



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Determinación de la Velocidad de Caída de sedimentos costeros  
de la Península de Yucatán, México**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A :

**JUAN CARLOS ALCÉRRECA HUERTA**

DIRECTOR DE TESIS:

**Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN**



MÉXICO, D.F.

JUNIO DE 2009

A Dios...

...por haberme dado la oportunidad de conocer a todas aquellas personas que me han proporcionado su apoyo, su confianza, su motivación y su cariño.

# Determinación de la Velocidad de Caída de sedimentos costeros de la Península de Yucatán, México

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>i</b>
<b>OBJETIVOS Y ALCANCES</b>	<b>ii</b>
<b>DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO</b>	<b>iii</b>
<b>LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>iv</b>
<b>CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>v</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 PARTES DE LA PLAYA</b>	<b>1</b>
1.1.1 Transformaciones del oleaje en la zona costera	1
1.1.2 Perfil de una playa	2
<b>1.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS</b>	<b>4</b>
1.2.1 Propiedades físicas del agua	4
1.2.2 Propiedades físicas de los sedimentos	5
1.2.3 Propiedades físicas de la mezcla de sedimentos	6
<b>1.3 PROPIEDADES DEL MEZCLADO AGUA- SEDIMENTO</b>	<b>7</b>
<b>1.4 UMBRALES DE MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS</b>	<b>8</b>
1.4.1 Sedimentación de las partículas	12
1.4.1.1 <i>La Ley de Stokes</i>	13
1.4.1.2 <i>Otras formulaciones</i>	14
<b>2. PRUEBAS DE LABORATORIO</b>	<b>17</b>
<b>2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS</b>	<b>17</b>
2.1.1 Recolección de muestras	18
2.1.2 Análisis granulométrico	20
2.1.3 Propiedades físicas básicas de la muestra	21
2.1.4 Ángulo de reposo del material	21
2.1.5 Propiedades del mezclado agua- sedimento	21
2.1.6 Determinación de los umbrales de movimiento	21
2.1.7 Tamaño y forma de los granos del sedimento	22
2.1.8 Medición experimental de la velocidad de caída	22
2.1.9 Retroalimentación de los modelos teóricos de los umbrales de movimiento y de las propiedades del mezclado agua-sedimento	22
<b>2.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MUESTRAS PARA ENSAYES</b>	<b>23</b>
2.2.1 Criterio estadístico	23
2.2.2 Localización geográfica	24
2.2.3 Zona de extracción de la muestra	26
2.2.4 Geología	26
2.2.5 Muestras Seleccionadas	27

<b>2.3</b>	<b>PRUEBAS DE VELOCIDAD DE CAÍDA</b>	<b>28</b>
2.3.1	Descripción y desarrollo de las pruebas	28
2.3.2	Resultados del análisis fotográfico	29
2.3.3	Resultados de la prueba de velocidad de caída	32
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>35</b>
3.1	RESUMEN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	35
3.1.1	Resultados del D50 de las partículas	35
3.1.2	Análisis de los resultados de la velocidad de caída de las partículas	36
	<i>3.1.2.1 Resultados a partir de la media</i>	<i>37</i>
	<i>3.1.2.2 Resultados a partir de la moda</i>	<i>39</i>
	<i>3.1.2.3 Resultados a partir de la mediana</i>	<i>39</i>
3.2	COMPARACIÓN CON FORMULACIONES EXISTENTES	41
3.2.1	Primer criterio de comparación	42
3.2.2	Segundo criterio de comparación	42
3.2.3	Particularidades de las formulaciones de mejor comportamiento	43
3.3	RECOMENDACIONES	45
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN</b>	<b>47</b>
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>51</b>

## INTRODUCCIÓN

La República Mexicana posee una gran riqueza en cuanto a recursos costeros se refiere, por ejemplo, las playas de la Península de Yucatán son reconocidas a nivel mundial por su belleza y encanto, en las cuales se desarrolla un cúmulo de escenarios que varían desde un ambiente natural prácticamente inexplorado, hasta las actividades turísticas y económicas que son propiamente humanas y en ocasiones mayormente reconocidas, sin dejar de lado la magnificencia de las culturas que se asentaron en la zona dejando testimonio de ello.

Las actividades humanas y el beneficio económico suelen considerarse como elementos más que necesarios para justificar la importancia de un determinado proyecto, estudio o análisis de ingeniería; no obstante, cuando un fenómeno se presenta de manera natural, sin la presencia de la mano humana, es necesario tener en cuenta el impacto que se produce en el ambiente y de éste en las obras que edifica el ser humano. De esta manera, complejos turísticos como lo es Cancún, en el estado de Quintana Roo, se ven afectados por la naturaleza fuertemente, siendo una muestra de ello la erosión de sus playas por el paso del huracán Wilma en agosto de 2005; asimismo, el puerto de Progreso, en el estado de Yucatán, requiere, para llevar a cabo sus labores, de obras de infraestructura y de operación de gran costo que alteran el ambiente en el que se encuentra, como son la misma construcción del puerto para resguardo de las naves y la realización de las operaciones comerciales, obras que se ven afectadas a diario por las fuerzas de la naturaleza.

La elaboración de este trabajo tiene su importancia en la determinación y análisis de la velocidad de caída de los sedimentos costeros, involucrada directamente en el transporte de sedimentos, y que frecuentemente se relaciona con los procesos de sedimentación y erosión implicados en dicho transporte. La velocidad de caída es un componente esencial para la determinación del movimiento de las partículas, y por tanto, es uno de los elementos básicos involucrados en la conformación final de los ambientes costeros, relacionándose para ello con el oleaje, las corrientes, la descarga de ríos, etc.; fenómenos que en conjunto, determinan la morfología de un lugar en específico, su origen y su configuración actual, así como la manera en que las actividades humanas relacionadas a las costas se ven afectadas o beneficiadas por el comportamiento del ambiente.

Si bien es cierto que el ser humano tiene la capacidad de emplear los recursos, transformarlos y aprovecharlos para su propio beneficio, también es cierto que debe entender y conocer el recurso que quiere aprovechar; por ejemplo, el turismo costero, requiere para funcionar, en general, de hermosas playas, de lugares de hospedaje, de un atractivo natural que llame la atención de los turistas, entre otras cosas, motivo por el cual debe entenderse cómo es que las playas se ven afectadas por los fenómenos de erosión y sedimentación, no solo para preservación del medio consistente en el atractivo turístico, sino también en la conservación de la infraestructura creada para tal fin, así como para la protección y conservación de estos lugares. De esta manera, el movimiento del sedimento muestra su importancia primeramente en la manutención y conservación de un ecosistema, en este caso costero, dependiente del transporte de sedimentos, su acumulación, su erosión, etc., así como en la preservación de las obras que se construyen para su aprovechamiento.

El enfoque de este trabajo en sedimentos costeros, no significa que únicamente se puedan aplicar a este ambiente, sino que haya en ríos, en azolves de presas y en tratamiento de aguas una aplicación directa.

## **OBJETIVOS Y ALCANCES**

La observación y la experimentación han promovido la existencia de formulaciones empíricas que surgen en búsqueda de explicar el fenómeno de velocidad de caída, más allá de los límites de la idealización del fenómeno por medio de la Ley de Stokes, motivo que produce cierta incertidumbre al disponerse de un gran número de formulaciones en su aplicación a un lugar en específico.

Así entonces, el objetivo de esta tesis es determinar cuál formulación, de diversas que existen, es la que mejor se apega a la realidad de la velocidad de caída que presentan los sedimentos costeros de la Península de Yucatán, presentando un primer punto de referencia en la caracterización del fenómeno en la región.

Al seleccionar una formulación que represente lo mejor posible al fenómeno de velocidad de caída, se da pie a analizar la morfología de las playas así como los procesos de la dinámica litoral referidos al transporte de sedimentos.

En este trabajo, solamente se trabajó con un conjunto muestral muy pequeño del universo de muestras que se tenían, pues como se mencionó anteriormente, el objetivo es marcar un punto de partida en la caracterización del fenómeno; no obstante, el alcance del trabajo establece una metodología para desarrollar y continuar con dicha labor de caracterización, así como recomendaciones, que tras la experiencia de realizar las pruebas de laboratorio, darán una idea de las razones de los resultados obtenidos, de una forma de análisis, así como de los límites y bondades de aplicar la metodología aquí empleada.

Se espera que se le de una continuidad al trabajo aquí realizado, con la finalidad de aprovechar las muestras extraídas de la zona, y concluir en una verdadera caracterización del transporte de sedimentos en la región.

## **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO**

Este trabajo fue desarrollado de manera tal, que en el capítulo 1, se hace un recorrido por el marco teórico involucrando, en primer término, la definición del lugar de estudio, que en este caso corresponde a la zona litoral, donde se empieza a determinar la relación de ciertos parámetros como morfología de la playa, la relación con el tipo de sedimentos que se pueden encontrar o la transformación del oleaje que se pueden presentar.

Posteriormente, teniendo en mente cuál es el contexto de desarrollo del trabajo, en el mismo capítulo se hace una revisión de aquellos factores que participan en la definición de la velocidad de caída, pasando para ello por las propiedades físicas de los sedimentos y del fluido en el que se mueven; asimismo, se muestra la relación de la velocidad de caída con la

determinación de los umbrales de movimiento de las partículas, la relación con los fondos marinos teóricos así como la suspensión de los sedimentos y el modo de transporte.

El marco teórico concluye con las formulaciones teórica y empíricas de la velocidad de caída, que son el punto de comparación de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y del correspondiente análisis del cual tratan los capítulos 2 y 3 del trabajo, respectivamente.

En el capítulo 2, correspondiente a las pruebas de laboratorio, se detalla en un principio la metodología que se siguió para la caracterización del universo de las muestras, que serviría de base, para con los datos obtenidos, definir una selección de muestras que sería sometida a las pruebas experimentales. El criterio de selección se detalla punto por punto pasando por el criterio estadístico, zona de extracción de la muestra, geológico y de ubicación geográfica. Igualmente la metodología que se empleó para realizar las pruebas experimentales, y los resultados obtenidos a partir de éstas se detallan en esta sección del trabajo.

Con los resultados obtenidos con las pruebas de laboratorio, en el capítulo 3 se señala un resumen de los mismos, tanto de los tamaños de partículas empleadas, como de las velocidades de caída experimentales obtenidas, estableciendo ya un análisis de los datos para poder trabajarlos y compararlos con las formulaciones que se detallaron, como ya se mencionó, en el marco teórico. A partir de las comparaciones entre la velocidad de caída experimental y de las formulaciones consideradas, es como se cumplen los objetivos de este trabajo al puntualizar las ecuaciones que mejor comportamiento presentan en el fenómeno de caída, a fin de definir de una manera práctica, por medio de una formulación existente, la velocidad de caída de los sedimentos costeros de la Península de Yucatán, manejando para ello una sección correspondiente a recomendaciones, que pudieran ser consideradas como punto de referencia para posteriores pruebas de velocidad de caída de la región, así como para la determinación de ésta en términos de rangos de diámetro, forma, y zonificación geográfica.

Finalmente, el último capítulo correspondiente a las conclusiones, es donde se exponen los resultados obtenidos de una manera concisa, además de comentar las limitantes encontradas tras la realización de las pruebas experimentales y de su análisis. Igualmente, se proporciona un panorama de aplicación de la velocidad de caída más allá de sedimentos correspondientes a granos, invitando con ello a un análisis de sedimentos de otro tipo, como son conchas, fragmentos de coral, moluscos que no son poco escasos en la Península de Yucatán. Finalmente, se hace la invitación a continuar con los estudios realizados para determinar con mayor certidumbre los objetivos que en este trabajo se pretendieron alcanzar y ampliarlos, inclusive a otras regiones del país, mejorando el conocimiento de los ambientes costeros y su comportamiento para beneficio mismo del país.

## **LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

La zona de estudio se localiza sobre las costas del norte de la Península de Yucatán, desde la zona aledaña a la ciudad de Progreso en Yucatán hasta Punta Allen, Quintana Roo, esto es, a partir de la longitud 87.4743 °W hasta la 89.8174 °W, y de la latitud 19.7976 °N a la 21.2540 °N, abarcando los estados de Yucatán y Quintana Roo en la República Mexicana.

El estado de Yucatán se localiza al sureste del país y al norte de la península del mismo nombre, colinda al norte con el Golfo de México, al este con el estado de Quintana Roo y al suroeste con el estado de Campeche. El punto más importante y reconocible del estado en cuanto sus costas se refiere, es el puerto de Progreso, con un muelle de 2 km de longitud, que permite el ingreso de embarcaciones de gran calado, permitiendo el desarrollo de las actividades comerciales que la actividad portuaria genera.

Por otra parte, el estado de Quintana Roo se ubica al este de la Península de Yucatán, en la frontera con Centroamérica; colinda con los estados de Yucatán hacia el noroeste y Campeche al oeste; al norte con el Golfo de México; al sur, con Belice y con Guatemala; mientras que las playas al oriente de su territorio son bañadas por las aguas del Mar Caribe.

Con cerca de 865 km de zona de litorales, de los cuales 700 km se desarrollan a lo largo del Mar Caribe, pudiéndose dividir en 5 tramos, abarcando la zona de estudio tres de las 5 zonas que se mencionan:

- 🌀 El primer tramo comprende desde la Isla de Holbox hasta Puerto Morelos donde se presentan características coralinas y se identifican muchos bajos que rodean a las islas; existiendo entradas de mar de poca profundidad que son el efecto del afloramiento de los bancos de coral (ríos de Chacmuchuch, Inglés y de Nizúc). Los accidentes geográficos más notables son las puntas (Arenas, Cancún, Nizúc, Petempich y Tachacté), y las islas (Contoy, Cayo Sucio, Isla Blanca, Isla Mujeres y Cancún) próximas a la zona continental.
- 🌀 La segunda porción se caracteriza por llevar una dirección al suroeste con playas angostas, siendo las puntas Céliz y Maroma los accidentes geográficos más distintivos. A partir de esta isla de Cozumel, se presentan playas de roca caliza, cuyas puntas más notables son Punta Céliz y Playa del Carmen, hasta llegar a Tanca.
- 🌀 El tercer tramo, hacia el sur, presenta una línea continua a lo largo de 35 km hasta las Bahías de Ascensión y del Espíritu Santo, obstruidas por cayos y arrecifes. Es hasta este tramo que queda delimitada la zona de estudio en el Estado de Quintana Roo.
- 🌀 El cuarto tramo, con una longitud de 150 km y sin accidentes considerables, culmina en la boca de Bacalar Chico, al final de una península, en el límite de cayo Ambergris, que ya pertenece a Belice.
- 🌀 El quinto y último tramo corresponde a las costas del noreste, norte y este de la bahía de Chetumal. De escasa profundidad y poblada de bajos, ésta se conecta, por la bahía de San José con la Laguna de Bacalar, de 40 km de longitud por 2 de ancho, que a su vez está comunicada con el río Hondo por el canal de Chac.

De las costas aquí mencionadas se recolectaron 142 muestras, cuya ubicación más precisa se detalla en el trabajo, en la Figura 2.1. En dicha figura se muestra la amplitud de la zona de estudio, abarcando gran parte de las costas de la Península de Yucatán, requiriéndose además, un análisis del tipo bibliográfico de la geología de la zona con el fin de determinar los orígenes de los sedimentos que se encontraron en la zona y con ello, generar un panorama del contexto de los sedimentos.

## **CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO**

Para poder entender de una manera sencilla el tipo de sedimento que se puede encontrar en la zona de estudio, se hace a continuación una descripción breve de la geología histórica que ha acontecido en la región y que es la causante de la presencia de los sedimentos que existen actualmente en la Península de Yucatán. La presencia de los arrecifes de coral, la presencia de conjuntos de moluscos, y la presencia especialmente de material proveniente de la caliza, constituyen los materiales de los que está formado el sedimento que es analizado en esta tesis.

El estudio de la geología de la región (López, 1983 y Cartas Geológico- Mineras F16-, F16-8 y F16-11 del SGM) remonta los orígenes de la Península hacia el Paleozoico, ya en un contexto como se le conoce en forma de plataforma, donde ésta permanece emergida hasta el Triásico Jurásico. Posteriormente, hacia el Cretácico Superior y parte del Terciario, al norte de la Península, se presenta un período margoso (predominio de la marga, un tipo de roca sedimentaria compuesta principalmente de caliza), indicándose además una profundización de los mares en este sentido.

Hacia el Terciario Medio y Superior, aparece la Península de Yucatán como una plataforma sumergida con oscilaciones a baja profundidad, y en la que predominantemente se han depositado calizas litorales y neríticas, material que hasta nuestros días forma parte importante de los sedimentos que se pueden encontrar en la Península.

Al final del Plioceno y Cuaternario, la Península adquiere su forma actual, desarrollándose grandes alineamientos de arrecifes de tipo biostromal (formado por acumulación de capas), constituidos esencialmente de material calcáreo. Inmediata a la costa actual, se formó una franja paralela de varios kilómetros de ancho donde aparecen grandes conjuntos de moluscos.

La unidad geológica más antigua expuesta es la Formación Carrillo Puerto, compuesta por una secuencia de caliza y coquina, llegando a encontrarse en algunos puntos costeros de la Península; sin embargo, la unidad anterior se encuentra cubierta por depósitos cuaternarios de diferentes orígenes, el primero de ellos, arenisca poco consolidada constituida por calcita y ostras, que afloran aisladamente paralelamente a la costa del Mar Caribe, entre Cancún e Islas mujeres. Igualmente, se tienen depósitos palustres constituidos por limos y arcilla con materia orgánica a lo largo de la costa del Golfo de México, así como depósitos de litoral constituidos por arena blanca, compuesta principalmente de fragmentos subredondeados a arredondeados de ostras y gasterópodos (oolitas), observándose éstos en las franjas costeras del Mar Caribe y del Golfo de México.

Con esto, se puede observar que los elementos que dan origen a los sedimentos, además de ubicarse en un contexto donde la escala de tiempo es humana, dicha escala se transforma y se amplía abarcando millones de años, involucrándose todos los elementos de sedimentación y erosión como eslabones de una gran cadena de eventos que dan como resultado la apariencia que conocemos de la Península de Yucatán, tanto de la zona continental que alguna vez fue un ambiente costero y marino, como de la costa actual, sujeta a la erosión, sedimentación y al transporte de sedimentos que son el objeto al que hace referencia este trabajo y que se desarrolla en los capítulos que lo componen.

## 1. MARCO TEÓRICO

Para poder entender las modificaciones que sufre la zona costera, es importante entender procesos como el transporte de sedimentos y los diversos parámetros que lo integran; un factor relevante en la cuantificación del sedimento es el relacionado a la velocidad de caída que desarrollan los sedimentos en el agua, es por ello, importante aclarar los puntos básicos que rodean al fenómeno.

El transporte de sedimentos se encuentra fundamentado en leyes físicas que intentan explicarlo mediante el análisis de diversas propiedades de los elementos que participan en éste, como lo es el sedimento que se desplaza por el agua. Es por ello, que se hace en este capítulo una revisión de las propiedades básicas de estos últimos, del sedimento, del agua y de la mezcla sedimento- agua, con el objeto de entender el cómo se involucran dichas propiedades en el análisis de los umbrales del movimiento de las partículas, para finalmente concluir en la velocidad de caída, que es el fenómeno que atañe a este trabajo.

Para el trabajo que se presenta, el ambiente de análisis corresponde principalmente a las costas o sistemas litorales.

### 1.1 PARTES DE LA PLAYA

La playa suele definirse como el conjunto de sedimentos no consolidados que se depositan desde la línea de bajamar hasta algún cambio fisiográfico importante; por ejemplo, una zona de dunas o simplemente hasta la zona terrestre donde crece la capa vegetal permanente. Sin embargo, la definición anterior solamente describe lo que es la parte de la playa seca de una costa. La mayoría de los procesos de transporte de sedimentos, erosión y depositación, ocurren en la porción que queda sumergida en el agua, por lo que un mejor término a emplear es el de “litoral”, que abarca tanto la zona sumergida en el mar como la zona seca, y de manera más general, el término “costa” que incluye además zonas tierra adentro como los estuarios, campos de dunas, etc. El término playa es usado como sinónimo de la zona litoral, que es la forma con la que se le tratará en este trabajo.

Las transformaciones del oleaje que se desarrollan en la zona cerca de la costa (*nearshore*), delimitan tres zonas de acuerdo a la transformación por la cual está atravesando el oleaje: zona de rompientes (*breaker zone*), zona de disipación (*surf zone*), zona de lavado (*swash zone*). Dichas transformaciones a su vez se desarrollan a lo largo del perfil de la playa, el cual se caracteriza de cuatro partes: zona sumergida (*offshore*), zona de playa activa (*inshore*), zona intermareal (*foreshore*), zona supramareal (*backshore*). Entre el oleaje y el perfil de la playa existe una interacción tal, que generalmente es empleada para describir la morfología de la playa resultante, cerca de la costa.

#### 1.1.1 Transformaciones del oleaje en la zona costera

En las zonas donde se desarrollan los procesos de transformación del oleaje, y que se muestran en la Figura 1.1, se puede observar la distribución de éstos a lo largo del perfil de la playa dentro de la región de *nearshore*, la cual inicia a partir de la línea de costa y se extiende

hasta el punto donde las olas comienzan a ser inestables y rompen; punto a partir del cual y hacia mar adentro se denomina con el nombre de *offshore* o zona sumergida.

De los elementos que conforman a la región *nearshore*, su definición es la que se muestra a continuación:

- 🌀 *Zona de rompientes o breaker zone*.- zona en donde las olas que llegan de la región alejada de la costa (*offshore*) se hacen inestables por el fenómeno de someramiento, por lo que empiezan a romper.
- 🌀 *Zona de disipación o surf zone*.- zona donde se produce una superficie espumosa y con oleaje rompiente. Se ubica a partir de las rompientes internas con dirección hacia la costa, hasta llegar a la zona de lavado (*swash zone*).
- 🌀 *Zona de lavado o swash zone*.- zona donde el agua avanza y retrocede sobre la cara de la playa, cubriéndola alternativamente, siendo ésta la zona de la playa mojada pero no sumergida en el agua.

La variación en cuanto a la presencia de dichas zonas está en función de la pendiente del perfil de la playa, de la longitud de desarrollo de cada zona, o de los cambios en el nivel del mar (mareas), con lo cual se muestra la relación de estas zonas con las que se encuentran en el perfil de la playa.

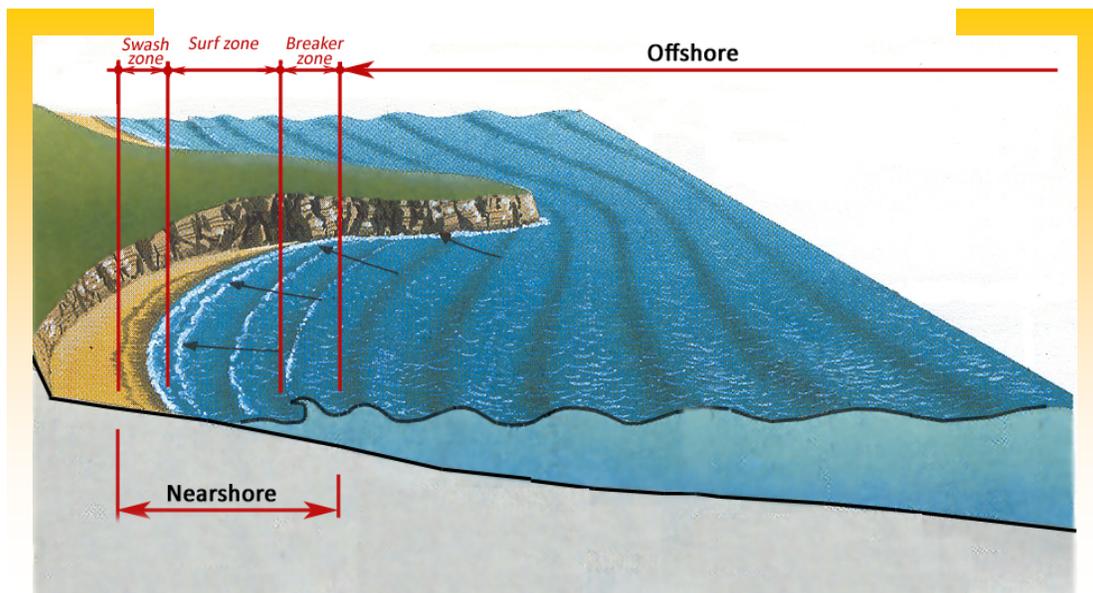


Figura 1.1 Zonas en las que se divide la región cercana a la costa, conforme al comportamiento del oleaje (imagen modificada de Atlas Universal de Reader's Digest®).

### 1.1.2 Perfil de una playa

Otra parte importante para poder entender el comportamiento de las playas, es tener conciencia de cómo se compone el perfil de la playa. Los límites de dicho perfil se enmarcan en la definición de playa como sinónimo de litoral, donde un cambio fisiográfico en la playa seca como dunas de arena, acantilados, o el inicio de la vegetación permanente, constituyen el límite en tierra de dicho perfil, no encontrándose límite hacia mar adentro.

Las partes que constituyen al perfil se muestran gráficamente en la Figura 1.2, en la que se pueden distinguir la similitud del perfil desarrollado y la zona de oleaje que le correspondería. Las definiciones de los elementos que componen el perfil de la playa son lo que a continuación se enuncian:

- ☞ *Zona supramareal o backshore*.- zona que se extiende hacia tierra adentro, a partir de la cresta de una berma o en su defecto, del límite que marca la línea de la pleamar, y hasta el límite del cambio fisiográfico o la presencia de la vegetación permanente; a esta zona también se le conoce como zona de la playa seca, o berma.
- ☞ *Zona intermareal o foreshore*.- zona comprendida a partir de la cresta de la berma, o de la línea de marea alta, hasta la marca de agua más baja dejada por la bajamar. A esta zona también se le llama zona de estrán de la playa, o igualmente empleado como sinónimo de cara de la playa, aunque la zona implica una porción por debajo de la cara de la playa.
- ☞ *Playa activa o inshore*.- zona que se extiende a partir de la zona de estrán de la playa, hacia mar adentro hasta llegar a la zona donde inicia el rompimiento de las olas (*breaker zone*).

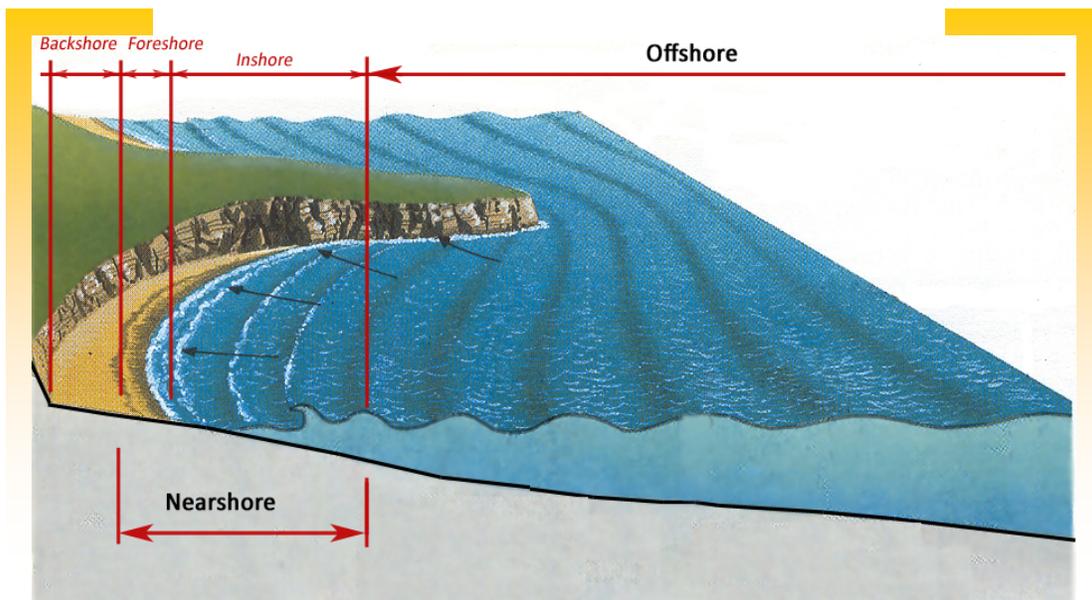


Figura 1.2 Zonas en las que se divide el perfil de una playa (imagen modificada de Atlas Universal de Reader's Digest®).

Los diferentes perfiles que se desarrollan en la playa inducen el comportamiento de los patrones del oleaje cercano a la costa, impactando éstos a su vez en la configuración del perfil. De acuerdo a las características que se observen en la playa, se puede tener (según Wright y Short), dos tipos de playa y un pseudo tercero, que combinan las condiciones del perfil de la playa con los agentes de oleaje y corrientes, los cuales a su vez se relacionan íntimamente con el tamaño y carácter de los sedimentos, de la pendiente de la playa así como del tipo de material disponible para la formación de la misma.

Así, se tiene entonces que una longitud amplia para el desarrollo de la zona de disipación, está asociada a una baja pendiente del perfil y esto a su vez a una composición de arenas finas, conociendo a este tipo de playa como “disipativas”, ya que en la longitud de

desarrollo se disipa la energía con la que llegó la ola de la zona sumergida. Por el otro lado, cuando la pendiente es fuerte, los sedimentos que se pueden encontrar son de tamaño grueso, y la longitud de desarrollo de la zona de rompientes prácticamente no existe, por lo que las olas rompen muy cerca de la línea de costa sin una importante pérdida de energía, reflejándose nuevamente hacia el mar, de ahí que a este tipo de playas se les denomine “reflectivas o reflejantes”.

Un pseudo tercer tipo de playas conocidas como “intermedias”, se caracterizan por arenas finas a medias, con presencia característica de barras o barrera de arrecifes. La relación que existe entre la pendiente de la playa y el tipo de sedimento que se puede encontrar está relacionado con el ángulo de reposo del material pues para pendientes fuertes, el material es grueso al poseer éste un valor de ángulo de reposo alto, mientras que para pendientes suaves, el material que se encuentra es fino con un ángulo de reposo igualmente bajo.

## **1.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

El transporte de sedimentos es un fenómeno constituido por la erosión, el depósito y por el transporte de las partículas sólidas, las cuales se depositan o precipitan en un fluido. El origen de los materiales que conforman la zona litoral se debe al transporte de los sedimentos ya sea desde la zona sumergida o desde tierra adentro, siendo los fenómenos de sedimentación y erosión los puntos inicial y final del transporte de sedimentos. De manera general, las playas que surgen por erosión del relieve costero tienden a poseer materiales inorgánicos; sin embargo, en playas ubicadas en latitudes tropicales el material que las conforma puede estar compuesto de conchas y fragmentos de coral, que es el caso de los sedimentos costeros de la península de Yucatán.

Los fenómenos mencionados pueden ser descritos esencialmente por las leyes físicas que actúan sobre ellos; la participación de la fuerza de gravedad, la fuerza de arrastre, el principio de Arquímedes y los parámetros de viscosidad del fluido, diámetro, densidad y forma de la partícula, son las variables consideradas en el inicio del movimiento de las partículas en su transporte. Para poder determinar dichas fuerzas, se requiere conocer las propiedades físicas tanto del fluido por el cual se transporta el sedimento, como del sedimento que es transportado; es por ello, que en seguida se muestran las propiedades básicas de los elementos que participan en el transporte de sedimentos.

### **1.2.1 Propiedades físicas del agua**

Es conveniente analizar las propiedades físicas del agua ya que juegan un papel importante tanto en la sedimentación como en el transporte de sedimentos, por ser justamente el medio por el cual se llevan a cabo los fenómenos citados. Las principales propiedades del agua que llegan a influir son: la densidad del fluido ( $\rho_w$ ), el peso específico ( $\gamma_w$ ) y la viscosidad dinámica ( $\mu$ ), relacionada esta última directamente con la viscosidad cinemática ( $\nu$ ).

La densidad del fluido se considera como la unidad de masa que cabe por unidad de volumen. Esta densidad varía ligeramente de acuerdo a la temperatura a la que se encuentra el fluido, que para los rangos de temperatura en que se hicieron las pruebas de velocidad, dicho cambio no es significativo, por lo que se maneja el valor habitual de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

El peso específico se define como el peso de material por unidad de volumen, tomando un valor habitual de  $9810 \text{ N/m}^2$ . El peso específico se obtiene matemáticamente de multiplicar la densidad por la gravedad del sitio, es por ello que al depender de la densidad sufre una pequeña variación debido a la temperatura.

Por otra parte, al aplicar un esfuerzo tangencial a un fluido, éste opone una resistencia al esfuerzo, reflejándose en una deformación; el esfuerzo tangencial que se le aplica es proporcional a la velocidad de deformación del fluido multiplicado por la constante de proporcionalidad, que corresponde justamente a la viscosidad dinámica y cuyas unidades son  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ . El valor de la viscosidad dinámica disminuye conforme la temperatura aumenta. Si la viscosidad dinámica se le divide por la densidad del fluido, lo que se obtiene es la viscosidad cinemática, que varía de manera similar a como lo hace la viscosidad dinámica. La viscosidad cinemática es más frecuentemente empleada en la formulaciones para determinar la velocidad de caída, las unidades en que se expresa son  $\text{m}^2/\text{s}$ .

### 1.2.2 Propiedades físicas de los sedimentos

Respecto a las propiedades físicas de los sedimentos se toma en consideración, igualmente que en las propiedades del agua, la densidad de las partículas y el peso específico, pero aunado a lo anterior se tiene el peso específico sumergido, la gravedad específica, el tamaño del sedimento, y el factor de forma de la partícula.

En cuanto a la densidad del sedimento, ésta se denota como  $\rho_s$ , su valor no se ve influenciado por la temperatura en la medida en que lo es con el agua. Valores típicos para arenas rondan un rango de densidades que va desde los  $2400$  a los  $2800 \text{ kg/m}^3$ , siendo un valor típico el de  $2700 \text{ kg/m}^3$ . El peso específico de los sedimentos se mide de igual manera que para el caso del agua, denotándose para este caso como  $\gamma_s$ .

A partir del peso específico del material y el del agua, se puede determinar lo que se denomina con el nombre de peso específico sumergido de la partícula ( $\gamma_s'$ ) que no es más que la diferencia del peso específico del sedimento menos el peso específico del agua ( $\gamma_s' = \gamma_s - \gamma_w$ ). Este parámetro se obtiene en conformidad al principio de flotación de Arquímedes el cual establece que todo cuerpo sumergido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso del volumen de líquido desplazado, que en el caso de las partículas que se sedimentan es un principio que cobra importancia al encontrarse sumergidas en el agua.

De igual forma, existe una propiedad que toma en consideración la relación existente entre la densidad del sedimento y la densidad del agua, conociéndose a este parámetro como gravedad específica ( $G$ ). A la gravedad específica se le puede nombrar también como peso específico relativo, con la diferencia de que ocupa la relación entre el peso específico de la partícula y el correspondiente al agua, obteniéndose el mismo resultado al simplificarse el valor de la gravedad al realizar la división entre los pesos específicos.

Una propiedad física básica de la partícula es su tamaño, cuya determinación se puede hacer por diversos métodos. Un método empleado en las formulaciones de velocidad de caída es la valoración del diámetro nominal que está referido al diámetro que tendría una esfera del mismo volumen de la partícula, usualmente se obtiene de medir el volumen de agua desalojado

tras sumergir la partícula. Existe otro método para determinar el tamaño de las partículas, el cual se logra midiendo la velocidad de sedimentación de una partícula en agua a 24°C con una gravedad específica determinada, siendo el tamaño de la partícula determinado como el diámetro que correspondería a una esfera con la misma gravedad específica cayendo a la misma velocidad de sedimentación; a este diámetro se le conoce como diámetro de caída.

Sin embargo, las dos opciones anteriores para determinar el tamaño de la partícula resultan poco prácticas al momento de tener una mezcla de sedimentos o cuando los tamaños de las partículas son muy pequeños, por lo tanto, se suele recurrir a la determinación indirecta del diámetro de la partícula por medio del diámetro de malla que es la mínima abertura de la malla a través de la cual la partícula pasará. El análisis granulométrico de un material a través de las mallas, proporciona como resultado una curva granulométrica que muestra la distribución acumulada del material a través de su paso por las distintas mallas. A partir de esta distribución es que se encuentra el punto por el que ha pasado o ha sido retenido el 50% del material en peso, al cual se le denomina  $D_{50}$ , y que es muy empleado en las formulaciones para determinar la velocidad de caída de una partícula, esto es gracias a la facilidad de determinar este punto al interpolar la curva granulométrica y de que las muestras que se pueden recolectar de un sitio no constituyen partículas de un solo tamaño. Los inconvenientes de este método es que no considera irregularidades, forma de la partícula, incertidumbres en la correcta abertura de la malla y pérdida de parte del material en el proceso; pese a los problemas que intervienen en este método, su practicidad lo hace un método muy empleado para caracterizar el tamaño de las partículas en una mezcla de sedimentos.

Para la caracterización de los tamaños del sedimento, se recurre a la nomenclatura del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la clasificación de Wentworth o la clasificación de la *American Society for Testing Materials* (ASTM).

Por último, el factor de forma determina la forma de los sedimentos por medio de la medición de sus ejes ortogonales más largo ( $l_a$ ), intermedio ( $l_b$ ), y más corto ( $l_c$ ). El factor de forma puede ser determinado por medio de la siguiente expresión  $Co = l_c / \sqrt{l_a l_b}$ , donde Co es el factor de forma de Corey (CSF).

### **1.2.3 Propiedades de la mezcla de sedimentos**

Existen otras propiedades físicas relacionadas con la mezcla de sedimentos, y cuya implicación está relacionada con la obtención de las muestras y su caracterización como conjunto de partículas. En este sentido se señalan las siguientes propiedades: porosidad, relación de vacíos, ángulo de reposo, peso específico seco, masa específica seca.

La porosidad ( $n$ ), es la medición del volumen de los espacios vacíos con respecto al volumen total de la muestra,  $n = V_v / V$ ; mientras que la relación de vacíos ( $e$ ) es la relación que existe entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos de la muestra,  $e = V_v / V_s$ . Es necesario tener en mente, que el volumen de vacíos es el correspondiente al volumen de aire más el volumen de agua contenido en la muestra, el total del volumen de la muestra es la suma del volumen de vacíos más el volumen de sólidos.

En cuanto al ángulo de reposo, éste es importante en cuanto a la pendiente que se presenta en los perfiles, ya que es el límite para inicio del movimiento sobre esta pendiente correspondiente al acomodo natural del material, siendo una de las variables que afectan la forma del fondo marino. El ángulo de reposo se determina como el ángulo descrito entre la horizontal y el ángulo en el que la partícula se encuentra al límite del equilibrio para iniciar su rodamiento sobre el plano de inclinación.

Respecto al peso específico de la mezcla de sedimentos, es el peso de sólidos dividido entre el volumen de la mezcla incluyendo los sólidos y los vacíos; mientras que la masa específica seca es la masa de sólidos entre el volumen de la mezcla.

Las propiedades de las partículas y de las mezclas de éstos, se combinan para dar origen a los parámetros que influyen en el análisis de la velocidad de caída de las partículas y con ello a la velocidad de sedimentación, lo cual se plasma directamente en las formulaciones que se presentan en la sección 1.4.1.2.

### 1.3 PROPIEDADES DEL MEZCLADO AGUA- SEDIMENTO

Las propiedades de mezclado agua - sedimento hacen la consideración de que todos los espacios vacíos del suelo están ocupados en su totalidad por agua, que es el caso que ocurre con los suelos que se encuentran sumergidos en el agua. El análisis de las propiedades de esta mezcla es muy similar a la realizada para el caso de mezclas de sedimentos; sin embargo, la porosidad del material y la relación de vacíos juegan un papel importante en este mezclado.

Para obtener el peso específico del mezclado se obtiene como el peso de los sólidos y del agua por unidad de volumen y que se puede expresar en términos de la porosidad del material como se muestra en la ecuación 1.1.

$$\gamma_m = \gamma_s(1-n) + \gamma_w n \quad \dots(1.1)$$

Por otro lado, el volumen de la concentración del sedimento puede ser expresado de diferentes maneras, pero se encuentra definido de una manera sencilla como el volumen de sólidos entre el total del volumen del mezclado ( $C = V_s / V$ ). Es una propiedad adimensional, que puede estimarse por medio de la definición, o empleando la relación de vacíos o la porosidad (ecuación 1.2). Este dato generalmente se emplea como una propiedad del sedimento en suspensión, más que de la sedimentación.

$$C = 1/(1+e), C = 1-n \quad \dots(1.2)$$

Mientras tanto, la masa específica de la mezcla sedimento- agua se determina como el total de la masa de sólidos y de agua ocupando los vacíos, entre el volumen total de la mezcla. De nueva cuenta esta propiedad se puede escribir en función de la porosidad.

$$\rho_m = \rho_s(1-n) + \rho_w n \quad \dots(1.3)$$

Otra propiedad, es la permeabilidad, que es la capacidad que posee el material para ser traspasado por un fluido sin alterar su estructura interna. La permeabilidad específica del material puede medirse en función del  $D_{50}$  de la partícula como  $k_p = 0.011(d_{50})^2$ , donde  $k_p$  es la permeabilidad específica en  $m^2$ . A partir de la permeabilidad específica se puede calcular el coeficiente de permeabilidad por medio de la relación que guardan: el coeficiente de permeabilidad es proporcional al producto de la aceleración de la masa por la permeabilidad específica e inversa a la viscosidad cinemática del fluido.

El gradiente de presión que se requiere para que la arena se empiece a comportar como un fluido se determina con la expresión que se presenta a continuación, donde el término del lado izquierdo de la ecuación representa dicho gradiente:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{wf} = g(\rho_s - \rho)(1-n) \quad \dots(1.4)$$

Finalmente, de las propiedades del mezclado agua sedimento, se tiene una propiedad muy importante para determinadas aplicaciones y que corresponde a la velocidad mínima para alcanzar la licuefacción. La licuefacción es el cambio de comportamiento del suelo de algo sólido a un pseudo líquido, haciendo inestables la cimentación de las obras que se construyan sobre el suelo al momento de ocurrir el fenómeno. Previo al cálculo de la velocidad de licuefacción ( $W_{mf}$ ) es necesario determinar el factor de Yalin ( $D_*$ ) o parámetro adimensional de la partícula que se representa como sigue:

$$D_* = \left[ \frac{g \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)}{\nu^2} \right]^{1/3} d_{50} \rightarrow W_{mf} = \frac{\nu}{d_{50}} \left[ \left( 10.36^2 + 1.049n^{4.7} D_*^3 \right)^{0.5} - 10.36 \right] \quad \dots(1.5)$$

Cabe señalar que el factor de Yalin es empleado en varias de las formulaciones de velocidad de caída, ya que éste se encuentra en función del tamaño de la partícula, la viscosidad cinemática del agua así como el peso específico sumergido relativo del material que se está trabajando.

#### 1.4 UMBRALES DEL MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS

En la determinación de los umbrales de movimiento lo que se ha hecho de manera tradicional es realizar un conjunto de experimentos, los cuales al ser representados gráficamente en un arreglo de los ejes con las variables, se genera una curva la cual separa las condiciones en las que se establece el movimiento y las condiciones en las que no. Uno de los trabajos más representativos en este aspecto ha sido el trabajo de Shields realizado en el año de 1936, quien tras realizar experimentos en un canal angosto sobre el que se encontraba una cama de sedimentos y se le hacía pasar el agua, pudo representar gráficamente el inicio del movimiento de la partícula de una manera adimensional y general. Es importante tener en mente el concepto de esfuerzo cortante crítico que es el esfuerzo cortante requerido para que

los sedimentos del material de la cama inicien su movimiento, pues es el punto a partir del cual la partícula inicia su movimiento o no.

En la gráfica de inicio del movimiento de la partícula, Shields representó la curva que delimita el estado de movimiento y de no movimiento de las partículas, colocando en el eje de las ordenadas el llamado parámetro de Shields ( $\theta_c$ ), adimensional, el cual resulta de dividir el esfuerzo cortante crítico ( $\tau_b$ ) entre el peso específico sumergido ( $\gamma'$ ) y el diámetro nominal de la partícula ( $d$ ); sin embargo, el esfuerzo cortante crítico suele expresarse en términos de la velocidad de cortante crítica ( $(u_*)_c$ ), que es una forma de escribir el esfuerzo cortante en función de la velocidad.

$$\theta_c = \tau_c / (\gamma' d) = (u_*)_c^2 / g(G-1)d, \text{ donde } (u_*)_c = \sqrt{\tau_c / \rho} \quad \dots(1.6)$$

Por otro lado, en el eje de las abscisas se coloca el número de Reynolds crítico adimensional, que a diferencia del número de Reynolds tradicional, en lugar de emplear la velocidad normal, emplea la velocidad de cortante crítica ya mencionada, por lo que se tendría lo siguiente:

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (Re_*)_c = \frac{(u_*)_c d}{\nu} \quad \dots(1.7)$$

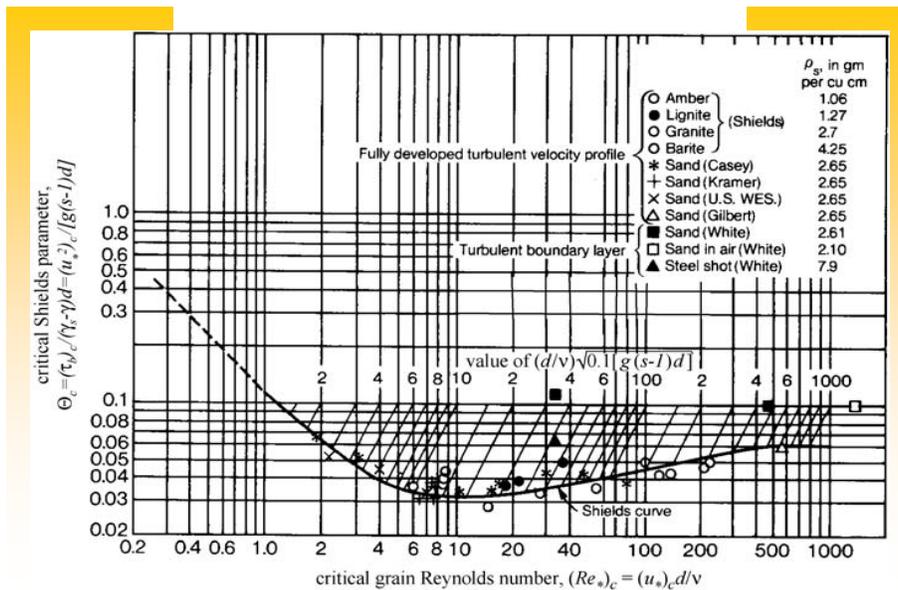


Figura 1.3 Diagrama de Shields, adaptado por la ASCE Sedimentation Engineering, 1975, obtenido de Southarn, 2006.

En la Figura 1.3, se muestra el llamado diagrama de Shields, en el que se define la curva de Shields, la cual surge a partir de datos experimentales, delimitando la región de no movimiento, por debajo de ella, y la región de movimiento, por encima de ella. Esta curva ha sido ampliamente utilizada como referencia para analizar los umbrales de movimiento de la partícula, aunque cabe mencionar, no es la única referencia con la que se cuenta para ello.

Diversos investigadores han tratado de reproducir experimentalmente las condiciones para el inicio del movimiento de la partícula, pero empleando para ello otros parámetros adimensionales, especialmente en el eje de las abscisas, para no depender en ambos ejes de la velocidad de corte crítica; es por ello que Madsen y Grant, 1976, emplearon en el diagrama de Shields, en vez del número de Reynolds crítico, el parámetro adimensional sedimento - fluido ( $S_*$ ), que queda definido a partir de la viscosidad cinemática del fluido, del diámetro nominal, de la gravedad específica, y de la gravedad.

El factor de Shields crítico puede obtenerse entonces como función directa del parámetro adimensional sedimento - fluido, a través de la aproximación que se muestra en seguida (ejemplificado en Ruíz y Silva, 2007), con lo que se puede determinar de manera analítica si una partícula inicia o no su movimiento tras hacer la comparación de su posición en el diagrama modificado con respecto a la curva  $F(S_*, \theta_c)$ :

$$S_* = \frac{d\sqrt{(G-1)gd}}{4\nu} \rightarrow \begin{aligned} x &= \log_{10}(S_*) \\ \theta &= 0.002235x^5 - 0.06043x^4 + 0.20307x^3 + 0.054252x^2 - 0.6364x - 1.03167 \\ \theta_c &= 10^\theta \end{aligned} \quad \dots(1.8)$$

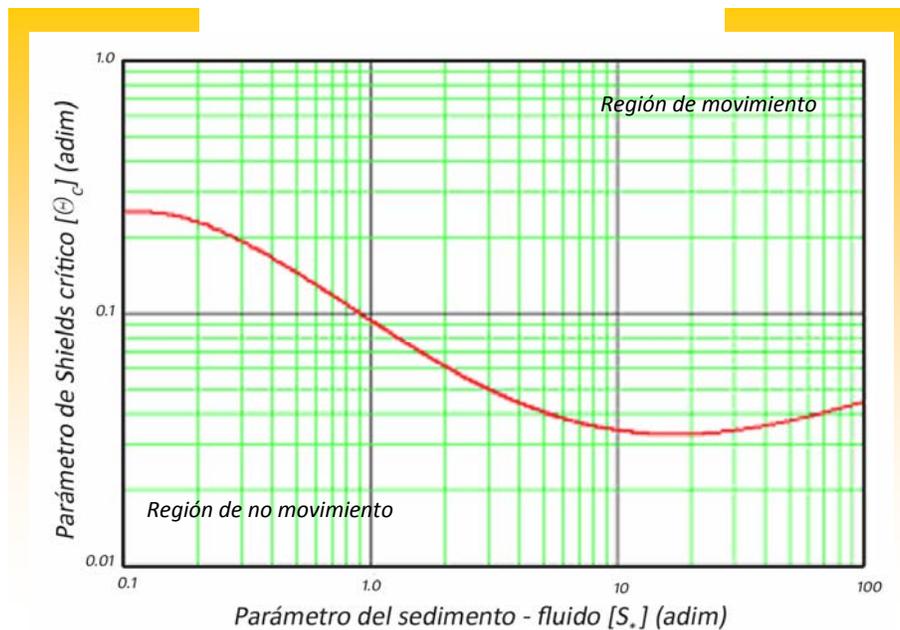


Figura 1.4 Diagrama de Shields modificado (Madsen y Grant, 1976), construido a partir de la curva  $F(S_*, \theta_c)$ , descrita en el texto.

Igualmente, existen representaciones del diagrama de Shields, donde en vez de emplear el número de Reynolds crítico, se emplea el parámetro adimensional de la partícula o parámetro de Yalin ( $D_*$ ), lográndose el mismo objetivo que con el parámetro adimensional sedimento - fluido.

Con la facilidad de obtener los elementos que intervienen en el parámetro sedimento - partícula, el empleo del diagrama de Shields modificado resulta más práctico que el manejo del

diagrama original, pues al obtener de manera directa el parámetro adimensional de Shields, se puede calcular, sin la necesidad de realizar iteraciones como sucede con el diagrama original, la velocidad de cortante crítica y con ésta el esfuerzo cortante crítico al que se ven sujetas las partículas para iniciar su movimiento.

Obtenida la velocidad de cortante crítico, se puede determinar sin problemas el número de Reynolds a partir de la ecuación 1.7, este número se emplea para determinar de una forma teórica la configuración del fondo marino: en forma de ripples, dunas, o fondo plano.

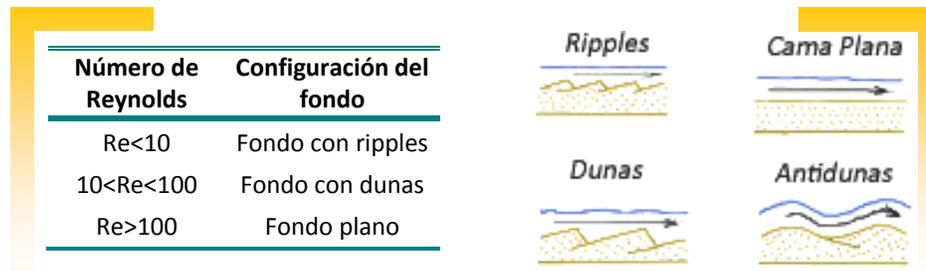


Figura 1.5 Tabla con las distintas configuraciones del fondo (CEM- Coastal Sediment Properties, USACE), e imágenes mostrando dichas configuraciones.

El índice de flotación de Arquímedes queda descrito en la ecuación 1.9, en la que se toma en cuenta el factor de Yalin de la ecuación 1.5. Por medio del índice de flotación es posible clasificar el tipo de flujo, mostrándose en la tabla 1.1 los tipos de flujo asociados al índice de flotación de Arquímedes.

$$A = (D_s)^3 \dots(1.9)$$

El efecto de la turbulencia del flujo en la velocidad de caída es relevante, ya que las variaciones de la trayectoria debidas a las turbulencias del flujo ocasionan que la velocidad de caída no sea constante y se encuentre variando, condición que no ocurre en flujos laminares.

Tabla 1.1 Clasificación del flujo en función del índice de flotación de Arquímedes (Ahrens, 2003)

Índice de flotación de Arquímedes	Tipo de flujo
A < 39	Flujo laminar
39 < A < 10000	Flujo transitorio
A > 10000	Flujo turbulento

El parámetro de Rouse es empleado para estimar la condición en que se está movilizand las partículas, es decir, el modo de transporte de la partícula, que puede ser: arrastre o rodamiento, saltación o reptación, suspensión y suspensión sin transporte. Dicho parámetro se determina con la expresión mostrada en 1.10 donde  $\gamma_d$  es un factor aproximado con 1, obtenido de la diferencia entre la difusión del fluido donde se encuentra la partícula y la partícula,  $k$  es la constante de Von Karmán (0.4 para agua limpia), y  $W_f$  es la velocidad de caída de la partícula en m/s. En la Figura 1.6 se muestra los rangos de movimiento del sedimento.

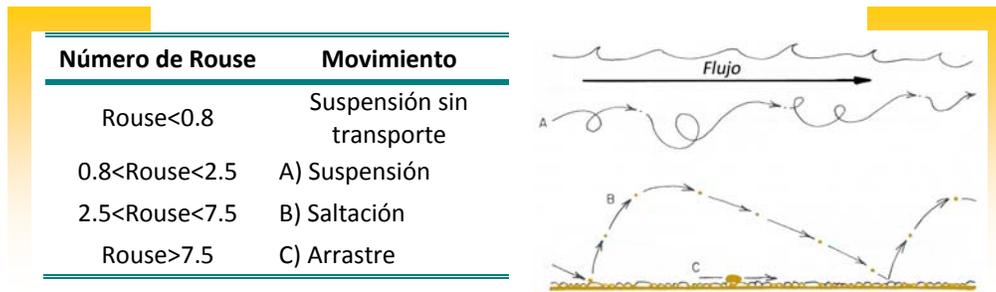


Figura 1.6 Tabla de rangos de movimiento y esquema donde se señala la forma en que se produce el movimiento (Sellev, 2000)

Por último, relacionado con la velocidad de caída de los sedimentos, se encuentra el criterio de suspensión de Bagnold (ecuación 1.11), que determina cuándo puede llegar a considerarse transporte en suspensión. Esto último es muy importante, ya que a partir de ello se puede determinar el inicio del transporte de los sedimentos por suspensión. Dicho criterio depende de la velocidad de cortante crítica de la ecuación 1.6 y de la velocidad de caída  $W_f$ , la cual se desarrolla de manera especial en las siguientes secciones.

$$Rouse = \frac{W_f}{\gamma_d (u_* )_c k} \quad \dots(1.10)$$

$$P_b = \frac{(u_* )_c}{W_f} \quad \dots(1.11)$$

Definidos los umbrales para que se produzca el movimiento de las partículas, queda claro que la relación que se establece con la velocidad de caída es muy importante, pues va directamente ligada hacia el transporte de sedimentos, el esfuerzo cortante crítico para iniciar el movimiento marca el punto en que las partículas se empiezan a mover, quedando definida dicha forma de movimiento en función de la velocidad de caída, y las formas en que se produce dicho movimiento, así como para definir el criterio de inicio del transporte de sedimentos. Así mismo, la velocidad de caída, como participante en el transporte de sedimentos, se involucra de manera más directa en el fenómeno de sedimentación, sin que esto quiera decir que no se involucre a lo largo del desarrollo del transporte de las partículas.

#### 1.4.1 Sedimentación de la partícula

Cuando una partícula se deja caer con velocidad inicial cero desde la superficie del agua, ésta alcanza una velocidad constante debido al equilibrio entre las fuerzas antes mencionadas, siendo precisamente a dicha velocidad a la que se denomina como velocidad de caída.

La velocidad de caída está directamente asociada a la sedimentación de las partículas, la cual es un fenómeno que se puede explicar por medio de leyes físicas básicas, y del equilibrio que existe entre estas; de este modo, las fuerzas que intervienen son: la fuerza de arrastre, el peso propio de la partícula bajo la acción de la gravedad, así como el empuje de Arquímedes por encontrarse la partícula sumergida. En las siguientes secciones se detalla cómo es la interacción de las fuerzas y las formulaciones que se han obtenido para describir la velocidad de caída.

### 1.4.1.1 La Ley de Stokes

La Ley de Stokes constituye la base de todas las formulaciones que se han creado para determinar la velocidad de caída de los sedimentos, y poder obtener una parte de los datos que se requieren para describir el transporte de sedimentos. Esta ley describe el movimiento vertical de una esfera en un fluido viscoso bajo régimen laminar, motivo por el cual se hace una revisión de esta ley, especialmente, para observar los elementos que se ven involucrados en la velocidad de caída; para ello se recurre a un análisis dimensional ya que es una forma muy simple de analizar la velocidad de caída.

La primera consideración que se hace para realizar este análisis es que la forma de la partícula es esférica. Para determinar la fuerza de arrastre que actúa sobre la partícula es necesario establecer las variables que intervienen en esta fuerza: velocidad de caída, diámetro nominal de la partícula, densidad del fluido, viscosidad del fluido.

$$F_D = \mathbb{F}(u, d_s, \rho, \mu) \quad \dots(1.12)$$

Una vez determinados las variables, se escriben éstas en términos de las dimensiones fundamentales y se selecciona aquellas que contengan las dimensiones de la fuerza de arrastre, y aquellas que sean dependientes a partir de las otras variables no se seleccionan.

$$\left. \begin{array}{l} d_s = L \\ u = L/T \\ \rho = M/L^3 \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} L = d_s \\ T = d_s / u \\ M = \rho d_s^3 \end{array} \right. \quad \dots(1.13)$$

Se escriben los parámetros dependientes en términos de las dimensiones fundamentales y se substituyen las funciones obtenidas en 1.13 de dichos parámetros, que para este caso serían  $\Pi_1: F_D$  y  $\Pi_2: \mu$ .

$$\Pi_1: F_D = \frac{ML}{T^2} = \frac{\rho d_s^3 d_s u^2}{d_s^2} = \rho d_s^2 u^2 \rightarrow \Pi_1 = \frac{F_D}{\rho d_s^2 u^2} = \frac{\pi}{8} C_D \quad \dots(1.14)$$

$$\Pi_2: \mu = \frac{M}{TL} = \frac{\rho d_s^3 u}{d_s d_s} = \rho d_s u \rightarrow \Pi_2 = \frac{\rho d u}{\mu} = \text{Re} \quad \dots(1.15)$$

Por último se escribe la relación entre las funciones  $\Pi_1: F_D$  y  $\Pi_2: \mu$ , como  $\Pi_1 = \mathbb{F}(\Pi_2)$ , ó  $C_D = \mathbb{F}(\text{Re})$ , de donde se obtiene la fuerza de arrastre de la partícula:

$$F_D = F(\text{Re}) \frac{\pi}{8} \rho u^2 d^2 \quad \dots(1.16)$$

Nótese que el coeficiente de arrastre de la partícula queda en función del número de Reynolds y, aunque este análisis no proporciona una referencia de la relación exacta que existe entre ellos, las pruebas experimentales definen el valor de dicha relación.

Para obtener la resultante ( $F_N$ ) de la fuerza por peso propio de la partícula y el empuje de Arquímedes, se tiene la siguiente expresión:

$$F_N = (\rho_s - \rho)gV = (\rho_s - \rho)g \frac{\pi d^3}{6} \quad \dots(1.17)$$

Si se igualan las expresiones 1.16 y 1.17 para obtener el equilibrio de las fuerzas, y posteriormente se despeja la velocidad de caída, se llega a la expresión de la ley de Stokes, para agua limpia; en caso de ser una mezcla sedimento- agua, la densidad del agua debe ser sustituido por el de la mezcla, empleándose para ello la primera igualdad de la velocidad de caída de la ecuación 1.18.

$$C_D \frac{\pi}{8} \rho u^2 d^2 = (\rho_s - \rho)g \frac{\pi d^3}{6} \rightarrow u = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{gd(\rho_s - \rho)}{\rho}} = \sqrt{\frac{4}{3C_D} gd(G-1)} \quad \dots(1.18)$$

La Ley de Stokes solamente es válida para una partícula esférica, y no considera la variabilidad de formas que poseen las partículas en el mundo real, así como la posible sedimentación de un grupo de partículas, que por los choques entre ellas alteren la velocidad de caída. Como se puede observar, la Ley de Stokes es una primera formulación base que considera las fuerzas involucradas en el fenómeno de la velocidad de caída; sin embargo para explicar el fenómeno de mejor manera, se han creado nuevas formulaciones.

#### 1.4.1.2 Otras formulaciones

Tomando como base la Ley de Stokes, y considerando las limitantes que esta presenta en la determinación de la velocidad de caída, se han desarrollado formulaciones empíricas, con el fin de asociar los resultados a una expresión que represente mejor a la velocidad de caída, y por ende pueda ser mejor representado el fenómeno de sedimentación en el transporte de sedimentos.

De esta manera, se presentan 12 formulaciones empíricas que servirán como punto de comparación y de apoyo, para determinar cuál o cuáles presentan un mejor comportamiento de la velocidad de caída para las arenas de las costas de la Península de Yucatán. La comparación de los resultados de las formulaciones que se presentan, con los resultados experimentales obtenidos, se detallan en los capítulos 2 y 3 de este trabajo.

Cabe señalar, que cada una de las formulaciones que se presentan, tienen una tendencia hacia cierto parámetro u otro, aunque en general, toman en cuenta las mismas variables, a excepción del parámetro de forma que sólo es considerado en algunas formulaciones como lo es la de Camenen o Cheng.

En seguida se muestra en la Tabla 1.2, las 12 formulaciones resumidas (Ruiz y Silva, 2007) de la velocidad de caída, las cuales pertenecen a Chang y Liou, Cheng, Hallermier, Van Rijn, Soulsby, Ahrens, Jiménez- Madsen, Rubey, Swamee y Ojha, Camenen y Zanke. Las variables que intervienen en cada formulación fueron descritas en las secciones 1.2 y 1.3. La velocidad de caída para las formulaciones se denota en lugar de con la letra "u", con  $W_f$ .

Tabla 1.2 Formulaciones empíricas para la determinación de la velocidad de caída (Ruiz y Silva, 2007).

AUTOR	FORMULACIÓN
<b>1) Hallermier</b>	$W_f = \frac{\nu A}{18d_{50}} \quad \rightarrow \text{si } A < 39$ $W_f = \nu \left( \frac{D_*^{2.1}}{6d_{50}} \right) \quad \rightarrow \text{si } 39 \leq A \leq 10000 \quad \dots(1.19)$ $W_f = \frac{(1.05\nu D_*^{1.5})}{d_{50}} \quad \rightarrow \text{si } A > 10000$
<b>2) Van Rijn</b>	$W_f = \frac{\nu A}{18d_{50}} \quad \rightarrow \text{si } A < 16.187$ $W_f = \left( \frac{10\nu}{d_{50}} \right) (\sqrt{1 + 0.01A} - 1) \quad \rightarrow \text{si } 16.187 \leq A \leq 16187 \quad \dots(1.20)$ $W_f = \frac{(1.1\nu D_*^{1.1})}{d_{50}} \quad \rightarrow \text{si } A > 16187$
<b>3) Soulsby</b>	$W_f = \frac{\nu}{d_{50}} (\sqrt{10.36^2 + 1.049A} - 10.36) \quad \dots(1.21)$
<b>4) Ahrens</b>	$CL = 0.055 \tanh\{[12A^{-0.59}] \exp(-0.0004A)\}$ $CT = 1.06 \tanh\{[0.016A^{0.5}] \exp(-120/A)\}$ $W_f = \frac{CL(G-1)gd_{50}^2}{\nu} + CT\sqrt{(G-1)gd_{50}} \quad \dots(1.22)$
<b>5) Zanke</b>	$z = \left( \frac{2.5}{S_*} \right) [\sqrt{1 + 0.16S_*^2} - 1]$ $W_f = z\sqrt{(G-1)gd_{50}} \quad \dots(1.23)$
<b>6) Julien</b>	$W_f = \frac{8\nu}{d_{50}} (\sqrt{1 + 0.0139A} - 1) \quad \dots(1.24)$
<b>7) Cheng</b>	$Re = \left( \sqrt{3.61^2 + 1.18A^{1/1.53}} - 3.61 \right)^{1.53}$ $C_D = 4A / (3Re^2)$ $W_f = \sqrt{\frac{4}{3C_D} (G-1)gd_{50}} \quad \dots(1.25)$
<b>8) Chang y Liou</b>	$Re = \frac{24.6A^{0.477}}{17.9(1 + 24.6^{-0.528})}$ $W_f = \sqrt{\frac{4}{3 \left( \frac{4A}{3Re^2} \right)} (G-1)gd_{50}} \quad \dots(1.26)$

<p><b>9) Jiménez y Madsen</b></p>	$d_{nw} = d_{50} / 0.9$ $s_{*w} = d_{nw} \left( \sqrt{(G-1)gd_{nw}} \right) / (4v)$ $W_f = \left( 0.954 + \frac{5.12}{s_{*w}} \right)^{-1} \sqrt{(G-1)gd_{nw}}$ <p style="text-align: right;">...(1.27)</p>
<p><b>10) Rubey</b></p>	$Re = A / 17.9 \quad \rightarrow \text{si } A < 39$ $Re = \frac{24.6A^{0.477}}{17.9(1 + 24.6^{-0.528})} \quad \rightarrow \text{si } 39 \leq A \leq 10000$ $Re = 24.6A^{0.477} / 17.9 \quad \rightarrow \text{si } A > 10000$ <p style="text-align: right;">...(1.28)</p> $W_f = \sqrt{\frac{4}{3 \left( \frac{4A}{3Re^2} \right)}} \sqrt{(G-1)gd_{50}}$
<p><b>11) Swamee y Ohja</b></p>	$v_* = \frac{v}{d_{50}} \sqrt{(G-1)gd_{50}}$ $\text{si } v_* \geq 1.8 \times 10^{-4} \sqrt{CSF}$ $\rightarrow \omega_* = \left[ \frac{44.84v_*^{0.667}}{\left(1 + 4.5CSF^{0.35}\right)^{0.833}} + \frac{0.794}{\left(CSF^4 + 20CSF^{20} + v_*^{2.4} \exp(18.6CSF^{0.4})\right)^{0.125}} \right]^{-1}$ <p style="text-align: right;">...(1.29)</p> $W_f = \omega_* \sqrt{(G-1)gd_{50}}$
<p><b>12) Camenen</b></p>	$a_1 = 24 \quad a_2 = 100 \quad a_3 = 2.1 + 0.06P_{rou}$ $b_1 = 0.39 + 0.22(6 - P_{rou}) \quad b_2 = 20 \quad b_3 = 1.75 + 0.35P_{rou}$ $m_1 = 1.2 + 0.12P_{rou} \quad m_2 = 0.47$ $A_{ca} = a_1 + \left\{ a_2 \left[ 1 - \text{sen} \left( \frac{CSF\pi}{2} \right) \right]^{a_3} \right\}$ $B_{ca} = b_1 + \left\{ b_2 \left[ 1 - \text{sen} \left( \frac{CSF\pi}{2} \right) \right]^{b_3} \right\}$ <p style="text-align: right;">...(1.30)</p> $m_{ca} = m_1 + \left[ \text{sen} \left( \frac{CSF\pi}{2} \right) \right]^{m_2}$ $W_f = \frac{v}{d_{50}} \left[ \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{A_{ca}}{B_{ca}} \right)^{2/m_{ca}} + \left( \frac{4A}{3B_{ca}} \right)^{1/m_{ca}} - \frac{1}{2} \left( \frac{A_{ca}}{B_{ca}} \right)^{1/m_{ca}}} \right]^{m_{ca}}$ <p style="text-align: center;">si <math>CSF = 0.7 \rightarrow P_{rou} = 3.5</math>, si <math>CSF = 0.4 \rightarrow P_{rou} = 5</math></p>

## 2. PRUEBAS DE LABORATORIO

Para la realización de las pruebas de laboratorio, el ojo es un buen instrumento para percibir el movimiento de las partículas en general; sin embargo, cuando se trabaja con partículas de pequeño diámetro, el ojo se convierte en una herramienta incierta. La tecnología y su aplicación traen consigo que las pruebas de laboratorio posean una mayor validez en cuanto a la certeza de obtener resultados más cercanos a la realidad; por ejemplo, en las pruebas realizadas, la medición se llevó a cabo con un mejor control de su registro, pudiendo ser verificado cuantas veces sea.

La determinación de la velocidad de caída, por medio de una graduación de la distancia, de la grabación de la trayectoria de la partícula, y especialmente el manejo de la computadora para observar cuadro por cuadro el fenómeno con la certeza de medir correctamente el tiempo y que pueda ser verificado, hacen que los resultados obtenidos posean el mínimo de error humano. El diseño de la prueba y los resultados que en este capítulo se muestran, indican que en general, los resultados obtenidos de manera experimental concuerden o se acercan con la teoría del fenómeno, o cuando menos, dado que las formulaciones de velocidad de caída son empíricas, se acercan a los resultados obtenidos por otros investigadores.

La realización de las pruebas, aún facilitada y evitando en lo posible el error humano con la tecnología empleada (cámara digital con microlentes, videocámara con resolución de 30 cuadros por segundo, y análisis por computadora), presentaron una dificultad, especialmente en la manipulación de partículas cuyo diámetro es tan pequeño (cerca de los 0.1mm) que a simple vista resulta muy difícil observarlas; no obstante, cómo se verá a lo largo de este capítulo y del siguiente, los resultados ponen de manifiesto, que aun manejando un pequeño porcentaje de muestras, la velocidad de caída medida se acerca a lo esperado, resultados que se pueden mejorar con la realización de las pruebas al total de las muestras recolectadas, proporcionando así, una mayor fidelidad de los resultados aquí mostrados.

Es necesario destacar la labor de obtención de las 142 muestras, así como su caracterización, pasos previos a las pruebas de laboratorio realizadas para este trabajo, sin los cuales no se podría haber llevado a cabo éste, que es tan sólo una pequeña parte de todo el proceso que requiere la caracterización de los sedimentos y de los fenómenos asociados al transporte de sedimentos, esto último con el fin conocer, entender y aprovechar los recursos costeros.

Si bien solamente fue analizada la velocidad de caída de los sedimentos de las costas de la Península de Yucatán, y comparados los resultados experimentales con formulaciones ya existentes, la relevancia estriba en que son el inicio de los análisis de los sedimentos de las costas de México.

### 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

La metodología empleada para la caracterización de las 142 recolectadas muestras consistió básicamente en 7 etapas (Ruiz, 2008), añadiéndose una etapa más para una selección de muestras representativas que queda englobada en la realización de los experimentos de velocidad de caída, así como de otra más de retroalimentación de los modelos teóricos:

- a) Recolección de las muestras.
- b) Realización del análisis granulométrico.
- c) Obtención de las propiedades físicas básicas de las muestras.
- d) Medición del valor del ángulo de reposo del material.
- e) Determinación de las propiedades del mezclado agua- sedimento
- f) Determinación de los umbrales teóricos de movimiento de la partícula.
- g) Tamaño y forma de los granos del sedimento.
- h) Medición experimental de la velocidad de caída de la partícula.
- i) Retroalimentación de los modelos teóricos de los umbrales de movimiento y de las propiedades del mezclado agua-sedimento.

### 2.1.1 Recolección de muestras

La extracción de los sedimentos de las playas se realizó con una planeación previa para escoger aquellas que representasen la franja costera del norte la Península de Yucatán, así como aquellas que permitiesen estudiar las características del sedimento sometido a la asimetría del oleaje. Asimismo, las zonas sobre las que se extrajo las muestras corresponden a las siguientes:

- Zona sumergida u offshore (Ps o Pr), la zona de extracción se realizó tanto para una profundidad de 1.50 m como de 0.50 m, ésta última, extraída únicamente para las playas correspondientes al estado de Yucatán.
- Zona del estrán, lavado o foreshore (Pl), es la zona de rompimiento del oleaje y donde se genera la disipación de la energía potencial de éste; en dicha zona intervienen los parámetros del sedimento generados del mezclado de material con el fluido.
- Zona de playa seca, berma o backshore (Pb), con el fin de conocer las diferencias entre el material de la zona seca de la playa y las zonas anteriormente descritas.

El material extraído de cada punto de muestreo fue variable, es decir, de 1 a 2 kilogramos de material granular, el sedimento fue obtenido de manera superficial sin la realización de pozos de sondeo; además, para cada muestra extraída se registraron las coordenadas reales de su ubicación. En la Tabla 2.1, se enlistan los sitios de donde se extrajeron las muestras con sus respectivas coordenadas, marcándose su ubicación geográfica en la Figura 2.1.

Se recolectaron un total de 142 muestras de campo de 57 sitios a lo largo de la línea costera de Quintana Roo y de Yucatán. Se extrajo una muestra de Punta Brava 3, y una por cada uno de los hoteles citados en la Tabla 2.1 (desde Beach Paraíso Yalma a Sheraton) ubicados sobre la isla barrera de Cancún, Quintana Roo; además de tres muestras de 11 sitios ubicados sobre la misma isla barrera (de Punta Nizúc a Punta Cancún); en 6 lugares ubicados entre Punta Cancún y Punta Sam, así como en un par de sitios ubicados en la cercanía de las bocas litorales de Laguna Nichupté. También se obtuvieron muestras de las localidades de Puerto Morelos, y de la reserva ecológica de Sian Ka'an; así como de otros sitios ubicados a lo largo de la costera de Quintana Roo hasta Punta Allen. Mientras que en el estado de Yucatán, se extrajeron 4 muestras de 6 sitios ubicados a partir de Dzilam y hacia el límite estatal con Quintana Roo, además de 5 muestras de Kanai, Quintana Roo.



Figura 2.1 Ubicación geográfica de los sitios de las muestras, en los recuadros de la derecha de la imagen se detalla la zona encerrada en el recuadro en morado correspondiente a los puntos de muestreo en Cancún, Quintana Roo (imagen hipsigráfica modificada: Mapa Digital de México, versión 3.0, Visualizador de Ortofotos versión 2.0, del portal de INEGI).

Tabla 2.1 Coordenadas de los sitios de las muestras

SITIO	COORDENADAS		SITIO	COORDENADAS	
	Longitud	Latitud		Longitud	Latitud
Boca Sur	-86.7954	21.0358	Playa del Carmen 1	-87.0717	20.6252
Puerto Morelos UNAM	-86.8673	20.8680	Playa del Carmen 2	-87.0657	20.6298
Puerto Morelos 2	-86.8659	20.8708	Punta Brava 1	-86.9110	20.8121
Puerto Morelos 3	-86.8686	20.8660	Punta Brava 2	-86.9023	20.8156
P1	-86.7452	21.1335	Punta Brava 3	-86.8981	20.8321
P2	-86.7482	21.1304	Punta Allen	-87.4743	19.7976
P3	-86.7494	21.1287	Holbox	-87.3829	21.5232
P4	-86.7578	21.1146	Beach Paraíso Yalma	-86.7791	21.0363
P4A	-86.7631	21.1036	Carissa Palma	-86.7476	21.1313
P5	-86.7668	21.0945	Club Regina	-86.7817	21.0396
P6	-86.7742	21.0746	El Pueblito	-86.7799	21.0579
P7	-86.7791	21.0604	F.A. Condesa	-86.7722	21.0807
P8	-86.7820	21.0472	Gran Caribe Real	-86.7544	21.1206
P9	-86.7819	21.0423	Gran Mella Cancún	-86.7712	21.0834
P10	-86.7800	21.0369	Hilton	-86.7774	21.0660
Punto A	-86.7511	21.1396	Hilton cerca corral	-86.7767	21.0680
Punto B	-86.7487	21.1392	Hyatt Cancún Caribe	-86.7535	21.1226
Punto C	-86.7742	21.1439	Royal Sands	-86.7656	21.0977
Punto D	-86.7870	21.1440	Royal Solaris	-86.7818	21.0497
Punto E	-86.7854	21.1447	Ritz Carlton	-86.7675	21.0930
Punto F	-86.8060	21.1767	Sheraton	-86.7606	21.1094
Punto G	-86.8021	21.2411	Chelem MC41, Yuc.	-89.7481	21.2551
Isla Mujeres	-86.7512	21.2602	ECCA, Yuc.	-89.8174	21.2540
Tulum A	-87.4364	20.1980	Progreso, Yuc.	-89.6511	21.2887
Tulum B	-87.4477	20.1737	Telchac, Yuc.	-89.2791	21.3419
Sian Ka'an	-87.4664	20.1197	UAY, Yuc.	-89.5231	21.3117
Bahía Príncipe	-87.3321	20.3643	Dzilam, Yuc.	-88.9309	21.3860
Akumal 1	-87.3153	20.3947	Kanai, Quintana Roo	-86.9976	20.7107
Akumal 2	-87.3191	20.3916			

### 2.1.2 Análisis granulométrico

Se realizó un análisis granulométrico a cada una de las muestras que se tenían con lo cual se determinó la curva granulométrica correspondiente. Las mallas empleadas para obtener la granulometría de las muestras fueron de acuerdo a la clasificación ASTM (American Society for Testing Materials): #8 (2.36 mm), #10 (2.00 mm), #14 (1.40 mm), #18 (1.00 mm), #25 (0.71 mm), #35 (0.50 mm), #45 (0.355 mm), #60 (0.25mm), #80 (0.18 mm), #120 (0.125 mm). A partir de la curva granulométrica se obtuvieron los diámetros nominales de partículas:  $D_5$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{60}$ ,  $D_{75}$ ,  $D_{84}$ ,  $D_{96}$  con unidades en mm.

Con los datos de la granulometría y de los diámetros nominales, se calculó el coeficiente de uniformidad y de curvatura de la muestra estudiada, obteniéndose así mismo el porcentaje de contenido de gravas, arenas y finos. Con lo anterior se llevó a cabo la clasificación del material de la muestra de acuerdo al SUCS (Sistema Universal de Clasificación de Suelos), a la clasificación de la ASTM y a la de Wentworth.

Con los valores proporcionados del análisis granulométrico, se efectuó un análisis estadístico de los parámetros de la distribución de los granos de cada una de las muestras. Fue calculada la media, la desviación estándar, el sesgo y la curtosis del tamaño de grano en la muestra; se obtuvieron las curvas de frecuencia, su histograma, la curva aritmética acumulada y de probabilidad acumulada, así como el porcentaje de arena contenido en la muestra.

### 2.1.3 Propiedades físicas básicas de la muestra

En cuanto a las propiedades físicas bastó con calcular la densidad de las partículas de la muestra (en  $\text{kg/m}^3$ ) y de la relación de vacíos para determinar el peso específico y la densidad relativa del material y la densidad relativa del mismo dentro del agua.

Para el cálculo, se consideró el peso específico del agua con un valor igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Las unidades de peso específico utilizadas para la determinación de las propiedades están dadas en  $\text{kg/m}^3$ .

### 2.1.4 Ángulo de reposo del material

El ángulo de reposo fue determinado debido a su importancia en el acomodo natural de las partículas en el fondo marino. La existencia de un ángulo de reposo es indicativo del material predominante con el que se trabaja: gravas o arenas gruesas para valores de ángulo de reposo grandes y con arenas finas si éste es pequeño. La determinación de dicho ángulo se realizó mediante la medición del ángulo entre la horizontal y aquel en el que las partículas del sedimento inician su rodamiento para alcanzar el plano horizontal.

### 2.1.5 Propiedades del mezclado agua- sedimento

En este apartado las propiedades que se midieron fueron las siguientes: volumen de la concentración, concentración de la masa, porosidad, densidad de suspensión, permeabilidad específica, coeficiente de permeabilidad, gradiente de presión para la licuefacción y la velocidad mínima del flujo de agua para alcanzar el estado de licuefacción.

En la determinación de la velocidad mínima del flujo para alcanzar la licuefacción, se evaluó el factor de Yalin ó parámetro adimensional de la partícula.

### 2.1.6 Determinación de los umbrales de movimiento

Para la determinación de los umbrales de movimiento de la partícula fue necesario seguir una metodología (Ruiz, 2008) que consistió en la determinación del parámetro de sedimento- fluido a partir del cual se calculó el factor de Shields crítico, con la magnitud del factor encontrada es posible la determinación del esfuerzo cortante crítico al que se ven sometidas las partículas, considerando que éste es función de dicho factor y de la densidad del agua. Calculado el esfuerzo cortante crítico, es posible el cálculo de la velocidad de dicho esfuerzo como se señala en la sección 1.4.

Se empleó asimismo el número de Reynolds, el cual también fue calculado, y con el cual es posible la determinación del tipo de fondo marino teórico que se podría formar. También se calculó el índice de flotación de Arquímedes, el cual es considerado para inferir qué tipo de flujo

influirá en el comportamiento de la movilidad del sedimento. El número de Rouse (adimensional) fue calculado y con él se conoció el tipo de fondo marino teórico que se puede formar con el sedimento analizado. Dicho número está en función de la velocidad de caída, de la constante de Karmán y de la velocidad del esfuerzo cortante crítico.

Finalmente, se estimó también la velocidad de caída teórica que tendrían las partículas a partir de las formulaciones explicadas en la sección 1.4.1.2, y que son la base de comparación que se dispondrán para con la parte experimental realizada y descrita posteriormente. También se calculó el criterio de Bagnold con el cual se puede determinar cuándo los sedimentos pueden llegar a considerarse como transporte en suspensión.

### **2.1.7 Tamaño y forma de los granos del sedimento**

Para la determinación del factor de forma del sedimento se empleó la expresión de Corey, que es la más utilizada para determinar dicho factor. Para emplear la expresión se requiere de conocer las dimensiones de largo, ancho y profundidad de la partícula, tarea que se llevó a cabo mediante el análisis de fotografías tomadas a los sedimentos, los cuales fueron colocados sobre una retícula dibujada con aberturas cuadradas de 1 mm.

La relevancia de este factor estriba en que influye en el contorno del fondo marino. Existe una relación con el ángulo de reposo que como ya se dijo, influye en el perfil del fondo marino.

### **2.1.8 Medición experimental de la velocidad de caída**

Para la medición experimental de la velocidad de caída se realizó un análisis fotográfico de las partículas de la muestra seleccionada, similar al descrito en la sección 2.1.7, con el fin de determinar aquellos granos con el  $D_{50}$  determinado a partir del análisis granulométrico; los granos que se encontraron muy cercanos a cumplir dicha condición fueron extraídos para determinar su velocidad de caída.

Las partículas seleccionadas fueron depositadas al inicio de una columna de agua contenida en una tubo de acrílico de 2" de diámetro, desde donde iniciarían su caída hacia el fondo de ésta. El proceso fue videograbado con una resolución de 30 cuadros por segundo para la medición del tiempo mientras el grano recorría una distancia medida con una graduación colocada en la columna de agua, con resolución de 1 mm. La distancia seleccionada del recorrido fue variable en función del tamaño de la partícula y de la resolución del equipo de video para enfocar simultáneamente a la partícula y la graduación colocada para medir la distancia.

### **2.1.9 Retroalimentación de los modelos teóricos de los umbrales de movimiento y de las propiedades del mezclado agua-sedimento**

La retroalimentación de los modelos teóricos se llevó a cabo tras la corrección del  $D_{50}$  teórico empleado por el  $D_{50}$  experimental promedio definido por los granos empleados en la medición de la velocidad de caída, por lo que se obtuvieron nuevos umbrales de movimiento y de las propiedades del mezclado agua- sedimento.

Los resultados de esta retroalimentación a los modelos teóricos, fueron contra los que se compara la velocidad de caída experimental obtenida para cada una de las muestras seleccionadas.

## 2.2 CRITERIO DE SELECCIÓN DE MUESTRAS PARA ENSAYES

De las 142 muestras recolectadas a todo lo largo de las costas de Quintana Roo (desde Punta Allen hasta Holbox) y del estado de Yucatán, se seleccionaron 6 muestras representativas, para realizar con ellas el análisis experimental de la velocidad de caída de las partículas. El criterio de selección se basó tomando en cuenta los aspectos estadísticos de la granulometría, localización geográfica, la geología del sitio, así como la zona de la playa de la que se extrajo la muestra.

### 2.2.1 Criterio estadístico

Del universo de las 142 muestras, y del análisis granulométrico realizado a cada uno de ellas, se seleccionaron las muestras representativas aplicando un criterio estadístico del análisis del total de las muestras. Los valores de importancia que se consideraron fueron los siguientes:  $D_{50}$ , densidad relativa de la muestra, media del tamaño de los granos, desviación estándar de los granos, modo de la curva de frecuencia (unimodal, bimodal, etc.).

Tomando como base inicial el  $D_{50}$ , se obtuvo el histograma, dividiendo el conjunto de muestras en 6 clases, para poder así observar el comportamiento de dicho conjunto (ver Figura 2.2). Así, la mayor cantidad de las muestras (137), se encontraron incluidas dentro de las dos primeras clases, lo cual corresponde a un  $D_{50}$  comprendido entre 0.079mm – 0.723mm.

Ya determinadas las clases y, observando la cantidad de muestras que se encontraron en cada una, se decidió considerar como muestra representativa a aquella con el valor más cercano al del valor medio de la clase; sin embargo, para mejorar dicha estimación, se calculó la media de los  $D_{50}$  comprendidos en cada clase lo cual generó intervalos, teniendo éstos como límites el valor de la media de la clase y la media de los  $D_{50}$ . Lo anterior ayudaría a considerar el resto de los aspectos deseados en las muestras representativas, que hasta el momento no se han incluido.

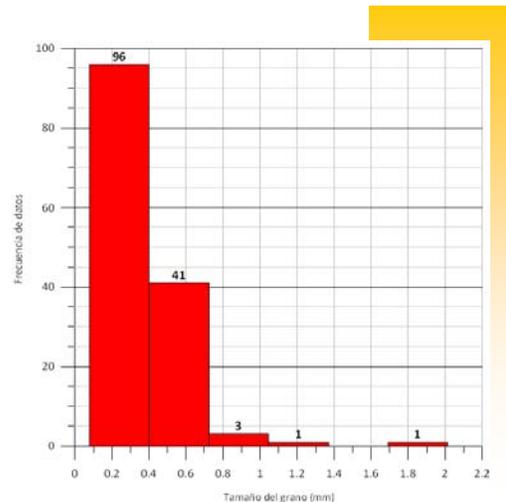


Figura. 2.2 Histograma en función del  $D_{50}$  de las muestras.

Dada la gran cantidad de muestras (67.6% del total) que se encontraron dentro de la primera clase, se decidió considerar el análisis de tres de ellas como representativas, dos de éstas cercanas a los límites de la clase y una más cerca o dentro del intervalo descrito en el párrafo anterior. De manera similar, en la segunda clase (con 28.9% de las muestras), se decidió considerar dos muestras, una de ellas dentro del intervalo descrito anteriormente, y la segunda entre el límite superior de la clase y el intervalo ya mencionado; asimismo, para la tercera,

cuarta y sexta clase se tomó en cuenta una sola muestra debido al pequeño número de muestras contenidas en las clases de análisis; cabe señalar que no se encontraron muestras en la clase 5 ( $D_{50}$  entre 1.369 a 1.692 mm), por lo que se omite su análisis. Por lo tanto, se tendrían seleccionadas con este criterio 8 muestras, las cuales no pueden ser definidas totalmente por lo que se recurre a un segundo criterio.

Así, se decidió comparar la media de la distribución de la muestra ( $\mu$ ) con el valor del  $D_{50}$  para cada una de las franjas de selección delimitadas anteriormente, cuidando que la desviación estándar ( $\sigma$ ) de los tamaños de las partículas fuera lo menor posible.

Además, al observar la curva de frecuencias del tamaño de grano de cada muestra, se puede distinguir frecuencias unimodales y bimodales, lo cual representa el número de orígenes de los granos de la muestra, es decir, la fuente de formación de los granos es única para una frecuencia unimodal, mientras que para una frecuencia bimodal los granos provienen de dos o más fuentes. Es por ello, que se consideró que las muestras representativas tuviesen un solo origen, lo que delimita aún más la selección de muestras.

Como resultado de conocer el comportamiento de las muestras, de clasificar mediante un histograma los tamaños de los granos de la muestra, seleccionar las franjas de cada clase que serían consideradas dado el número de muestras, de comparar con los estadísticos  $\mu$  y  $\sigma$ , y con ayuda de la curva de frecuencias de las muestras para seleccionar sólo aquellas con un origen de formación, se logró construir la Tabla 2.2 en la que se resumen los resultados obtenidos. La muestra PF señalada en el último renglón de la tabla posee una distribución de frecuencias donde se observan tres posibles fuentes de origen; sin embargo, ésta se presenta ya que es la única muestra que se tiene como representante de la clase 6 ( $D_{50}$  entre 1.692 y 2.014 mm).

Tabla 2.2. Muestras representativas considerando  $D_{50}$ , media y desviación estándar del tamaño de los granos, y origen de formación de los granos.

CLASE	MUESTRAS REPRESENTATIVAS	$D_{50}$ (mm)	$\mu$ (mm)	$\sigma$ (mm)	Ss
1	Akumal 2 (offshore)	0.11422	0.11289	1.497	2.721
	Isla mujeres (foreshore)	0.21673	0.21682	1.3131	2.532
	Club Regina (backshore)	0.39001	0.39426	0.4055	2.721
2	Bahía Príncipe (backshore)	0.49694	0.4717	1.4003	2.572
	P9, Cancún, Quintana Roo (offshore)	0.59835	0.59835	1.5858	2.685
3	P7, Cancún, Quintana Roo (offshore)	0.86964	0.9857	1.7102	2.753
4	Punta Brava 2 (zona de lavado)	1.3094	1.2762	1.7617	2.597
6	PF, Cancún, Quintana Roo (zona de rompiente)	2.0142	1.4812	4.3503	2.417

\*Ss es la densidad relativa de las partículas de la muestra

### 2.2.2 Localización geográfica

Este criterio de selección se basa, en que para determinar las muestras representativas, éstas deben de abarcar las zonas geográficas de donde fueron extraídas, por lo que en éste ámbito deben incluirse tanto arenas de las playas de Quintana Roo como de Yucatán, así como de las localidades cuyo círculo de influencia represente un área geográfica importante.

Este criterio busca, aunado al descrito en la sección anterior, hacer que las muestras sean lo más representativas en cuanto a sus características propias de composición granulométrica, como de las zonas geográficas en las que se encuentran. De este modo, de la Tabla 2.2 se puede notar que 4 de las muestras representativas pertenecen a Cancún, Quintana Roo, por lo que la selección realizada debe corregirse tomando en cuenta este nuevo criterio.

Primeramente, para determinar cuál de las 4 muestras seleccionadas es la que podría representar a la zona de Cancún, se realizó un análisis estadísticos tomando en consideración únicamente las arenas de este sitio y no considerando el dato de PF de la zona de rompiente puesto que su  $D_{50}$  se encuentra muy alejado del conjunto, misma razón por la cual es eliminada como muestra representativa de la Tabla 2.2. Del conjunto de muestras de Cancún, se obtuvo el  $D_{50}$  promedio que resultó con un valor de 0.39329 mm y una desviación estándar de 0.1564, así como una densidad relativa promedio de 2.681 con desviación estándar de 0.083. Derivado de lo anterior y observando el valor de la media, asimismo comparándolo con el  $D_{50}$  de las muestras señaladas en la Tabla 2.2, se optó por la muestra del Club Regina, ya que el  $D_{50}$  que posee es 0.39001 mm, valor muy próximo al valor promedio de la zona, igualmente que el valor de su densidad relativa con un valor de 2.721.

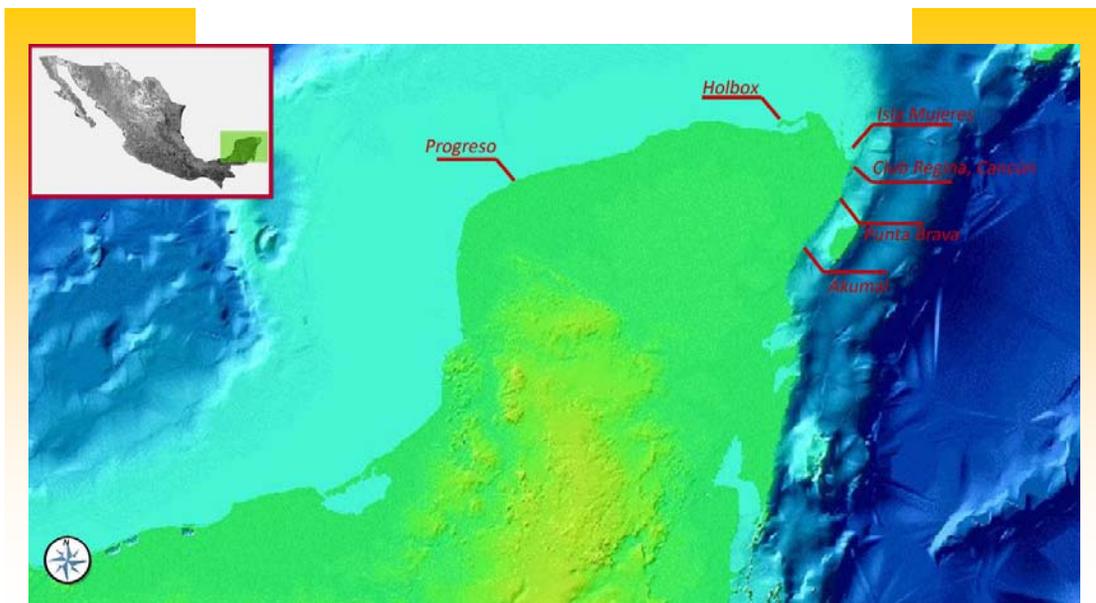


Figura 2.3 Localización geográfica de los sitios de las muestras seleccionadas (imagen hipsigráfica modificada; Mapa Digital de México, versión 3.0, portal del INEGI).

Por otra parte, con el criterio de la sección anterior, las muestras de las playas de Yucatán no resultaron seleccionadas, esto debido fundamentalmente a que, en general, se presentan dos e inclusive tres orígenes de las arenas de la zona. Pero, considerando este criterio y tratando de buscar la compatibilidad con el criterio anterior, es que deben incluirse alguna de las muestras representativas como lo sería Progreso, Yucatán en sustitución de P7 en Cancún, Quintana Roo, y de Holbox, en sustitución de P9 en Cancún y Bahía Príncipe; si bien Holbox pertenece al estado de Quintana Roo, se halla cerca de la frontera con Yucatán.

Observando el mapa de la Figura 2.3, se puede distinguir que: Akumal 2 se encuentra en la zona sur de la zona de muestreo de las costas de Quintana Roo; Isla Mujeres, cuya condición de isla la diferencia geográficamente de la zona continental; Club Regina es un hotel ubicado en Cancún, Quintana Roo; Holbox se localiza cerca al límite estatal entre Yucatán y Quintana Roo, Progreso se encuentra en la costa noroeste de Yucatán; Punta Brava 2 se ubica en la zona intermedia entre lo que es Cancún y Akumal.

Así, las muestras seleccionadas cumplen con el fin de representar tanto los diferentes tamaños de granos que se podrían tener en las arenas, como con la zona geográfica en la que se encuentran. Por lo tanto, las muestras representativas reuniendo los criterios estadístico y de localización geográfica, serían las mostradas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Muestras representativas considerando el criterio estadístico y la condición geográfica

CLASE	MUESTRAS REPRESENTATIVAS	$D_{50}$ (mm)	$\mu$ (mm)	$\sigma$ (mm)	$S_s$
1	Akumal 2 (offshore)	0.11422	0.11289	1.497	2.721
	Isla Mujeres (foreshore)	0.21673	0.21682	1.3131	2.532
	Club Regina (backshore)	0.39001	0.39426	0.4055	2.721
2	Holbox (foreshore)	0.48604	0.41825	3.0542	2.556
3	Progreso, Yucatán (zona intermareal)	0.96083	1.0656	2.3793	2.6109
4	Punta Brava 2 (foreshore)	1.3094	1.2762	1.7617	2.597

### 2.2.3 Zona de extracción de la muestra

Así como se consideró la zonificación geográfica para seleccionar el tipo de muestras, también es necesario considerar la zonificación que ofrece el perfil de la playa para tener muestras que la representen.

Observando la Tabla 2.3, se tienen dos muestras que representan la zona de la playa seca o berma (backshore), tres a la zona del estrán de la playa (zona de lavado), una a la zona intermedia a las dos anteriores (zona intermareal) y finalmente, una más de la playa sumergida (offshore), con lo que las zonas de la playa quedan representadas con al menos una muestra.

### 2.2.4 Geología

Observando así mismo que las muestras cubran o representen la geología de la región (Cartas geológico- mineras, Esc. 1:250 000, Servicio Geológico Mexicano (SGM)), se tiene que cubrir las unidades geológicas que afloran actualmente en la región, sobre la línea costera de la Península, las cuales son:

- 🔗 Formación Carrillo Puerto (TmplCz-Cq) que es la unidad más antigua expuesta constituida por una secuencia de caliza y coquina de edad Mioceno- Plioceno que se distribuyen ampliamente por la península de Yucatán.
- 🔗 Depósitos cuaternarios de arenisca poco consolidada (Qpt(?)Ar) constituida por gasterópodos, palecípodos, ostras y calcita de edad Pleistoceno.

- ☞ Depósitos palustres (Qhopa) formados por sedimentos finos, fango calcáreo y sales mezclados con materia orgánica de edad Holoceno.
- ☞ Depósitos de litoral (Qholi) formados por sedimentos no consolidados de granos de arenas, líticos re trabajados que varían de arena fina a gruesa, algunas gravas y fragmentos de conchas de edad Holoceno.

De esta manera observando las cartas geológico- mineras, realizadas por el Servicio Geológico Mexicano (Cartas F16-7, F16-8, F16-11, disponibles en el portal del SGM), y cuyos fragmentos se muestran en la Figura 2.4, se distinguen las características geológicas de cada uno de los sitios donde se ubican las muestras representativas de la Figura 2.3. Así, Akumal se ubica sobre la unidad de la Formación Carrillo Puerto, Punta Brava al igual que Holbox, se encuentran sobre la unidad de depósitos palustres, Progreso sobre la unidad de depósitos de litoral y finalmente, Cancún e Isla Mujeres sobre los depósitos cuaternarios de arenisca poco consolidada.

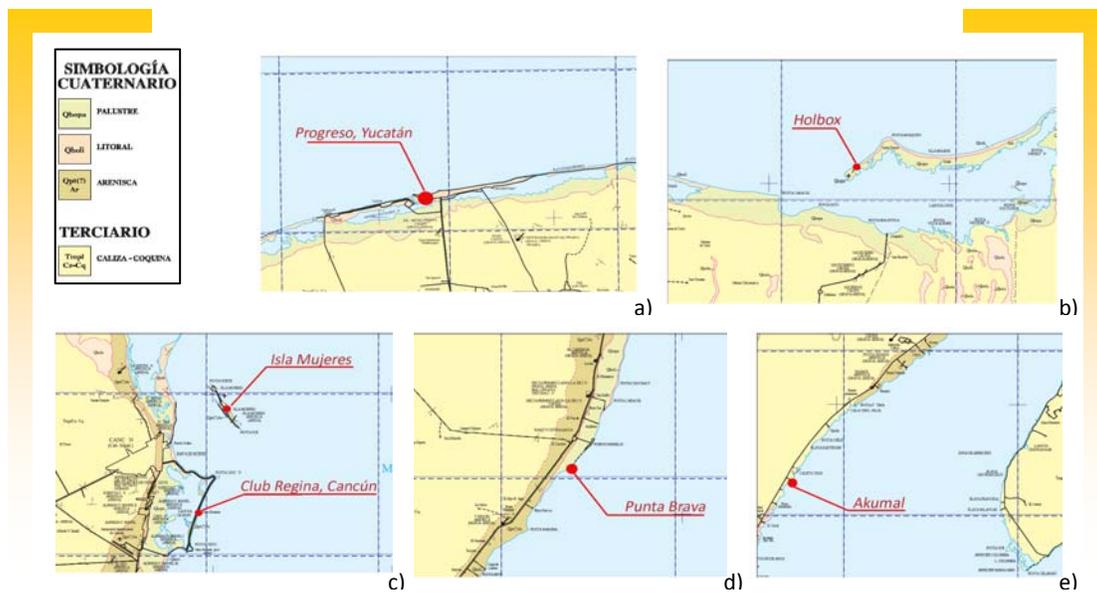


Figura 2.4 Fragmentos de Cartas Geológico- Mineras F16-7, F16-8, F16-11 (disponibles en el portal del SGM), en las que se muestra: Unidad geológica de a) Progreso, Yucatán (Qholi), b) Holbox, Quintana Roo (Qhopa), c) Isla Mujeres y Cancún (Qpt(?)Ar), d) Punta Brava, Quintana Roo (Qhopa) y e) Akumal, Quintana Roo, frente a la isla de Cozumel (Tmp/Cz-Cq).

### 2.2.5 Muestras Seleccionadas

Como resumen de los criterios de selección, se tiene como resultado que las muestras que se emplearán para el análisis de la velocidad de caída de las partículas son las que se muestran en la siguiente tabla, en la cual se señala su  $D_{50}$ , tamaño medio de grano, desviación estándar del tamaño de grano, coordenadas geográficas de la zona de extracción así como la unidad geológica a la que pertenecen.

Las muestras seleccionadas son las que mejor cubren de manera simultánea todos los criterios aquí explicados, lo que hace que los resultados obtenidos busquen representar el total de las 142 muestras recolectadas, y más aún a regiones costeras con características de sedimentos similares.

Tabla 2.4. Muestras representativas considerando el criterio estadístico, la condición geográfica y la geología de los sitios.

CLASE	MUESTRAS REPRESENTATIVAS	D <sub>50</sub> (mm)	$\mu$ (mm)	$\sigma$ (mm)	S <sub>s</sub>	Zona de extracción	Coordenadas		Unidad geológica
							Longitud	Latitud	
1	Akumal 2	0.11422	0.11289	1.497	2.721	Offshore	-87.3191	20.3916	TmplCz-Cq
	Isla Mujeres	0.21673	0.21682	1.313	2.532	Foreshore	-86.7512	21.2602	Qpt(?)Ar
	Club Regina	0.39001	0.39426	0.406	2.721	Backshore	-86.7817	21.0396	Qpt(?)Ar
2	Holbox	0.48604	0.41825	3.054	2.556	Foreshore	-87.3829	21.5232	Qhopa
3	Progreso, Yucatán	0.96083	1.0656	2.379	2.611	Intermareal	-89.6511	21.2887	Qholi
4	Punta Brava 2	1.3094	1.2762	1.762	2.597	Foreshore	-86.9023	20.8156	Qhopa

## 2.3 PRUEBAS DE VELOCIDAD DE CAÍDA

### 2.3.1 Descripción y desarrollo de las pruebas

El primer paso para la realización de las pruebas de velocidad de caída fue la determinación de los granos que correspondían a un tamaño muy cercano a su D<sub>50</sub> estimado por la granulometría de la muestra.

Lo anterior se hizo colocando sobre una retícula dibujada con aberturas cuadradas de 1 mm los sedimentos de cada una de las muestras, una vez hecho esto, se capturaron en formato digital las fotografías de los sedimentos. El análisis fotográfico se llevó a cabo por medio de una rutina del programa Matlab®, con la cual pudo estimarse qué granos poseían un diámetro similar al D<sub>50</sub> teórico. Con dichas imágenes y utilizando la retícula a modo de coordenadas, se localizaron los granos seleccionados para después ser removidos uno por uno de los sedimentos que se encontraban alrededor, apartándoseles en un recipiente para ser trasladados hacia donde se realizó la prueba de velocidad de caída.

Para la medición de la velocidad de caída fue necesario emplear un recipiente, dentro del cual se colocó agua en estado de reposo total, una cámara cuya resolución fuera lo suficientemente aceptable tanto en cuadros por segundo como en la calidad de las imágenes proporcionadas, todo ello con el propósito de identificar el recorrido de los granos, así como una graduación que se situó en la parte trasera del recipiente, con el fin de determinar la distancia vertical recorrida por los granos. Así mismo, como consecuencia del color de los granos, se determinó emplear un fondo que permitiese igualmente la identificación de los granos en su recorrido.

La resolución de la graduación empleada en las pruebas fue de 1 mm; mientras que la de los videos fue cercana a los de 30 cuadros por segundo, con una resolución por imágenes de 10 Mpx.

Una vez armado el equipo para realizar las pruebas de velocidad de caída, y con los granos seleccionados, se procedió a colocar los granos sobre la superficie del agua y después, para evitar los efectos de la tensión superficial, los granos fueron introducidos en el fluido de una manera metódica y permitiendo que los granos pudiesen caer libremente por la columna de agua del recipiente.

La caída de los granos fue registrada por la cámara de video en el tramo seleccionado, dependiendo la longitud del tramo en gran medida del tamaño de grano que se estuviese probando y de la capacidad de la cámara para registrarlos, es decir, para un grano con un diámetro pequeño, el zoom requerido para enfocarlo disminuía el ángulo de visión, y con ello, la distancia recorrida por el grano que era visible en la escena; mientras que para partículas de mayor diámetro, el zoom permitía un mayor ángulo de visión y como resultado poder registrar una longitud mayor de recorrido. Dicha longitud dependió igualmente de la velocidad con la que caían los granos pues, entre mayor era el diámetro de la partícula, menor tiempo les tomaba caer y recorrer la distancia vertical seleccionada, motivo por el que, para obtener mejores resultados, se amplió la distancia recorrida por el grano hasta el límite impuesto por el enfoque de la partícula por parte de la cámara. De este modo, para granos con un diámetro inferior a 0.40 mm la distancia vertical seleccionada a recorrer fue de 15 cm, para granos entre 0.40 y 1.00 mm la distancia fue de 20 cm, y para granos superiores a este último diámetro la distancia fue de 25 cm.

Capturados los videos en formato digital, fue posible su análisis en cuadros, con lo cual se determinó el tiempo que requirió la partícula en recorrer la distancia seleccionada, y por tanto obtener la velocidad de caída por medio de la relación de la distancia vertical entre tiempo empleado.

De la manera anterior, fue como se determinó la velocidad de caída para cada una de las muestras seleccionadas y mostradas en la Tabla 2.4. De igual forma se realizó una prueba más en la que se contempló a la muestra de Progreso, pero empleando un diámetro no correspondiente al  $D_{50}$ , con el motivo de obtener una comparación de velocidades en un sitio y observar de manera experimental la relevancia del diámetro en la velocidad de caída de los sedimentos así como otros factores involucrados como el factor de forma de la partícula.

### 2.3.2 Resultados del análisis fotográfico

A partir del análisis de las fotografías se obtuvieron los granos correspondientes con un diámetro cercano al  $D_{50}$ , de cada muestra se decidió seleccionar alrededor de 9 granos con el diámetro correspondiente ya que fue la cantidad de granos que se encontraban de manera general por fotografía analizada; a excepción de determinadas muestras como fue el caso de Holbox, donde se hizo necesaria la toma de dos fotografías para hallar los granos especificados, la facilidad de hallar los granos radicaba en la consistencia de la arena, esto es, en cuanto a contenido de conchas, restos de coral, u otros elementos diferentes a los de la arena. Igualmente, para granos de mayor diámetro a los aquí examinados, es posible que se requiera de una mayor cantidad de fotografías debido a la cantidad de granos concentrados en cada imagen, así como del espaciamiento necesario para extraer los granos seleccionados del resto de las partículas.

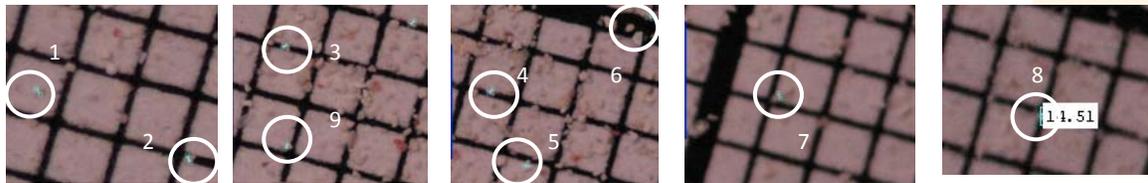
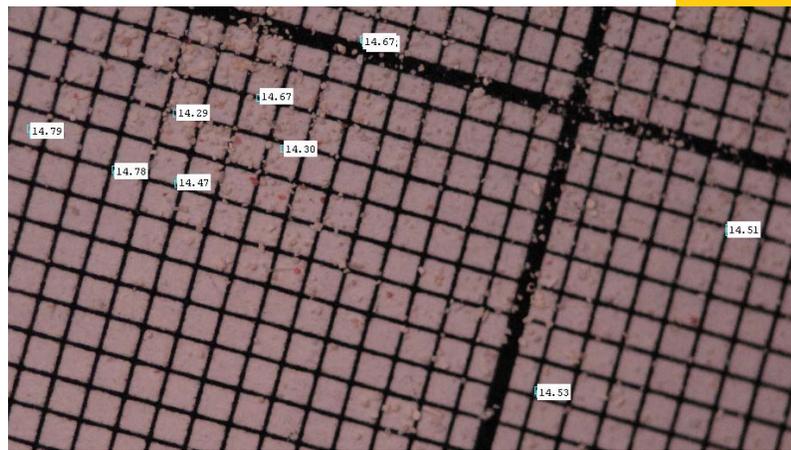
La importancia de haber seleccionado uno a uno los granos y registrarlos con su diámetro respectivo, así como probarlos de manera individual, radica en verificar qué tan sensible es la velocidad de caída ante una variación del mismo, por pequeña que esta sea; sin embargo, para las muestras de Isla Mujeres y de Akumal2, las pruebas de velocidad de caída se realizaron colocando la nube de granos que cumplían con el  $D_{50}$ , esto debido a que el pequeño diámetro de las partículas hace que probarlas una a una sea propiamente imposible.

El análisis fotográfico también tuvo como finalidad hacer una revisión, a grandes rasgos, de las formas que poseen las partículas de arena, ya que esto influye en la velocidad de caída de las partículas. Dicha consideración fue tomada al momento de seleccionar los granos para tratar de recoger aquellos dentro de la muestra, que poseyeran una forma similar; así por ejemplo, se tuvieron partículas de forma circular, cilíndrica o de hojuela.

En seguida se muestran las fotografías obtenidas para cada una de las muestras en las que se señalan los granos seleccionados con una indicación de su diámetro en píxeles que queda asentado en una tabla así como su correspondiente  $D_{50}$  en mm de las partículas, de acuerdo a la escala obtenida para cada fotografía.

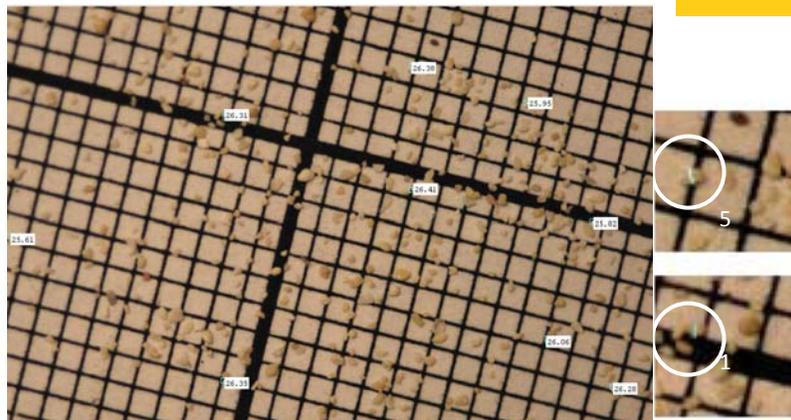
**A) AKUMAL 2**

No.	$D_{50}$ (px)	$D_{50}$ (mm)
1	14.79	0.11644
2	14.78	0.11635
3	14.29	0.11250
4	14.67	0.11549
5	14.30	0.11258
6	14.67	0.11549
7	14.53	0.11439
8	14.51	0.11423
9	14.47	0.11392



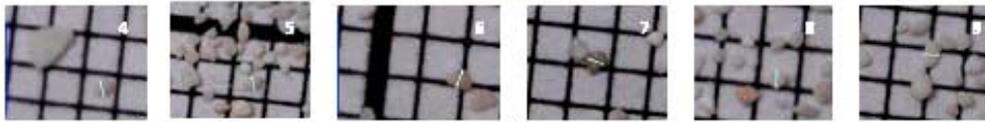
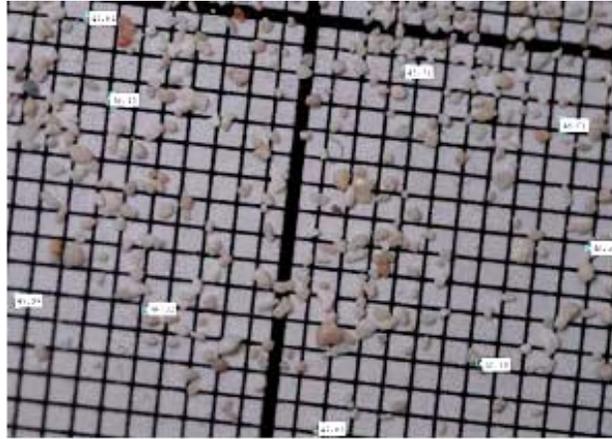
**B) ISLA MUJERES**

No.	$D_{50}$ (px)	$D_{50}$ (mm)
1	26.31	0.22004
2	26.35	0.22037
3	26.38	0.22062
4	26.41	0.22087
5	25.95	0.21702
6	26.06	0.21795
7	25.82	0.21594
8	26.28	0.21978
9	25.61	0.21418



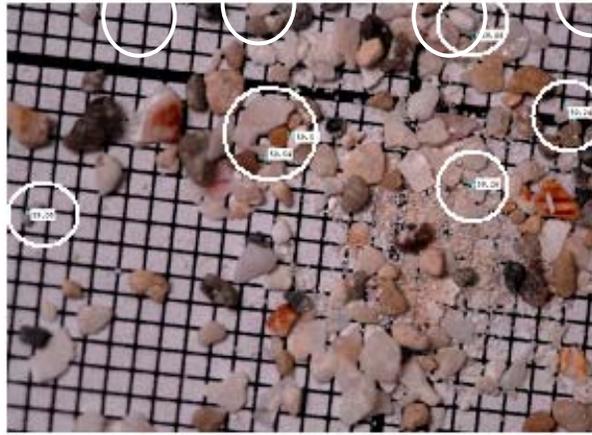
**C) CLUB REGINA, CANCÚN**

No.	D <sub>50</sub> (px)	D <sub>50</sub> (mm)
1	45.84	0.38940
2	46.10	0.39161
3	46.02	0.39093
4	45.99	0.39067
5	45.71	0.38829
6	45.63	0.38931
7	45.88	0.38974
8	46.01	0.39084
9	46.10	0.39161



**D) HÓLBOX**

No.	D <sub>50</sub> (px)	D <sub>50</sub> (mm)
1	59.05	0.48477
2	59.54	0.48879
3	59.54	0.48879
4	59.26	0.48650
5	59.24	0.48633
6	59.08	0.48502
7	58.89	0.48669
8	59.04	0.48793
9	58.94	0.48710



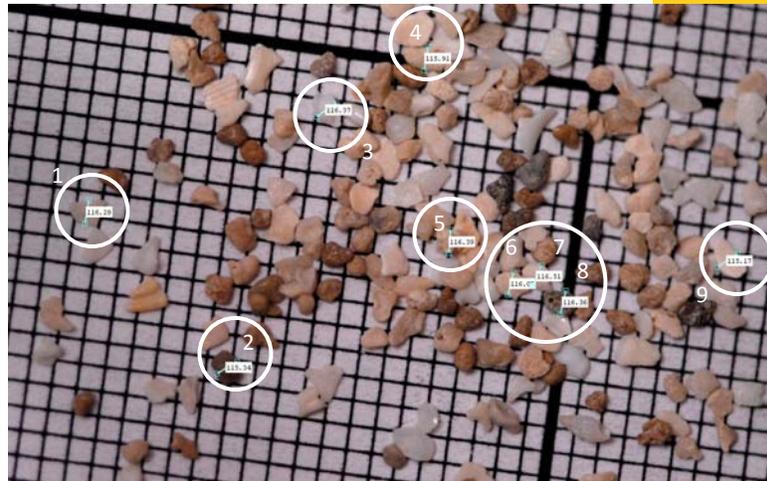
**E) PROGRESO, YUCATÁN A**

No.	D (px)	D (mm)
1	107.35	0.90967
2	107.57	0.91153
3	106.25	0.90035
4	106.90	0.90586
5	106.94	0.90619
6	107.32	0.90941
7	106.69	0.90408
8	107.76	0.91314
9	107.49	0.91086



**F) PROGRESO, YUCATÁN B**

No.	D <sub>50</sub> (px)	D <sub>50</sub> (mm)
1	116.26	0.96338
2	115.34	0.95559
3	116.37	0.96416
4	115.91	0.96031
5	116.39	0.96429
6	116.07	0.96164
7	116.51	0.96529
8	158.06	1.30294
9	157.65	1.29956



**G) PUNTA BRAVA 2**

No.	D <sub>50</sub> (px)	D <sub>50</sub> (mm)
1	159.05	1.31110
2	158.47	1.30632
3	158.99	1.31061
4	159.35	1.31358
5	159.19	1.31226
6	160.41	1.32231
7	160.92	1.32652
8	158.06	1.30294
9	157.65	1.29956

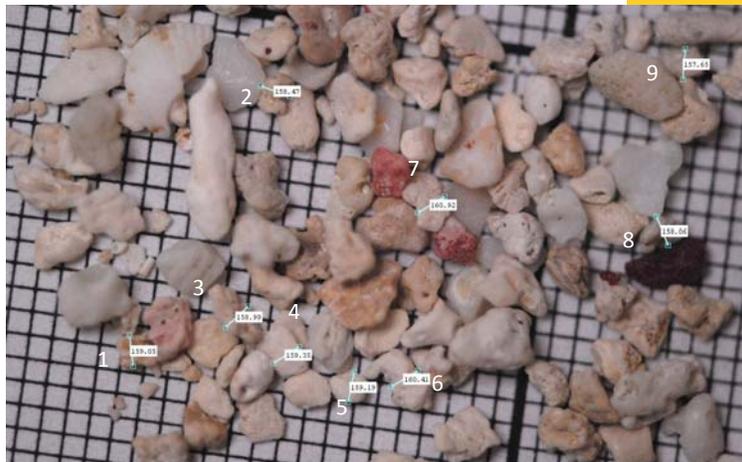


Fig. 2.5 Tablas e imágenes donde se ubican los granitos y su D50 correspondiente, para el caso de A) Akumal 2 y B) Isla Mujeres, se requirió de un zoom en la computadora del 200% para determinarlo (aunado al proporcionado por la cámara). La escala en cada fotografía aquí mostrada difiere de las originales.

**2.3.3 Resultados de la prueba de velocidad de caída**

A partir de los granos seleccionados se inició la prueba de velocidad de caída del sedimento. Para el caso de granos con el D<sub>50</sub> inferior a los 0.3 mm (casos específicos: Akumal 2 e Isla Mujeres), se decidió colocar la nube de sedimentos en la superficie del agua del recipiente y con un ligero toque en ésta se rompió la tensión superficial, observándose su recorrido con la videocámara.

Lo descrito en el párrafo anterior se hizo tras realizar una prueba con un grano independiente de Isla Mujeres (grano no. 9), el cual se perdió en el recorrido y no pudo ser captado por la videocámara; de esta manera, con la nube de granos, se tendría la certeza de registrar varios granos los cuales fueron ubicados sin mayores problemas en el video, disminuyendo el riesgo de perderlos si eran arrojados uno a uno, además de la dificultad que representó romper la tensión superficial con un grano de tan pequeño tamaño colocado sobre la

superficie; aunque desgraciadamente esta técnica impide asociar a un grano en particular con su velocidad de caída correspondiente.

Para los granos con un  $D_{50}$  superior a los 0.3mm, se decidió coleccionarlos, respetando el orden que poseían, y precipitados uno a uno, pruebas que resultaron satisfactorias al registrarse en el video el recorrido de cada una de las partículas.

Tras el análisis de los videos digitales y considerando la distancia vertical para cada uno de los casos, como se señaló en la sección 2.3.1, se obtuvieron las tablas que aparecen en la siguiente página, donde se muestra el  $D_{50}$  de la partícula, con el tiempo requerido para recorrer la distancia vertical, y su velocidad. Se omiten en dichas tablas los diámetros para el caso de Akumal 2 e Isla Mujeres por las razones ya antes expuestas.

Tabla 2.5  $D_{50}$ , tiempo- distancia de recorrido y velocidad de caída de los sedimentos, (datos experimentales).

AKUMAL 2	
tiempo (s)	Velocidad (m/s)
11.600	0.01293
17.800	0.00843
6.267	0.02393
9.800	0.01531
11.467	0.01308
14.533	0.01032
16.167	0.00928
19.330	0.00776
21.800	0.00688

\*Distancia recorrida: 15 cm

CLUB REGINA, CANCÚN		
$D_{50}$ (mm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)
0.38940	2.833	0.05295
0.39161	2.700	0.05556
0.39093	3.167	0.04736
0.39067	3.399	0.04413
0.38829	2.533	0.05922
0.38931	2.233	0.06717
0.38974	3.133	0.04788
0.39084	4.133	0.03629
0.39161	2.033	0.07378

\*Distancia recorrida: 15 cm

PROGRESO, YUCATÁN A		
$D_{50}$ (mm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)
0.90967	2.466	0.08110
0.91153	1.467	0.13633
0.90035	2.167	0.09229
0.90586	2.000	0.10000
0.90619	1.700	0.11765
0.90941	1.967	0.10168
0.90408	1.900	0.10526
0.91314	1.500	0.13333
0.91086	1.600	0.12500

\*Distancia recorrida: 20 cm

PUNTA BRAVA 2		
$D_{50}$ (mm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)
1.31110	2.200	0.11364
1.30632	1.833	0.13639
1.31061	2.467	0.10134
1.31358	1.800	0.13889
1.31226	2.433	0.10275
1.32231	1.533	0.16308
1.32652	2.567	0.09739
1.30294	1.600	0.15625
1.29956	1.700	0.14706

\*Distancia recorrida: 25 cm

ISLA MUJERES	
tiempo (s)	Velocidad (m/s)
6.267	0.02393
5.329	0.02815
7.833	0.01915
3.833	0.03913
6.033	0.02486
6.133	0.02446
6.400	0.02344
5.467	0.02744
---	---

\*Distancia recorrida: 15 cm

HOLBOX		
$D_{50}$ (mm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)
0.48477	3.367	0.05940
0.48879	4.467	0.04477
0.48879	2.733	0.07318
0.48650	5.800	0.03448
0.48633	2.433	0.08220
0.48502	2.600	0.07692
0.48669	2.633	0.07596
0.48793	3.400	0.05882
0.48710	4.092	0.04888

\*Distancia recorrida: 20 cm

PROGRESO, YUCATÁN B		
$D_{50}$ (mm)	tiempo (s)	Velocidad (m/s)
0.96338	2.600	0.07692
0.95559	1.533	0.13046
0.96416	2.967	0.06741
0.96031	2.200	0.09091
0.96429	1.733	0.11541
0.96164	2.400	0.08333
0.96529	2.200	0.09091
1.30294	1.700	0.11765
1.29956	2.600	0.07692

\*Distancia recorrida: 20 cm

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 RESUMEN DE LOS RESULTADOS

##### 3.1.1 Resultados del $D_{50}$ de las partículas

El  $D_{50}$  de las partículas fue obtenido de manera experimental tomando como referencia el señalado tras realizar el análisis granulométrico; sin embargo, dada la variación del tamaño de los granos, resulta prácticamente imposible encontrar un conjunto que posea el  $D_{50}$  teórico. De esta manera, de los granos seleccionados se decidió obtener la media de los diámetros seleccionados para cada muestra, calculándose además la desviación estándar para observar qué tan significativo es el error obtenido al realizar la selección de granos de la muestra de cada sitio.

En la Tabla 3.1, se señala el  $D_{50}$  promedio integrado por los 9 granos para cada una de las muestras consideradas (8 en el caso de Isla Mujeres), así como la desviación estándar obtenida del conjunto de datos. Igualmente se incluye el  $D_{50}$  conseguido con la granulometría, con motivo de hacer notar las pequeñas diferencias entre ambos, diferencia que se tomó en cuenta para obtener los nuevos valores de velocidad de caída.

Se calcularon únicamente los errores absolutos y errores relativos obtenidos en cada una de las muestras con respecto al diámetro nominal ya que es la única variación que se tiene (una vez caracterizado el conjunto de granos con el diámetro promedio y su desviación estándar). Los resultados de dichos análisis se muestran en la misma Tabla 3.1, en sus últimas dos columnas.

Para el caso de la muestra de Progreso, Yucatán A, no existe un  $D_{50}$  teórico con el cual comparar puesto que la selección del diámetro se hizo con el fin de comparar con arena de un mismo sitio y con las mismas características, la variación producida por un pequeño cambio del diámetro de la partícula (0.0546mm) en la velocidad de caída, así como los factores involucrados en la misma.

Tabla 3.1  $D_{50}$  experimental y  $D_{50}$  de granulometría.

CLASE	MUESTRAS	$D_{50}$ experimental (mm)	$\sigma$ (mm)	$D_{50}$ teórico (mm)	Err. Abs. (mm)	Err. Rel. %
1	Akumal 2	0.11460	0.00138	0.11422	0.00038	0.33159
	Isla Mujeres	0.21907	0.00173	0.21673	0.00234	1.06815
	Club Regina	0.39027	0.00107	0.39001	0.00026	0.06662
2	Holbox	0.48688	0.00137	0.48604	0.00084	0.17253
3	Progreso, Yucatán a	0.90683	0.00385	---	---	---
	Progreso, Yucatán b	0.96143	0.00378	0.96083	0.00060	0.06241
4	Punta Brava 2	1.31169	0.00810	1.30940	0.00229	0.17458

A partir de los datos mostrados en la Tabla 3.1, se puede observar que el error obtenido ya sea absoluto o relativo es muy pequeño, con lo que se tiene una buena selección en el conjunto de granos para cada sitio elegido; no obstante, dicha variación, por más pequeña que

sea, sí influye en la obtención de datos teóricos de la velocidad por lo cual requiere ser mínima, especialmente para fines de decidir qué formulación teórica se asocia mejor al comportamiento presentado experimentalmente pues las variaciones entre las expresiones resultan para algunos casos muy pequeña, motivo por el cual se hizo la consideración del cambio del  $D_{50}$  obtenido con la granulometría por el obtenido experimentalmente, y asegurar una congruencia con los datos experimentales y los teóricos.

Si en determinado caso se presenta una mayor variación, en error absoluto, de los granos de Isla Mujeres y de Punta Brava 2, se acepta dicho error considerando que alcanzar una visibilidad cercana a los 0.002 mm resulta imposible con el equipo empleado para estas pruebas, especialmente por la resolución que se requiere. La variación en el error relativo de estos dos sitios se acentúa más en los granos de Isla Mujeres debido a su tamaño de grano el cual hace que la precisión y la exactitud en cuanto a la medición de estos granos tomen un lugar muy importante para su análisis; no obstante, un error cercano al 1% es un error bastante aceptable para las pruebas experimentales aquí realizadas, al considerar la dificultad que representa trabajar con granos de muy pequeño tamaño.

### 3.1.2 Análisis de los resultados de la velocidad de caída de las partículas

El resumen de datos de las velocidades de caída requiere de un análisis de los datos, de tal forma que pueda ser empleado para la comparación posterior con las formulaciones existentes teóricas y no trabajar con la información cruda obtenida de las pruebas experimentales (Tabla 2.5).

Por ello, es que de los datos experimentales obtenidos de cada sitio se determinó el valor máximo y el valor mínimo de las velocidades obtenidas de cada prueba, para así trabajar dentro de dicho rango. Asimismo, se obtuvo la media, la mediana y la moda de las velocidades de cada prueba, valores que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 3.2 Media, moda y Valores extremos de la velocidad de caída; de las pruebas realizadas

CLASE	MUESTRAS	Velocidad media (m/s)	Moda* (m/s)	Mediana (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad mínima (m/s)
1	Akumal 2	0.01199	0.008, 0.013	0.01032	0.02393	0.00688
	Isla Mujeres	0.02632	0.024	0.02466	0.03913	0.01915
	Club Regina	0.05382	0.05	0.05295	0.07378	0.03629
2	Holbox	0.06162	0.059	0.05940	0.08220	0.03448
3	Progreso, Yucatán A	0.011029	0.10, 0.13	0.10526	0.13633	0.08110
	Progreso, Yucatán B	0.09444	0.091	0.09091	0.13046	0.06741
4	Punta Brava 2	0.12853	0.10	0.13639	0.16308	0.09739

\*La moda se obtuvo dejando la velocidad hasta un valor de milésimas y en caso de no obtener algún valor, hasta centésimas.

A partir de un análisis más detallado de los datos a partir de su media, su moda y su mediana, y que se presentan en las secciones siguientes (3.1.2.1 a 3.1.2.3), la conclusión a la que se llegó fue la de recurrir al empleo de la mediana como valor de referencia, la cual es mejor que la utilización de la moda o la media, especialmente por la baja sensibilidad ante los valores

extremos y a la repetición de datos con la misma frecuencia. Por lo tanto, en la tabla 3.5 que se presenta más adelante en la sección 3.1.2.3, se resumen los datos a emplear para la comparación con las formulaciones existentes.

De manera específica, para el uso de la media se encontró la problemática de un mal ajuste de la curva normal al comportamiento de los datos de cada muestra por lo que no era muy conveniente su empleo. En cuanto a la moda, la existencia de muestras bimodales hace que este parámetro no refleje la realidad de la muestra. Por lo tanto, al no considerar las desviaciones que producen los valores extremos, la mediana se hace un parámetro mucho más robusto con el cual comparar el comportamiento de las velocidades de caída de las partículas.

### 3.1.2.1 Resultados a partir de la media

El motivo de trabajar con la media de los valores, se basa en registrar un valor que represente a todos los elementos del grupo de una manera significativa, sin despreciar valor obtenido alguno. Para decidir qué tan efectivo es trabajar con dicho valor se determinó además, para establecer la tendencia y el comportamiento de los datos: la desviación estándar asociada, sesgo, curtosis y coeficiente de variación de Pearson (V), este último para poder decidir qué tan válido sería emplear la media como criterio de selección de la velocidad al observar la relación entre la desviación estándar y la media. Igualmente, con la desviación estándar y la media se puede definir la distribución normal correspondiente, como una forma de observar el comportamiento de los datos hacia un valor representativo de tendencia central (la media), comportamiento que se detalla más adelante. Así entonces, en la Tabla 3.3 se detallan los valores mencionados anteriormente.

Tabla 3.3 Media, desviación estándar, sesgo y curtosis respecto de la media, de la velocidad de caída

CLASE	MUESTRAS	Velocidad media (m/s)	$\sigma$ (m/s)	Sesgo	Curtosis	Coef. de variación (%)
1	Akumal 2	0.01199	0.00497	1.32191	0.94176	41.47
	Isla Mujeres	0.02632	0.00547	1.29159	1.13686	20.80
	Club Regina	0.05382	0.01099	0.31267	-0.73592	20.43
2	Holbox	0.06162	0.01561	-0.29518	-1.23261	25.33
3	Progreso, Yucatán A	0.011029	0.01783	0.01752	-1.19694	16.16
	Progreso, Yucatán B	0.09444	0.02046	0.47394	-1.15864	21.67
4	Punta Brava 2	0.12853	0.02373	-0.00214	-1.55520	18.47

A partir de la Tabla 3.3, se puede observar que la desviación estándar de los valores incrementa conforme mayor es la velocidad de caída. El sesgo que se tiene es en su mayoría positivo lo que quiere decir que los valores de la velocidad de los granos se encuentran con una tendencia mayor a la de la media, incrementándose dicha tendencia cuanto menor es el diámetro de la partícula, aunado al hecho de que se apuntala la curva de frecuencias más en estos casos, lo cual quiere decir que existen extremos con valores muy altos que hacen que la gráfica se desplace hacia ellos, caso que no ocurre con las muestras de tamaño de grano más grandes.

Sin embargo, al observar el coeficiente de variación, la mayoría de las muestras toman un valor alrededor del 20%, disparándose dicha variación para el caso de Akumal 2, donde sí se percibe una gran variación en las velocidades de las partículas elegidas al obtenerse prácticamente el doble de variación que el resto de las muestras.

Para poder emplear de mejor manera la media como punto de comparación, como se había mencionado antes, es conveniente observar cómo se comportan los valores respecto a la distribución Normal, la cual se construye a partir de los datos mostrados en la tabla 3.3, y dividiendo el grupo de datos en 5 clases. Se elige la distribución normal ya que lo que se busca es una tendencia central de los datos que represente al fenómeno de la velocidad de caída, por las características de las pruebas realizadas no existen razones que induzcan a buscar valores con tendencia hacia los extremos, situación de las distribuciones de Weibull y Gumbel, o con tendencia hacia un extremo en particular, caso de la distribución Ji- cuadrada, Exponencial, Gamma, F de Fischer (con tendencia al extremo inferior) o la distribución Log normal (con tendencia al extremo superior).

Las gráficas que se muestran a continuación para cada uno de los sitios de las muestras, señalan el histograma de frecuencias y, en rojo, la curva de la distribución normal, para observar el comportamiento de los datos de velocidad de caída hacia un valor central.

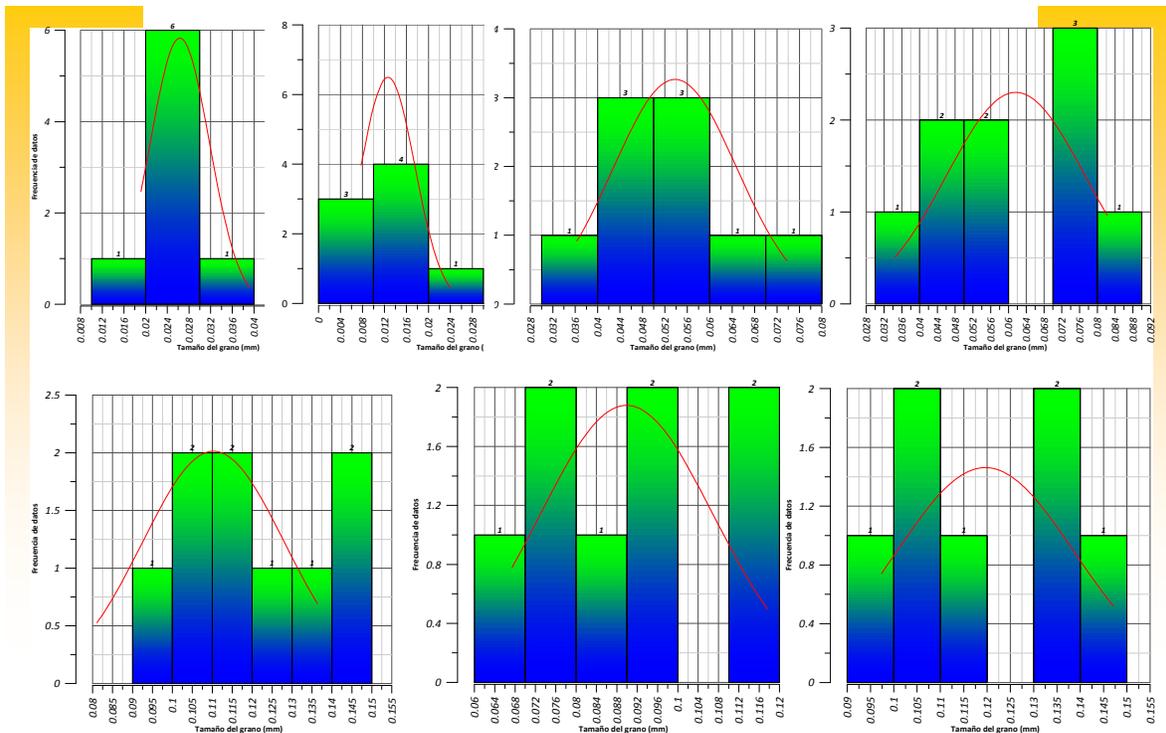


Figura 3.1 Ajuste de los datos a la distribución normal considerando la media y la desviación estándar de la Tabla 3.3. En el primer renglón, de izq. a der.: Akumal 2, Isla Mujeres, Club Regina, Holbox; en el segundo renglón, de izq. a der.: Progreso A, Progreso B, Punta Brava 2.

Con la Figura 3.1, se puede deducir que la media está siendo sensible ante valores extremos de la muestra por lo que es conveniente revisar la moda y la mediana como elementos más robustos y no tan sensibles a dichos valores atípicos.

### 3.1.2.2 Resultados a partir de la moda

Igualmente, se decidió calcular la moda pues en caso de tener valores con una mayor frecuencia de ocurrencia, podría pensarse en la caracterización de la muestra a partir de ello, como es el caso específico de Akumal 2; no obstante, al tener un comportamiento bimodal en el caso de Akumal 2 y de Progreso, Yucatán A, no se puede establecer un criterio para decidir cuál de las modas que se presenta es la más válida para el conjunto de datos. Es principalmente por esta razón que la moda queda descartada para emplearse en la comparación con las velocidades teóricas de caída del sedimento.

Aunado a lo anterior, en el caso de aquellos sitios con un comportamiento unimodal, el ajuste a la distribución normal es similar al presentado en la Figura 3.1, esto se deduce al comparar los resultados mostrados en la Tabla 3.3 y la Tabla 3.4, que en general presentan un incremento del coeficiente de variación y del sesgo de los datos, esto último reflejado en una gran influencia de los valores extremos en la distribución.

Tabla 3.4 Moda, desviación estándar, sesgo y curtosis respecto de la moda, de la velocidad de caída

CLASE	MUESTRAS	Moda (m/s)	$\sigma$ (m/s)	Sesgo	Curtosis	Coef. de variación (%)
1	Akumal 2	0.008, 0.013	---	---	---	---
	Isla Mujeres	0.024	0.00595	2.05994	2.34417	22.81
	Club Regina	0.05	0.01164	1.17680	-0.26354	21.99
2	Holbox	0.059	0.01583	0.20524	-1.35504	26.43
3	Progreso, Yucatán A	0.10, 0.13	---	---	---	---
	Progreso, Yucatán B	0.091	0.02075	0.94227	-0.79638	22.49
4	Punta Brava 2	0.10	0.03711	1.39705	-2.75834	23.73

\*La moda se obtuvo dejando la velocidad hasta un valor de milésimas y en caso de no obtener algún valor, hasta centésimas.

### 3.1.2.3 Resultados a partir de la mediana

La mediana de la muestra es de utilidad para determinar el punto central de un conjunto de datos, quedando definida al dejar el 50% de los datos antes y después de ésta, siempre y cuando el conjunto de datos se encuentre ordenado de menor a mayor. La ventaja principal del uso de la mediana es su resistencia a ser afectada por la presencia de valores extremos en cuanto a su valor numérico se refiere, lo cual no sucede con la media, aunado al hecho de ser un valor único, problema hallado al emplear la moda. De igual manera, el empleo de la mediana considera en su determinación a todo el conjunto de datos recolectados, sin que la dispersión de los mismos la afecte sobremanera.

Para hacer el análisis con base en la mediana, se hizo el estudio por medio de una gráfica de caja y bigotes (box and whisker plot) que es la que se muestra en la Figura 3.2. Donde de manera gráfica se representan los valores máximos y mínimos de la muestra, así como los cuartiles del conjunto de datos, estos últimos dividen al mismo conjunto de datos ordenado en 4 partes iguales, conteniendo cada una de las partes un número igual de valores. Se señala en la gráfica con una línea horizontal al interior de la caja, el valor de la mediana del conjunto de

velocidades de caída del sitio muestral; al dividir el conjunto de datos ordenado de velocidades de caída de cada sitio en 4 partes iguales, la caja hace referencia a los valores que se encuentran al interior de las dos partes centrales, concentrándose en ella el 50% del total de los datos de velocidad de caída con tendencia central. El resto de los datos que no se ubican dentro de la caja, se señalan con los llamados “bigotes”, siendo los extremos de éstos, los valores máximos y mínimos de velocidades de caída del conjunto analizado.

El empleo de ésta gráfica ilustra de muy buena forma el comportamiento de los datos y sus variaciones a través del agrupamiento de los datos. Muestra con claridad el rango de velocidades dentro del cual se trabaja, así como la concentración de los datos dentro de cierto intervalo, sin que éste se vea influenciado por los valores de datos extremos o de gran variación.

En la gráfica se muestran los sitios de análisis, colocados de izquierda a derecha en función de su diámetro, quedando a la izquierda los de menor diámetro. En el eje de las ordenadas se colocó la velocidad de caída, percibiéndose un incremento de ésta a medida que se incrementa el diámetro.

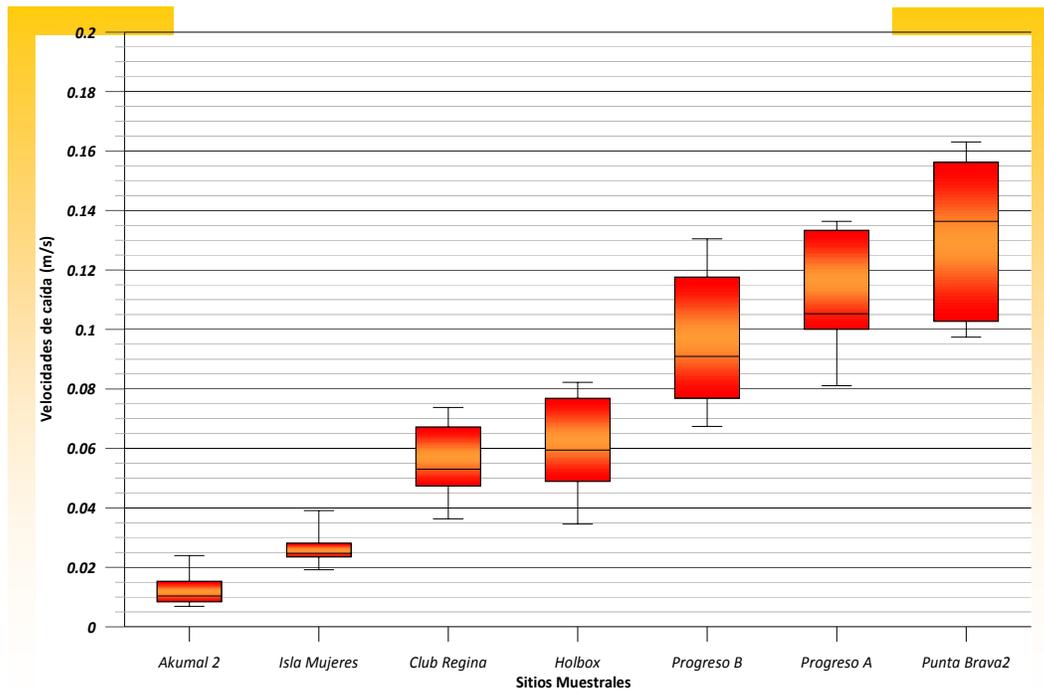


Figura 3.2 Gráfica de caja y bigotes para cada uno de las muestras elegidas

La ampliación del rango de velocidades cuando el diámetro aumenta está en función de la exactitud y la precisión requerida para analizar cada una de las muestras, es decir, existe una relación proporcional entre la variación que se obtenga en las mediciones y la precisión y exactitud que se requiere para medirlas, no debe existir una gran oscilación de los valores cuando se trabaja con partículas muy pequeñas, ya que los errores relativos resultarían grandes, mientras que para el caso de partículas mayores la variación puede aumentar, sin llegar a exageraciones. Por ejemplo, para el caso de Akumal 2, con un diámetro ligeramente superior a 0.1 mm, la exactitud y la precisión de los valores debe ser mucho mayor que la requerida a

Punta Brava 2, con un diámetro 12 veces superior al de Akumal 2; esto debido a que el rango de datos de velocidad de caída debe ser congruente con el orden de magnitudes que se trabaja, considerando como referencia el diámetro de la partícula.

Tras observar el comportamiento de la gráfica y de los valores que se encierran en ella, resulta mucho más adecuado trabajar con esta forma de representación de los datos, empleando a la mediana como parámetro de comparación, que con la media o la moda, por las razones ya expuestas, además de que la caja de datos para cada muestra, permite obtener un rango de datos de velocidades experimentales con tendencia central que sirve para realizar la comparación con las formulaciones teóricas.

Con el fin de determinar los límites en forma numérica de la gráfica mostrada en la figura 3.2, valores con los cuales se trabajará en la comparación con las formulaciones existentes, se decidió construir la Tabla 3.5, donde se marcan los límites de la caja correspondientes al primer y al tercer cuartil, así como los valores de los extremos externos de los bigotes que corresponden a la velocidad máxima de caída, y a la mínima.

*Tabla 3.5 Mediana, valores máximos y mínimos, primer y tercer cuartil.*

CLASE	MUESTRAS	Mediana (m/s)	Primer cuartil (m/s)	Tercer Cuartil (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad mínima (m/s)
1	Akumal 2	0.01032	0.00843	0.01308	0.02393	0.00688
	Isla Mujeres	0.02466	0.02381	0.02761	0.03913	0.01915
	Club Regina	0.05295	0.04736	0.05922	0.07378	0.03629
2	Holbox	0.05940	0.04888	0.07596	0.08220	0.03448
3	Progreso, Yucatán A	0.10526	0.10000	0.12500	0.13633	0.08110
	Progreso, Yucatán B	0.09091	0.07692	0.11541	0.13046	0.06741
4	Punta Brava 2	0.13639	0.10275	0.14706	0.16308	0.09739

### 3.2 COMPARACIÓN CON FÓRMULACIONES EXISTENTES

A partir de los resultados obtenidos y de su análisis, resumidos en la sección anterior, se decidió comparar cada muestra con cada una de las formulaciones existentes, para así poder concluir en la formulación que mejor representa el comportamiento de la velocidad de caída de las arenas de la Península de Yucatán.

Un primer criterio de comparación se basa en el empleo de la mediana y en la caja de datos, descritos en la sección 3.1.2.3 y que son mostrados de manera gráfica en la Figura 3.2. En la Tabla 3.6, se establecen las velocidades teóricas obtenidas con las formulaciones para cada uno de los sitios de análisis, empleando para su cálculo el  $D_{50}$  experimental para cada muestra obtenido en la sección 3.1.1; igualmente, en la misma tabla se registran los valores que cumplen con estar dentro del intervalo del primer y tercer cuartil de las velocidades experimentales obtenidas para cada sitio señaladas en la Tabla 3.5 del apartado anterior.

Un segundo criterio de comparación es a través de emplear a la mediana como único medio de comparación para cada formulación, obteniéndose el error relativo respecto a ella.

Las formulaciones que obtengan un error relativo promedio más bajo, serán aquellas que poseen un mejor comportamiento general ante las distintas variaciones de diámetros.

### 3.2.1 Primer criterio de comparación

Estableciendo como primer criterio el encontrarse dentro de la caja de datos definida por la Figura 3.2 y cuyos valores numéricos se registran en la Tabla 3.5 en las columnas correspondientes al primer y tercer cuartil, se tiene que ninguna de las formulaciones satisface completamente todos los rangos de tamaño y forma de grano; sin embargo, las formulaciones que se aproximan en mayor número son las de: Camenen, Cheng y Julien.

Las tres formulaciones señaladas satisfacen este criterio para 6 de los 7 sitios analizados en este trabajo, lo que representa el 85.72% del total. Aunque apenas son 7 los sitios registrados, se percibe ya una diferencia entre las formulaciones comparadas en este trabajo; no obstante, la realización de un mayor número de pruebas confirmaría los resultados aquí presentados.

Tabla 3.6 Tabla de velocidades de caída teóricas, en verde se señalan aquellas que se encuentran dentro del primer y tercer cuartil del rango de velocidades experimentales de cada sitio.

FORMULACIÓN	VELOCIDAD EN CADA SITIO (m/s)						
	Akumal 2	Isla Mujeres	Club Regina	Holbox	Progreso A	Progreso B	Punta Brava 2
Jiménez- Madsen	0.0079217	0.025791	0.056816	0.066301	0.11790	0.11795	0.14432
Ahrens	0.0086804	0.026099	0.055417	0.065156	0.12478	0.12484	0.15120
Camenen	0.0075212	0.024368	0.053118	0.058287	0.10784	0.10789	0.11336
Chang Liou	0.0077313	0.026011	0.058028	0.067618	0.11730	0.11735	0.14107
Cheng	0.0083714	0.026048	0.054708	0.06326	0.11183	0.11188	0.13788
Hallermier	0.0090185	0.026323	0.053897	0.06406	0.12938	0.12942	0.15052
Julien	0.0085074	0.02877	0.058759	0.066523	0.10819	0.10824	0.12925
Rubey	0.0090689	0.025598	0.057242	0.066798	0.13596	0.13599	0.15484
Soulsby	0.0078755	0.028142	0.060727	0.069545	0.11588	0.11593	0.13914
Swamee Ojha	0.0082915	0.024873	0.061181	0.070145	0.16959	0.16971	0.21569
Van Rijn	0.0077707	0.027674	0.059497	0.068082	0.11325	0.11330	0.15769
Zanke	0.0077707	0.027674	0.059497	0.068082	0.11325	0.11330	0.13593

A partir de la Tabla 3.6, se observa que las formulaciones poseen ciertos intervalos de tamaño de grano donde funcionan mejor, los casos más relevantes son: Zanke, Van Rijn, Soulsby, que tienen un mejor acercamiento a los valores experimentales para tamaños de grano ligeramente menores a 0.5 mm hasta los granos de tamaño más grueso probados que corresponden a un  $D_{50}$  cercano a 1.3 mm; Rubey, Hallermier, que poseen un mejor comportamiento para granos de tamaño menor a los 0.5 mm.

### 3.2.2 Segundo criterio de comparación

De las tres formulaciones mencionadas, se les aplica un segundo criterio para observar cuál de ellas, de manera más específica, posee un comportamiento mejor. Por ello, se les compara, por medio del error relativo, a cada una de las velocidades con la mediana obtenida a

partir de los datos experimentales. Se toma al valor experimental como el valor de referencia para la obtención del valor relativo. Así pues, los resultados se concentran en la siguiente tabla:

Tabla 3.7 Tabla de errores relativos obtenidos para cada formulación y para cada uno de los sitios analizados; en verde se señalan las líneas que satisfacen el primer criterio.

FORMULACIÓN	ERROR RELATIVO (%)							
	Akumal 2	Isla Mujeres	Club Regina	Holbox	Progreso A	Progreso B	Punta Brava 2	Promedio
Jiménez- Madsen	23.25	4.58	7.31	11.62	12.01	29.75	5.82	<b>13.47</b>
Ahrens	15.90	5.83	4.66	9.69	18.54	37.32	10.86	<b>14.69</b>
Camenen	<b>27.13</b>	<b>1.19</b>	<b>0.32</b>	<b>1.87</b>	<b>2.45</b>	<b>18.68</b>	<b>16.88</b>	<b>9.79</b>
Chang Liou	25.09	5.48	9.60	13.83	11.44	29.09	3.43	<b>13.99</b>
Cheng	<b>18.89</b>	<b>5.63</b>	<b>3.33</b>	<b>6.50</b>	<b>6.24</b>	<b>23.07</b>	<b>1.09</b>	<b>9.25</b>
Hallermier	12.62	6.74	1.79	7.85	22.91	42.36	10.36	<b>14.95</b>
Julien	<b>17.57</b>	<b>16.66</b>	<b>10.98</b>	<b>11.99</b>	<b>2.78</b>	<b>19.06</b>	<b>5.23</b>	<b>12.04</b>
Rubey	12.13	3.80	8.11	12.45	29.16	49.59	13.53	<b>18.40</b>
Soulsby	23.70	14.12	14.69	17.08	10.09	27.52	2.02	<b>15.60</b>
Swamee Ojha	19.67	0.86	15.55	18.09	61.11	86.68	58.14	<b>37.16</b>
Van Rijn	24.71	12.22	12.37	14.62	7.59	24.63	15.62	<b>15.96</b>
Zanke	24.71	12.22	12.37	14.62	7.59	24.63	0.34	<b>13.78</b>
Mediana	0.01032	0.02466	0.05295	0.05940	0.10526	0.09091	0.13639	
Factor de forma	0.72169	0.71932	0.72158	0.55688	0.5915	0.5915	0.47365	

Los resultados mostrados en la Tabla 3.7, son congruentes con los obtenidos en la Tabla 3.6, mostrándose de manera general que para las formulaciones de Camenen, Cheng y Julien, se tienen los errores relativos promedios más bajos, destacándose especialmente Camenen y Cheng, ya que Julien proporciona un error relativo promedio mayor al 10%.

Este segundo criterio da más cuenta de cuál es la variación de los datos en torno a un valor central experimental que es la mediana. De donde se descubre, por ejemplo que Julien pese a encontrarse dentro del intervalo central de datos experimentales, al momento de compararse con respecto a la mediana produce errores más grandes, que sin estar fuera de rango, sí representan valores más elevados de error a comparación de las formulaciones de Cheng y de Camenen que poseen una diferencia entre ellas de 0.5%.

Por lo tanto, de este análisis se desprende que de las 12 formulaciones teóricas empleadas para su comparación, 2 de ellas, Cheng y Camenen presentan un error relativo promedio del 9.25 y 9.79%, respectivamente, y con ello un mejor comportamiento ante la gama de diámetros trabajados y de la forma de las partículas. No obstante, para determinados rangos de diámetro de las partículas existen formulaciones que se comportan de mejor manera que las arriba escritas, y aún de manera más detallada, para ciertos sitios en particular.

### 3.3.3 Particularidades de las formulaciones de mejor comportamiento

Tras aplicar los dos criterios de comparación y obtener para la totalidad de las muestras, las formulaciones que mostraron un comportamiento aceptable fueron las de Cheng y Camenen, por ello es conveniente realizar un análisis de estas expresiones y observar los

parámetros que las diferencian de las del resto. Entender las componentes de estas formulaciones permite, ya obtenidos los resultados y efectuadas las comparaciones, cuál es su importancia y grado de afectación en la velocidad de caída de las partículas.

Si bien todas las formulaciones parten de la velocidad de caída de una esfera considerando el equilibrio entre la fuerza gravitacional y la resistencia de arrastre en un fluido en reposo, existen variaciones entre ellas debido a que algunas expresiones buscan tomar en cuenta la forma del sedimento y otras, solamente se formularon de forma empírica, buscando ajustarse a los resultados que les dieron origen.

De esta manera, para la formulación hecha por Cheng, (ver Tabla 1.2) el principal elemento distintivo de la expresión respecto de otras, es la consideración del índice de flotación de Arquímedes (A) como un elemento influyente de la velocidad de caída sobre otros parámetros, relacionando además al coeficiente de arrastre con el número de Reynolds y éste a su vez con el mismo índice de flotación de Arquímedes. Por los resultados obtenidos, para los granos trabajados presenta un buen ajuste, siendo los rangos de 0.02 a 0.13 mm de  $D_{50}$  sobre los que se obtienen los mejores resultados, aunque al no considerar un factor de forma propio de cada partícula analizada, y generalizando un valor igual a 0.7, los resultados no son tan satisfactorios como la formulación de Camenen, especialmente para arenas cuya forma se aproxima al de una hojuela (caso de Progreso, Yucatán).

La formulación de Camenen considera, de manera muy importante el factor de forma de Corey, que depende de la medición del eje de mayor longitud del grano, del de longitud intermedia y el de longitud más corta. El ajuste de esta formulación, especialmente para las arenas de Progreso, Yucatán, donde el factor de forma toma un papel importante, ya que la forma de hojuela hace que, aunque el  $D_{50}$  se incremente, la velocidad de caída disminuya, encontrándose una mayor resistencia a caer, análogo a lo que sucede al abrir un paracaídas en el aire. Dicho comportamiento solamente es considerado por esta expresión, lo que la hace una expresión bastante competitiva en este sentido. No obstante lo anterior, la utilización del factor de forma no suele ser una tarea tan trivial, ya que una correcta determinación de éste proporcionará resultados más cercanos a los experimentales; pero en caso de no ser bien estimado dicho factor, se conducirá a grandes errores como lo fue el caso de Akumal 2, donde el tamaño del grano (ver Figura 2.5) hace muy complicado la obtención de las longitudes de los ejes, aún considerando que se trabajó en su obtención con una cámara digital con micro-lentes. De igual forma, en la expresión que deriva de Camenen, se toma en cuenta el parámetro de la redondez de la partícula, cuya determinación se hace a partir del CSF y del nomograma de Dieriech, este último presenta valores del parámetro de redondez de la partícula para determinados valores del CSF, por lo que el valor de dicho parámetro implica fluctuaciones en su determinación para valores no específicas explícitamente en el nomograma. De esta manera, se concluye que para los granos tratados, Camenen tienen una muy buena aproximación con los resultados experimentales obtenidos aquí a excepción de Akumal 2, donde el error como ya se dijo se adjudica al CSF y a su dificultad para obtenerlo.

Las dos formulaciones anteriores concentran un error no mayor al 10% cada una, por lo que resultan, a comparación de las demás y para el rango de diámetros manejados, las mejores dentro de las 12 formulaciones iniciales presentadas, notándose la importancia de considerar tanto el índice de flotación de Arquímedes, como el factor de forma de la partícula.

Una tercera formulación, correspondiente a la de Julien, si bien posee un error relativo del 12.04%, los resultados que proporciona satisficieron las condiciones del primer criterio de comparación de buena manera, por lo que es conveniente analizar su fundamento y la similitud con otras formulaciones. El parámetro de gobierno en dicha expresión es esencialmente el  $D_{50}$  de la partícula, sin dejar de lado la densidad de la partícula o la viscosidad cinemática del fluido; sin embargo, las formulaciones de Julien, Zanke y Soulsby, fueron obtenidas de manera experimental, ajustando al conjunto de datos que emplearon, por lo que las correcciones que requieren están en torno al número de pruebas que se llevaron a cabo para obtener las expresiones correspondientes.

### 3.3 RECOMENDACIONES

A partir del análisis de los resultados realizado en la sección anterior, es conveniente hacer unas recomendaciones que conduzcan a la consideración de la mejor formulación de velocidad de caída que represente las condiciones del sitio en el que se esté trabajando, y no inventar o suponer datos que no correspondan a la realidad.

En la Tabla 3.8, se establecen los rangos de diámetro de la partícula y las formulaciones que mejor se adaptan a ello, tabla que se encuentra en función de las clases en que se ubicaron cada una de las muestras a partir del análisis estadístico de selección de las muestras. Para cada rango de diámetro se muestra una gama de formulaciones que son las que mejor se adecuan al tamaño del grano del que se trata, y se mencionan en orden de mayor a menor aproximación al resultado experimental.

De igual forma, para los sitios analizados, una formulación se adapta mejor al sitio observado y, dado que se buscó realizar una zonificación geográfica de los sitios, se puede emplear dicha formulación conforme al sitio estudiado y un área de influencia, siempre y cuando exista congruencia en el tamaño de grano, relación que se mostró en la Tabla 3.8, y de otros factores como son la forma de la partícula o la densidad de la misma. En la Tabla 3.9 se presenta la relación del sitio y las formulaciones de mayor a menor proximidad.

Las tablas presentada anteriormente, sólo sirven de referencia en la orientación de qué formulación podría ajustarse mejor a la zona de estudio y por tanto llegar a emplearse; sin embargo, para obtener una mayor certeza de un sitio en particular, se recomienda realizar los análisis correspondientes con la arena del sitio, ya que como se ha visto a lo largo de este trabajo, son múltiples los factores que intervienen en el fenómeno de velocidad de caída.

Tabla 3.8 Tamaño de grano y formulación que se mejor se adecua a éste.

CLASE	$D_{50}$ (mm)	Formulación de velocidad de caída
1	0.10 - 0.40	Hallermier, Rubey, Ahrens, Cheng, Camenen
2	0.40 - 0.70	Camenen, Cheng, Hallermier, Ahrens
3	0.70 - 1.0	Camenen, Julien, Cheng, Zanke
4	1.0 - 1.5	Zanke, Cheng, Soulsby, Chang Liou
**	Para todo el rango de 0.1 a 1.5 mm	Cheng, Camenen

Tabla 3.9 Relación de los sitios y las formulaciones que mejor se adecuan.

CLASE	SITIO	Zona de influencia	Formulación de velocidad de caída
1	Akumal 2	Playa del Carmen a Tulum	Rubey, Hallermier
	Isla Mujeres	Cancún, Quintana Roo	Camenen, Rubey, Cheng
	Club Regina	Cancún, Quintana Roo	Camenen, Cheng
2	Holbox	Zonas cercanas a la Isla de Holbox	Camenen, Cheng
3	Progreso, Yucatán	Noroeste del estado de Yucatán	Camenen, Julien
4	Punta Brava 2	Cancún a Playa del Carmen	Zanke, Soulsby, Julien

Los resultados obtenidos son solamente preliminares y requerirán de ser ajustados tras la realización de las pruebas al resto de las muestras recolectadas a todo lo largo de la costa del norte de la Península de Yucatán, que por los alcances de esta tesis, sólo fueron seleccionadas un conjunto de las mismas que intentase representar al total, proporcionando una idea inicial para el desarrollo posterior de las pruebas así como de su aprovechamiento para identificar los fenómenos relacionados con la velocidad de caída, y en última instancia, con el transporte de sedimentos.

De manera similar se hace hincapié en continuar las pruebas empleando la tecnología disponible para evitar al máximo los errores humanos que conduzcan a conclusiones equivocadas. La resolución de los instrumentos de medición, y la realización de un mayor número de pruebas, hará que los resultados que se obtengan posean una mayor validez y representatividad para su uso posterior.

## 4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Durante el desarrollo de este trabajo, se ha resaltado la importancia de establecer la velocidad de caída de los sedimentos por medio de una formulación que se vea ratificada por los resultados experimentales de las partículas, en este caso, de una región del país, como lo es la Península de Yucatán, y aún más a detalle, para un sitio en particular bajo determinadas características en sus granos.

La intención de poseer algún modelo matemático que represente el fenómeno, tiene relevancia al momento de obtener de manera sencilla y práctica el valor de la velocidad de caída, valor que resulta como base para iniciar la descripción de los fenómenos relativos al transporte de sedimentos. En el capítulo correspondiente al marco teórico, se observó la relación de la velocidad de caída con las propiedades de las partículas y del fluido, pero a su vez, la relación que tiene ésta con la suspensión misma de los sedimentos, con la forma teórica del fondo marino, y a partir de dichas relaciones, con los esfuerzos cortantes críticos en el fondo marino que inician los procesos de suspensión, para llegar de esta manera a definir de manera completa el transporte de sedimentos.

Los análisis de los resultados, permitieron obtener las formulaciones que mejor ajustan a todo el rango de diámetros de partículas: Cheng y Camenen, con un error respecto de los resultados experimentales menor al 10%, valor aceptable puesto que da una idea inicial del comportamiento de las partículas, sin la realización de la totalidad de las pruebas, las cuales, hay que aclarar, son importantes para obtener resultados más fieles y con mayor certidumbre, así como para verificación y retroalimentación de las mismas formulaciones.

Dadas las características de cada formulación, es importante señalar los casos en que podrían emplearse las dos formulaciones escritas previamente: para casos de tipo práctico, y en el que una buena aproximación rápida sea conveniente para trabajar a partir de ella (sin la necesidad de hacer suposiciones), es la formulación de Cheng la cual resulta la más idónea para ello, ya que contempla el uso de parámetros cuya definición es rápida y muy sencilla de obtener; mientras tanto, la formulación de Camenen, arroja muy buenos resultados siempre y cuando se defina de manera correcta el factor de forma (CSF), se disponga del tiempo y del equipo para su análisis, el inconveniente de esta formulación en cuanto a su empleo, se refiere a la importancia con la cual se debe de tratar el factor de forma del sedimento; sin embargo, una buena determinación de dicho factor, permitirá obtener buenos resultados, especialmente para partículas cuya forma difiera en mucho de la forma esférica donde la conveniencia de utilizar dicha expresión se hace más evidente.

Para aquellas formulaciones que no consideran la forma de la partícula como un factor importante, pero sí el índice de flotación, se acentúa más su apego a los datos cuando la forma del sedimento es cilíndrica y el factor de forma es cercano a 0.7 (Rubey, Hallermier, Chang Liou, Ahrens, Jiménez- Madsen). Cuando el índice de flotación no es tan importante, y la partícula tiende a una forma esférica como es el caso de los sedimentos de Punta Brava 2, es recomendable el empleo de formulaciones que consideren el  $D_{50}$  como el parámetro fundamental, pues poseen una mejor aproximación a los datos experimentales aquí obtenidos (Julien, Soulsby, Zanke). El nivel de detalle del trabajo y la importancia que este posea, definirá la formulación a utilizar en función de los resultados que se quieran obtener.

Para el caso de partículas cuyo  $D_{50}$  es muy pequeño, como fue el caso de Akumal 2, se recomienda mejorar en lo posible la resolución de los instrumentos para la medición del CSF, así como el manejo de los granos de arena, ya que por sus dimensiones, la manipulación debe ser bastante delicada. También se puede optar, si se requiriese, de mejorar la metodología para llevar a cabo las pruebas como: adquirir una mayor resolución en cuadros por segundo del equipo de video, una mejor iluminación o tinte de los granos para su visibilidad al momento de la caída, un mayor ángulo de visión de la grabación, utilización de sensores, etc., quedando todo ello en función nuevamente de la relevancia, detalle, y necesidad en la calidad de los resultados esperados.

Por otro lado, si el análisis de la velocidad de caída se concentrase en un rango de tamaños de partícula muy específico en cuanto a diámetro y forma, se obtuvieron formulaciones que se adaptan mejor que otras, motivo por el cual no es conveniente generalizar los resultados obtenidos en esta tesis, pues, para alcanzar mayores grados de certidumbre, mayor representatividad y una mayor confiabilidad, será necesario realizar las pruebas a la totalidad de las muestras y en lugar de realizar una inferencia de los datos, proceder a un análisis descriptivo de los mismos, lo cual eliminará la necesidad de hacer suposiciones y generalizaciones que pudiesen ser erróneas, ejemplo de lo anterior es que para un determinado sitio, es elemental tener en cuenta que la arena cambia su tamaño dependiendo de la zona de la playa en la que se encuentre, pudiéndose encontrar arena muy fina o gruesa en el mismo sitio, correspondiéndole por tanto una velocidad de caída diferente a cada una de ellas.

Adicionalmente y sin restarle importancia se concluye, que los resultados que se presentan fueron para muestras extraídas de los sitios citados, manejándose únicamente la arena del sitio, esto es, el contenido de conchas moluscos o fragmentos de coral no fue utilizado, aun cuando la muestra del sitio las tuviera, debido al diferente manejo teórico que requieren éstos por poseer concavidades, huecos o fracturas. Lo anterior no elude la posibilidad de emplear la metodología para realizar las pruebas experimentales, ya que se tiene un control que no depende sobremanera en la persona o personas que realicen la prueba de velocidad, ni de las diferencias que existan en los elementos a ensayar, reflejando los valores más cercanos a la velocidad de caída; la única condición es tener especial cuidado al trabajar con granos de pequeño diámetro, si lo que se pretende es elegir aquellos granos que correspondan con el  $D_{50}$ , o en el caso de conchas, moluscos, fragmentos de coral, realizar la comparación de la velocidad de caída con la teoría correspondiente, para efectuar con ello un análisis considerando los factores que se vean involucrados en el fenómeno.

Cabe señalar, que varias muestras recolectadas de los diferentes sitios, el contenido de conchas, moluscos y fragmentos de coral era bastante importante, por lo que para determinar el transporte de estos sedimentos, se requiere de considerar los factores que intervienen en este fenómeno, donde seguramente la velocidad de caída juega un papel importante. Por lo tanto, se deja abierta la posibilidad de realizar pruebas que logren identificar y describir el movimiento de estas partículas y hacer notar las similitudes y las diferencias que existan con la caída de granos de arena. Igualmente, el campo se amplía al analizar de manera individual las propiedades físicas del sedimento y del fluido para ubicar cuales de ellas se involucran e influyen de mayor manera en la determinación de la velocidad de caída de sedimentos e inclusive poder generar una formulación que se adecue de manera particular a la región de la Península de Yucatán.

Por otra parte, buscar una zonificación de los resultados obtenidos, aunque fue una consideración como un criterio para seleccionar las muestras, no define por completo el comportamiento de los granos en dichas zonas, aunque sí proporciona un punto de partida en futuras pruebas y resultados.

La continuación de las pruebas en las muestras recolectadas en la Península de Yucatán, no sólo los sitios nombrados aquí, sino de más lugares pertenecientes a ella, hará que la región quede perfectamente caracterizada, y por tanto, el empleo de los datos de la velocidad de caída en el transporte de sedimentos permitirá un mejor análisis del impacto que dicho transporte ocasiona en los ecosistemas costeros, en la morfología de los ambientes, o en el desarrollo de obras costeras, entre otros. La riqueza en costas de la República Mexicana es tan grande que el análisis no debe limitarse únicamente a la Península de Yucatán, es necesario y aconsejable ampliar el análisis de las costas del país, para reconocer en ellas la capacidad de los recursos que disponen y hacer un uso adecuado de los mismos.

Es importante recordar que la velocidad de caída, como muchos otros fenómenos de la naturaleza, no es un evento aislado, que se produce en un lugar específico, es un fenómeno que se repite en diferentes ramas de la Ingeniería, en esta ocasión su aplicación fue en torno a los ambientes costeros, pero su aplicación también puede darse en ambientes de ríos, y aun más, en procesos artificiales creados por el hombre como son los desarenadores para el tratamiento de aguas residuales, por lo que el estudio de este sencillo fenómeno abre las puertas a diversas líneas de investigación que conduzcan a disminuir la incertidumbre y las suposiciones, procurando que sean éstas sustituidas por resultados y datos confiables y certeros.

La velocidad de caída es tan sólo una parte del conocimiento que se requiere para entender al ambiente, que requiere ser compilado con otros y aprovechado de manera tal, que produzca beneficios a la sociedad, traducido en obras de infraestructura o de conservación ecológica, siempre tomando en cuenta el respeto que la naturaleza merece de nuestra parte.

***“El conocimiento y el poder humano son sinónimos, puesto que la ignorancia de la causa frustra el efecto” . Francis Bacon***



## REFERENCIAS

### BIBLIOGRAFÍA

- Atlas Universal.** Reader's Digest®, Estados Unidos de América, 1992.
- Campillo Cuautli, Héctor. **Diccionario Quintana Roo Enciclopedia Regional.** Fernández Editores, México, 1988 .
- Julien, Pierre Y. **Erosion and sedimentation.** Cambridge University Press, Estados Unidos de América, 1995.
- Komar, Paul D. **Beach processes and sedimentation, 2a. edición.** Prentice Hall, Estados Unidos de América, 1998.
- Liu, Zhou. **Sediment Transport.** Laboratorio de Hidráulica e Ingeniería Costera, Universidad de Aalborg, Noruega, 2001.
- López Ramos, Ernesto. **Geología de México, Tomo III, 3a. edición.** México, 1983.
- Pérez López César. **Métodos Estadísticos con STATGRAPHICS para WINDOWS. Técnicas Básicas.** RA-MA Editorial, Madrid, 1998.
- Ruiz Martínez, Gabriel, *et al.* **Caracterización del sedimento del corredor Turístico Tulúm-Cancún.** XX Congreso Nacional de Hidráulica , Toluca, Edo. de México, México, Octubre 2008.
- Ruiz Martínez, Gabriel y Silva Casarín, Rodolfo. **Conclusiones del análisis de muestras de arena, de Septiembre 2007.** Grupo de Ingeniería de costas y puertos, II-UNAM, México, Noviembre 2007.
- Ruiz Martínez, Gabriel y Silva Casarín, Rodolfo. **Caracterización (granulometría, propiedades físicas e inicio de movimiento) de las muestras de arena, extraídas de las campañas de campo de Cancún, Quintana Roo del 2007.** Grupo de Ingeniería de costas y puertos, II-UNAM, México, Noviembre 2007.
- Selley, Richard C. **Applied sedimentology.** Academic Press, Estados Unidos de América, 2000.
- The civil engineering handbook/ Edited by W.F. Chen and J.Y. Richard Liew,** 2a. edición. CRC Press, Estados Unidos de América, 2003.

### HEMEROGRAFÍA

- Jiménez, José A. y Madsen, Ole S. **A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments,** en *Journal of Watermark, Port, Coastal and Ocean Engineering.* ASCE, Vol. 129 , Núm. 2, Marzo – Abril 2003. pp. 70- 78.

### MESOGRAFÍA

**Portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI):** <http://www.inegi.gob.mx>

Mapa Digital de México, versión 3.0 disponible en el portal de INEGI.

<http://galileo.inegi.org.mx/website/mexico/viewer.htm?sistema=1&s=geo&c=1160>

*Determinación de la Velocidad de Caída de sedimentos costeros de la Península de Yucatán, México*

Visor de Ortofotos, versión 2.0, disponible en el portal del INEGI.

<http://mapserver.inegi.org.mx/map/visortoDx/visor.html>

**Portal del Servicio Geológico Mexicano (SGM):** <http://www.sgm.gob.mx>

**Portal del Gobierno del Estado de Yucatán:** <http://www.yucatan.gob.mx>

**Portal del Gobierno del Estado de Quintana Roo:** <http://www.quintanaroo.gob.mx>

Southard, John. **Special Topics: An Introduction to Fluid Motions, Sediment Transport, and Current-generated Sedimentary Structures**, Fall 2006. (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare), <http://ocw.mit.edu> (Acceso Junio 6, 2009). License: Creative Commons BY-NC-SA.

### **CARTAS GEOLÓGICO- MINERAS**

Servicio Geológico Mexicano. Carta Geológico- Minera: Tizimín F16-7, Yucatán. Escala 1:250 000, enero 2006. Disponible en:

<http://www.sgm.gob.mx/productos/cartas/cartas250/geologia/ordcarta250.html>

Servicio Geológico Mexicano. Carta Geológico- Minera: Cancún F16-8, Quintana Roo y Yucatán. Escala 1:250 000, febrero 2006. Disponible en:

<http://www.sgm.gob.mx/productos/cartas/cartas250/geologia/ordcarta250.html>

Servicio Geológico Mexicano. Carta Geológico- Minera: Cozumel F16-11, Quintana Roo y Yucatán. Escala 1:250 000, enero 2006. Disponible en:

<http://www.sgm.gob.mx/productos/cartas/cartas250/geologia/ordcarta250.html>