversal del sedimento y la forma de la partícula (Bluck, 1967).

La distribución granulométrica brinda información sobre su fuente y la forma e intensidad del transporte que lo origina (Guillén, s.f.). Esta distribución tiende a poseer un comportamiento temporal el cual varía de manera estacional y se relaciona, a su vez, tanto con los cambios morfológicos del perfil como con las diferentes solicitaciones hidrodinámicas (Medina et al., 1995). Sin embargo, la variación temporal resulta ser la menos estudiada debido a que es difícil de reconocer y suele ser de menor magnitud. La variación más estudiada es aquella que tiene que ver con el espacio: 1) variaciones longitudinales, relacionadas principalmente con cambios en la energía del oleaje a lo largo de la playa y cambios en cuanto a cantidad y tipo de sedimento, y 2) variaciones transversales, aquellas que tienen que ver con el perfil de equilibrio (Guillén, s.f.).

La distribución granulométrica del sedimento en la zona litoral de manera habitual responde a que los granos de mayor tamaño se encuentren tanto en la zona de interacción backwash o surf, es decir, una zona donde la turbulencia es mayor, como en la zona de la cresta de la berma de verano debido a la dinámica del run-up. Los granos de menor diámetro suelen encontrarse en dunas debido a los procesos de transporte del viento. Desde la bajamar media y a medida que aumenta la distancia mar adentro de la zona de rompiente, tiende a presentarse una disminución respecto al tamaño de sedimento, es decir, los granos tienden a ser más finos (López, 2016).

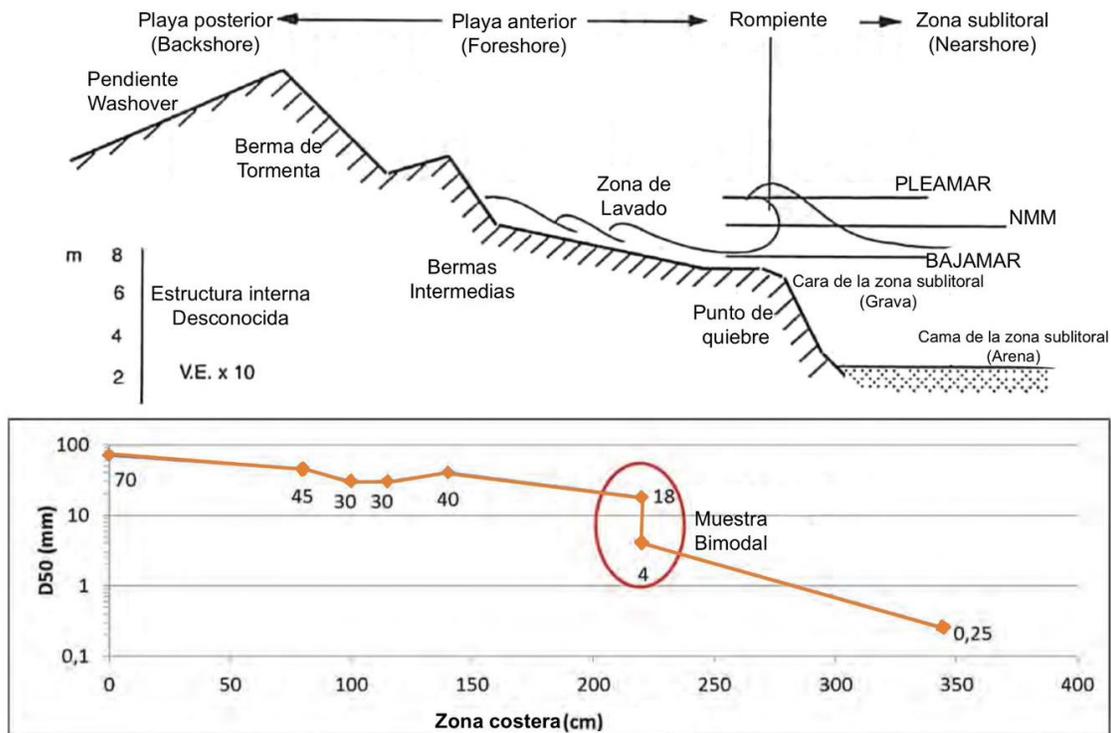


Figura 1.6. 2. Variaciones en el tamaño de los granos del sedimento (Blanco, 2004 modificado a partir de Single & Hemmingsen, 2001, como se citó en López, 2016)

Como se observa en la *Figura 1.6.2*, se puede decir que, de manera general, la distribución de los granos tiende a disminuir conforme se acerca a la plataforma continental, esto se debe principalmente a la disminución de la energía de los flujos de transporte conforme se acerca a la plataforma (Guillén, s.f.).

Además del D_{50} (ver sección 1.2), se suelen utilizar otros parámetros estadísticos como la desviación estándar, la asimetría y la curtosis, que resultan útiles siempre y cuando los granos sean relativamente uniformes (asemejarse a una distribución normal-logarítmica). En caso de presentarse una muestra con grandes rangos de diámetros resultarían en una medida inadecuada, como suele ser el caso en playas mixtas compuestas de arena y grava (López, 2016; Medina, 1995).

Cuando una playa es mixta, se considera que los sedimentos que la conforman son de tipo bimodal, resultandos difíciles de caracterizar, pues en el caso del D_{50} , este suele volverse muy inestable cuando se cuentan tamaños de diámetros con grandes variaciones en los extremos, surgiendo así la necesidad de utilizar otros percentiles para intentar llevar a cabo una aproximación a la caracterización de la distribución granulométrica.

Las playas muy heterogéneas tampoco son fáciles de caracterizar, y esto se debe principalmente a que los sedimentos que se encuentren en dicha playa no serán constantes en el tiempo debido a los cambios estacionales que se presentan. Como parte de estos cambios estacionales se tienen dos extremos de playa, la bonanza y el temporal, los cuales se van alternando, dando como resultado un ciclo entre ellos y a su vez resultando un método de defensa natural pero altamente sensible a los cambios.

Cuando la energía del oleaje es baja se suele llamar “bonanza”, es aquí cuando el perfil de la playa suele tener pendientes más fuertes y la mayor parte de los granos se acumulan en la zona de playa seca, dando como resultado un mayor ancho en la playa. Cuando la energía del oleaje sube y posee cierta intensidad es cuando se producen los temporales, los cuales dan el resultado “opuesto” a la bonanza, es decir, el ancho de playa seca se reduce, las pendientes se suavizan, la orilla retrocede y los sedimentos tienden a ser transportados mar adentro o a zonas más profundas del perfil, lo que puede originar la formación de barras que ocasionan que la rotura del oleaje sea más alejada de la costa (Ibarra & Belmonte, 2017). Durante el ciclo bonanza-temporal la playa se ajusta a un perfil de equilibrio de acuerdo con la energía del oleaje incidente.

2. METODOLOGÍA

Con el objetivo de caracterizar las partículas sedimentarias que conforman las diferentes playas de México, el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos (GICP) del Instituto de Ingeniería de la UNAM se ha dado a la tarea de llevar a cabo campañas de recolección de muestras que son sometidas a diferentes pruebas de laboratorio que permiten identificar las principales características de los sedimentos.

En el presente capítulo se expone de manera general cómo se obtienen las muestras, y se explican las pruebas de laboratorio realizadas en el Laboratorio de Sedimentos para, finalmente, presentar los resultados de los análisis a la información provista por la base de datos (BD).

2.1. Muestras de sedimento en el litoral mexicano disponibles

Para la caracterización de los sedimentos del litoral mexicano, se tomó la información recopilada por el GICP del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en el periodo de noviembre del 2006 a octubre del 2021.

La BD del GICP, a octubre del 2021, es el resultado del trabajo de campañas de campo realizadas en 15 de 17 estados costeros de la República Mexicana (ver Figura 2.1.1) en el periodo antes mencionado, y de estudios necesarios para la caracterización de los sedimentos, llevados a cabo en laboratorio y en gabinete.

El trabajo en campo consiste en recolectar muestras en 3 zonas específicas del perfil de playa:

- 1) Zona seca (backshore), la cual es la zona cuya extensión abarca desde el límite de la pleamar hasta donde la presencia de la vegetación ya es permanente.
- 2) Zona de lavado (swash), es la zona donde el nivel del mar sube y baja de manera constante sobre la cara de la playa, cubriendo y descubriendo esta zona.
- 3) Zona de rompiente (surf), es donde las olas provenientes de la playa exterior rompen debido al efecto de someramiento.

Una vez obtenidas las muestras en cada campaña, en el Laboratorio de Sedimentos del GICP, se someten a diferentes pruebas para obtener sus propiedades físicas (sección 2.2), para finalmente procesar en gabinete la información obtenida de cada análisis y vaciar así los datos en la BD.



Figura 2.1. 1. Estados de la República Mexicana con información en la BD del GICP, IINGEN, UNAM (elaboración propia)

De la totalidad de los datos, la distribución de estos varía de según el estado, contando con algunos donde la información es mínima, mientras que otros estados cuentan con una gran cantidad de datos.



Figura 2.1. 2. Distribución de la información de la BD

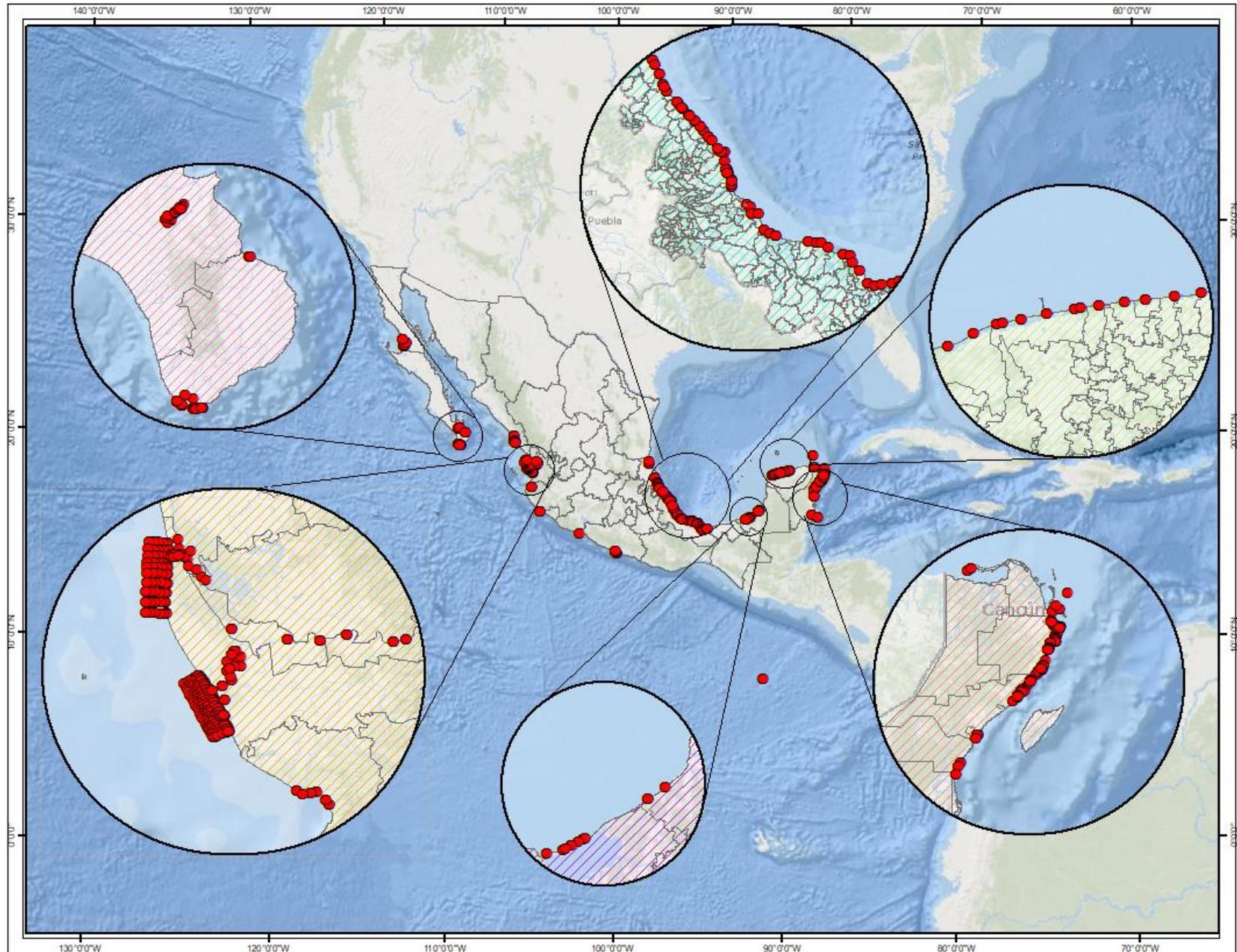


Figura 2.1. 3. Distribución geográfica de las muestras (con datos) de la base de datos del GICP, IINGEN (elaboración propia)

2.2. Propiedades físicas

El GICP se centra en realizar las pruebas que arrojen como resultado las propiedades más representativas o con mayor aplicación en el área de la ingeniería de costas.

Las propiedades físicas de interés, y que son capturadas en la BD del análisis sedimentario del GIPC, son las siguientes:

- Coeficiente de Uniformidad y de Curvatura (CU, CC, respectivamente), con los cuales se puede conocer que tan uniforme o bien graduada es la muestra de suelo.
- La densidad (ρ), es decir la relación que existe entre la masa de una sustancia (Ms) y su volumen (V).
- La densidad relativa, obtenida por picnómetro (ρ_{pic}) o por el CAMSIZER (rD), es la relación que existe entre la densidad de una sustancia y otra que se toma como referencia).
- El límite líquido, plástico e índice de plasticidad (LL, LP e IP), los cuales permiten conocer algunas propiedades de los suelos finos (tamaño inferior a 0.074mm).
- El peso volumétrico suelto (γ_s), aquella relación entre el peso y el volumen ocupado por el material suelto.
- Los diámetros característicos (D_{10} , D_{50} , D_{90}), donde el subíndice n hace referencia al porcentaje del peso de los sedimentos cuyas partículas tienen tamaños menores de D_n .
- La velocidad de caída asociada al D_{50} (W_{d50}), es el tiempo que le toma a una partícula caer. Es una propiedad que permite evaluar el transporte de sedimentos.
- El factor de forma ($bl/3$), establece una relación entre la longitud, ancho y grosor del grano.
- La esfericidad (SPHT3), refleja las condiciones de depositación y de la acumulación del material.
- La redondez (Symm3), da una idea de la abrasión, madurez o desgaste que ha sufrido el sedimento.

2.2.1. Pruebas en laboratorio

El procedimiento de laboratorio para el análisis de muestras de sedimentos en el Laboratorio de Sedimentos del GICP establece que el tamaño de las partículas definirá el tipo de pruebas a las que se deban someter las muestras. En conjunto, existen 12 pruebas (Tabla 2.2.1.1) que se llevan a cabo en el Laboratorio de Sedimentos del GICP.

Tabla 2.2.1. 1. Pruebas efectuadas en el Laboratorio de Sedimentos del GICP

Arcillas y Limos	Arena	Grava
Secado en horno	Secado en aireadora	Secado en aireadora
Granulometría por medio de hidrómetro o tamizadora	Granulometría por medio del CAMSIZER o tamizadora	Granulometría por medio de la tamizadora
Densidad por matraces	Densidad por picnómetro	Fotografía con microscopio
Límites de consistencia	Velocidad de caída	Velocidad de caída
Peso volumétrico	Peso volumétrico	Peso volumétrico

A continuación, se presentan los procedimientos de las pruebas de interés para el presente trabajo, es decir, aquellas que se realizan a las arenas. De las pruebas enlistadas en la Tabla 2.2.1. 1., la velocidad de caída se ha realizado para un número mínimo de muestras, por lo que se ha dejado fuera del presente análisis.

Pruebas granulométricas

Obtención de la granulometría por medio de tamices

La manera más tradicional de obtener la distribución granulométrica es empleando un juego de mallas, tamices o cribas a base de filamentos de acero inoxidable que se identifican mediante el tamaño de la abertura en pulgadas o de acuerdo con el número de hilos.

Instrumentos y materiales

Un juego de tamices (el Laboratorio de Sedimentos cuenta con 34 tamices Retsch, los cuales van desde las 20 micras hasta los 40 milímetros), una tamizadora analítica, una báscula de precisión, una charola y una brocha. (Figura 2.2.1.1)



Figura 2.2.1. 1. Instrumentos utilizados para la prueba granulométrica por tamices

Procedimiento

Se debe verificar que la muestra a analizar se encuentre seca, de no ser así se deberá someter a un proceso de secado por medio de un aireador. Cuando menos se debe tener un kilogramo de la muestra a analizar, pues con este peso se llevará a cabo la prueba. Los pasos a seguir, son los siguientes:

1. Limpiar cada tamiz a utilizar, pesarlos y registrar dicho valor.
2. Ordenar sobre la tamizadora analítica cada tamiz de acuerdo con su tamaño, colocando la charola de retención hasta abajo, enseguida la malla con menor abertura y así de manera ascendente hasta la más grande.
3. Verter la muestra y se coloca la tapa de la tamizadora.
4. Ajustar en tiempo y amplitud la tamizadora analítica, y esperar a que termine el proceso.
5. Retirar cada tamiz, pesarlo (ahora con el fragmento de muestra retenido) y registrar estos valores.
6. Construir la curva granulométrica.

Obtención de la granulometría por CAMSIZER

El CAMSIZER es un instrumento electrónico utilizado para efectuar el análisis granulométrico de partículas secas cuyo rango de tamaño sea desde las 30 micras hasta los 30 mm. Toma como base el análisis dinámico de imágenes descrito en la ISO 13222-2, método que a diferencia del análisis estático, considera el movimiento de las partículas en relación con la cámara, brindando así una facilidad de análisis en muestras cuyo volumen es considerable y se requiere de resultados rápidos y fiables a la vez, gracias a este principio, el CAMSIZER es capaz de obtener las principales características morfológicas de las partículas a través de las sombras de estas.

Además del instrumento como tal, para efectuar los análisis de tamaño y forma de las partículas, se cuenta con un software, el cual, a su vez, calcula en tiempo real las curvas de distribución granulométrica y arroja diferentes parámetros de forma como la redondez, el factor de forma y la esfericidad del grano.

Al efectuar un análisis granulométrico con el CAMSIZER, no solo se tendrá como resultado la curva granulométrica, si no también, los **diámetros característicos** (D_{10} , D_{50} y D_{90}), el **factor de forma** ($b/13$), la **densidad** (ρD), la **esfericidad** (SPHT3) y la **redondez** (Symm3) media de los granos de la muestra.

Instrumentos y materiales

Una báscula, una espátula, una brocha, una cápsula de porcelana, una malla de serigrafía de alambre de acero inoxidable y el CAMSIZER. (Ver Figura 2.2.1.2)



Figura 2.2.1. 2. Instrumentos utilizados para la obtención de la granulometría por CAMSIZER

Procedimiento¹

Al igual que para efectuar el análisis granulométrico con tamices, la muestra debe estar seca en este caso (y para todas las pruebas).

Se efectúa la prueba con 100 gramos de muestra, esto se pesará con ayuda de la cápsula de porcelana y la báscula.

Con la tolva, la guía, el alimentador y el compartimento inferior del CAMSIZER limpios, se realiza una calibración del CAMSIZER donde se crea un archivo nuevo, el cual guardará los resultados obtenidos, es aquí donde se vierte por primera vez la muestra. Con ese ajuste, se hace

¹ El procedimiento presentado a continuación es un resumen breve de los pasos que se deben de seguir. Si se requiere profundizar en el manejo del software para efectuar tanto como la calibración como el análisis final se recomienda consultar el manual del equipo y el *Manual para la obtención de granulometría por medio del CAMSIZER en el Laboratorio de Costas y Puertos del IIUNAM* (Ramírez y de la Cruz, 2021).

una serie de arreglos en cuanto a los parámetros que se medirán, finalmente se vierte nuevamente la muestra y se guardan los archivos generados.

Pruebas para la obtención de las relaciones de peso

Obtención de la densidad relativa por picnómetro

El picnómetro es un instrumento de medición utilizado para determinar la densidad de una sustancia o un elemento de la cual se desconoce este dato. Se puede describir como un envase, generalmente de vidrio, cuya base es ancha o cilíndrica y que cuenta con una escala volumétrica (ver Figura 2.2.1.3.).



Figura 2.2.1. 3. Picnómetro utilizado en el Laboratorio de Sedimentos del GICP

El uso de esta metodología puede aplicarse a prácticamente cualquier tipo de arena siempre y cuando su tamaño sea tal que pase por la boquilla del picnómetro.

La densidad relativa, utilizando un picnómetro, se obtiene considerando la masa de la muestra, así como el volumen del líquido desplazado, ya que éste será igual al volumen de la muestra (principio de Arquímedes), y se calcula con la ecuación 2-1, donde m es la masa de la muestra seca y V es el volumen desplazado en ml.

$$\rho_{\text{pic}} = 0.978 \frac{m}{V}$$

Ec. 2- 1

Instrumentos y materiales

Una pizeta, un embudo de vidrio, agua destilada, una cápsula de porcelana, una franela, un vaso de precipitado de 2 litros, una báscula, una brocha, una espátula, un tamiz #10 y un picnómetro. (Ver Figura 2.2.1.4).



Figura 2.2.1. 4. Instrumentos utilizados para la obtención de la densidad relativa por picnómetro

Procedimiento

Dado que la prueba está enfocada a suelos arenosos, la muestra seca debe ser tamizada con una malla cuya abertura sea de 2mm y si llegase a contar con materia orgánica, el tamiz a utilizar es aquel cuya abertura sea de 1mm.

1. El picnómetro limpio se debe aforar (que el menisco se encuentre sobre la marca del cero) con ayuda de las pizetas.
2. Se limpian las paredes y la entrada de éste para evitar que alguna partícula de la muestra quede pegada.
3. Se pesan 55 gramos de la muestra en la cápsula de porcelana.
4. Con ayuda del embudo, se vierten con cuidado en el picnómetro previamente aforado.
5. Se debe eliminar el aire de la muestra realizando cualquiera de las maniobras presentadas en el *Manual para la obtención de la densidad por picnómetro en el Laboratorio de Costas y Puertos del IIUNAM* (Ramírez y de la Cruz, 2022).
6. Finalmente, medir el volumen desplazado con ayuda de la escala del picnómetro.

Para llevar a cabo la comparación entre las densidades obtenidas con el picnómetro y con el CAMSIZER, se utilizará la *prueba t pareada*, el cual es un método empleado para llevar a cabo la comparación de datos que corresponden a la misma unidad experimental y cuyo motivo de contraste es determinar si el factor que diferencia a los datos tiene o no efecto en los datos.

$$t = \frac{\overline{x_m}}{s_d/\sqrt{n}}$$

Ec. 2- 2

Dónde:

$\overline{x_m}$; diferencia media entre las muestras

s_d ; desviación estándar de la diferencia entre muestras

n ; número de muestras

El valor obtenido de la ec.2-2, será contrastando con el valor de la distribución T-Student ($t_{\alpha,gl}$), el cual se obtiene estableciendo un nivel de significación ($\alpha=0.05$) y los grados de libertad ($gl=n-1$). Por lo que si $t_{\alpha,gl} < t$ se rechazará la hipótesis H_0 y se aceptará H_a y si $t_{\alpha,gl} > t$ no se puede rechazar H_0 .

La hipótesis H_0 o también llamada hipótesis nula, establece que la media de población de las diferencias es cero.

$$H_0: \mu_d = 0$$

Mientras que la hipótesis H_a o hipótesis alternativa, es aquella donde la media de población de las diferencias es distinta de cero.

$$H_a: \mu_d \neq 0$$

Para poder realizar la prueba t pareada se deben cumplir tres condiciones: (1) que las muestras sean independientes, (2) que cada pareja de resultados se obtenga de la misma muestra y, (3) que la distribución de las muestras tienda a una distribución normal.

De primera instancia, las dos primeras condiciones se cumplen, dado que una muestra no depende de otra y se trabajará con datos obtenidos de la misma muestra, restando así, conocer si se asemejan a una distribución normal.

Para contrastar los resultados obtenidos al efectuar la prueba de densidad con picnómetro (tomado como el valor real de la densidad dada la precisión del método) contra los obtenidos con el CAMSIZER, las hipótesis serán las siguientes:

$H_0: \mu_d = 0$, los resultados obtenidos de ambas pruebas es prácticamente el mismo, por lo que los resultados de ambos métodos pueden tomarse como válidos y comparables.

$H_a: \mu_d \neq 0$, los resultados obtenidos de ambas pruebas son diferentes, por lo que los resultados de los diferentes métodos no son comparables y los valores obtenidos del CAMSIZER se asumen como aproximados.

Para conocer si las muestras en cuestión se asemejaban a una distribución normal, se hizo uso del software STAT-FIT, el cual realiza 3 de las pruebas de Bondad de Ajuste más utilizadas en la estadística (Anderson-Darling, Chi-Cuadrada y Kolmogorov-Smirnov), permitiendo así encontrar la mejor distribución para representar los datos.

Pruebas para la obtención de los diámetros característicos y parámetros de forma

El CAMSIZER es un instrumento que utiliza sistemas ópticos y sistemas electrónicos, es decir, se trata de un instrumento optoelectrónico que permite manipular datos a una alta velocidad que, en este caso, hace posible la medida y análisis de los tamaños y formas de las partículas cuyo rango de tamaño oscila entre las 30 μm y los 30 mm. El CAMSIZER es capaz de obtener las características morfológicas de los sedimentos a través de las sombras proyectadas de éstas.

Los principales componentes externos del CAMSIZER se presentan en la fig. 2.2.1.5. De manera sencilla se puede resumir el funcionamiento del CAMSIZER de la siguiente manera: 1) se vierte la muestra en la *tolva*, 2) la muestra es transportada por el *alimentador* a la zona de medida o *guía*, 3) una vez dentro, las cámaras capturan a razón de 60 imágenes por segundo todas las partículas que caen por la guía y almacenando dicha información en el software del instrumento, 4) finalmente la muestra es depositada en el *compartimento inferior* donde se puede recuperar posteriormente.

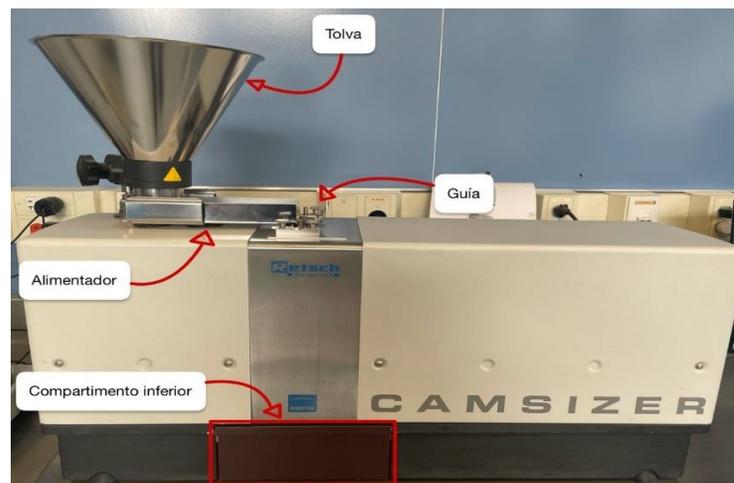


Figura 2.2.1. 5 Componentes externos del CAMSIZER (Ramírez y de la Cruz, 2021)

El tiempo de medida, según el manual de usuario, indica que tomará entre 2 y 10 minutos según la cantidad y tamaño de partículas de la muestra, sin embargo, en la práctica, esta medición puede extenderse a un par de horas.

La puesta en marcha de la medición es muy sencilla y no requiere más de unos pasos y ajustes que se realizan a través del software del CAMSIZER, mismos que se enuncian con mayor detalle en el *Manual para la obtención de granulometría por medio del CAMSIZER en el Laboratorio de Costas y Puertos del IIUNAM* (Ramírez y de la Cruz, 2021).

Una vez que se finaliza el análisis de la muestra, el CAMSIZER arroja 3 archivos de acuerdo con la característica que haya tomado como base para efectuar el análisis de la distribución de las partículas:

- $x_{Fe\ max}$, el cual efectúa el análisis tomando la longitud de la partícula o también el “diámetro de Feret²” más largo del conjunto de los diámetros de Feret medidos de una partícula.

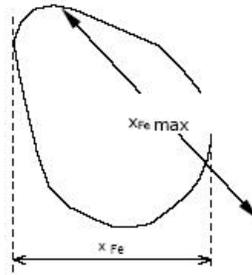


Figura 2.2.1. 6 Representación gráfica del $X_{Fe\ max}$ (Retsch Technology)

- x_{Area} , en este caso se obtiene el diámetro de la partícula al calcularlo con base en la superficie de proyección.

$$x_{area} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Ec. 2- 3

Dónde:

A; Superficie de la proyección de la partícula.

- $x_{c\ min}$, hace referencia a el ancho de la partícula, al considerar el diámetro de ésta, es decir, toma en cuenta la cuerda más corta del conjunto de cuerdas máximas medidas de la proyección de una partícula, razón por la cual se considera que esta característica es aquella cuyo resultado se asemeja más a aquellos obtenidos de realizar una prueba de cribado, pues en ésta, el diámetro que se considera es aquél que permite el paso de la partícula entre los filamentos del tamiz, diámetro tal que resulta ser el “mínimo”.

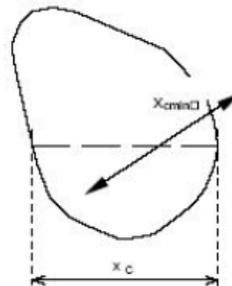


Figura 2.2.1. 7 Representación gráfica del $X_{c\ min}$ (Retsch Technology)

Debido a que la última característica mencionada es aquella cuya semejanza es la más aproximada a los resultados obtenidos de efectuar un análisis granulométrico empleando tamices, el archivo que

² Diámetro de Feret: es la distancia entre dos tangentes perpendiculares a la dirección de medida.

lleve su nombre ($x_{c\min}$) es el archivo que se utiliza para extraer las principales propiedades físicas de la partícula (esfericidad, simetría y diámetros característicos).

El CAMSIZER es capaz de analizar la forma del grano gracias a sus cámaras que registran las imágenes proyectadas sin distorsiones, por lo que, no solo facilita el análisis granulométrico, si no también, a su vez obtiene las características morfológicas de las partículas que componen a la muestra.

Los principales parámetros de la partícula que determina el CAMSIZER (Figura 2.2.1.8) son los siguientes: el ancho de la partícula ($x_{c\min}$ o x_a), el largo ($x_{Fe\max}$ o x_l) y el diámetro de un círculo cuya área es equivalente a la superficie de la partícula (x_{area}).

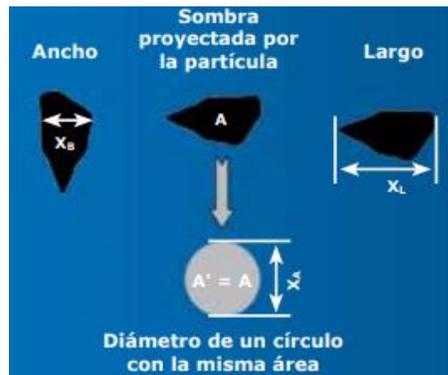


Figura 2.2.1. 8. Parámetros determinados por el CAMSIZER (Retsch Technology)

Recordando lo mencionado en el primer capítulo, la redondez de acuerdo con Wadell (1933), se obtiene al efectuar el cociente del promedio de los radios de curvatura (r_i) de los diferentes bordes o esquinas que delinean el contorno del área proyectada entre el radio del círculo máximo que puede inscribirse en dicha área (R), según se observa en la Figura 2.2.1.8.

Mientras que la esfericidad, a diferencia de la redondez que toma en cuenta los bordes y los ángulos que estos forman, indica que tan parecida la partícula es a una esfera sin importar justamente los ángulos entre sí.

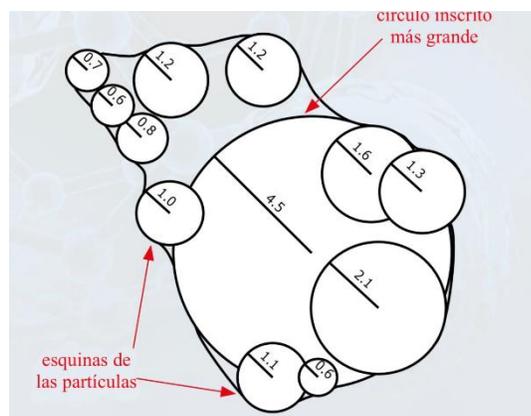


Figura 2.2.1. 9. Radios tomados para calcular la redondez (Retsch Technology)

El CAMSIZER utiliza un algoritmo desarrollado por la Universidad de Leuven (Bélgica) y la empresa Retsch Technology, el cual toma como base los trabajos de Wadell (1933) y Krumbein (1965) quien presenta una escala visual que permite la evaluación de la redondez y esfericidad (Figura 2.2.1.10 y 2.2.1.11). Dicho algoritmo es capaz de proporcionar la redondez y la esfericidad de las partículas de una muestra idénticas a los obtenidas con métodos manuales (ya antes descritos). Las expresiones que utiliza el CAMSIZER se muestran a continuación:

$$SPHT3 = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Ec. 2- 4

Dónde:

SPHT3; es la esfericidad obtenida por el CAMSIZER
 P; Perímetro o circunferencia de la proyección de una partícula
 A; Superficie medida cubierta por la proyección de una partícula

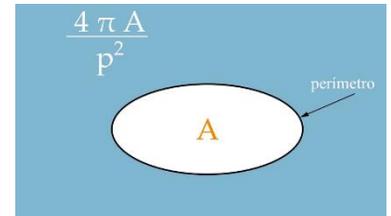


Figura 2.2.1. 10. Esfericidad (Retsch Technology)

$$Symm_3 = \frac{1}{2} \left(1 + \min \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \right)$$

Ec. 2- 5

Dónde:

Symm3; Redondez obtenida por el CAMSIZER
 r_1 y r_2 ; distancias desde el centro de la superficie a los bordes en la dirección de medida

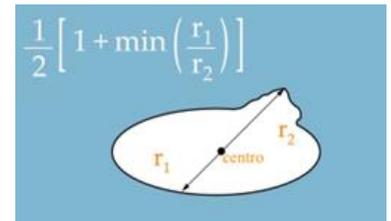


Figura 2.2.1. 11. Redondez (Retsch Technology)

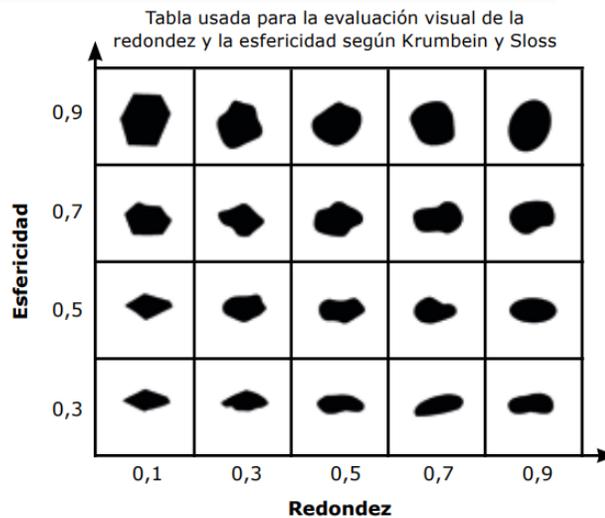


Figura 2.2.1. 12. Tabla propuesta por Krumbein y Sloss para realizar la evaluación visual de la redondez y esfericidad (Retsch Technology)

2.3. Agrupación y manejo de resultados

A continuación, se exponen los criterios seleccionados para efectuar la caracterización de los sedimentos del litoral mexicano, a partir de la BD del GICP.

1° Criterio: Propiedades físicas a analizar

De las propiedades físicas obtenidas por el GICP, se seleccionaron aquéllas que nos permiten conocer información referente a la abrasión que han sufrido debido al movimiento ocasionado por los diferentes agentes a los que están expuestos (aire y agua), así como la distribución granulométrica que siguen las partículas de las arenas de las playas mexicanas. Las propiedades físicas seleccionadas se presentan en la Tabla 2.3.1.

Tabla 2.3. 1. Propiedades físicas por analizar

Propiedad	Símbolo	Medio de Obtención
Densidad relativa	ρ_{pic}	Picnómetro
	rD	CAMSIZER
Tamaño de las partículas	D_{10}, D_{50}, D_{90}	CAMSIZER
Esfericidad	SPHT3	CAMSIZER
Redondez	Symm3	CAMSIZER

2° Criterio: Zonas de muestreo

En la BD se tienen registradas muestras que fueron tomadas en diferentes zonas del perfil de playa y cuerpos de agua como lagunas (como la Laguna de Cuyutlán en Colima) y ríos (río San Pedro Mezquitil que desemboca a la laguna de Mexcaltitán en Nayarit). Para este análisis se utilizaron únicamente aquellas recolectadas en la zona seca, lavado y rompiente (ver Figura 2.3.1.).

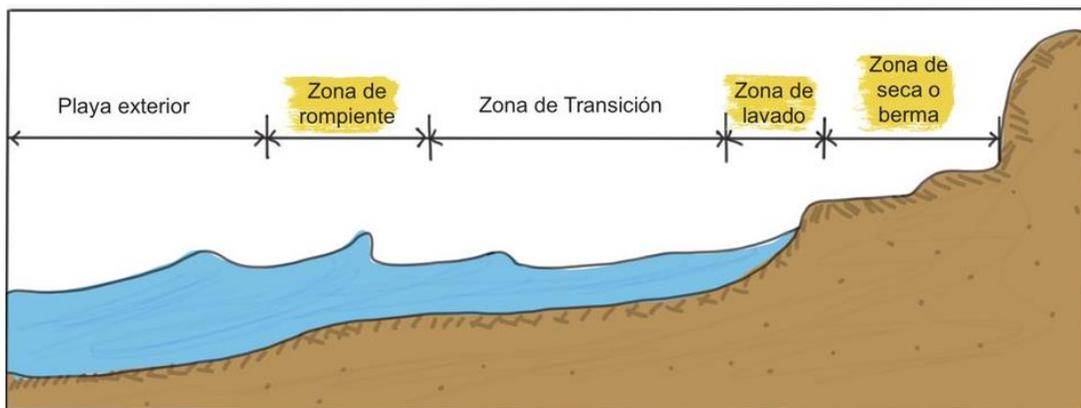


Figura 2.3. 1. Zonas de muestreo

3° Criterio: Estados con información completa

Como se observa en la *Figura 2.1.2*, y comparando gráficamente con la *Figura 2.1.3*, se puede notar que en estados como Oaxaca, Tamaulipas, Colima y Chiapas no aparecen muestras visibles en el mapa. Esto se debe, principalmente, a que al momento en que se realizaron las campañas en estos sitios no se llevó a cabo el registro preciso de la ubicación geográfica donde fueron recolectadas las muestras, por lo que se analizaron los estados que contaban con la información más completa. Si el estado cuenta con datos de las propiedades físicas, pero no con las coordenadas, se efectuará el análisis pero no será posible plasmarlo de manera gráfica en un mapa. Si el estado no cuenta ni con datos de las propiedades ni con coordenadas, se descartará ese registro.

2.4 Caracterización de sitios a escala local

El análisis de las cuatro propiedades físicas seleccionadas (densidad relativa, diámetros característicos, esfericidad y redondez), se llevó a cabo en sitios representativos a lo largo del litoral mexicano. Para la selección de dichos sitios se buscó uno por cada mar y océano que rodean las costas mexicanas (el Océano Pacífico, Golfo de California, Golfo de México y el Mar Caribe) y que tuvieran un barrido lo más completo posible de la zona, es decir, que la cantidad de muestras que se tomaron sean tales que lo abarquen casi en su totalidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Propiedades físicas de los sedimentos del litoral mexicano

De acuerdo con la BD, se tiene un registro de 5,877 muestras analizadas a lo largo de 15 años. Sin embargo, aplicando los 2 primeros criterios mencionados (propiedades físicas y zonas de muestreo), se tienen, únicamente 1,283 datos útiles para el presente trabajo, es decir, se trabajará con el 24.7% de la información contenida en la BD. En adelante, al referirnos a una “totalidad de muestras” se hará referencia únicamente a la porción de información ya filtrada para este estudio.

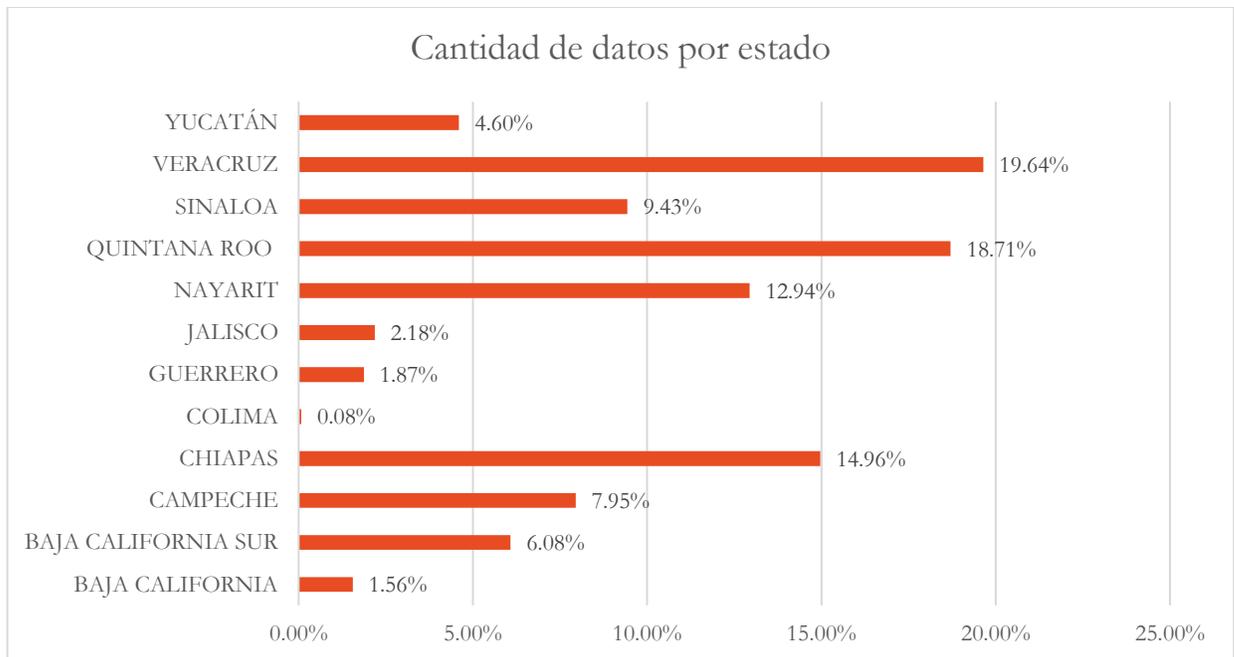


Figura 3.1. 1. Cantidad de datos por Estados una vez aplicados los criterios

En la Figura 3.1.1, se observa que el estado con la mayor cantidad de información “útil” es Veracruz, el cual, como se muestra en la Tabla 3.1.1, es también el que mayor detalle en cuanto a distribución de tomas de muestra respecta, seguido por Quintana Roo, estado en el cual la situación es similar. Posteriormente, se encuentra Chiapas, pero, desafortunadamente, no cuenta con ninguna información de ubicación. Contrario a lo sucede con Colima, el cual, a pesar de ser el estado con mayor cantidad de muestras (Figura 2.1.2), una vez aplicados los filtros, resultó únicamente tener una muestra que cumplía con las características necesarias.

Tabla 3.1. 1. Relación de la cantidad de información por Estado de acuerdo con los criterios

Estado	Abreviación	Municipio	Cantidad de muestras				Cantidad de información con la que se cuenta:									
			Seca	Lavado	Rompien te	Total	Coor denadas	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	ρ_{pic}	b/13	SPHT3	Symm3	Densidad por CAMSIZER (rD)	
BAJA CALIFORNIA	BC	ENSENADA	4	8	8	20	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	
BAJA CALIFORNIA SUR	BS	LA PAZ	4	1	0	5	0%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	
		LOS CABOS	26	26	21	73	94%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	97%	
CAMPECHE	CM	CARMEN	9	57	13	79	54%	62%	62%	62%	10%	62%	62%	62%	62%	
		CALKINI	0	7	0	7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
		CHAMPOTÓN	1	15	0	16	33%	33%	33%	33%	0%	33%	33%	33%	33%	
CHIAPAS	CS	-	64	64	64	192	0%	92%	92%	92%	0%	92%	92%	92%	92%	
COLIMA	CO	CUYUTLAN	1	-	-	1	0%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	
GUERRERO	GR	ACAPULCO	8	8	8	24	75%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	
JALISCO	JC	PUERTO VALLARTA	2	3	0	5	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	
		CHIHUATLAN	8	8	7	23	74%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	
NAYARIT	NT	BAHÍA BANDERAS	0	1	1	2	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	
		SAN BLAS	18	18	18	54	50%	88%	88%	88%	0%	88%	88%	88%	88%	
		SANTA MARÍA DEL ORO	9	9	9	27	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
		SANTIAGO IXCUINCLA	24	23	30	77	0%	99%	99%	99%	0%	99%	99%	99%	99%	
		TECUALA	2	1	3	6	0%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	
QUINTANA ROO	QR	BENITO JUÁREZ	77	45	28	150	83%	97%	97%	97%	54%	97%	97%	97%	97%	
		ISLA MUJERES	2	1	1	4	100%	100%	100%	100%	75%	100%	100%	100%	100%	
		LÁZARO CARDENAS	1	1	1	3	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
		OTHON P. BLANCO	5	1	1	7	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	
		PUERTO MORELOS	8	3	2	13	77%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	
		SOLIDARIDAD	18	15	14	47	96%	100%	100%	100%	15%	100%	100%	100%	100%	
		TULUM	6	6	4	16	100%	100%	100%	100%	88%	100%	100%	100%	100%	

SINALOA	SL	MAZATLÁN	41	40	40	121	88%	98%	98%	98%	1%	98%	98%	98%	98%
VERACRUZ	VZ	ACTOPAN	38	39	40	117	79%	99%	99%	99%	0%	99%	99%	99%	99%
		AGUA DULCE	2	2	1	5	40%	80%	80%	80%	0%	80%	80%	80%	80%
		ALLENDE	1	1	-	2	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		ALTO LUCERO	5	5	4	14	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		ALVARADO	4	4	3	11	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		BOCA DEL RÍO	1	2	1	4	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		CATEMACO	1	1	1	3	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		CAZONES DE HERRERA	2	3	3	8	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		COATZACOALCOS	4	4	3	11	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		LERDO DE TEJADA	1	1	-	2	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		MEXAYAPAN	2	1	-	3	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		NAUTLA	3	3	3	9	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		PAJAPAN	1	1	1	3	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		PAPANTLA	1	1	1	3	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		SAN ANDRES TUXTLA	4	3	2	9	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		TAMIAHUA	1	1	1	3	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		TAMPICO ALTO	1	1	1	3	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		TATAHUICAPAN	1	1	-	2	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		TECOLUTLA	10	10	10	30	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
TUXPAN	-	-	2	2	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%		
URSULO GALCAN	-	-	4	4	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%		
VEGA DE LA TORRE	-	-	4	4	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%		
YUCATÁN	YN	CELESTUN	8	3	3	14	0%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		DZILAM DE BRAVO	1	-	2	3	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		PROGRESO	8	6	7	21	100%	95%	95%	95%	43%	95%	95%	95%	95%
		SISAL	2	2	2	6	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%
		TELCHAC PUERTO	5	5	5	15	100%	100%	100%	100%	40%	100%	100%	100%	100%

Observando la Tabla 3.1.1, la propiedad física con menos información es la densidad obtenida por picnómetro por lo que, más adelante, se llevará a cabo una comparativa con aquellas muestras que tengan a su vez la densidad obtenida por el CAMSIZER y observar si éste permite obtener las densidades relativas esperadas.

De igual manera, la información de las coordenadas no siempre está completa por lo, para llevar a cabo la representación gráfica de cada propiedad, se omitirá la información de aquellas muestras que no cuenten con ese dato.

Densidad Relativa

De las muestras registradas en la BD, sólo el 7% presenta resultados de densidad relativa obtenida con picnómetro. En contraste, para el 93% restante, la densidad relativa fue obtenida por medio del CAMSIZER.

Para llevar a cabo la comparación entre las densidades obtenidas con el picnómetro y con el CAMSIZER, se tomaron las muestras de los estados de Yucatán (Dzilam de Bravo, Progreso, Telchac) y Quintana Roo (Benito Juárez, Isla Mujeres, Lázaro Cárdenas, Solidaridad y Tulum), de los cuales, según se observa en la Tabla 3.1.1, son los que tienen más información de la densidad relativa obtenida con picnómetro (ρ_{pic}).

Las gráficas incluidas en la Figura 3.1.2 presentan los cuatro conjuntos de muestras (ρ_{pic} , rD de Yucatán y ρ_{pic} , rD de Quintana Roo) e indican tendencia a una distribución normal, por lo que se puede aplicar la prueba de la t pareada.

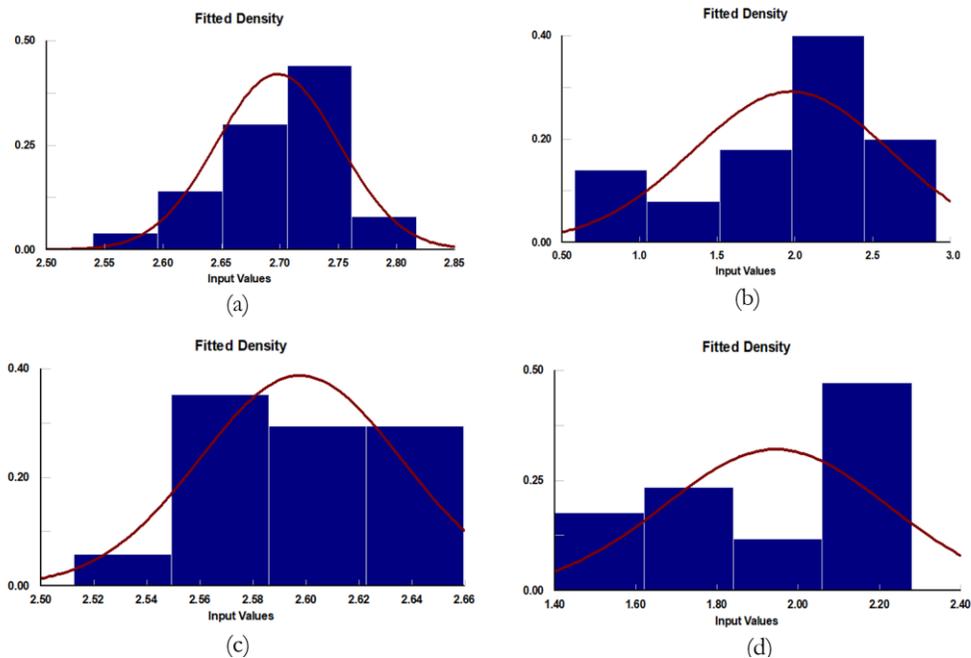


Figura 3.1. 2. Ajuste de las muestras a una distribución normal: (a) ρ_{pic} Quintana Roo, (b) rD Quintana Roo, (c) ρ_{pic} Yucatán, (d) rD Yucatán

Efectuando la prueba t pareada para ambos estados, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3.1. 2. Resultados de la prueba t pareada

	Quintana Roo	Yucatán
Media de las diferencias	0.3608	0.6531
Desviación Estándar de las diferencias	0.5181	0.2711
Número de muestras	104	17

Estadístico (t)	7.10	9.93
Valor Crítico a dos colas ($t_{\alpha,gl}$)	1.98	2.12

$t_{\alpha,gl} < t$

$t_{\alpha,gl} < t$

Debido a que en ambos casos el estadístico t obtenido de la Ec. 2- 2 es mayor que el valor crítico, rechazamos la hipótesis nula (H_0) y aceptamos la hipótesis alternativa (H_a). Lo anterior quiere decir que los resultados obtenidos de ambas pruebas son diferentes, por lo que los resultados de los diferentes métodos no son comparables y los valores obtenidos por medio del CAMSIZER se asumen como aproximados. Por ello, en adelante, el análisis de la densidad relativa se presenta por separado para los dos conjuntos de valores.

En la Tabla 3.1. 3 se presentan las densidades relativas promedio por municipio obtenidas tanto por picnómetro (ρ_{pic}) como a través del CAMSIZER (rD), donde de manera evidente se nota la disparidad en cuanto a la cantidad de información obtenidas entre ambos métodos. De las densidades obtenidas con el picnómetro (ρ_{pic}), las cuales suman un total de 107, como se observa en la Figura 3.1.3, la mayor cantidad de información registrada corresponde a la Zona Hotelera de Cancún, Quintana Roo, es decir, pertenecientes al municipio de Benito Juárez, de donde se tiene cerca del 77% de la totalidad de muestras con esta propiedad de este estado.

Tal y como se representa en el zoom a la Zona Hotelera de Cancún del mismo mapa, la mayoría de las muestras poseen una densidad dentro del rango de 2.65 a 2.713 (puntos rosas), mientras que, en las playas de Yucatán, la densidad relativa fluctúa entre los 2.353 y los 2.650 (puntos anaranjados y amarillos).

En cuanto a las densidades obtenidas a través del CAMSIZER (rD) se tienen un total de 770 muestras analizadas, las cuales abarcan 10 estados de la República Mexicana. Dichos valores se presentan de manera gráfica en la Figura 3.1. 4 y Figura 3.1. 5, de las cuales, las primeras corresponden a una vista global de los datos correspondientes a la densidad obtenida por el CAMSIZER que se tienen en la Base de Datos a lo largo de la República Mexicana, mientras que el mapa siguiente, se enfoca en los 3 estados que cuentan con mayor cantidad de información.

En ambos mapas correspondientes al rD se puede observar que la densidad que más predomina es aquella que fluctúa entre 2.575 y 2.034, es decir los puntos rosas, después se tienen aquellas que

están en el rango de 2.575-4.943 (naranjas) y finalmente, como sucede en el estado de Yucatán, la densidad oscila entre 1.306 y 2.034 (puntos azules).

Tabla 3.1. 3. Densidades relativas promedio por municipio obtenidas con picnómetro (ρ_{pic}) y CAMSIZER (rD)

Estado	Abreviación	Municipio	Densidad promedio obtenida por picnómetro (ρ_{pic})			Densidad promedio obtenida por CAMSIZER (rD)		
			Seca	Lavado	Rompiente	Seca	Lavado	Rompiente
BAJA CALIFORNIA	BC	ENSENADA				2.375	2.158	2.177
BAJA CALIFORNIA SUR	BS	LOS CABOS				2.831	2.892	2.661
CAMPECHE	CM	CARMEN	-	0.658	-	2.108	2.001	1.513
		CHAMPOTÓN				1.517	1.411	-
GUERRERO	GR	ACAPULCO				2.706	2.764	2.853
JALISCO	JC	PUERTO VALLARTA				2.711	2.273	-
		CHIHUATLAN				2.559	2.114	1.924
NAYARIT	NT	BAHÍA BANDERAS				-	1.692	1.022
		SAN BLAS				0.958	0.579	0.531
QUINTANA ROO	QR	BENITO JUÁREZ	2.217	2.317	2.671	2.513	2.463	2.347
		ISLA MUJERES	2.524	2.532	2.508	2.191	2.307	1.810
		LÁZARO CARDENAS	2.580	2.556	2.508	0.959	1.514	0.774
		OTHON P. BLANCO	-	-	-	1.054	1.306	1.219
		PUERTO MORELOS	-	-	-	1.874	2.280	2.283
		SOLIDARIDAD	2.536	2.645	2.600	2.183	2.192	1.931
		TULUM	2.524	2.530	2.394	1.313	1.392	1.297
SINALOA	SL	MAZATLÁN				2.487	2.109	1.808
VERACRUZ	VZ	ACTOPAN				2.285	2.212	2.153
		AGUA DULCE				2.487	2.485	-
		ALLENDE				1.463	1.532	-
		ALTO LUCERO				2.406	2.431	2.295
		ALVARADO				2.355	2.549	2.237
		BOCA DEL RÍO				2.669	2.185	2.790
		CATEMACO				1.735	2.139	2.309
		CAZONES DE HERRERA				2.146	2.375	2.242
		COATZACOALCOS				2.417	2.581	2.453
		LERDO DE TEJADA				2.837	2.947	-
		MEXAYAPAN				1.912	1.095	-
		NAUTLA				3.326	2.570	2.481
		PAJAPAN				1.844	2.274	-

		PAPANTLA				2.467	2.399	2.218
		SAN ANDRES				2.503	2.644	2.920
		TUXTLA				1.781	1.879	1.767
		TAMIAHUA				2.473	2.361	2.065
		TAMPICO ALTO				2.041	2.220	-
		TATAHUICAPAN				2.244	2.400	2.284
		TECOLUTLA				1.644	1.729	1.643
		TUXPAN				2.619	2.579	2.398
		URSULO GALVAN				2.592	2.353	2.153
		VEGA DE LA TORRE						
YUCATÁN	YN	DZILAM DE BRAVO	-	2.597	2.532	-	1.778	1.848
		PROGRESO	2.641	2.632	2.602	2.220	2.196	1.925
		SISAL	-	-	-	1.987	2.264	1.911
		TELCHAC PUERTO	2.571	2.597	2.587	2.122	2.106	1.444

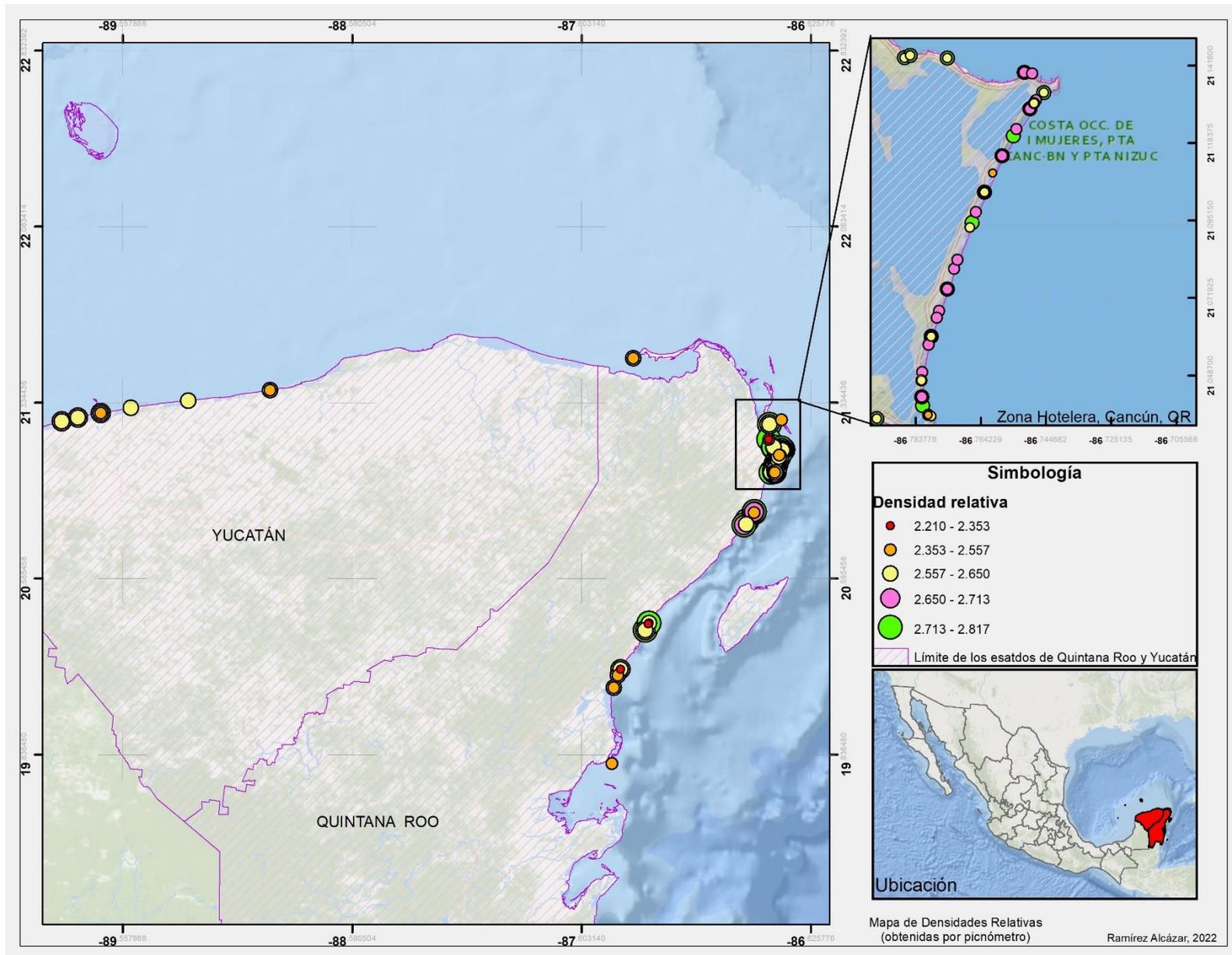


Figura 3.1. 3. Mapa de las densidades relativas obtenidas por picnómetro (ρ_{pic})



Figura 3.1. 4. Mapa de las densidades relativas obtenidas por CAMSIZER (rD)

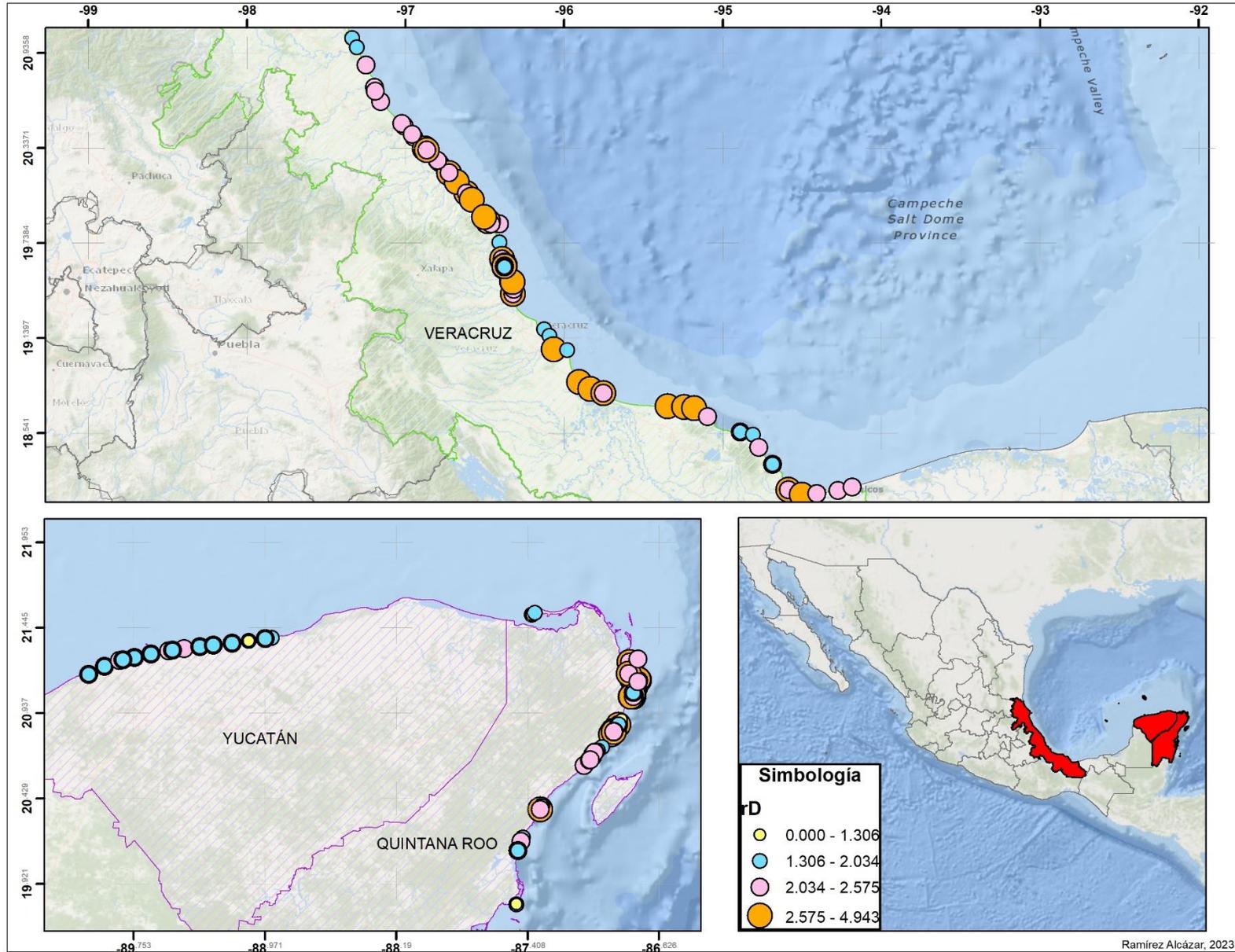


Figura 3.1. 5. Mapa de las densidades relativas de los estados con mayor cantidad de muestras obtenidas por CAMSIZER (rD)

Ramírez Alcázar, 2023

Elaborando un histograma con la información de las 107 muestras sometidas a la prueba del picnómetro (Figura 3.1. 6) gran parte de ellas arrojan una densidad relativa en el rango de 2.644 y 2.73, con un promedio de 2.645. Además, la desviación estándar es de $\sigma=0.1214$, lo cual indica que la dispersión de las muestras respecto a la media es baja y, por tanto, se concluye que la mayoría de las densidades se acerca al promedio.

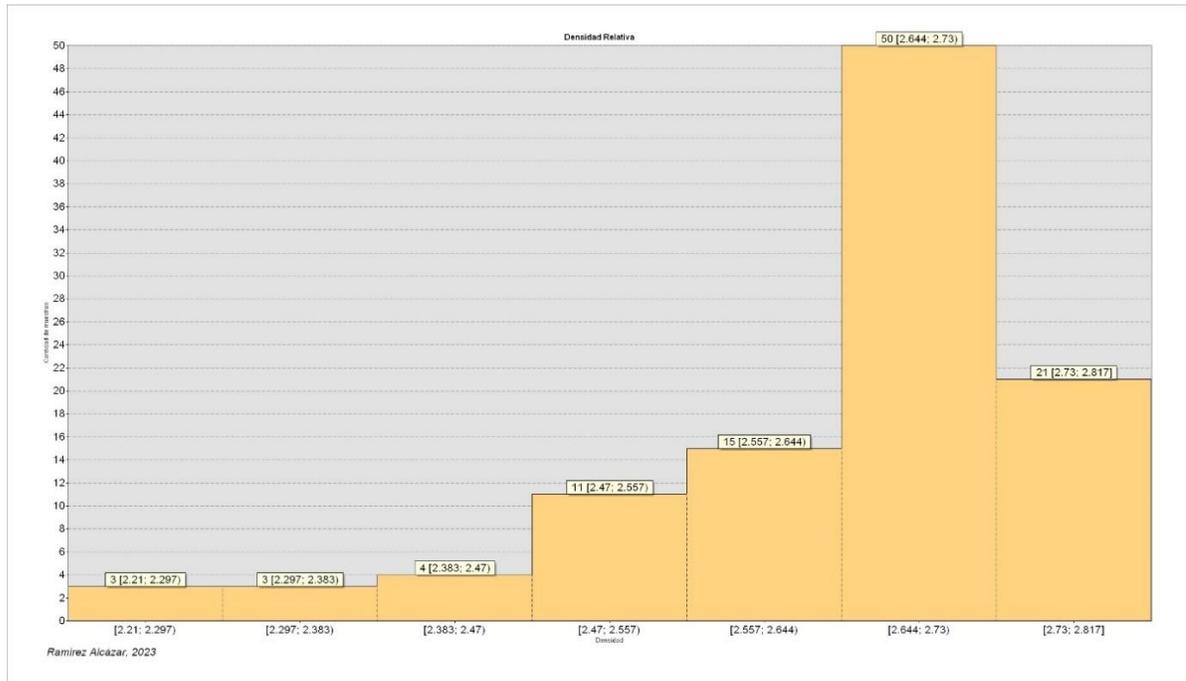


Figura 3.1. 6. Histograma de la densidad relativa obtenida por el método del picnómetro

Una característica importante que presentan los estados de la Península de Yucatán es el suelo denominado “Sahcab”, es decir, un suelo calizo conformado aproximadamente por un 98% de carbonato de calcio, razón por la cual la arena de las playas de la región presenta una coloración blanca. Las rocas calizas tienen una densidad relativa generalmente entre 2.70 y 2.75, por lo que nuevamente coincide con los valores de ρ_{pic} de una parte de las muestras analizadas.

En lo que respecta con la zona en la que fue recolectada la muestra (seca, lavado o rompiente), esto no interfiere significativamente con el resultado de la densidad relativa obtenida pues, en la mayoría de los casos, se mantiene dentro del mismo intervalo o varía de forma despreciable.

Para las densidades obtenidas con el CAMSIZER, la Figura 3.1. 7 muestra el histograma de la densidad relativa. En ella, se observa que la densidad relativa de las 770 muestras distribuidas a lo largo del litoral mexicano oscila entre 2.118 y 2.825, con un promedio de 2.236 y una desviación estándar de $\sigma= 0.5776$, la cual se podría considerar “alta” pero es consistente con la cantidad de muestras sedimentarias que se tienen, cuyas densidades oscilan desde 0.371 hasta 4.943.

Al abarcar muestras de 10 estados diferentes, se espera que los resultados muestren variaciones como, por ejemplo, la arena que se tiene en los estados pertenecientes a la Península de Yucatán contra la que se encuentra presente en estados como Veracruz o Guerrero. Estas diferencias son notorias incluso a simple vista, sobre todo por la coloración de la arena, misma que hace referencia a su composición mineralógica y origen del sedimento (terrígenos o biogénicos). En estados como Quintana Roo se observa un característico color blanco por su origen principalmente biogénico, esto debido a que la mayor parte del litoral del estado se encuentra cerca de la segunda barrera arrecifal más grande del mundo, el “arrecife mesoamericano”, y por el tipo de suelo que se tiene en esa zona. En cambio, existen playas como en Veracruz, donde el color de la arena es más oscuro o “negro”, debido principalmente a que su composición mineralógica está dada por minerales oscuros producto de la meteorización de rocas preexistentes en la zona, como la magnetita o ilmenita cuyas densidades relativas respectivamente son de 5.17 y 4.76, siendo valores coincidentes con la mayor densidad relativa (rD) registrada en la BD (4.943), la cual corresponde al municipio de Nautla, Veracruz.

Por otro lado, como se mencionó, los resultados de la densidad relativa obtenida por medio del CAMSIZER (rD) únicamente se asumen como aproximados al momento de realizar una comparación con los resultados del picnómetro (ρ_{pic}) por lo que se recomienda, para estudios donde se requiera mayor precisión, realizar la prueba de densidad relativa haciendo uso del picnómetro.

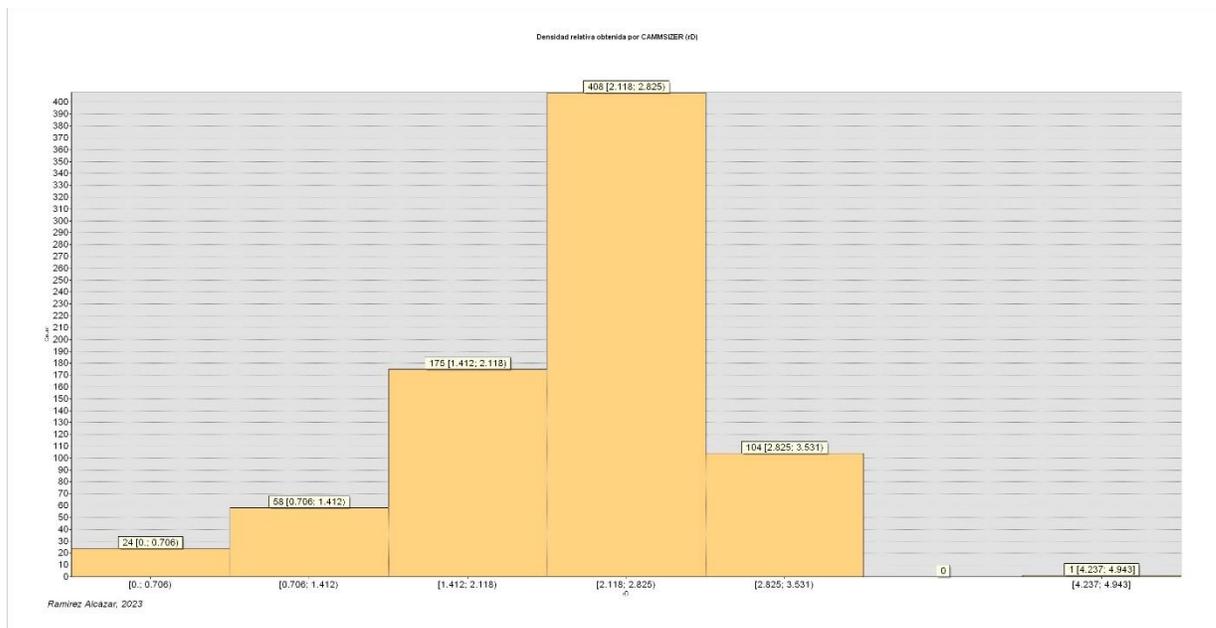


Figura 3.1. 7. Histograma de la densidad relativa obtenida por el CAMSIZER

Diámetros característicos de la muestra

A partir de la curva granulométrica resultante de pruebas de cribado o CAMSIZER, o de sedimentación (según sea al caso del tipo de sedimento a analizar), se obtienen los diámetros característicos (D_n), donde el subíndice n hace referencia al porcentaje del peso de los sedimentos cuyas partículas tienen tamaños menores de D_n , es decir, si se tiene un $D_n=X$, “ n ” por ciento del peso total de la muestra se conforma por partículas cuyo tamaño es inferior a X .

En la Figura 3.1. 8 se presenta un ejemplo de un informe realizado con el CAMSIZER, donde el análisis corresponde a una muestra tomada en el año 2015 en Los Cabos, Baja California Sur.

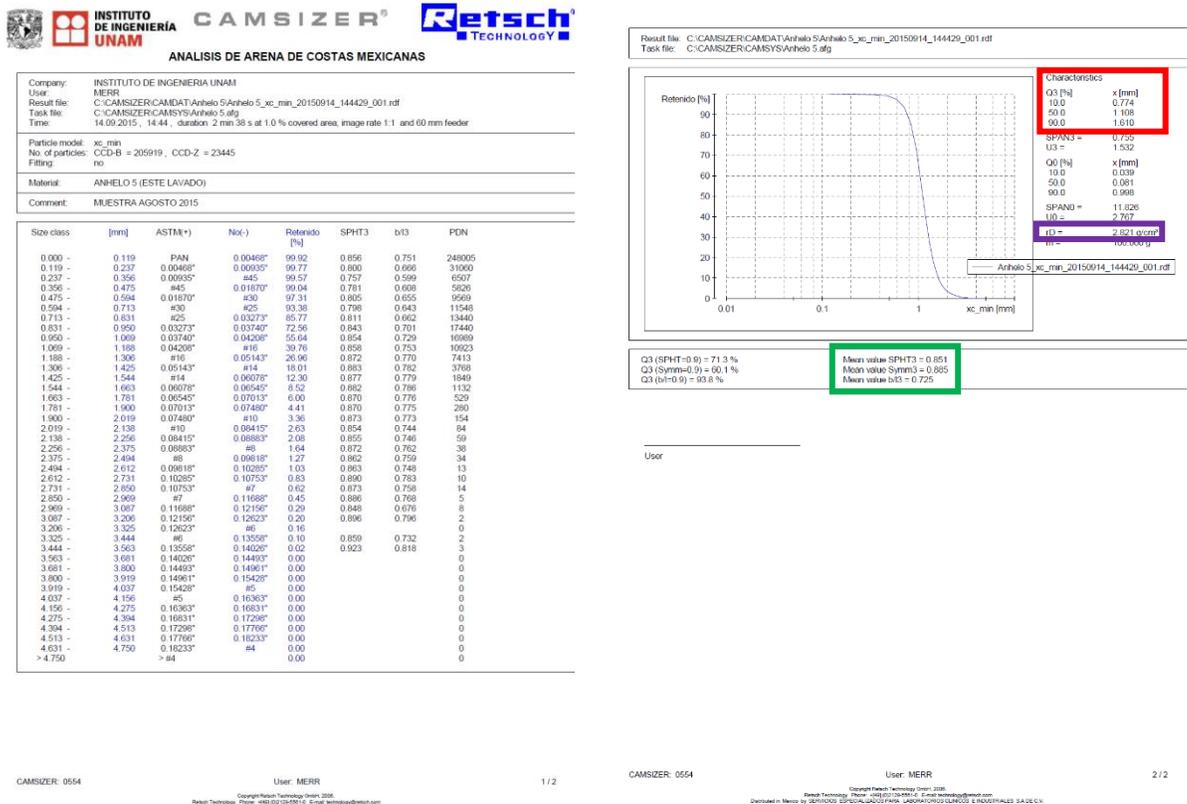


Figura 3.1. 8. Informe producto del análisis granulométrico efectuado con el CAMSIZER, muestra 1878 Los Cabos, año 2015

De acuerdo con la BD del GICP, los diámetros característicos promedio (D_{10} , D_{50} , D_{90}) obtenidos a través del CAMSIZER se presentan en la Tabla 3.1. 4 y de manera gráfica en la Figura 3.1. 9 a la Figura 3.1. 12. Las primeras corresponden a una vista global de los datos correspondientes a la distribución granulométrica que se tienen en la Base de Datos a lo largo de la República Mexicana, mientras que los mapas siguientes, hacen énfasis en 3 estados representativos (aquellos que cuentan con mayor cantidad de información) y se desglosan los rangos de cada diámetro característicos (D_{10} , D_{50} , D_{90}).

Tabla 3.1. 4. Diámetros característicos (D_{10} , D_{50} , D_{90}) promedio por estado y municipio

Estado	Abreviación	Municipio	D_{10} promedio [mm]			D_{50} promedio [mm]			D_{90} promedio [mm]		
			Seca	Lavado	Rompiente	Seca	Lavado	Rompiente	Seca	Lavado	Rompiente
BAJA CALIFORNIA	BC	ENSENADA	0.306	0.239	0.236	0.572	0.484	0.430	1.265	1.014	0.909
BAJA CALIFORNIA SUR	BS	LA PAZ	0.307	0.236	-	0.529	0.366	-	0.908	0.577	-
		LOS CABOS	0.418	0.414	0.568	0.784	0.803	1.036	1.562	1.404	1.890
CAMPECHE	CM	CARMEN	0.208	0.245	0.226	0.439	0.577	0.404	0.895	1.186	0.743
		CALKINI	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		CHAMPOTÓN	0.133	0.109	-	0.221	0.184	-	0.387	0.305	-
CHIAPAS	CS	-	0.210	0.196	0.238	0.357	0.337	0.402	0.556	0.529	0.687
COLIMA	CO	CUYUTLAN	0.545	-	-	0.804	-	-	1.159	-	-
GUERRERO	GR	ACAPULCO	0.412	0.588	1.037	0.886	0.937	1.683	1.685	1.432	2.656
JALISCO	JC	PUERTO VALLARTA	0.232	0.176	-	0.547	0.343	-	1.523	0.846	-
		CHIHUATLAN	0.328	0.320	0.258	0.614	0.550	0.558	1.107	1.462	1.942
NAYARIT	NT	BAHÍA BANDERAS	-	0.107	0.076	-	0.177	0.141	-	0.268	0.462
		SAN BLAS	0.092	0.073	0.076	0.203	0.133	0.135	0.360	0.340	0.412
QUINTANA ROO	QR	BENITO JUÁREZ	0.239	0.278	0.267	0.392	0.471	0.553	0.805	1.028	1.512
		ISLA MUJERES	0.160	0.161	0.158	0.250	0.242	0.278	0.370	0.371	0.487
		LÁZARO CARDENAS	0.093	0.105	0.080	0.136	0.545	0.137	0.221	1.699	0.650
		OTHON P. BLANCO	0.165	0.450	0.350	0.568	1.217	1.408	1.309	2.340	2.879
		PUERTO MORELOS	0.158	0.201	0.211	0.273	0.300	0.320	0.532	0.474	0.531
		SOLIDARIDAD	0.194	0.205	0.224	0.321	0.320	0.434	0.581	0.587	0.955
TULUM	0.116	0.110	0.116	0.250	0.208	0.209	0.493	0.649	0.598		
SINALOA	SL	MAZATLÁN	0.226	0.217	0.190	0.392	0.431	0.427	0.769	0.961	1.223
VERACRUZ	VZ	ACTOPAN	0.141	0.151	0.144	0.213	0.245	0.234	0.333	0.437	0.455
		AGUA DULCE	0.197	0.223	-	0.288	0.375	-	0.448	0.637	-
		ALLENDE	0.104	0.109	-	0.142	0.158	-	0.204	0.319	-
		ALTO LUCERO	0.152	0.178	0.165	0.220	0.269	0.253	0.317	0.450	0.414
		ALVARADO	0.133	0.307	0.151	0.322	0.542	0.237	0.998	0.964	0.453
		BOCA DEL RÍO	0.259	0.233	0.566	0.516	0.606	1.032	0.994	1.207	1.650
		CATEMACO	0.110	0.139	0.146	0.156	0.213	0.251	0.211	0.412	0.535
		CAZONES DE HERRERA	0.138	0.182	0.161	0.209	0.311	0.255	0.335	0.851	0.490
		COATZACOALCOS	0.210	0.254	0.318	0.282	0.427	0.713	0.426	0.714	2.599

		LERDO DE TEJADA	0.227	0.316	-	0.479	0.536	-	0.737	0.826	-
		MEXAYAPAN	0.136	0.147	-	0.202	0.223	-	0.350	0.379	-
		NAUTLA	0.153	0.175	0.177	0.231	0.262	0.270	0.333	0.392	0.457
		PAJAPAN	0.119	0.140	0.136	0.169	0.219	0.205	0.235	0.384	0.378
		PAPANTLA	0.136	0.158	0.146	0.212	0.250	0.229	0.300	0.403	0.396
		SAN ANDRES TUXTLA	0.155	0.208	0.247	0.256	0.353	0.547	0.447	0.568	1.844
		TAMIAHUA	0.122	0.126	0.119	0.178	0.188	0.186	0.603	0.364	0.441
		TAMPICO ALTO	0.161	0.158	0.119	0.294	0.387	0.185	1.332	1.290	0.292
		TATAHUICAPAN	0.126	0.146	-	0.126	0.233	-	0.264	0.443	-
		TECOLUTLA	0.139	0.176	0.173	0.217	0.275	0.275	0.322	0.431	0.452
		TUXPAN	0.120	0.122	0.118	0.182	0.192	0.186	0.422	0.370	0.455
		URSULO GALVAN	0.192	0.235	0.588	0.341	0.600	0.994	0.659	1.574	1.868
		VEGA DE LA TORRE	0.183	0.197	0.285	0.277	0.524	0.294	0.432	0.693	0.743
YUCATÁN	YN	DZILAM DE BRAVO	-	0.212	0.201	-	0.640	0.580	-	2.823	2.283
		PROGRESO	0.195	0.314	0.170	0.402	0.883	0.318	1.150	2.586	0.711
		SISAL	0.148	0.209	0.144	0.287	0.430	0.343	0.704	0.898	1.085
		TELCHAC PUERTO	0.190	0.196	0.109	0.371	0.508	0.185	0.875	1.860	0.350

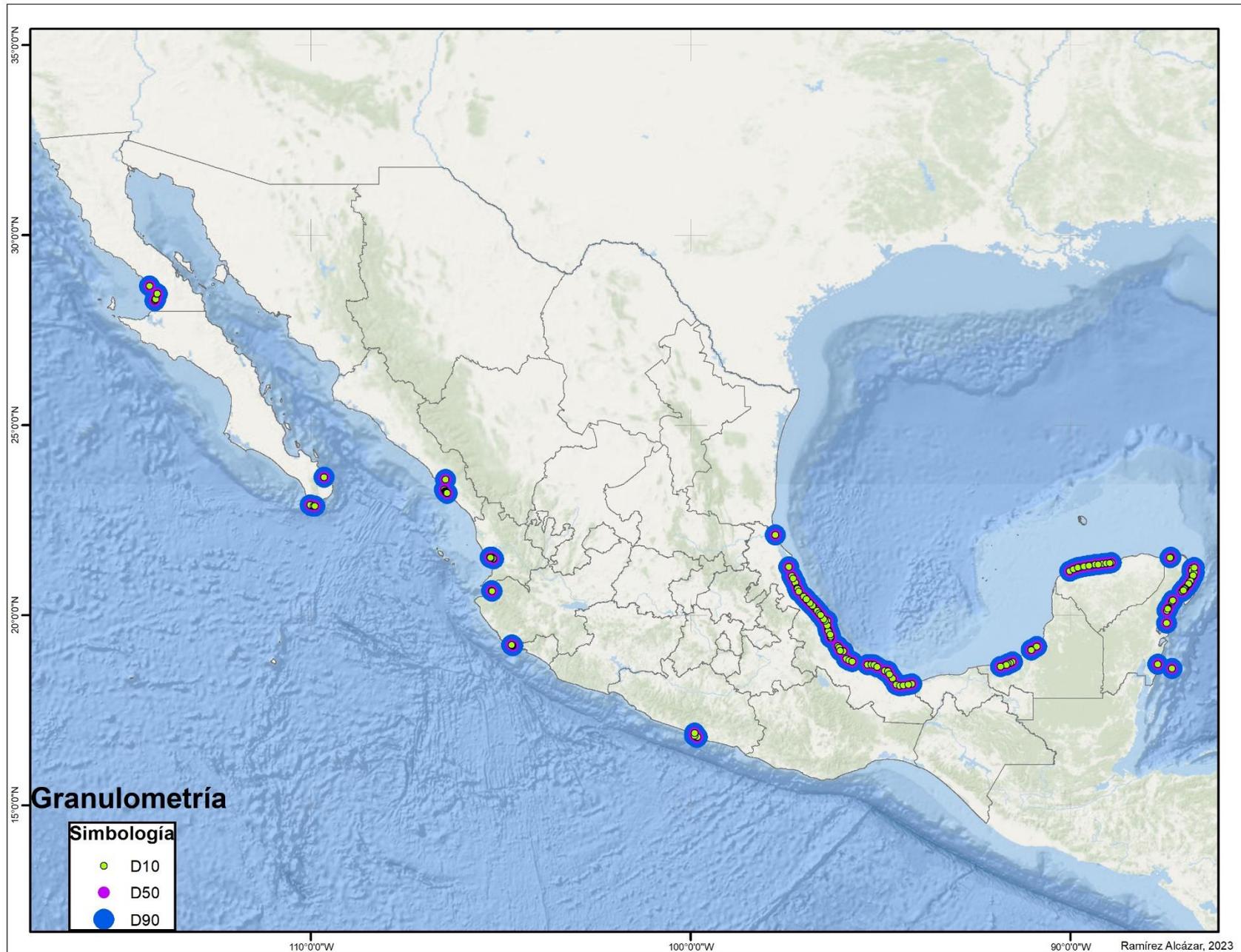
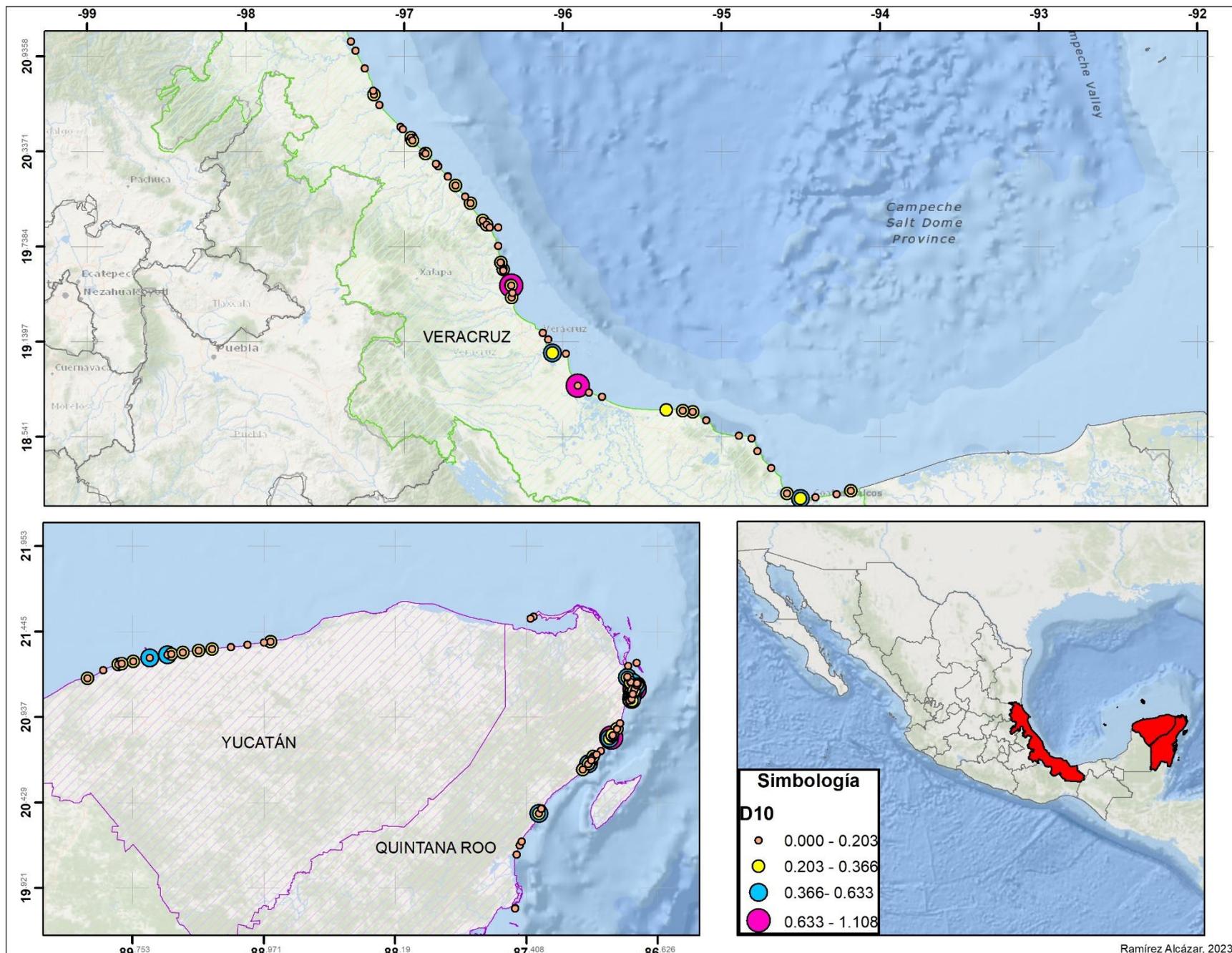


Figura 3.1. 9. Mapa de la distribución de los diámetros característicos de la BD del GICP obtenidos a través del CAMSIZER



Ramírez Alcázar, 2023

Figura 3.1. 10. Mapa del diámetro característico D_{10} de los estados con mayor número de muestras registradas en la BD del GICP

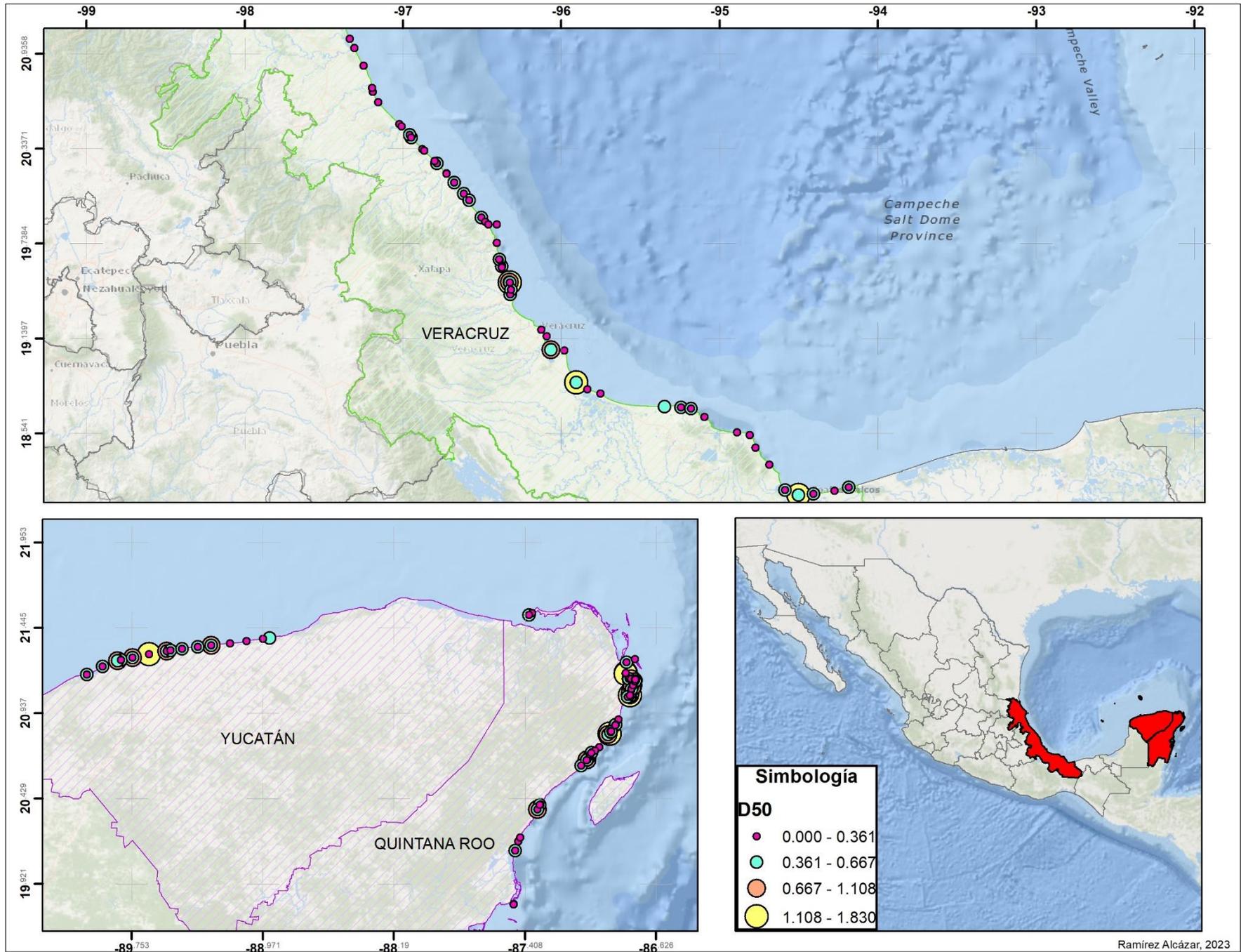


Figura 3.1. 11. Mapa del diámetro característico D_{50} de los estados con mayor número de muestras registradas en la BD del GICP

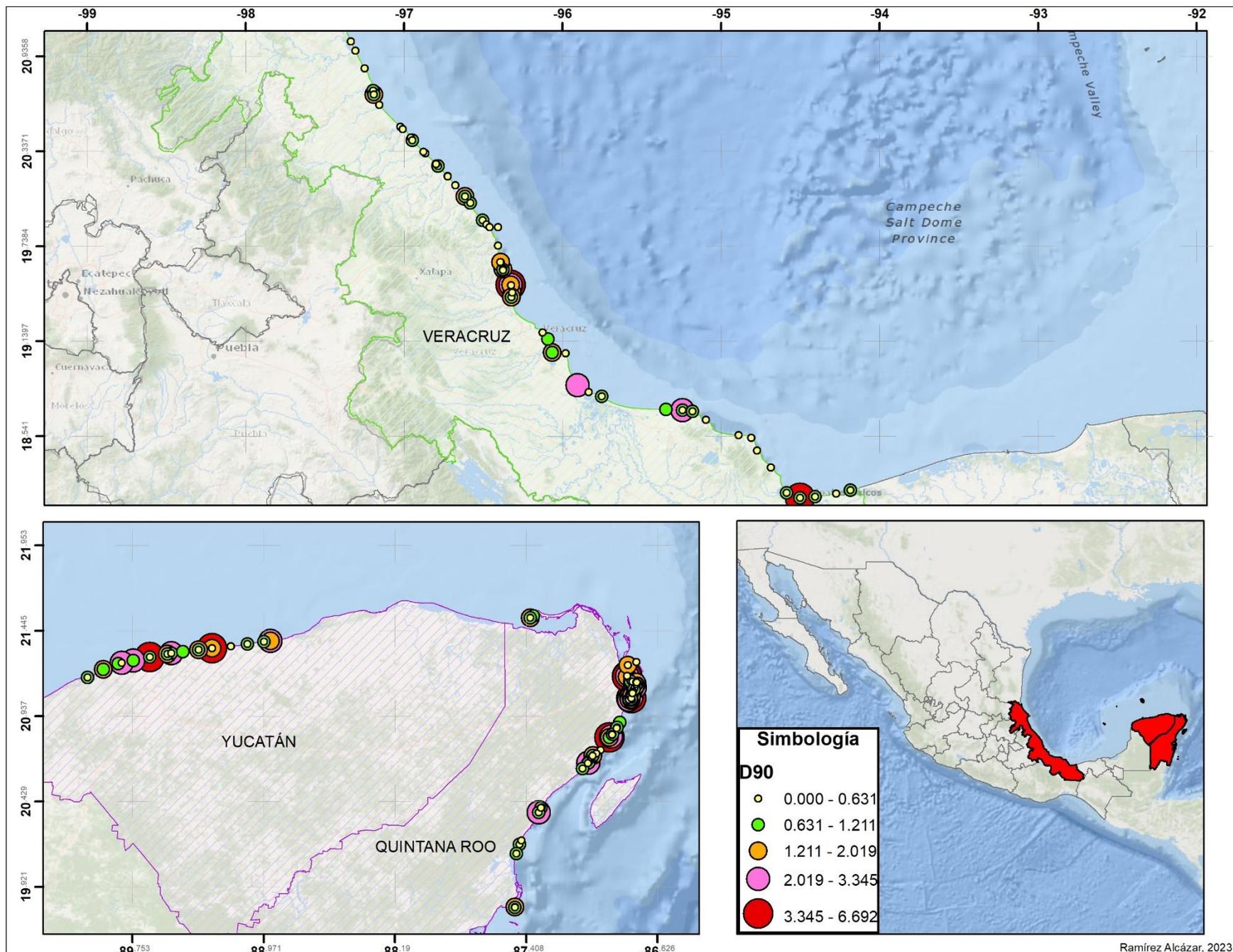


Figura 3.1. 12. Mapa del diámetro característico D_{90} de los estados con mayor número de muestras registradas en la BD del GICP

Para que una muestra se considere uniforme debe estar compuesta principalmente por partículas de un tamaño específico, es decir, que abarque únicamente un rango reducido de tamaños. La manera en la que se puede conocer esta característica es realizando un análisis visual, el cual consiste en ver la forma de la curva granulométrica (resultado de haber ejecutado un estudio granulométrico con tamices o con ayuda del CAMSIZER), la cual debe presentar una forma de “S” y poseer una pendiente no suave (debe ser casi vertical) (ver Figura 1.2.1.1 o Figura 3.1. 8).

Al efectuar el análisis granulométrico con el CAMSIZER es posible desprestigiar los extremos de la muestra y ajustar los resultados a un suelo uniforme, por esta razón, se puede asumir que todos los resultados obtenidos y vaciados en la BD del Laboratorio de Sedimentos del GICP corresponden a muestras de sedimentos cuya granulometría es prácticamente uniforme.

Recordando, se sabe que, si el material es casi uniforme, el D_{50} será el tamaño representativo o la mediana de la muestra. Razón por la cual en este punto únicamente se tomarán los resultados del D_{50} para efectuar la caracterización de la dinámica costera.

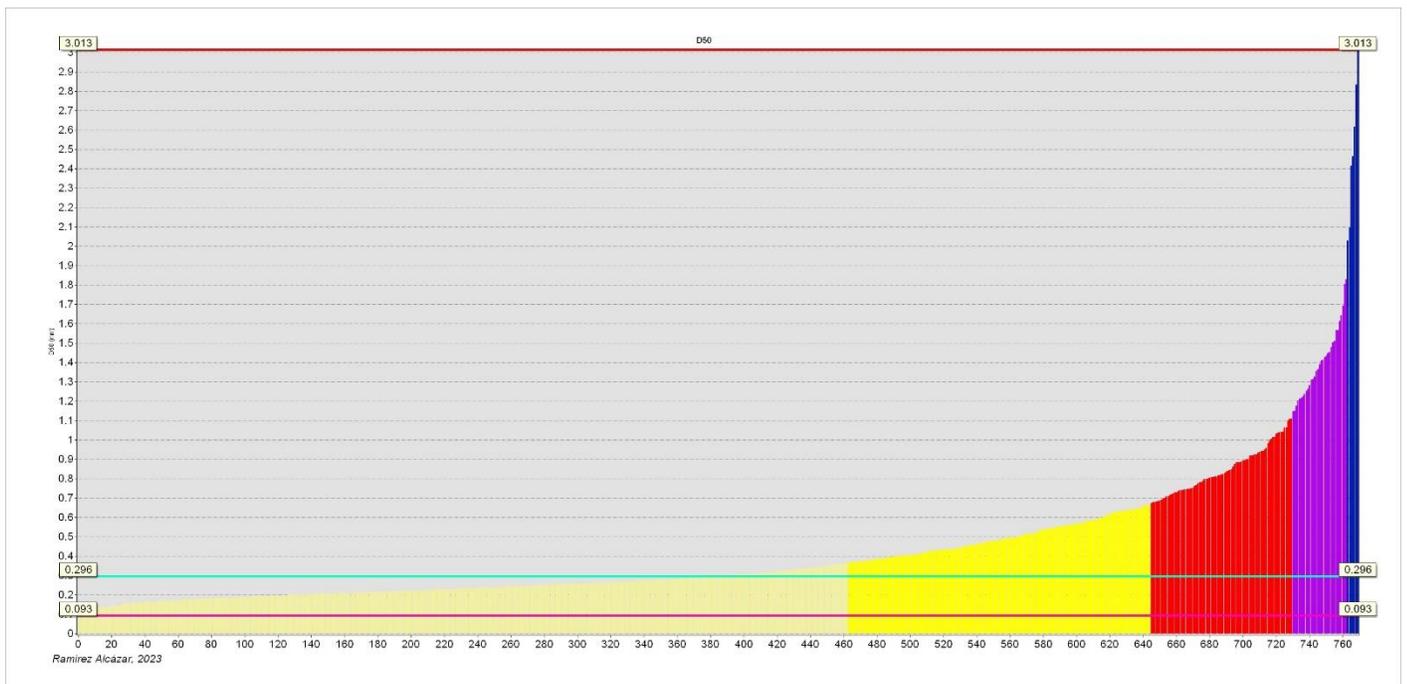


Figura 3.1. 13. Diámetro representativo (D_{50}) de las muestras analizadas

En la Figura 3.1. 13 se puede ver la variación de tamaños correspondientes al D_{50} de la totalidad de las muestras analizadas, donde igual se puede apreciar que el promedio se encuentra en los 0.296 mm y los extremos son 3.013 mm y 0.093 mm. Tomando la clasificación de Udden-Wentworth (ver Tabla 1.2.1.5) se considera que un suelo se clasifica como arena si se encuentra entre los 0.074 mm y los 2.00 mm, por lo que la gran mayoría de las muestras registradas en la BD se encuentra en la clasificación de arenas finas-medias, pocas en arenas gruesas y solo algunos registros, (específicamente hablando aquellos correspondientes a partículas tomadas de Acapulco, Gro) salen de la clasificación de arena de acuerdo con Udden-Wentworth y se consideran gránulos.

Redondez (Symm3) y Esfericidad (SPHT3)

De acuerdo con la BD del GICP, la redondez (Symm3) y la esfericidad (SPHT3) obtenidas a través del CAMSIZER se presenta en la Tabla 3.1. 5 y de manera gráfica en las Figura 3.1. 14 a la Figura 3.1. 17, de las cuales, las dos primeras corresponden a la Symm 3 y las dos restantes a la esfericidad.

Tabla 3.1. 5. Esfericidad (SPHT3) y Redondez (Symm3) promedio por estado y municipio

Estado	Abreviación	Municipio	SPHT3 (promedio)			Symm3 (promedio)		
			Seca	Lavado	Rompiente	Seca	Lavado	Rompiente
BAJA CALIFORNIA	BC	ENSENADA	0.839	0.828	0.814	0.884	0.875	0.866
BAJA CALIFORNIA SUR	BS	LA PAZ	0.842	0.825	-	0.885	0.875	-
		LOS CABOS	0.860	0.857	0.853	0.893	0.892	0.917
CAMPECHE	CM	CARMEN	0.787	0.782	0.789	0.864	0.865	0.864
		CALKINI	-	-	-	-	-	-
		CHAMPOTÓN	0.804	0.826	-	0.867	0.870	-
CHIAPAS	CS	-	0.838	0.836	0.826	0.883	0.880	0.877
COLIMA	CO	CUYUTLAN	0.862	-	-	0.893	-	-
GUERRERO	GR	ACAPULCO	0.860	0.867	0.871	0.890	0.889	0.895
JALISCO	JC	PUERTO VALLARTA	0.862	-	-	0.891	0.881	-
		CHIHUATLAN	0.857	0.835	0.833	0.888	0.873	0.866
NAYARIT	NT	BAHÍA BANDERAS	-	0.854	0.851	-	0.874	0.870
		SAN BLAS	0.842	0.780	0.790	0.868	0.790	0.837
		SANTA MARÍA DEL ORO	-	-	-	-	-	-
		SANTIAGO IXCUINCLA	0.847	0.829	0.829	0.871	0.866	0.867
		TECUALA	0.841	0.821	0.823	0.863	0.855	0.857
QUINTANA ROO	QR	BENITO JUÁREZ	0.844	0.833	0.827	0.882	0.878	0.875
		ISLA MUJERES	0.847	0.858	0.811	0.881	0.887	0.871
		LÁZARO CARDENAS	0.856	0.805	0.667	0.876	0.865	0.802
		OTHON P. BLANCO	0.773	0.792	0.791	0.851	0.864	0.866
		PUERTO MORELOS	0.812	0.837	0.829	0.867	0.879	0.782
		SOLIDARIDAD	0.831	0.821	0.808	0.879	0.875	0.867
		TULUM	0.810	0.829	0.824	0.855	0.868	0.868
SINALOA	SL	MAZATLÁN	0.830	0.812	0.813	0.881	0.868	0.866

VERACRUZ	VZ	ACTOPAN	0.851	0.824	0.825	0.874	0.867	0.867
		AGUA DULCE	0.849	0.811	-	0.885	0.868	-
		ALLENDE	0.847	0.815	-	0.866	0.853	-
		ALTO LUCERO	0.849	0.822	0.820	0.878	0.870	0.866
		ALVARADO	0.854	0.828	0.829	0.883	0.875	0.870
		BOCA DEL RÍO	0.841	0.831	0.855	0.884	0.870	0.885
		CATEMACO	0.871	0.802	0.809	0.881	0.853	0.861
		CAZONES DE HERRERA	0.846	0.768	0.837	0.874	0.851	0.876
		COATZACOALCOS	0.807	0.831	0.822	0.870	0.879	0.873
		LERDO DE TEJADA	0.856	0.855	-	0.891	0.891	-
		MEXAYAPAN	0.806	0.840	-	0.853	0.876	-
		NAUTLA	0.808	0.841	0.829	0.850	0.879	0.875
		PAJAPAN	0.843	0.806	0.769	0.869	0.857	0.849
		PAPANTLA	0.866	0.841	0.829	0.884	0.879	0.871
		SAN ANDRES TUXTLA	0.844	0.845	0.856	0.878	0.883	0.891
		TAMIAHUA	0.819	0.816	0.825	0.863	0.858	0.867
		TAMPICO ALTO	0.827	0.828	0.868	0.867	0.876	0.882
		TATAHUICAPAN	0.856	0.829	-	0.878	0.870	-
		TECOLUTLA	0.859	0.836	0.834	0.884	0.876	0.876
		TUXPAN	0.804	0.818	0.813	0.853	0.861	0.860
URSULO GALVAN	0.846	0.839	0.861	0.882	0.882	0.889		
VEGA DE LA TORRE	0.846	0.819	0.823	0.883	0.874	0.873		
YUCATÁN	YN	CELESTUN	-	-	-	-	-	-
		DZILAM DE BRAVO	-	0.777	0.781	-	0.862	0.863
		PROGRESO	0.821	0.812	0.820	0.877	0.873	0.877
		SISAL	0.825	0.816	0.822	0.877	0.875	0.875
		TELCHAC PUERTO	0.818	0.810	0.842	0.876	0.872	0.875

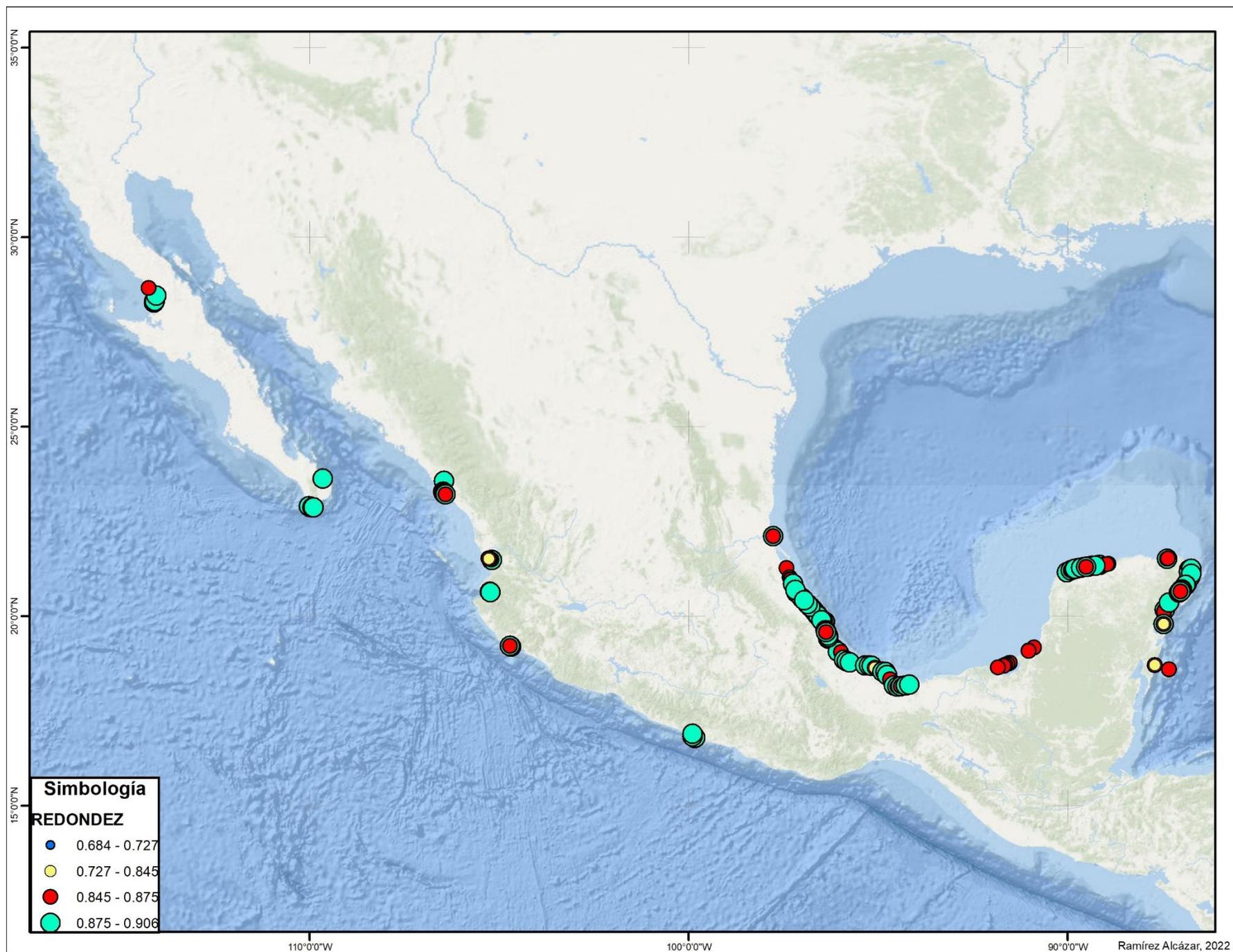


Figura 3.1. 14. Muestras de sedimentos del GICP de la República Mexicana filtradas de acuerdo con su Redondez (Symm3)

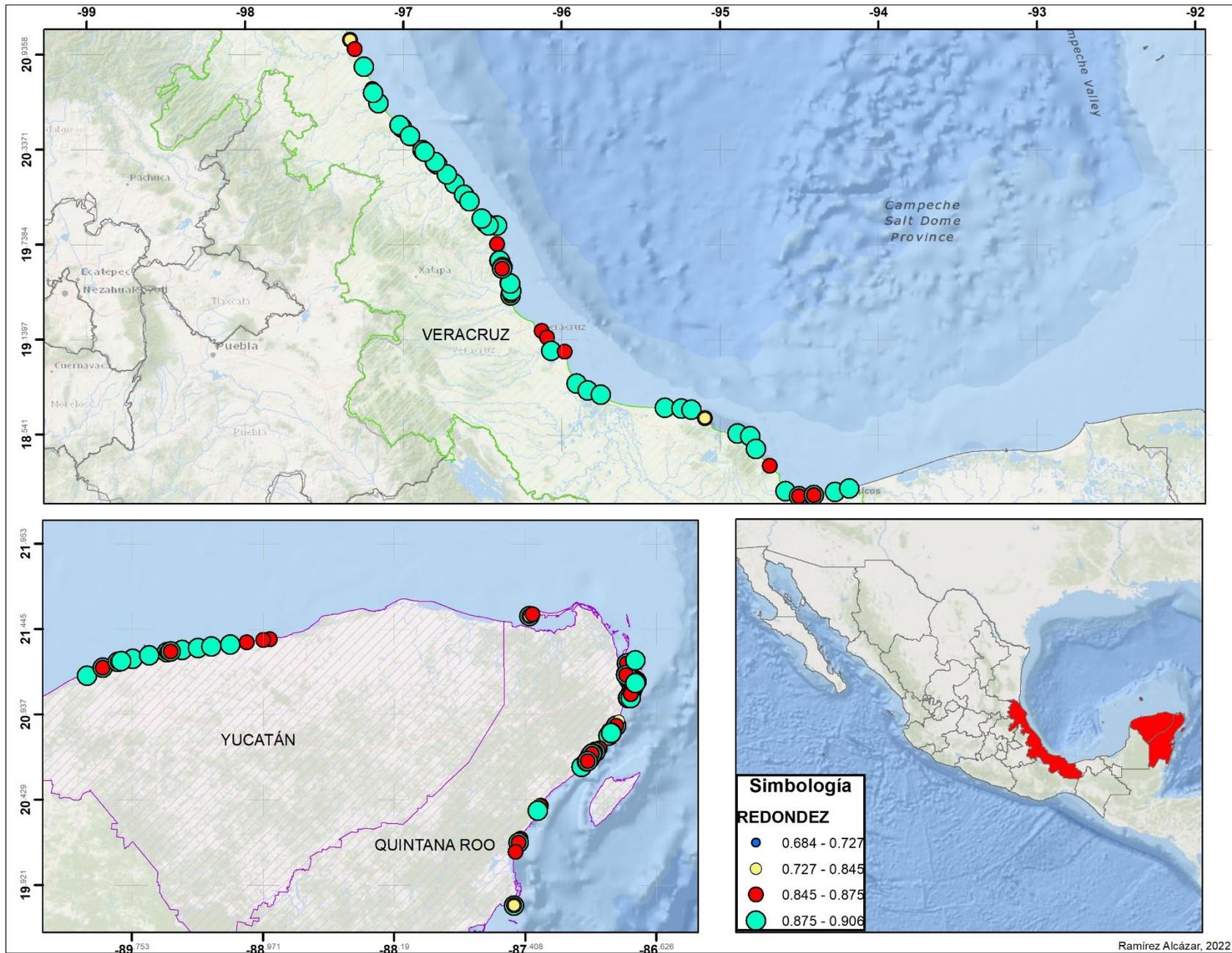


Figura 3.1. 15. Muestras de sedimentos del GICP de los estados de Yucatán, Quintana Roo y Veracruz filtradas de acuerdo con su Redondez (Symm3)

Ramírez Alcázar, 2022



Figura 3.1. 16. Muestras de sedimentos del GICP de la República Mexicana filtradas de acuerdo con su Esfericidad (SPHT3)

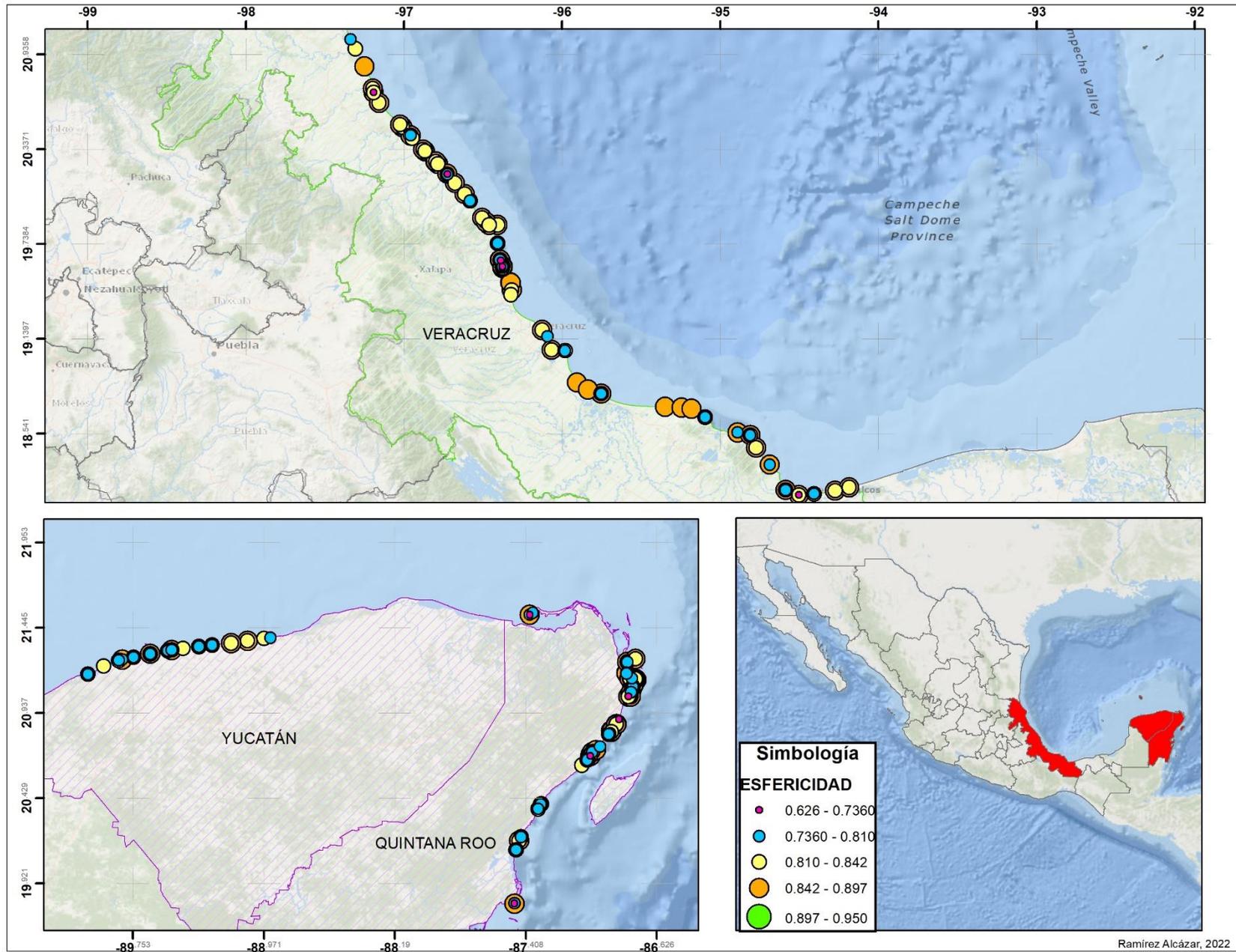


Figura 3.1. 17. Muestras de sedimentos del GICP de los estados de Yucatán, Quintana Roo y Veracruz filtradas de acuerdo con su Esfericidad (SPHT3)

En la Figura 3.1. 18 y la Figura 3.1. 19, se representa el valor obtenido tanto de la redondez como de la esfericidad correspondiente a cada una de las muestras analizadas, ahí mismo es posible ver que el promedio de los parámetros es de $SPHT3_{prom}=0.833$ y $Symm3_{prom}=0.878$.

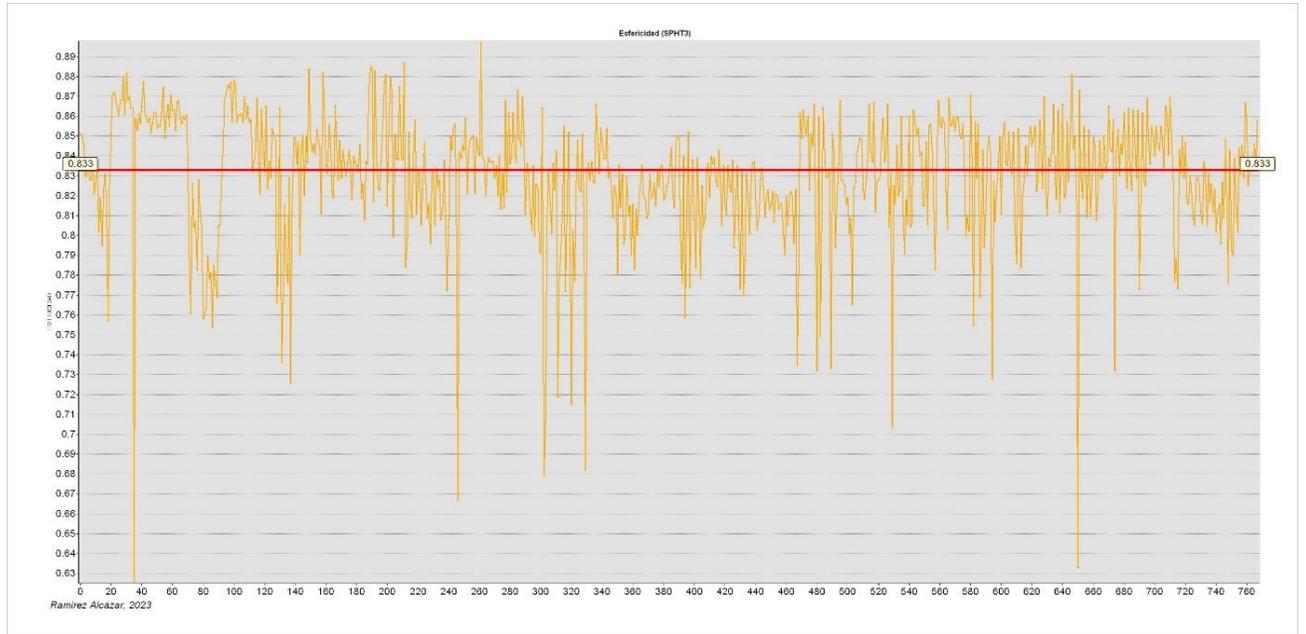


Figura 3.1. 18. Valores de la Esfericidad de la totalidad de muestras analizadas

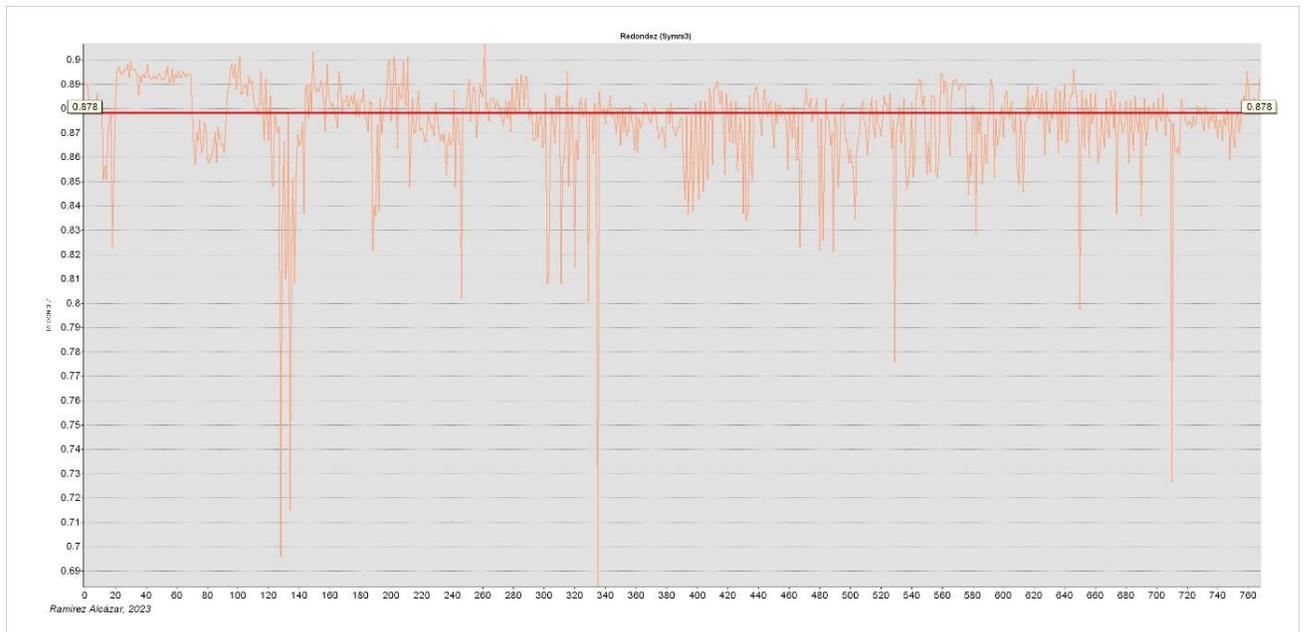


Figura 3.1. 19. Valores de la Redondez de la totalidad de muestras analizadas

Tanto para la redondez como para la esfericidad, por definición, el valor de cada parámetro es de 1 cuando se trata de partículas totalmente esféricas y cuyos bordes están completamente redondeados, Maza & García (1998) explican que para partículas naturales la redondez oscila entre 0.30 y 0.80, mientras que para la esfericidad el rango es de 0.60 a 0.85. Al comparar el valor del promedio obtenido de la esfericidad y de la redondez (0.833 y 0.878 respectivamente) se puede apreciar que dichos valores se salen por poco de los rangos establecidos por Maza & García, sin embargo, únicamente es indicador de que los sedimentos que conforman la BD del GICP han sufrido diversas acciones mecánicas que han ido desgastando y asemejando la forma de las partículas a una esfera y que además no presentan demasiados ángulos. De igual manera, en la Figura 3.1. 18 y Figura 3.1. 19 también se logra apreciar ciertos picos, los cuales, indican que la muestra de arena ha sufrido mayor o menor abrasión a lo largo de su vida.

3.2. Caracterización de sitios a escala local

Dado que no se cuenta con muestras del Golfo de California, se seleccionaron los tres sitios mostrados en la Tabla 3.2. 1, ubicados en los siguientes estados: Veracruz para el Golfo de México, Quintana Roo para el Mar Caribe y Nayarit en el Océano Pacífico.

Tabla 3.2. 1. Sitios de los cuales se efectuará el análisis de la distribución de las propiedades físicas

Estado	Abreviación	Municipio	Sitio
Nayarit	NT	Santiago Ixcuintla	Boca Camichín
Quintana Roo	QR	Benito Juárez	Zona Hotelera
Veracruz	VZ	Actopan	La Mancha

Para conseguir tanto la distribución espacial del tamaño medio de las partículas (D_{50}) como la densidad (rD), la distribución de la redondez (Symm3) y la esfericidad (SPHT3) de los sitios de interés (Tabla 3.2.1), se llevó a cabo una interpolación de los datos disponibles para así obtener un mapa cuadrículado de la distribución en el espacio de dichas propiedades físicas.

Boca Camichín – NT

Boca Camichín se localiza en la zona donde desemboca el río San Pedro y pertenece al municipio costero de Santiago Ixcuintla. Se caracteriza principalmente por formar parte de una de las zonas de marismas y esteros más grandes del estado de Nayarit, debido a esto, ahí se concentra la mayor parte de la producción de camarón, pargo, ostión, entre otras variedades marinas.

La campaña de recolección de los datos utilizados para el análisis de las propiedades físicas del frente costero Camichín se llevó a cabo en agosto de 2015.

El sedimento del frente costero Camichín posee las siguientes características (Figura 3.2. 1 a la Figura 3.2.4):

- De acuerdo con la escala de Udden-Wentworth, se compone principalmente por arena fina y en menor medida por arena media.
 - El promedio del tamaño de las partículas es $D_{50}=0.181 \pm 0.025$ mm, con un valor medio de 0.192 mm en la zona de rompiente, disminuyendo gradualmente en la zona de lavado (0.174 mm) y en la zona de seca (0.170 mm).
 - Los sedimentos más gruesos se localizan aproximadamente a 5 km al noroeste de la desembocadura del río San Pedro (21.766°N, 105.512°W), seguidos de aquellos pertenecientes justo en la Boca de Camichín (21.735°N, 105.493°W). Mientras que las arenas más finas se encuentran justo arriba de la desembocadura del río (21.752°N, 105.501°W).
 - La densidad relativa promedio, mediante el CAMSIZER, es $rD=1.539 \pm 0.261$. Teniendo la mayor densidad (2.202) ubicada aproximadamente a 2 km al noroeste de la Boca de Camichín (21.752°N, 105.501°W), siendo coincidente con el sitio donde se localizó la mayor redondez y esfericidad, pero también el menor D_{50} . El valor de la densidad relativa promedio (1.54) se puede deber a que la zona de estudio se encuentra prácticamente delimitada por la desembocadura del Río San Pedro y por una granja de ostión, lo que propiciaría que la composición de la arena de la zona estuviese dada en parte de la materia orgánica proveniente de estos sitios mencionados y que, además, sea un reflejo del aporte fluvial.
 - El promedio de la redondez es $Symm_3=0.871 \pm 0.011$ y el de la esfericidad es $SPHT_3=0.839 \pm 0.030$.
 - Se puede apreciar que tanto la redondez como la esfericidad tienen comportamientos similares, contrario a lo que sucede con el tamaño representativo, es decir, los menores valores de la esfericidad y de la redondez corresponden a los sitios cuyo D_{50} es mayor.
-

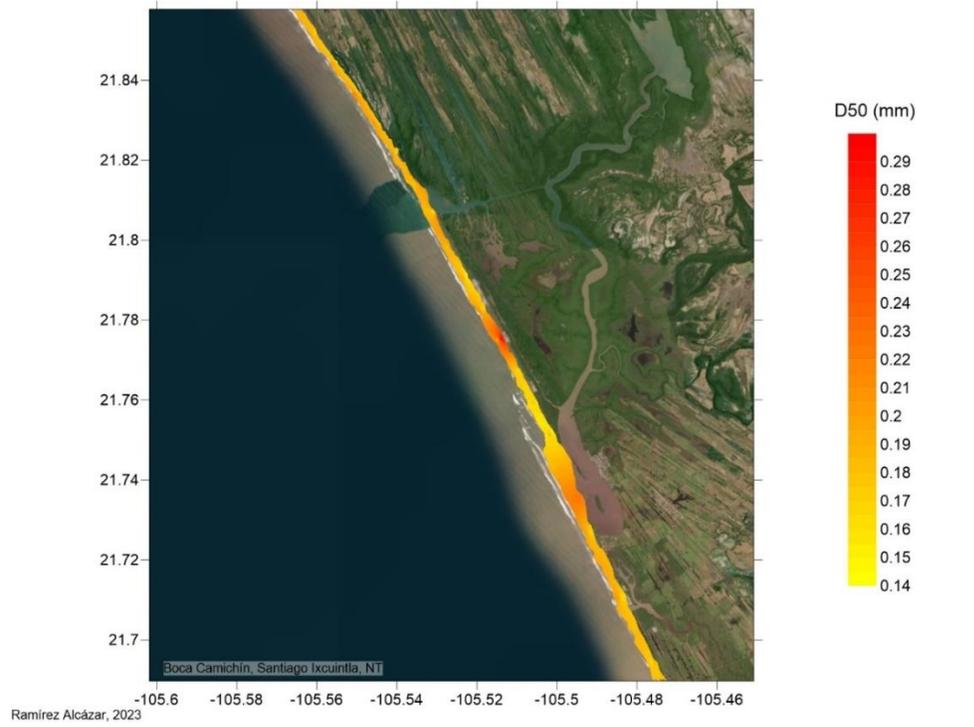


Figura 3.2. 1. Distribución espacial del D_{50} en Boca Camichín

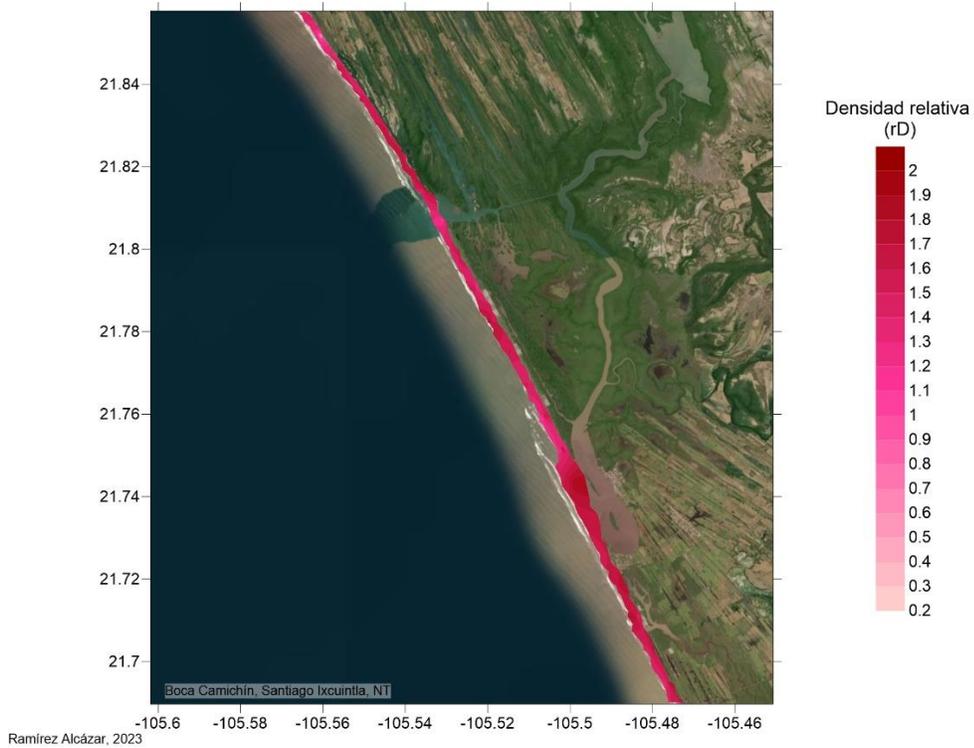
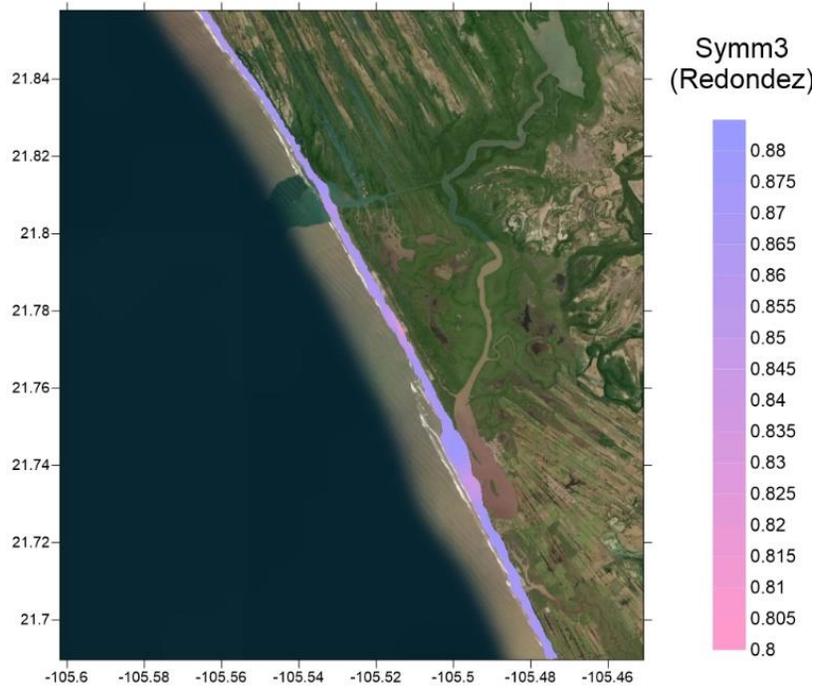
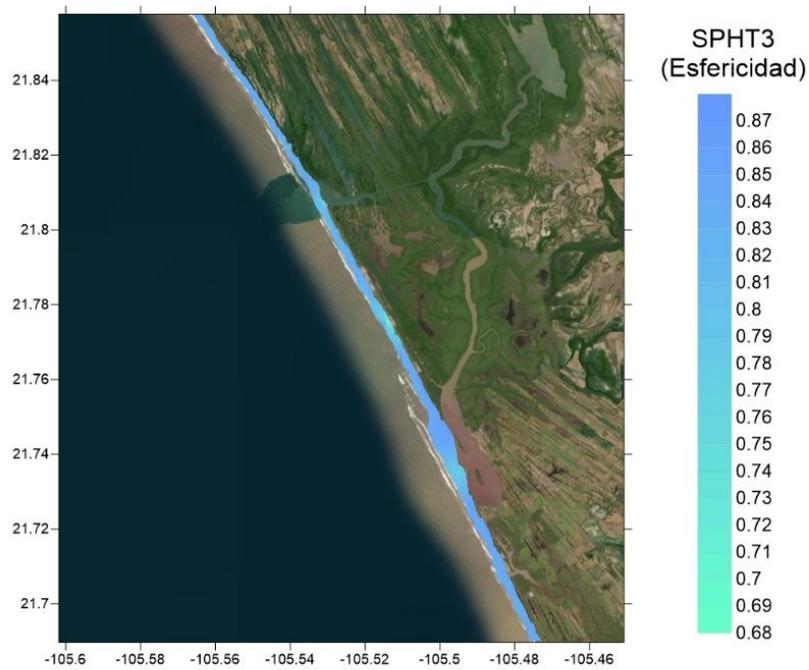


Tabla 3.2. 2. Distribución espacial de la densidad relativa obtenida por CAMSIZER (rD) en Boca Camichín



Ramírez Alcázar, 2023

Tabla 3.2. 3. Distribución espacial de la redondez en Boca Camichín



Boca Camichín, Santiago Ixcuintla, NT

Tabla 3.2. 4. Distribución espacial de la esfericidad en Boca Camichín

Zona Hotelera, Benito Juárez – QR

Cancún es una de las ciudades planificadas más jóvenes de México, cumpliendo apenas 50 años en el año 2020. Surge como idea para impulsar la economía del país y fue uno de los primeros proyectos del FONATUR. La ciudad de Cancún se localiza en el municipio de Benito Juárez, creado en 1975 como resultado de aprobar la ley relativa a la división territorial del estado de Quintana Roo.

La zona turística de Cancún forma parte del sistema regional turístico de la Riviera Maya y sus playas tienen una extensión de aproximadamente 31 km. Hoy en día, la zona hotelera, que es una de las cinco zonas en las que se divide la ciudad de Cancún, es considerado el principal destino turístico de México y uno de los más considerados a nivel mundial.

Debido a la importancia de la zona hotelera, el estado de Quintana Roo es el segundo estado con más información (18.71%) en la BD del Laboratorio de Sedimentos.

Hablando específicamente del sitio de estudio (Zona Hotelera), las campañas de recolección tuvieron lugar en 2007, principalmente, en abril, junio y julio.

Las características de los sedimentos de la Zona Hotelera de Cancún, según se muestra en las Figuras 3.2.5 a la 3.2.7, son las siguientes:

- Los sedimentos de la ZH están compuestos principalmente por arenas medias y en menor medida por arenas finas.
 - El promedio del tamaño de las partículas es $D_{50}=0.471 \pm 0.153$ mm, con un valor medio 0.564 mm en la zona de rompiente, disminuyendo gradualmente en la zona de lavado (0.488 mm) y en la zona de seca (0.428 mm).
 - La densidad relativa promedio de la Zona Hotelera de Cancún es $rD=2.632 \pm 0.293$, mientras que la densidad relativa promedio $\rho_{pic}=2.692 \pm 0.054$, ambos valores resultan coincidentes con la densidad relativa típica de algunos de los restos de corales y conchas marinas por los cuales está compuesta la arena de esta zona. Estos restos se componen principalmente por carbonato de calcio ($CaCO_3$) cuya densidad relativa oscila entre los 2.60 y 2.80.
 - En cuanto a la variación de la densidad relativa promedio en las diferentes zonas de muestreo, se tiene que el mayor valor se presenta en la zona de lavado (2.680), seguido de la zona de seca (2.678) y, finalmente, la zona de rompiente con la menor densidad relativa promedio (2.463).
 - El promedio de la redondez es $Symm_3=0.879 \pm 0.015$, el valor medio de esta propiedad aumenta de la zona de rompiente (0.872) a la zona de seca (0.882). La esfericidad promedio es $SPHT_3=0.842 \pm 0.018$ y, al igual que con la redondez, su valor va en aumento conforme se acerca a la playa (rompiente-0.832, lavado-0.840, seca-0.846).
-

- Los sedimentos más gruesos se localizan en lo que se conoce como Playa Delfines (21.060°N, 86.780°W) y se extiende al sur prácticamente hasta el fin de la ZH. Los sedimentos más finos se localizan en parte de Playa Blanca, en el frente del hotel The Westin (21.109°N, 86.761°W) y del hotel Paradisus (21.083°N, 86.771°W).
- Tal y como ocurre con Boca Camichín la redondez y la esfericidad presentan comportamientos similares, mismos que difieren con el tamaño representativo. Lo anterior significa que, en la Zona Hotelera de Cancún, también sucede que los menores valores tanto de la esfericidad como de la redondez se presentan en los sitios cuyo D_{50} es mayor.

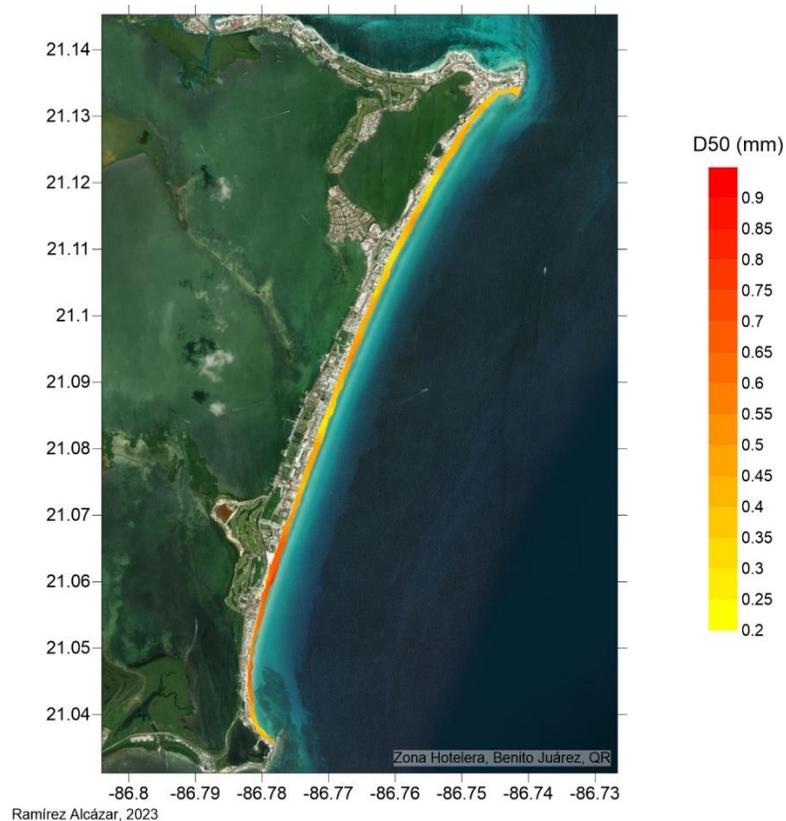


Tabla 3.2. 5. Distribución espacial del D_{50} en la Zona Hotelera

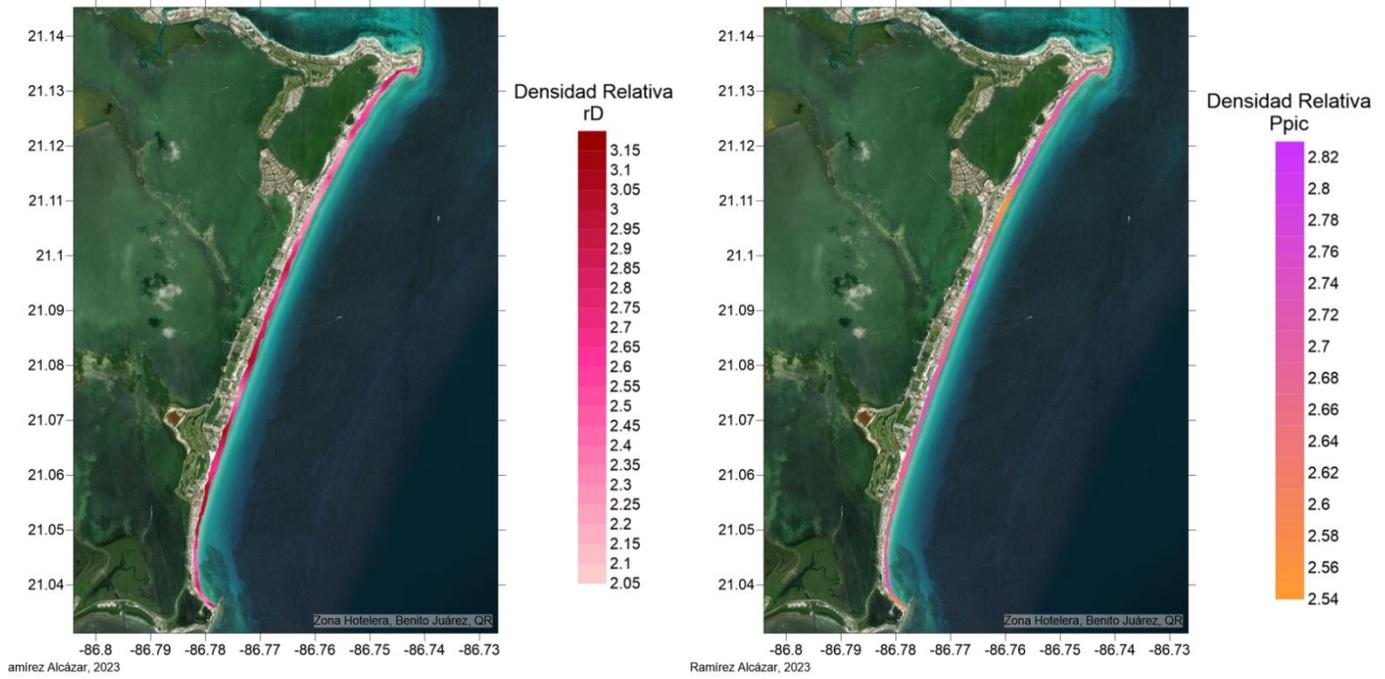


Tabla 3.2. 6. Distribución espacial del rD y ρ_{pic} en la Zona Hotelera

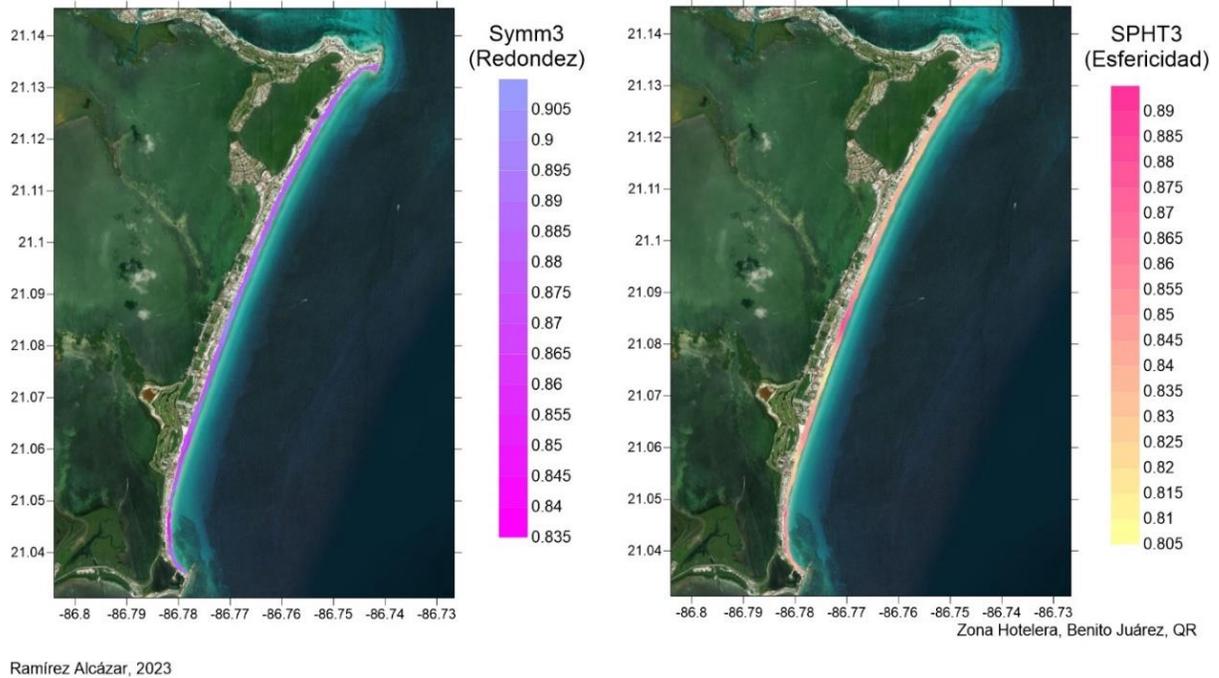


Tabla 3.2. 7. Distribución espacial de la redondez y la esfericidad en la Zona Hotelera

La Mancha – VZ

La Mancha es un sitio de relevancia ecológica perteneciente al municipio de Actopan, donde tres ecosistemas convergen: la playa, manglares y una laguna. Una de las características a destacar de esta región ecoturística es que cuenta con una laguna costera de 135 hectáreas en la que confluye tanto agua del mar como de los ríos aledaños.

Debido a que este sitio aún no ha sufrido de la actividad humana de manera indiscriminada, la riqueza natural con la que cuenta es muy alta, siendo un lugar por el cual existe el tránsito de millones de aves de, aproximadamente, 38 especies diferentes provenientes de Estados Unidos y Canadá, y cuyo destino es Sudamérica.

Por parte del GICP, a finales del año 2013 y durante el 2014, se realizaron diversas campañas de recolección de sedimentos en la región ecoturística de la Mancha. En las Figuras 3.2.8 a la 3.2.10 se presentan los mapas de distribución espacial de las diferentes propiedades físicas de interés que se tienen como resultado de efectuar la interpolación de los datos obtenidos en laboratorio al someter las muestras recolectadas en el periodo antes mencionado a las pruebas pertinentes.

Las principales características que destacar del sedimento de La Mancha son las siguientes:

- Los sedimentos que conforman el fragmento de playa en estudio, de acuerdo con la clasificación de la ASTM, se considera en su totalidad como arena fina, mientras que al tomar como referencia la escala de Udden-Wentworth la arena del sitio se divide entre arena fina y arena media.
 - El promedio del tamaño de las partículas es $D_{50}=0.227 \pm 0.052$ mm, con un valor medio de 0.224 mm en la zona de rompiente, aumentando un poco en la zona de lavado (0.254 mm) y disminuyendo nuevamente en la zona de seca (0.214 mm).
 - El promedio de la densidad relativa obtenida con el CAMSIZER es $rD=2.203 \pm 0.298$. Este valor se modifica un poco dependiendo de la zona de muestreo. Para la zona seca, se tiene un promedio de $rD=2.280$, disminuyendo gradualmente conforme se adentra en el agua (lavado-2.154, rompiente-2.128). De manera espacial, la menor densidad relativa se tiene en la zona donde confluye la laguna de La Mancha (19.589°N, 96.379°W).
 - En cuanto a la morfología de los granos de la Mancha se tiene una esfericidad promedio $SPHT_3=0.833 \pm 0.029$. El valor medio de esta propiedad en la zona de rompiente es de 0.829, en la zona de lavado disminuye un poco (0.822) y aumenta, superando al valor mencionado en la zona de rompiente, en la zona de seca (0.850). Mientras que la redondez promedio es $Symm_3=0.869 \pm 0.021$ y se presenta el mismo comportamiento que con la esfericidad, es decir, se tiene el mayor valor de la redondez en la zona de seca (0.872), luego en la zona de rompiente (0.868), y finalmente el menor valor se presenta en la zona de lavado (0.866).
-

- Las arenas medias se localizan en su mayoría al noreste del fragmento de playa de la Mancha y, conforme se recorre ésta hacia el sur, se puede ver como en general disminuye el tamaño de los granos, a excepción de lo que se conoce como “Playa Paraíso”, es decir, a 260 metros al norte de la desembocadura de la laguna, donde se presenta el máximo tamaño de las partículas.
- Las partículas menos redondeadas y con un poco de mayor angulosidad se localizan prácticamente en la desembocadura de la laguna de la Mancha y se extienden unos cuantos metros hacia el norte para ir disminuyendo su angulosidad conforme se llega al fin del tramo en estudio.

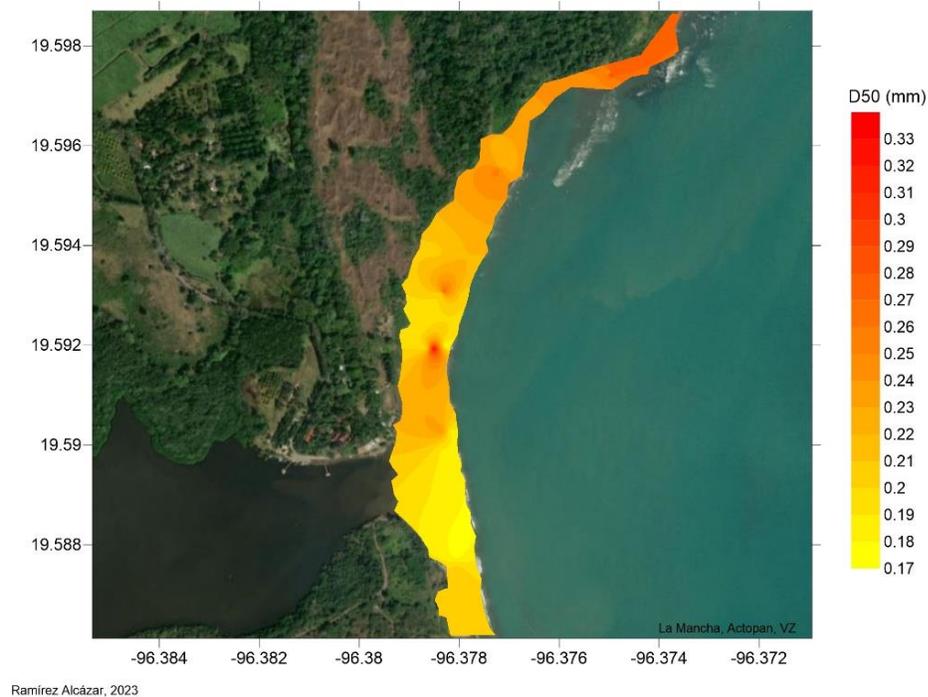


Tabla 3.2. 8. Distribución espacial del D50 en La Mancha

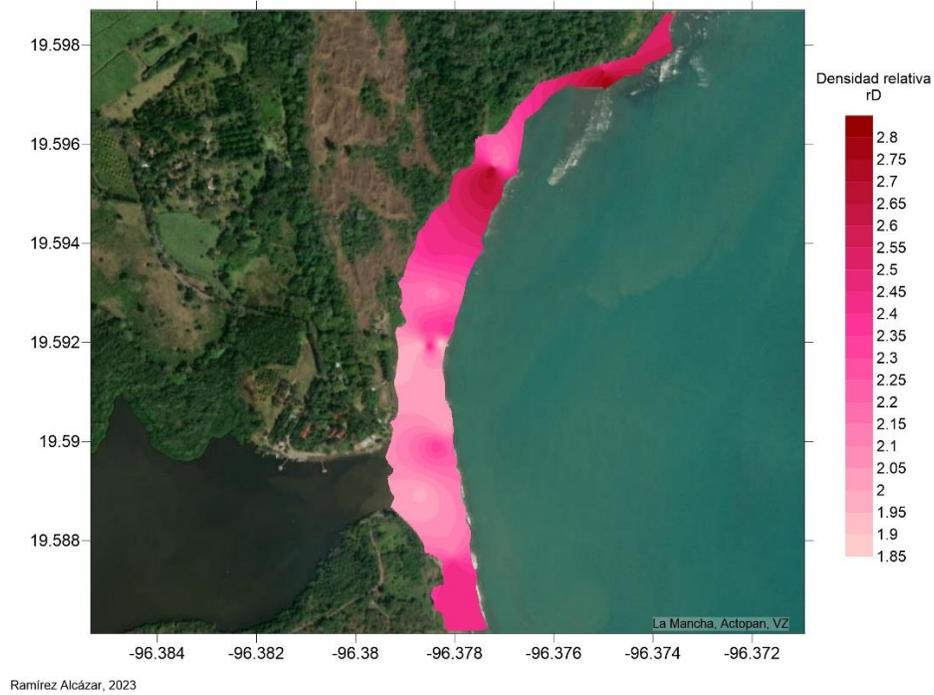


Tabla 3.2. 9. Distribución espacial del rD en La Mancha

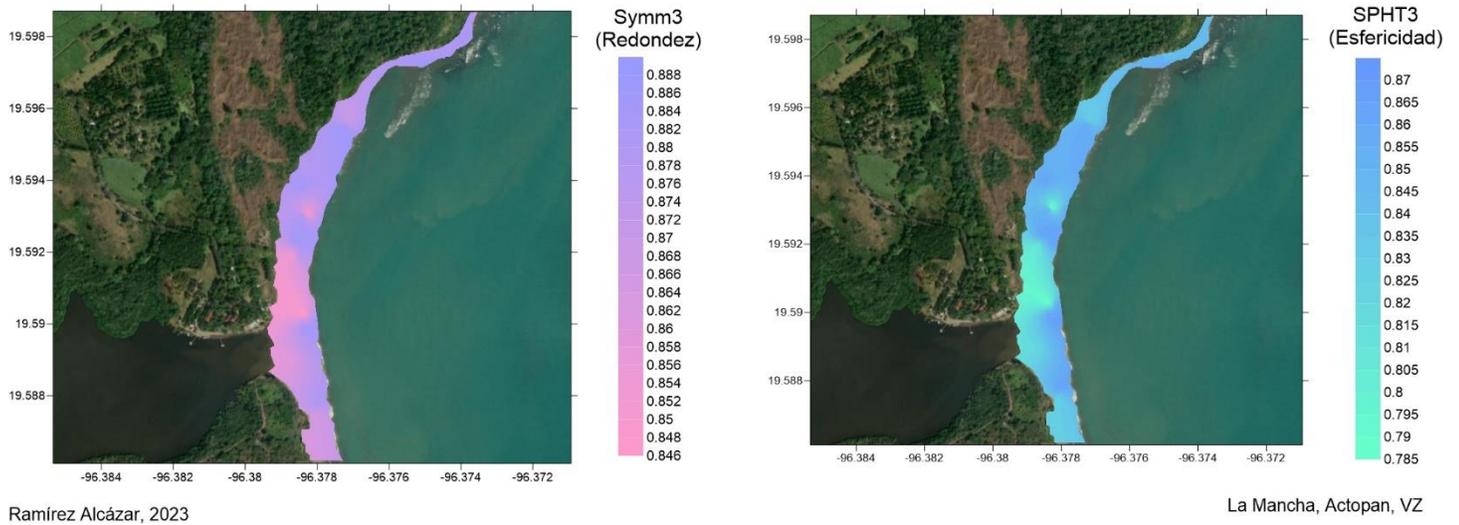


Tabla 3.2. 10. Distribución espacial de la redondez y la esfericidad en La Mancha

4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para el presente trabajo se llevó a cabo la caracterización de los sedimentos de las playas arenosas del litoral mexicano disponibles en la Base de Datos del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, resultado de campañas de recolección llevadas a cabo entre 2006 y 2021. Esto con la finalidad de analizar la densidad relativa, el tamaño de la partícula, la esfericidad y la redondez, características que pueden ser asociadas con la dinámica costera.

Se encontró que la densidad relativa obtenida haciendo uso del CAMSIZER (rD) arrojó que el 53% de las muestras analizadas fluctúa entre 2.118 y 2.825, teniendo como promedio $rD=2.236 \pm 0.578$, valor que es coincidente con los valores típicos de las densidades relativas de los minerales que comúnmente componen a las arenas de origen terrígeno (cuarzo, 2.60-2.65; feldespatos, 2.54-2.76; micas como moscovita 2.76-3.10, biotita 2.70-3.10; y minerales opacos).

Al contrastar las densidades relativas de elementos compuestos mayormente de carbonato de calcio ($2.60 \leq \rho_r \leq 2.75$), como conchas y corales, resulta coincidente con la densidad relativa promedio producto de la prueba de picnómetro de 107 muestras pertenecientes a los estados de Yucatán y Quintana Roo, cuyo valor fue de $\rho_{pic}=2.645 \pm 0.1214$.

Las arenas caracterizadas pertenecientes a la BD del GICP son muestras bien graduadas, por lo que el tamaño representativo de estas es el D_{50} . En general, se puede observar que este valor promedio alrededor de las costas analizadas en la República Mexicana es $D_{50}=0.435$ mm, lo que indica que la arena de acuerdo con la escala de Udden- Wentworth es una arena media.

Por otro lado, la esfericidad promedio de manera global se obtuvo de $SPHT_3=0.830$, además que este valor es mayor en la zona de seca y tiende a disminuir hacia la zona de rompiente. En cuanto a la redondez el promedio fue de $Symm_3=0.875$, sucediendo el mismo fenómeno que en la esfericidad, es decir, la redondez es menor en la zona de rompiente y aumenta conforme se acerca a la zona de seca.

Del análisis a escala local de Boca Camichín, Nayarit; La Mancha, Veracruz; y la Zona Hotelera de Cancún en Quintana Roo, se obtuvo lo siguiente:

- Al comparar la densidad relativa (rD) promedio obtenida de manera general ($rD=2.236$) con las de Boca Camichín ($rD=1.539$) y La Mancha ($rD=2.203$), se tienen densidades más bajas en los sitios antes mencionados, lo cual hace pensar que a pesar de que el origen de sus sedimentos esté ligado más a la meteorización de las rocas localizadas en los alrededores, debido al medio en el que se encuentran, su densidad no es solo un reflejo de un sedimento terrígeno, sino también de los restos orgánicos, y aportes fluviales y lagunares presentes en los ecosistemas de los cuales forman parte los sitios de estudio. Mientras que en la Zona Hotelera de Cancún, la densidad relativa promedio de los sedimentos es de $rD=2.632$ y $\rho_{pic}=2.692$, valores que resultan concordantes con la densidad relativa del carbonato de calcio.
-

- De acuerdo con la escala de Udden-Wentworth las arenas de estos sitios se clasifican como arenas finas y medias, Boca Camichín posee un diámetro $D_{50}=0.181$ mm, La Mancha $D_{50}=0.227$ mm y la Zona Hotelera $D_{50}=0.471$ mm. Mientras que la redondez y la esfericidad en estos sitios resulta ser bastante similar entre sí, siendo en la ZH donde se tienen valores un poco más grandes ($Symm_3=0.879$ y $SPHT_3=0.842$) con respecto a los otros sitios (La Mancha, $Symm_3=0.869$ y $SPHT_3=0.833$; y Boca Camichín, $Symm_3=0.871$ y $SPHT_3=0.839$).

De las muestras analizadas, la mayoría de las arenas mexicanas son de origen terrígeno, sin embargo, el origen exacto de los sedimentos depende del sitio al que pertenezcan. En México existen zonas donde los componentes biogénicos predominan, casos como Quintana Roo, estado que mayormente colinda con el arrecife mesoamericano, presenta arenas cuya composición incluye, principalmente, restos de organismos marinos, como corales, conchas y fragmentos de algas. Ecosistemas como los arrecifes representan no solo una fuente de sedimentos, sino también un medio de protección y disipación de la energía del mar por lo que el tamaño de la partícula también se relaciona con la presencia de estos ambientes.

En cuanto al análisis granulométrico, se concluye que los diámetros característicos permiten conocer la capacidad que tienen las arenas de ser transportadas, tanto para el inicio de movimiento como para la depositación. Por ejemplo, donde hay sedimentos de menor tamaño, menor será la energía requerida para su movimiento. A su vez, se observó que el tamaño de los sedimentos disminuye conforme se acerca a la zona de seca y que los diámetros son mayores en la zona de lavado o rompiente. Con el tamaño de la partícula vienen relacionadas propiedades físicas como la esfericidad y redondez, las cuales suelen tener valores altos cuando el D_{50} es menor, es decir, los sedimentos entre mayor sea su exposición a diversas acciones mecánicas mayor será el desgaste y parecido de las partículas a una esfera, por lo que a su vez presentarán menos ángulos y el tamaño representativo de la partícula tenderá a disminuir.

Respecto a los métodos utilizados en el Laboratorio de Sedimentos, la obtención de la densidad con el CAMSIZER ofrece una alternativa práctica. Sin embargo, en este trabajo se observó que los valores obtenidos con el picnómetro contra el CAMSIZER no son comparables y los valores obtenidos por este último se asumen como aproximados. Esta diferencia es apreciable en el caso de estudio a escala local que se llevó a cabo de la Zona Hotelera de Cancún, ya que, revisando los mapas de ambas densidades relativas se observa una disparidad entre estos, y que a pesar de que en cuanto a magnitud sean comparables no lo son en cuanto a valores.

Finalmente, a manera de resumen, se concluye que dentro de la dinámica costera participan complejos procesos de intercambio de materia y energía como lo son los agentes hidrodinámicos, los factores antropogénicos y los procesos de transporte de sedimentos. El conjunto de estos procesos trae como resultado un ecosistema en constante cambio que a su vez es sensible y frágil, por lo que caracterizar de manera adecuada los elementos biofísicos del sistema, como lo es el sedimento, permite entender la relación que existe entre dicho intercambio de energía y evaluar las acciones pertinentes para conservar y preservar la costa de la mejor manera posible, cuidando que a su vez sea se haga un uso sostenible.

Como futuras línea de investigación se propone lo siguiente:

- Realizar un estudio de validación metodológica para la obtención de la densidad relativa por ambos métodos, dado que, en el presente trabajo se observó una diferencia entre los valores obtenidos de efectuar una u otra prueba. Se propone evaluar la teoría que toma como base el CAMSIZER para calcular la densidad relativa, el cómo llevar a cabo dicho procedimiento, y cómo el resultado varía de acuerdo con los parámetros de calibración del equipo o con el nivel de mantenimiento que éste posee. Mientras que para el método del picnómetro se recomienda determinar si influyen cuestiones como la experiencia de quien ejecuta la prueba, la metodología seguida para eliminar el aire de las partículas sedimentarias, el tiempo dedicado a realizar dicha acción, la cantidad de muestra utilizada, y cómo afecta el resultado la materia orgánica presente.
 - Continuar con la recolección y caracterización de sedimentos a lo largo y ancho de las costas de la República Mexicana, con el objetivo de ampliar significativamente el alcance de este trabajo y de futuras investigaciones que impliquen, por ejemplo, el estudio respecto al transporte de sedimentos. Asimismo, al enriquecer la BD del GICP, se establece un fundamento sólido que puede ser tomado como referencia al momento de evaluar procesos relacionados con la sedimentación, erosión y acreción de las playas mexicanas. Permitirá de igual manera, conocer el tipo de sedimento a colocar en rellenos, estudiar el impacto de fenómenos naturales de importancia o ayudar a cualquier trabajo que requiera un conocimiento detallado las propiedades físicas de las arenas del país.
-

REFERENCIAS

- ☉ Alcérreca, J. (2011) *Determinación de los umbrales de movimiento de arenas de la península de Yucatán*. México: Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.
 - ☉ Armanini, A. (2005) *Principles of River Hydraulics*. 2nd Edition. Springer International Publishing AG. ISBN: 978-3-319-68099-6.
 - ☉ Azus, I. (s.f.). *El Manejo De Los Cambios En La Morfología Costera*. México: Centro de Enseñanza Técnica y Superior-Ensenada
 - ☉ Basanta, K.S. & Patro, B.C. (1970). *Treatment of Sphericity and Roundness Data of Quartz Grains of Clastic Sediments*. *Sedimentology*, 14, 51-66.
 - ☉ Bensery, G. (2006). *El Espacio Turístico Litoral*. Argentina: Aportes y Transferencias, Vol. 10, Núm. 2, 102-122, Universidad Nacional de Mar de Plata.
 - ☉ Bernabeu A.M., Medina R., (2002). *Efecto de la reflexión sobre la forma de equilibrio del perfil de playa: validación para la costa de la península Ibérica*. *Rev. C. & G.*, 16-(1-4), 83-95.
 - ☉ Bluck, B.J. (1967). *Sedimentation of Beach Gravels: Examples from South Wales*. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 37. doi:10.1306/74d71672-2b21-11d7-8648000102c1865d
 - ☉ Bonilla, J. (2022). *Apuntes de Hidráulica de Ríos*. México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
 - ☉ Borselli, L. (2022). *Geotecnia I. Parte II. Clasificación ingenieril de los suelos y de los macizos rocosos*. México: Instituto de Geología, Facultad de Ingeniería, UASLP. Recuperado el 9 de agosto de 2022, de: https://www.lorenzo-borselli.eu/geotecnia1/Geotecnia_1_parte_II.pdf
 - ☉ Caballero, M. et al. (2013). *Paleolimnología: Como Descifrar La Historia De Los Lagos Y Su Entorno A Partir Del Estudio De Sus Sedimentos*. *Paleontología Mexicana*, 3(1), 22–28. Recuperado el 24 de octubre de 2022 de: <http://ojs-igl.unam.mx/index.php/Paleontologia/article/view/172>
 - ☉ Caballero. C. (s.f). *Intemperismo*. México: Facultad de Ciencias. Recuperado el 11 de agosto de 2022 de: <http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/cursos/34b-Intemperism.pdf>
 - ☉ Casagrande, A., (1948), *Classification and identification of soils*, American Society of Civil Engineers, Transactions, Vol. 113, 901-991.
 - ☉ Cerda, G. (2016). *Estimación del transporte de sedimento en la barra del río Mataquito*. pp. 13-15. Chile: Universidad Católica de la Santísima Concepción. Recuperado el 12 de septiembre del 2022 de: <http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1042/Cesar%20Gabriel%20Cerda%20Sandoval.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page25>
 - ☉ CFE. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de la Electricidad*. México.
-

- 9 Chávez, V. (2011). *Determinación experimental del Inicio de Arrastre de Arenas del Estado de Quintana Roo, México*. pp. 32-41. México: Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
 - 9 *Composición de los sedimentos marinos. Medios marinos sedimentarios*. (2017). España: Universidad de las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).
 - 9 Cruz, A., Cervantes, O. (2016). *Erosión de playas: ¿Cambio climático o acción humana?* México: Universidad de Colima.
 - 9 CZMA. (1972). *The Coastal Zone Management Act*. US.
 - 9 Davidson, R. (2009). *Introduction to Coastal Process and Geomorphology*. Reino Unido: Cambridge University.
 - 9 Deméneghi, A., Puebla, M., (2019). *Comportamiento de suelos*. México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
 - 9 *Erosión costera en Colombia*. (s.f). Colombia: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. Programa Nacional de Investigación para la Prevención, Mitigación y Control de la Erosión Costera en Colombia (PNIEC).
 - 9 *Erosión costera*. (s.f). El Salvador: Dirección General del Observatorio Ambiental. Ministerio De Medio Ambiente Y Recursos Naturales. Recuperado el 12 de septiembre de 2022 de: <http://mapas.snet.gob.sv/oceanografia/erosionCostera.pdf>
 - 9 Folk, R.L, (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Estados Unidos, 182 pp.
 - 9 García, A. (s.f) *Hidráulica Fluvial, morfología fluvial, erosión y transporte sólido*. España: Escuela de Negocios, Máster en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua.
 - 9 Göğüş, M. et al. (2001). *Effect of Particle Shape on Fall Velocity of Angular Particles*. Journal of Hydraulic Engineering, 127(10), 7-18.
 - 9 Guillén, J. (s.f). *Geología de la Zona Litoral*. España: Instituto de Ciencias del Mar.
 - 9 Holtz, D.R. and Kovacs, D.W. (1981) *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall, Inc.
 - 9 Horton, R. (1945). *Erosional Development Of Streams And Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach To Quantitative Morphology*. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
 - 9 Ibarra, D. & Belmonte, F., (2017). *Comprendiendo el litoral: Dinámica y procesos*. pp. 15, 20-22. España: Universidad de Murcia.
 - 9 INEGI (2022). *Producto Interno Bruto Turístico*. México. Recuperado el 7 de agosto de 2022 de: <https://www.inegi.org.mx/temas/turismosat/>
-

- 9 Jimémez et al. (2021). Desarrollo de territorios costeros turísticos en México mediante la autogestión con base sistémica. EURE, 47(141), 5–26. <https://redalyc.org/journal/196/19666824001/html/>
 - 9 Jin, G., et al. (2009). *Pore-Level Study of Grain-Shape Effects on Petrophysical Properties of Porous Media*. SPWLA 50th Annual Logging Symposium, June 21-24, 2009.
 - 9 Juárez, E. & Rico, A. (1973). *Mecánica de Suelos. Tomo I. Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. México: Limusa.
 - 9 Krumbein, W.C. (1938). *Local Aerial Variation of Beach Sands*.
 - 9 Lizarzaburu, E. (2016). *Mecánica de Suelos I*. Perú: Universidad Nacional de Ucayali.
 - 9 López, E. (2010). *Componentes biogénicos en sedimentos del margen sur-occidental de la península de Baja California*. México: Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN. Recuperado el 6 de septiembre de 2022 de: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/13514/1/lopezo1.pdf>
 - 9 López, I. (2016). *Clasificación Morfológica de las Playas y Modelado del Perfil Transversal en Valencia, Alicante y Murcia*. España: Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante.
 - 9 Mariscal, J. (s.f). *El Manejo Integrado de Zona Costera*. México: Departamento de Estudios para el Desarrollo Sustentable de Zonas Costeras, Universidad de Guadalajara.
 - 9 Masselink, G & Short A.D. (1993). *The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model*. Journal of Coastal Research. 785-800.
 - 9 Maza, J. & García, M. (1998). *Origen y Propiedades de los Sedimentos. Capítulo 7 del Manual de Ingeniería de Ríos*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
 - 9 Medina, R., Losada, I., Losada, M., Vidal, C. (1995) *Variabilidad de los perfiles de playa: forma y distribución granulométrica*. España: Universidad de Cantabria.
 - 9 MiraCosta Collage. (2013). *Oceanography 101. Chapter 6. Marine Sediments*. Estados Unidos: Miracosta.edu. Recuperado el 03 de septiembre de 2022 de: <https://gotbooks.miracosta.edu/oceans/chapter6.html>
 - 9 Morales, E; Winckler, P & Herrera, M. (2019). *Costas de Chile. Medio Natural, Cambio Climático, Ingeniería Oceánica y Gestión Costera*. Chile: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
 - 9 Pérez, A. & Márquez, A. (2017). *Sedimentología*. México: División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Unidad Iztapalapa, Universidad Autónoma Metropolitana.
 - 9 Pye K. (2001). The nature and geomorphology of coastal shingle. Ecology and geomorphology of coastal shingle.2-22.
-

- ◉ Ramírez, R & de la Cruz, V. (2021). *Manual para la obtención de granulometría por medio del CAMSIZER en el Laboratorio de Costas y Puertos del IIUNAM*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
 - ◉ Ramírez, R & de la Cruz, V. (2022). *Manual para la obtención de la densidad por picnómetro en el Laboratorio de Costas y Puertos del IIUNAM*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
 - ◉ *Rocks under the Microscope*. (2020). Oxford Earth Sciences Image Store <https://www.earth.ox.ac.uk/~oesis/micro/index.html>
 - ◉ Rodríguez, P. (2021). *Apuntes de Ingeniería Costera. Tema 1. Introducción a la Ingeniería Costera y Oceanografía*. México: Facultad de Ingeniería.
 - ◉ Rolando, V. (2007). *Algunas Consideraciones Acerca de la Escala en Geografía y en Geomorfología*. pp. 50-52. Argentina: Centro de Geociencias Aplicadas. Recuperado el 17 de septiembre de 2022 de: <https://revistas.unne.edu.ar/index.php/cga/article/download/1742/1500>
 - ◉ Rubey, W. (1933). *The Hydrodynamics of Sedimentation*.
 - ◉ Sánchez, E. (2015). *Curso Básico de Hidráulica Fluvial. Origen y Propiedades de los Sedimentos*. México: IMTA. Recuperado el 8 de agosto de 2022 de: <https://imta.gob.mx/potamologia/images/potamologia/CV-profesores-curso/DR.%20ENRIQUE%20S%C3%81NCHEZ%20CAMACHO.pdf#:~:text=Intemperizaci%C3%B3n%20Proceso%20destrutivo%20o%20grupo%20de%20procesos%20mediante,o%20sin%20transporte%20del%20material%20suelto%20o%20alterado>.
 - ◉ Sánchez, J.L & Centeno, E. (2015). *Técnicas y aplicaciones del estudio de los sedimentos terrígenos de grano fino: procedencia y tectónica*. México: Instituto de Geología - UNAM. Recuperado el 8 de septiembre de: <https://www.geologia.unam.mx/contenido/tecnicas-y-aplicaciones-del-estudio-de-los-sedimentos-terrigenos-de-grano-fino-procedencia-y-tectonica>
 - ◉ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Mares Mexicanos*. México. Recuperado el 4 de agosto de 2022, de: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/mares-mexicanos>
 - ◉ Shields, A. (1936). *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement* (translated version). Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau (en inglés). Berlin: Preußische Versuchsanstalt für Wasserbau.
 - ◉ Stanley, D. J. & D. J. P. Swift. (1976). *Marine sediment transport and environmental management*. Nueva York: John Wiley & Sons. USA. 592 p.
 - ◉ Tucker, M. E. (2001). *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. Reino Unido: Blackwell Science
 - ◉ *DYNAMIC IMAGE ANALYSIS. Particle characterization of powders, granules and suspensions in a size range from 1 μm to 30 mm*. (s.f.). Retsch Technology: The Sample. Verder Scientific Customer Magazine. Vol. 42.
-

- 9 Udden, J. A. (1898). *Mechanical composition of wind deposits*. Augustana Library. USA. 69 p
 - 9 Universidad de Alicante. (2020). *Aspectos texturales*. Atlas Digital de Petrografía Sedimentaria. Recuperado el 13 de octubre 2022 de: <https://web.ua.es/es/e-pesedua/siliciclasticas/aspectos-texturales.html>
 - 9 USACE. (2008). *Coastal Engineering Manual. Chapter 3. Chapter 4*. Estados Unidos.
 - 9 Valdés, J. (s.f). *6. Sedimentos marinos. 6.1 Geoquímica marina*. Chile: Universidad de Antofagasta. Recuperado el 7 de septiembre de 2022 de: http://www.cona.cl/publicaciones/geologia_marina/6.pdf
 - 9 Wadell, H. (1932). *Volume, shape and roundness of rock particles*. Journal of Geology, 40, 443-451.
 - 9 Wentworth, C. (1922). *A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments*. Estados Unidos: Artículo, Universidad de Chicago. Recuperado el 13 de agosto de 2022, de: https://www.jstor.org/stable/30063207?seq=15#metadata_info_tab_contents
 - 9 Wright, L.D. & Thom, B.G., (1977). *Coastal depositional landforms: A morphodynamic approach.* *Progress in Physical Geograph*
-