



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DETERMINACIÓN DE LOS UMBRALES DE
MOVIMIENTO DE ARENAS DE LA PENÍNSULA DE
YUCATÁN

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – INGENIERÍA DE COSTAS Y RÍOS

P R E S E N T A :

JUAN CARLOS ALCÉRRECA HUERTA

TUTOR:

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

2011





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado Asignado:

Presidente: Dr. Domínguez Mora Ramón
Secretario: Dr. Mendoza Baldwin Edgar G.
Vocal: Dr. Silva Casarín Rodolfo
1er. Suplente: Dr. Pedrozo Acuña Adrián
2do. Suplente: Dr. Escalante Sandoval Carlos

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F., México.
Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F., México.

Tutor de Tesis:
Dr. Rodolfo Silva Casarín

Firma

Agradecimientos

A Dios por todas las bendiciones y dones que me ha concedido en la vida y por permitirme llegar a este momento y dedicarle estas palabras.

A mis padres Jorge Alejandro y María Luisa, que día y noche han estado a mi lado apoyándome en todo momento... gracias por su amor y comprensión incondicional.

A mi hermano Jorge con cariño.

A CONACyT por el apoyo económico brindado para el desarrollo de mis estudios de maestría por medio de la *Beca Nacional para Estudios de Posgrado* recibida, con número de registro 332841.

Con gratitud a la UNAM por la integridad de la formación que me brindó, por las experiencias, por los años vividos en ella y por el orgullo de pertenecer a ella.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín, por su confianza y apoyo a lo largo de la maestría y para el desarrollo de este trabajo. Al Dr. Edgar G. Mendoza Baldwin y al Dr. Adrián Pedrozo Acuña por su asesoría y convivencia. A mis maestros por la transmisión de sus conocimientos.

A todas las personas que me ayudaron en el desarrollo de los trabajos de campo y de laboratorio de esta Tesis. Agradezco al Ing. Jair del Valle Morales, al igual que a los compañeros del Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM por su ayuda y colaboración.

A Dulce Aline por su compañía y paciencia durante estos años. A mis amigos por las desveladas juntos y por sus palabras de apoyo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO.....	7
1.1 UMBRAL DE MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS	7
1.1.1 Velocidad de Inicio de Movimiento	
1.1.2 Velocidad de Caída	
1.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS	20
1.2.1 Granulometría y Tamaño de las Partículas	
1.2.2 Características de una Masa de Sedimentos	
1.2.2.1 Relaciones Peso-Volumen	
1.2.2.2 Características del Mezclado Sedimento-Fluido	
1.2.3 Composición del Sedimento	
1.2.3.1 Material Sedimentario Terrígeno	
1.2.3.2 Material Carbonatado Aloquímico	
1.2.3.3 Material Sedimentario Ortoquímico	
1.3 MORFOLOGÍA DE LAS PARTÍCULAS	28
1.3.1 Factor de Forma	
1.3.2 Redondez	
1.3.3 Esfericidad y Circularidad	
1.3.4 Medición de Parámetros	
2. TRABAJO DE CAMPO Y LABORATORIO.....	37
2.1 TRABAJO DE CAMPO	37
2.2 TRABAJO DE LABORATORIO	42
2.2.1 Análisis Granulométrico	
2.2.2 Estimación de las Propiedades Básicas de una muestra	
2.2.3 Estimación de las Propiedades Básicas de las partículas	
2.2.3.1 Procedimiento de Selección de Partículas	
2.2.3.2 Obtención de los Parámetros de las Partículas	
2.2.4 Pruebas de Velocidad de Caída	
2.2.5 Pruebas de Inicio de Movimiento	
3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS.....	55
3.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MUESTRAS RECOLECTAS	55
3.1.1 Tamaño del Sedimento y su Distribución en el Perfil de Playa	

3.1.2	Densidad del Sedimento, Ángulo de Reposo y su Distribución en el Perfil de Playa	
3.2	PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS PARTÍCULAS DE ARENA	60
3.2.1	Factor de Forma	
3.2.2	Diámetro Nominal	
3.2.3	Redondez	
3.2.4	Esfericidad	
3.2.5	Relación entre los Parámetros	
4.	UMBRALES DE MOVIMIENTO.....	71
4.1	VELOCIDAD DE CAÍDA	71
4.1.1	Resultados Experimentales	
4.1.2	Análisis Estadístico de los Resultados	
4.1.3	Modelación Matemática de la Velocidad de Caída	
	<i>4.1.3.1 Ajuste de Modelos Matemáticos</i>	
	<i>4.1.3.2 Modelo Matemático para la Velocidad de Caída</i>	
4.2	VELOCIDAD DE INICIO DE MOVIMIENTO	86
4.2.1	Selección de Muestras para Ensayos	
4.2.2	Resultados de las Pruebas	
4.2.3	Análisis de Resultados	
5.	ZONIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL SEDIMENTO Y UMBRALES DE MOVIMIENTO.....	97
5.1	ZONIFICACIÓN DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN	97
5.2	ZONIFICACIÓN DE LA ZONA DE CANCÚN, QUINTANA ROO	106
	CONCLUSIONES.....	111
	REFERENCIAS.....	115

de las playas. Es en este proceso que los umbrales de movimiento de las partículas cobran especial relevancia pues permiten relacionar las propiedades mecánicas de las partículas con la interacción del flujo para que se produzca en ellas el cese o el inicio del movimiento; con dicha relación, es que a través de ellos es posible estimar las tasas de transporte de sedimento.

En forma particular el tipo de material que puede ser encontrado en la zona de estudio integra uno de los ambientes costeros más comunes no únicamente en costas mexicanas sino también en diversas regiones del Mar Caribe, por lo que conocer parámetros de las partículas tales como los umbrales de movimiento permitirá obtener un mayor conocimiento y estimación, como ya se mencionó, de las tasas de transporte y comenzar a entender de mejor manera la modificación que pueden llegar a sufrir las costas.

OBJETIVOS

El presente trabajo, posee como objetivo principal la caracterización de las propiedades de arenas de la Península de Yucatán, principalmente el umbral de inicio de movimiento y la velocidad de caída de partículas calcáreas.

Establecer una metodología, para la estimación en laboratorio de dichas características mecánicas, involucrando técnicas y tecnologías que permitan un mayor control en la determinación de los parámetros y reducir incertidumbres de medición existentes.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

El presente trabajo se divide en cinco capítulos, el primero de estos corresponde al marco teórico en donde se describen aquellos elementos relacionados especialmente con la estimación de los parámetros de velocidad de caída y de inicio de movimiento; aunado a lo anterior también se presenta la forma en que estos parámetros son requeridos en cálculos relativos a la tasa de transporte de sedimentos, proceso que conlleva problemas comunes dentro de la ingeniería costera.

En el siguiente capítulo, el trabajo realizado en campo y en laboratorio es precisado a fin de asentar la metodología utilizada para que ésta pueda extenderse en la realización de pruebas similares. Se destaca de manera especial los experimentos llevados a cabo con del fin de determinar los parámetros objetivo de esta tesis, sin dejar de lado la difícil tarea de recolección de las muestras a lo largo de la zona de estudio.

Los dos capítulos que continúan el trabajo, se refieren, el primero a la caracterización de los sedimentos obtenidos a partir de las muestras recolectadas en campo, y el segundo, a la caracterización de los parámetros asociados al umbral de movimiento de los sedimentos calcáreos, con lo que se logrará un mejor entendimiento de las playas constituidas por tal tipo de partículas.

Finalmente, en el último capítulo, con los resultados obtenidos a lo largo de la tesis, se realiza una zonificación de las características de sedimentos de la Península de Yucatán, así como del umbral de movimiento de éstos, con lo que se llega a tener una de las primeras caracterizaciones de las costas mexicanas y parámetros asociados con la estimación del transporte de sedimentos en ellas.

LA ZONA DE ESTUDIO

La Península de Yucatán, se caracteriza por ser una de las regiones de mayor belleza y biodiversidad del país y del mundo entero. Igualmente importante es la participación de las actividades económicas, entre las que se puede citar: la explotación petrolera en el estado mexicano de Campeche; la ubicación de puertos marítimos de gran importancia como Progreso en Yucatán, o el alojamiento de sitios turísticos de gran envergadura como lo es Cancún en el estado de Quintana Roo.

La Península de Yucatán se ubica al sureste de México y se encuentra conformada por los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, donde se diferencian dos regiones morfo hidrográficas distintas: la zona del Mar Caribe, y la zona del Golfo de México, y que comprende a la costa noroccidental de la Península. El clima que se puede encontrar de manera predominante es subhúmedo con lluvias en verano; sin embargo, los escurrimientos que podrían producirse como consecuencia de tales precipitaciones, y con excepción del sur de Campeche, no se presentan de manera superficial debido a la escasa variabilidad del relieve y a la geología de la zona, por lo cual, puede hallarse el desarrollo de un gran sistema de drenaje subsuperficial o subterráneo y con él, manantiales cársticos (cenotes y/o retenes), que le imprimen condiciones particulares a las marismas de la zona costera.

Por lo anterior, en propiamente toda la región, el aporte de sedimentos que pueda producirse hacia las playas desde la parte continental es prácticamente nulo; sin embargo, en el área del Mar Caribe, un volumen importante de los sedimentos pueden ser transportados hacia la zona como consecuencia del arrastre de las corrientes longitudinales predominantes, por degradación de la barrera arrecifal o de la roca caliza que se encuentran frente a estas costas de la Península.

El posible suministro de sedimento en la mayor parte de las playas de la Península, se ve disminuido por la nula existencia de ríos en la región, con lo que se



Figura I. De arriba abajo: cenote en Xel-Há, Quintana Roo; Cancún, Quintana Roo; corales del Sistema Arrecifal Mesoamericano, y Puerto de Progreso en Yucatán.

elimina una fuente de material. Mucho tiene que ver con la geología de la región, ya que se encuentra compuesta por llanuras costeras de escasa altura y pendiente, que estrictamente conforman una meseta de roca calcárea que cubre la mayor parte del territorio, a excepción de las costas donde se presenta el afloramiento del suelo. Dicho suelo está compuesto de diversos materiales: ya sea por arenisca poco consolidada (compuesta por fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcitas) dispuestos en forma paralela a la costa del Mar Caribe, entre Cancún, Alfredo V. Bonfil e Isla Mujeres; por depósitos de limo y arcilla mezclados con materia orgánica en áreas aisladas de la costa que corresponde al Golfo de México; o por depósitos de arena blanca compuesta por fragmentos de ostras, bivalvos y gasterópodos, siendo este tipo de suelo el de mayor abundancia a lo largo de las costas de la Península, tanto del lado del Caribe, como del Golfo de México (SGM, 2006).

En la zona que comprende la costa noroccidental, se destaca el transporte de sedimentos en dirección poniente, y pueden encontrarse playas arenosas en proceso de crecimiento y expansión con sedimentación activa, como Punta Celestún y Punta Arenas. Mientras tanto, en la región frente al Mar Caribe, la costa absorbe gran parte de la energía proveniente de dicho mar, con lo que se induce la presencia de una laguna de barrera arrecifal somera. Amplios cordones de playa consolidados cubiertos por arenas sueltas son frecuentes en la zona costera entera, pero de forma especial en el litoral que abarca desde Cabo Catoche hasta Cancún. Hacia el sur de este último, en las Bahías de Sian Ka'an se halla un amplio humedal controlado por la cadena arrecifal.

La influencia de huracanes no es poco común para la región, y la acción modificadora de éstos en la morfología de las playas es evidente; ejemplo reciente de ello es el paso del huracán Wilma en 2005 (ver figura 2), el cual ha sido el más intenso registrado en aguas del Atlántico, y cuyos efectos en toda la Península de México se hicieron sentir, especialmente la industria turística de Cancún que resultó la más afectada con la súbita erosión de sus playas. Así, la vulnerabilidad de las playas es conocida a través de registros de la incidencia de huracanes desde 1851 (Morales, 2010), donde se reporta que, de 1879 a 1900, 14 tocaron tierra, uno cada 1.5 años, similar a lo que ocurriría en la segunda y cuarta década del siglo XX; mientras que de 1961 a 1988, sólo dos huracanes tocaron tierra, lo que colocó la tasa en uno cada 14 años; sin embargo, en los años de 1995 a 2008, 5 huracanes impactaron tierra, por lo que la tasa se ubicó en uno cada 2.8 años (CNA, 2010).

Así, la bonanza meteorológica se constituye también en un factor que puede alterar favorablemente las playas y todo el litoral costero. Por ejemplo en Cancún, entre 1961 a 1988, la baja incidencia de huracanes permitió la acumulación de sedimento y la acreción de las playas, lo que derivó en la apuesta de invertir en un desarrollo turístico de nivel internacional; no obstante, el paso continuo de huracanes en la zona a generado cuantiosas inversiones que superan los miles de millones de dólares debido tanto a daños en la infraestructura existente como en el desarrollo de obras de protección y de recuperación del sedimento que es erosionado por la acción de dichos fenómenos meteorológicos.

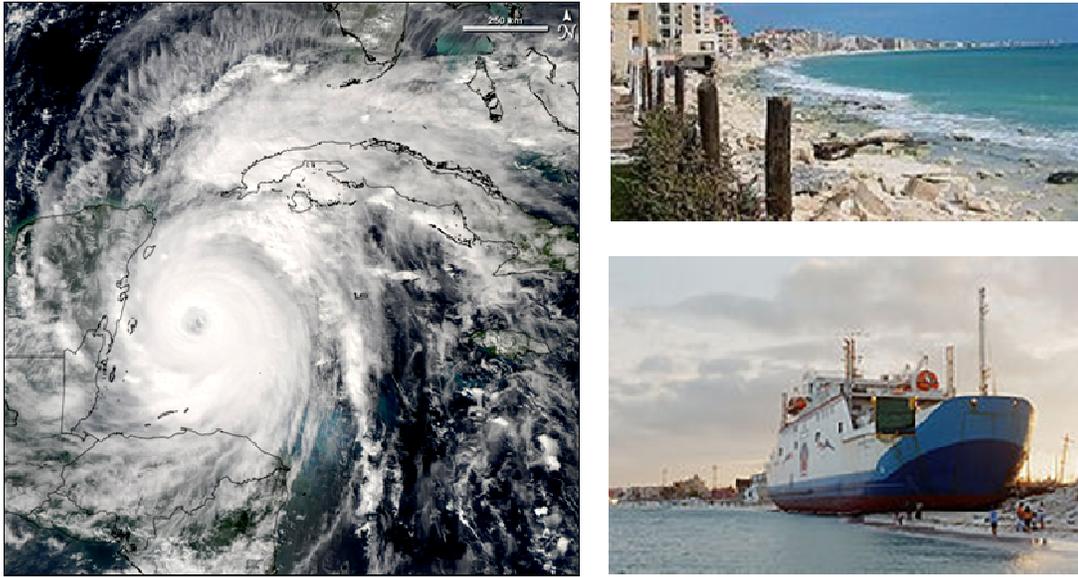


Figura 2. A la izquierda: imagen satelital del huracán Wilma, 2005 (Fuente: <http://earthobservatory.nasa.gov>). Derecha abajo: Ferry “Bahía Espíritu Santo” arrastrado por el mismo huracán hacia la costa de Puerto Juárez, a 7 km de las playas erosionadas de Cancún, Quintana Roo (Derecha arriba).

De manera particular, los arrecifes llegan proporcionar una protección natural ante el embate de los agentes modeladores de las playas, por lo que es de mencionarse que la presencia de parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (segundo sistema arrecifal más grande del mundo) cuya extensión abarca desde Cabo Catoche, al norte de Quintana Roo, hasta traspasar las fronteras de las aguas mexicanas en la costa norte de Honduras, condiciona de manera importante la estabilidad de la zona, además de servir de fuente de sedimento.

Como puede deducirse, las características tanto de sedimento, como las condiciones meteorológicas, de clima marítimo e inclusive el ambiente natural propios de la Península de Yucatán, propician un interés en su estudio, el cual deriva en su aplicación a diversas áreas. De manera particular, el transporte de sedimentos evidenciado en la erosión o acumulación de material en las playas, constituye un elemento de enorme relevancia para el ser humano ya sea por intereses económicos, turísticos, de preservación de áreas naturales, o de recuperación ante fenómenos naturales como los citados anteriormente.

El equilibrio dinámico de las playas, y en general de las costas se encuentra afectado por muchos elementos, de ahí que el aprovechamiento y explotación de los recursos que se desee realizar quede condicionado al entendimiento que se tenga de la naturaleza y sus procesos. Los parámetros que se muestran en esta tesis la base para la determinación de uno de ellos: el transporte de sedimentos.

Capítulo 1

MARCO TEÓRICO

Capítulo 1



MARCO TEÓRICO

El transporte de las arenas, desde la óptica de la ingeniería costera, influye de manera importante en el desarrollo de obras de infraestructura, especialmente asociado con costos económicos que condicionan de manera directa la viabilidad de proyectos e incluso en la afectación de sectores de la economía de un país. Entre los problemas relacionados con el transporte de arenas y de otros sedimentos pueden citarse: el dragado de los canales de accesos a puertos; erosión al pie de las estructuras; deterioro de ambientes costeros debido a erosión de los mismos; ingreso de sedimentos a los tanques de enfriamiento de centrales generadoras de electricidad, y la acreción o pérdida de playas destinadas al turismo.

De esta manera, en el presente capítulo, se muestran los elementos básicos que integran el análisis de los elementos involucrados en el transporte de sedimentos, con especial énfasis en aquellos relacionados con el tema de esta tesis.

1.1 UMBRAL DE MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS

Para determinar el movimiento de las partículas de sedimento que constituyen el fondo marino, existen diversos forzamientos que es necesario tomar en consideración. Algunos de ellos están asociados al flujo, como las fuerzas de arrastre y sustentación, y otros ligados a las características del sedimento tales como su peso propio, densidad, morfología, etc. Además, en estricto sentido, es necesario considerar la configuración del fondo marino y la resistencia que éste presenta ante el flujo, ya que la presencia de rizos en el fondo altera las condiciones de arrastre (Bagnold, 1946).

Ante la diversidad de variables involucradas en la determinación del umbral de movimiento de los sedimentos, la mayor parte de los estudios avocados a su definición tienen su base en experimentos bajo condiciones controladas de laboratorio. Esto se debe a las enormes dificultades que representa la medición en campo de estos parámetros (Larsen, 1981).

De manera general, el umbral de movimiento se ha relacionado con la velocidad de caída y a la velocidad de cortante, parámetros involucrados con el momento en que el sedimento se incorpora al flujo, o da inicio su depositación en el fondo. Estas dos velocidades se han relacionado de múltiples formas a fin de delimitar las zonas de movimiento y no movimiento de las partículas (Shields en 1936; Collins & Rigler, 1982; Crosby, Ben & Kelin Whipple, 2004), de ahí su relevancia para considerar el umbral donde se producirá el transporte o no de los sedimentos, ya sea para iniciarlo o detenerlo.

Pese a que existe en la literatura mucha información disponible para la realización de experimentos con el fin de obtener las velocidades antes mencionadas (Shields en 1936; Cheng, 2008; Beheshti, 2008; Lovell & Rose, 1991; Smith & Cheung, 2004; Modarressi, 1968), no ha sido posible encontrar alguna metodología o procedimiento único generalizado para su determinación.

En consecuencia, este capítulo presenta una revisión de las bases teóricas necesarias para el estudio de los umbrales del movimiento, y las principales consideraciones que deben ser tomadas en cuenta para llevar a cabo la experimentación.

1.1.1 VELOCIDAD DE INICIO DE MOVIMIENTO

El concepto de inicio de movimiento ha sido empleado para describir las condiciones necesarias para que se produzca el inicio del transporte de sedimento. Los flujos oscilatorios y bidireccionales debidos a oleaje y corrientes, producen en el fondo marino esfuerzos de cortante que promueven el transporte de sedimentos tal y como se ejemplifica de manera esquemática en la figura 1.1. Las ideas básicas y conceptos en torno al inicio de movimiento de partículas provinieron del estudio de flujos unidireccionales de la ingeniería fluvial y que posteriormente fueron adoptados por la ingeniería de costas para extenderse a su vez al estudio de flujos oscilatorios.

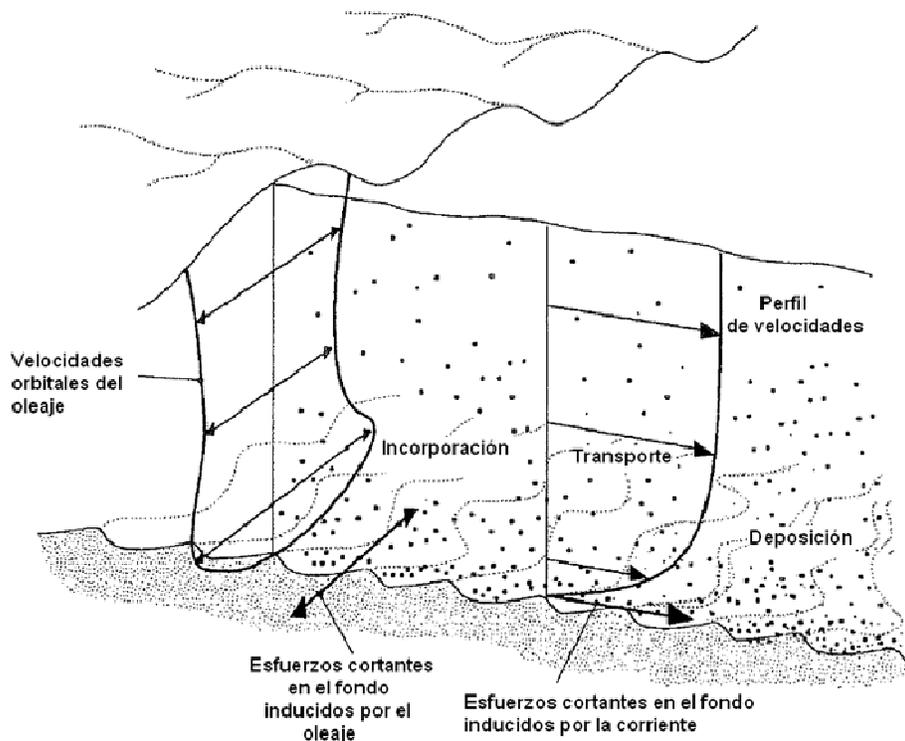


Figura 1.1 Esquema que representa los procesos de transporte de sedimentos marinos los cuales se suceden de forma simultánea en casos reales (Modificado de Pedrozo, 2010).



Figura 1.2 Diagrama de cuerpo libre en el que se ilustran las fuerzas actuantes sobre una partícula ubicada en el fondo marino.

A lo largo del tiempo, dentro del estudio del umbral de inicio de movimiento, se han desarrollado dos tendencias principales de análisis. La primera ellas se basa en una visión determinista del fenómeno (mecánica clásica); bajo esta perspectiva se analiza la relación entre las fuerzas que actúan sobre las partículas y que originan los esfuerzos cortantes en el fondo (figura 1.2). El movimiento del sedimento inicia en el instante en que las fuerzas generadoras del movimiento son mayores que las fuerzas resistivas. En el plano horizontal, el forzamiento está representado por un esfuerzo cortante expresado a través de la ley de arrastre. Una vez iniciado el movimiento, se produce lo que se denomina como el esfuerzo cortante crítico (τ_c). Por otra parte, la segunda de las tendencias de análisis tiene su fundamento bajo una perspectiva probabilística del inicio del movimiento, donde se consideran las incertidumbres que existen en cuanto a las diferencias encontradas entre las partículas que componen una cama de sedimento, expresadas en variaciones de tamaño, densidad y forma. Esto es, que el inicio de movimiento está asociado a una probabilidad relacionada con el movimiento de un número de partículas en un tiempo y área determinados, a partir de las propiedades físicas que éstas poseen.

Dentro los primeros trabajos desarrollados, el trabajo doctoral de Shields presentado en 1936 representa la base para los estudios con una perspectiva determinista del fenómeno. A partir de sus experimentos, Shields propuso un diagrama (figura 1.3) definido en términos de un parámetro adimensional de esfuerzo cortante (θ) conocido de forma general como parámetro de Shields, y el número de Reynolds, de tal suerte que se diferencian las regiones en la que se produce movimiento de la que no. Los experimentos realizados por Shields consistieron en colocar sobre el fondo de un canal, una cama de material de características conocidas y con espesor uniforme sometido al forzamiento de una corriente uniforme. La posibilidad de incrementar la intensidad de la corriente incidente sobre dicho material, permitió identificar la velocidad necesaria para el inicio de movimiento de los sedimentos. Esta velocidad está definida a través de la expresión 1.1a, mientras que la ecuación 1.1b asocia esta velocidad con el esfuerzo cortante crítico (τ_c). A la expresión adimensional del esfuerzo cortante se le denomina parámetro de Shields crítico ($\theta_c = \tau_c/[gD(\rho_s - \rho)]$).

$$u_{*c} = \sqrt{\tau_c/\rho} \quad \dots(1.1a)$$

$$\tau_c = 0.5\rho f_w \|u_{*c}\| \overline{u_{*c}} \text{ con } f_w = 0.00251 \exp[5.21(u_{*c}T/4\pi D)] \quad \dots(1.1b)$$

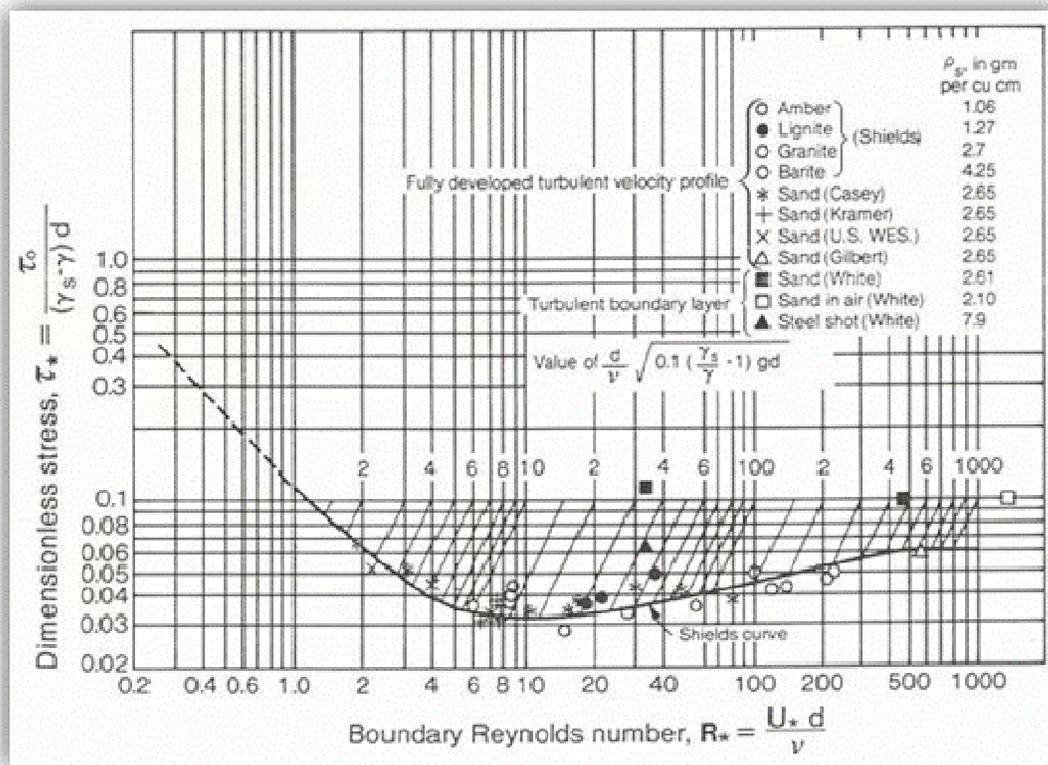


Figura 1.3 Diagrama de Shields, donde se muestran la relación del parámetro de Shields vs. Reynolds (Imagen tomada del CEM, 2001).

De acuerdo a Buffington (1999), la determinación de dicha velocidad pudo haber sido obtenida de dos formas:

- A través de una extrapolación de las mediciones simultáneas de esfuerzo cortante y la tasa de transporte por fondo, hasta llevar a esta última a un nivel cero; o
- Por inspección visual de la cama de sedimento empleando el criterio de movimiento general de Kramer, que se describe más adelante.

El problema principal del diagrama de Shields, además de la incertidumbre sobre la forma en la cual fueron realizadas las mediciones, es la aparición en ambos ejes de su diagrama del esfuerzo cortante crítico. Esto último es señalado por diversos autores (Beheshti, 2008), dado que este hecho presenta dificultades de interpretación, en virtud de que se requiere de un proceso iterativo para la estimación tanto del esfuerzo cortante como de la velocidad umbral (ver ecuaciones 1.1a y 1.1b).

Posterior al primer esfuerzo de Shields, diversos investigadores han realizado experimentos de laboratorio que consideran más variedad de materiales con el propósito de completar el diagrama originalmente propuesto. Así mismo, se han propuesto modificaciones al diagrama para que éste pudiese expresarlo en función de otros parámetros como el Parámetro sedimento- fluido (Larsen, 1981), el diámetro adimensional de la partícula (Van Rijn, 1993), o el número de movilidad u_* / W_f (Collins & Rigler, 1982). Igualmente, otros autores como Bonnefille, Chien & Wan, Paphitis, Hager & Oliveto, Cheng, Sheppard & Renna, Cao et al. (Beheshti, 2008), entre otros, han propuesto ecuaciones

para disminuir la incertidumbre en el uso gráfico del diagrama de Shields y poder así estimar de mejor manera el valor del parámetro de Shields. En la tabla I.1 se muestran algunas de las expresiones que han sido desarrolladas para determinar el parámetro de Shields en función del diámetro adimensional de la partícula o calcular la velocidad de cortante en términos de dicho diámetro.

Tabla I.1 Expresiones que consideran para el cálculo del parámetro de Shields crítico al diámetro adimensional de la partícula, o en su defecto en estimación de la velocidad de cortante crítica a través del número de movilidad (Beheshti, 2008).

Autor	Año	Expresión
Parámetro de Shields crítico en función del diámetro adimensional de la partícula		
Bonnefile	1963	$\theta_c = \begin{cases} 0.118 D_*^{-0.468} & D_* < 2.33 \\ 0.137 D_*^{-0.648} & 2.33 \leq D_* < 9.15 \\ 0.063 D_*^{-0.298} & 9.15 \leq D_* < 15.28 \\ 0.900 D_*^{-0.424} & 15.28 \leq D_* < 9.15 \end{cases}$
Soulsby	1997	$\theta_c = \frac{0.30}{1+1.2D_*} + 0.055(1 - e^{-0.02 D_*}) \quad 0.01 \leq Re_* \leq 10^4$
Paphitis	2001	$\theta_c = \frac{0.273}{1+1.2D_*} + 0.046(1 - 0.576e^{-0.02 D_*}) \quad 0.01 \leq Re_* \leq 10^4$
Cheng	2004	$\theta_c = 0.147D_*^{-0.29} \quad 0.114 \leq D_* \leq 35.4, 0.02 \leq Re_* \leq 48.8$
Sheppard & Renna	2005	$\theta_c = \begin{cases} 0.25 + 0.1D_*^{0.5} & 0.1 < D_* < 3 \\ 0.0023D_* - 0.00038D_* \ln D_* + \frac{0.23}{D_*} - 0.005 & 3 < D_* < 150 \\ 0.0575 & 150 < D_* \end{cases}$
Número de movilidad en función del diámetro adimensional de la partícula		
Paphitis	2001	$\frac{u_{*c}}{w_f} = \frac{0.75}{Re_{*c}} + 14e^{-2Re_{*c}} + 0.01 \ln Re_{*c} + 0.115 \quad 0.1 < Re_{*c} < 10^5$
Beheshti	2008	$\frac{u_{*c}}{w_f} = \begin{cases} 9.6674 D_*^{-1.57} & D_* \leq 10 \\ 0.4738 D_*^{-0.226} & D_* > 10 \end{cases}$

Entre los estudios del tipo determinista, se encuentra un desventaja relativa a la asignación cuantitativa y precisa del instante en que se produce el inicio de movimiento. Por ello, existen dos metodologías con el fin de dar solución a dicha imprecisión. La primera de ellas, representa una medición indirecta de la velocidad de cortante que no se relaciona con el diámetro de las partículas y consiste en la extrapolación de las mediciones de tasas de sedimento y velocidad del flujo para un valor de tasa de transporte cercana a cero. Por otra parte, el segundo método comprende el método visual, en el que se identifica a ojo el momento de inicio del transporte de sedimentos. Si bien este método es muy funcional y sencillo de implementar, para una muestra de sedimento homogénea, no lo es para el caso de una muestra de sedimento con una mezcla de diferentes tamaños.

Dentro de los métodos visuales para identificar el inicio de movimiento de una mezcla de partículas, el criterio utilizado por Shields es conocido como el criterio de Kramer (Buffington, 1999), el cual se presenta a continuación:

- a) *No movimiento.*
- b) *Movimiento débil.* Muchas de las partículas más pequeñas se encuentran en movimiento, en puntos asilados y en número contable.

- c) *Movimiento medio*. Granos de diámetro medio se encuentran en movimiento, en suficiente cantidad, que son incontables; presentan un movimiento que no puede ubicarse en puntos aislados o locales. No es lo suficientemente fuerte el movimiento como para afectar la configuración de la cama de sedimento y no resulta en un transporte considerable de material.
- d) *Movimiento general*. Los granos de mayor tamaño se encuentran en movimiento, de tal forma que la configuración de la cama de sedimento cambia, así como material transportado en mayor cantidad.

Durante muchos años, este criterio sirvió como base para estimar la condición bajo la cual se produce el movimiento de las partículas de una muestra. Sin embargo, estudios posteriores sobre el inicio de movimiento de sedimentos observaron que el comportamiento de una cama de sedimentos sujeto a un flujo producido por algún mecanismo, puede ser diferenciado en cinco estados (Chan et al. 1972), a saber:

- a) *Cama estacionaria*. Las partículas no son perturbadas por el movimiento del fluido en que se encuentran.
- b) *Inicio de movimiento*. Algunas partículas en la superficie de la cama se mueven de tal forma que se desplazan momentáneamente sólo para alcanzar una posición de mayor estabilidad. Para este estado, partículas muy finas se pueden encontrar en suspensión, siendo difícil identificar el umbral en el que se empieza a distinguir esta etapa.
- c) *Movimiento general (formación de dunas)*. Todas las partículas de la superficie de la cama se mueven. Para el caso en el que el mecanismo que produce el flujo es oscilatorio, las partículas se mueven cuando la velocidad del flujo es mayor, para asentarse nuevamente cuando la velocidad del flujo dentro del ciclo oscilatorio disminuye, esto induce la formación de rizos y de dunas estables.
- d) *Cama móvil*. En este punto, la cama de sedimento se mueve completamente hasta un punto en el que las partículas no se asientan como en el caso de movimiento general, es decir, se desplazan de un lado a otro evitando la formación de dunas y rizos.
- e) *Cama suspendida*. La cama de sedimento se encuentra totalmente en suspensión, con lo que se pierde la configuración de la misma.

En esta clasificación, la dificultad estriba en la definición de las fronteras entre un estado y otro, lo que representa una gran desventaja, especialmente en flujos turbulentos o mezclas de partículas de diferentes tamaños, donde el movimiento de los sedimentos no ocurre en un único evento bien definido, sino que es paulatino.

Con el fin de evitar una observación subjetiva del inicio de movimiento, criterios de probabilidad fueron desarrollados por Yalin, Schvidchenko & Pender y Dancey *et al.* (Dancey et al., 2002), entre otros, donde básicamente se fija el valor de un parámetro adimensional, el cual se encuentra en función principalmente del número de partículas que se mueven por unidad de área y por unidad de tiempo. La base de dichas formulaciones se encuentra en los trabajos desarrollados por Einstein (1950) quien

estableció fundamentalmente que el umbral de movimiento consistiera en un rango de partículas que se encontraran en un transporte por fondo, dicho rango fue establecido en función del esfuerzo cortante y de otros parámetros.

Así, con las bases probabilísticas mencionadas, es que se dio pie a estudios centrados en un criterio diferente al determinístico. De acuerdo a Dancy et al. (2002), Neil y Yalin, establecieron el número adimensional mostrado en I.2, como el umbral bajo el cual se produce el inicio de movimiento

$$N = \frac{\dot{n}'' d^3}{u_*} \quad \dots(I.2)$$

donde \dot{n}'' es el número de granos de sedimento que se mueven por unidad de área y por unidad de tiempo, d es el diámetro del sedimento y u_* es la velocidad de cortante; dichos autores establecieron como la condición de umbral de movimiento cuando N tuviese un valor del orden de 10^{-6} . Por otro lado, Shvidchenko y Pender, establecieron lo que ellos denominaron como “intensidad del movimiento del sedimento”, definido como se muestra en la ecuación I.3a

$$I = \frac{m}{nT} \quad \dots(I.3a)$$

$$I = \frac{\dot{n}}{n} \quad \dots(I.3b)$$

donde m es el número de partículas en movimiento observadas sobre un área de la cama y sobre un intervalo de tiempo T , y n es el número de partículas que se encuentran distribuidas inicialmente en el área de la cama. Los autores de dicha expresión consideraron, experimentalmente, que estadísticamente T resultaba un valor grande por lo cual se puede llegar a la expresión mostrada en I.3b donde \dot{n} es el número de partículas que se mueven por unidad de tiempo, e I podría interpretarse como la probabilidad de que una partícula en una determinada área se mueva en un segundo dado, es decir, como una probabilidad de movimiento por unidad de tiempo, la cual, para la condición límite se consideró igual con 10^{-4} ; no obstante, I no es adimensional ($1/s$) por lo cual no podría llevarse este concepto a diferentes fluidos o a diferentes escalas de tiempo.

Bajo el concepto de probabilidad de movimiento por unidad de tiempo, el trabajo de Dancy et al. (2002) propone la expresión mostrada en I.4 con las facilidades de establecer una tasa en la que el sedimento se encuentra en movimiento sin la necesidad de extrapolaciones o de estados idealizados de inicio de movimiento como los descritos anteriormente. El reemplazo del criterio de condición límite de movimiento, es sustituido por uno asociado con el nivel de actividad de la cama de sedimento, de tal forma que se tiene:

$$\Gamma = I\mathfrak{T} = \frac{\dot{n}\mathfrak{T}}{n} \quad \dots(I.4)$$

donde el parámetro \mathfrak{T} es el período promedio entre la ocurrencia de dos eventos turbulentos, y Γ es la probabilidad de que un grano se mueva como consecuencia de un evento turbulento, la cual, es fijada en un valor de 3.58×10^{-5} para obtener la probabilidad asociada al umbral de movimiento de la partícula. Aunque esta formulación intenta explicar desde un punto de vista probabilístico el umbral de movimiento de las partículas, elementos relativos a características de las partículas no son tomados en

cuenta, por lo cual se ve limitada la aplicación a partículas esféricas uniformemente distribuidas y de igual diámetro, por lo cual las limitaciones de aplicación son elevadas.

De esta manera, desde el punto de vista probabilístico, se logra definir de mejor manera lo que se puede entender como inicio de movimiento, se evitan subjetividades y se ofrecen umbrales de movimiento no asociados al observador que realiza la experimentación; no obstante, la medición de las variables en las ecuaciones 1.2 a 1.4 no resulta lo suficientemente práctica, lo cual impide la completa utilización y aceptación de esta línea de investigación.

La idea original de velocidad umbral de movimiento, proviene de flujos unidireccionales en la ingeniería fluvial, concepto que ha sido adaptado en la ingeniería de costas para su uso en flujo oscilatorio. Las metodologías que existen para realizar los experimentos de inicio de movimiento, no poseen una convención establecida para su realización, por lo cual, en la literatura pueden encontrarse distintas formas de hallar los valores de velocidad y de esfuerzo cortante. De manera particular, para flujos oscilatorios, el mecanismo para realizar las mediciones se hace considerando el movimiento relativo entre el fluido y la cama de sedimento, lo cual genera dos alternativas para llevar a cabo la experimentación: la primera de ellas es consiste en mantener el fluido en estado estacionario e inducir el movimiento de la cama a través de un plato sobre el cual es colocada la cama de sedimento, con esto se puede manipular fácilmente la frecuencia y amplitud del movimiento del plato, lo que genera un flujo oscilatorio controlado. Ejemplos de este tipo de resultados han sido presentados por Le Roux (2001), Voulgaris (1995), Larsen (1981), Bagnold (1946), Stevenson (2004), entre otros, quienes emplean distintas metodologías en la obtención de velocidad de cortante bajo flujo oscilatorio.

Pese a que los conceptos de velocidad de inicio de movimiento y de esfuerzo de cortante crítico se han utilizado ampliamente para las formulaciones de transporte de sedimentos, autores como Seminara, *et al.* (2002) y Parker, *et al.* (2003) discuten la posibilidad de que dichos conceptos pudieran ser incorrectos; su trabajo se fundamenta esencialmente en resultados tanto de trabajos previos como propios, que no muestran de forma evidente la relación entre los parámetros y los resultados del transporte del material. Dichos autores sostienen que la hipótesis de Bagnold (la cual establece que esfuerzo de cortante del fluido actuante en la cama de sedimento se reduce a un valor crítico para producir el inicio de movimiento), debe ser abandonada. Lo anterior se debe a que encontraron deficiencias en dicha hipótesis cuando se le aplica a fondos con pendiente, además de que al considerar el equilibrio estático en el que se encontrarían las partículas hasta antes de iniciar su movimiento, no se podría dar solución a una concentración por fondo en un área determinada, esto último se hace evidente en el tratamiento de transporte por fondo de una mezcla de sedimento de diferentes tamaños, por lo que los autores sugieren el establecimiento de una carga por fondo en equilibrio dinámico donde parte del sedimento se deposita a la vez que se da inicio al transporte por fondo.

A pesar de este debate, prácticamente todos los modelos de transporte de sedimentos por fondo consideran como un fundamento básico el concepto de esfuerzo cortante crítico necesario para el inicio del movimiento de las partículas (Pedrozo, 2010).

El transporte total de sedimentos a lo largo de la columna de agua está definido como la suma del transporte por fondo y el transporte por suspensión. Ambas contribuciones suelen estimarse forma separada para después sumarse.

El principio general para el cálculo de la tasa de transporte por suspensión (q_s) consiste en la solución de la integral, a lo largo de la columna de agua, del flujo del sedimento $U(z)C(z)$. Este flujo es definido una vez conocidos los perfiles de velocidad $U(z)$ y concentración $C(z)$ a lo largo de la columna de agua (figura I.4). La integral queda expresada tal que:

$$q_s = \int_{z_a}^h U(z)C(z)dz \quad \dots(I.5)$$

donde, de acuerdo con Soulsby (1997), la mejor manera de calcular la concentración es a través de la expresión proporcionada por Van Rijn (1993), que se muestra en las ecuaciones I.6 y I.7, donde la concentración de referencia se encuentra dada por $C_a = (0.015dT_s^{1.5})/(z_aD_*^{0.3})$, considerando

$z_a = \Delta_S/2$ si Δ_S es la altura de las ondas de arena que existan en el fondo manteniendo como valor mínimo $z_a = 0.01h$; y $b' = \frac{Rou}{B_1} + B_2$, donde Rou es el parámetro de Rouse que se estima como $Rou = W_f/\kappa u_*$ donde κ es la constante de Von Karman (0.4), W_f y u_* representan los forzamientos involucrados en la depositación y movimiento del material en la columna de agua, por un lado la velocidad de caída y por el otro la velocidad de cortante crítica necesaria para el inicio de movimiento. Así la expresión para determinar la concentración del sedimento a cualquier altura de la columna de agua, está dada por:

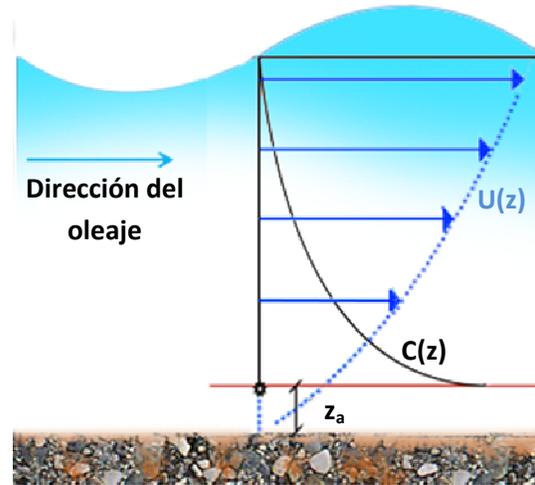


Figura I.4 Esquema de la integración vertical del perfil de velocidades y de concentración del sedimento en suspensión, bajo flujo oscilatorio.

$$C(z) \begin{cases} C_a \left(\frac{z_a}{h - z_a} \right)^{b'} & \text{para } z_a < z < \frac{h}{2} \\ C_a \left(\frac{z_a}{h - z_a} \right)^{b'} \exp \left[-4b' \left(\frac{z}{h} - 0.5 \right) \right] & \text{para } \frac{h}{2} < z < h \end{cases} \quad \dots(I.6)$$

$$B_1 \begin{cases} 1 + 2(W_f/u_*)^2 & \text{para } 0.1 < W_f/u_* < 1 \\ 2 & \text{para } W_f/u_* \geq 1 \end{cases}$$

$$B_2 \begin{cases} 2.5(W_f/u_*)^{0.8} (C_a/0.65)^{0.4} & \text{para } 0.1 < W_f/u_* < 1 \\ 0 & \text{para } W_f/u_* \geq 1 \text{ o } z_a > 0.1h \end{cases} \quad \dots(I.7)$$

En lo referente al transporte debido a corrientes, las expresiones que han tenido cierta aceptación de acuerdo a su funcionalidad son las propuestas por Engelund y Hansen (1967), Ackers y White (1973), y Van Rijn (Soulsby, 1997). Todas estas expresiones, a excepción de la primera, requieren de la determinación de la velocidad de inicio de movimiento (u_{*c}). Por otra parte, para el caso de transporte de sedimentos inducido por el oleaje (flujo oscilatorio), Soulsby (1997), señala que una de las teorías

más utilizadas corresponde a la propuesta por Bailard (1981), la cual usa un concepto energético, que considera el trabajo realizado por el fluido sobre las partículas de sedimento (Bagnold, 1966). Sin embargo, ninguna de estas aproximaciones han logrado una correcta determinación del transporte de sedimentos bajo condiciones de flujo en las cercanías de la costa, específicamente en las zonas de rompientes y lavado (Butt et al. 2005; Masselink et al., 2008).

La aparición del valor de la velocidad de caída, de forma conjunta con la velocidad de cortante en diversas formulaciones de transporte de sedimentos, es debido a su principalmente al transporte en suspensión por considerarse en las expresiones de concentración del sedimento en la columna de agua, y representa especialmente el umbral en el que las partículas cesan su movimiento en el flujo.

1.1.2 VELOCIDAD DE CAÍDA

Como se mencionó en el apartado anterior, la velocidad de caída es considerada como un elemento básico en la evaluación de los procesos para modelar el transporte de sedimentos por suspensión, de mezclado y depositación, por lo cual es conveniente hacer una revisión de este concepto.

A pesar de que la definición del fenómeno está perfectamente establecida, no es el caso de su estimación matemática a través de las características físicas de la partícula. La base teórica para su estimación tiene como punto de partida la Ley de Stokes, que a través de un equilibrio estático de fuerzas define a la velocidad de caída como: “Una partícula que se deja caer en una columna de agua con velocidad inicial cero se encuentra sujeta a la acción de las fuerzas de gravedad, de arrastre y de Arquímedes; a partir del instante en que dichas fuerzas se equilibran, la aceleración de la partícula desaparece, por lo que la velocidad toma un valor constante que es al que se le conoce como velocidad de caída de la partícula”.

Pese a que la Ley de Stokes considera el fenómeno físico para llegar a la expresión matemática, el rango de validez resultante es aplicable únicamente para flujos laminares ($Re < 1$), así como para partículas esféricas. Por medio de la ecuación 1.8 queda representada dicha Ley, ya sea como función del coeficiente de arrastre (el cual se considera constante, $C_D = 24/Re$), o del Parámetro sedimento-fluido (S_*), que se describirá en apartados siguientes.

Por otro lado, existe una expresión para el régimen turbulento desarrollada para partículas esféricas, que puede escribirse en términos del diámetro de la partícula o del parámetro sedimento- fluido, tal y como se señala en la ecuación 1.9; el rango de validez de la expresión es para $Re > 1000$, y se considera que el coeficiente de arrastre es $C_D \cong 0.4$ (Jiménez-Madsen, 2003).

$$W_f = \sqrt{\frac{4}{3C_D} g d \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)} = \frac{1}{18} \frac{g d^2}{\nu} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) = \frac{8}{9} \frac{S_*^2 \nu}{d} \quad \dots (1.8)$$

$$W_f = \sqrt{\frac{4}{3C_D} g d \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)} = \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \frac{g d}{0.3}} = \frac{7.32 \nu}{d} S_* \quad \dots (1.9)$$

Las ecuaciones 1.8 y 1.9 pueden ser escritas de forma adimensional al utilizar únicamente Reynolds y el parámetro sedimento- fluido, lo anterior se ejemplifica en la ecuación 1.10, con los límites que se señalan para S_* :

$$\text{Re} \begin{cases} \frac{8}{9} S_*^2 & \text{para } S_* < 1 \\ 7.32 S_* & \text{para } 150 < S_* < 4 \cdot 10^4 \end{cases} \quad \dots(\text{I.10})$$

Aunque las relaciones para flujo laminar y flujo turbulento se hallan definidas, la zona de transición no lo ha sido de manera precisa, lo cual ha motivado la realización de trabajos en torno a ello, así como para reducir a una única expresión el comportamiento de la velocidad de caída para las tres zonas de flujo y aun más, para generalizar las expresiones para cualquier tipo de material y forma de la partícula. Por lo tanto, en la literatura se han desarrollado múltiples expresiones para el cálculo de la velocidad de caída dando mayor o menor peso a cada una de las características involucradas en el fenómeno; como ejemplo de ello, se encuentran los trabajos desarrollados por diferentes autores: Rubey (1933), Hallermeier (1981), Cheng (1997), Chang y Liou (2001), Ahrens (2003), Zanke, Julien, Soulsby, Jiménez- Madsen (Jiménez y Madsen (2003)), Swamee y Ohja (1994), Camenen (2007).

Una de las consideraciones básicas de muchas de las expresiones creadas para la estimación de la velocidad de caída es suponer que la partícula es esférica, a partir de lo cual se derivan formulaciones como las mostradas por Yalin (1977), por Cliff, *et al.* (1978) o por Gibbs (1971) construidas a partir de resultados empíricos con esferas de cristal, plástico u otros materiales. Entre las conclusiones de estos experimentos se puede mencionar que el valor de velocidad de caída depende únicamente de variables como el diámetro de la esfera, la viscosidad del fluido en que se encuentra, y el peso específico sumergido de la partícula, así como de la gravedad del lugar. No obstante que las expresiones señaladas explican de buena manera el comportamiento de la velocidad de caída de partículas esféricas, en la naturaleza es poco común encontrar sedimentos con esta forma, de ahí que se haya continuado la labor de investigación, considerando primeramente a las partículas como sólidos de forma conocida (Stringham, 1969; Baba & Komar, 1981) y evolucionar hasta intentar explicar el comportamiento de partículas totalmente irregulares a través de elementos como son el factor de forma, la redondez y la esfericidad de una partícula.

De esta manera, dentro de las formulaciones que consideran el empleo de partículas naturales, se han desarrollado diferentes expresiones, entre las que se encuentran las desarrolladas por Zanke, Julien y Soulsby (Jiménez y Madsen, 2003), las cuales poseen una estructura similar que puede ser descrita por medio de la ecuación mostrada en I.II, donde las diferencias entre las ecuaciones propuestas consiste en la definición de los valores para las constantes α y β , que toman los valores de 2.50 y 0.160 para Zanke, 2.00 y 0.222 para Julien, 2.59 y 0.156 para Soulsby, respectivamente. En estas expresiones se puede observar que no es considerada la irregularidad de la partícula a través de un factor de forma involucrado, y se toman en cuenta elementos como los señalados para partículas esféricas con especial énfasis al diámetro y peso específico sumergido de la partícula; donde el diámetro utilizado es aquel proporcionado por el análisis granulométrico de la muestra.

$$W_f = \frac{4v}{d} \alpha [\sqrt{1 + \beta S_*^2} - 1] \quad \dots(\text{I.II})$$

Bajo las mismas consideraciones que los autores anteriores, se encuentran las expresiones desarrolladas por Rubey y Cheng (Ahrens, 2003); sin embargo, éstas conceden una mayor importancia al empuje de Arquímedes, al considerar, en sus representaciones matemáticas del fenómeno, al índice de Arquímedes. Ambas ecuaciones si bien fueron realizadas tomando en cuenta sedimentos de cuarzo naturales, no consideran de ninguna forma el efecto producido por la forma de la partícula, la redondez o

esfericidad. La derivación de las ecuaciones de Rubey y Cheng se realiza a partir de intentar unificar los comportamientos en régimen laminar y turbulento de la partícula, o los coeficientes de arrastre en dichos regímenes, respectivamente. Dado que los análisis realizados por estos autores contienen un número limitado de datos de velocidad de caída de granos de cuarzo, Ahrens (2003) realizó una corrección en los coeficientes involucrados en las ecuaciones, con el propósito de abarcar un rango más amplio de validez. De esta manera se desarrollaron las ecuaciones 1.12 (Rubey) y 1.13 (Cheng), utilizando la base de datos generada por Hallemeier (1981). El comportamiento de la ecuación de Rubey ajustaba, originalmente, de mejor manera a granos con velocidad de caída en regímenes laminar y de transición, mientras que de forma contraria, la expresión de Cheng lograba mejores resultados para el régimen turbulento.

$$W_f = \frac{v}{d} \left[\sqrt{3.61^2 + 1.18A^{1/1.53}} - 3.61 \right]^{1.53} \quad \dots(1.12)$$

$$W_f = \frac{v}{d} \left[\sqrt{10.09^2 + 0.968A} - 10.09 \right] \quad \dots(1.13)$$

Aunque, como ya se dijo, el factor de forma no fue considerado en las ecuaciones, Cheng hace mención a que las partículas tienen un factor de forma de Corey cercano a 0.7, mientras que la redondez la considera uniforme en todas las partículas e igual con 3.5.

En la búsqueda por una única ecuación que pudiese ajustar los tres regímenes del flujo, surgen de manera alternativa las formulaciones desarrolladas por Ahrens (2003) y por Chang y Liou (2001), las cuales consideran términos propios para el régimen laminar y términos para el régimen turbulento, dándole mayor importancia al índice de Arquímedes, igual que las expresiones anteriores; sin embargo tales formulaciones más que provenir de un análisis físico del fenómeno, como lo hicieran Rubey o Cheng, se relacionan mayormente con el análisis estadístico matemático de las bases de datos disponibles, de donde resultaron las ecuaciones señaladas en 1.14 (Chang y Liou) y 1.15 (Ahrens):

$$W_f = \frac{v}{d} 24.6A^{0.477} / [17.9(1 + 24.6A^{0.477-1})] \quad \dots(1.14)$$

$$W_f = \frac{v}{d} [C_L A + C_T \sqrt{A}] \quad \dots(1.15)$$

donde $C_L = 0.055 \tanh[12A^{-0.59} \exp(-0.0004A)]$ es el coeficiente correspondiente al régimen laminar y $C_T = 1.01 \tanh[0.016A^{0.50} \exp(-115A)]$ es el coeficiente asociado al régimen turbulento.

Pese a que los estudios mostrados en torno a la velocidad de caída hacían más confiables las expresiones para el cálculo de ésta, ninguna de ellas consideraba la morfología de las partículas.

Dentro de los trabajos desarrollados en la materia que si consideran de forma explícita la forma de la partícula, se pueden citar los de Dietrich (1982) y Camenen (2007). El primero de estos dos autores emplea una expresión que considera tanto a la redondez como al factor de forma de Corey de la partícula; dicha ecuación se ajusta a una base de datos propia donde dichos parámetros fueron medidos, la expresión resultante es la que se muestra enseguida:

$$W_f = \sqrt[3]{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right) g v [R_3 10^{R_1 + R_2}]} \quad \dots(I.16)$$

donde

$$R_1 = -3.76715 + 1.92944 \log D_* - 0.09815(\log D_*)^2 - 0.00575(\log D_*)^3 + 0.00056(\log D_*)^4,$$

$$R_3 = \left[0.65 - \left(\frac{CSF}{2.83} \tanh(\log D_* - 4.6)\right)\right]^{(1+(3.5-P)/2.5)}, \quad R_2 = \log\left(1 - \frac{1-CSF}{0.85}\right) \text{ y } D_* = \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right) g \frac{d_N^3}{v^2}.$$

Así, la ecuación generada por Dietrich, intenta combinar en una única expresión la morfología de la partícula; sin embargo, resulta sumamente complicada en comparación con las formulaciones previas, por lo cual su uso no se generalizó, aunque su base de datos y los resultados obtenidos de los experimentos sí han sido empleados para realizar pruebas de validación de las expresiones de velocidad de caída.

Jiménez y Madsen (2003) utilizaron la base de datos de Dietrich para derivar su propia formulación de velocidad de caída, considerando como efecto importante en el fenómeno la redondez de la partícula. La ecuación presentada por estos autores (ec. I.17) se encuentra descrita en términos de una regresión lineal de ajuste de datos entre el recíproco de la velocidad de caída adimensional $1/W_*$ y el recíproco del parámetro sedimento fluido $1/S_*$, en la que se presentan dos coeficientes A y B, cuyo valor está en función del valor de redondez P de la partícula (0.995 y 5.211 para P=2.0, 0.954 y 5.121 para P=3.5, 0.890 y 4.974 para P=6.0, respectivamente). En esta expresión, la redondez es considerada como variable; sin embargo, el factor de forma de Corey para las partículas probadas fue considerado igual con 0.7, misma suposición hecha por Cheng en estudios previos.

$$\frac{1}{W_*} = A + \frac{B}{S_*} \quad \rightarrow \quad W_f = \left[\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right) g d / \left(A + \frac{B}{S_*}\right)} \right] \quad \dots(I.17)$$

Por último, Camenen (2007) presenta una ecuación que busca integrar la morfología de la partícula, en el que los valores del factor de forma de Corey y la redondez fuesen variables que se pudiesen modificar libremente, sin adoptar algunas suposiciones como las que hiciera Cheng o Jiménez- Madsen en su momento.

A partir de un análisis de la relación entre el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds, realizado por Cheng (1997), se puede obtener una forma general de muchas de las expresiones generadas para velocidad de caída, la cual se muestra en I.18, y la cual fue utilizada por Camenen para determinar la participación del factor de forma.

$$W_f = \frac{v}{d} \left[\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{A}{B}\right)^{2/m} + \left(\frac{4 D_*^3}{3 B}\right)^{1/m}} - \frac{1}{2} \left(\frac{A}{B}\right)^{1/m} \right]^m \quad \dots(I.18)$$

La derivación de la ecuación propuesta por Camenen, consiste en ajustar los parámetros A y B, de la ecuación en función del factor de forma de Corey por medio de las expresiones mostradas en I.19, valores que son sustituidos posteriormente en la ecuación I.18, con ello se percibe una fuerte presencia del factor de forma y redondez de la partícula en ésta formulación:

$$\begin{aligned}
 A &= a_1 + a_2 \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \text{CSF} \right) \right]^{a_3} \\
 B &= b_1 + b_2 \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \text{CSF} \right) \right]^{b_3} \\
 m &= m \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} \text{CSF} \right) \right]^{m_2} \quad \dots(\text{I.19})
 \end{aligned}$$

donde $a_1 = 24$, $a_2 = 100$, $a_3 = 2.1 + 0.06P$; $b_1 = 0.39 + 0.22(6 - P)$, $b_2 = 20$, $b_3 = 1.75 + 0.35P$; $m_1 = 1.2 + 0.12P$, $m_2 = 0.47$, donde P es la redondez de Powers que se considera para las esferas igual con $P=6.0$ y CSF es el factor de forma de Corey.

En todas las expresiones mostradas en el presente capítulo, se puede observar que las variables involucradas en todas las expresiones son prácticamente las mismas. Siendo la diferencia característica entre ellos la complejidad del modelo desarrollado, ejemplo de ello son las expresiones mostradas por Dietrich y Camenen, que resultan bastante más complejas que otras, dado que involucran variables como el factor de forma o la redondez del sedimento que a su vez incorporan problemas relativos a la medición de dichos parámetros.

Una incertidumbre asociada a las expresiones mencionadas en el presente trabajo, corresponde a la uniformidad de las bases de datos utilizadas en su derivación. Esto se debe a que no existe una única base de datos con la que puedan compararse todas las formulaciones. Esto reduce su comparación objetiva y la determinación de una expresión más completa.

La falta de una unificación para la realización de los experimentos y aun en la definición de conceptos como el de la velocidad de cortante, hace que los trabajos en torno a los parámetros expresados en este capítulo busquen proporcionar una expresión matemática que se ajuste a las pruebas experimentales que se realizan y aun más, llevarlas en su aplicación a condiciones en campo, en donde se pueda aprovechar en la medida de lo posible las nuevas tecnologías de medición existentes.

Por último, las definiciones de velocidad de inicio de movimiento y de velocidad de caída, se encuentran asociadas con características y propiedades de los sedimentos, por lo que la revisión de dichas variables es de vital importancia para establecer las relaciones entre el sedimento y los umbrales de su movimiento.

1.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS

Los sedimentos son los principales protagonistas en algunos de los grandes problemas de la ingeniería costera debido a su capacidad de movilidad. Es entonces necesario revisar las diversas propiedades que poseen, las cuales, de acuerdo al CEM (2001), se pueden agrupar en tres categorías principales: granulometría y tamaño de las partículas, composición del sedimento y características de una masa de sedimentos.

1.2.1 GRANULOMETRÍA Y TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS

La distribución granulométrica del sedimento posee gran relevancia en la ingeniería costera debido a que es uno de los elementos a considerar para llevar a cabo los diseños de rellenos de playa así como para estudios de estabilidad de las mismas, mientras que la velocidad de caída, relacionada con el tamaño de las partículas, permite determinar la turbidez de una columna de agua; así como, junto con otras características relacionadas con las propiedades del tamaño del sedimento en condiciones de flujo, velocidad de caída, volumen de concentración, etc., permiten realizar estimaciones en estudios de transporte de sedimentos. Éstas y más aplicaciones poseen el análisis de la granulometría del sedimento, lo cual ha motivado a desarrollar una clasificación del mismo.

Dentro de las clasificaciones existentes, las más conocidas son las empleadas por la American Society for Testing and Materials (ASTM), que contemplaría al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la clasificación de Wentworth y la escala phi ($\phi = -\log_2(d)$ con d en mm), las cuales se muestran en la tabla I.2.

Para ubicar una muestra de sedimentos dentro de cualquiera de las clasificaciones, se requiere de la realización de una prueba de cribado a través de la cual se obtiene la curva de distribución granulométrica. Dicha prueba es aplicable a material en condiciones secas, y consiste básicamente en la separación, por medio de tamices o cribas, de las partículas que componen la muestra; dichos tamices poseen diferentes aberturas las cuales se hallan estandarizadas (ver tabla I.2). El material retenido en cada malla es pesado, y finalmente, en una gráfica se colocan: en el eje de las ordenadas, en escala logarítmica, el porcentaje de material que pasa una determinada malla; y en el eje de las abscisas, en escala natural, los diámetros correspondientes a las aberturas de las mallas. A la gráfica mencionada es a la que se le conoce como curva granulométrica, y de ella se pueden obtener diámetros representativos d_x que simbolizan el porcentaje “x” de material, que en peso, posee un diámetro menor al d_x .

A partir de esta curva, es posible definir el diámetro asociado a la media y a la mediana de la distribución, diámetros d_x , desviación estándar, sesgo y curtosis de la distribución del sedimento en una muestra, etc., es decir, datos que permiten obtener características como: graduación del sedimento, si el sedimento proviene de una sola fuente (dato relacionado con la moda de la muestra), o el diámetro característico del sitio.

Dado que la definición de diámetro resulta un tanto subjetiva en una partícula irregular considerada individualmente, es que ha surgido lo que se conoce como diámetro nominal (d_N), el cual consiste en el diámetro que tendría una esfera con el mismo volumen que el de la partícula dada. Para su cálculo, se hace la consideración de que la partícula irregular se asemeja en volumen a un elipsoide, de donde se obtiene que si a , b , y c son los tres ejes ortogonales entre sí de mayor longitud posible de la partícula, entonces el diámetro nominal es igual con:

$$d_N = \sqrt[3]{abc} \quad \dots(1.20)$$

Así, los parámetros de tamaño de las partículas se han descrito básicamente con la distribución de los diámetros de los granos de una muestra, la cual se considera representativa y a partir de lo cual se pretende conocer los parámetros involucrados en la solución de determinados problemas.

Tabla I.2 Clasificación del sedimento de acuerdo a su tamaño (tabla modificada del CEM, 2001).

ASTM	Malla Estándar U.S.	Tamaño (mm)	Tamaño (phi)	Clasificación de Wentworth
Boleos		4096	-12.0	Boleos
		1024	-10.0	
Cantos	12 in. (300mm)	256	-8.0	Cantos Grandes
		128	-7.0	
		107.64	-6.75	
Grava Gruesa	3 in. (75mm)	90.51	-6.5	Cantos Pequeños
		76.11	-6.25	
		64.00	-6.0	
		53.82	-5.75	
		45.26	-5.5	
		38.05	-5.25	
Grava Fina	¾ in. (19mm)	32.00	-5.0	Guijarros Muy Grandes
		26.91	-4.75	
		22.63	-4.5	
		19.03	-4.25	
		16.00	-4.0	
Arena Gruesa	# 4 (4.75mm)	13.45	-3.75	Guijarros Grandes
		11.31	-3.5	
		9.51	-3.25	
		8.00	-3.0	
		6.73	-2.75	
		5.66	-2.5	
		4.76	-2.25	
Arena Media	# 10 (2.0mm)	5	-2.0	Guijarros Pequeños
		6	-1.75	
		7	-1.5	
		8	-1.25	
		2.00	-1.0	
Arena Fina	# 40 (0.425mm)	12	-0.75	Gránulos
		14	-0.5	
		16	-0.25	
		18	0.0	
		20	0.25	
		25	0.5	
		30	0.75	
		35	1.0	
		0.42	1.25	
		0.354	1.50	
Finos	# 200 (0.075mm)	0.297	1.75	Arena Muy Gruesa
		0.25	2.0	
		0.21	2.25	
		0.177	2.5	
		0.149	2.75	
		0.125	3.0	
		0.105	3.25	
		0.088	3.5	
0.074	3.75			
0.0625	4.0	Arena Gruesa		
				Arena Media
				Arena Fina
				Arena Muy Fina

1.2.2 CARACTERÍSTICAS DE UNA MASA DE SEDIMENTOS

Puesto que los suelos, ya sean marinos o terrestres, son un cúmulo de sedimentos que no pueden ser estudiados uno a uno, se han creado diferentes parámetros que involucran las propiedades referentes a la totalidad de una muestra y que proporcionan mayor información para la resolución de diversos problemas de ingeniería.

En seguida se hace una breve revisión de los mismos, puesto que son de utilidad en la descripción del umbral de movimiento de las partículas.

1.2.2.1 Relaciones Peso - Volumen

De manera general, los suelos pueden presentar tres fases constituyentes: sólida, líquida y gaseosa, que quedan representadas de manera general por el sedimento o las partículas, el agua y el aire respectivamente. Así, en el suelo s el *volumen de vacíos* (V_v) suele ser ocupado por el volumen ocupado por la fase líquida (V_w) y gaseosa (V_a); mientras que la fase sólida conforma el *volumen de sólidos* (V_s); al volumen total de una muestra suele designarse como V_m .

En el caso de suelos que se hallan por debajo del nivel de aguas freáticas o por debajo del nivel medio del mar son suelos cuyos vacíos normalmente han sido ocupados totalmente por agua (con excepción de los suelos donde hay emanaciones o generación de gases), y por lo tanto se consideran totalmente saturados; no obstante, en la zona de lavado, donde el nivel de agua asciende y desciende, lo que se presenta es una lámina de agua que es adsorbida lo cual produce una interacción de la mezcla de la fase sólida y la líquida, y que suele clasificarse en ésta última, y es a lo que se le conoce como parcialmente saturado.

En la figura I.5 se muestran las fases principales que componen a un suelo, obsérvese que en cuanto a volúmenes la fase gaseosa puede ocupar un espacio importante de una muestra de suelo; sin embargo, en cuanto a los pesos se refiere, ocupa únicamente una pequeña porción respecto del total, por lo que en ocasiones el peso del aire (W_a) se desprecia. En el esquema se emplea la siguiente nomenclatura, la cual se utilizará en la definición de las propiedades del suelo: W_w corresponde al peso de la fase líquida en una muestra; W_s al peso de la fase sólida y W_m es el peso total de la muestra.

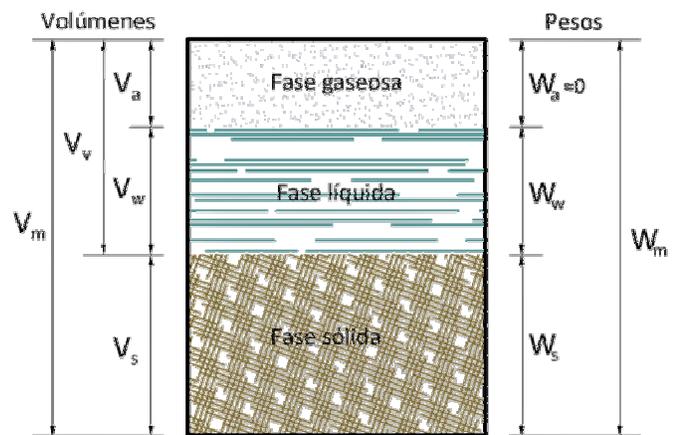


Figura I.5 Representación esquemática de las fases de una muestra, y la asociación con los volúmenes y pesos.

Definidos los volúmenes y pesos asociados a las fases que se encuentran en un suelo, se pueden determinar las relaciones peso- volumen de una muestra. Dentro de las relaciones de volúmenes es posible determinar: la relación de vacíos, la porosidad y el grado de saturación; mientras que entre las

relaciones de pesos, podemos encontrar el contenido de humedad, peso específico, peso específico relativo.

El peso específico de un material queda definido como la relación entre el peso de una sustancia y su volumen; se pueden distinguir distintos pesos específicos de los materiales:

- Peso específico del agua destilada (γ_0). A 4°C de temperatura y a la presión atmosférica a nivel del mar, su valor es igual a 1000 kgf/m³.
- Peso específico del agua en condiciones de trabajo (γ_w). Posee un valor muy cercano al del agua destilada; sin embargo, las variaciones que posee son debidas principalmente a la temperatura y a la concentración de minerales en el agua.
- Peso específico de la masa de sedimentos. El valor es obtenido a través de la definición ya mencionada, por lo que $\gamma_m = W_m/V_m = (W_w + W_s)/V_m$.

La densidad de un material (ρ) está definida como la relación entre la masa de una sustancia y su volumen, y que a diferencia del peso específico, esta propiedad no depende de la aceleración de la gravedad en el sitio. Análogamente al caso de los pesos específicos, se dispone de valores de densidad del agua destilada ($\rho_0=1000$ kg/m³), del agua en condiciones de trabajo (ρ) y de la masa de sedimentos (ρ_m).

Por medio del peso específico de las partículas sólidas de la muestra, es posible calcular el peso específico relativo (S), el cual es la relación entre el peso específico de la masa de sedimentos entre el peso específico del agua destilada:

$$S = \frac{\rho_s}{\rho_0} = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} = \frac{W_s}{V_s \gamma_0} \quad \dots(1.21)$$

Conocido el valor del peso específico, se puede determinar el valor del peso específico sumergido (Δ), el cual es equivalente a restar al peso específico de la muestra el valor del peso específico del agua:

$$\Delta = S - 1 = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad \dots(1.22)$$

La relación de vacíos (e), es la relación existente entre el volumen de vacíos entre el volumen de sólidos de una muestra dada, este término puede expresarse en términos del peso específico relativo:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_m - V_s}{V_s} = \frac{V_m S \gamma_w}{W_s} - 1 \quad \dots(1.23)$$

La porosidad de un suelo (n) es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de la muestra, expresada generalmente en porcentaje. La relación varía desde cero, cuando la masa de sedimentos únicamente se haya compuesta por la fase sólida, hasta el 100% que corresponde a un espacio totalmente vacío. La porosidad puede escribirse en términos de la relación de vacíos como se muestra en seguida:

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_m} \times 100 = \frac{e}{1+e} \times 100 \quad \dots(1.24)$$

El grado de saturación (G), es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos, generalmente expresado en porcentaje. Para suelos saturados, como es el caso de aquellos sumergidos en el mar, el grado de saturación es del 100%.

Por último, para suelos granulares, el grado de compactación se mide a través de la compacidad relativa (C_r), medida generalmente en porcentaje. Esta propiedad básicamente consiste en la relación entre la diferencia del estado más suelto que posee el suelo y el estado *in situ*, y la diferencia entre el estado más suelto y más denso que podría tener el material. Esta propiedad, al igual que la porosidad se halla relacionada con el coeficiente de uniformidad y la morfología que poseen las partículas.

1.2.2.2 Características del mezclado sedimento- fluido

Dentro de estas características pueden mencionarse la concentración, concentración de la masa y la densidad de la suspensión. Los cuales pueden ser obtenidos por medio de las relaciones de peso-volumen mencionadas en el apartado anterior.

De esta manera, la concentración (C), es el volumen del material disuelto en el volumen total de la disolución, que aplicado a los sedimentos se expresaría como se muestra enseguida, ya sea en función de la relación de vacíos, o de los volúmenes de la masa de sedimentos. El dato de concentración suele emplearse en modelos de cuantificación del transporte en suspensión.

$$C = \frac{V_s}{V_m} = \frac{V_s}{V_v + V_s} = \frac{1}{\frac{V_v}{V_s} + 1} = \frac{1}{1+e} \quad \dots(I.25)$$

La concentración en masa (ρ_{cas}) emplea la densidad en su determinación, y representa la relación entre la masa de sólidos y el volumen total de la muestra, lo cual queda expresado ya sea en términos de las relaciones de volumen o por medio de la relación de vacíos.

$$\rho_{cas} = \frac{m_s}{V_m} = \frac{\rho_s V_s}{V_v + V_s} = \frac{\rho_s}{\frac{V_v}{V_s} + 1} = \frac{\rho_s}{1+e} \quad \dots(I.26)$$

La densidad de la suspensión se calcula simplemente como un promedio pesado de los componentes que integran la mezcla sedimento- agua, de tal suerte que puede ser expresado por medio de las densidades relativas a cada constituyente de la mezcla o a través, nuevamente, de la relación de vacíos.

$$\rho_{sus} = \frac{m_m}{V_m} = \frac{\rho_s V_s + \rho_v V_v}{V_v + V_s} = \frac{\rho_s + \rho_v \frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s} + 1} = \frac{\rho_s + \rho_v e}{1+e} \quad \dots(I.27)$$

si se tratase de un suelo completamente saturado, la densidad de vacíos simplemente sería igual a la densidad del agua.

Al encontrarse en un fluido, el sedimento posee características inherentes a la interacción entre ambos elementos, lo cual desencadena diversos fenómenos. Para llevar a cabo el estudio de los mismos, se han desarrollado parámetros adimensionales, donde se consideran las propiedades tanto del sedimento como del fluido. Tal es el caso del parámetro sedimento- fluido, del diámetro adimensional de la partícula y del índice de flotación de Arquímedes.

En cuanto al parámetro sedimento- fluido (S_*) es una expresión que relaciona el diámetro de la partícula, las densidades del sedimento y del fluido así como la viscosidad cinemática, su representación se logra a través de la siguiente expresión:

$$S_* = \frac{D}{4\nu} \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) gD} \quad \dots(1.28)$$

El diámetro adimensional de la partícula o factor de Yalin (D_*) se expresa al igual que el parámetro sedimento- fluido por medio de la viscosidad, el diámetro de la partícula y las densidades tanto del fluido como del sedimento:

$$D_* = \left[\frac{g(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)}{\nu^2} \right]^{1/3} D \quad \dots(1.29)$$

Por último, el índice de flotación de Arquímedes (A), se define simplemente como el factor de Yalin elevado a la tercera potencia, y suele relacionarse con el tipo de flujo que se presenta, este último involucrado en el inicio de movimiento del sedimento.

1.2.3 COMPOSICIÓN DEL SEDIMENTO

De acuerdo con Folk (1974), una clasificación fundamental de la composición de rocas sedimentarias o de los sedimentos se basa en tres componentes: componentes terrígenos, componentes aloquímicos y componentes ortoquímicos. Cada una de estas categorías se establece gracias a la composición mineralógica y a la textura de los sedimentos (incluidos el tamaño y la forma del grano).

1.2.3.1 Material sedimentario terrígeno

El material terrígeno es producto de la erosión de material ubicado fuera de la zona de depositación, acarreado como producto de la degradación de una roca madre. Dentro del material terrígeno se pueden encontrar conglomerados, areniscas, fragmentos de roca, etc. que constan de granos detríticos formados a partir de la roca madre de la cual fueron erosionados, y que se hallan consolidados o no por algún tipo de cementante. Cuando se encuentran consolidados, forman una roca sedimentaria; sin embargo, si se encuentran separados los granos, se clasifican los sedimentos no como rocas, sino como sedimento detrítico,

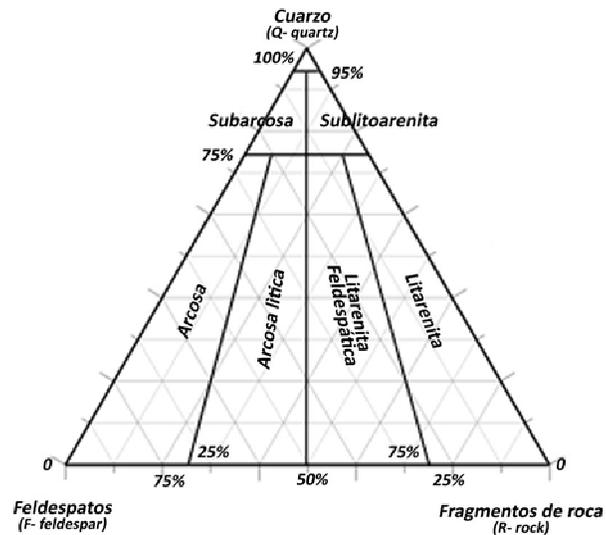


Figura 1.6 Clasificación de material terrígeno; los extremos del diagrama son los cuarzos, feldespatos y fragmentos de roca.

es decir, gravas, arenas y finos.

Los conglomerados y las brechas (cantos rodados, guijarros, gravillas, gránulos) bien redondeados o anguloso, según sea el caso, las areniscas y los finos, se encuentran integrados por granos detríticos de mayor o menor tamaño (gravas, arenas y finos). Otro tipo de material perteneciente a este rango, son las rocas sedimentarias surgidas de rocas piroclásticas, las cuales simplemente añaden el calificativo de “volcánico”.

La subdivisión de este tipo de materiales, más que centrarse en el tamaño del sedimento, lo hace en función de su mineralogía, en otras palabras, el material terrígeno se subdivide en granos compuestos por cuarzo (Q), feldespato (F) y fragmentos líticos (R). En la figura I.6, se muestra la subclasificación de este tipo de material, donde la constitución arcosa es la predominante en feldespatos, y en la constitución lítica predomina el fragmento de roca.

Puesto que la composición de un material generalmente es una mezcla de diferentes componentes, el criterio que discierne si el material puede considerarse como terrígeno es poseer 50% del material bajo esta categoría.

1.2.3.2 Material carbonatado aloquímico

Este tipo de material se encuentra caracterizado por poseer una estructura similar al material terrígeno, en cuanto a estar compuesto por granos detríticos, pero su clasificación resulta un tanto más complicada. Las sustancias que integran este tipo de sedimentos se depositan por precipitación; sin embargo, son materiales de origen químico o bioquímico formados en la cuenca de sedimentación.

La particularidad de este tipo de material es que su formación puede deberse a una interacción con las formas de vida micro y macroscópicas lo cual conduce al aprovechamiento de sustancias en disolución que terminan por fijarse en precipitados directos o como sustancias sólidas de esqueletos o partes duras de los seres vivos implicados (material biogénico), tal es el caso del carbonato de calcio que integra a ciertos sedimentos, tales como los de la Península de Yucatán. Considerando lo anterior, los granos aloquímicos pueden subdividirse en cuatro grupos, en función del componente aloquímico que los integra:

- a) ***Intraclastos***. Representa los fragmentos de sedimento carbonatado débilmente consolidado que han sido divididos, transportados y redepositados por corrientes dentro de la cuenca.
- b) ***Oolites***. Con un tamaño entre 0.1 y 1.0 mm de diámetro, son de forma esférica con estructuras radiales y concéntricas, que se desarrollan alrededor de núcleos de fragmentos de conchas, granos de arenas de cuarzo o un fragmento de fósil. Su formación es química bajo la influencia de corrientes u oleaje de gran energía y en aguas poco profundas.
- c) ***Fósiles o Bioclastos***. Son los más comunes formadores de roca caliza, ejemplos de éstos son algas, restos de coral y conchas de organismos, gastrópodos, ostrácodos, entre otros.
- d) ***Pellets***. Son agregados homogéneos bien redondeados de caliza microcristalina y tamaño comprendido entre 0.03 y 0.2mm de diámetro, que proceden principalmente de las heces de moluscos, gusanos y crustáceos.

El material sedimentario carbonatado al igual que el material terrígeno, se encuentra constituido por una mezcla de los componentes arriba señalados, por un cemento de calcita u otro elemento, lo cual complica aún más la clasificación ya establecida; no obstante, dado que el alcance de este trabajo está centrado en arenas costeras, únicamente se establecen los cuatro grupos de material sedimentario aloquímico, esto debido a que los granos como tales, se encontrarán integrados esencialmente por alguno de dichos grupos.

1.2.3.3 Material sedimentario ortoquímico

Los componentes ortoquímicos, son materiales carbonatados inorgánicos precipitados directamente a partir del agua; son difíciles de identificar puesto que los procesos orgánicos se encuentran altamente asociados en los procesos sedimentológicos de los carbonatos. Prácticamente presentan poca o nula evidencia de transporte significativo. Se distinguen tres grupos básicos de sedimentos de este tipo:

- a) **Evaporitas.** Este tipo de sedimentos se forman cuando las aguas de un lago o una laguna se evaporan y las sales disueltas se precipitan constituyendo depósitos sedimentarios.
- b) **Formaciones de hierro.** Son rocas sedimentarias con un mínimo de 15% de hierro y una estructuración formada por la alternancia de capas de óxidos de hierro y sílice con espesores variables, desde unos cuantos mm, hasta metros. Son materiales formados muy antiguamente con origen sedimentario marino.
- c) **Travertino.** Es un mineral calcáreo depositado por las aguas de manantiales o por agua subterránea que llega a la superficie, a partir de esta se desprende CO_2 y como resultado se obtiene la precipitación de los carbonatos cálcicos, formando depósitos de travertino.

1.3 MORFOLOGÍA DE LAS PARTÍCULAS

En la medición de las propiedades de los sedimentos han surgido diversas técnicas y métodos cuyo fin es determinar parámetros enfocados a describir y clasificar las propiedades geométricas y de forma de las partículas, y que se realacionan con la interacción del sedimento con el fluido en el cual se desplaza. En Göğüş (2001), se detallan algunos efectos relacionados con dicha interacción, tales como:

- Separación del flujo. A medida que se incrementa el número de Reynolds, se cambian los patrones de flujo, lo cual altera las distribuciones de presión sobre la superficie de la partícula.
- Formación de vórtices. Al desarrollarse una separación del flujo, se generan vórtices en los bordes posteriores de la partícula así como variaciones de presión y torques aplicados a la partícula.

Dentro de la descripción de la forma de las partículas y de su geometría, se puede hallar en la literatura el manejo de diversos conceptos, siendo los de mayor importancia: el factor de forma, la redondez y la esfericidad. La finalidad de establecer los anteriores parámetros radica en poder establecer una comparación entre la interacción de una partícula ideal con el flujo que existe a su alrededor y una partícula cualquiera.

Si bien la definición de dichos conceptos no resulta compleja, sí lo es la medición de estos parámetros, motivo por el cual existen gran cantidad de métodos, expresiones y maneras de interpretar las mediciones realizadas.

1.3.1 FACTOR DE FORMA

El factor de forma es un parámetro adimensional que deriva de la medición de la longitud, ancho y grosor de la partícula. Desde los primeros trabajos (Wentworth en 1922), en los que se ha incorporado este concepto, las dimensiones de la partícula se han designado de diferentes maneras, empleándose en este trabajo aquella utilizada por Zingg (1935) y Krumbein (1941), que nombran al eje más largo como “a”, al eje intermedio o ancho como “b”, y al eje más corto o grosor como “c”. Dichos ejes deben ser ortogonales entre sí; no obstante, no necesariamente deben intersectarse en un punto.

La forma en que se pueden medir los ejes es considerar a la partícula encerrada en un prisma imaginario que posea las menores dimensiones posibles, correspondiendo las dimensiones de dicho prisma a las magnitudes de los ejes a, b, c. En la figura 1.7 se muestra un ejemplo de cómo se pueden encontrar configurados dichos ejes en una partícula irregular y esencialmente la equivalencia que se hace de esta con un elipsoide.

Aun cuando, la convención anterior haya sido establecida, existirá una incertidumbre en la medición que se presenta de manera especial con los sedimentos, ya que las formas irregulares de las partículas pueden proveer una subjetividad en cuanto al establecimiento del prisma imaginario. Por lo anterior es que, para la determinación del factor de forma, el error obtenido de su definición será debida a un error humano el cual puede ser disminuido si se orienta la partícula de tal forma que exhiba la menor área proyectada para el ojo (Blott & Pye, 2007).

Definidos los ejes a, b, c de una partícula, se puede estimar el valor del factor de forma; sin embargo, en la literatura pueden encontrarse un gran número de expresiones que están referidas a la definición de dicho parámetro (Briggs *et al.*, 1962; Blott & Pye, 2007). En la tabla 1.3 que se muestra en seguida, se presentan las expresiones que definen este parámetro geométrico.

Tabla 1.3 Expresiones de los diferentes factores de forma.

AUTOR	EXPRESIÓN	RANGO
Wentworth (1922)	$\frac{a + b}{2c}$	1 a ∞
Krumbein (1942)	$\left[\left(\frac{b}{a} \right)^2 \left(\frac{c}{b} \right) \right]^{1/2}$	0 a 1
Corey (1949)	$\frac{c}{\sqrt{ab}}$	0 a 1
Sneed & Folk (1958)	$\left(\frac{c^2}{ab} \right)^{1/2}$	0 a 1
Aschenbrenner (1956)	$\frac{12.8[(c/b)^2(b/a)]^{1/2}}{1 + (c/b)(1 + b/a) + 6[1 + (c/b)^2(1 + (b/a)^2)]^{1/2}}$	0 a 1
Williams (1965)	$\begin{cases} 1 - \frac{ac}{b^2} & \text{si } b^2 > ac \\ \frac{b^2}{ac} - 1 & \text{si } b^2 \leq ac \end{cases}$	-1 a +1
Janke (1966)	$\frac{c}{\sqrt{(a^2 + b^2 + c^2)/3}}$	0 a 1

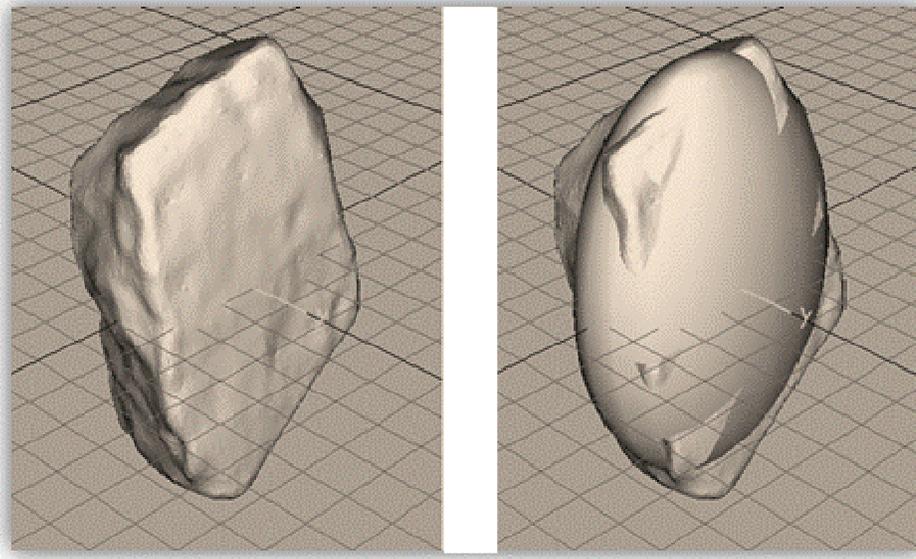


Figura 1.7 Similitud supuesta en la determinación de los factores de forma respecto a la irregularidad de una partícula y un elipsoide, a través de la medición de los ejes a , b y c (Imagen modificada de Stückrath, 2006).

Por medio de los factores de forma, se establecen relaciones de que tan plana (c/b), elongada (b/a) o equidimensional (c/a). Al multiplicar las relaciones mencionadas se puede llegar fácilmente a que, por ejemplo, los factores de Wentworth (tomando en cuenta su recíproco), el factor de Corey y el proporcionado por Sneed & Folk, consideran de mayor importancia los propiedades de equidimensionalidad y forma plana de la partícula, mientras que los demás factores consideran a las otras relaciones como más importantes.

Para discernir entre los factores de forma a utilizar, se han realizado diversos estudios que son referenciados en Komar (1981) quien enuncia de manera breve que en el caso de trabajarse en la determinación de la velocidad de caída de partículas elipsoidales es preferible emplear el factor de forma propuesto por Corey (CSF); sin embargo, de trabajarse con partículas tanto cilíndricas como elipsoidales, es preferible el factor de forma introducido por Janke (E), puesto que sí hace distinción entre estas dos formas.

El factor de forma describe numéricamente la posible relación de aspecto de una partícula, la cual, al encontrar valores particulares, ofrece la posibilidad de poder representar de manera gráfica la relación entre los ejes de la partícula y su respectiva asociación con el factor de forma. Así entonces, han sido propuestos dos diagramas que poseen maneras distintas de distribuir las formas de las partículas en ellos.

El primer diagrama fue desarrollado por Zingg (1935), que básicamente se resume en colocar en un sistema coordenado las relaciones ancho-largo (b/a) y grosor-ancho (c/b), de límites 0 a 1 se divide el cuadrante, en cuatro regiones con la razón 2:3 de las relaciones antes dichas. La terminología original utilizada para nombrar a cada una de las regiones fue la de formas: “planas”, “esféricas”, “planas y

columnares” y “columnares”. A las regiones anteriores se han añadido, con el paso del tiempo, mayor número de clasificaciones para distinguir de mejor manera las formas entre partículas.

En un intento de mejorar la clasificación gráfica realizada por Zingg, se presenta el diagrama triangular de Sneed & Folk (1958), el cual representa en cada esquina una de las siguientes características de forma: totalmente plana, elongada o equidimensional. En este diagrama se manejan originalmente 10 clases diferentes de formas.

Nuevas clasificaciones se han realizado con el fin de añadir de mejor manera los grados de forma; sin embargo, continúan siendo clasificaciones arbitrarias que permiten sobretodo una familiarización con las formas y su descripción dentro de un determinado trabajo. En la figura I.8 se muestran los diagramas de Zingg y de Sneed & Folk, conjunto con ejemplos de formas distribuidas en dichos diagramas.

Tanto uno como otro de los diagramas citados presentan ventajas y desventajas, algunas de las cuales pueden encontrarse en la literatura; entre estas, por ejemplo, el diagrama de Zingg puede distorsionar los valores I/L , lo que proporciona datos más cercanos a 1 que a cero; mientras que el diagrama de Sneed & Folk puede generar distorsiones al aglutinar datos en la esquina inferior derecha del diagrama triangular (formas elongadas). Blott & Pye (2007), por medio de generación aleatoria de dimensiones de partículas y por representación gráfica de los resultados en ambos diagramas, concluyeron que en el diagrama de Zingg se obtiene una mejor distribución de los datos y por lo tanto, apreciación de las formas que poseen las partículas.

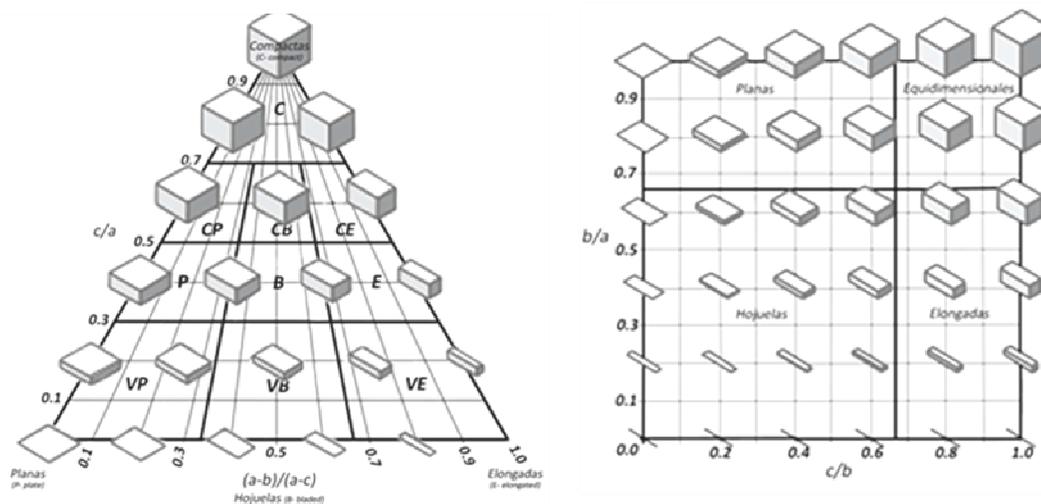


Figura 1.8 Diagramas de Sneed & Folk (a la izquierda) y de Zingg (a la derecha). En ambos se muestra la clasificación original de los autores. En Sneed & Folk se muestran 10 clases: C- compactas, P- planas, B- hojuelas, E- elongadas y la combinación de las anteriores; en Zingg solo se muestran las 4 clases originales: planas, hojuelas, elongadas y equidimensionales.

1.3.2 REDONDEZ

La redondez es una propiedad que permite describir la forma de una partícula, referida especialmente a considerar la relativa angularidad de sus esquinas y aristas. La redondez de las partículas, convencionalmente, se considera independiente de la forma de la partícula, lo cual fue demostrado por Wadell (1932) al sostener que un cilindro rematado en cada una de sus bases por una semiesfera poseerá el mismo valor de redondez que una esfera con igual diámetro (Flemming, 1965). Esta propiedad es asociada a la historia de abrasión que han sufrido los sedimentos, así como su madurez (Basanta, 1970).

Los primeros trabajos realizados en torno a este concepto fueron llevados a cabo por Wentworth en 1919 (Blott & Pye, 2007), quien buscó proporcionar una metodología de medición no dependiente de la subjetividad que se tiene en la determinación del parámetro por simple visualización de los objetos, como se realizaba anteriormente. Dicha metodología de cálculo depende principalmente de la relación del radio de la esquina más aguda (r_i) con respecto al radio principal de la partícula (R). Por otra parte, Wadell en el año de 1933 presenta una nueva forma para medir la redondez de una partícula, que se basa no únicamente en el radio de la esquina más aguda, sino en la suma de los radios de las esquinas respecto al radio principal de la partícula. En la figura 1.9, se muestra de manera gráfica la consideración de los radios para cada una de las metodologías de cálculo; a continuación se señalan las fórmulas empleadas para el caso de Wentworth (1.30a) y de Wadell (1.30b).

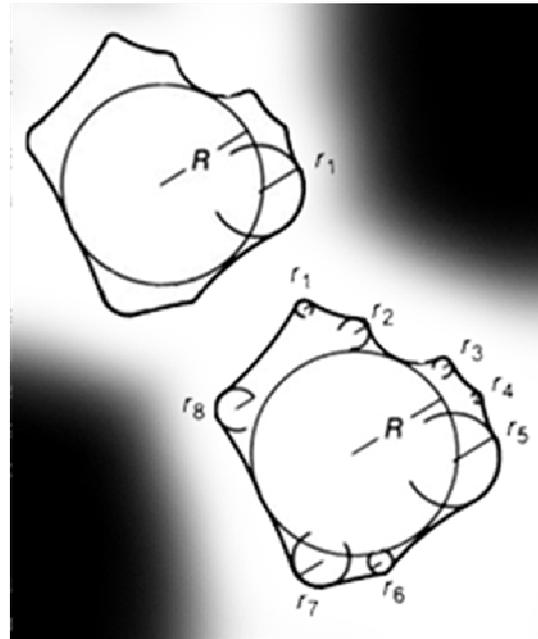


Figura 1.9 Esquematización de los radios a los que hacen alusión las expresiones de Wentworth (arriba) y Wadell (abajo). Imagen modificada de GEL 124.

$$P = \frac{r_i}{R} \quad \dots(1.30a)$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{R} \quad \dots(1.30b)$$

Aun cuando los métodos arriba señalados pretenden eliminar la subjetividad para la estimación de la redondez, su aplicación consume una gran cantidad de tiempo en laboratorio, además, de que la determinación de los radios de las esquinas, en ocasiones recae nuevamente en una ambigüedad para su determinación. Por ello es que posterior a dichos autores se han desarrollado más metodologías para intentar determinar este parámetro. Posterior a Wadell se retomó la estimación de dicho parámetro por medio del ojo humano, puesto que éste alcanza a distinguir de mejor manera la redondez de una partícula.

Autores como Pettijohn, Krumbein y Powers, han empleado siluetas o fotografías de partículas con el fin determinar por medio de una escala gráfica los valores de redondez de sedimentos. De esta manera, se puede determinar esta característica de forma práctica, y aunque precise de incertidumbre, la

inversión de tiempo se disminuye considerablemente. Esta última técnica es la que suele emplearse para granos de arena y que no ha cambiado por más de medio siglo.

Así entonces, la clasificación usual empleada para caracterizar la redondez es la creada por Powers a partir de una modificación de la escala propuesta por Pettijohn. La modificación radica en el empleo de seis clases verbales que dividen el rango de variación de la redondez; Krumbein aplicó a dicha escala verbal una asociación con una escala logarítmica base 0.7 lo que proporcionó el valor definitivo de redondez y con rango de cero a uno. En la figura I.10 se muestra la escala gráfica para la determinación de este parámetro.

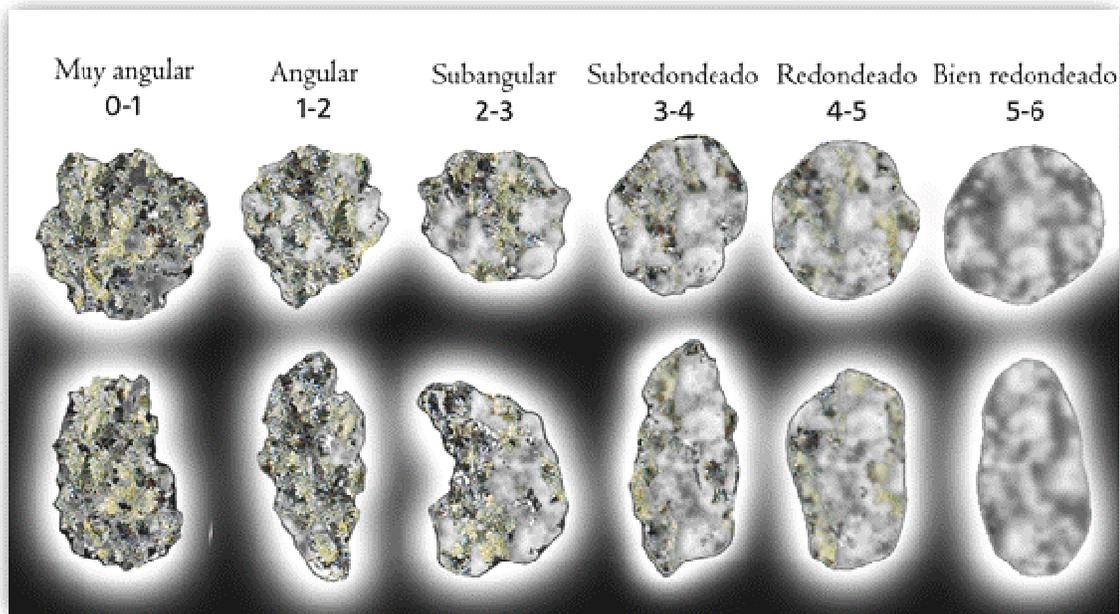


Figura I.10 Clasificación visual de redondez propuesta por Powers y modificada por Pettijohn, mostrándose además, la escala numérica asociada por Krumbein a cada una de los posibles estados de redondez. Asimismo, nótese que las partículas superiores poseen una alta esfericidad en comparación con las partículas inferiores.

1.3.3 ESFERICIDAD Y CIRCULARIDAD

El concepto de esfericidad suele confundirse con el de redondez puesto que la esfera es la partícula de referencia para ambos conceptos. Una manera de distinguir entre ambos conceptos es utilizando como referencia un dodecaedro, el cual posee una alta esfericidad (forma cercana a la esfera) pero una redondez cero, puesto que todas las caras forman ángulos entre sí. En Basanta (1970), se hace mención de que la esfericidad refleja las condiciones de depositación y de la acumulación del material, así como efectos relacionados con bajas esfericidades ocasionados quizá por la acción química actuante en la diagénesis temprana o tardía del sedimento. Por otra parte, la esfericidad se encuentra relacionada con la porosidad del lecho en el que se encontró el material (Jin, 2009), de esta manera, la fracción de huecos disminuye a medida que la esfericidad aumenta.

De manera más precisa, la esfericidad puede definirse como lo hicieron Wadell y Wentworth, a partir de la relación que existe entre el área superficial de un cuerpo con respecto a la que posee una esfera perfecta. La definición anterior si bien sí contempla la real esfericidad, conlleva a múltiples problemas de medición, especialmente si se trata de partículas naturales. Los primeros trabajos en torno a este concepto trataron de basarse en las dimensiones de los ejes de las partículas; sin embargo, esta técnica no diferencia entre esferas y cubos.

Posteriormente, dado que el trabajo de determinar la superficie de un volumen irregular resulta complejo, fueron desarrolladas técnicas basadas en las mediciones de partículas proyectadas en dos dimensiones, con lo que el término de esfericidad es redefinido a circularidad de la partícula.

Cox y Pentland (1927) desarrollan los primeros métodos de medición de circularidad de la partícula basados en imágenes bidimensionales; el primero relacionó el área de la partícula con la de un círculo que tuviese el mismo perímetro, mientras que el segundo, por medio de una variante, relacionó el área de una partícula con la de un círculo con el mismo diámetro. Wadell (1932) desarrolló su propio método de medición de la partícula, al igual que muchos otros autores al pasar del tiempo; en la tabla I.4 se detallan algunas de las fórmulas empleadas para determinar la circularidad de la partícula, a partir de las cuales se concluye que es mucho más fácil la medición de esta propiedad en dos dimensiones que en tres.

En torno a las mediciones de la esfericidad pocos trabajos se pueden encontrar en la literatura, la gran mayoría son grandes consumidores de tiempo, aunque factores de esfericidad llegan a apoyarse en la relación de los tres ejes de la partícula (Krumbein, 1941; Aschenbrenner, 1956).

Todos los métodos mencionados fueron aplicados en primera instancia para granos de arena o gravas vistos en dos dimensiones; sin embargo, gracias al avance de instrumentos tecnológicos, los métodos descritos pueden llevarse a cabo más fácilmente por medio del análisis digital de imágenes e inclusive, las relaciones descritas pueden llevarse a la tercera dimensión de la partícula por medio de microscopios de electrones (SEM).

Tabla I.4 Factores de circularidad comúnmente usados (Blott & Pye, 2007).

AUTOR	EXPRESIÓN	RANGO	NOTAS
Pentalnd (1927)	$\frac{4A}{\pi L^2}$	0 a 1	Relación del área del grano al área del círculo con igual diámetro al del diámetro mayor del grano.
Cox (1927)	$\frac{4\pi A}{P^2}$	0 a 1	Relación del área del grano al área del círculo con el mismo perímetro
Tickell (1931)	$\frac{4A}{\pi D_c^2}$	0 a 1	Relación del área del grano al área del menor círculo circunscrito
Wadell (1933)	$\frac{c}{C} = \sqrt{\frac{4\pi A}{P^2}}$	0 a 1	Relación del perímetro del círculo con la misma área del grano con respecto al perímetro real del grano.
Riley (1941)	$\frac{D_I}{D_C}$	0 a 1	Raíz cuadrada de la relación del diámetro del más grande círculo inscrito con respecto al diámetro del menor círculo circunscrito.
Janoo (1998)	$\frac{P^2}{A}$	4π a ∞	Relación general del perímetro- área.

P es el perímetro de la partícula; **A** es el área de la partícula; **D_I** es el diámetro del círculo inscrito más grande; y **D_C** es el diámetro del círculo circunscrito más pequeño.

1.3.4 MEDICIÓN DE PARÁMETROS

Los métodos visuales y por comparación con siluetas o formas ya preestablecidas, son métodos que son fáciles de realizar al no requerir de grandes recursos tecnológicos; sin embargo, siempre estarán sujetos a errores humanos de apreciación y definición. Un estudio realizado por Folk (1955) realizado a arenas y con estudiantes sin experiencia alguna en el análisis de partículas, arrojó que, para el análisis de la redondez por medio de las imágenes de redondez de Powers, se tuvo un error experimental de ± 0.35 , lo cual resulta bastante amplio si se considera el rango de la escala. Por otra parte, en dicho trabajo también se realizó el análisis de la esfericidad estimando los tres ejes de la partícula, con lo que se consiguió errores de ± 0.02 , que resulta un error prácticamente despreciable.

El empleo de los métodos visuales ha sido mejorado con el uso del análisis digital de imágenes, con lo que los parámetros quedan mejor definidos. El requisito base para poder efectuar un buen análisis digital consiste en proveer un contraste del fondo respecto de la partícula a analizar con la mejor resolución posible, pero especialmente por la cámara empleada en la toma de las imágenes. La base fundamental para realizar dichos análisis es mantener un contraste entre la partícula y el fondo, lo que permite la obtención de imágenes binarias (blanco y negro) requeridas para el análisis por computadora; posteriormente se emplea el análisis de los píxeles que integran la partícula Janoo (2008) o por medio de series de Fourier (Ehrlich, 1970). En la figura I.11, se muestra de forma muy básica el método de análisis para el área y el perímetro de una partícula, cabe destacar que si bien se perfecciona la cuantificación de los parámetros, estos no dejan de estudiarse de una forma bidimensional.

La primera de las técnicas provee una interpretación 3-D de las características de una partícula debido a la capacidad de resolución de las imágenes obtenidas ya que con la calidad obtenida puede incluso determinarse con facilidad la rugosidad de la superficie de la partícula. El SEM, permite observar un grano desde diferentes perspectivas, así como la capacidad de realizar análisis de rayos X que traen el beneficio de conocer la composición elemental de la partícula. Por otro lado, el microscopio de luz únicamente permite mejorar la calidad de la imagen obtenida para su análisis; la resolución respecto a un SEM es bastante pequeña, y por tanto no pueden emplearse para determinar, por ejemplo, la rugosidad de las partículas; sin embargo, los costos de esta técnica son bastante menores frente a los de su competencia. En la figura I.12 se muestran imágenes tomadas con dichos instrumentos (Goldbery, 1989; Cox, 2008).

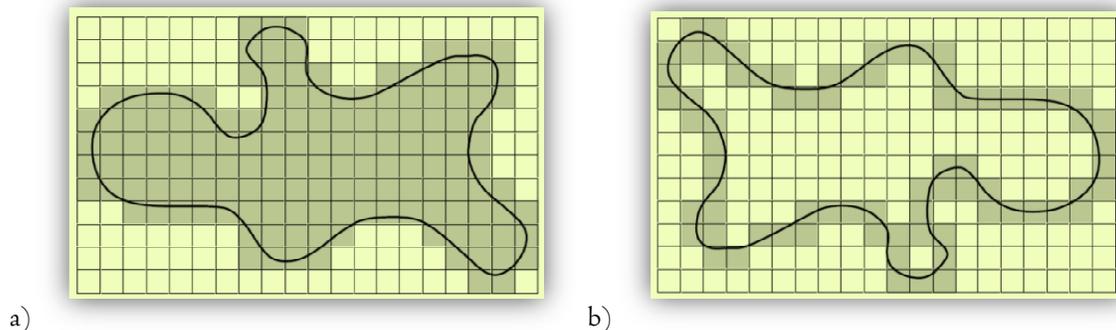


Figura I.11 En a) se muestra el análisis de los píxeles que conforman un área y en b) el perímetro de una partícula cualquiera, tal y como lo realizaría una computadora. (Imagen tomada de Janoo, 1998).

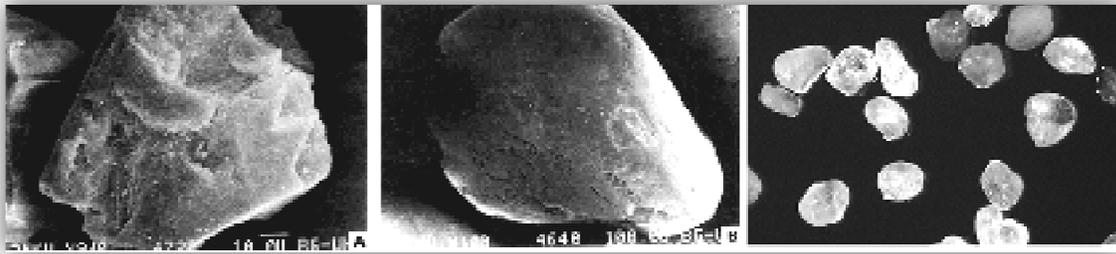


Figura 1.12 A la izquierda y al centro se muestran dos imágenes capturadas por medio de un SEM (tomadas de Goldbery, 1989), donde claramente se observa la textura de los granos; a la derecha, una imagen capturada por medio de un LM (tomada de Cox, 2008) donde se observa una mayor facilidad para la conversión a binario y realizar el análisis por computadora.

Para análisis más detallados de las características de una partícula pueden emplearse dos técnicas (Cox, 2008): Microscopios Electrónico de Barrido (SEM por sus siglas en inglés) o con Microscopios de Luz (LM por sus siglas en inglés).

Las técnicas básicas bidimensionales, con la utilización de imágenes digitales y análisis computacional, permiten una disminución considerable de tiempo y costos de análisis frente a técnicas tridimensionales como las ya mencionadas, motivo por el cual se ha afinado el desarrollo del análisis de imágenes por computadora en cualquiera de sus dos vertientes: a través del contraste entre las partículas y su fondo, o por medio de considerar las diferencias de texturas identificables en las imágenes (Buscombe y Masselink, 2009).

Capítulo 2

TRABAJO DE CAMPO Y LABORATORIO

Capítulo 2



TRABAJO DE CAMPO Y LABORATORIO

Para la caracterización de los fenómenos de velocidad de caída y de inicio de movimiento, se decidió emplear arena proveniente de las costas de la Península de Yucatán dadas las características que los sedimentos en ella presentan, así como para iniciar un proceso de caracterización mecánica del sedimento en las costas mexicanas.

Estudios realizados en arenas de origen calcáreo, en cuanto a los parámetros ya mencionados, han sido escasamente desarrollados, tanto por la dificultad que representa el trabajar con partículas irregulares de tamaño pequeño, como por los países de origen en que se desarrollan los estudios, los cuales no suelen poseer dichos materiales de forma común en sus costas.

Por tal motivo el análisis de los parámetros da inicio con el trabajo de campo para la obtención de las muestras, seguido de todos los estudios en el laboratorio y gabinete para conseguir así la caracterización completa del sedimento. Una breve descripción del procedimiento seguido se muestra en el presente capítulo.

2.1 TRABAJO DE CAMPO

Los pasos a seguir en esta parte del proceso pueden resumirse básicamente a la selección, recolección y extracción de la muestras, así como a la elaboración previa de una planificación para determinar los sitios candidatos a ser analizados.

Las campañas de campo para extraer las muestras de arena fueron realizadas a lo largo de varios años, dada la complejidad existente para su obtención. Se dio inicio a dicha labor en el año de 2007, por lo cual para la realización de esta tesis, se disponía con la mayor parte de las muestras. Igualmente fueron realizadas campañas de campo en el año 2008 al 2010, y continua aún vigente la recolección de muestras; sin embargo, el análisis de esta tesis se llevó a cabo con aquellas muestras obtenidas hasta antes de febrero de 2010.

Los sitios fueron seleccionados procurando una distribución espacial uniforme a lo largo de las costas de la zona norte de la Península de Yucatán; sin embargo, la dificultad para acceder a algunos sitios especialmente debido a la falta de caminos, a la presencia de terrenos vírgenes, o la ubicación de reservas naturales, provocó discontinuidades que impiden completar un estudio con cobertura plena de la costa de la Península. Por otra parte, en sitios de gran interés, como por ejemplo Cancún o Puerto Morelos, se extrajeron un mayor número de muestras.

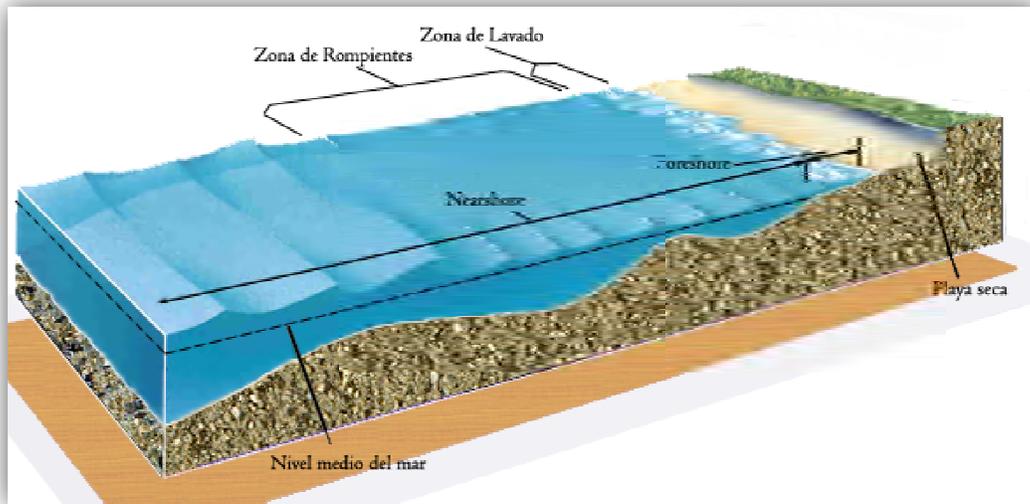


Figura 2.I Representación de las zonas principales que componen una playa. La extensión de la región de vaivén (foreshore), está en función de las mareas, mientras que la región de transformación (nearshore), se extiende poco atrás de la primera línea de rompientes.

Otro criterio de selección para extraer una muestra fue su ubicación a lo largo del perfil de la playa, y se consideró a aquellas zonas en las que se presenta la asimetría del oleaje y hasta la zona seca, en la figura 2.I se muestra la ubicación de las mismas:

- a) *Zona de la playa seca, berma (backshore)*. Esta zona puede considerarse como aquella en la que la interacción con el mar se produce únicamente bajo condiciones de tormenta, y el interés surge del análisis de la diferencia entre esta zona activa en condiciones extremas y las otras dos zonas.
- b) *Zona de lavado (swash zone)*. Es donde el agua asciende y desciende constantemente en la cara de la playa. La importancia de esta zona radica en que la arena y otros sedimentos pueden ser transportados ya sea en dirección a tierra o hacia el mar, igualmente es donde se puede producir un transporte longitudinal como consecuencia de las corrientes que genera la oblicuidad del oleaje.
- c) *Zona de rompientes (surf zone)*. Cuando el oleaje se acerca a la costa, por efecto del someramiento rompe. La rotura del oleaje se produce en un área debido a que de manera natural las ondas no viajan todas con la misma altura de ola. la importancia de esta muestra radica en que es justamente la zona donde se inicia el transporte de sedimentos.

Cabe señalar que en la Península de Yucatán la amplitud de marea ronda entre los 10 – 20 cm para la región caribeña, y de 20-30 cm en la correspondiente al golfo de México, por lo que la ubicación de la zona de lavado es fácilmente identificable sin importar el momento en el día en que se extraiga, a diferencia de otras zonas en la República, donde la amplitud de marea debe tomarse en cuenta.

Producto de los efectos combinados de marea de tormenta y de oleajes intensos en condiciones de tormenta, el transporte de sedimentos se presenta en zonas que en situaciones normales forman parte de

la playa seca. Por lo cual, para realizar una caracterización adecuada fue necesario investigar el sedimento que puede ser movido tanto en condiciones normales como extremas.

De esta manera, al procurar satisfacer los dos criterios mencionados, se extrajeron un total de 145 muestras provenientes de 58 sitios, los cuales son mostrados en la tabla 2.1, y su ubicación en la figura 2.2.

El 84.2% de las muestras pertenecen a las costas del estado de Quintana Roo, 10.5 % a las del estado de Yucatán, y 5.3% a las del estado de Campeche. La diferencia de porcentajes es debido a las dificultades para acceder a los sitios, especialmente en el estado de Yucatán, donde por ejemplo, una franja considerable de litoral pertenece a la Reserva de la Biosfera “Ría Lagartos”, cuya extensión abarca cerca de 80 km y un área de 12 580 hectáreas, por lo cual los caminos de acceso a las playas en esta reserva por lado de tierra son prácticamente inexistentes; mientras que en el estado de Campeche existe una gran extensión de costa tipo manglar sin la presencia de arenas.

La extracción de todas las muestras se hizo de manera superficial siempre y cuando no hubiese una ligera capa de restos de concha o coral por encima de la arena, en cuyo caso una pequeña excavación para removerla, de alrededor de 20 cm, fue necesaria para obtener en la medida de lo posible la mayor cantidad de arena (únicamente dentro de la zona de lavado y de playa seca).

Mientras tanto, en la zona de rompientes, la rotura del oleaje impidió obtener la muestra de forma sencilla, por lo cual, la metodología de extracción se hizo a través de un recipiente tubular de boca aproximada de 3 pulgadas con el cual se pudo remover parte del fondo, la boca fue inmediatamente tapada para evitar que el sedimento se perdiese por suspensión. Posteriormente, fuera del agua, el sedimento recolectado se almacenó en una bolsa hermética y el agua devuelta nuevamente al mar, previamente separados ambos por decantación.

La cantidad de material extraído por muestra debía ser de 0.5 kg en peso seco para poder llevar a cabo el análisis granulométrico correspondiente, esto en función de la norma ASTM C 136; sin embargo, dado que posteriores pruebas al material sucederían y con la posibilidad de repetir algunas pruebas, se decidió extraer entre 2 y 3 kg en campo.

De manera general, fueron extraídas tres muestras por sitio, cada una correspondiente a alguna de las zonas del perfil de la playa descritas anteriormente, cabe mencionar que si la muestra de la zona de rompientes no se encontraba a una profundidad cercana a los 1.5 m, entonces sería extraída a la misma profundidad, pero sería caracterizada como perteneciente a la zona sumergida, aún dentro de los límites de la zona de resaca (nearshore). No obstante lo anterior, las primeras muestras obtenidas de la isla barrera de Cancún, solo contemplaron la zona de berma, mientras que las de Yucatán contemplaron 4 muestras: playa seca, zona de lavado y dos en la zona de rompientes a 0.5 y 1.5 m de profundidad.

Es importante mencionar que el material obtenido de Cancún corresponde a distintas fechas comprendidas entre 2007 a 2010, por lo cual se obtuvo material perteneciente a los diferentes rellenos realizados en el lugar; no obstante, dado que el objetivo de esta tesis no es clasificar de forma particular a una única región sino a los sedimentos calcáreos, no se hace mucho hincapié en los tiempos de extracción, aunque posteriormente en los análisis de laboratorio sí se mostrarán los cambios en el tipo de sedimento antes y después de un relleno para ejemplificar las variaciones que conlleva un escaso estudio de una zona.

A continuación, en la tabla 2.I, se citan los sitios de donde fueron tomadas las muestras, empleándose además la siguiente notación para identificar la zona del perfil de la playa: Pb, playa seca; Pl, zona de lavado; PrA para la zona de rompientes a 1.5m de profundidad, y PrB para la zona de rompientes a 0.5m de profundidad.

Tabla 2.I Coordenadas de sitios seleccionados para análisis de muestras.

SITIO	MUESTRAS	LONG.	LAT.	SITIO	MUESTRAS	LONG.	LAT.
QUINTANA ROO							
Boca Sur	Pl, PrA	-86.7954	21.0358	Sian Ka'an	Pb, Pl, PrA	-87.4664	20.1197
Pto. Morelos I	Pb, Pl, PrA	-86.8673	20.8680	Bahía Príncipe	Pb, Pl, PrA	-87.3321	20.3643
Pto. Morelos II	Pb, Pl, PrA	-86.8659	20.8708	Akumal, punto 1	Pb, Pl, PrA	-87.3153	20.3947
Pto. Morelos III	Pb, Pl, PrA	-86.8686	20.8660	Akumal, punto 2	Pb, Pl, PrA	-87.3191	20.3916
Cancún, punto 1	Pb, Pl, PrA	-86.7452	21.1335	Pl. del Carmen I	Pl	-87.0717	20.6252
Cancún, punto 2	Pb, Pl, PrA	-86.7482	21.1304	Pl. del Carmen II	Pl	-87.0718	20.6252
Cancún, punto 3	Pb, Pl, PrA	-86.7494	21.1286	Punta Brava I	Pl, PrA	-86.9110	20.8121
Cancún, punto 4	Pb, Pl, PrA	-86.7578	21.1146	Punta Brava II	Pl	-86.9023	20.8156
Cancún, punto 4a	Pb, Pl, PrA	-86.7631	21.1036	Punta Brava III	Pl	-86.8981	20.8321
Cancún, punto 5	Pb, Pl, PrA	-86.7668	21.0945	Punta Allen	Pb, Pl, PrA	-87.4743	19.7976
Cancún, punto 6	Pb, Pl, PrA	-86.7742	21.0746	Holbox	Pb, Pl, PrA	-87.3829	21.5232
Cancún, punto 7	Pb, Pl, PrA	-86.7791	21.0604	H. Beach Paraiso	Pb	-86.7791	21.0363
Cancún, punto 8	Pb, Pl, PrA	-86.7820	21.0472	H. Carissa	Pb	-86.7476	21.1313
Cancún, punto 9	Pb, Pl, PrA	-86.7819	21.0423	H. Club Regina	Pb	-86.7817	21.0396
Cancún, punto 10	Pb, Pl, PrA	-86.7800	21.0369	H. F.A. Condesa	Pb	-86.7722	21.0807
Punto A (Cancún)	Pb, Pl, PrA	-86.7511	21.1396	H. Gran Caribe R	Pb	-86.7544	21.1206
Punto B (Cancún)	Pb, Pl, PrA	-86.7487	21.1392	H. Gran Melia	Pb	-86.7712	21.0834
Punto C (Cancún)	Pb, Pl, PrA	-86.7742	21.1439	H. Hilton I	Pb	-86.7774	21.0660
Punto D (Cancún)	Pb, Pl, PrA	-86.7870	21.1440	H. Hilton II	Pb	-86.7767	21.0680
Punto E (Cancún)	Pb, Pl, PrA	-86.7854	21.1447	H. Hyatt Cancún	Pb	-86.7535	21.1226
Punto F (Cancún)	Pb, Pl, PrA	-86.8060	21.1767	H. Ritz Carlton	Pb	-86.7675	21.0930
Punto G (Cancún)	Pb, Pl, PrA	-86.8021	21.2411	H. Royal Sands	Pb	-86.7656	21.0977
Isla Mujeres	Pb, Pl, PrA	-86.7512	21.2602	H. Royal Solaris	Pb	-86.7818	21.0497
Tulum I	Pb, Pl, PrA	-87.4364	20.1980	H. Sheraton	Pb	-86.7606	21.1094
Tulum, II	Pb, Pl, PrA	-87.4477	20.1737				
YUCATÁN							
Chelem	Pb,Pl,PrA,PrB	-89.7482	21.5232	Dzilam	Pb,Pl,PrA,PrB	-88.9309	21.3875
ECCA	Pb,Pl,PrA,PrB	-89.8175	21.2555	Progreso	Pb,Pl,PrA,PrB	-89.6512	21.2902
Telchac	Pb,Pl,PrA,PrB	-89.2792	21.3434	U.A.Y.	Pb,Pl,PrA,PrB	-89.5253	21.3132
CAMPECHE							
Pl. Isla del Carmen	Pb, Pl	-91.5533	18.7686	Punta Xen	Pb, Pl	-90.8981	19.1878
Bahía Tortugas	Pb, Pl, PrA	-91.0361	19.0962				
* Abreviaturas: Long.= longitud; Lat.= latitud; Pl.= playa; U.A.Y.= Universidad Autónoma de Yucatán; H.= Hotel.							

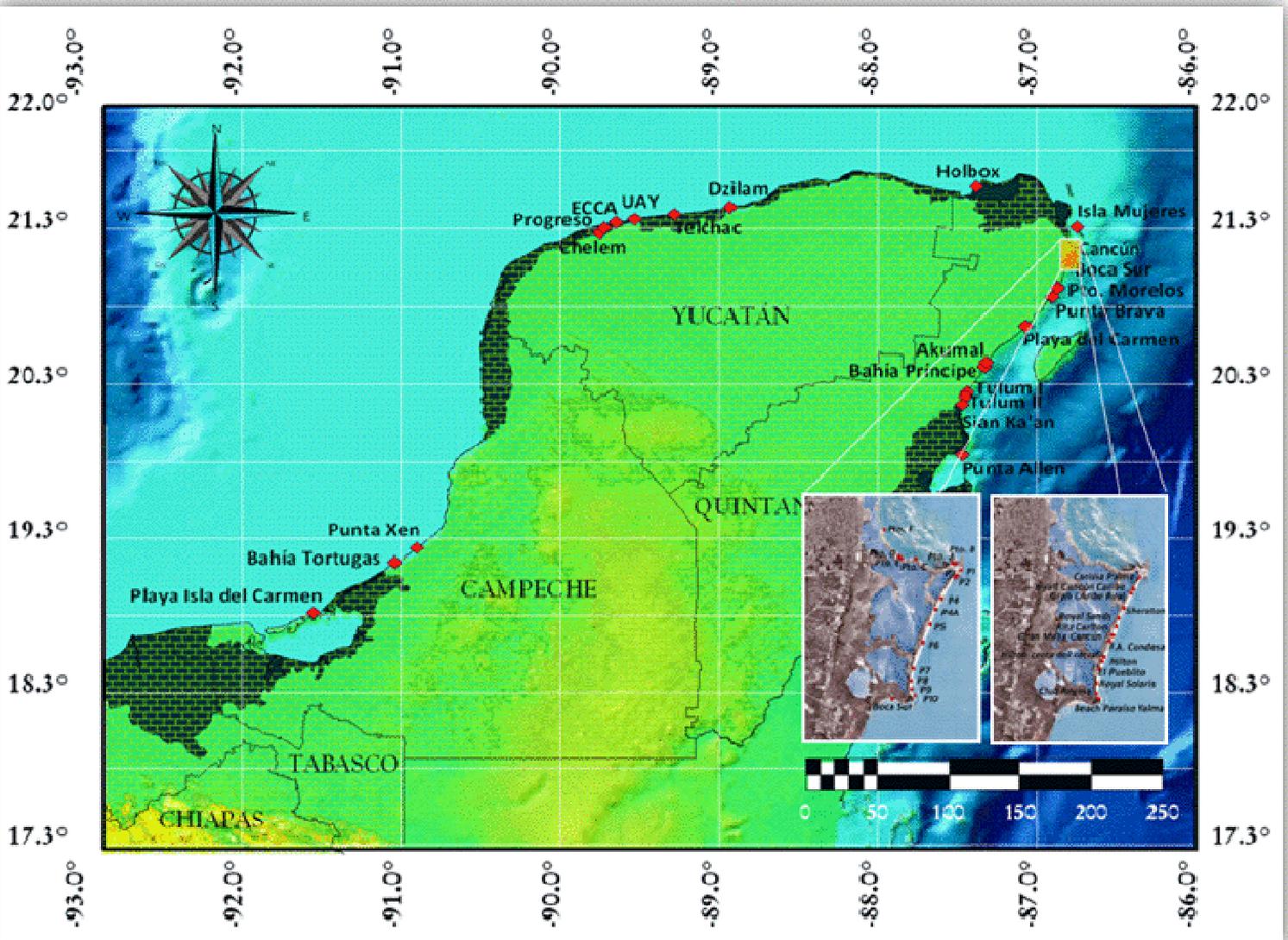


Figura 2.2 Ubicación de los sitios donde fueron obtenidas las muestras; en tono oscuro se marcan regiones naturales de gran importancia, donde se dificulta la extracción de muestras: Pantanos de Centla (en Tab. y Camp.), Petenes-Ría Celestín (en Camp. y Yuc.), Dzilam-Ría Lagartos-Yum Balam (en Yuc. y Q. Roo) y Sian Ka'an-Laymil-Xcalak (en Q. Roo). Imagen hipsométrica modificada de Atlas Interactivo de México (INEGI) e Información cartográfica de CONABIO.

2.2 TRABAJO DE LABORATORIO

Dentro del trabajo experimental en condiciones controladas, se desarrollaron los análisis propios para la caracterización de las propiedades físicas del sedimento: granulometría, densidad, ángulo de reposo, entre otros. Sin embargo, de manera especial se hace hincapié en las metodologías para efectuar las pruebas correspondientes a velocidad de caída e inicio de movimiento de las partículas, las cuales conforman parte del aporte de esta tesis, debido fundamentalmente a la facilidad para llevarlas a cabo, así como la eliminación de incertidumbres con el apoyo de la tecnología disponible y con la posibilidad de generalizar así su aplicación.

Así, con las muestras recolectadas a lo largo de las diversas campañas de campo, se llevó a cabo su análisis y caracterización. En los subsecuentes apartados se muestra únicamente la metodología seguida, mientras que los resultados se reservan para los siguientes dos capítulos.

2.2.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

De acuerdo con la nomenclatura de la ASTM, para el análisis granulométrico, las mallas utilizadas en los tamices fueron las del #5, #8, #10, #14, #18, #25, #35, #45, #60, #80, #120, #170 y #230, que corresponden a aberturas de 4, 2.36, 2.00, 1.40, 1.00, 0.71, 0.50, 0.355, 0.250, 0.180, 0.1255, 0.090 y 0.063 mm, respectivamente. Igualmente el procedimiento que se describe enseguida se encuentra asociado a la norma ASTM C 136-06 “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”, aunque en el caso de que hubiese sedimento fino en grandes proporciones, que no fue el caso de las muestras obtenidas, se recomienda el uso de la norma ASTM C 117.

Antes de realizar el vibrado de las cribas con el material, fue necesario secar las muestras a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ($230 \pm 9^\circ\text{F}$) durante aproximadamente 24 hrs., hasta que éstas tuviesen mediciones constantes de masa, para lo cual se empleó una balanza con resolución de 0.1 gr. En el caso de que se encontraran en la muestra restos de conchas grandes o fragmentos de coral, estos fueron removidos manualmente antes de iniciar todo el procedimiento que aquí se describe, esto debido a que lo que se deseaba era la obtención de la granulometría correspondiente a la arena del sitio seleccionado.

Ya secada y enfriada la muestra, se colocaron alrededor de 0.5 kg de material en la columna de tamices, que fueron ordenados de manera decreciente según la abertura de la malla. Posteriormente, durante un tiempo de 5 minutos, la cribadora se mantuvo en funcionamiento, quedando retenida en cada tamiz una determinada porción de material. Es necesario considerar no exceder la carga de cada tamiz, pues de lo contrario, rupturas y daños en el mismo podrían provocarse; así debe procurarse no sobrepasar una carga de 7 kg/m^2 por tamiz para aberturas menores a los 4.75 mm, ni 2.5 veces la abertura del tamiz por el área del tamiz si las aberturas son mayores o iguales a los 4.75 mm.

Finalmente se determinó la masa del material retenido en cada tamiz, y la suma del material en los diferentes tamices no debía tener un error mayor al 1% respecto a los 0.5 kg iniciales. Con dichos resultados se pudo construir la curva granulométrica como la que se muestra en la figura 2.3, y obtener de ella, por interpolación con polinomios de Hermite (Ruiz, 2007), los diámetros nominales de interés: d_5 , d_{10} , d_{16} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{75} , d_{84} , d_{95} .

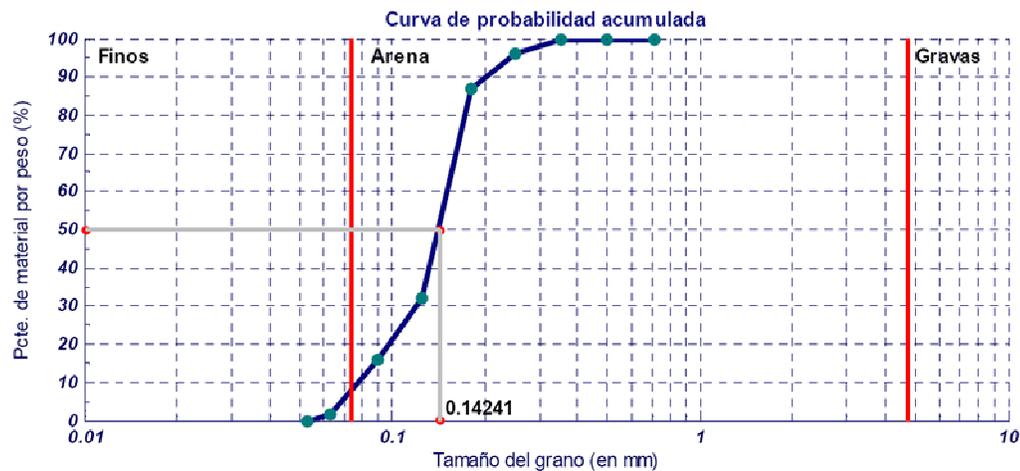


Figura 2.3 Curva granulométrica de la muestra Bahía de Tortugas (PrB), donde se muestra la ubicación del d_{50} obtenido con el procedimiento señalado en Ruiz, 2007.

Con los diámetros de interés fue posible, con la correspondiente conversión a escala phi (ϕ), el cálculo de los parámetros estadísticos de la muestra, como son: media, desviación estándar, sesgo, curtosis, donde la metodología y las expresiones pueden encontrarse en Folk (1957). Con dichos parámetros, fue posible determinar (Ruiz, 2009) características del mecanismo de depósito del material, tales como: el número de posibles fuentes del sedimento, lo cual se refleja en la moda muestral; el posible agente de depositación, donde para una distribución leptocúrtica el oleaje sea el principal involucrado; o ser indicativos de la graduación del material.

Igualmente, con los diámetros señalados fue posible la estimación de los coeficientes de curvatura (C_u) y de uniformidad (C_u). Los cuales permiten asociar la distribución de la muestra con la clasificación elaborada por el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

2.2.2 ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES BÁSICAS DE UNA MUESTRA

Con el material seco se continuó con la determinación de las propiedades básicas de la muestra que incluyeron al peso volumétrico, la densidad relativa y el ángulo de reposo. El primero de estos tres parámetros se obtuvo con el empleo de una cápsula de vidrio de volumen y peso conocido, la cual fue rellena con el material de la muestra seca sin realizar compactación alguna y enrazando el material a la altura de la boca de la cápsula; posteriormente se midió el peso del material más la cápsula y se restó el peso de la cápsula, con lo que se obtuvo la cantidad de material que ocupa dicho volumen. Por medio de la relación peso entre volumen se obtuvo el peso volumétrico del material.

Para la estimación de la densidad relativa, se siguió un método indirecto que consiste en el empleo del picnómetro cuyo procedimiento puede ser revisado en la norma ASTM D854 “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer” y que básicamente consistió en la obtención de la relación entre las masas del sedimento y la del agua destilada, y donde se mantiene constante el volumen que ocupan ambos materiales.

Posteriormente, para la determinación del ángulo de reposo, se dispuso de una caja de acrílico con dimensiones de 10 x 10 cm, la cual se encuentra destapada totalmente en su parte superior, y posee una cara lateral que es removible, de esta manera, se colmata la caja de acrílico con el material a analizar y una vez enrazado se remueve la cara lateral correspondiente, esto permitió que el sedimento se derramase formando el ángulo de reposo respecto de la horizontal, y el cual pudo ser medido con ayuda de un transportador adherido a la caja de acrílico y perpendicular al derrame, haciendo coincidir el origen con una de las esquinas del borde por donde escurre el material.

Para un mayor seguimiento de esta parte del trabajo de laboratorio, puede consultarse el trabajo de Ruiz (2010), donde se ahonda más en el desarrollo de las pruebas correspondientes a las propiedades físicas de la muestra.

2.2.3 ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES BÁSICAS DE LAS PARTÍCULAS

Dentro de las propiedades básicas de las partículas se cuentan la esfericidad, la circularidad y el factor de forma, los cuales fueron obtenidas a partir de un análisis de imágenes por computadora, que permite una mayor precisión de los datos obtenidos. Puesto que ahora no se estudió la muestra entera sino a partículas individuales, la elección de éstas resultó importante pues, para el caso de las pruebas de la velocidad de caída, los granos a los cuales se les determinó sus propiedades también fueron sometidos a dicha prueba.

Con el motivo de hacer representativos los granos a ser estudiados, se eligieron entre 10 y 15 granos por muestra, que tuviesen un diámetro intermedio (b) cercano al d_{50} obtenido del análisis granulométrico. Para ello, se tomaron fotografías con una cámara Nikon® y un objetivo de micro lentes que permitió la toma de imágenes en primer plano con una resolución de 10 Mpx., en la figura 2.4 se muestra el equipo utilizado.



Figura 2.4 Cámara Nikon y objetivo AF-S VR Micro Nikkor 105 mm f/2.8G IF-ED) empleados, con dispositivo disparador y reductor de vibración (VR), auto enfoque (AF) y autoenfoque interno (IF) para distancias de enfoque más cortas, y cristales ED para la corrección de color y brillo.

Todas las características citadas permitieron capturar imágenes del sedimento con la nitidez y claridad necesaria como para ser observados con facilidad en la computadora y realizar su caracterización por este medio, lo cual cubre un amplio rango de diámetros si se tiene en cuenta que las variaciones en diámetro de las partículas oscilan desde los 0.07 hasta los 2 mm, lo cual para una cámara común resultaría difícil de capturar, especialmente aquellos diámetros inferiores a los 0.4 mm.

2.2.3.1 Procedimiento de selección de partículas

Con el fin de satisfacer la selección del diámetro de los granos escogidos, mencionada en párrafos anteriores, se requirió de una escala conocida que permitiese determinar la relación entre el número de píxeles propios de la fotografía digital y los milímetros reales de la partícula. Por tal razón fue colocada una cuadrícula con aberturas de 1 mm y por encima de ella el sedimento (ver figura 2.5a).

Una vez realizado lo anterior se capturaron las fotografías con ayuda del disparador remoto, de tal forma que se obtuvo una vista superior del plano de la retícula con los granos, cuidando en la medida de lo posible áreas borrosas en ella, lo cual se logró fácilmente al separar la lente de la cámara unos 31 cm (1 ft) respecto del objetivo, lo cual corresponde a la distancia mínima focal de la lente.

Una vez capturadas las imágenes, por medio de dos instrucciones del programa Matlab® fue posible identificar los granos de interés:

```
> fig=imread('nombre de la imagen');  
> imtool (fig)
```

donde en la primera instrucción, el nombre de la imagen debe incluir la extensión del archivo; mientras que la segunda instrucción despliega en pantalla la imagen con herramientas que permiten medir el número de píxeles, realizar acercamientos a un área determinada, seleccionar grupos de píxeles, e información de los píxeles con su respectiva ubicación, entre otras. Por lo tanto, al emplear la herramienta de medición “regla”, es posible medir los granos ubicados en la pantalla, en píxeles, y posteriormente hacer la conversión a milímetros por medio de la escala que proporciona la retícula.

Así, seleccionados los granos con diámetro cercano al d_{50} , fue posible obtener digitalmente las propiedades de esfericidad, circularidad y factor de forma, además de que, ubicados en la retícula, pudieron ser extraídos como se explicará más adelante y utilizarlos para realizar las pruebas de velocidad de caída, que fue lo que se hizo.

2.2.3.2 Obtención de los parámetros de las partículas

La caracterización de las partículas se realizó en diferente tiempo a las pruebas de velocidad de caída siempre y cuando se mantuviera el registro de las partículas seleccionadas y el orden en que fueron probadas. Lo anterior se logró al guardar el archivo de la imagen (con los letreros que indican la medida del diámetro del grano) desplegada por las instrucciones del Matlab® y al anotar en un registro los siguientes datos: número de muestra, sitio de extracción, d_{50} de la muestra (en mm y en pix), diámetro (en mm y en pix) y número de grano probado, velocidad de caída del grano probado, nombre del archivo con la imagen. Esto trae la ventaja de que de forma separada una persona pueda realizar las pruebas de velocidad de caída, y otra revise los parámetros de la partícula, lo que incrementa la eficiencia del proceso.

El más sencillo de los parámetros a obtener fue el de redondez de la partícula, el cual fue obtenido con la escala de Powers descrita en el Capítulo I de esta tesis; se consideró la escala original (Powers, 1952) y no la escala modificada por Pettijohn (Blott & Pye, 2007), esto debido a que, aunque suelen emplearse en los estudios de velocidad de caída e inicio de movimiento cualquiera de las dos escalas, fue mucho más sencillo utilizar la escala natural propuesta originalmente, que la escala logarítmica del último autor citado.

Con la comparación visual de la redondez de la partícula, si bien incluye cierta subjetividad, las variaciones obtenidas no son tan significativas, especialmente si se le usa como un criterio que permite diferenciar sedimentos trabajados o no en una determinada playa, esto proporciona datos de la energía a la que es sometido el material, o el tiempo relativo para producir tal redondez, lo cual se ve asociado también con el diámetro del sedimento.

El siguiente parámetro calculado de forma relativamente sencilla fue el de esfericidad, cuyo proceso consistió establecer la relación entre el área de la partícula y su perímetro. Dadas las características de las imágenes, aun cuando poseen gran nitidez y claridad, no fue posible utilizar rutinas disponibles para la obtención del perímetro y del área, así como para la estimación de la redondez, pues el color del papel en que se hizo el trazo de la cuadrícula y los granos no mostraron el contraste necesario. En su lugar se empleó la aplicación Autocad®, para delinear el contorno de las partículas seleccionadas, y con la instrucción *area* se determinó tanto el área como el perímetro, para con ello calcular la redondez de la partícula. La posibilidad de hacerlo con este último programa radica en que diferenciar lo que es el fondo de los granos resulta una tarea muy sencilla para el ojo humano y contornear la partícula no es complejo, lo cual no sucede con el procesamiento por computadora, el cual sí podría llegar a realizarse siempre y cuando el contraste entre el fondo y el elemento deseado sea importante.

Por último, la determinación del factor de forma se obtuvo, al igual que la esfericidad, por medio del despliegue de la imagen por las instrucciones de Matlab®, dado que con esta herramienta es fácil medir tanto el eje mayor “a”, como el intermedio de la partícula “b”; sin embargo, la medición del eje corto de la partícula “c”, resultó de alguna forma más compleja debido a que la imagen fue tomada en vista superior a los granos. Para resolver el problema anterior se requirió de la apreciación de volumen que el ojo humano percibe, así como la asociación de las sombras generadas por los granos al momento de ser fotografiados. En las imágenes tomadas, existían granos que poseía forma prácticamente cilíndrica o esférica, como consecuencia del origen biogénico del material, por lo tanto, dado que un cilindro o una esfera poseen de profundidad lo mismo que de ancho, se tiene que puede ser conocidos de ellos el ancho; al proyectar la sombra de estos objetos cuyas dimensiones son conocidas. Al comparar las dimensiones con las del grano seleccionado pudo estimarse la profundidad de estos últimos. Igualmente, en caso de que se encontraran problemas de iluminación de la fotografía y no se hubiera podido estimar la profundidad de este modo, se recurrió a una inspección visual de la forma del grano, el cual posee en forma general secciones que se asemejan a conos, especialmente en las puntas de las partículas y cuyo ancho es similar a la profundidad; se identificó además que la mayoría de las partículas analizadas son aplanadas en su parte central y redondeadas en sus extremos, lo cual facilitó la estimación de su profundidad. En la figura 2.5 puede observarse la similitud de las partículas con formas geométricas conocidas en la determinación del factor de forma; los pasos de transformación seguidos en tal figura ocurren mentalmente, de tal suerte que de imaginar a las partículas de esa manera, se mide únicamente donde se ubica el eje corto de la partícula “c”.

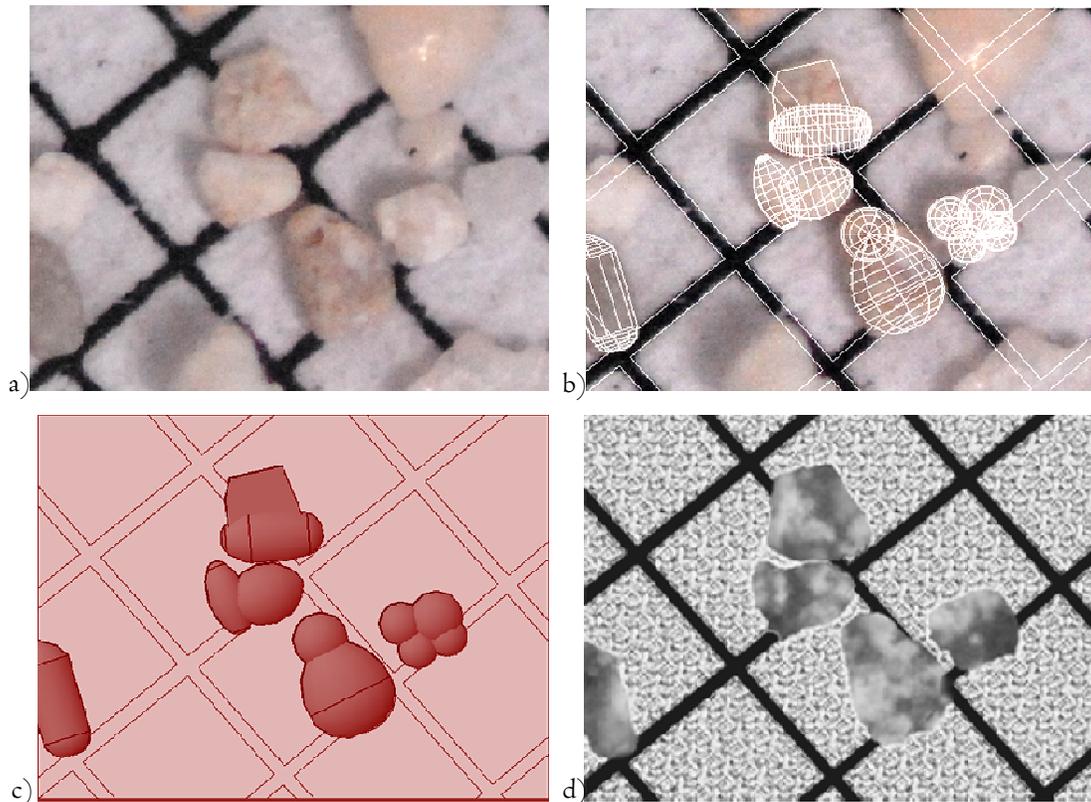


Figura 2.5 Descripción del proceso de ajuste de las partículas originales (inciso a) a formas geométricas regulares con ancho y profundidad de igual magnitud (inciso b y c) y su transformación nuevamente a partículas irregulares tras aplicar únicamente un *render* tipo roca y suavizar las uniones de las figuras geométricas (d).

2.2.4 PRUEBAS DE VELOCIDAD DE CAÍDA

Para las pruebas de velocidad de caída, la medición se obtuvo de forma más exacta y precisa al emplear cámaras de grabación y referencias de magnitud conocida que se mantienen constantes durante toda la experimentación. El procedimiento de prueba es sencillo; sin embargo, el montaje del equipo debió hacerse con cuidado con el fin de obtener los mejores resultados posibles.

Así, el primer paso consistió en la utilización de una probeta sin graduación, de vidrio, con diámetro interno de 6 cm y altura de prueba de 50 cm., en cuya parte posterior fue colocada una graduación con resolución de 1 mm, la cual sirvió para medir la distancia recorrida por la partícula en caída, con el especial cuidado de que el fondo de la misma tuviese un color verde, lográndose con ello el contraste con los granos y que éstos pudiesen ser vistos con facilidad al revisar la grabación hecha.

Posteriormente la probeta fue llenada con agua destilada hasta unos 0.5 cm por debajo de la boca de la misma; el manejo de este tipo de agua permite mantener constantes los parámetros asociados al fluido de prueba, particularmente la viscosidad y la densidad, con lo que se mejoran las condiciones de prueba.

Por otra parte, una videocámara con resolución de 30 cuadros por segundo (0.03 segundos/cuadro), fue empleada para grabar el recorrido de la partícula, por lo que conocida la velocidad de grabación en cuadros por segundo y fragmentado el video en dichos cuadros fue posible conocer el tiempo que tardó en pasar dos determinadas marcas de la graduación cuya distancia era conocida, y por medio de la relación de distancia entre tiempo se calculó el valor de velocidad de caída de la partícula correspondiente. Por lo tanto, la estimación de este parámetro realizada con la metodología descrita permitió un menor grado de incertidumbre ya que al grabarse el fenómeno puede revisarse cuantas veces sea necesario y así eliminar las posibles dudas respecto de las mediciones, además de que se evita la subjetividad de apreciación del operador, lo que reduce los errores humanos al mínimo.

Para mejorar aun más la visibilidad de la caída del sedimento, se colocó un sistema de iluminación que permitió obtener un mayor contraste entre el fondo y la partícula; por ello, el fondo elegido fue negro debido a que las partículas al ser calcáreas tienen un color predominantemente blanco, y se hizo que la luz iluminara únicamente a las partículas. Una mampara negra con forma semicilíndrica rodeando la parte posterior de la probeta fue empleada, mientras que la iluminación se colocó de tal forma que se evitó la captación de reflejos a consecuencia del vidrio de la probeta, sin dejar de enfocar a la partícula, lo cual se logró al colocar luces de gran intensidad anguladas a 45° respecto del eje focal de la videocámara, los haces de luz se concentraron en dirección de la probeta, con lo que esta última no es deslumbrada en ningún momento, igualmente la mampara mencionada permitió atenuar dichos reflejos a consecuencia del acabado mate que posee.

Al momento en que se tuvo todo el equipo mencionado, fue posible dar inicio a las pruebas, para lo cual el procedimiento de éstas comienza con la selección de las partículas tal y como se mencionó en el apartado 2.1.2.1. Los granos seleccionados se separaron del resto por medio de un utensilio de punta fina (para granos de diámetro inferior a 0.25 mm) o ligeramente achatada (para granos de mayor diámetro) remojada previamente en agua, lo que genera una adhesión entre la punta del instrumento y la partícula.

Una vez que uno de los granos se seleccionó para realizar la prueba (previo registro de su diámetro estimado en píxeles, número de grano de prueba y nombre de la muestra), se le retiró del resto como ya se mencionó, y se le colocó inmediatamente en una caja pequeña descubierta en su parte superior, manteniendo el orden de acuerdo al registro correspondiente. Previamente el interior de dicho recipiente se pintó de negro para no perder de vista los granos y generar el contraste deseado. Posteriormente, ya retiradas la totalidad de las partículas a ensayar, se encendió la videocámara para dar inicio a su grabación, entonces los granos fueron colocados en la probeta para iniciar su caída por la columna de agua, con ayuda del mismo utensilio de punta fina o achatada humedecida mencionada anteriormente. La introducción de dicha punta con el grano debió hacerse con cuidado pues el problema principal de la colocación es la ruptura de la tensión superficial. Por lo anterior, la punta con el sedimento debieron introducirse poco menos de 0.5 cm después de atravesar la superficie de la columna de agua, con lo que el grano se desprendió automáticamente de la punta e inició su caída por el fluido con velocidad inicial cero; sin embargo, en el caso de que el grano haya sido muy fino y al intentar atravesar la tensión superficial se quedara justamente en la superficie, un ligero golpe sobre éste permitió que iniciare su caída, y aunque, la velocidad inicial no sea cero, el equilibrio de fuerzas

producirá que la velocidad se estabilice hasta llegar a un valor constante el cual será la velocidad de caída buscada, la única afectación que se presenta al realizar lo anterior es que la velocidad de caída tarda una distancia mayor en alcanzarse; otra forma de romper la superficie fue mediante el empleo de una punta auxiliar, a fin de desprender el grano de la punta del primer utensilio.

Debe mencionarse, que la distancia desde la superficie de la columna de agua, hasta donde se produce la velocidad constante del sedimento es aproximadamente de 15 cm para sedimentos inferiores a los 0.6 mm y de unos 20 a 25 cm para granos de arena de mayor diámetro. Por lo tanto, la grabación del fenómeno debe iniciarse posterior a las distancias señaladas, para verdaderamente capturar el momento en que se presenta la velocidad de caída. Para sedimento mayor a los 0.6 cm es recomendable que la altura de la probeta sea mucho mayor a 50 cm; en el caso de las pruebas señaladas, dado que únicamente 5 de las 145 pruebas se encontraron en dicho caso, se consideró apropiada la longitud de probeta.

De esta manera, se probaron de 10 a 15 granos por muestra, los cuales se registraron en orden como fueron seleccionados y ensayados: la velocidad de caída y los otros parámetros ya mencionados relativos a la partícula. Así se obtuvo tanto las características propias de la partícula como las del fenómeno que se estudia en la presente tesis.

La revisión de los videos cuadro por cuadro permitió minimizar los errores, quedando estos únicamente en función de la precisión de grabación de la cámara y la graduación de distancia. Igualmente, entre las ventajas con las que se cuenta al realizar la metodología descrita es que los videos no necesariamente deben ser examinados al momento en que son capturados, que si bien es recomendable, no se gana ni pierde información, por lo cual se consigue mayor flexibilidad para el análisis del fenómeno de velocidad de caída.

Probablemente con el uso de video cámaras de alta velocidad, que son capaces de registrar más de 1000

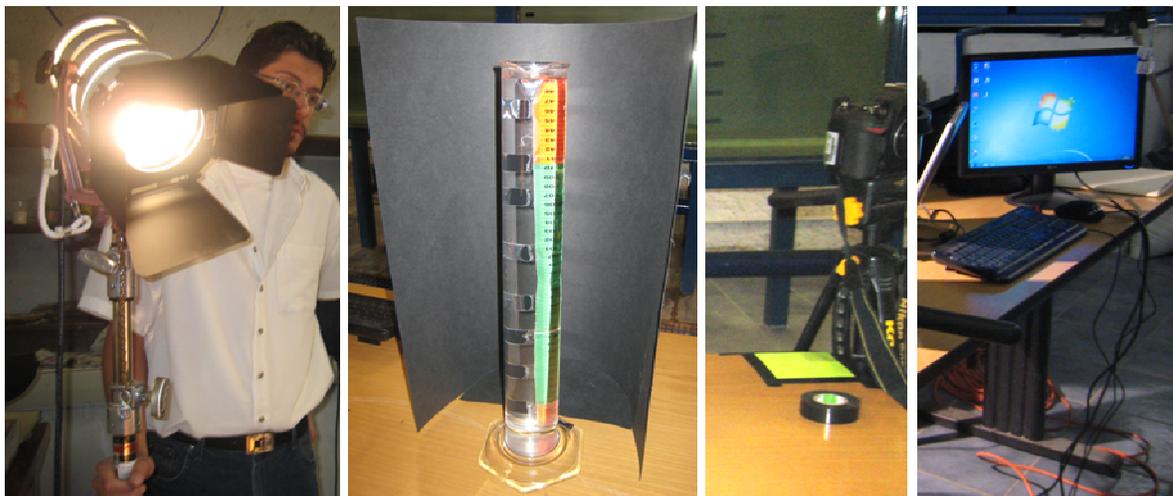


Figura 2.6 Imágenes del montaje del equipo. De izquierda a derecha se tiene la iluminación que incide en la probeta de pruebas llena con agua destilada, la cámara fotográfica colocándose en posición ortogonal a la retícula de medición (cuadro ubicado en una esquina de mesa) y una computadora para el procesamiento de las imágenes capturadas tanto por la cámara fotográfica, como la de video.

cuadros en un segundo, los resultados experimentales mejorarían en exactitud, pero la solución de los problemas de iluminación asociados a la sensibilidad óptica de este tipo de cámaras no son de fácil adecuación técnica en un laboratorio de hidráulica. Por otro lado, de resolverse se tendría la ventaja de estar en condiciones de observarse los efectos turbulentos en el movimiento de la partícula y como afecta ésta a la caída del sedimento, con la posibilidad de captar giros y rotaciones que son comunes a la gran mayoría de los granos, pero escasamente descritos en la literatura relacionada al tema de la velocidad de caída.

Así mismo, en la selección de granos se recomienda la colocación de un fondo que contraste con los granos como tonalidades verdes (clasificación RGB de colores R: 11, G: 226, B: 0 ó similares), lo cual permitirá automatizar especialmente la obtención de las propiedades de los granos y eliminar aun más los posibles errores humanos.

En la figura 2.6 se ilustran los elementos requeridos en la aplicación de la metodología para realizar las pruebas de velocidad de caída, con la adición de las mejoras de la metodología recomendada.

2.2.5 PRUEBAS DE INICIO DE MOVIMIENTO

Los ensayos para registrar el inicio de movimiento básicamente consistieron en colocar una cama de sedimento sujeta a la condición exclusiva de la acción del oleaje, y donde se midieron las variables de velocidad del sedimento, del flujo, así como la altura del oleaje.

Las pruebas fueron llevadas a cabo en el Canal de Oleaje del Laboratorio del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería, UNAM. Las dimensiones de dicho canal, son de 37 m de largo, 1.2 m de alto y 80 cm de ancho, con una capacidad de generación de oleaje regular e irregular.

De esta manera, el primer paso para desarrollar las pruebas en el canal de oleaje, fue la construcción de un elemento que permitiese la colocación de la cama de sedimento, con el tamaño suficiente como para ser colmatado, que pudiese cubrir el mayor área así como permitir que se formasen rizos o ripples en su interior, por lo cual, el volumen con las características mencionadas fue de 30 x 30 cm con un espesor de 1cm, el cual puede almacenar poco más de 2 kg de material, esto representa el mínimo necesario para realizar las pruebas que se describen.

El recipiente fue fabricado con placas de polietileno de espesor de 0.8 cm y, para evitar su flotabilidad como consecuencia de la acción del oleaje, se construyó con un doble fondo, es decir, el recipiente consistía de un cajón en el cual se colocó un peso muerto (compuesto en este caso por cubos de concreto de 3 cm, pero puede ser sustituido con otro material como arena) sobre del cual se ubicó la charola que albergaba el material de prueba. En la figura 2.7a se ilustra el recipiente mencionado con el fondo relleno de cubos de concreto.

Dado que el recipiente posee una altura de 10.5, por sobre el fondo, fue necesaria la elaboración de una estructura que no permitiese una gran deformación del oleaje, así como nivelar el tope del recipiente que almacena el sedimento de prueba. Dicha estructura consistió de dos elementos:

- Una rampa con un ancho de 0.79 cm, altura 9 cm y pendiente 1:7 construida de placas de polietileno, rellena con arena y sellada para evitar la salida de dicha arena. La rampa fue

- colocada en la zona central del canal como se muestra en la figura 2.7a y 2.7b, a una distancia de la pala de generación de oleaje igual con 15.70 m, esto con el fin de ubicar el recipiente con la muestra y los instrumentos de medición en un punto que pudiera ser visible a través de las paredes de vidrio del canal sin el obstáculo de los postes de la estructura de éste.
- Una estructura para nivelación del recipiente con la muestra, la cual fue realizada con cubos de concreto de 3 cm y de 1.5 cm colocados uno a uno alrededor del recipiente, y que comprendió un espacio entre el recipiente y la rampa de cerca de 60 cm, y otros 60 cm en sentido contrario a la ubicación de la rampa, contados a partir del borde del recipiente.

En la figura 2.7a se ilustra el dispositivo con el montaje del recipiente para la muestra en su interior. Cabe mencionar que una vez colocada la rampa al interior del canal de oleaje, fue necesaria la colocación de sellos de neopreno tanto en los bordes como en el fondo de ésta para evitar que se produjeran ya sea supresiones o flujos canalizados por los espacios entre la rampa y el borde del canal que influenciaran el movimiento de las partículas o generaran cambios en el desarrollo del oleaje.

Respecto a la estructura de nivelación se hizo con cubos de concreto que por su peso no serían removidos tras el paso del oleaje, así como también evitar cambios de rugosidad respecto con la muestra. Entre la rampa y el final del área de la estructura de nivelación (largo aproximado de 1.50 m) fue colocada una primera cama de cubos de 3 cm, sobre la cual se colocaron 2 camas de cubos de 3 cm, pero estas últimas considerando el espacio para recibir el recipiente con la muestra; finalmente, por encima de la rampa y por encima de la tercera capa de cubos de 3 cm, se colocó una capa con cubos de 1.5 cm, para preservar la rugosidad a lo largo de las estructuras. Por último, por delante de la rampa fue colocado un tapete con grava de origen calcárea para proporcionar una zona de transición a la misma, y continuar la rugosidad hasta el fondo del canal de oleaje.

Armado el dispositivo, el siguiente paso realizado fue el de colocar los instrumentos de medición: PIV (Particle Image Velocimetry), sensores de nivel y vecrinos, los cuales se muestran en la figura 2.7c. Tanto el PIV, como los vecrinos, tienen por objetivo principal la captación de las velocidades presentes en el flujo, con la principal diferencia de que el primero también puede captar las velocidades de los sedimentos de forma simultánea, pues dispone de un sistema que permite el envío de una “pantalla láser” por pulsos que es captada por una cámara especial, con lo que se obtienen pares de imágenes, estos captados a una velocidad de 125 ms entre uno y otro, y separación de 1500 μ s entre las imágenes de cada par de fotos. Los vecrinos, por su parte, solo son capaces de medir velocidades puntuales.

La ubicación de dichos aparatos fue de tal suerte que se obtuvieran mediciones representativas del fenómeno de inicio de movimiento. Por tal motivo, la ubicación de los instrumentos fue como sigue:

- Con el objeto de medir el oleaje incidente sin perturbación, el primero de los sensores de nivel fue colocado a los 5 m a partir del cero de la pala de generación de oleaje. El segundo sensor fue ubicado justo al terminar la rampa para medir la deformación del oleaje por la presencia de ésta (a 16.4 m del cero de la pala). El tercer y último sensor de nivel fue colocado a los 20 m para medir la deformación del oleaje tras haber pasado por la estructura, así como para medir la reflexión del oleaje como consecuencia de los disipadores de energía del canal (esto último antes de la colocación de las estructuras para estimar el inicio de movimiento).
- Los vecrinos fueron localizados antes y después del recipiente con la muestra, esto es, a los 17.05 y 17.35 m respecto del cero de la pala, para obtener las velocidades puntuales en dichos

lugares y conocer si existe algún cambio importante de la velocidad del flujo como consecuencia de la presencia del recipiente con la muestra de arena a ensayar.

- El cañón del PIV por la capacidad de envío de una pantalla láser es capaz de encontrarse hasta un metro por delante o por detrás de la ubicación de la muestra, se prefirió por detrás de ella para evitar perturbar el oleaje, y por detrás de los vectrinos lo que permitió su colocación sobre los rieles ubicados por encima de los costados del canal de oleaje, por lo cual su posición final fue a los 18 m.

Una vez que los instrumentos (figura 2.7b) y las estructuras para contener a la muestra de sedimento (figura 2.7a) fueron ubicados, se procedió a colocar los aproximadamente 2 kg de material en el recipiente correspondiente, con el especial cuidado de no proporcionar compactación al material y enrazado éste al tope del recipiente, para lo cual se empleó una brocha o una espátula que facilite dicha labor. Igualmente debió cuidarse de no mover los instrumentos para mantener su ubicación a lo largo de todas las pruebas, lo cual también puede solucionarse con la colocación de marcas de su posición.

El siguiente paso es el llenado del canal de oleaje hasta alcanzar una profundidad de 40 cm, esto para todas las muestras comprendidas entre 0.10 y 2.00 mm. Dicha altura fue seleccionada con base en los resultados de una serie de experimentos realizados previamente con arena proveniente de Puerto Morelos ($d_{50}=0.2044$ mm en la zona de berma) la cual es de un tamaño medio, fino, a comparación de la gama de tamaños que serían probados, esto resultó en que las alturas para que se iniciase el movimiento se encuentran entre 15 y 20 cm, por lo que la altura ideal para que el oleaje no rompiese



Figura 2.7 En a) se aprecia la construcción de la estructura que permitiría lograr alcanzar el nivel del recipiente que contendría la muestra, así como igualar en lo posible las rugosidades de la misma y su alrededor. En b) se presenta la estructura mencionada terminada, y en c) la ubicación de: cañón del PIV, los dos vectrinos y un sensor de nivel bajo (de izq. a der.) durante la realización de una prueba.

sobre la muestra fue de unos 40 cm medidos a partir del fondo del canal de oleaje.

Con el nivel del agua correspondiente, se calibran los instrumentos: para los sensores de nivel es preciso colocarlos inicialmente con un voltaje cero en la posición cero, posteriormente se sube verticalmente la posición del sensor una distancia conocida tal que los sensores no queden por encima del agua y se mide el voltaje correspondiente, enseguida, se bajan verticalmente una distancia tal que queden por debajo de la ubicación cero y se vuelve a medir el voltaje correspondiente; finalmente, con las relaciones medidas de voltaje y altura del sensor de nivel es posible realizar una regresión lineal, y esta debe registrarse con un valor del coeficiente de correlación no menor a 0.99995 para cada uno de los sensores, lo cual asegura que la calibración fue hecha correctamente, y puede asociarse la curva de voltajes (que es lo que mide el sensor) frente a la altura del nivel de agua por encima del sensor. Debe procurarse que los sensores al realizarse las pruebas queden sumergidos en todo momento por el agua, para que las mediciones no salgan distorsionadas. Los vectrinos automáticamente se calibran, pero es conveniente revisar que las mediciones no tengan ruido y de ser así modificar la frecuencia de registro.

En cuanto al PIV se refiere, lo primero es obtener el enfoque adecuado de la cámara para que el sensor que recibe los datos lo haga de forma adecuada, por lo cual se recomienda colocar algún objeto al centro de la cama de sedimento y enfocar la lente, la cual es similar a la de una cámara fotográfica. Una vez hecho esto, es necesario ubicar puntos de referencia para hacer el escalamiento de las imágenes que proporciona el instrumento de medición, por lo tanto, para el desarrollo de este trabajo, se colocó un nivel graduado en milímetros sujeto a un tubo para poder introducirlo y sacarlo del agua fácilmente; hecho esto, se obtuvieron las imágenes para realizar la escala. Es importante señalar que el procesamiento de las imágenes obtenidas por una medición con el PIV así como el escalamiento de las imágenes se realizó por medio del programa Flow Manager©, el cual forma parte del equipamiento completo del PIV.

Ya calibrados los equipos se procede a dar inicio a las pruebas, para lo cual se generan oleajes de altura de 15 cm y períodos comprendidos entre 1.0 s y 2.0 s a cada 0.2 s. Es conveniente que para sedimento con d_{50} inferior a 0.20 mm, se realice una prueba más correspondiente a la misma altura de oleaje pero con un período de 0.9 s, pues para este sedimento, la condición crítica se presenta en períodos en torno a dicho valor.

Las mediciones de los vectrinos se recomienda duren alrededor de un minuto con frecuencia de medición superior a los 40 Hz; así mismo, para los sensores de nivel, se recomienda que la medición dure un minuto y 80Hz. Tanto los vectrinos como los sensores de nivel deben iniciar su medición simultáneamente con el comienzo del movimiento de la pala de generación de oleaje, para tener el control del tiempo de medición de las variables que dichos instrumentos miden y poderlas asociar entre sí.

El PIV, bajo las condiciones mencionadas en párrafos anteriores, no alcanza a medir mucho tiempo, por lo cual se recomienda iniciar su medición en el instante en que se perciba que la altura de ola es la correspondiente a 15 cm. Para llevar el control del tiempo entre el PIV y los otros instrumentos, lo que se hizo fue iniciar el conteo de un cronómetro en el instante en que los vectrinos y sensores de nivel iniciaran su medición, el tiempo del cronómetro se detuvo cuando el PIV comenzó su medición.

Las pruebas de interés para obtener el inicio de movimiento, corresponden a una cama de sedimento plana sujeta a las condiciones de oleaje críticas, por debajo de las cuales no se produce movimiento alguna de la cama, y por encima de ellas, el movimiento de la cama es seguro.

El procesamiento de los datos por el PIV se realizó por medio del mismo programa Flow Manager© el cual posee una rutina que consiste en comparar las imágenes contenidas en cada par para hallar variaciones de la ubicación de pequeñas partículas entre una y otra, con lo cual se obtuvo así las velocidades de inicio de movimiento del sedimento por medio de la definición de velocidad, que es la variación de la distancia en el tiempo, esto proporcionó tanto la magnitud de la velocidad, como la dirección y sentido de ésta.

Con las mediciones del PIV se pudieron obtener los valores de la velocidad de sedimento, mientras que con los vectrinos se obtuvieron las mediciones de la velocidad del flujo, por lo cual ambas pueden ser correlacionadas. Los resultados de dicho análisis serán mostrados en el capítulo 4 de este trabajo.

Finalmente, la velocidad de inicio de movimiento al ser analizada en las imágenes proporcionadas por el PIV debe ser considerada como aquella en la que se perciba un desprendimiento de un cúmulo de granos respecto de la cama, sobre todo las velocidades concentradas inmediatamente por encima de la cama de sedimento donde existe tal suspensión o saltación; no obstante, si el mecanismo de movimiento es por reptación o arrastre, deben considerarse las velocidades en los puntos de la cama donde se perciba el correspondiente movimiento. El hecho de medir cerca de la cama, se basa en la obtención en la medida de lo posible de aquella velocidad con la que se da inicio al movimiento del sedimento hasta antes de formar parte del fluido, ya que al encontrarse en este, adoptará la velocidad del flujo.

Capítulo 3

CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS

Capítulo 3

CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS

Con la realización de las pruebas, cuya metodología fue descrita en el capítulo anterior, es posible caracterizar los sedimentos que en general pueden encontrarse en las playas de la costa de la Península de Yucatán. A continuación se muestran los resultados y un análisis de los mismos que permitirá generalizar las propiedades de los sedimentos calcáreos.

El presente capítulo se enfoca especialmente a las propiedades de los sedimentos como muestra y como partícula sin ahondar mucho en su ubicación específica en la Península, lo cual será abordado en el último capítulo de esta tesis. Igualmente, los resultados relativos a los umbrales de movimiento se dejan para un apartado posterior donde serán vistos a mayor detalle.

El panorama general bajo el cual se presentan los resultados en las siguientes secciones es primeramente mostrar la generalidad de los sedimentos, desde el punto de vista de frecuencia en toda la Península, así como para obtener las diferencias entre el sedimento que puede ser ubicado en una u otra zona del perfil de playa.

3.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MUESTRAS RECOLECTADAS

Dentro de las propiedades físicas que se mostrarán se tiene al d_{50} , densidad, ángulo de reposo, que fueron considerados como los más importantes, en virtud de que la mayor parte de los parámetros están directamente relacionados con dichas variables.

3.1.1 TAMAÑO DEL SEDIMENTO Y SU DISTRIBUCIÓN EN EL PERFIL DE PLAYA

Respecto a la distribución granulométrica se observó que la gran mayoría de las muestras puede considerarse como arena media y/o arena fina de acuerdo con la nomenclatura de la ASTM; mientras que tomando en cuenta al SUCS, absolutamente todas las muestras de arena se clasificarían como arena mal graduada (SP), a partir de lo cual puede deducirse un origen y una degradación similar del sedimento en toda la región. El origen similar del sedimento se debe a que la Península constituye una única plataforma de roca caliza, así como por su ubicación en un clima y mar tropical que permite el crecimiento de los arrecifes, de gran importancia, pues mucho del sedimento se origina por degradación de los restos de animales y corales con gran contenido de carbonato de calcio.

deberse a que la característica de las playas de Yucatán y Campeche de que el oleaje rompe muy cerca de la zona de lavado, por lo cual era de esperarse que el sedimento más grueso estuviese relacionado a dicha zona, o también, como consecuencia del efecto de la corriente de resaca lo cual induce a que el sedimento sea más grueso a fin de resistirse al movimiento.

Aun cuando los procesos de depositación y erosión de las playas sean similares en toda la Península, se presenta un parteaguas del comportamiento del tamaño del sedimento a lo largo del perfil de playa justamente en la isla de Holbox, lo cual divide las playas de la Península entre las ubicadas en los estados de Yucatán y Campeche, y las de Quintana Roo. Se presenta un comportamiento similar del sedimento a lo largo del perfil en las diferentes playas de los dos primeros estados mencionados, esto quizá a consecuencia de los huracanes que han pasado por la región y que han afectado en mucha mayor magnitud a Quintana Roo, lo que genera las irregularidades mencionadas.

3.1.2 DENSIDAD DEL SEDIMENTO, ÁNGULO DE REPOSO Y SU DISTRIBUCIÓN EN EL PERFIL DE PLAYA

La variación de la densidad de las muestras se obtuvo en un rango de 2200 a 2900 kg/m³; no obstante, el 86.73% se encierra en el rango de 2600 a 2900 kg/m³, y 42.19% adopta un valor medio de 2750 kg/m³.

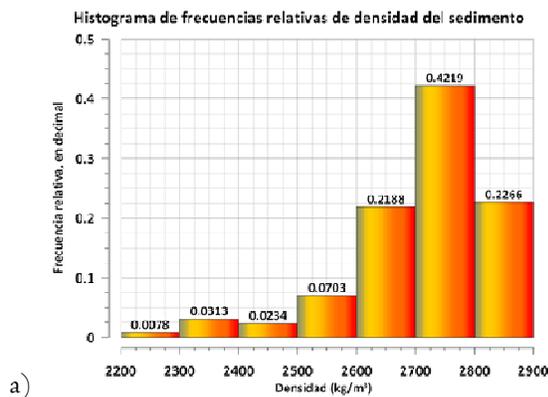
Lo anterior coincide con el hecho de que el mineral predominante de los sedimentos que pueden encontrarse en las playas de la Península, estén constituidos del mineral de calcita, cuya densidad suele fijarse con un valor cercano a los 2700 kg/m³.

Es de notarse que la densidad de aquellas muestras recolectadas en el estado de Yucatán, poseen una densidad de magnitud inferior que la de los otros estados, lo cual puede explicarse a través de una mayor porosidad de los sedimentos que pueden encontrarse en la zona, como posible consecuencia de la karsticidad del material.

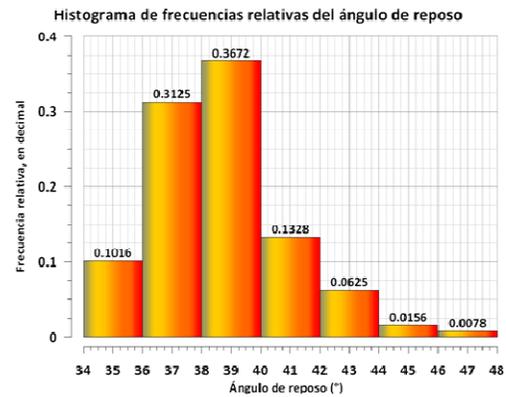
Respecto a las densidades de material en las zonas del perfil de playa, se observa que en forma general, en la zona de rompientes se puede encontrar un material menos denso que su similar de las otras zonas, y que los materiales más densos justamente se asocian a Cancún, Quintana Roo, donde probablemente cierto contenido de dolomía haya sustituido a la calcita lo que aumentaría la densidad del material.

Por otra parte, se encontraron peculiaridades en la muestra correspondiente a la zona de lavado en Pto. F, en Cancún, la cual pese a que posee granos con diámetros de gran tamaño, su densidad es de las más bajas que se hayan encontrado, lo cual puede explicarse en parte por la cementación que presentaron los granos de mayores dimensiones (cerca de los 2mm) como posible consecuencia de material de construcción¹ del sitio que contaminó el sedimento, lo cual proporcionaría una densidad propia del cemento (2200 a 2400 kg/m³), o también como consecuencia de la existencia de intersticios de mayor volumen en la muestra como consecuencia de fenómenos de karsticidad, esto último podría reflejarse en la porosidad del material.

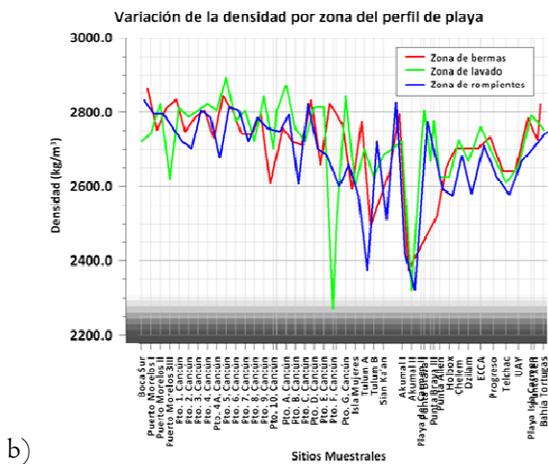
¹ A partir del año de 2004 se dio inicio al desarrollo de un Plan Maestro de Construcción en Playa Mujeres, (lugar donde se recolectó la muestra de Pto. F, Cancún) y que para 2006 se encontraba en la última etapa de urbanización del lugar, apenas un año antes de la campaña de campo en que se hiciera la recolección de sedimento en esta zona.



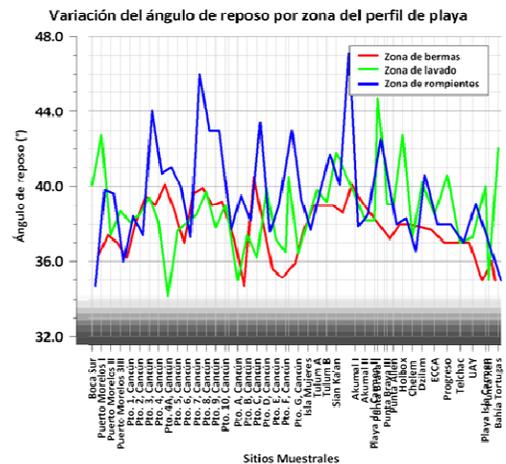
a)



a)



b)



b)

Figura 3.2 Gráficas correspondientes al a) histograma de frecuencias de densidad, y b) Variación de este parámetro de acuerdo a la zona del perfil de playa que se trate.

Figura 3.3 Gráficas correspondientes al a) histograma de frecuencias de ángulo de reposo, y b) Variación de este parámetro de acuerdo a la zona del perfil de playa que se trate.

Otro punto en particular es el correspondiente a Akumal, donde la variabilidad del sedimento muestra condiciones energéticas de oleaje diferentes en la zona puesto que una de las muestras fue extraída en una playa del sitio protegida en su totalidad por el arrecife, mientras que la otra no, de ahí la diferencia de diámetros de sedimento y de densidad, como consecuencia del nivel energético al que son sometidas dichas playas. De esta manera, en la figura 3.2, se muestra la variación de la densidad a lo largo del perfil de playa, y también, a lo largo del litoral de la Península, con un comportamiento similar y con muy pequeñas variaciones a lo largo del perfil, a diferencia de su distribución en las diferentes costas.

El rango del ángulo de reposo que puede ser encontrado en toda la Península se encontró entre los 36 y 40°, como se señala en la figura 3.3a, con un 67.97% del total de las muestras; aunque predomina ligeramente el rango comprendido entre 38 y 40° con 36.72% de las muestras, el cual resulta un tanto mayor al valor usual de ángulo de reposo correspondiente a arena seca, esto como consecuencia de encontrarse mayoritariamente muestras con diámetros bajos (inferiores a los 0.4mm). Para el caso en que la arena se encuentra sumergida, el ángulo de reposo disminuye; sin embargo, dichas pruebas no

fueron llevadas a cabo, por lo cual, para el empleo de los resultados de esta variable debe considerarse la afectación si el sedimento en su estado natural se encuentra seco o sumergido en agua.

El ángulo de reposo suele asociarse a la pendiente que podría llegar a poseer el perfil de playa, y el comportamiento de éste a lo largo de la costa y por ubicación en el perfil de playa se muestra gráficamente en la figura 3.3.

Cabe señalar que se observó un comportamiento similar a lo ya mencionado con los diámetros de las partículas, presentándose un parteaguas justo en el sitio muestral de Holbox, ya que en las costas de Quintana Roo (especialmente la de Cancún), la zona de rompientes parece soportar pendientes mayores que la de lavado, lo cual puede deberse a una transformación del perfil hacia uno más reflejante, ya sea por el paso más constante de huracanes que se ha registrado en los últimos dos décadas, o por reacomodo del material de relleno, específicamente del caso de Cancún, o quizá por encontrarse la playa en un estado erosivo.

Mientras tanto, en las costas de Yucatán y Campeche, es en la zona de lavado donde podría presentarse perfil de mayor pendiente, lo cual asociado al mayor diámetro asociado a esta zona, y explicado anteriormente, puede deberse a los efectos generados por la intensidad de la corriente de resaca.

Asimismo, la zona de dunas de esta región no es muy grande, o de gran magnitud (al menos no en altura), lo cual no es tan necesario debido a que tras el paso de huracanes o tormentas, éstas no suelen impactar frontalmente a las costas de dichos estados, a diferencia de lo que ocurre en Quintana Roo, por lo cual la reposición de material de la zona de berma hacia las otras zonas debido a erosión del perfil no es tan significativo tras la influencia de un evento extremo, especialmente si se le compara con costas como la de Cancún, donde el sedimento de la zona de berma sí puede formar dunas con mayor pendiente y por tanto acumular mayor cantidad de material en menor superficie, lo cual se ve reflejado directamente en los ángulos de reposo del material de las bermas

Una de las características que pueden observarse del comportamiento general de los parámetros mencionados hasta este momento, independientemente de la ubicación de la muestra, es a través de los histogramas obtenidos, los cuales si se analizan detenidamente, la forma que poseen los correspondientes a diámetro d_{50} y ángulo de reposo son similares; sin embargo, se diferencia en comportamiento respecto al de densidad, lo que sugiere que ésta se asocia a los otros parámetros con la siguiente lógica: para un material de mayor densidad, la resistencia aumenta ante las condiciones a las que es sometido por lo cual los granos podrán poseer menores diámetros, y por ello tender a perfiles más disipativos que reflejantes; esto último concuerda con el ángulo de reposo, mientras que la variación en densidad responde especialmente al origen del sedimento.

Por lo anterior, retomando como ejemplo la muestra obtenida en Pto. F, Cancún, se tiene una baja densidad del material, asociada ésta a granos de gran tamaño, y ángulo de reposo medio; comportamiento análogo que se muestra para la totalidad de las muestras, sólo que no evidenciado tan fácilmente, más que con el empleo de los histogramas correspondientes.

Por último, el ángulo de reposo posee un rango de variación más amplio que las otras dos variables vistas; lo cual sugiere una asociación, además de con las variables ya mencionadas, con otros elementos como el factor de forma, la redondez o la circularidad de la partículas, que son los que en los siguientes apartados serán vistos.

3.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS PARTÍCULAS DE ARENA

Posterior al análisis granulométrico de cada una de las muestras recolectadas en campo, se obtuvieron las propiedades de los sedimentos empleados para determinar la velocidad de caída, esto con la finalidad de observar o llegar a la conclusión de qué parámetros o variables intervienen en los umbrales de movimiento de las arenas. A diferencia de las propiedades mencionadas en el apartado 3.1, las que se muestran y describen a continuación es preferible trabajarlas como fueron obtenidas, es decir, por partículas.

Puesto que se trabajan las propiedades a nivel partícula, la medición de las mismas resulta un tanto compleja, especialmente por el tamaño que estas poseen que por lo general es inferior al milímetro,

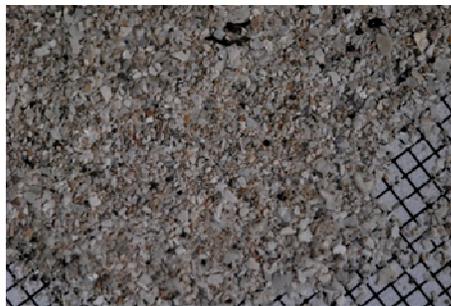


Figura 3.4 Fotografías de sedimentos de Cancún, Q.Roo.; Chelem, Yucatán; y Punta Xen, Campeche (de arriba a abajo). Nótese la similitud de forma, redondez y circularidad de los granos de una muestra.

pero permiten observar propiedades que influyen a nivel muestra, bajo la suposición de que las partículas dentro de una misma muestra son similares en cuanto a forma, redondez y esfericidad, como puede apreciarse en la muestras extraídas en la Península, algunas de ellas ejemplificadas en la figura 3.4, donde igualmente se aprecia lo pequeño de los granos de arena ya que la retícula en la parte posterior de las fotografías tiene de abertura 1 mm.

El empleo de cámaras digitales con microlentes, así como programas para el procesamiento de imágenes, permiten que las partículas de sedimento sean observadas con gran nitidez y aun más, que se obtengan las propiedades relacionadas con su morfología.

Por lo anterior, en seguida se revisan las propiedades de las partículas: factor de forma, diámetro nominal, redondez y esfericidad; observando de manera particular cual fue su comportamiento en las distintas zonas del perfil, así como mostrar la caracterización del sedimento con origen calcáreo, donde se examinaron un total de 1557 granos de arena extraídos de las diferentes muestras disponibles, de 10 a 15 partículas por cada una.

3.2.1 FACTOR DE FORMA

Para el factor de forma, la determinación del eje más corto de la partícula es quizá el más complicado de medir; sin embargo, una vez obtenido los tres ejes de la partícula el cálculo de esta propiedad resulta

sencillo. Se eligió de las expresiones existentes la del factor de forma de Corey (CSF), que es uno de los más empleados al proporcionar mayor importancia a las características de equidimensionalidad y forma plana de la partícula, aunado a la facilidad de estimación (ver Tabla I.2).

De los resultados obtenidos, el primero de ellos indica que las partículas tienden a ubicarse en un amplio rango de valores. Se encontraron casos extremos en que las partículas poseen formas tubulares largas, como el caso de dos de los tres sitios analizados en Campeche (Playa Isla del Carmen y Bahía Tortugas) o completamente esférica, como el caso de algunas muestras en Cancún y Punta Brava en Quintana Roo (éstos dos últimos lugares mayormente expuestos a la energía del oleaje).

Pese a tal variación del factor de forma, a grandes rasgos, en los sedimentos calcáreos se encontró con un valor ubicado entre 0.5 y 0.7, con 49.20% de las partículas analizadas (figura 3.5a), intervalo que resulta de valor inferior al que se estima si se trabaja con cuarzos o material terrígeno que suele considerarse muy cercano a 0.7 o ligeramente mayor (Cheng, Pettijohn, Blott & Pye, Camenen). Por lo tanto se desprende una conclusión inicial de que el sedimento analizado posee una mayor variabilidad en formas pero tendientes a poseer un grado de aplanamiento, independientemente de la elongación que pudieran tener, lo cual las diferencia de las partículas terrígenas.

La disminución del factor de forma es consecuencia del origen del sedimento ya que al integrarse de restos de determinado especie de coral, se obtienen formas elongadas, que fueron las que mayormente se encontraron en la zona de lavado del perfil de playa; o por fragmentos de caparzones u otras especies de coral por lo que este factor puede asociarse con factores biológicos que pudieran ser sencillos de localizar y por tanto, ubicar así la fuente de sedimento probable.

La particularidad de dicha forma es que puede llegar a alcanzar una mayor fracción de volumen que uno compuesto por esferas, lo cual se refleja en la densidad, la cual disminuye sensiblemente. Por tanto, una de las explicaciones es que a densidades bajas como las que se ubican de forma especial en los estados de Yucatán y Campeche, se presenta un mayor número de partículas cuyo factor de forma resulta inferior a 0.3 con tendencia a ser prácticamente hojuelas de baja elongación cuya forma es fácilmente erosionable; sin embargo, lo anterior es compensado en algunos casos con incremento del diámetro del sedimento, o del ángulo de reposo, mostrándose ejemplos del comportamiento dicho, esencialmente en la zona de lavado, en las figuras 3.1 y 3.3.

Igualmente relacionado el factor de forma con el ángulo de reposo que resulta mayor, ya que las formas cilíndricas y discos (ambos aplanados) pueden modificar la fricción interparticular y hacer más difícil el flujo del material granular debido a que se pierde energía cuando rotan, lo cual desemboca en ángulos de reposo elevados. Esto coincide con los resultados presentados en la sección 3.1.2, lo cual permite identificar la relación entre las variables que hasta el momento han sido tratadas.

De forma general, para la totalidad de los sedimentos, sin referenciarlos a un sitio en particular, se muestra en los histogramas de la figura 3.5 los diferentes comportamientos asociados al perfil de playa, que si bien son histogramas de forma similar, al menos los correspondientes a la zona de lavado y zona de rompientes o sumergida poseen un factor de forma de Corey ligeramente tendido hacia valores un poco más bajos (0.6) que los de la zona de bermas (0.65).

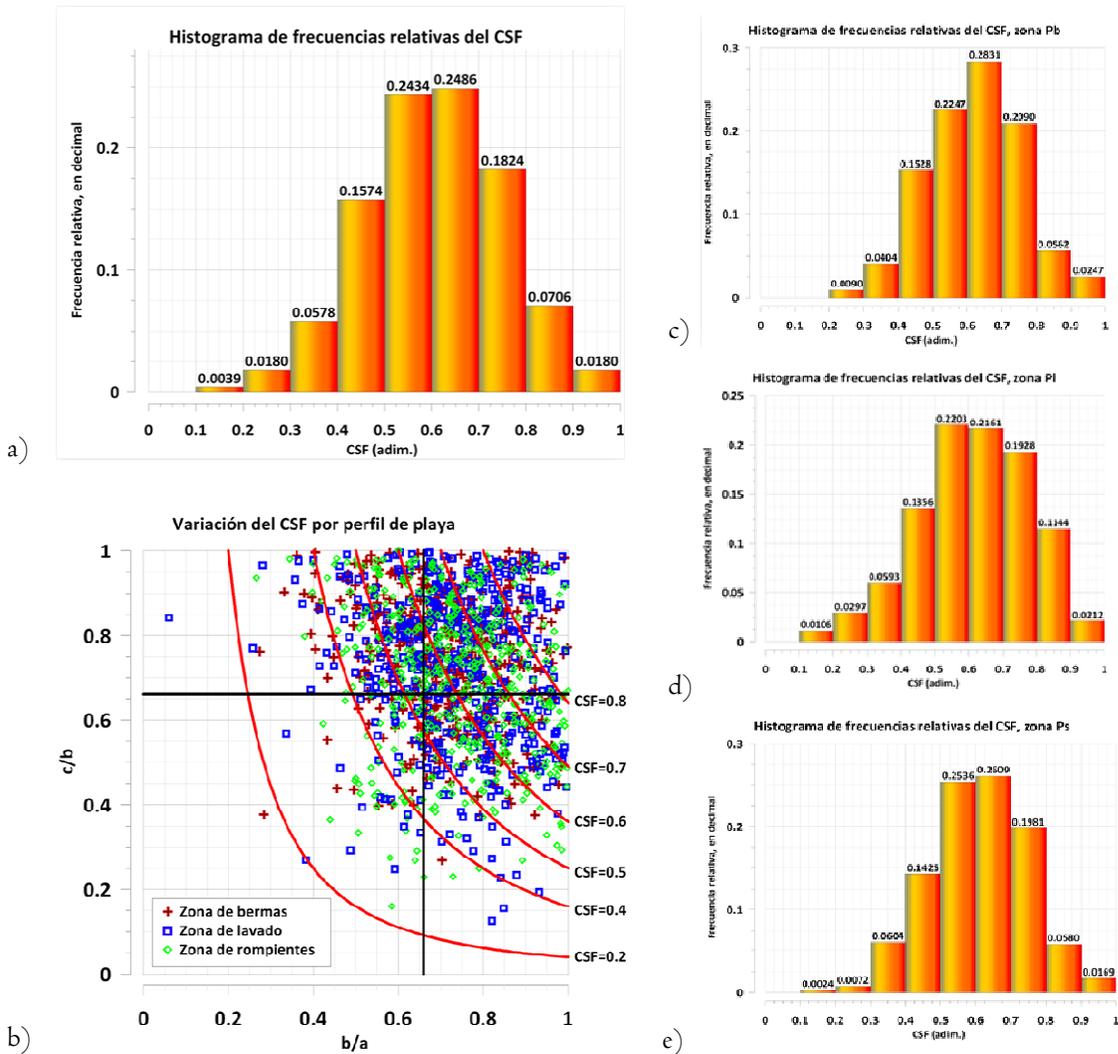


Figura 3.5 Histogramas de frecuencias asociados al CSF: a) en forma general, c) zona de bermas, d) zona de lavado, e) zona de rompientes. En b) se muestra el diagrama de Zingg considerando la totalidad de las partículas.

Por otra parte, a partir de la estimación del diámetro mayor, intermedio y corto de la partícula para el cálculo del factor de forma, fue posible representar en un diagrama de Zingg la distribución de la forma de los sedimentos calcáreos ubicados en las diferentes zonas del perfil, así como añadir al mismo las curvas asociados al factor de Corey previamente mencionado y el cual se muestra en la figura 3.5, donde se señala en los ejes la relación entre los diámetros largo, intermedio y corto de la partícula (a, b, y c respectivamente). En dicho diagrama se observa la dispersión de formas que pueden encontrarse a lo largo de los diferentes perfiles sin inclinarse las partículas de manera definitiva hacia una forma geométrica en particular, a excepción del aplanamiento que presentan y que fue mencionado en párrafos anteriores.

Cabe señalar que si bien el diagrama arroja cierta información, en general resulta un tanto difusa debido a la variedad de formas de éstas, no acentuándose hacia determinada forma geométrica que es la

principal cualidad que podría detectarse con el diagrama. Por lo anterior si se desea manipular un valor puntual de factor de forma es más sencillo observar los histogramas, los cuales sí muestran una tendencia de comportamiento, aunque la desventaja de ellos, es que en caso de que sí hubiese una forma geométrica no podría saberse de cual se trata.

Con los resultados mostrados, no se considera al factor de forma de Corey como un elemento que represente del todo la forma de los sedimentos, pues aunque sí existe una tendencia a adquirir determinados valores, se confirma lo que se señala en el capítulo I, relativo a que únicamente puede representarse una combinación de dos de las tres características de la forma del sedimento: elongación, aplastamiento o equidimensionalidad, por lo que inclusive si se empleara otro factor de forma, resultados similares serían obtenidos. Así que en lo que concierne al presente trabajo, se tienen ciertas reservas para el empleo de esta variable expresada por medio de un parámetro adimensional como los que se señalan en la sección I.3.I.

Pese a que se sabe que la forma de la partícula se ve involucrada en muchas otras variables como el ángulo de reposo, la densidad e inclusive en los umbrales de movimiento de las partículas, es complicado conocer su intervención directa en ellos debido principalmente a la dispersión de formas de los granos y la representatividad por medio de una expresión matemática, queda su participación en los parámetros mencionadas relegada a considerarse de manera cualitativa o implícita, esta última forma es como se tratará en esta tesis.

3.2.2 DIÁMETRO NOMINAL

El diámetro nominal es una de las propiedades de la partícula que se prefiere emplear puesto que implícitamente toma en cuenta el “volumen” de la partícula a través de los diámetros largo, intermedio y corto de la partícula al considerarla como un elipsoide y la relación de éste con una esfera de diámetro equivalente.

Dentro de las ventajas del diámetro nominal es que suele emplearse en la estimación de la velocidad de caída, lo que adiciona la capacidad de mantener cierta información de la partícula. Así, de las características que permiten su análisis, se tiene primeramente que presenta un mejor comportamiento estadístico fácilmente visible en el histograma (ver figura 3.6a), y aun más, que permite diferenciar entre partículas que hayan pasado la malla correspondiente al d_{50} , lo cual es una gran ventaja para la obtención de umbrales de movimiento con dicho parámetro, ya que una de las fuerzas involucradas es la de empuje, donde el volumen del objeto es tomado en cuenta, así como la fuerza de arrastre, mayormente relacionada con la forma de la partícula.

En primer término, al observar la figura 3.6a, se percibe que ésta tiene una forma muy similar al de aquella mostrada en la figura 3.1a correspondiente al d_{50} de la partícula, con sus pequeñas diferencias, una de las cuales se centra en un ligero aumento del rango de partículas entre 0.2 y 0.4 mm, elevándose de 46.46% a un 50.43%, lo cual en parte refleja en cierto modo las mediciones de los diámetros de las partículas hechas de forma individual (si se considera la misma cantidad de granos por muestra) que apenas difieren de realizar un análisis granulométrico sobre la muestra. Igualmente, este resultado muestra que el diámetro intermedio de la partícula (b) puede ser considerado como equivalente al d_{50}

(que fue la consideración hecha en la metodología descrita en el capítulo anterior); por lo que la diferencia entre el d_{50} y el diámetro nominal, está asociada con los otros dos diámetros de la partícula.

Una característica fundamental que se obtuvo al terminar los experimentos de velocidad de caída y realizar la caracterización de las partículas, fue la relación entre el diámetro nominal y el diámetro d_{50} propio del análisis granulométrico, los cuales resultaron ser prácticamente iguales, esto bajo la consideración de que el diámetro nominal representado en la figura 3.6b es la media de los diámetros nominales de las partículas extraídas por muestra y que serían ensayadas para las pruebas de velocidad de caída. Al realizar el modelo de regresión lineal centrada en el origen se obtuvo el ajuste proporcionado por la ecuación 3.1, donde la pendiente es prácticamente igual con la unidad; asimismo, el coeficiente de regresión resultó $r^2 = 0.9935$, que resulta una muy buen coeficiente regresión de los

datos, si se tiene en cuenta la gran diversidad de partículas manejadas (cerca de 1557), así como las diferencias propias que existen entre muestra y muestra que parecen no condicionar la expresión 3.1:

$$d_{50} = 1.00256 d_n \quad \dots(3.1)$$

Este resultado es importante puesto que la velocidad de caída mediana de los granos de una muestra puede asociarse sin problemas al valor del d_{50} del análisis granulométrico, con lo que se pueden identificar parámetros asociados a la muestra de forma sencilla. Aunque de manera estricta, partícula a partícula es preferible el empleo del diámetro nominal por las características que cada una de éstas exhibe.

Si se realiza el análisis con una masa de sedimentos, puede ser de gran utilidad la conclusión que se marca en la ecuación 3.1 puesto que se eliminan estudios relacionados a caracterizar los diámetros de una partícula, con lo que se evitan errores de medición y aun más, un ahorro de tiempo considerable al no tener que medir los diámetros de una partícula. Por lo tanto, si se desea realizar un análisis de los umbrales de movimiento partícula a partícula, un buen indicador es el diámetro nominal en lugar del d_{50} , mientras que para umbrales de movimiento de muestras el d_{50} sí se considera buen elemento de estimación, por lo mencionado en el párrafo anterior.

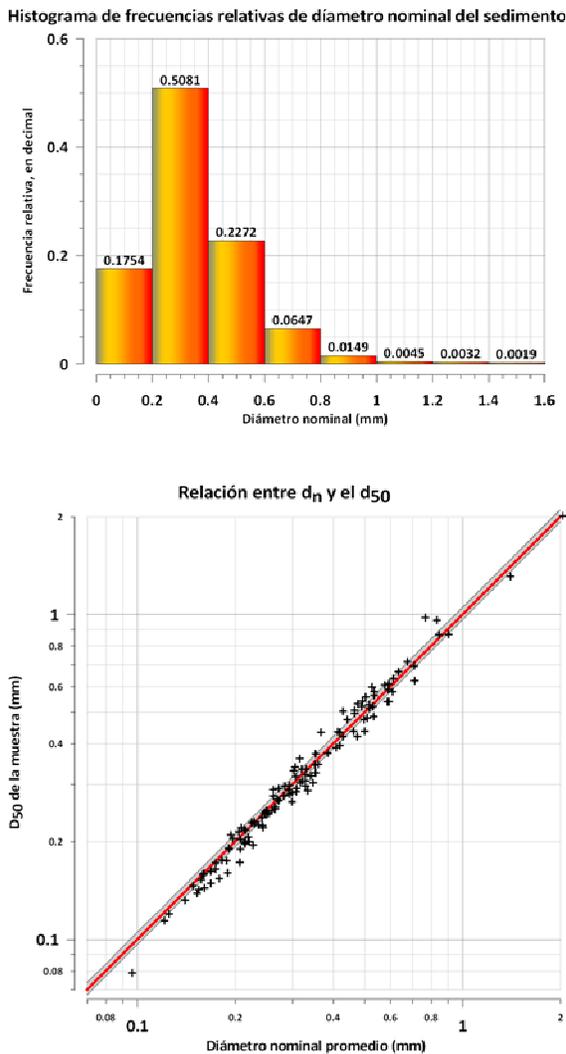


Figura 3.6 En a) Histograma del comportamiento del diámetro nominal y b) Gráfica de la relación entre d_{50} y el diámetro nominal. Ajuste de los datos a una recta que pasa por el origen señalada en la ec. 3.1

3.2.3 REDONDEZ

La redondez puede ser considerada como una medida de la madurez del sedimento en un determinado sitio sujeto a determinadas condiciones de clima marítimo; y en el que se refleja también cierta estabilidad de la playa al presentarse retrabajados los vértices de las partículas por el constante movimiento y rozamiento con otras partículas, sin llegar a la erosión total de la playa.

Un valor general adoptado en la literatura suele ser el de 3.5 para partículas de cuarzo o material de origen terrígeno; sin embargo, este valor se encontró que varía ligeramente para las partículas de origen biogénico tratadas en esta tesis encontrándose que el 44.73% se ubican en un rango de 3.6 a 4.0, empleando la escala de Pettijohn (ver figura 3.7). Lo anterior es fácilmente explicable si se atiende a los componentes que integran a los sedimentos trabajados ya que las partículas calcáreas tienden a disolverse en el medio por el fenómeno de karsticidad, lo que resulta en una más fácil degradación de sus aristas que la de partículas de cuarzo.

Con lo anterior, se tiene que en general las partículas poseen un nivel de redondez medio; aunque existen sitios donde aparentemente el sedimento ha sido trabajado durante mayor tiempo que el resto de las playas, lo cual genera partículas que prácticamente no poseen vértices angulosos.

Entre los sitios con partículas redondeadas que están en el rango de 5.0 a 6.0, con cerca del 11% del total, pueden citarse: Pto. A, Pto. B, Pto. C; Pto. D, Pto. E, Pto. F, Pto. G, ubicadas en la parte continental desde Punta Cancún hasta Punta Sam; y en Puerto Morelos. Las mismas características del sedimento pueden encontrarse en las tres zonas del perfil de playa consideradas, lo cual refleja una fuerte madurez del material de los lugares señalados, así como un gran dinamismo y transporte de sedimentos en dichas playas. Una posibilidad en cuanto al origen del sedimento encontrado en los sitios mencionados es que dicho material se encuentra sujeto a mayores distancias de transporte.

Igualmente se obtienen valores de redondez superiores a la media de las playas de la Península, sobre la isla barrera de Cancún, pero a diferencia de los sitios mencionados en el párrafo anterior, únicamente se encuentran aleatoriamente en alguna de las partes del perfil. Lo observado se puede relacionar con el relleno realizado en 2006 tras la erosión casi total de las playas por el paso del huracán Wilma en 2005, por lo que parte del material que resistió al fenómeno natural se mezcló con el material de relleno, donde la redondez de éste último por proceder de un banco marino es inferior debido a que no se encontraba sujeto a movimientos y rozamientos que redondearan el material.

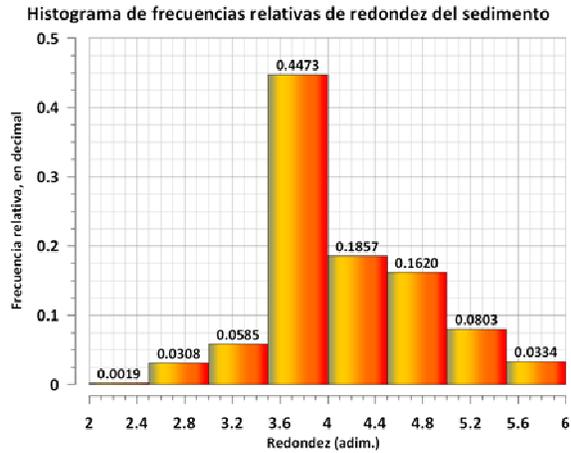


Figura 3.7 Histograma de frecuencias relativas de la redondez del sedimento, considerando los 1557 granos probados.



Figura 3.8 A la izquierda, granos de arena correspondientes a la muestra que se logró recolectar antes del paso del huracán Wilma (2005); a la derecha, granos de arena pertenecientes al relleno en la isla barrera de Cancún, sobre playa Marlin.

Una de las características relacionadas con este tipo de material es que pese a que es un sedimento más maduro que uno con vértices angulosos, el ángulo de reposo disminuye por presentarse una fricción interparticular menor, con lo que se concluye en que es más fácilmente erosionable que una partícula del mismo tamaño pero de vértices angulados, induciendo a que la playa sea más vulnerable al presentarse eventos extremos.

Como ejemplo de lo anterior obsérvese la gran diferencia entre los sedimentos que podían encontrarse antes del huracán Wilma en las playas de Cancún, con cerca de 17 años sin ser afectado por algún evento extremo directamente en la zona, pero sí sujeto a las condiciones normales de clima marítimo, (Figura 3.8) y el material correspondiente al primer relleno realizado en la misma zona. La facilidad con que el primero es erosionable resalta a la vista; pues la fricción interparticular ha sido reducida al encontrarse inclusive pulidas las partículas de arena.

Este parámetro relacionado con la morfología de las partículas da indicios del dinamismo de la playa, o de la transportación del sedimento, que aunque son un tanto cualitativos proveen información que puede ser de utilidad para entender dichos procesos.

3.2.4 ESFERICIDAD

De todos los parámetros de las partículas analizados en este trabajo, éste es el que ofrece menor dificultad en su determinación, pues considera únicamente propiedades en dos dimensiones de la partícula: el área de máxima proyectada y el perímetro de ésta. Se utilizó la ecuación desarrollada por Cox (Blott & Pye, 2007) señalada en la tabla 1.5, por poseer un rango de variación del parámetro entre 0 a 1, además de ser similar a las presentadas por Wadell (1932) y Janoo (1998), y no presentar grandes diferencias entre las mencionadas expresiones.

De forma general, y de acuerdo con el histograma de la figura 3.10, se obtuvo como resultado que en general el sedimento tiene una esfericidad de 0.80 y 0.90, esto quiere decir que las partículas en su mayoría, alrededor del 49.84% (ver figura 3.9), son de una forma tendiente a una esfera ligeramente deformada, lo cual refleja que los sedimentos han sufrido cierto transporte o han sido trabajados durante largo tiempo para poseer altas esfericidades.

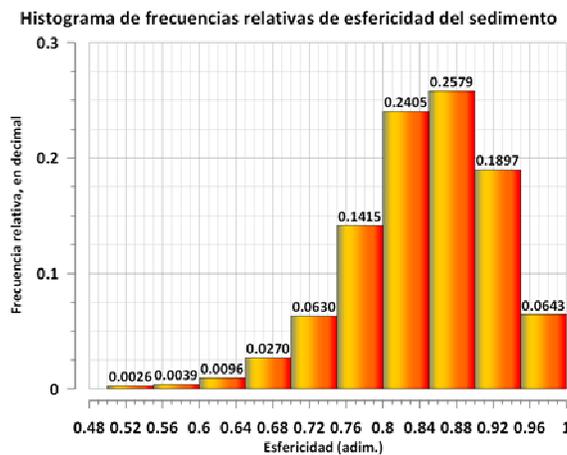


Figura 3.9 Histograma que muestra la tendencia de la esfericidad del sedimento de las playas de la Península.

3.2.5 RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS

A partir de los resultados mostrados a lo largo del presente capítulo se ha observado que existe una relación entre las variables. Aun cuando éstas hayan sido separadas en aquellas relacionadas con propiedades de las muestras y en propias a las partículas, implícitamente la relación entre ambas puede ser descrita en forma cualitativa, especialmente aquella entre las propiedades de la partícula la cual resulta interesante ya que proporciona datos que parecen incidir en una especie de ciclo natural del sedimento que puede encontrarse en las playas.

No se pretende en esta tesis llegar a una expresión que relacione a las variables y propiedades, ya que no es el objetivo del trabajo; pero sí resulta importante dar a conocer las relaciones que se han hallado con el fin de identificar la morfología y características del sedimento con el comportamiento de una playa.

Así, dentro de las primeras relaciones encontradas son las referidas a las propiedades de la muestra, las cuales parecen equilibrarse entre sí a fin de buscar la estabilidad del material bajo las condiciones a las que es expuesto. Por ello, para sedimento con grandes diámetros, el tamaño de las partículas suple las carencias de densidad que pudiese tener el material; mientras que el ángulo de reposo variará de forma análoga a como lo hará el diámetro del sedimento a fin de resistir las condiciones del clima marítimo por lo que si el tamaño de la partícula aumenta, el ángulo de reposo deberá hacerlo de forma análoga aunque no necesariamente en proporción totalmente directa. Lo anterior es debido al desgaste que las partículas sufren de forma individual como consecuencia de los movimientos que realizan con respecto a otras partículas, lo que provoca que las partículas se tornen hacia formas esféricas o en su defecto, redondeadas, lo cual afecta al ángulo de reposo, lo que hace que éste disminuya.

Pese a que el ángulo de reposo se abate parcialmente con el tiempo o con la distancia de transporte del sedimento por las razones ya mencionadas, la compactación del material aumenta por la misma forma que adquieren las partículas, por lo tanto, se observa una interacción entre todas las variables señaladas.

Por lo tanto, para cuando se presentan granos de gran diámetro sujetos a fuertes condiciones energéticas de oleaje, en un tiempo inicial serán resistentes por su tamaño y forma irregular, pero al transcurrir éste, la resistencia es sustituida si es posible, por una mejor compactación del material, o por una deformación del perfil a una condición más disipativa que consecuentemente cambia las hidrodinámicas a las que era sometido inicialmente. En el caso de no lograrse el equilibrio anterior, se tienen dos posibilidades: la primera de ellas se inclina hacia la erosión de la playa si a ésta no se le suministra nuevo material que reemplace al que ha sido degradado, y que se refleja en valores elevados de redondez y esfericidad con poca dispersión de dichos datos; o hacia la acreción cuando el sedimento suministrado es mayor, que se muestra en forma contraria al caso previo.

De forma particular, en las playas de la Península de Yucatán, la densidad del material puede dar indicios de la antigüedad del sedimento, puesto que ocurren procesos que lo alteran de manera significativa. Esto se debe a que la calcita es sustituida por dolomita, lo que hace que el material sea más denso, pasando de alrededor de 2700 kg/m^3 a 2800 o hasta 3100 kg/m^3 , por lo cual una tendencia del material a densidades grandes indica que el sedimento lleva gran tiempo en la zona para llevar a cabo el proceso de transformación descrito, además de suministros no muy grandes de material de “reciente formación” a la región.

Por otra parte, al considerar las propiedades de las partículas, en la figura 3.10 se muestra la relación entre redondez, esfericidad y diámetro de la partícula, en función del tiempo o de la distancia recorrida por una partícula, lo cual refleja condiciones que pueden ser observadas con facilidad en la playa. En el párrafo anterior, se mencionó la forma en que puede realizarse una estimación cualitativa de la antigüedad del sedimento en función de la densidad, al menos para la Península; por lo cual, si un material de “reciente formación” se encuentra con elevados índices de redondez o esfericidad, quiere decir que ha recorrido una distancia mayor que un material que no se halla en dicho estado.

En general se observó que los diámetros más pequeños (inferiores a 0.2 mm) no poseen elevados índices especialmente de redondez; lo cual no quiere decir que no tengan un proceso de degradación similar al mostrado en la figura 3.10, sino que están sujetos a condiciones de menor energía por lo que su degradación no ocurre al mismo ritmo que el de partículas de mayor tamaño, o al menos no es tan perceptible.

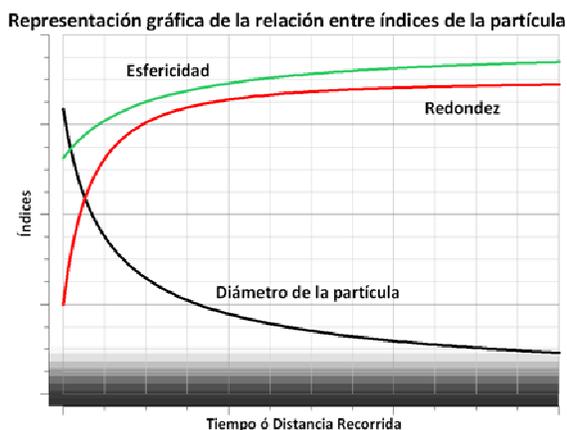


Figura 3.10 Representación esquemática del comportamiento de las propiedades de la partícula por degradación del sedimento.

Ejemplo de la degradación y transformación del sedimento se tiene la figura 3.9, donde en la imagen se tiene sedimento extraído en diferentes fechas, el primero de los cuales fue redondeado durante un largo tiempo lo que indica que el sedimento llevaba mucho tiempo en el sitio; mientras que la segunda imagen presenta sedimento que no tiene más de un año, pero empieza a mostrar la degradación de los vértices angulosos y la adquisición de un gran índice de esfericidad, que al pasar de más tiempo implicará la disminución del diámetro de las partículas.

Desgraciadamente las muestras recolectadas no permiten la caracterización temporal de la evolución del sedimento en los mismos sitios de muestreo forma cuantitativa; sin embargo, proveen esbozos de la evolución del sedimento en una playa, tanto de su posible origen, como indicios del transporte que ha sufrido, la antigüedad o las condiciones de clima marítimo a las que se ven sujetos.

Por último, se observa que ningún parámetro puede ser tratado de forma aislada, aunque sí pueden distinguirse algunos que reflejan por medio de un valor definido lo que acontece respecto a la muestra de sedimento, lo cual ofrece una gran ventaja de ser utilizados para la determinación y cálculo de otros parámetros como lo será en el siguiente capítulo en la estimación de la velocidad de caída del sedimento.

Capítulo 4

UMBRALES DE MOVIMIENTO

UMBRALES DE MOVIMIENTO

Los umbrales de movimiento son de gran interés puesto que éstos son necesarios para el empleo de muchas de las formulaciones relacionadas con la estimación del transporte de sedimentos, tal y como fue descrito en el primer capítulo de esta tesis. Así mismo, las metodologías para la obtención de estos umbrales fueron descritas en el segundo capítulo; por tanto el presente capítulo se enfoca a lo referente a los resultados obtenidos, al análisis y parametrización de los mismos.

Igualmente, al considerar las propiedades de los sedimentos y los resultados obtenidos de su análisis, se buscó la relación entre éstas y los umbrales del movimiento en forma estadística. Los umbrales que se consideran son la velocidad de caída del sedimento y el inicio de movimiento, los cuales se detallan a continuación, tanto en las consideraciones hechas para su determinación o estimación, como del manejo de la información procesada.

Cabe mencionar que los umbrales de movimiento citados fueron obtenidos bajo condiciones diferentes: la velocidad de caída relacionada a partículas, mientras que el inicio de movimiento se estimó para una muestra de sedimento; sin embargo, los resultados son mostrados tratando de que ambos estén asociados a lo que es una muestra de sedimento, con el fin de facilitar su manejo en la aplicación de modelos de transporte.

4.1 VELOCIDAD DE CAÍDA

Al llevar a cabo la metodología descrita en el capítulo 2, fue posible asociar las características de una determinada partícula con su respectiva velocidad de caída. La definición conceptual de este umbral permite establecer con facilidad el momento en el cual se produce, no restringido éste a un único instante sino que se desarrolla un tiempo bastante considerable como para ser observado y medido con facilidad.

Los resultados obtenidos se muestran en dos etapas, la primera de ellas correspondiente a la condición de velocidad de caída de partículas individuales, y posteriormente, con los resultados obtenidos asociar el umbral con las propiedades que corresponderían a una muestra de sedimento, pues uno de los objetivos de la caracterización es que esta pueda ser de utilidad, y no restringirse a un conocimiento meramente teórico de poca practicidad.

El interés particular de haber realizado las pruebas grano a grano, radica en el entendimiento del fenómeno y de las variables que se ven involucradas, con lo que resulta mucho más sencillo apreciar las

propiedades de las partículas que mejor se relacionan con el umbral de movimiento y obtener a partir de ellos una expresión matemática que refleje el comportamiento de la velocidad de caída en la Península de Yucatán, y aun más, para aquellas partículas de material calcáreo, que fácilmente pueden encontrarse en otras regiones del mundo.

4.1.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del análisis de 1557 granos de arena, de los cuales grupos de entre 10 y 15 granos corresponden a cada uno de los sitios de muestreo de la Península de Yucatán.

Para cada uno de los granos probados se estimaron las siguientes características físicas: la velocidad de caída experimental, redondez (escala gráfica de Powers), diámetros largo, intermedio y corto de la partícula, área proyectada y su perímetro correspondiente. Por otra parte, se calcularon otras propiedades como: Reynolds, Parámetro sedimento- fluido, factor de forma de Corey, redondez (escala logarítmica de Pettijohn), esfericidad y diámetro nominal; ver resumen de resultados en la tabla 4.I.

Igualmente, se presenta enseguida una revisión rápida de los errores de medición que fueron cometidos al realizar las pruebas y en la caracterización de determinados parámetros, ya que de ello depende la confiabilidad de los análisis hechos a las pruebas y con ello, de las conclusiones a las que se llegará con el trabajo desarrollado.

Es importante verificar que dichas variables puedan ser utilizadas, pues uno de los objetivos centrales de la tesis radica en la zonificación de dichas variables, así como establecer, con la participación de las mismas, una expresión matemática que permita estimar la velocidad de caída de partículas calcáreas.

Dentro de todas las características físicas que se midieron, las que tuvieron menor incertidumbre en su determinación son las siguientes:

- La velocidad de caída fue estimada considerando la precisión de la graduación de la distancia igual con 1 mm, así como del tiempo que existe entre cuadro y cuadro de la toma de vídeo, que corresponde a una precisión de 0.03 s. Lo anterior representa errores que no superan el 1.00% respecto a la distancia total, la cual posee un valor mínimo registrado de 10 cm; mientras tanto, en la medición del tiempo, el error no supera el 2.51%, pues el mínimo registrado que le tomó a un partícula recorrer la distancia seleccionada fue de 1.194 s (Pto. F, Cancún, Pl).
- Los diámetros largo e intermedio de la partícula fueron estimados con errores no mayores a ± 2 pixeles lo cual traducido en milímetros equivale en promedio entre 0.010 y 0.012 mm que para la media de tamaño de granos trabajados (alrededor de 0.3 mm), representa un error de estimación entre 3.3% y 4%, lo cual da una buena estimación para el cálculo del diámetro nominal de la partícula que se calcula a partir de estas dos variables, aunado al diámetro corto de la misma.
- La esfericidad tuvo errores mínimos pues por medio del programa Autocad, se estimaron tanto el área proyectada como el perímetro correspondiente, cada uno de ellos con un error de

$\pm 0.1\%$ ya que la delimitación de los objetos fue fácilmente visible en la gran mayoría de los granos fotografiados con la cámara de microlentes.

Una vez evaluados los posibles errores técnicos, se puede establecer que con los instrumentos de medición utilizados se estuvo en condiciones de obtener buenos resultados, de los cuales se hablará más adelante, razón que igualmente conduce a aceptar los errores mencionados arriba. Además, una característica particular de la metodología empleada es que no se sacrifica resolución por área de visión, como sucedería con un microscopio SEM y que afectaría en el tiempo de selección de partículas, o resolución por tiempo de grabación del fenómeno, como sucedería en una cámara de alta velocidad; por lo cual es importante buscar el equilibrio entre los instrumentos utilizados, el tiempo de trabajo correspondiente y la resolución y errores esperados en los resultados.

Para el caso de esta tesis y por el tamaño de los granos, es aceptable la metodología considerando una cámara de video digital (30 cuadros por segundo de 1.3 Mpix) y cámara fotográfica con microlentes pues aunque carecen de cierta resolución, registran bien el fenómeno de velocidad de caída, que por ejemplo para el manejo de arcillas o cúmulo de granos tendrían muchas mayores limitantes por encontrarse efectos asociados tanto por propiedades electroquímicas o cohesivas, como por la interacción entre partículas que no podrían ser apreciados correctamente.

A pesar de que la incertidumbre cuantificada en el caso de las variables descritas anteriormente, no fue significativa, existieron otras mediciones en las que se involucra el juicio de apreciación del laboratorista, por los que se les considera propensas a incorporar un error más grande. Dentro de estas variables se encontraron:

- La determinación del eje corto de la partícula, resultó difícil obtenerlo a través de imágenes bidimensionales donde la profundidad no es tan sencilla de estimar y queda en parte sujeta a la percepción del operador. Con el propósito de minimizar este error, el operador designado para la estimación de este parámetro fue la misma persona.
- La redondez, al estimarse por medio de una escala gráfica también induce errores de apreciación, que igual se deben al operador en turno y que igualmente el trabajo fue desarrollado por la misma persona.

La estimación del diámetro corto de las partículas no se encuentra lejos de su valor real tras observar el comportamiento que existe entre el valor de la media de los diámetro nominales de las partículas y el d_{50} de la muestra (ver ecuación 3.1). Puesto que el diámetro nominal está en función de los tres ejes de la partícula y que se llegó a un relación entre diámetros, similar a la que puede encontrarse en la literatura (Raudkivi, 1990) donde se propone o estima que $d_{50} \approx 0.9d_N$ para arenas de cuarzo, es que se concluye que los ejes de la partícula fueron bien estimados. Dado que se ha encontrado que en general los granos calcáreos son de forma más aplanada que su contrapartes de cuarzo, conclusión fácil de llegar por inspección visual (no solo de granos de arena sino de partículas de mayor tamaño del mismo material) resulta que el valor del diámetro nominal es menor en comparación, por lo cual el coeficiente para equilibrar la relación entre diámetro nominal y d_{50} debe aumentar en este caso hasta llegar a ser 1.0.

Por otro lado, respecto a la redondez estudios previos llevados a cabo por Folk (1955), con la participación de diferentes operadores, señalan que el error puede llegar a tener alrededor de ± 0.35 en

la escala de Powers que va de 0 a I, por lo cual este parámetro de las partículas no se le asociará en esta tesis con los umbrales de movimiento, pero vale la pena su estimación para conocer la naturaleza del sedimento y los procesos en forma cualitativa a los que ha sido sometido.

Por tanto, una vez analizados los posibles errores en la medición de las variables, se tiene entonces que algunas de ellas, ya sea por que su medición no fue precisa o por que influyen en el cálculo de otras, son desechadas para su empleo en este trabajo, a reserva de observar su comportamiento en el siguiente apartado correspondiente al análisis estadístico de los datos.

Entre las variables desechadas o poco confiables se encuentra principalmente la redondez de la partícula; mientras que el CSF, el d_N y la velocidad de caída W_f , así como las variables derivadas de ellas como el número de Reynolds, Parámetro sedimento- fluido, diámetro adimensional de la partícula, entre otros, son aceptables por los bajos errores que existen en su estimación y que han sido mostrados a lo largo del capítulo.

Tabla 4.1 Resultados de la caracterización de propiedades de las partículas asociadas con los resultados de velocidad de caída de las mismas; se muestran resultados a cada 30 granos ensayados.

# ensayo	Sitio y Zona	Re	S_*	W_f (m/s)	d_N (mm)	CSF	P	E
1	Boca Sur (Pl)	6.3120	4.0352	0.02500	0.2525	0.429	0.41	0.6469
31	Pto. Morelos (Pl)	11.0683	6.6353	0.03158	0.3505	0.611	0.25	0.7536
61	Pto. Morelos II (Pl)	3.0296	3.6180	0.01316	0.2302	0.660	0.30	0.7763
91	Pto. Morelos III (Pl)	4.7082	3.0620	0.02195	0.2145	0.802	0.21	0.6787
121	Pto. 1, Cancún (Pl)	51.7865	14.4278	0.08929	0.5800	0.857	0.70	0.9201
151	Pto. 2, Cancún (Pb)	11.2232	6.7384	0.03175	0.3535	0.601	0.35	0.6213
181	Pto. 3, Cancún (Pb)	12.7246	6.4646	0.03726	0.3415	0.541	0.35	0.7974
211	Pto. 4, Cancún (Pb)	9.9108	4.7624	0.03571	0.2775	0.736	0.30	0.8351
241	Pto. 4A, Cancún (Pb)	12.9108	6.2600	0.03822	0.3378	0.832	0.35	0.7984
271	Pto. 5, Cancún (Pb)	25.7807	12.1900	0.05000	0.5156	0.613	0.41	0.8186
301	Pto. 5, Cancún (Ps)	20.0073	10.3057	0.04317	0.4635	0.492	0.30	0.9024
331	Pto. 6, Cancún (Ps)	6.4376	3.3351	0.02941	0.2189	0.892	0.59	0.9516
361	Pto. 7, Cancún (Ps)	152.054	30.0489	0.15789	0.9630	0.765	0.49	0.8928
391	Pto. 8, Cancún (Pl)	60.1385	15.7277	0.09615	0.6254	0.701	0.49	0.9148
421	Pto. 9, Cancún (Pl)	30.6378	12.8904	0.05725	0.5352	0.482	0.84	0.8952
451	Pto. 10, Cancún (Pl)	27.6097	8.8557	0.06452	0.4280	0.330	0.49	0.6400
481	Pto. A, Cancún (Pb)	6.8119	4.4861	0.02532	0.2691	0.741	0.49	0.8831
511	Pto. A, Cancún (Ps)	7.1977	4.1061	0.02857	0.2519	0.650	0.41	0.8018
541	Pto. B, Cancún (Ps)	4.6592	3.3167	0.02055	0.2267	0.621	0.30	0.8391
571	Pto. C, Cancún (Ps)	31.0737	20.0443	0.04310	0.7209	0.731	0.41	0.8286
601	Pto. D, Cancún (Pl)	16.6194	7.1401	0.04580	0.3629	0.493	0.35	0.8449
631	Pto. E, Cancún (Pl)	10.0218	5.5197	0.3279	0.3057	0.505	0.30	0.8695
661	Pto. F, Cancún (Pb)	3.0542	2.6261	0.01642	0.1860	0.469	0.35	0.9114
691	Pto. F, Cancún (Ps)	1.2972	1.8120	0.00855	0.1518	0.693	0.70	0.7886
721	Pto. G, Cancún (Ps)	21.9624	8.9744	0.05042	0.4356	0.559	0.30	0.9233
751	Isla Mujeres (Ps)	3.8596	3.6748	0.01579	0.2444	0.597	0.41	0.9218
781	Tulum I (Pl)	2.4196	2.1946	0.01433	0.1688	0.699	0.30	0.8321
811	Tuum II (Pl)	6.1315	3.2915	0.02727	0.2248	0.485	0.30	0.7529
841	Sian Ka'an (Pb)	8.5859	5.0311	0.2844	0.3019	0.725	0.21	0.7808
871	Bahía Príncipe (Pb)	14.7752	7.7930	0.03713	0.3979	0.496	0.41	0.8307
901	Akumal I, (Pb)	2.0695	1.8543	0.01054	0.1504	0.589	0.41	0.9109
931	Akumal II (Pb)	9.2328	10.0213	0.01847	0.4998	0.479	0.41	0.8834
961	Playa del Carmen II (Pb)	6.2901	4.3096	0.02410	0.2610	0.443	0.35	0.7688

991	Punta Brava II (Pl)	111.0435	47.4722	0.08410	1.3203	0.980	0.49	0.9093
1021	Punta Allen (Pb)	3.2418	3.7964	0.01282	0.2529	0.831	0.35	0.9086
1051	Holbox (Pb)	1.6498	2.1589	0.00977	0.1688	0.565	0.35	0.7824
1081	H. Beach Paraiso (Pb)	37.8805	13.9579	0.06522	0.5808	0.856	0.25	0.9400
1111	H. F.A. Condesa (Pb)	31.6163	10.6474	0.06579	0.4806	0.391	0.59	0.7389
1141	H. Gran Meia (Pb)	7.5670	4.0611	0.03000	0.2522	0.612	0.41	0.9447
1171	H. Hyatt Cancún Caribe	14.0568	6.0680	0.04255	0.3303	0.607	0.30	0.8838
1201	H. Royal Sands (Pb)	29.9797	7.5915	0.07060	0.3822	0.693	0.35	0.9018
1231	H. Sheraton (Pb)	6.4652	3.7418	0.2632	0.2457	0.486	0.30	0.9301
1261	Chelem (Ps)	3.9367	5.0086	0.01339	0.2939	0.930	0.25	0.7842
1291	Telchac (Pl)	21.7444	12.5962	0.04000	0.5436	0.608	0.30	0.8523
1321	UAY (Pl)	25.7480	10.3852	0.05357	0.4807	0.280	0.35	0.8616
1351	UAY (Ps)	2.9515	2.1025	0.01822	0.1620	0.521	0.30	0.9791
1381	ECCA (Ps)	4.9866	2.7764	0.02528	0.1972	0.406	0.30	0.9054
1411	Progreso (Pl)	134.6447	32.9612	0.13043	1.0323	0.586	0.41	0.8170
1441	Progreso (Ps)	5.4413	2.4517	0.02976	0.1828	0.670	0.30	0.8999
1471	Dzilam (Ps)	9.7975	10.4672	0.02013	0.4866	0.534	0.25	0.7882
1501	Bahía de Tortugas (Ps)	2.8028	1.7825	0.01923	0.1457	0.515	0.30	0.8072
1531	Playa Isla del Carmen (Pl)	27.4594	10.8095	0.05714	0.4805	0.950	0.49	0.9178

Tabla 4.2 Resultados de la caracterización de propiedades de las muestras asociadas con los resultados de velocidad de caída mediana de las mismas; se muestran resultados a cada 10 sitios muestreados.

# Sitio muestral	Sitio y Zona	ρ (kg/m ³)	d_{50} (mm)	W_f exp. (m/s)	n	CSF	Ángulo de reposo (°)	S_*
1	Boca Sur (Pl)	2721.55	0.29736	0.0251	0.9780	0.5955	40.1	5.1575
11	Pto. Morelos III (Ps)	2757.44	0.30353	0.0448	0.9140	0.7186	36.0	5.3750
21	Pto. 4 Cancún (Pb)	2804.74	0.28958	0.0284	1.4718	0.6605	39.0	5.0766
31	Pto. 6, Cancún (Pl)	2774.95	0.22123	0.0191	0.9304	0.6612	38.1	3.3614
41	Pto. 9, Cancún (Ps)	2757.50	0.59835	0.0610	1.0897	0.4684	43.0	14.8767
51	Pto. B, Cancún (Ps)	2607.55	0.19687	0.0214	0.9983	0.6823	38.2	2.6833
61	Pto. F, Cancún (Pb)	2823.22	0.20091	0.0192	1.0162	0.6721	35.1	2.9490
71	Tulum I (Pb)	2774.95	0.17501	0.0189	1.3060	0.5987	39.0	2.3651
81	Bahía Príncipe (Ps)	2827.33	0.86763	0.0953	0.8523	0.5762	47.1	26.4952
91	Punta Brava (Ps)	2774.35	0.61313	0.0559	1.3472	0.5962	42.5	15.5090
101	Chelem (Ps)	2724.12	0.66675	0.0773	0.9875	0.5712	37.3	17.3296
111	Progreso (Pb)	2731.38	0.32116	0.0331	1.0644	0.5815	37.0	5.8057
121	UAY (Ps)	2667.55	0.20305	0.0179	1.1874	0.6382	39.1	2.8804

Por otra parte, al intentar asociar la velocidad de caída con las propiedades de una muestra, se emplearán los resultados de la caracterización del capítulo anterior, cuyos valores son necesarios para describir el umbral de dicho movimiento, a nivel de muestra.

Sin embargo, los parámetros obtenidos de los análisis granulométricos y propiedades de los sedimentos a nivel de muestra no serán revisados en cuanto a su precisión, pues fueron desarrollados dichos estudios considerando las normas ASTM C136 y D854 que son un procedimiento estandarizado y no intervienen incertidumbres relacionadas con el operador como sucede con las propiedades de las partículas.

Así, la velocidad de caída puede asociarse sin problemas a los parámetros de una muestra; en la tabla 4.2 se muestran los parámetros estimados y la velocidad de caída, correspondiente ésta a la mediana de los datos de velocidad de los 10 a 15 granos seleccionados por muestra, esto con base en los resultados mostrados en Alcérreca (2009).

Ambos análisis, relativos tanto a partículas individuales como a muestras, se desarrollan en el siguiente capítulo, una vez que han sido confirmadas las posibles fallas en las que se incurre y con la aceptación de la existencia de errores que pueden llegar a corregirse en futuros experimentos.

4.1.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

En el análisis estadístico se muestra particularmente las correlaciones entre las diferentes variables de tal modo que sea fácilmente visible la incidencia de cada una de ellas en el valor de la velocidad de caída, para posteriormente poder formular una expresión matemática del umbral de movimiento.

De esta manera en la tabla 4.3 se muestran las distintas correlaciones obtenidas entre los diferentes parámetros medidos y calculados de los 1557 datos extraídos de las pruebas de velocidad de caída y caracterización grano a grano de las variables. De igual forma, en la misma tabla se presenta el valor p , el cual al tener un valor inferior al nivel de significación (se elige 0.05 para contemplar el equilibrio entre cometer un error tipo I y uno de tipo II, estadísticamente hablando²) equivale a que el resultado, para este caso, es estadísticamente significativo, es decir, que no es probable o consecuencia del azar la relación entre las variables.

Por lo tanto, al realizar dicho análisis, se obtiene que las variables que tiene mayor relación entre sí, en atención a un coeficiente de correlación mayor a 0.8, fueron: Diámetro nominal frente al d_{50} , Parámetro sedimento- fluido frente al d_{50} , Diámetro nominal frente al Parámetro sedimento- fluido, Reynolds frente al d_{50} , número de Reynolds frente al diámetro nominal, número de Reynolds frente al Parámetros sedimento- fluido, perímetro y área frente al d_{50} , perímetro y área frente al Diámetro nominal, perímetro y área frente al Parámetro sedimento fluido, perímetro y área frente al número de Reynolds. Por lo tanto las variables principales que se distinguen para describir el fenómeno de velocidad de caída son: número de Reynolds, Parámetro sedimento- fluido, Diámetro nominal, D_{50} , perímetro y área.

Ahora, al observar los valores P , se destacan las variables correspondientes a densidad frente al CSF, diámetro nominal frente al CSF, Parámetro sedimento-fluido frente al CSF, Reynolds frente al CSF, área frente al CSF, densidad frente a esfericidad, densidad frente al Parámetro sedimento- fluido y densidad frente al número Reynolds; que resultan con un valor P superior al nivel de significancia seleccionado por lo que la relación entre ambas variables es al azar. Se logra a distinguir al observar el listado de relaciones, que el factor de forma CSF y la densidad parecen hasta cierto punto ser resultado del azar.

Es especialmente importante destacar que el CSF no parece reflejar condiciones asociadas con el flujo, sino únicamente morfología de la partícula como es su relación con la esfericidad y la redondez; esto

² El error tipo I consiste en aceptar lo que se conoce comúnmente como un falso positivo, esto es, rechazar resultados que deben ser aprobados; y por el contrario, el error tipo II consiste en un falso negativo, es decir, en aceptar resultados que no debieron serlo.

quizá debido a que para reflejar condiciones de la partícula en el flujo, deben considerarse las tres propiedades de la misma: aplanamiento, elongación y equidimensionalidad, y no únicamente dos de éstas, ya que la faltante podría influir de manera conjunta. Lo interesante es que, aunque el CSF estima cuan plana podría ser una partícula, ésta no se relaciona significativamente con el área máxima proyectada del grano, lo cual sugiere que realmente no es verdaderamente considerada en dicho parámetro y que quizá sea conveniente realizar una nueva propuesta de un factor de forma que contemple las tres propiedades morfológicas de la partícula y aun más, se relacione con las turbulencias que puede ocasionar la partícula por la forma que posee tras su paso por un fluido.

Por otra parte, la densidad de las partículas, no se correlaciona de buena forma con variables como el Parámetro sedimento- fluido, o el Reynolds, posiblemente como consecuencia del comportamiento de la variable que no se distribuye en un amplio rango de valores y aun más, que el valor de densidad no es dependiente de otras variables pero se involucra con ellas desde un punto no estadístico, sino más bien físico, lo cual también podría extenderse al caso del factor de forma; sin embargo, en este último, como ya se mencionó, existen problemas tanto en la representación del factor de forma, como cierta incertidumbre al realizar su medición.

Tabla 4.3 Correlaciones y valores P de significancia de la relación entre variables; en cada cuadro, el primer dato que se escribe es el correspondiente a la correlación entre los parámetros, e inferior a este, el valor P

	CSF	d ₅₀	ρ	d _N	P	E	S*	Reynolds	Perímetro	Área
CSF		-0.1069	0.0318	-0.0143	0.1969	-0.2728	0.0215	0.0324	-0.1718	-0.0416
		0.0000	0.2097	0.5723	0.0000	0.0000	0.3971	0.2008	0.0000	0.1007
d ₅₀	-0.1069		0.1238	0.9622	-0.0615	0.0768	0.9232	0.8791	0.9571	0.8749
	0.0000		0.0000	0.0000	0.0151	0.0024	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ρ	0.0318	0.1238		0.0883	0.1536	-0.0332	0.0285	0.0109	0.0750	-0.0526
	0.2097	0.0000		0.0005	0.0000	0.1898	0.2613	0.6674	0.0030	0.0378
d _N	-0.0143	0.9622	0.0883		-0.0624	0.1342	0.9782	0.9299	0.9662	0.9124
	0.5723	0.0000	0.0005		0.0138	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P	0.1969	-0.0615	0.1536	-0.0624		-0.2659	-0.0799	-0.0668	-0.0955	-0.1025
	0.0000	0.0151	0.0000	0.0138		0.0000	0.0016	0.0083	0.0002	0.0000
E	-0.2728	0.0768	-0.0332	0.1342	-0.2659		0.1345	0.1076	0.2445	0.1455
	0.0000	0.0024	0.1898	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
S*	0.0215	0.9232	0.0285	0.9782	-0.0799	0.1345		0.9683	0.9386	0.9649
	0.3971	0.0000	0.2613	0.0000	0.0016	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000
Reynolds	0.0324	0.8791	0.0109	0.9299	-0.0668	0.1076	0.9683		0.8907	0.9484
	0.2008	0.0000	0.6674	0.0000	0.0083	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
Perímetro	-0.1718	0.9571	0.0750	0.9662	-0.0955	0.2445	0.9386	0.8907		0.9155
	0.0000	0.0000	0.0030	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000		0.0000
Área	-0.0416	0.8749	-0.0526	0.9124	-0.1025	0.1455	0.9649	0.9484	0.9155	
	0.1007	0.0000	0.0378	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

* En rojo se señalan los valores P con un valor inferior al nivel de significancia 0.05, con lo cual la relación es significativa estadísticamente

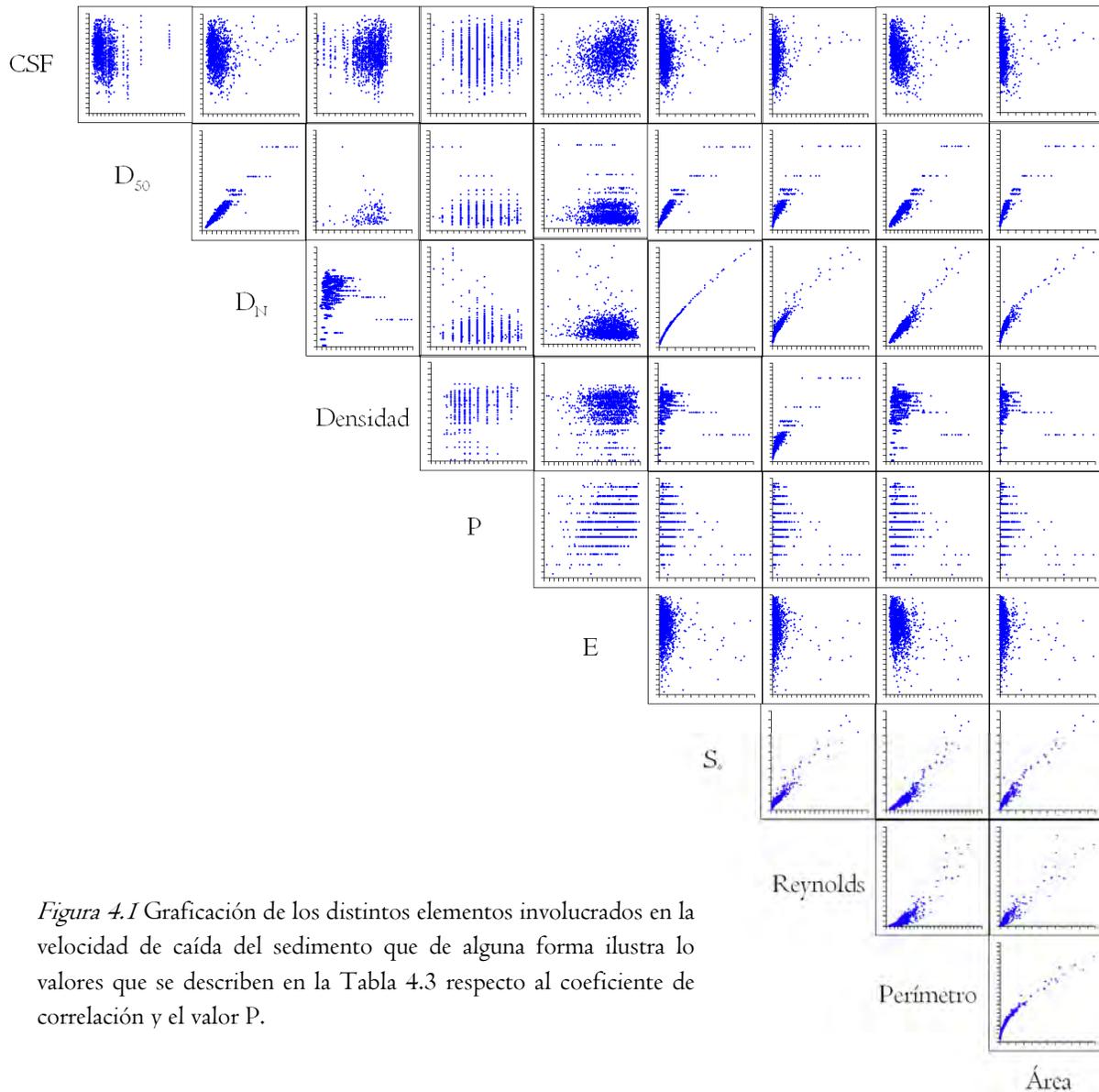


Figura 4.1 Graficación de los distintos elementos involucrados en la velocidad de caída del sedimento que de alguna forma ilustra los valores que se describen en la Tabla 4.3 respecto al coeficiente de correlación y el valor P.

A partir de lo que se muestra en la figura 4.1, se puede observar el comportamiento de las distintas relaciones entre las variables, así como el comportamiento de algunas en forma especial; por ejemplo, en torno a la redondez, se observa el reflejo de haber empleado la escala de Powers la cual aunque propone que el valor de redondez se encuentra dentro de ciertos intervalos, no es fácil distinguir numéricamente todo el rango, por lo que un operador normal elige entre los valores proporcionados directamente de la escala gráfica, por lo cual en la figura 4.1, las gráficas relacionadas con dicho parámetro se observan como un conjunto de líneas rectas definidas.

De la misma figura puede observarse la presencia de variables de muy buen comportamiento no únicamente con otra variable, sino con tres o más, entre las que se encuentran el número de Reynolds, el Parámetro sedimento-fluido, diámetros de las partículas, perímetro y área. Es notable la forma en que el empleo del diámetro nominal influye en generar una mejor distribución de los datos si se le compara con los resultados arrojados con el d_{50} , esto se debe a que el valor del diámetro nominal puede

representar de mejor manera el diámetro de una partícula al considerar en su estimación la equivalencia del diámetro que tendría una esfera con el mismo volumen que la partícula, lo cual no sucede con el d_{50} .

También se observa que existen parámetros que correlacionan muy bien entre sí como son el perímetro o el área o el parámetro sedimento fluido y el diámetro nominal; sin embargo es importante recordar que es en el Número de Reynolds donde se encuentra considerada la velocidad de caída de la forma mostrada en la ecuación 4.1, por lo cual es importante verificar aquellos parámetros que mejor se relacionan con dicho número son: parámetro sedimento fluido, diámetro de la partícula.

$$Re = \frac{W_f d_N}{\nu} \quad \dots(4.1)$$

4.1.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA VELOCIDAD DE CAÍDA

Con todos los resultados mostrados en los apartados anteriores, fue posible detallar aquellas variables que podrían ser introducidas en un modelo matemático. Asimismo, al observar la literatura y las ecuaciones I.15 y I.16, se tiene una coincidencia de los parámetros que intervienen en las condiciones de flujo laminar y turbulento (Reynolds y parámetro sedimento-fluido) y que no es la excepción para el flujo en transición³. A la luz de los resultados mostrados en la figura 4.1 y en la tabla 4.3, la relación de las dos variables mencionadas ($r = 0.9683$) es evidente.

Así, al considerar los parámetros que intervienen tanto en la Ley de Stokes, como la Ley para flujo turbulento, y en vista de que coinciden con los resultados obtenidos en esta tesis, es posible formular una expresión en esta dirección, la cual no pierde el sentido físico del fenómeno pues se relacionan parámetros que involucran las fuerzas de inercia y fuerzas viscosas con el número de Reynolds, y condiciones propias del sedimento a través del Parámetro sedimento- fluido (densidad, diámetro, viscosidad). Para este último parámetro se consideró el diámetro nominal en lugar del d_{50} , pues, como se puede visualizar en la figura 4.1, el empleo de un parámetro propio de una muestra no necesariamente refleja las condiciones grano a grano.

4.1.3.1 Ajuste de modelos matemáticos

Fueron aplicados entonces distintos ajustes con formulaciones lineales y no lineales los cuales son mostrados en la tabla 4.4, con sus respectivos coeficientes de correlación, y donde se consideró como variable independiente al Parámetro sedimento – fluido, y como variable dependiente al número de Reynolds, esto debido fundamentalmente a la buena relación existente entre ambas variables, así como la adimensionalidad de las mismas.

Una vez consideradas aquellas variables que pueden involucrarse en un modelo matemático, es posible obtener la expresión que ajusta a los datos conseguidos experimentalmente, sin que esto signifique dejar de relacionar la física que ocurre en el fenómeno, de ahí que se hayan elegido dos parámetros adimensionales que contengan las variables de interés.

³ Para los 1557 granos ensayados se obtuvo que el número de Reynolds se ubica en un intervalo de 0.302 y 454.30, encontrándose que únicamente 32 granos (2.06% del total) presentaron condiciones de flujo laminar, y el restante se ubicó en flujo de transición.

Así, con ayuda del programa CurveExpert Professional 1.0.2© (programa validado con el *Statistical Reference Datasets Project* de la National Institute of Standards and Technology del U.S. Department of Commerce), fue posible analizar modelos pertenecientes a distintas familias:

- 1 modelo lineal de la forma $ax + b$.
- 8 modelos pertenecientes a la familia “Ley de Potencias”, las cuales se pueden interpretar en algunos casos de forma clara como líneas rectas en un gráfico log-log; la principal característica de estos modelos es la invarianza de escala: Potencia I (ax^b), Potencia II ($ax^b + c$), Potencia desplazada ($a(x - b)^c$), Raíz ($ab^{1/x}$), Geométrica (ax^{bx}), Geométrica modificada ($ax^{b/x}$), Hoerl ($ab^x x^c$), Hoerl modificada ($ab^{1/x} x^c$)
- 4 modelos de la familia de funciones “Exponenciales”, las cuales se caracterizan por el hecho de que su derivada es igual a la misma función, pero multiplicada por una constante como los modelos: Exponencial (ae^{bx}), Exponencial modificada ($ae^{b/x}$), o en su defecto también dentro de esta familia pueden considerarse las funciones inversas de las ya citadas exponenciales: Logaritmo Natural ($a + b \ln x$), Recíproco del logaritmo natural ($1/[a + b \ln x]$). El crecimiento de este tipo de modelos es estrictamente creciente aumentando la pendiente fuertemente conforme mayores son los valores de la variable independiente.
- 4 modelos de la familia “Sigmoidales”, los cuales intentan describir comportamientos de poca variación en un principio, los cuales aumentan progresivamente de forma acelerada, hasta de nuevo decaer en una variación escasa. De los modelos probados se tienen: la relación de Gompertz ($ae^{-e^{-bx}}$), el modelo Logístico ($a/[1 + be^{-cx}]$), el modelo de Potencia Logística ($a/[1 + (x/b)^c]$) y el modelo de Weibull ($a - be^{-cx^d}$).
- 3 modelos que no pueden clasificarse en una familia en particular de las citadas anteriormente, y que son: Racional ($\frac{a+bx}{1+cx+dx^2}$), Asociación exponencial I ($a[1 - e^{-bx}]$) y Asociación exponencial II ($a[b - e^{-cx}]$).

Tabla 4.4 Resultados de los 10 mejores modelos de ajuste analizados para la obtención de la curva de ajuste a los datos de Reynolds y Parámetro sedimento- fluido.

Modelo	r^2	Ecuación	Parámetros			
			a	b	c	d
Racional	0.9452	$Re = \frac{a + bS_*}{1 + cS_* + dS_*^2}$	-4.1049	2.7648	-0.0048	0.00001
Potencia I	0.9447	$Re = aS_*^b + c$	2.0058	1.1318	-2.6742	
Hoerl modificada	0.9447	$Re = ab^{1/S_*} S_*^c$	2.2041	0.2037	1.1128	
Weibull	0.9447	$Re = a - be^{-cS_*^d}$	18824	18827	0.0001	1.1373
Bleasdale	0.9445	$Re = (a + bS_*)^{-1/c}$	-1.3495	1.7418	-0.8720	
Potencia desplazada	0.9445	$Re = a(S_* - b)^c$	1.8895	0.7748	1.1468	
Hoerl	0.9437	$Re = ab^{S_*} S_*^c$	1.4100	0.9986	1.2384	
Potencia logística	0.9437	$Re = \frac{a}{(1 + (S_*/b)^c)}$	3375.9	555.35	-1.2288	
Potencia II	0.9433	$Re = aS_*^b$	1.5967	1.1825		
Lineal	0.9376	$Re = a + bS_*$	-8.1946	3.4867		

En la tabla 4.4 se muestran los parámetros concernientes a los mejores modelos en función del coeficiente de determinación r^2 , y se observa que cualquiera de los modelos colocados en dicha tabla podría elegirse pues los resultados que muestran son similares. No obstante, la selección de un determinado modelo no únicamente se basa en los resultados arrojados por el coeficiente de determinación sino que también es importante observar la física del fenómeno motivo por lo cual se realizó el análisis de resultados y se analizó el comportamiento de las variables en el apartado anterior.

4.1.3.2 Modelo matemático para la velocidad de caída

Como conclusión de lo obtenido en los apartados anteriores, se percibe que tanto el modelo racional como el correspondiente a potencia I poseen altos valores del coeficiente de correlación, pero se prefiere el empleo como modelo de representación matemática del fenómeno la expresión del tipo de la de potencia I, ya que como se mencionó en párrafos anteriores, coincide con la forma de la Ley de Stokes (ecuación I.15) y la Ley para flujo turbulento (ecuación I.16).

De esta manera, el modelo resultante para la velocidad de caída puede escribirse como se muestra en la ecuación 4.3, en términos del Parámetro sedimento- fluido y el número de Reynolds. Cabe señalar, que los coeficientes, han sido redondeados sin que ello modifique significativamente los resultados de ajuste del modelo; sin embargo es conveniente hacerlo por sencillez del modelo.

$$Re = aS_*^b + c \quad \dots(4.2)$$

$$Re = 2 S_*^{1.13} - 2.67 \quad \dots(4.3)$$

En vista de que el modelo matemático pertenece a la familia “Ley de potencias”, es conveniente entonces graficar los resultados con los ejes en escala logarítmica y observar como es el comportamiento tanto de la curva, como de los datos en torno a ella, lo cual se muestra en la figura 4.2

En la misma figura 4.2 también se ilustra la banda de confianza con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, y cuyos límites vienen dados por las ecuaciones 4.4 y 4.5, las cuales fueron igualmente obtenidos con el empleo del programa CurveExpert Professional 1.0.2©.

$$\text{Límite superior } \alpha=0.05: Re = 2.1724 S_*^{1.1506} - 1.8242 \quad \dots(4.4)$$

$$\text{Límite inferior } \alpha=0.05: Re = 1.8381 S_*^{1.1130} - 3.5158 \quad \dots(4.5)$$

Cabe mencionar que el nivel de significancia está relacionado con la probabilidad de fallar en la estimación; y por tanto, para el caso que se muestra la banda de confianza está asociada a la probabilidad de que una próxima medición arroje, en un 95% ($1-\alpha$) de las veces, un resultado ubicado dentro de dicha banda. La elección del nivel de significancia consiste en un equilibrio conjunto con la amplitud de la banda de confianza, esto es, la banda de confianza se ensanchará con el fin de incrementar la probabilidad de acierto y viceversa.

El objetivo de colocar las bandas de confianza es determinar aquella ecuación que limita, especialmente en el límite superior, el fenómeno que se quiere representar tal y como lo hacen los límites en la región laminar (dado por la Ley de Stokes) y en el régimen turbulento.

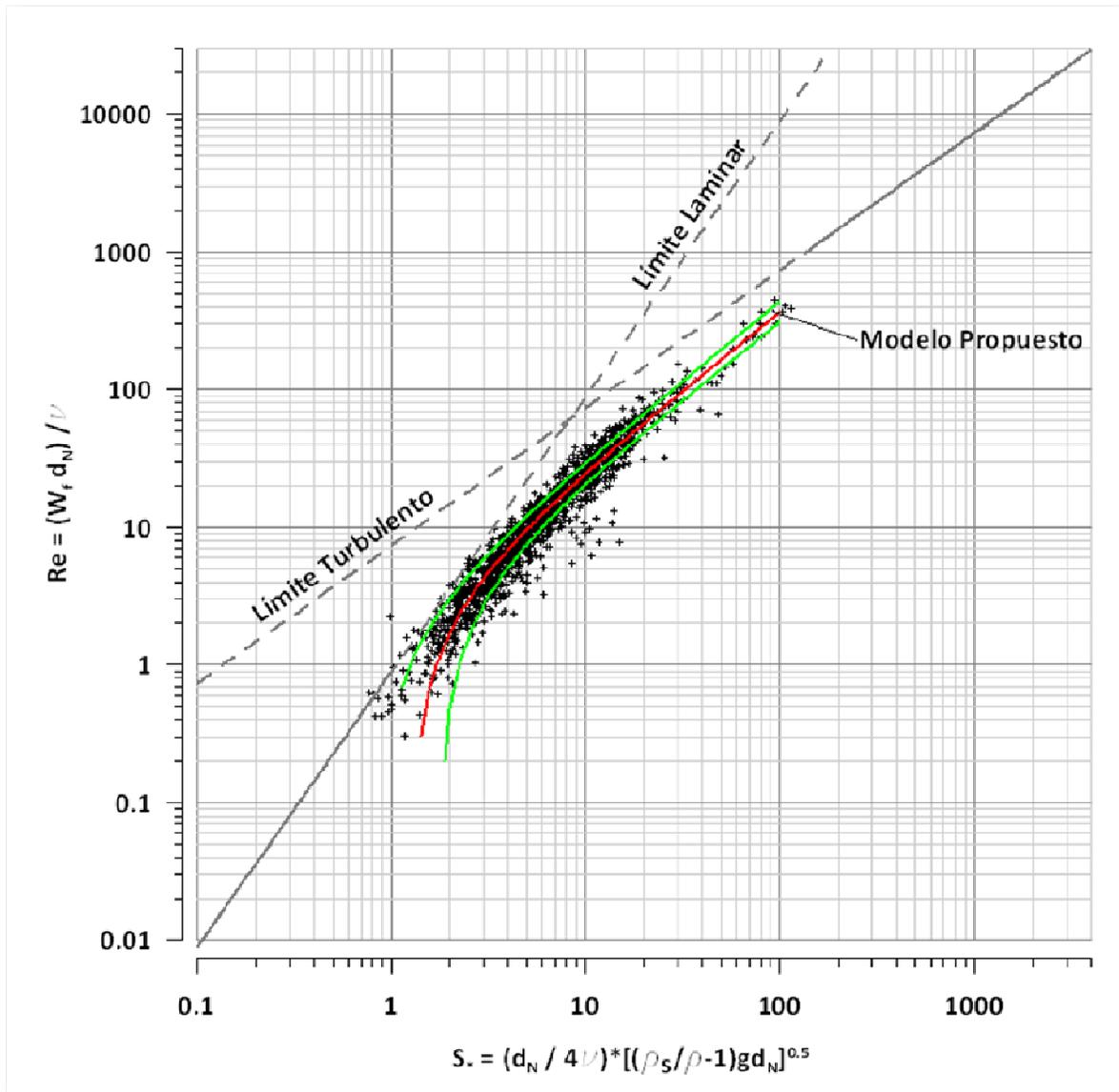


Figura 4.2 Resultados empíricos y modelación propuesta para la determinación teórica de la velocidad de caída por medio de la ecuación 4.3, así como la banda de confianza ($\alpha=0.05$) cuyos límites se representan en la figura y dados por las ecuaciones 4.4 y 4.5.

En la figura 4.2 se puede apreciar que el límite superior de la banda de confianza (ecuación 4.4), llega a coincidir con los límites laminar y turbulento, lo cual es un indicativo de que el modelo propuesto funciona bastante bien.

Bajo la perspectiva propuesta, se tiene que el valor de la velocidad de caída puede variar dentro de un determinado rango; sin embargo, el modelo propuesto, proporciona cuatro elementos de gran importancia:

- 1) Identifica el rango en que se puede encontrar el valor de velocidad de caída para una determinada partícula (ecuaciones 4.4 y 4.5).
- 2) Determina un valor central de velocidad de caída que alcanzarían las partículas. Esto permite, aunado al resultado de que la media de diámetros nominales es igual al d_{50} para una muestra dada, concluir en un valor representativo de la velocidad de caída pero asociado a la muestra a tratar.
- 3) Proporcionar el umbral máximo que puede alcanzar la velocidad de caída dentro del régimen de transición, el cual para sedimento de origen biogénico, no ha sido reportado al momento en la literatura.
- 4) La adimensionalidad de los parámetros involucrados y mostrados en las ecuaciones 4.3 a 4.5, y en la figura 4.2, permiten generalizar el fenómeno de velocidad de caída, al poderse realizar cambios en la viscosidad del fluido, densidad de los elementos involucrados, diámetro, etc.

Por último, para concluir este apartado, se hizo una comparación de la capacidad predictiva del modelo propuesto ante un conjunto de datos de velocidad de caída reportados en la literatura (Hallermier, 1981) y que han sido utilizados ampliamente como referencia para diversas expresiones de velocidad de caída que han sido generadas.

Cabe aclarar de manera importante, que la base de datos con la cual se compara fue generada a partir de pruebas con granos de cuarzo, pumita, plásticos, carbón, entre otros, y no con granos de origen biogénico que son los estudiados en la presente Tesis. Igualmente, dentro de los datos reportados por dicha base, se encuentran: diámetro de las partículas (el cual es representado por el d_{50}), densidad relativa del material, viscosidad y velocidad de caída experimental, por lo cual, los parámetros adimensionales correspondientes al número de Reynolds y al Parámetros sedimento- fluido pueden ser calculados sin problemas para colocarse en una gráfica del tipo de la Figura 4.2, con la única diferencia que el diámetro que se emplearía es el d_{50} y no el diámetro nominal, como fue seleccionado en este trabajo.

De lo anterior se desprende la figura 4.3 donde se observa con cruces los resultados directamente tomados de la base de datos de Hallermier (1981), que presenta en general velocidades de caída que se encuentran por encima del límite superior de la banda de confianza ($1-\alpha = 95\%$) con 57.94% de los datos, mientras que un 39.25% se hallan dentro del rango establecido por la banda de confianza, y un 2.80% se hallan ya sea por fuera inclusive de los límites laminar y turbulento o por debajo del límite inferior de la banda de confianza. Asimismo, en dicha figura se tiene que los datos presentan un comportamiento paralelo al modelo propuesto, lo cual es un indicativo de que las partículas analizadas en la referencia poseen velocidades superiores al sedimento de origen biogénico pero con un comportamiento similar.

En este sentido es importante resaltar que la base de datos incluye resultados provenientes de 13 fuentes distintas recolectadas por Hallermier, con lo cual se mezclan tanto las técnicas de medición, como la omisión de determinados datos como por ejemplo el valor del diámetro nominal, que al ser sustituido por el d_{50} , refleja ciertas diferencias, como las halladas por Jimenez- Madsen (2003) en torno a la base de datos de Hallermier (1981), que establece que la relación entre dichos diámetros

para el sedimento utilizado podría ser asumida como $d_N \approx d_{50}/0.9$, con el fin de realizar equivalencias entre bases de datos que emplean el diámetro nominal y el diámetro d_{50} . Al realizar la equivalencia de diámetro mencionada, se presenta el comportamiento ilustrado por los círculos en la figura 4.3, donde ahora se tiene que el 58.87% de los datos caen dentro de la banda de confianza propuesta, 19.62% más datos que si no se hace la mencionada corrección.

Al observar la banda de confianza, se esperaría que 95% de las partículas de dicha base cayesen en el rango propuesto; sin embargo, únicamente lo hacen 58.87%. Lo anterior puede explicarse a través del tipo de partículas empleadas en uno y otro estudio, esto es, para este trabajo se manejan partículas de

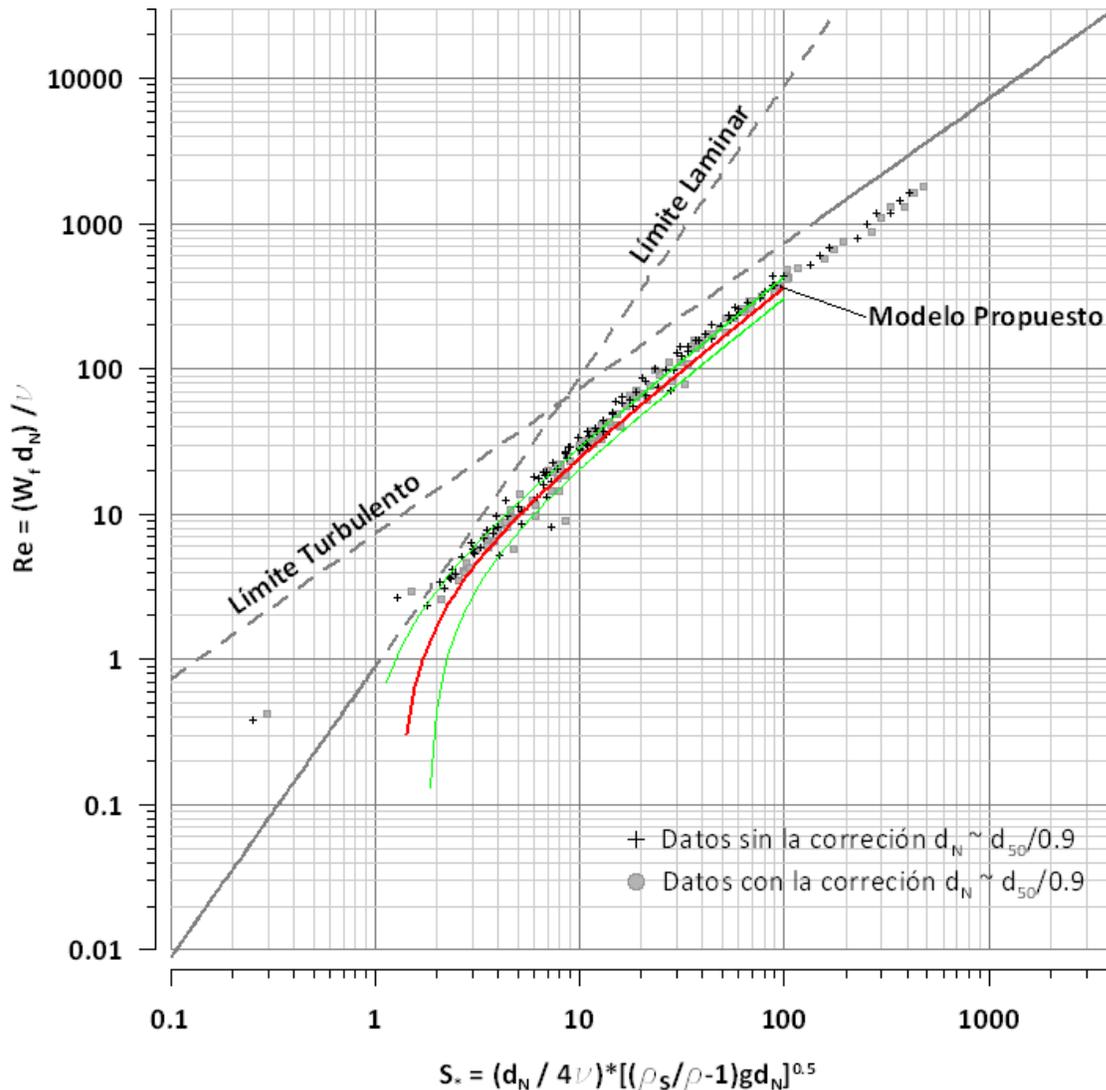


Figura 4.3 Datos de pruebas de velocidad de caída que pueden encontrarse en Hallermier (1981) y la modelación propuesta en esta tesis para la determinación teórica de la velocidad de caída por medio de la ecuación 4.3, con la correspondiente banda de confianza.

origen biogénico cuyas características morfológicas se diferencian en gran manera de las partículas de cuarzo predominantes en la recopilación hecha por Hallermier. En Smith & Cheung (2002), se hace referencia a la gran variedad de formas y tamaños de las partículas calcáreas en comparación granos de cuarzo, lo cual origina varios efectos en la estimación de la velocidad de caída, entre los cuales se pueden citar:

- a) Un valor inferior de velocidad de caída para partículas de origen calcáreo en comparación con otros tipos de granos tales como los de cuarzo. Esto también es corroborado por Smith & Cheung (2003), donde se muestran resultados similares a los aquí encontrados, pues dichos autores igualmente generan una comparación de la velocidad de caída de partículas calcáreas y se compara la misma con otras base de datos que pueden encontrarse en la literatura (Komar & Reimers, 1978; Baba & Komar, 1981).
- b) La forma de las partículas calcáreas, que en general es un valor inferior al de granos de cuarzo, produce un efecto “paracaídas” que induce la reducción del valor de velocidad de caída.
- c) La turbulencia que se origina por detrás de la partícula como consecuencia de la irregularidad de la forma de estas, genera efectos como caídas en espiral e inclusive giros alrededor del eje de la partícula en su caída libre dentro del fluido, lo cual modifica igualmente el valor de velocidad de caída.

Finalmente como muestra del funcionamiento de la fórmula propuesta, se decidió comparar el error relativo que se obtiene al utilizar la expresión propuesta (ecuación 4.3) con diversas formulaciones que pueden ser encontradas en la literatura desarrolladas por los diferentes autores citados en el apartado I.4.I, con lo que se obtienen los resultados señalados en la tabla 4.5, considerando para ello los datos experimentales de velocidad de caída, parámetro sedimento fluido, diámetro nominal medio, etc. algunos de los cuales se detallan en la tabla 4.2 de este capítulo.

Tabla 4.5 Comparación de errores relativos entre la ecuación propuesta y formulaciones ya existentes en la literatura, considerando la base de datos obtenida el presente trabajo.

Autor	Error relativo $\left(\frac{w_{fexp}-w_{fcalc}}{w_{fexp}}\right) \times 100.$	Autor	Error relativo $\left(\frac{w_{fexp}-w_{fcalc}}{w_{fexp}}\right) \times 100.$
Hallermeier	36.444 %	Cheng	35.471 %
Ahrens	35.358 %	Jiménez- Madsen	34.777 %
Van Rijn	40.411 %	Chang & Liou	35.946 %
Soulsby	42.146 %	Rubey	35.657 %
Zanke	39.732 %	Camenen	26.945 %
Julien	41.012 %	Swamme- Ohja	44.254 %
Ecuación propuesta (ec. 4.3)			19.925 %

* Las formulaciones de dichos autores pueden consultarse en la referencias del apartado I.I.2, o en Alcérreca (2009).

La mayoría de las formulaciones son del tipo empírico o semi-empírico, consideran además sedimento de origen terrígeno, motivo por el cual presentan un porcentaje de error mayor al comparárseles con la formulación propuesta la cual considera material de origen biogénico. También es importante señalar que en Alcérreca (2009) y Del Valle (2010), se detectó que la formulación de Camenen presentaba muy buenos resultados, lo cual se confirma en este estudio; sin embargo, se prefiere el empleo de la

ecuación propuesta pues ésta fue creada para el sedimento del que trata esta tesis y aun más, presenta un error relativo más pequeño que la del autor mencionado.

Por otro lado, se decidió verificar el funcionamiento de la ecuación propuesta con respecto a la base de datos experimentales recopilados por Hallermier (1981), y que ha sido usada como referencia para el desarrollo de varias de las formulaciones teóricas que existen en la literatura para la estimación de la velocidad de caída. De esta manera, en la tabla 4.6, se presenta el error relativo que presenta cada formulación respecto de los datos experimentales de dicha base.

Tabla 4.6 Comparación de errores relativos entre la ecuación propuesta y formulaciones ya existentes en la literatura, considerando la base de datos de Hallermier.

Autor	Error relativo $\left(\frac{W_{fexp}-W_{fcalc}}{W_{fexp}}\right) \times 100.$	Autor	Error relativo $\left(\frac{W_{fexp}-W_{fcalc}}{W_{fexp}}\right) \times 100.$
Hallermeier	23.405 %	Cheng	23.622 %
Ahrens	23.355 %	Jiménez- Madsen	23.766 %
Van Rijn	24.997 %	Chang & Liou	24.155 %
Soulsby	25.016 %	Rubey	24.155 %
Zanke	24.930 %	Camenen	24.565 %
Julien	25.312 %	Swamme- Ohja	32.999 %
Ecuación propuesta (ec. 4.3)			21.995 %

Cabe señalar que la formulación que se propone en el siguiente trabajo considera para su cálculo el valor del diámetro nominal por lo que se emplea la corrección ya mencionada de $d_N \approx d_{50}/0.9$ sugerida para el tipo de sedimento trabajado por Hallermier. Así, se obtiene un resultado importante en torno a la formulación propuesta ya que el error porcentual obtenido fue de 21.995% que resulta inferior al que se obtiene con otras formulaciones, lo cual demuestra la confiabilidad de la expresión, así como de los resultados que puedan ser obtenidas a partir de ella.

El error relativo se incrementa del 21.995% al 28.648% si es usado el valor del d_{50} , por lo cual se hace notar la necesidad de emplear para la expresión propuesta la estimación del diámetro nominal, obteniéndose mejores resultados, al menos respecto a partículas como las empleadas por Hallermier.

De esta manera, si bien se concluye en un modelo que estima en buena forma el valor de este umbral de movimiento, es indispensable dar mayor seguimiento a la influencia de la forma de las partículas en dicho fenómeno, y especialmente a la forma de incluir dichos resultados por medio de una expresión matemática que refleje tales efectos sin que ello represente una complicación de los modelos de estimación de la velocidad de caída.

4.2 VELOCIDAD DE INICIO DE MOVIMIENTO

Tras haber aplicado la metodología desarrollada en el capítulo 2 para la obtención de la velocidad de inicio de movimiento del sedimento, se presentan a continuación los resultados obtenidos. El principal objetivo de este apartado consiste en demostrar el funcionamiento de la metodología descrita, a través

de la obtención de resultados satisfactorios para el análisis del umbral de movimiento, así como proponer aquellos parámetros que se encuentran relacionados al mismo.

4.2.1 SELECCIÓN DE MUESTRAS PARA ENSAYOS

Con el fin de alcanzar el objetivo planteado para este umbral de movimiento, se consideraron los resultados que se obtuvieron de realizar pruebas a un subconjunto del universo de muestras originarias de la Península de Yucatán. El criterio de selección de éstas consideró que las muestras tuviesen una representatividad en los siguientes aspectos:

- *Ubicación geográfica.* Las distribución espacial de las muestras en torno de las costas de la Península de Yucatán debía de ser lo más uniforme posible, para poder desarrollar posteriormente una zonificación primaria de la región en torno al umbral de inicio de movimiento de las partículas.
- *Tamaño del sedimento.* Las muestras debían poseer un tamaño acorde con el histograma de distribución del diámetro d_{50} en la Península (ver figura 3.1), y representar tanto la gama de tamaños existentes como la frecuencia en que estos se presentaron.
- *Morfología de la partícula.* Para este punto se contempló el valor del CSF y el histograma correspondiente que puede observarse en la figura 2.3a, eligiéndose muestras que en conjunto presentasen una distribución similar a la ya mencionada.
- *Zona de extracción de la playa.* Dado que las muestras fueron obtenidas de tres zonas distintas del perfil de playa, éstas debían estar representadas por alguna de las muestras seleccionadas.

De esta manera, con los criterios mencionados se plantearon 10 muestras a ensayar, cada una perteneciente a un determinado lugar en la Península de Yucatán y a una zona del perfil, lo cual representó cerca del 7% del total de las muestras. En la tabla 4.7 se puede apreciar las muestras que fueron seleccionadas, los cuales en conjunto poseen una distribución similar de los parámetros respecto a la totalidad de las muestras recolectadas, para ello se empleó la información encontrada en el capítulo 3 de esta tesis, especialmente en torno al tamaño del sedimento y la morfología del mismo.

Tabla 4.7 Muestras seleccionadas para ensayos de determinación de la velocidad de inicio de movimiento.

Sitio y Zona	ρ (kg/m ³)	d_{50} (mm)	W_f exp. (m/s)	CSF
Akumal II (PI)	2319.993	0.14380	0.00868	0.762
Pto. Morelos II (Pb)	2823.223	0.20440	0.01415	0.722
Sian Ka'an (PI)	2684.578	0.25556	0.02381	0.584
Isla Mujeres (PI)	2600.364	0.27888	0.02369	0.559
Pto. E, Cancún (Ps)	2684.578	0.30352	0.03619	0.628
Chelem (Pb)	2702.631	0.34529	0.04076	0.542
Pto. 10, Cancún (PI)	2703.064	0.38876	0.04255	0.408
Bahía de Tortugas (PI)	2746.065	0.43565	0.01419	0.651
Holbox (PI)	2625.012	0.48604	0.04256	0.541
Pto. F, Cancún (Ps)	2482.259	2.0142	0.15789	0.740

Las pruebas de inicio de movimiento fueron realizadas considerando distintas condiciones de oleaje, las cuales consistieron en períodos desde 1.0 hasta 2.0 s con espaciamiento de 0.2 s y alturas de ola de 0.15 m, y en el caso de no presentarse o detectarse movimiento alguno en la cama de sedimento colocada, como se mencionó en el apartado 2.2 de este trabajo, la altura de ola se incrementó a 0.18 y/o a 0.20 m.

Al momento de llevar a cabo los ensayos, en la muestra correspondiente a Pto. F no pudo ser percibido el movimiento de las partículas bajo las condiciones de oleaje correspondientes, motivo por el cual no se integró a los resultados que aquí se presentan. Asimismo, se detectaron irregularidades en las mediciones obtenidas en la muestra correspondiente a Bahía de Tortugas (PI), las cuales se adjudican no a fallas en la metodología sino más bien a la presencia de fragmentos de concha en dicha muestra (detectados al analizar las imágenes proporcionadas por el PIV), lo cual motivó resultados con valores bajos de velocidad de inicio de movimiento, valores que sí serán presentados en este apartado, pero no de forma integrada al análisis conjunto del resto de las muestras seleccionadas. Esta última observación fue importante ya que en la Península de Yucatán es posible encontrar sitios con playas cuyo sedimento esté integrado principalmente por fragmentos de concha, por lo que podría esperarse que en tales lugares, el valor de la velocidad de inicio de movimiento fuese mucho menor al esperado y consecuentemente que dichas playas se encuentren más vulnerables a procesos de erosión ante el paso de eventos extremos.

4.2.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Tras haber desarrollado las pruebas, los valores de velocidad de inicio de movimiento experimental de las muestras ensayadas se muestran en la tabla 4.8, donde aunado al resultado de velocidad, se presentan los valores correspondientes a: Parámetro sedimento- fluido (S^*); Parámetro de movilidad (M_N) y Parámetro de movilidad modificado (M_N'), ver ecuación 4.7; Velocidad Cuadrática Media (U_{rms}); Número de Froude (\mathcal{F}) asociado a U_{rms} y a la velocidad de inicio de movimiento (W_I), ver ecuación 4.8; Reynolds asociado a U_{rms} y a W_I , ver ecuación 4.9.

Los valores de W_I fueron obtenidos directamente del procesamiento de las imágenes obtenidas por medio del PIV (ver. figura 4.8); mientras que para la obtención de la U_{rms} fue necesario seleccionar de los registros de velocidad obtenidos de los vectores secciones donde el movimiento oscilatorio se hubiera establecido por completo y hasta alcanzar una extensión en tiempo cercana a 15 veces el período del oleaje considerado para la prueba. En la figura 4.5 se ejemplifican las secciones de dichos registros tomadas en cuenta para la estimación de la velocidad cuadrática media, para la cual se empleó la ecuación 4.6, donde N es el número de datos, y U es la velocidad que se obtiene de los registros:

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N U^2} \quad \dots(4.6)$$

Por otra parte, la inclusión del número de Froude (ec. 4.8) se encuentra relacionada con la inercia del flujo oscilatorio actuante sobre determinada partícula, y por ello, dado que el número de Froude representa la relación entre fuerzas de inercia y las de gravedad, se pueden definir éstas por un lado en

función de U_{rms} del flujo oscilatorio o con la velocidad de movimiento de la misma partícula W_i , y por otro lado, por el valor de la gravedad y el tamaño del sedimento, respectivamente.

$$M_N = \frac{U_{rms}}{W_f} \quad \text{y} \quad M'_N = \sqrt{\frac{U_{rms}}{W_f}} \quad \dots(4.7)$$

$$F_{U_{rms}} = \frac{U_{rms}}{\sqrt{gd_N}} \quad \text{y} \quad F_{W_i} = \frac{W_i}{\sqrt{gd_N}} \quad \dots(4.8)$$

Asimismo, en el desarrollo del inicio de movimiento de la partícula también se presentan fenómenos relacionados con las fuerzas viscosas, por lo cual se incluyeron los números de Reynolds correspondientes:

$$\Re_{U_{rms}} = \frac{U_{rms}d_N}{\nu} \quad \text{y} \quad \Re_{W_i} = \frac{W_id_N}{\nu} \quad \dots(4.9)$$

Por otra parte, se toma en consideración el efecto de la aceleración dentro del umbral de inicio de movimiento, ya que a partir de ésta es posible obtener de forma directa la fuerza requerida para que el sedimento se mueva. Por lo anterior es que se incluyen los valores de la aceleración pico (a_{max}), la aceleración media cuadrática (a_{rms}) y la aceleración de resalto o aceleración *spike* (a_{spike}), esta última en función de la aceleración media del registro y definida como $a_{spike} = \bar{a}^3 / \bar{a}^2$, esta última introducida como una variable que se ha considerado en forma relativamente reciente para el estudio del transporte y movimiento de las partículas (Drake & Calantoni, 2001). El registro de aceleración fue obtenido por derivación con diferencias finitas del registro de velocidad proporcionado por los vectrinos.

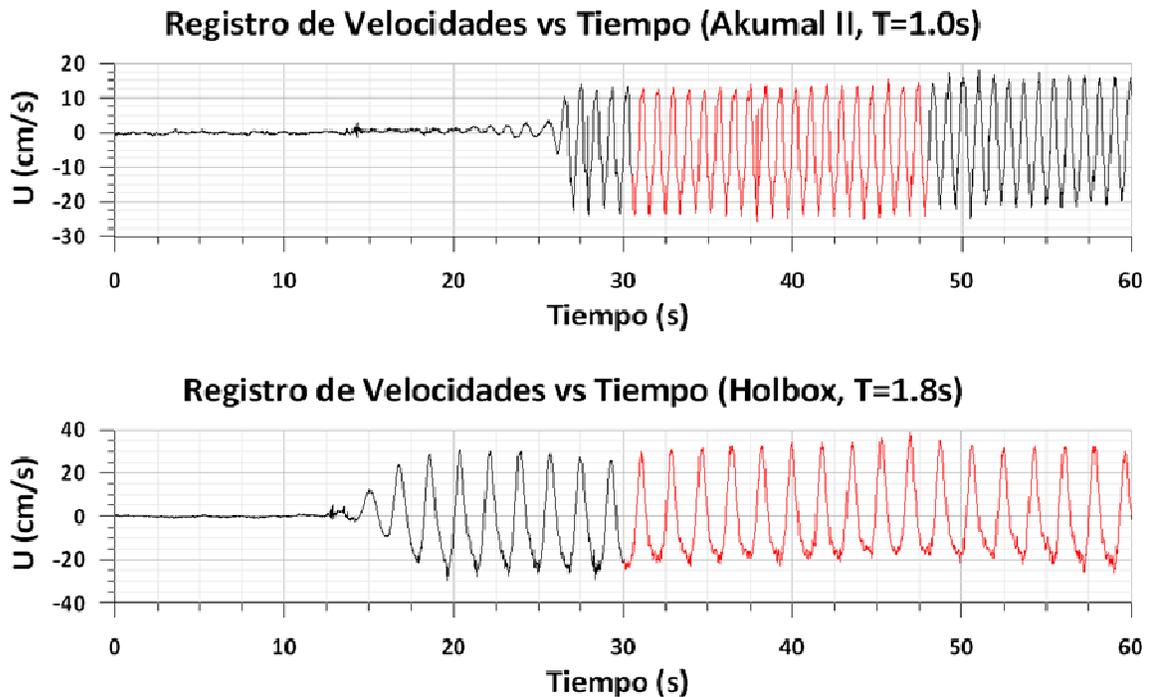


Figura 4.8 Ejemplo de registros obtenidos de los vectrinos para dos de las muestras trabajadas. En rojo se representa la sección extraída del registro para la obtención de la velocidad cuadrática media U_{rms} .

Tabla 4.8 Parámetros y resultados obtenidos tras la realización de las pruebas de velocidad de inicio de movimiento

Sitio	W_I (m/s)	T (s)	H (m)	U_{rms} (m/s)	\mathcal{R}_{Wi}	$\mathcal{R}_{U_{rms}}$	\mathcal{F}_{Wi}	$\mathcal{F}_{U_{rms}}$	M_N'	M_N	S^*	a_{RMS} (m/s ²)	a_{MAX} (m/s ²)	a_{SPIKE} (m/s ²)
Akumal II (Pl)	0.08230	1	0.15	0.14376	13.2100	23.0751	2.0740	3.6228	3.0792	9.4815	1.515	98.817	417.500	0.156
	0.15750	1.2	0.15	0.16839	25.2806	27.0292	3.9691	4.2436	4.2597	18.1452	1.515	106.710	816.750	-0.150
	0.09128	1.4	0.15	0.17862	14.6509	28.6706	2.3002	4.5013	3.2428	10.5157	1.515	92.564	221.875	2.338
	0.10671	1.6	0.15	0.18853	17.1277	30.2612	2.6891	4.7511	3.5062	12.2934	1.515	92.136	424.750	1.333
	0.20867	1.8	0.15	0.18451	33.4942	29.6155	5.2587	4.6497	4.9031	24.0405	1.515	88.767	763.000	0.506
0.20507	2	0.15	0.18249	32.9156	29.2914	5.1678	4.5988	4.8606	23.6252	1.515	75.292	202.125	0.302	
P Morelos II (Pb)	0.04929	1	0.15	0.14185	8.5535	24.6171	1.1945	3.4377	1.8663	3.4831	3.0262	116.032	219.625	-0.124
	0.11681	1.2	0.15	0.17410	20.2722	30.2145	2.8310	4.2194	2.8732	8.2551	3.0262	140.934	975.625	0.941
	0.16998	1.4	0.15	0.18339	29.4997	31.8279	4.1196	4.4447	3.4659	12.0127	3.0262	101.282	533.250	1.201
	0.24674	1.6	0.15	0.19423	42.8220	33.7077	5.9800	4.7072	4.1759	17.4378	3.0262	95.510	470.250	-0.310
	0.13425	1.8	0.15	0.18962	23.2990	32.9081	3.2537	4.5956	3.0802	9.4877	3.0262	87.372	225.875	-2.598
0.10587	2	0.15	0.18785	18.3728	32.6017	2.5657	4.5528	2.7353	7.4817	3.0262	76.032	214.750	-0.046	
Sian Ka'an (Pl)	0.06326	1	0.15	0.13466	16.7349	35.6256	1.2416	2.6432	1.6299	2.6567	4.0641	112.238	603.875	1.376
	0.13420	1.2	0.15	0.16436	35.5037	43.4823	2.6342	3.2262	2.3741	5.6362	4.0641	104.062	385.625	0.384
	0.16451	1.4	0.15	0.17397	43.5232	46.0258	3.2292	3.4149	2.6286	6.9093	4.0641	89.739	253.875	1.109
	0.19108	1.6	0.15	0.18271	50.5527	48.3386	3.7508	3.5865	2.8329	8.0252	4.0641	86.553	307.500	-0.155
	0.11511	1.8	0.15	0.17800	30.4529	47.0924	2.2595	3.4940	2.1987	4.8344	4.0641	81.484	301.500	0.465
0.10693	2	0.15	0.17591	28.2892	46.5389	2.0989	3.4530	2.1192	4.4909	4.0641	72.460	269.125	-1.460	
I. Mujeres (Pl)	0.06759	1	0.15	0.14295	14.5228	30.7148	1.4723	3.1138	1.6891	2.8532	3.0923	95.184	198.375	0.150
	0.13875	1.2	0.15	0.16783	29.8119	36.0605	3.0222	3.6557	2.4201	5.8570	3.0923	97.337	337.250	-0.840
	0.08009	1.4	0.15	0.18061	17.2083	38.8049	1.7445	3.9339	1.8387	3.3808	3.0923	115.714	823.250	0.053
	0.14166	1.6	0.15	0.18520	30.4367	39.7927	3.0856	4.0341	2.4454	5.9797	3.0923	86.593	259.000	-2.440
	0.12824	1.8	0.15	0.18094	27.5541	38.8769	2.7933	3.9412	2.3267	5.4134	3.0923	78.894	218.750	0.009
0.19091	2	0.15	0.18773	41.0187	40.3358	4.1584	4.0891	2.8388	8.0587	3.0923	74.723	197.500	1.635	
Pto. E (Ps)	0.09409	1	0.15	0.14387	29.7526	45.4920	1.6894	2.5831	1.6124	2.6000	5.2603	101.877	268.500	0.674
	0.09484	1.2	0.15	0.16916	29.9875	53.4881	1.7028	3.0372	1.6188	2.6205	5.2603	100.000	274.750	-1.375
	0.10036	1.4	0.15	0.17954	31.7352	56.7700	1.8020	3.2235	1.6653	2.7732	5.2603	91.115	278.375	0.934
	0.10753	1.6	0.15	0.18635	34.0024	58.9260	1.9307	3.3460	1.7238	2.9713	5.2603	83.658	250.125	0.072
	0.15009	1.8	0.15	0.18153	47.4605	57.4003	2.6949	3.2593	2.0365	4.1474	5.2603	79.443	240.750	0.582
0.16761	2	0.15	0.19045	53.0000	60.2224	3.0095	3.4196	2.1521	4.6315	5.2603	71.525	179.625	-1.032	
P10 (Pl)	0.06212	1	0.15	0.14540	25.3678	59.3826	0.9813	2.2972	1.2082	1.4598	7.6972	103.183	462.625	0.323
	0.08762	1.2	0.15	0.16637	35.7832	67.9445	1.3843	2.6284	1.4350	2.0592	7.6972	101.649	336.875	-1.397
	0.10313	1.4	0.15	0.18030	42.1176	73.6366	1.6293	2.8486	1.5568	2.4237	7.6972	92.423	319.375	0.841
	0.12346	1.6	0.15	0.18805	50.4222	76.7982	1.9506	2.9709	1.7034	2.9016	7.6972	83.621	236.375	-0.627
	0.14662	1.8	0.15	0.18511	59.8790	75.5993	2.3164	2.9245	1.8563	3.4458	7.6972	80.076	226.000	0.092
0.12483	2	0.15	0.18760	50.9794	76.6150	1.9721	2.9638	1.7128	2.9337	7.6972	74.007	227.625	0.298	
Holbox (Pl)	0.07008	1	0.15	0.14049	37.2466	74.6675	0.9706	1.9457	1.2832	1.6466	10.4662	---	---	---
	0.14126	1.2	0.15	0.16531	75.0739	87.8586	1.9563	2.2894	1.8218	3.3190	10.4662	101.531	365.625	0.541
	0.10783	1.4	0.15	0.18079	57.3116	96.0835	1.4934	2.5037	1.5918	2.5337	10.4662	97.758	259.625	0.425
	0.15266	1.6	0.15	0.18636	81.1369	99.0454	2.1142	2.5809	1.8939	3.5870	10.4662	87.380	493.375	0.561
	0.17609	1.8	0.15	0.18252	93.5884	97.0042	2.4387	2.5277	2.0341	4.1375	10.4662	81.623	247.750	1.543
0.11945	2	0.15	0.18480	63.4870	98.2177	1.6543	2.5593	1.6753	2.8067	10.4662	74.639	215.375	-0.433	
Chelem (Pb)	0.10291	1.2	0.15	0.16594	36.1447	58.2840	1.7532	2.8271	1.5890	2.5248	6.4173	96.946	306.875	0.911
	0.13537	1.4	0.15	0.17891	47.5455	62.8384	2.3062	3.0480	1.8224	3.3211	6.4173	106.867	403.125	2.253
	0.12007	1.6	0.15	0.18656	42.1717	65.5243	2.0455	3.1782	1.7163	2.9458	6.4173	91.364	293.625	-0.283
	0.20418	1.8	0.15	0.18222	71.7134	64.0015	3.4784	3.1044	2.2382	5.0093	6.4173	85.874	264.375	-0.913
	0.15401	2	0.15	0.17896	54.0924	62.8541	2.6237	3.0487	1.9438	3.7785	6.4173	79.306	271.625	-1.638
B. Tortugas (Pl)	0.05160	1	0.15											
	0.09280	1.2	0.15											
	0.16824	1.4	0.15											
	0.11825	1.6	0.15											
	0.17840	1.8	0.15											
0.13755	2	0.15												

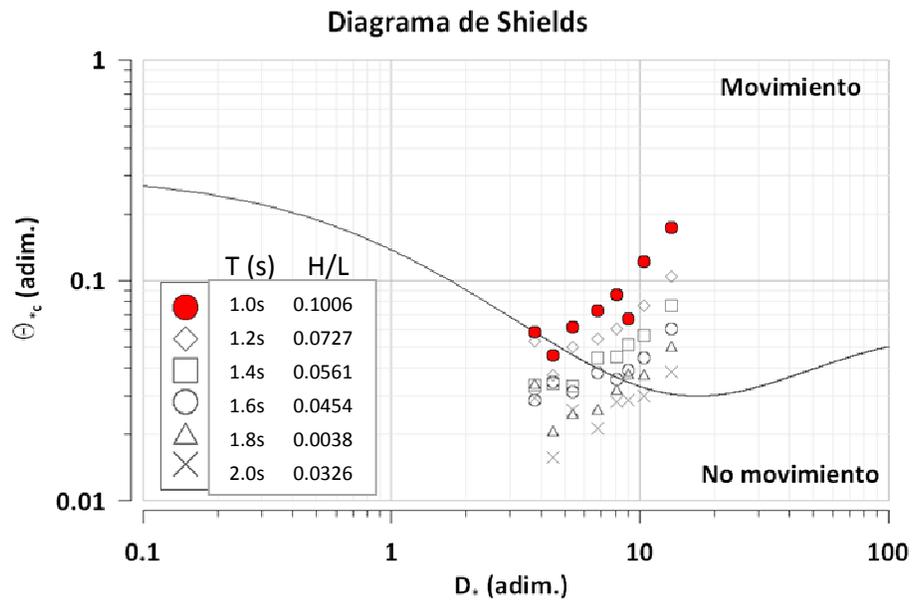


Figura 4.6 Diagrama de Shields modificado, donde se presenta la curva del umbral de movimiento propuesta por Soulsby (1997), así como los resultados de las pruebas de velocidad de inicio de movimiento y la relación altura de ola (H) y la longitud de onda (L).

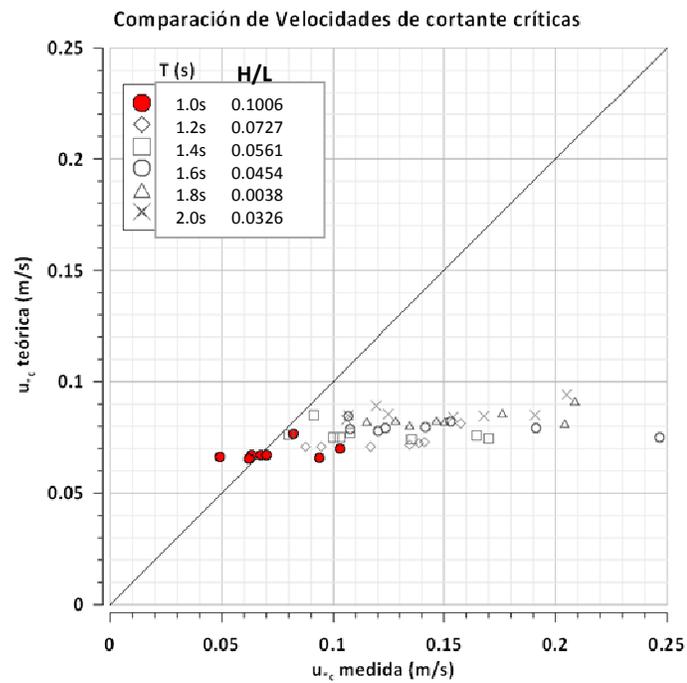


Figura 4.7 Comparación de los resultados experimentales contra los valores teóricos de velocidad de inicio de movimiento considerando las expresiones de Soulsby (1997).

4.2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Lo primero que se hizo respecto a los resultados obtenidos, fue su graficación en un diagrama de Shields modificado, donde la curva que define el umbral de inicio de movimiento fue estimada por medio de la expresión de Soulsby (1997) señalada en la tabla 1.2 de este trabajo, la cual posee la particularidad sobre otras de encontrarse en función del parámetro adimensional de la partícula, de ser válido para un amplio rango de valores de dicho diámetro, y también por basarse en resultados obtenidos de múltiples pruebas experimentales.

En el mencionado diagrama (ver figura 4.6), se puede identificar que los resultados obtenidos de las pruebas realizadas son congruentes con lo hallado en la literatura así como que los resultados obtenidos resultan del orden de magnitud respecto de la curva de umbral de movimiento. En la figura 4.6 se destacan las pruebas con períodos iguales con 1.0 s, ya que dichas pruebas fueron las primeras en las que se observó el inicio de movimiento, y representan además la condición de oleaje menos energética para lograr el movimiento de la cama de sedimento.

Aunque los resultados de las pruebas son similares a resultados que pueden ser encontrados en la literatura (Soulsby, 1997), es claro que el comportamiento del umbral de inicio de movimiento difiere del esperado teóricamente con la curva de Shields. Los resultados indican que el umbral de inicio de movimiento para el sedimento de origen biogénico trabajado, se ubica por encima del valor teórico, por lo que el movimiento de este tipo de partículas se alcanza bajo condiciones de oleaje más energéticas que las de sus similares de origen terrígeno, lo cual coincide con resultados mostrados por Smith & Cheung (2004) en torno a sedimento calcáreo.

Cabe señalar que los resultados obtenidos tienen un rango de validez para diámetros adimensionales de la partícula (D_*) entre 3 y 11, que comprende esencialmente partículas que se encuentran cerca del límite del comportamiento del material fino, y anterior al de arenas gruesas.

Igualmente, en la figura 4.7 se pueden observar la comparación de los resultados experimentales y los valores teóricos de velocidad de inicio de movimiento. Se eligió comparar contra los valores teóricos proporcionados por Soulsby (1997), pues como se mencionó anteriormente, se encuentran basados en una recopilación de datos de pruebas que pueden encontrarse en la literatura, así como de ofrecer una variación del valor de la velocidad de inicio de movimiento en función del período del oleaje.

A partir de dicha comparación se obtiene que los valores teóricos y los experimentales se asemejan para las condiciones menos energéticas que originan el inicio del movimiento de las partículas, esto es, la condición en que el período fue igual con 1.0 s; sin embargo, para períodos de mayor duración, la resistencia a producirse el movimiento aumenta considerablemente para las pruebas experimentales realizadas. La morfología de las partículas es uno de los principales elementos característicos de las partículas trabajadas, por lo que es conveniente un análisis más detallado de la forma en que dichas variables afectan al umbral de movimiento.

Por otra parte, con el objetivo de determinar los parámetros que se ven asociados al umbral de movimiento se realizó la matriz de coeficientes de correlación señalada en la tabla 4.9, donde

fácilmente puede apreciarse el comportamiento entre los diferentes parámetros, especialmente aquellos referidos a las condiciones hidrodinámicas.

El primero de los comportamientos que puede ser apreciado en dicha tabla, es el coeficiente de correlación obtenido entre el período del oleaje generado en las pruebas y U_{rms} , con un valor $r = 0.8043$, que si bien no explica la totalidad del valor de dicha velocidad, sí se ve fuertemente implicado en su determinación. Por lo cual, esta primera conclusión es de vital importancia, pues se puede confiar en que los parámetros estimados con la U_{rms} conllevan información de la variación del período. Por otra parte, se distingue dentro de los resultados de los coeficientes de correlación dos situaciones diferentes, la primera de éstas es respecto a coeficientes con valores inferiores a 0.80 lo cual no se consideró con la significancia suficiente como para asumir que existe una fuerte correlación entre los parámetros, por tanto se descartó la dependencia entre los mismos; mientras que la segunda situación consiste en asumir la correlación entre las variables como consecuencia de valores del coeficiente superiores a 0.80.

Así, al observar los parámetros que poseen un nivel aceptable del valor del coeficiente de correlación, se encontró que los números de Froude se encuentran mejor correlacionados con el Parámetro de Movilidad modificado, mientras que los números de Reynolds se asocian mejor con el Parámetro sedimento- fluido. Una interpretación física de lo que ocurre al obtenerse dichas relaciones es que los movimientos relacionados directamente con las partículas se encuentran asociadas especialmente a la interacción con las fuerzas viscosas del fluido, lo que genera el inicio del movimiento; sin embargo, el comportamiento dentro de un flujo de las partículas de sedimento se encuentra mayormente en función del número de Movilidad modificado (M_N') ya que dentro del flujo las condiciones que gobiernan son las fuerzas de inercia, así como el balance entre iniciar el movimiento o detenerlo, que es esto último lo que representa el M_N' .

Además de lo mencionado en el párrafo anterior, se obtuvieron los siguientes resultados la posibilidad de relacionar las siguientes variables de forma adecuada:

a) $\mathcal{R}_{U_{rms}}$ vs. Parámetro Sedimento- Fluido ($r = 0.9673$)

Esta relación implica que las fuerzas viscosas generadas por el flujo oscilatorio afectan a la partícula en función directa de las propiedades que ésta posea. El valor de r es bastante elevado respecto a lo que se esperaba en torno de este parámetro y es importante puesto que con las condiciones hidrodinámicas puede estimarse el tipo de sedimento a encontrar en un determinado sitio, y viceversa. Esta relación se puede identificar en la figura 4.8, donde el comportamiento varía en función del período.

b) \mathcal{R}_{w_i} vs. $\mathcal{R}_{U_{rms}}$ ($r = 0.8368$)

Por medio de esta relación se puede estimar la velocidad de inicio de movimiento a partir de las condiciones hidrodinámicas, lo cual para ciertos estudios podría representar un resultado que permitiría una gran ventaja para estimar la velocidad de inicio de movimiento, la cual se emplea directamente, como ya se ha visto, en el transporte de sedimento, con lo que se podrían llevar a cabo modelaciones teóricas en torno a dicho proceso en regiones donde no se dispone de datos de las propiedades del sedimento.

c) \mathcal{F}_{w_i} vs. M_N ($r = 0.8500$)

Estos dos parámetros relaciones representan el tipo de arrastre que puede llevarse a cabo al considerar los flujos que se presentan para dar pie al inicio de movimiento de la partícula. El

número de movilidad está en función de la velocidad de inicio de movimiento y de la velocidad de caída, análogo a lo realizado por Rouse y su parámetro correspondiente (Rou).

d) \mathcal{F}_{wi} vs. MN' ($r = 0.8738$)

Esta relación es análoga a la presentada en el inciso c), pero se encontró que la correlación se mejora al modificar el exponente al que se encuentra elevado el número de movilidad ($1/2$).

e) $\mathcal{F}_{U_{rms}}$ vs. Parámetro Sedimento-Fluido ($r = -0.8516$)

Esta relación refleja que las fuerzas de inercia se encuentran en proporción inversa con las propiedades del sedimento. Este resultado es más fácilmente de interpretar conforme a la relación hallada en a) en donde se obtuvo la proporcionalidad directa con las fuerzas viscosas a través del número de Reynolds. De lo anterior se puede desprender que, entre mayor sea el tamaño de la partícula, mayor será el efecto de las fuerzas viscosas presente en el fluido para provocar el inicio del movimiento esencialmente por arrastre (ver figura 4.9a), y por el contrario, entre menor sea el tamaño de la partícula, las fuerzas de inercia del flujo inducirán el inicio del movimiento, el cual se observa como un chorro de sedimento impulsado en un instante determinado (ver figura 4.9b).

Las relaciones halladas en c) y d) no son recomendables ya que, aunque físicamente expresan resultados importantes, la velocidad de inicio de movimiento se encuentra en ambos parámetros, lo que induciría un proceso iterativo para hallar dicha variable, lo cual ha sido un problema desde las primeras formulaciones desarrolladas para estimar la velocidad de inicio de movimiento.

La relación a) se presenta en la figura 4.9 donde puede observarse el comportamiento que tienen las variables correspondientes. En dicha figura se nota una tendencia lineal de las mismas y, de forma especial, la posibilidad de asociar condiciones propias de oleaje como el período T o la altura de ola H , con el posible sedimento que pudiera encontrarse.

Tabla 4.9 Coeficientes de correlación de las posibles variables involucradas en la velocidad de inicio de movimiento.

	W_I (m/s)	T (s)	H (m)	U_{rms} (m/s)	\mathcal{R}_{wi}	$\mathcal{R}_{U_{rms}}$	\mathcal{F}_{wi}	$\mathcal{F}_{U_{rms}}$	MN'	MN	S^*	a_{RMS} (m/s ²)	$a_{MÁX}$ (m/s ²)	a_{SPIKE} (m/s ²)
W_I (m/s)	1													
T (s)	0.5712	1												
H (m)	0.0000	0.0000	1											
U_{rms} (m/s)	0.6313	0.8044	0	1										
\mathcal{R}_{wi}	0.5065	0.3950	0	0.3968	1									
$\mathcal{R}_{U_{rms}}$	0.0171	0.1874	0	0.1988	0.8368	1								
\mathcal{F}_{wi}	0.8842	0.4368	0	0.5123	0.0593	-0.4152	1							
$\mathcal{F}_{U_{rms}}$	0.3883	0.3108	0	0.4326	-0.4923	-0.7672	0.7257	1						
MN'	0.6113	0.2548	0	0.3180	-0.2317	-0.6067	0.8738	0.8412	1					
MN	0.5899	0.2226	0	0.2719	-0.2212	-0.5605	0.8500	0.7771	0.9842	1				
S^*	-0.1087	0.0144	0	0.0003	0.7553	0.9673	-0.5126	-0.8516	-0.6827	-0.6261	1			
a_{RMS} (m/s ²)	-0.3951	-0.8114	0	-0.5367	-0.3905	-0.2719	-0.2266	-0.0496	-0.0622	-0.0500	-0.125	1		
$a_{MÁX}$ (m/s ²)	0.0150	-0.3457	0	-0.1306	-0.2414	-0.2843	0.1841	0.2378	0.3267	0.3488	-0.243	0.6882	1	
a_{SPIKE} (m/s ²)	-0.0575	-0.2225	0	-0.1357	0.0145	0.0106	-0.0492	-0.0459	0.0611	0.0682	0.0203	0.2351	0.1996	1

En rojo se presentan las correlaciones significativas con valor superior a 0.80, y en negro las que no; en azul se presentan correlaciones superiores a 0.8 pero son posiblemente correlaciones espurias asociadas con el cálculo matemático de algunos parámetros

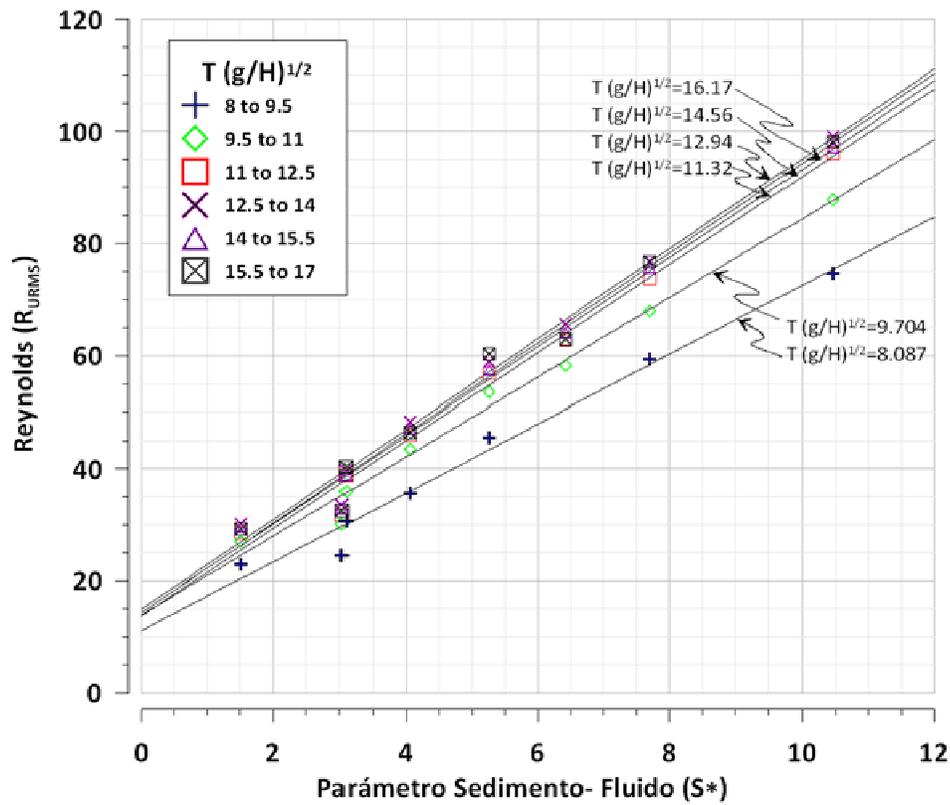


Figura 4.8 Representación gráfica de la relación entre \Re_{URMS} vs. S^* , observándose un comportamiento lineal de las variables.

Asimismo, a partir de la tabla 4.9 se obtuvo como resultado que las aceleraciones del flujo en el fondo de la cama no parecen incidir de forma directa ya sea con los parámetros de velocidad de movimiento o con aquellos representativos de las propiedades del sedimento; sin embargo, la relación que existe entre la aceleración cuadrática media y el período de onda es bastante buena ($r=0.8114$). A partir de lo anterior se desprende que el umbral de inicio de movimiento, puede relacionarse de mejor manera con la velocidad de inicio del sedimento, con la velocidad del flujo, que con la aceleración del flujo.

En este apartado del umbral de inicio del movimiento, no se llega a una relación funcional o expresión matemática entre las variables involucradas, ya que sería conveniente verificar el cumplimiento de los resultados enunciados anteriormente, con la realización de pruebas a un mayor número de muestras, con lo que se obtendría una mejor identificación del comportamiento de este umbral de movimiento y generar con ello una expresión confiable de este umbral de movimiento.

Los resultados a los que se llegó tras la realización de las pruebas resultan mayores a los que pueden ser encontrados en la literatura (Beheshti, 2008); sin embargo, los valores de velocidad de inicio de movimiento obtenidos se encuentran del orden de magnitud.

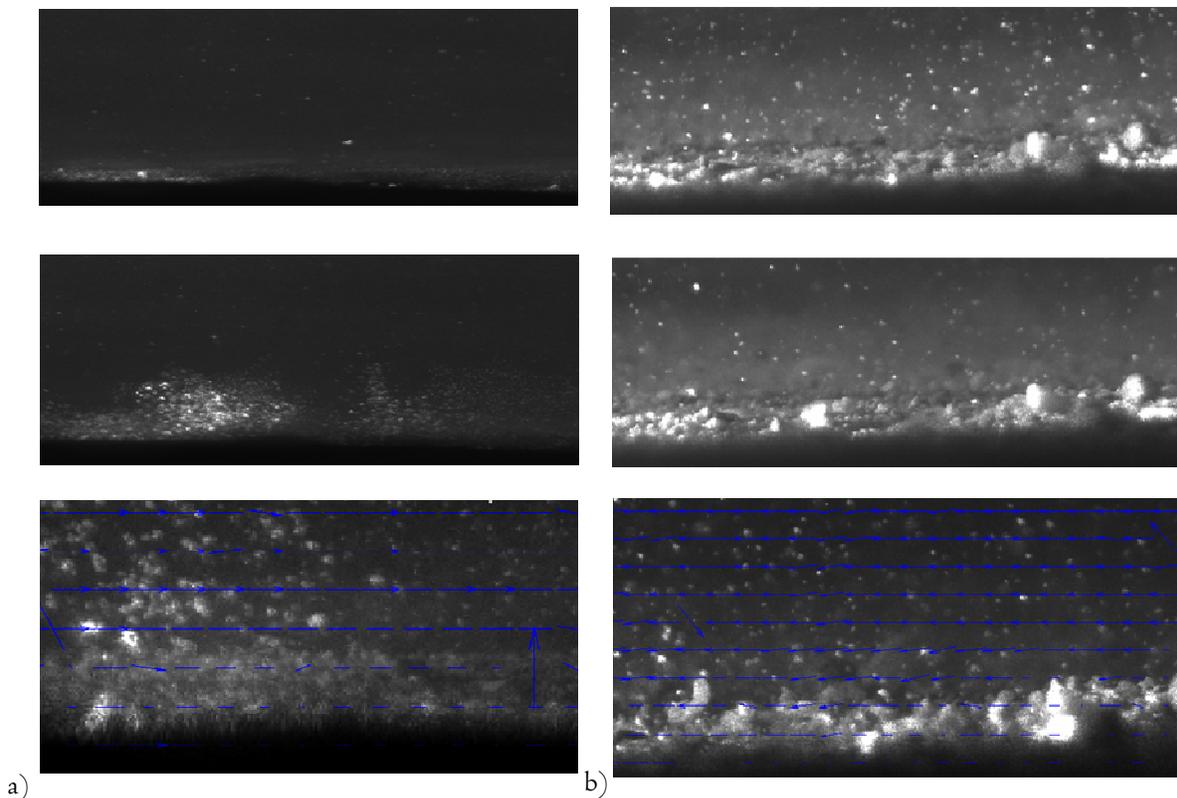


Figura 4.9 Las imágenes de la izquierda corresponden a pruebas realizadas a la muestra originario de Akumal II, mientras que las de la derecha corresponden a Holbox, ambas con bajo condiciones de oleaje $T=1.8s$, $H=0.15cm$. Los dos niveles de imágenes superiores corresponden a imágenes consecutivas entre sí obtenidas a partir del PIV y el nivel inferior muestra el mapa de vectores velocidad calculado.

La variación en torno a la velocidad e inicio de movimiento es grande sobretodo con sedimento con tamaño similar al aquí trabajado, por lo cual los valores presentados se estiman confiables, tanto por la conclusión mencionada, como por la ventaja de que los instrumentos utilizados proporcionan mediciones directas del fenómeno asociado con la velocidad de inicio de movimiento

Por último, cabe señalar que han sido pocos los estudios llevados a cabo en torno a los umbrales de movimiento de partículas calcáreas (Smith & Cheung, 2003; 2004), por lo que los resultados que se mostraron en este capítulo son de gran relevancia para explicar los fenómenos de transporte de sedimentos de playas compuestas por dicho material, lo cual se extiende no únicamente a playas de la Península de Yucatán, sino también a otras costas a lo largo del Mar Caribe o alrededor del mundo.

Capítulo 5

ZONIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL SEDIMENTO Y UMBRALES DE MOVIMIENTO

Capítulo 5

ZONIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL SEDIMENTO Y UMBRALES DE MOVIMIENTO

En el presente capítulo se ejemplifica de forma gráfica la zonificación geográfica de las propiedades del sedimento caracterizadas en el capítulo 3, así como del umbral de movimiento correspondiente a la velocidad de caída.

Respecto a la velocidad de inicio de movimiento dado que no se realizaron pruebas a la totalidad de las muestras, únicamente se presenta una zonificación geográfica en atención a la representatividad de las muestras; sin embargo, la misma se efectúa de forma tabulada para hacer más fácil la lectura de dichos resultados.

Asimismo, el tratamiento de la zonificación geográfica que se presenta, se hace primeramente para la totalidad de la Península de Yucatán, desde el sitio donde se ubica la primera de las muestras que es Playa Isla del Carmen, Campeche, bordeando la costa hasta llegar al sitio donde se ubica Punta Allen, en Quintana Roo. Posteriormente, se enfoca la atención en Cancún, Quintana Roo, pues muchas muestras fueron extraídas de esta zona, y donde se observa con facilidad el comportamiento de los sedimentos de esta región del país, cuya importancia es relevante en términos económicos y ambientales.

La presente zonificación, tanto de la Península de Yucatán, como de Cancún, Quintana Roo, representa un ejemplo de la manera en que podría caracterizarse la totalidad de las costas mexicanas; si bien no es un trabajo sencillo, resulta de gran utilidad para el conocimiento del sedimento que puede encontrarse y así tener ideas base tanto para desarrollo de modelos de transporte de sedimento, para la realización de rellenos artificiales, diseño de obras de protección costera, así como para conocer la modificación del material de una misma zona a lo largo del tiempo y ante el paso de eventos extremos, como son los de huracanes.

5.1 ZONIFICACIÓN DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Las propiedades del sedimento analizadas para su zonificación fueron el valor del diámetro d_{50} , factor de forma y la velocidad de caída; también se muestran los primeros resultados en este aspecto, relacionados con la velocidad de inicio de movimiento. El objetivo principal de haber generado los mapas es una sencilla consulta del posible material que puede encontrarse en determinada región del país, con lo que se genera un acercamiento al conocimiento del sedimento característico y de sus

propiedades que puede ser empleado en estudios de factibilidad, estudios preliminares de transporte de sedimento, y especialmente poseer alguna referencia en torno al tema y manejar datos concebidos bajo algún sustento.

De esta manera en las figuras 5.1 a 5.3 se presentan mapas que contienen la escala de variación de los ya mencionados parámetros, así como los gradientes correspondientes. De forma particular, en la figura 5.1 se muestran los valores de d_{50} alcanzados a lo largo de la costa de la Península, en a) zona de berma, b) zona de lavado y c) zona sumergida de donde se desprende el posible comportamiento del sedimento en torno al valor del d_{50} .

Se observa en los mapas de las figuras mencionadas que, claramente en la zona de lavado se tiene el sedimento de mayor tamaño respecto a las dos otras zonas a excepción de la parte sur de la zona de estudio correspondiente a las costas de Quintana Roo y cerca de las inmediaciones de Cancún en el mismo estado, lo cual puede representar fuertes efectos de las corrientes de resaca en la Península, por lo que en caso de análisis de rellenos es de vital importancia observar el mencionado efecto y tomar las medidas pertinentes para ello pues en caso contrario la erosión de las playas puede fácilmente presentarse. Igualmente se tiene que dicha zona de los perfiles de playa significa una región de clasificación del material, ya que de forma general, en la zona sumergida se puede encontrar el material más fino, y en la zona de berma un material intermedio y en ocasiones más grueso que la zona de lavado.

Respecto al posible transporte de sedimentos, se tiene que en la mitad de la longitud de la costa perteneciente al estado de Yucatán, parece haber una fuente importante de sedimento que es transportado en direcciones opuestas, paralelas a la costa, a partir de la fuente de sedimento: de este a oeste desde el punto mencionado hasta la zona media de la costa del estado de Campeche, y de oeste a este desde la fuente de sedimento en dirección a Ría Lagartos hasta antes del límite costero entre Yucatán y Quintana Roo. La posible fuente de sedimento pudiera ser ocasionada por la presencia de gran número de afloramientos de la capa freática o de manantiales en la región; sin embargo poco o nada se sabe sobre su existencia, tanto por los pocos estudios relacionados, como la dificultad actual de acceso para constatar dicho fenómeno.

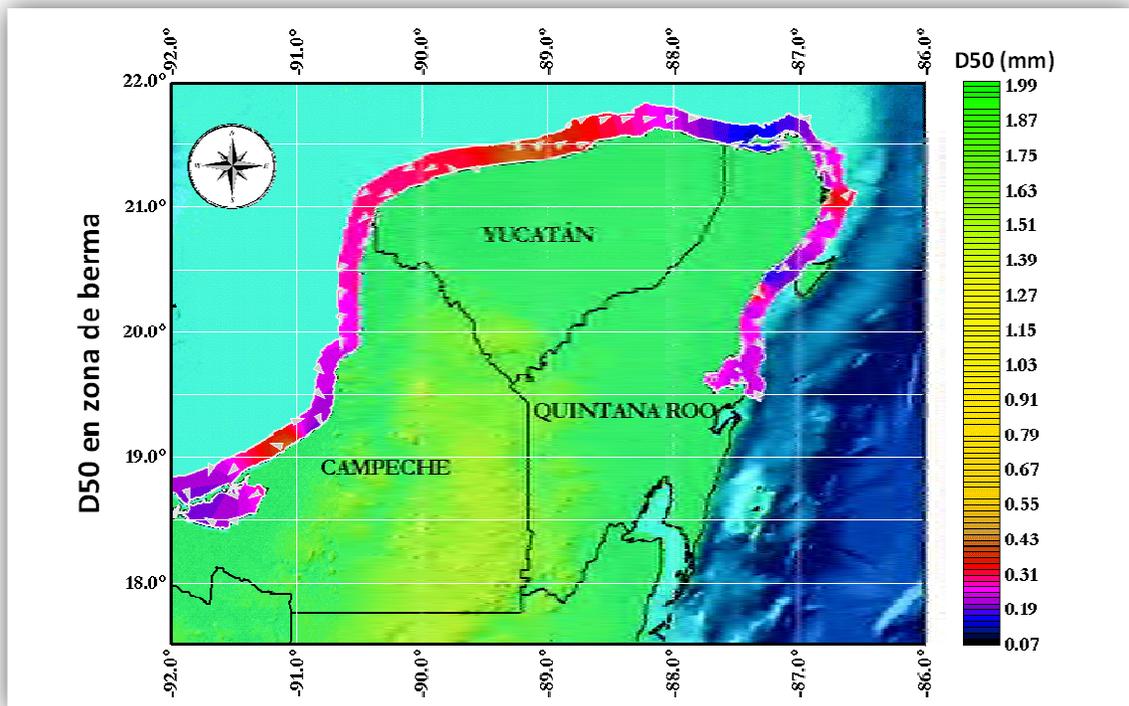
Al parecer, otra fuente de sedimento se encuentra en las cercanías de Puerto Morelos y Punta Brava, en Quintana Roo. En cuanto al material proveniente de la zona de lavado y zona sumergida se refiere (ver figuras 5.1 a 5.3), aparentemente se transporta en dirección sur-norte hacia Cancún donde bordea del lado de mar un transporte de menor magnitud que se produce en sentido contrario y así hasta llegar a la región de Ría Lagartos (cerca de la isla de Holbox) con sedimento proveniente de la otra fuente descrita en el párrafo anterior. Esto último hace pensar la relevancia de Ría Lagartos en el transporte de sedimento, ya que al haber una confluencia en dicha zona de material fino, se presentan condiciones idóneas para que pudiera pensarse en la acreción de las playas de esta zona, pues además presenta un bajo nivel energético de la hidrodinámica costera; sin embargo, es conveniente destacar la labor de retención de sedimento que la flora pudiera desempeñar en dicho sitio.

Asimismo se puede comprobar los efectos que ha generado el muelle de Puerto Progreso en las costas del estado de Yucatán, con 2 km aproximadamente de longitud, ya que el transporte de sedimento en el área sumergida es retenido, lo cual se indica en distintos parámetros como se verá en los siguientes apartados.

Por último, se observa en general, una cierta predominancia de material más grueso en las costas de Yucatán que en las costas de Campeche y que en Quintana Roo; siendo en este último estado en donde se pueden encontrar las arenas más finas, esto como posible consecuencia de la protección que ofrece la barrera arrecifal Mesoamericana ante la incidencia del oleaje. No obstante lo anterior, se destaca en la zona sumergida de Quintana Roo la presencia de sedimento más grueso, específicamente en el estrecho que se forma entre el continente y la isla de Cozumel, lo cual es un indicio de la presencia de una corriente en dicho estrecho con dirección sur- norte que motiva el cambio mencionado en el sedimento.

Por otra parte, se observó que en las cercanías de Bahía Príncipe y de Cancún, se presentó sedimento más grueso en la zona de berma. Si es considerado el hecho de que el sedimento de dicha zona actúa como reserva de material tras el paso de un evento extremo y que el material más grueso es más resistente a condiciones hidrodinámicas de un alto nivel energético, se puede llegar a la conclusión de que en los sitios mencionados, tras el paso de eventos extremos las consecuencias suelen ser de transformación a perfiles reflejantes y erosionados, que posteriormente se estabilizan hasta llegar nuevamente a perfiles de tipo disipativo, por lo que se puede identificar por tanto un gran dinamismo de las playas de estos lugares.

Por otra parte, respecto a la regionalización del valor del factor de forma, se pueden obtener indicios a partir de éste en cuanto al origen del material y madurez del sedimento, motivo por lo cual fueron desarrollados los mapas mostrados en la figura 5.2, los cuales se presentan en el mismo orden y zonas del perfil de la playa tratadas. Conviene resaltar, en cuanto al comportamiento espacial del factor de forma que, en general, en la costa norte del estado de Quintana Roo, hasta unos kilómetros después de Cancún, el sedimento se puede considerar maduro lo cual puede deberse básicamente a dos posibilidades: la primera de ellas corresponde a que el sedimento haya sido transportado largas distancias, o a que es capaz de soportar niveles energéticos elevados, lo cual puede corroborarse con el tamaño del sedimento.



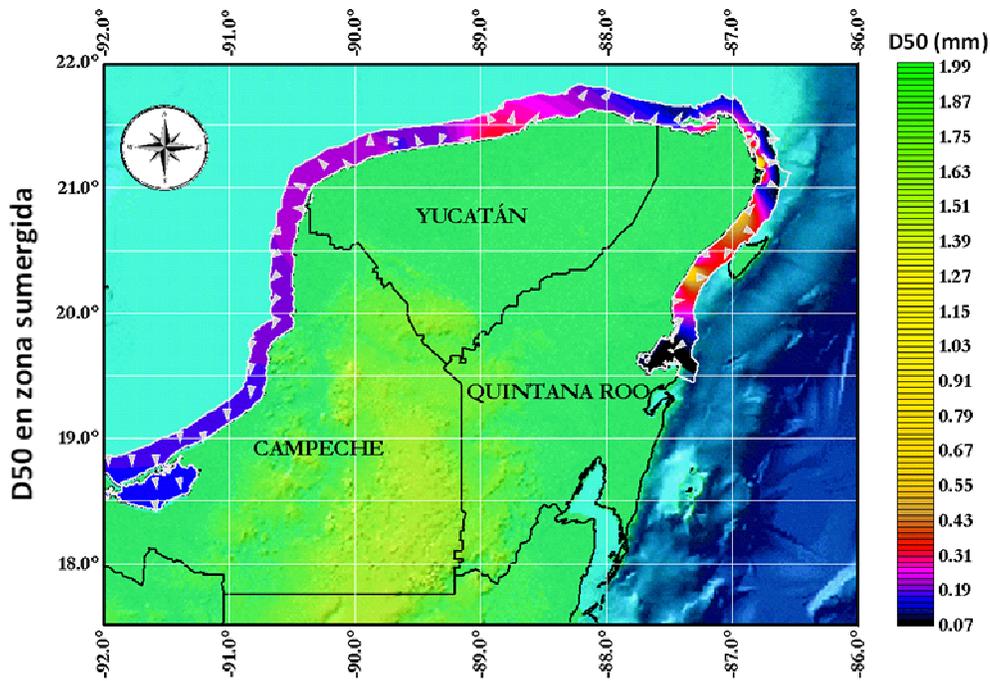
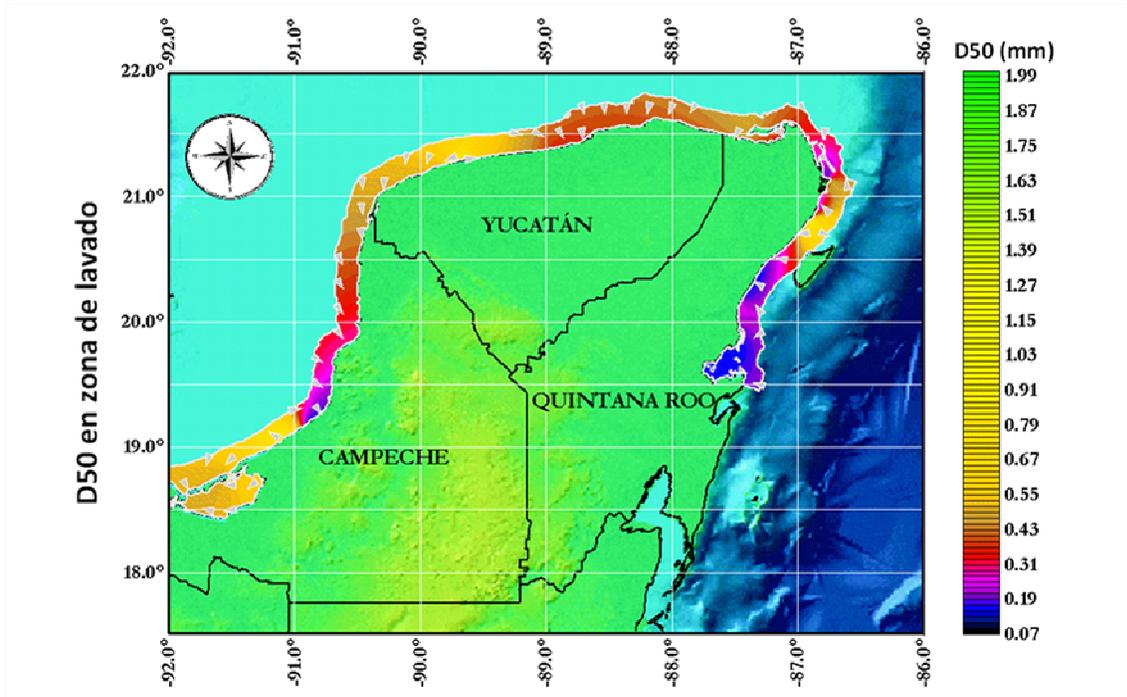
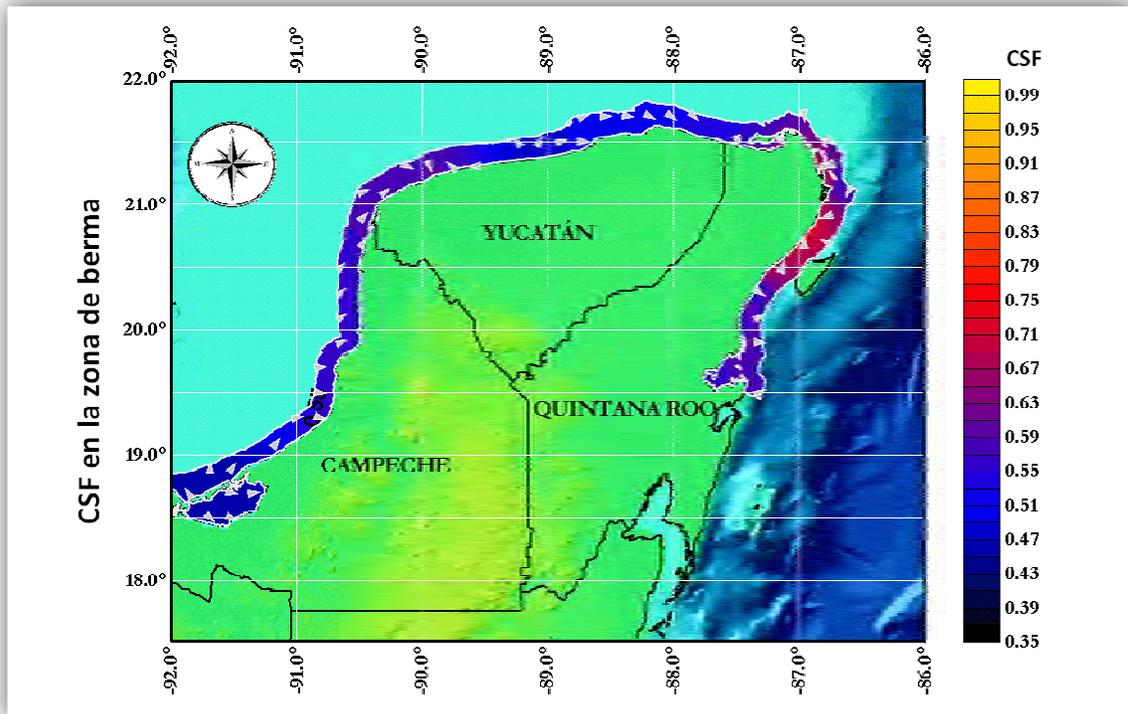


Figura 5.1 Mapas de la distribución del d_{50} de la arena que puede encontrarse a lo largo de las costas de la Península de Yucatán. En la página anterior se presenta el mapa correspondiente a la zona de berma y en la presente: la zona de lavado (arriba), y la zona sumergida (abajo).

Especialmente del estado de Campeche, también se observan valores muy bajos de factor de forma en las costas, lo cual muestra que no existe un nivel energético alto del oleaje incidente en dichas costas. En esta zona destaca la presencia de conchas o fragmentos de ellas que son integrantes del sedimento de esta parte de la región especialmente en las zonas de berma y de lavado; sin embargo en la zona sumergida, es importante observar que los valores de factor de forma aumentan por arriba de 0.6 lo cual se relaciona con muestras con poco o nulo contenido de conchas, aunque se encontraron pequeñas regiones con valores inferiores de CSF, donde es posible que exista un suministro de sedimento y sea el sedimento primario, ya que los granos de origen biogénico en un principio poseen formas con CSF bajos, que con el tiempo aumentan. Las zonas de generación de sedimento coinciden con lo mencionado al respecto en las costas del estado de Yucatán; pero en las costas de Quintana Roo, el sedimento en la zona sumergida parece generarse más al sur que el sedimento de las zonas de berma y de lavado.

Es conveniente resaltar el impacto del muelle del puerto de Progreso, ya que de nuevo se refleja en el comportamiento de otro parámetro de las partículas. Si bien en párrafos anteriores se comentó que el sedimento en la zona sumergida parece ser retenido parcialmente por dicho obstáculo, en el factor de forma es evidenciado el mismo fenómeno ya que a partir de la ubicación de dicho puerto y en dirección oeste, el sedimento tiende a tener factores de forma CSF inferiores a los que tiene hasta antes de arribar con las inmediaciones del puerto. Al tener en cuenta que las conchas pueden ser aun más fácilmente arrastradas que los granos de arena, se tiene entonces que el sedimento conformado por arena es retenido, mientras que el sedimento predominante en conchas es llevado más allá de la ubicación de la estructura hasta la región media de la costa del estado de Campeche, lo cual confirma lo mencionado respecto al tamaño del sedimento, al considerar que una vez pasado el punto de Progreso, empieza la degradación del tamaño del sedimento en uno más pequeño, mientras que su CSF aumenta.



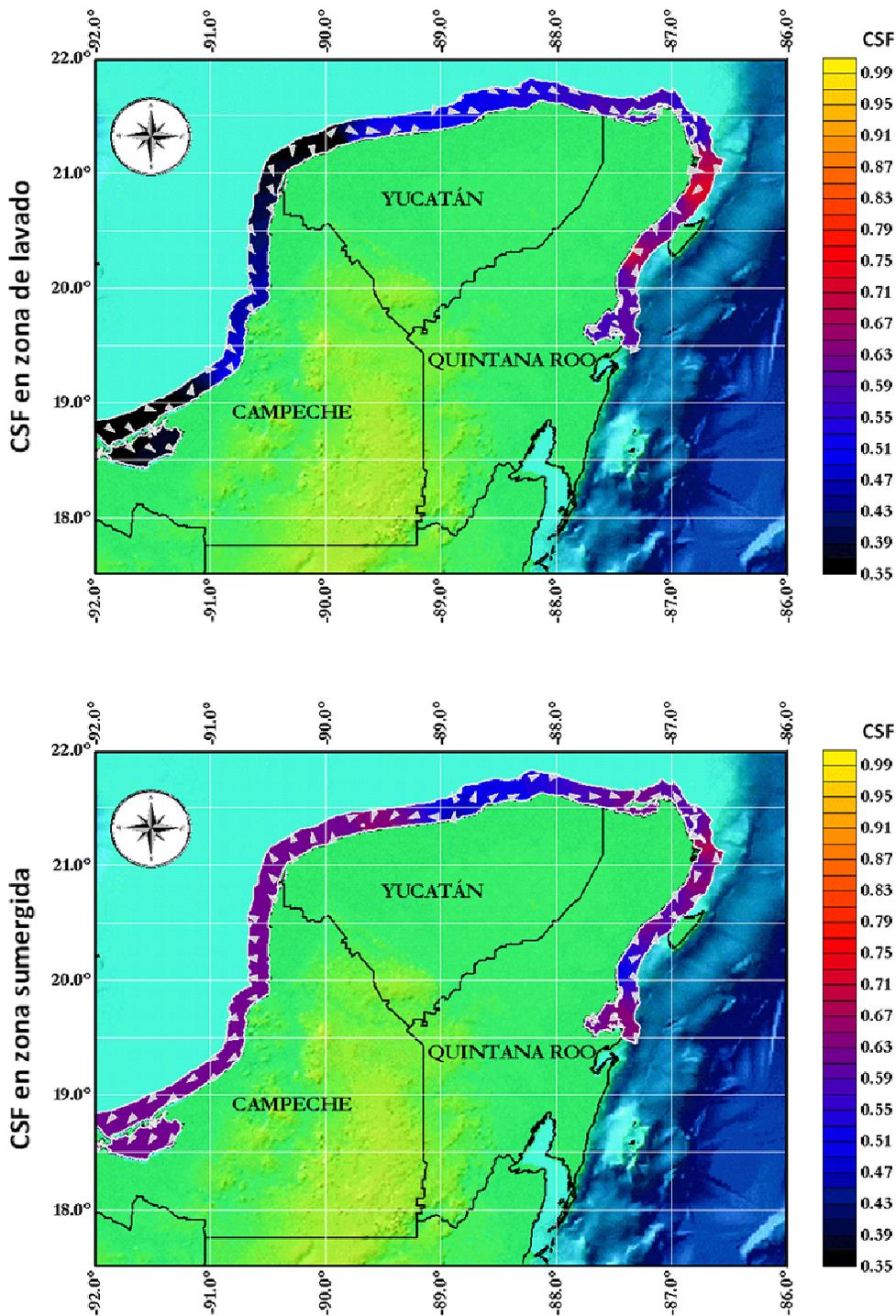


Figura 5.2 Mapas de la distribución del CSF de la arena que puede encontrarse a lo largo de las costas de la Península de Yucatán. En la página anterior se presenta el mapa correspondiente a la zona de berma y en la presente: la zona de lavado (arriba), y la zona sumergida (abajo).

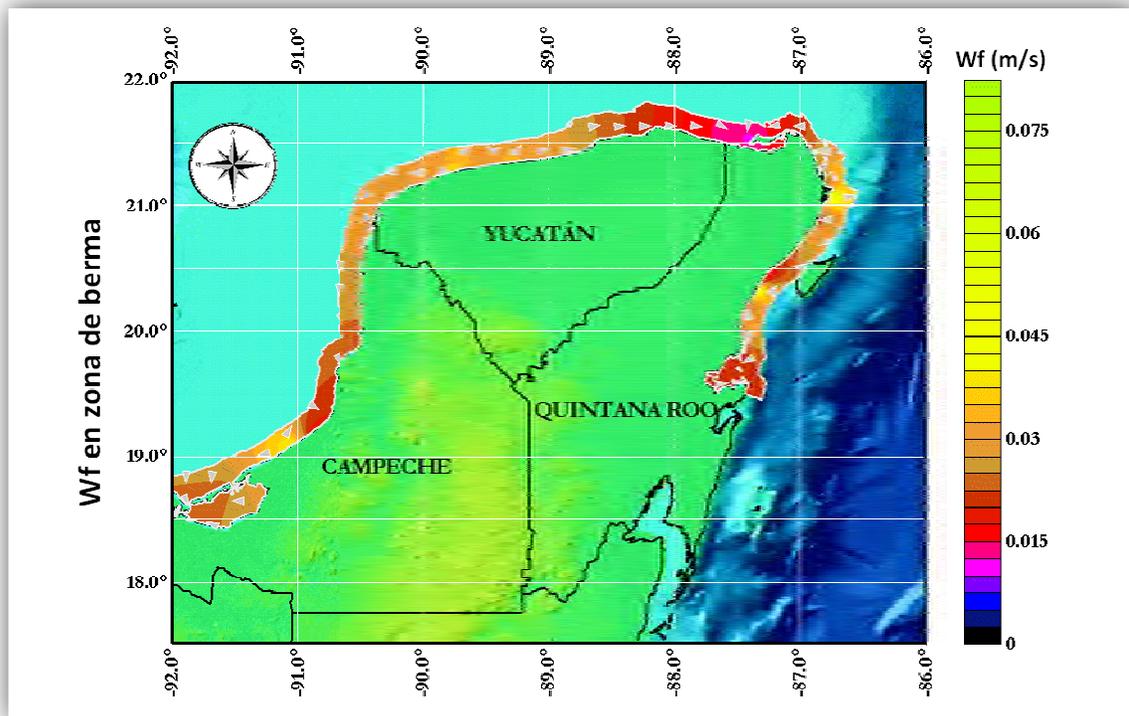
Finalmente, en este aspecto se tiene que en los estados de Campeche y Yucatán, la morfología de las partículas refleja mucho más las condiciones de transporte del sedimento que las condiciones energéticas del oleaje, éstas últimas con un mayor impacto en la morfología del sedimento de Quintana Roo.

Entre los últimos mapas que se presentan de la regionalización de la Península de Yucatán, se tiene el correspondiente a la velocidad de caída, el cual por sí solo no permite discernir lo que ocurre en torno al transporte de sedimentos, sino que debe relacionarse con el valor correspondiente de velocidad de inicio de movimiento y así poder tener una mejor idea del comportamiento del sedimento.

No obstante, como ya se mencionó, el objetivo de los mapas es proporcionar una regionalización de los umbrales de movimiento, y en este caso en las figura 5.3 se muestran los mapas correspondientes al umbral de velocidad de caída, los cuales se organizaron de igual manera que las figuras 5.1 y 5.2.

En los mapas mencionados, se observa cómo el valor de la velocidad de caída varía especialmente en función de la zona del perfil de playa en que se ubica el material al encontrarse que en general los valores de velocidad de caída son menores para sedimento ubicado en la zona de berma, que en los de la zona de lavado, y estos últimos poseen un valor inferior que los de la zona sumergida, especialmente en las costas de Yucatán y Campeche; en contraste, en las costas de Quintana Roo, el comportamiento no es tan fácilmente visible aunque se puede mencionar zonas se puede observar un incremento del valor de velocidad de caída como en las cercanías de Cancún y las zonas adyacentes a la zona de sombra generada por la isla de Cozumel.

Es importante destacar que los mapas de la figura 5.3 son los primeros en su tipo que describen la velocidad de caída de una región amplia de un país, con lo cual los trabajos que puedan ser



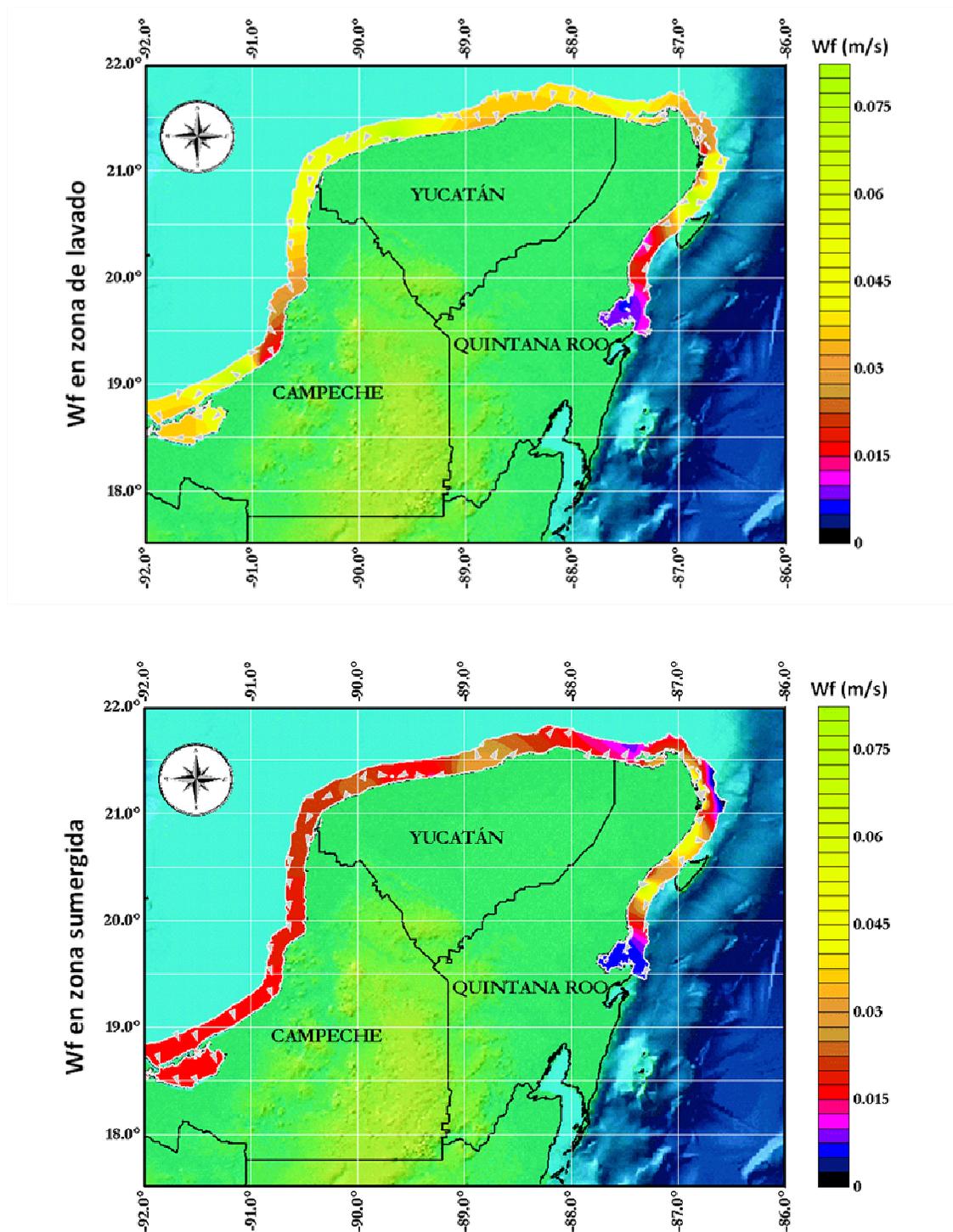


Figura 5.3 Mapas de la distribución de la velocidad de caída (W_f) de la arena que puede encontrarse a lo largo de las costas de la Península de Yucatán. En la página anterior se presenta el mapa correspondiente a la zona de berma y en la presente: la zona de lavado (arriba), y la zona sumergida (abajo).

desarrollados en cuanto al transporte de sedimentos que requieran este parámetro pueden llevarse a

cabo con una base confiable. El comportamiento de la velocidad de caída, se encuentra asociada como se vio en el capítulo previo, con diversos elementos propios de la partícula y del flujo; sin embargo, es necesaria su asociación con la velocidad de inicio de movimiento para definir entre ambos alguna característica verdadera del transporte de sedimentos.

La velocidad de caída se suele relacionar en mayor medida al transporte en suspensión y puede definirse que en la zona sumergida este tipo de transporte predomina en el área de estudio correspondiente a la costa sur del estado de Quintana Roo; sin embargo, en otras regiones de la Península parece sucederse una combinación entre el transporte por fondo y el de suspensión, por lo cual en este sentido sí es más conveniente combinar los resultados de velocidad de caída con los de velocidad de inicio de movimiento.

Por último, para concluir con la zonificación de la Península de Yucatán, se presentan los datos de velocidad de inicio de movimiento. Los sitios a los que fueron realizadas las pruebas fueron seleccionadas bajo un criterio de uniformidad espacial, por lo cual se espera que los valores que se muestran en la Tabla 5.I posean una representatividad para una determinada zona de influencia. Para la generación de un mapa a detalle en torno a este umbral de movimiento, será necesaria la realización de un mayor número de pruebas; sin embargo, quedan asentadas las bases de los valores que podrían esperarse para el sedimento de las costas de la Península. Igualmente para la zonificación se consideró que la velocidad de inicio de movimiento corresponde a la mínima observada, pues condiciones de mayor intensidad producirán mayores velocidades conforme a los resultados mostrados en el capítulo 4.

Tabla 5.I Posibles zonas de influencia de los valores hallados de velocidad mínima de inicio de movimiento, Parámetro de Rouse y Tipo de Transporte.

Sitio	Posible Zona de Influencia	W_i (m/s)	U_{rms} (m/s)	MN'	Rou	Tipo de transporte *
Akumal	Región costera entre Playa del Carmen y Tulúm, Q.Roo.	0.0823	0.14376	3.0792	0.264	Por Suspensión
Sian Kaán	Reserva de Sian Ka'an, Q.Roo.	0.0633	0.13466	1.6299	0.941	Por Suspensión cerca del 100%
Pto. Morelos	Región costera entre Playa del Carmen y Cancún, Q.Roo.	0.0493	0.14185	1.8662	0.718	Por Suspensión
Isla mujeres	Isla Mujeres, Q.Roo.	0.0676	0.14295	1.6891	0.876	Por Suspensión cerca del 100%
Pto. 10	Isla Barrera Cancún, Q.Roo.	0.0621	0.14540	1.2082	1.713	Por Suspensión cerca del 50%
Pto, E	Norte de Cancún, Q. Roo.	0.0941	0.14387	1.6124	0.962	Por Suspensión cerca del 100%
Holbox	Proximidades del límite estatal costero de Yucatán y Q. Roo.	0.0701	0.14049	1.2832	1.518	Por Suspensión cerca del 50%
Chelem	Región oeste próxima al Puerto Progreso, Yucatán.	0.1030	0.16594	1.9438	0.662	Por Suspensión
Bahía Tortugas	Región al suroeste de la cd. de Campeche, Campeche.	0.0516	---	0.6764	5.464	Por Fondo (Saltación)

* Para obtener el tipo de transporte se emplea el número de Rouse, y el Criterio de Whipple (Selley, 2000)

En la tabla 5.I se especifica la zonificación correspondiente a la velocidad mínima requerida para el inicio de movimiento. Los datos de velocidad media cuadrática fueron incluidos también pues bajo tales condiciones es que se obtiene el inicio del movimiento de las partículas y es un dato que

fácilmente puede asociarse energéticamente tanto con el período del oleaje, como con características del sedimento y con el inicio de movimiento.

Es necesario tener particular atención con los resultados del estado de Campeche, asociados con el sitio Bahía de Tortugas, ya que la integración de esta muestra por fragmentos de concha, puede no corresponder a una zona representativa de las costas de dicha región; sin embargo, esto únicamente puede ser comprobado con la extracción de muestras y la realización de las pruebas citadas en esta tesis.

Por último, cabe señalar que el tipo de transporte que ocurre en la Península de Yucatán, es predominantemente por suspensión; sin embargo, existen sitios como la isla barrera de Cancún y Holbox en Quintana Roo, donde el transporte se divide en transporte por fondo y por suspensión, resultados que son de gran utilidad para el caso de modelación del transporte total de sedimentos que ocurre en dichas zonas, pues no suelen calcularse de la misma manera estos tipos de transporte.

Asimismo, se obtiene como resultado de la zonificación que el transporte de grandes masas de sedimento puede ocurrir en esta parte del país especialmente por suspensión, por lo cual la retención del mismo, por medio de estructuras debe contemplar sobretodo la disminución de la energía del oleaje y de las corrientes, así como el impacto de eventos extremos, que con suma facilidad pueden erosionar las costas de la Península.

5.2 ZONIFICACIÓN DE LA ZONA DE CANCÚN, QUINTANA ROO

La zonificación que aquí se presenta es la asociada al caso particular de Cancún, Quintana Roo, un lugar de gran interés por el desarrollo a gran escala que ha tenido tanto como sitio turístico, ambiental y su impacto en la economía nacional.

La posibilidad de crear los mapas de zonificación del lugar, se encontró en función de la cantidad de muestras extraídas del sitio que fueron cerca de 33. Asimismo, el poder caracterizar una zona en particular es un ejemplo de las variaciones que pueden encontrarse en unos cuantos kilómetros de costa, y que por ello resulta importante verificar además de los mapas de regiones extensas como los mostrados en el capítulo anterior, valores más específicos para el desarrollo a más detalle de estudios relacionados con el transporte de sedimentos en un sitio particular.

De esta manera, en la figura 5.4 se muestran los mapas que contienen la variación del sedimento en las distintas zonas del perfil. En estos mapas se puede observar, por ejemplo con la variación del tamaño del sedimento, que la isla barrera de Cancún es la que recibe mayor energía del oleaje ya que es donde se presenta el material con un d_{50} más grande respecto de otras zonas. Tanto Isla Mujeres como la costa norte a partir de Punta Cancún (punta norte de la isla barrera de Cancún) posee en general un sedimento con diámetro cercano a 0.35 mm sin mucha variación a lo largo de la costa mencionada lo cual es un reflejo de poco dinamismo y madurez de este sedimento, así como de la baja incidencia de oleaje poco energético en la zona.

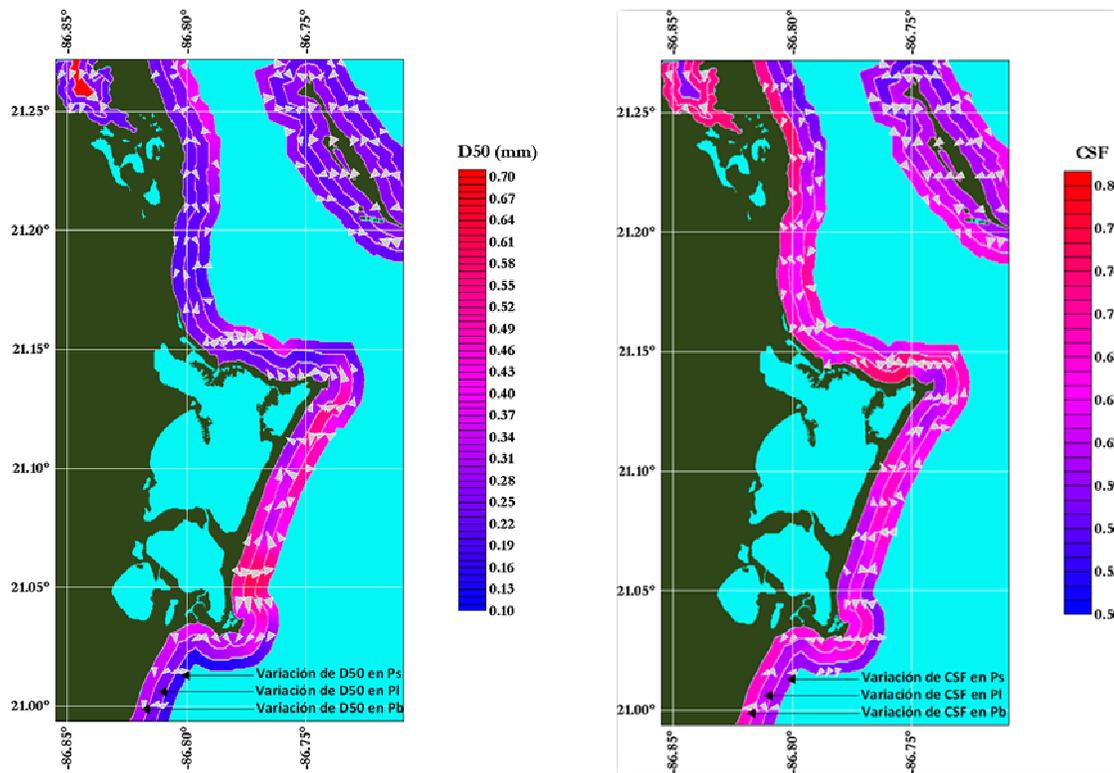


Figura 5.4 Mapas de los resultados obtenidos de d_{50} (izquierda) y CSF (derecha) de la zona de Cancún, en la costa norte del estado de Quintana Roo, para las distintas zonas del perfil: berma (Pb), lavado (PI) y sumergida (Ps).

Algo distintivo de los mapas presentados en 5.4, es que el asociado al CSF resulta el negativo cuando es asociado con el mapa correspondiente al tamaño del sedimento, lo cual proporciona una forma de verificar lo que gráficamente se expresa en la figura 3.10 de esta tesis, donde se señala que un incremento en el tamaño de la partícula puede estar asociado con un decaimiento del factor de forma. Esto último es debido fundamentalmente a la falta de madurez del sedimento, el cual con el paso del tiempo es degradado resulta en partículas de mayor redondez con la consecuente disminución del diámetro de la misma. Por lo tanto es importante hacer notar esta relación entre la morfología de la partícula y su tamaño, ya que un tamaño más grande de sedimento pero con forma esférica, no necesariamente es más estable que uno con un tamaño ligeramente menor pero de forma de hojuela.

Por otro lado, también pueden ubicarse aquellas zonas que pueden estar sujetas a un oleaje mucho más intenso y por ello susceptibles a ser mayormente erosionadas, tal es el caso de una franja costera ubicada al sur de la Isla barrera de Cancún (aproximadamente a los 21.05°N), donde el sedimento es grueso en comparación de aquel que puede encontrarse en otros lugares del sitio y aparentemente este material se dirige en sentido sur-norte con dirección a Punta Cancún (al norte de la isla barrera) y dirección norte sur con dirección a Punta Nizuc (al sur de la isla barrera).

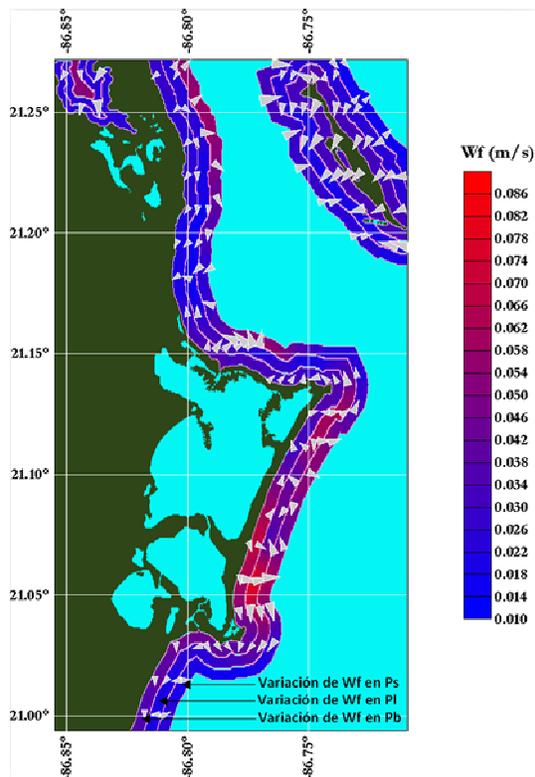


Figura 5.5 Mapa con la variación de la velocidad de caída en la zona de Cancún y por zona del perfil: berma (Pb), lavado (PI) y sumergida (Ps).

obstáculo que produzca tal divergencia. Al buscar una imagen satelital de Cancún, se encontró no únicamente que en dicho punto aun se preserva la duna original del perfil de playa hasta llegar ésta a la cobertura vegetal, sino que también en la parte posterior a la ubicación de las playas, se puede encontrar un macizo rocoso cubierto por arena y vegetación que se prolonga notablemente sobre la Laguna de Nichupté (región posterior de la isla barrera) y que podría hacerlo de igual forma mar adentro en la zona sumergida generando la divergencia del material y la generación de nuevo sedimento como resultado de su degradación.

Asimismo también se encuentran en dicho punto las ruinas mayas arqueológicas de “El Rey” y “San Miguelito”, lo cual es un indicio de la estabilidad y equilibrio en que se encuentra este punto ya que las ruinas se estima fueron construidas desde el 300 a.C. alcanzando su esplendor en los años 1300 a 1500 d.C. y que han soportado hasta nuestros días eventos extremos como los huracanes de gran intensidad que son frecuentes en la zona, tales como Gilberto (1988) y Wilma (2005), así como muchos otros más de los que no se tienen registros.

Por último, en la figura 5.5 se presenta la variación del valor de velocidad de caída, que sigue un patrón similar al observado en los mapas de la figura 5.4, y donde se identificó una posible dominancia del transporte por fondo en el punto de divergencia para posteriormente convertirse en un transporte en suspensión.

Es evidente que Isla Mujeres tiene un efecto muy importante en cuanto a la protección del sedimento, ya que proporciona una zona de abrigo ante ciertas condiciones de oleaje, particularmente en la zona norte de las playas de Cancún.

Con respecto a estos mapas, también pueden observarse variaciones del sedimento por zona del perfil de playa en que se encuentra, y donde se perciben en planta movimientos combinados tanto de transporte longitudinal como transversal a la playa especialmente sobre la isla barrera; esto se puede percibir al observar detenidamente la variación entre las distintas zonas del perfil, ya que se distinguen franjas oblicuas a la costa de sedimento en las tres zonas del perfil con las mismas características.

Por lo tanto a partir de los mapas de la figura 5.4, sobre la isla barrera puede distinguirse un transporte de sedimento predominante en dirección de la zona centro-sur de la isla barrera (21.075°N , 86.75°W) hacia Punta Cancún y hacia Punta Nizuc, con la posibilidad de que en el punto de divergencia del material puede que exista o una fuente de sedimento o algún

Es importante mencionar que la zona comprendida entre Isla Mujeres y la parte continental de la región norte de Cancún funge como una especie de reservorio de material, pues la energía del oleaje disminuye su impacto en las costas de esta zona. Por otra parte, en las costas al sur de Punta Nizuc se encuentra el inicio del Sistema Arrecifal Mesomaeriano, por lo cual el sedimento se dirige en dirección sur por suspensión en su mayoría, y en menor porcentaje por arrastre como consecuencia de los huecos que existen en la barrera arrecifal. Todo lo anterior puede percibirse a grandes rasgos con la figura 5.5, ya que el valor de velocidad de caída, como ya se dijo suele estar más relacionado con el transporte en suspensión.

Para explicar más en torno al tipo de transporte que se presenta en esta región particular del país, se puede recurrir a los resultados obtenidos de velocidad de inicio de transporte, y considerar el número de Rouse correspondiente. De manera particular, en los sitios de Isla Mujeres, Pto. E y Pto. 10 en Cancún, arrojaron la información mencionada y que puede ser vista en la tabla 5.I.

A partir de la tabla mencionada, se obtuvo que en la isla barrera de Cancún el tipo de transporte predominante que se asume podría presentarse en la región es tanto transporte por fondo como por suspensión, lo cual conlleva a que el sedimento en esta zona tienda a tener una mejor graduación de tamaños que sus similares en otras zonas de la Península de Yucatán, pero aun más, el sedimento refleja las condiciones energéticas a las que es sometido, entre las que se puede encontrar tanto oleaje, como la presencia de determinadas corrientes. En contraparte, la presencia de isla Mujeres induce que el nivel energético del oleaje disminuya y por ello de cómo resultado que el transporte predominante hacia el norte de la isla barrera sea por suspensión, lo que origina que el sedimento transportado por fondo quede atrapado en las puntas de la isla Barrera de Cancún, esencialmente en Punta Cancún y en las zonas en que es mayormente requerido, como lo es la zona de lavado en esta región.

De esta manera, la identificación de los mecanismos en los cuales ocurre del transporte de sedimentos, tiene un impacto que resulta importante tanto para realizar modelaciones más confiables del proceso como por las repercusiones económicas que en el caso particular Cancún tiene para el desarrollo de la República Mexicana.

También es notorio que el transporte de sedimentos posee un impacto en la modificación a una escala temporal mucho más amplia, pues puede observarse cómo la geomorfología se ve afectada; por ejemplo, en la región comprendida entre Puerto Morelos y Cancún, se puede observar el inicio de la formación de tómbolos que intentan unir la tierra con las formaciones arrecifales, para lo cual requieren del sedimento acarreado desde la isla barrera de Cancún, la cual a su vez se recarga del transporte que fue mencionado en el apartado de zonificación de la Península de Yucatán de este capítulo, interactuando dinámicamente un transporte de sedimentos local con un de mayor envergadura que incluye grandes extensiones de mar y tierra.

Así, con los mapas desarrollados es posible conocer la variación del sedimento, las posibles direcciones del transporte del material, y las posibles fuentes de sedimento o puntos que, por la variación de los parámetros, representen fenómenos particulares relacionados tanto al sedimento como a la hidrodinámica y consecuentemente a la morfodinámica de las playas. Lo anterior es el resultado de observaciones realizadas en torno a la zonificación llevada a cabo con los datos obtenidos de las pruebas realizadas a las muestras de sedimento recolectadas, y que desembocan finalmente en un mejor entendimiento de los procesos que acontecen en la región, con lo que se da pie a una mejor capacidad

de explotación de los recursos, desarrollo de actividades de protección al ambiente, de turismo, de comercio y de obras de infraestructura que el país requiere.

CONCLUSIONES



CONCLUSIONES

El seguimiento que se le ha dado en este trabajo a las características particulares del sedimento de la Península de Yucatán resultó relevante para el entendimiento de uno de los procesos que atañen a la ingeniería costera, y que es justamente el transporte de dicho material; sin embargo, la base fundamental para entender el proceso es interpretar los resultados y los datos que pueden ser extraídos del análisis y observación del sedimento mismo.

La variabilidad del sedimento de origen biogénico en cuanto a rangos de tamaño pero especialmente a forma, densidad y composición introdujeron componentes que no habían sido tomadas en cuenta extensamente en la literatura, ya que generalmente era utilizado material de origen terrígeno. Dentro de dichas componentes se presentaron disminución de las velocidades de caída, aumento de la irregularidad de la morfología de las partículas, disminución del tiempo de madurez de dichas partículas, aumento de los valores de velocidad de inicio de movimiento, entre otros, lo cual influye directamente en los procesos relacionados con el sedimento.

La obtención de una expresión matemática para la velocidad de caída del sedimento costero es una de las principales aportaciones de esta tesis, ya que todas aquellas que pueden encontrarse en la literatura han sido desarrolladas para material terrígeno. Así mismo, el haber formulado la expresión matemática y haber estimado los respectivos intervalos de confianza proporciona información sobre cuál puede ser la variabilidad esperada para este umbral del movimiento.

Por otro lado, se dio pie a la relación que puede encontrarse entre las condiciones de oleaje y el inicio de movimiento de las partículas, y aun más con el tamaño de sedimento asociado. Este último resultado es conocido a través de las observaciones realizadas tanto desde el punto de vista sedimentológico como hidrodinámico y se ve plasmado en los parámetros obtenidos en esta tesis, lo cual confirma la interacción entre ambos aspectos que en general suelen tratarse como temas separados. Asimismo, se encontraron indicios de que la velocidad de inicio de movimiento es mayor en partículas de origen biogénico que en aquellas de origen terrígeno, lo cual deberá confirmarse con la realización de un mayor número de pruebas y asociar dicha tendencia con parámetros característicos de las partículas tales como los correspondientes a la morfología de las partículas.

Importante es hacer notar que la dificultad básica en el desarrollo de las pruebas de inicio de movimiento es la determinación justamente del instante en que se presenta; sin embargo, la

facilidad de poder congelar este momento por medio de la tecnología disponible, como se hizo en este caso, resuelve en gran medida dicha problemática.

Dentro de las características que son apreciadas al término del presente trabajo es la sensibilidad adquirida en el tratamiento del tema, ya que con la observación del sedimento costero es posible inferir determinados parámetros del mismo que van desde el tamaño, morfología, posible origen, etc. hasta la obtención de un acercamiento a las posibles condiciones a las que puede estar sometido el material en estado natural, y con las que se alcanza el equilibrio dinámico que permite que la arena de un sitio exista en él, compensándose las deficiencias en determinadas características mecánicas por otras.

Las metodologías propuestas para cada umbral de movimiento se observó ofrecieron resultados satisfactorios y que no implicaron serias dificultades para llevarse a cabo. Entre las ventajas ofrecidas por dichas metodologías son la reducción de la incertidumbre asociada a errores humanos y la facilidad de ser implementadas por cualquier operador, sin que ello modifique las mediciones correspondientes.

Asimismo, otra de las conclusiones que se obtuvieron de este trabajo fue la obtención de mapas de zonificación que permitieron aterrizar los resultados y datos obtenidos a lo largo de la tesis. Estos mapas se ofrecen como una herramienta que puede ser fácilmente empleada por otras personas para llevar a cabo estudios costeros que precisen de dichos datos, con lo que se puede lograr una disminución de la incertidumbre que pudiera existir en torno a ellos.

Por medio de estos estudios puede verificarse el impacto que tiene por ejemplo el desarrollo de determinado tipo de infraestructura, como por ejemplo, la afectación del puerto de Progreso en la continuidad del tipo de sedimento a lo largo de la Península de Yucatán, alteración que previamente no había sido determinada con datos cuantitativos como los presentados en este trabajo. En la misma tónica, también es posible identificar la importancia de determinadas regiones como fuentes de sedimento como se encontró en la región intermedia de la costa del estado de Yucatán, o como sumideros del mismo, como por ejemplo la reserva de Ría Lagartos.

También, posibles patrones del tipo de transporte del sedimento, de la circulación que éste lleva, o la presencia de determinado tipo de corrientes como las de resaca pueden ser ubicados con la información y datos en forma conjunta de las características del sedimento y de sus umbrales de movimiento.

Las conclusiones de este trabajo también encierran de forma importante la utilidad de los parámetros presentados, tanto de los umbrales de movimiento de las partículas como de las características mecánicas del sedimento, ya que ambos en conjunto permiten obtener información que puede ser empleada para entender cómo es que se produce la dinámica del transporte de sedimentos en una región determinada y aun más, para llevar a cabo modelaciones en torno a dicho tema que permitan desarrollar predicciones, que además de reflejar en la medida de lo posible las condiciones de evolución de un sistema costero, permitan una disminución de los costos de las

soluciones a determinados problemas que se efectúan en campo para prevenir la erosión de las playas.



RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Dentro de las recomendaciones que se tienen para la realización de estos estudios pueden mencionarse los relativos a las metodologías, sobretodo para el desarrollo de las pruebas de inicio de movimiento, las cuales deben contemplar un cuidado especial para el manejo del PIV. Se sugiere en este aspecto, el empleo de cámaras de alta velocidad, pues el fenómeno ocurre en instantes muy breves inferiores a la milésima de segundo, que aunque son captados por dicho instrumento de medición, no ofrece la resolución deseada.

Por otro lado, la cobertura de los sitios en la Península de Yucatán en que no fue posible la extracción de muestras es un trabajo que debe desarrollarse para complementar la información aquí mostrada. De manera conjunta a lo anterior se presenta una línea de investigación que se extiende no únicamente a los sitios mencionados sino también a lo largo y ancho de las costas de la República Mexicana, con el fin de proporcionar datos de los sedimentos que existen en ellas y poder así realizar predicciones en torno al transporte de sedimentos, tipo de material y cambios que se puedan producir en este a lo largo del tiempo. La deficiencia en torno a esta información origina problemas como los acontecidos en Cancún, donde una de las preguntas base para la realización de los rellenos se encontraba relacionada con el tipo de sedimento a colocar.

Paralelamente al trabajo de caracterización de las costas mexicanas pueden desarrollarse los estudios correspondientes a arenas de origen terrígeno y observar las diferencias que existen entre éstas y las de origen calcáreo, así como arenas que combinen ambos elementos. De igual forma puede desarrollarse una metodología que se centre en el comportamiento del transporte de sedimento y de los umbrales de movimiento cuando éste está conformado predominantemente por material arcilloso o limoso, o por grandes cantidades de fragmentos de concha.

Asimismo, es conveniente mencionar una posible línea de investigación relacionada con la determinación del umbral de inicio movimiento bajo condiciones de oleaje, en la cual, en lugar de considerar a la velocidad como la variable de interés, se seleccione las aceleraciones que sufre un conjunto de partículas que inician su movimiento, lo cual sería más fácil de relacionar con las fuerzas que producen el movimiento y con ello el esfuerzo cortante existente en el fenómeno, lo que permitiría que la física del umbral sea más sencilla de entender y sobretodo para poder establecer la relación físico-matemática del fenómeno. Esto último promueve una reforma en lo relativo a dicho umbral pues pocos cambios ha sufrido la teoría al respecto desde hace ya cerca de un siglo.

Otra línea de investigación importante se haya relacionado con el desarrollo de estudios en campo para la determinación del tipo de transporte así como de las tasas del mismo que se presenta en las costas. Dichos resultados pudieran compararse con las modelaciones numéricas disponibles para

ello, las cuales vean involucrados los parámetros que en esta tesis fueron obtenidos, lo cual podría proporcionar un sistema de predicción confiable en torno al proceso de transporte.

Finalmente, diferentes campos disciplinarios pueden relacionarse para efectuar un trabajo más completo en la caracterización tanto del sedimento como de sus propiedades a lo largo de las costas mexicanas, al proveer de explicaciones a consecuencias debidas tanto a la presencia del mismo, como a su erosión, depositación, transporte y su interacción con sistemas antropogénicos como puertos o infraestructura turística o con sistemas naturales, como reservas de manglares o barreras arrecifales.

.....



REFERENCIAS

- ASTM Standard C136-06 "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.", *ASTM International*, West Conshohocken, DOI: 10.1520/D0854-10.
- ASTM Standard D854- 10 "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer." *ASTM International*, West Conshohocken, DOI: 10.1520/C0136-06.
- Ackers, P. & White, W.R. (1973). "Sediment Transport: New Approach and Analysis." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 99(11), 2041-2060.
- Ahrens, J.P. (2003). "Simple Equations to Calculate Fall Velocity and Sediment Scale Parameter." *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 129(2), 146-150.
- Alcérreca Huerta, J.C. (2009). *Determinación de la Velocidad de Caída de Sedimento Costero en la Península de Yucatán, México*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería- UNAM, México.
- Aschenbrenner, B.C. (1956). "A new method of expressing particle sphericity." *Journal of Sedimentary Petrology*, 26, 15-31.
- Baba & Komar (1981). "Settling Velocities of Irregular Grains at Low Reynolds Numbers." *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(1), 121-128.
- Bagnold, R.A. (1946). "Motion of Waves in Shallow Water. Interaction Between Waves and Sand Bottoms." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, U.K., 187(1008), 1-18.
- Bailard, J. (1981). "An Energetics Total Load Sediment Transport Model for a Plane Sloping Beach." *Journal of Geophysical Research*, 86, 10938-10954.
- Basanta, K.S. y Patro, B.C. (1970). "Treatment of Sphericity and Roundness Data of Quartz Grains of Clastic Sediments". *Sedimentology*, 14, 51-66.
- Beheshti, A.A. y Ataie-Ashtiani, B. (2008). "Analysis of threshold and incipient conditions for sediment movement." *Coastal Engineering*, 55(5), 423-430.
- Blott, S.J. y Pye, K. (2008). "Particle Shape: a review and new methods of characterization and classification." *Sedimentology*, 55, 31-63.
- Briggs, L, *et al.* (1962). "The Hydraulic Shape of Sand Particles". *Journal of Sedimentary Petrology*, 32(4), 645-656.
- Buffington, J. M. (1999). "The Legend of A.F. Shields". *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 376-387.

- Buscome, D. y G. Masselink. "Grain-size Information from the Statistical Properties of Digital Images of Sediment." *Sedimentology*, 56, 421-438.
- Camenen, B. (2007). "Simple and General Formula for Settling Velocity of Particles." *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), 229-233.
- CEM (2001). *Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Department of Army, Washington, DC.
- Chan, K.W. et al. (1972). "Behaviour of beds of dense particles in a horizontally oscillating liquid." *Proceedures of Royal Society of London. Series A- Mathematical and Physical Sciences*, U.K., 330, 537-559.
- Chang, H.K. & Liou, J.C. (2001). "Discussion of a free-velocity equation, by John P. Ahrens." *Journal of Waterway, Port and Ocean Engineering*, 127(4), 250-251.
- Cheng, N.S. (1997). "Simplified Settling Velocity Formula for Sediment Particles." *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), 149-152.
- Cheng, N.S. (2008). "Comparison of Settling Velocity Based Formulas for Threshold of Sediment Motion." *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(8), 1136-1141.
- Cliff, R., Grace, J.R. & Weber, M.E. (1978). *Bubbles, Drops and Particles*. Academic Press, New York, 380 pp.
- CNA (2010). *Ciclones Tropicales que impactaron a México de 1970 a 2008*. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2010. <http://smn.cna.gob.mx> (Acceso 14 de Enero de 2011).
- Collins, M.B. y K. Rigler (1982). "The use of settling velocity in defining the initiation of motion of heavy grains, under unidirectional flow." *Sedimentology*, 29, 419-426.
- Cox, E.A. (1927). "A method for assigning numerical and percentages values to the degree of roundness of sand grains." *Journal of Paleontology*, 1, 179-183.
- Crosby, B., & Whipple, K. (2004). *12.163/12.463. Surface Processes and Landscape Evolution, Fall 2004*. (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare), <http://ocw.mit.edu> (Accessed 03 Jan, 2011). License: Creative Commons BY-NC-SA.
- Dancey C.L., et al. (2002). "Probability of Individual Grain Movement and Threshold Condition." *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(12), 1069-1075.
- Del Valle Morales, J. (2010). *Velocidad de caída de arenas costeras de la Península de Yucatán, México*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería- UNAM, México.
- Dietrich, W.E. (1982). "Settling Velocity of Natural Particles." *Water Resources Research*, 18(6), 1615-1626.
- Drake, T.G. & Calantoni, J. (2001). "Discrete Particle Model for Sheet Flow Sediment Transport in the Nearshore." *Journal of Geophysical Research*, 106(C9), 19859- 19868.
- Engelund, F. A. & Hansen, E. (1967). "A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams." *Tech. Forlag Copenhagen*, 62 pp.
- INEGI (2005). *Estadísticas del Medio Ambiente*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Fleming, N.C. (1965). "Form and Function of Sedimentary particles." *Journal of Sedimentary Petrology*, 35(2), 381-390.

- Folk, R.L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Estados Unidos, 182 pp.
- Gel 324. http://www.kutztown.edu/acad/geology/geo_courses.html. (Acceso 20 de Septiembre de 2010).
- Gibbs, R. *et al.* (1971). "The Relationship between Sphere Size and Settling Velocity." *Journal of Sedimentary Petrology*, 41(1), 381-390.
- Göğüş, M. *et al.* (2001). "Effect of Particle Shape on Fall Velocity of Angular Particles." *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(10), 7-18.
- Golbery, R. & Richardson, D. (1989). "The Influence of Bulk Shape Factors on Settling Velocities of Natural Sand-Sized Sedimentary Suites". *Sedimentology*, 36, 125-126.
- Hallermeier, R. J. (1981). "Terminal Settling Velocity of Commonly Occurring Sand Grains." *Sedimentology*, 28(6), 859-865.
- Janoo, V.C. (1998). "Quantification of Shape, Angularity, and Surface Texture of Base Course Materials". *Cold Regions Research & Engineering Laboratory*, USACE, Special Report 98-1, January.
- Jin, G., *et al.* (2009). "Pore-Level Study of Grain-Shape Effects on Petrophysical Properties of Porous Media". *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*, June 21-24, 2009.
- Jiménez, J.A & Madsen, O.S. (2003). "A Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments". *Journal of Waterway, Port and Ocean Engineering*, 129(2), 70-78.
- Klein, C. & Hurlbut, C.S., (2003). *Manual de Mineralogía, 4a. Ed.* Reverté, España.
- Komar, P.D. (1981). "The Applicability of the Gibbs Equation for Grain Settling Velocities to Conditions other than Quartz Grains in Water." *Journal of Sedimentary Petrology*, 51, 1125-1132.
- Komar, P.D. & Reimers, C.E. (1978). "Grain Shape Effects on Settling Rates." *Journal of Geology*, 86, 193-209.
- Krumbein, W.C (1941). "Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles." *Journal of Sedimentary Petrology*, 11(2), 64-72.
- Larsen, L.H., *et al.* (1981). "Field Investigations of the Threshold of Grain Motion by Ocean Waves and Currents." *Marine Geology*, 42, 105-132.
- Le Roux, J.P. (2001). "A Simple Method to Predict the Threshold of Particle Transport Under Oscillatory Waves." *Journal of Sedimentary Geology*, 143, 59-70.
- Lovell, C.J. y C.W. Rose (1991). "The Effects of Sediment Concentration and Tube-Diameter on Particle Settling Velocity Measured beyond Stokes' range: Experiment and Theory." *Journal of Sedimentary Petrology*, 61 (4), 583-589.
- Modarresi, H.G. (1968). "Settling Velocity Tube Apparatus for Successive Determination of Fall Velocities of Sand Size Particles." *Journal of Sedimentary Research*, 38, 1354-1358.
- Morales, Juan José (2010). *Los huracanes en la Península de Yucatán*. Recurso electrónico, disponible en: www.naturalezamaya.org/libros/los-huracanes-peninsula-yucatan.pdf (Acceso 15 de Noviembre de 2010).
- Parker, G. *et al.* (2003). "Bed Load at Low Shields Stress on Arbitrary Sloping Beds: Alternative Entrainment Formulation." *Water Resources Research*, 39(7), 1-11.

- Pedrozo Acuña, A. (2010). *Procesos costeros y morfodinámica de playas*. Instituto de Ingeniería- UNAM, México.
- Powers, M.C. (1952). "A new Roudness Scale for Sedimentary Particles." *Journal of Sedimentary Petrology*, 23(2), 117-119.
- Raudkivi, A. (1990). *Loose boundary hydraulics*. Pergamon Press Inc., New York.
- Rubey, W.W. (1933). *Settling Velocities of Gravel, Sand, and Silt Particles*. U.S. Geological Survey, Washington, D.C.
- Ruiz Martínez, G. (2007). *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*. Instituto de Ingeniería- UNAM, Reporte Noviembre 2007.
- Ruiz Martínez, G. (2009). *Determinación del estado morfodinámico de segmentos de playa que poseen obstáculos sumergidos y emergidos*. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería- UNAM, México, Noviembre de 2009.
- Ruiz Cavazos, D. (2010). *Zonificación de la Península de Yucatán a partir de un análisis sedimentológico*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería- UNAM, México.
- Selley, R.C. *Applied sedimentology*. Academic Press, Estados Unidos de América.
- Seminara, G. et al. (2002). "Bed Load Shields Stress on Arbitrarily Sloping Beds: Failure of Bagnold Hypothesis." *Water Resources Research*, 38(11), 1-16.
- SGM (2006). *Cartas Geológico- Mineras: Cancún FI6-8, Cozumel FI6-II, Tizimín FI6-7, Quintana Roo y Yucatán. Escala 1:250 000*. Servicio Geológico Mexicano. Disponible en: <http://www.sgm.gob.mx>
- Smith & Cheung (2003). "Settling Characteristics of Calcareous Sand." *Journal of Hydraulic Engineering*. 129(6), 479-483.
- Smith & Cheung (2004). "Initiation of Motion of Calcareous Sand." *Journal of Hydraulic Engineering*. 130(5), 467-472.
- Sneed & Folk, R.L. (1958). "Pebbles in the Lower Colorado River, Texas, a Study in Particle Morphogenesis." *Journal of Geology*, 66(2), 114-150.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of Marine Sands. A manual for practical applications*. Thomas Telford Publications, U.K.
- Stringham, G. et al. (1969). "The Behavior of Large Particles Falling in Quiescent Liquid." *Technical Rep. Professional Paper No. 562-C*, U.S. Geological Survey.
- Stückrath, Timm, et al. (2006). "Classification of Shape and Underwater Motion Properties of Rock." *Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering*, National Cheng Kung University, Taiwan.
- Swamee, P.K. y Ohja, C.S.P. (1991). "Drag Coefficient and Fall Velocity of Nonspherical Particles." *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(5), 660-667.
- U.S. Army Corps of Engineers (1994). *Engineering and Design: Channel Stability Assessment for Flood Control Projects*. EM 1110-2-1418. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg..
- Van Rijn, L.C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, Amsterdam.
- Voulgaris, G. et al. (1995). "Laboratory Investigations into Wave Period Effects on Sand Bed Erodibility, Under the Combined Action of Waves and Currents". *Coastal Engineering*, 26, 117-134.

Wadell, H. (1932). "Volume, shape and roundness of rock particles". *Journal of Geology*, 40, 443-451.

Yalin, M.S. (1977). *Mechanics of Sediment Transport*, 2nd ed., Pergamon Press, Oxford, 298 pp.

Zingg (1935). "Beitrag zur Schotteranalyse." *Min, u, Pet. Mitt., Schweiz* 15, 39-140.