

SECCIÓN II.- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS ARENAS

Como parte de los trabajos que se están realizando para determinar las características que poseen las playas del Caribe y golfo de México, es importante realizar un análisis sobre los materiales que las conforman, con el fin de contar con un elemento más para la determinación de los procesos que existen en las costas mexicanas.

La velocidad de caída es un parámetro importante ya que su participación en este análisis es fundamental. Sin embargo, el antecedente que hay detrás de este tema, es igual de importante y que, por tanto, es tema en esta sección.

II.1.- METODOLOGÍA

Es importante destacar la labor previa al cálculo de la velocidad de caída de los sedimentos consistente en la caracterización mecánica de las arenas, de la cual se obtuvieron los resultados necesarios para la medición de la velocidad de caída. En tal caso para realizar las pruebas de laboratorio fue necesario contar con el d_{50} , diámetro nominal procedente del análisis granulométrico. Posteriormente, para el cálculo de la velocidad de caída, se necesitaba contar con la densidad relativa de cada una de las muestras, con el factor de Corey (CSF) y con el diámetro nominal experimental se estuvo en la posibilidad de realizar el cálculo correspondiente. En esta sección se describe la metodología previa a los ensayos de laboratorio para determinar la velocidad de caída.

La recolección de las muestras requirió una organización para elegir los sitios de los cuales se extraerían las muestras del material. Las zonas de extracción de las muestras fueron las siguientes (Ruiz, 2007):

- De la zona de la playa seca, berma o de dunas
- De la zona de estrán o de lavado de la playa
- Parte de la zona sumergida de la playa (profundidad de hasta 1.5 m)

El criterio para la extracción de las muestras en estas diferentes zonas (Figura II.1) se basó en el hecho de estudiar las características del sedimento que se ven sujetos a la asimetría del oleaje (propagación del oleaje).

La metodología empleada para la caracterización de los sedimentos consistió en los siguientes pasos (Ruiz, 2007):

- 1.- *Recolección del material.*
- 2.- *Realización del análisis granulométrico.*
- 3.- *Obtención de las propiedades físicas básicas de la muestra.*
- 4.- *Cálculo del valor del ángulo de reposo natural del material.*
- 5.- *Obtención de los umbrales (fronteras) de movimiento de la partícula en el fondo marino.*

6.- Tamaño y forma de los granos del sedimento.

Adicionalmente a los pasos anteriores, Alcérreca (2009) realizó la medición de la velocidad de caída para 7 muestras del universo de 143 con las se cuenta actualmente. Aún cuando fueron pocas mediciones, se cuidó que tales fueran representativas del conjunto.

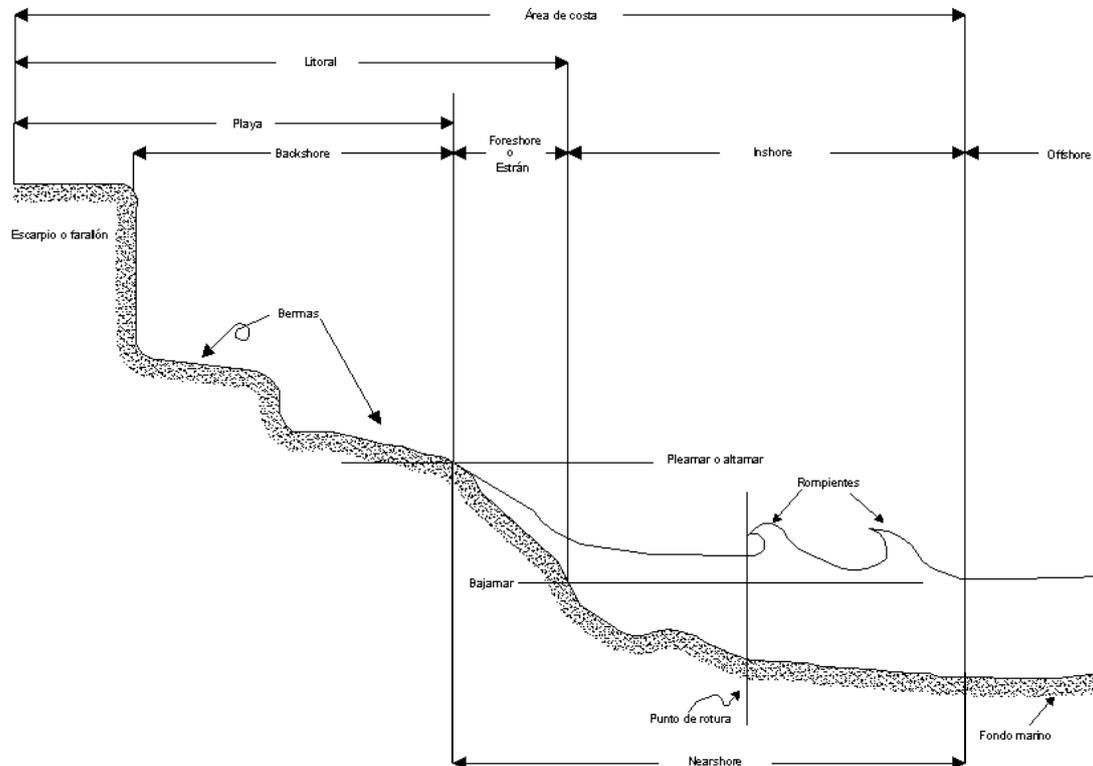


Figura II.1 Zonas del perfil de una playa

II.2.- RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

El total de muestras con las que se trabajó provienen de 59 sitios ubicados a lo largo de la línea de costa de la península de Yucatán (Quintana Roo, Yucatán y Campeche). De este total, 50 sitios se ubican en el estado de Quintana Roo, 6 están ubicados en el estado de Yucatán y 3 corresponden al estado de Campeche.

En cada sitio de muestreo se extrajeron alrededor de 2 kg de material, el cual fue obtenido de manera superficial sin realizar pozos de sondeo. En las campañas de campo se consideró de manera importante registrar las coordenadas reales de los sitios muestreados, indicándose en la siguiente tabla las coordenadas geográficas de los sitios seleccionados de la península de Yucatán.

Se extrajeron varias muestras correspondientes a las diferentes zonas del perfil en cada sitio. Comenzando con el estado de Quintana Roo, el sitio de Boca Sur se extrajeron muestras sólo de las zonas de foreshore y offshore; en el sitio Punto 10 se tomaron 4 muestras que corresponden a las tres diferentes zonas del perfil, pero con

la particularidad de que dos de ellas pertenecen a la zona offshore o sumergida, una se tomó a una profundidad de 0.5 m y la otra a una profundidad de 1.5 m; el sitio Punto F se tomaron 4 muestras al igual que en el punto 10; en los sitios Playa del Carmen 1 y Playa del Carmen 2 sólo se extrajo una muestra de la zona foreshore, respectivamente; mientras que en el sitio Punta Brava 1 se extrajeron dos muestras que pertenecen a la zona foreshore y offshore; en los sitios Punta Brava 2 y Punta Brava 3 se extrajo una muestra de la zona foreshore, respectivamente. Para el resto de los sitios se extrajeron una muestra por zona del perfil, tomando con ello 3 muestras por sitio. En la figura II.2 se puede apreciar de manera general los sitios muestreados para Quintana Roo.

Tabla II.1 Coordenadas geográficas de los sitios de los cuales se extrajeron las muestras
 ~ No se realizaron pruebas de velocidad de caída
 * Muestras provenientes de Cancún

	Sitio	Coordenadas geográficas	
		Longitud	Latitud
	Boca Sur	-86.795388	21.035788
	Puerto Morelos, UNAM	-86.867322	20.868030
	Puerto Morelos 2	-86.865947	20.870775
	Puerto Morelos 3	-86.868633	20.865994
	Punto 1	-86.745235	21.133473
	Punto 2	-86.748162	21.130360
	Punto 3	-86.749444	21.128680
	Punto 4	-86.749444	21.128680
	Punto 4A	-86.763100	21.103600
	Punto 5	-86.766819	21.094482
	Punto 6	-86.774186	21.074592
	Punto 7	-86.779072	21.060425
	Punto 8	-86.781969	21.047213
	Punto 9	-86.781857	21.042325
	Punto 10	-86.779979	21.036868
	Punta A	-86.751098	21.139611
	Punta B	-86.748748	21.139200
	Punta C	-86.774225	21.143897
	Punta D	-86.787015	21.143950
	Punta E	-86.785367	21.144652
	Punta F	-86.806042	21.176700
	Punta G	-86.802130	21.241116
	Isla Mujeres	-86.751200	21.260200
	Tulum A	-87.436390	20.197990
	Tulum B	-87.447720	20.173680
Estado de Quintana Roo	Sian Ka'an	-87.466400	20.119660
	Bahía Príncipe	-87.332060	20.364280
	Akumal 1	-87.315310	20.394660
	Akumal 2	-87.319100	20.391600
	Playa del Carmen 1	-87.071708	20.625217
	Playa del Carmen 2	-87.071708	20.625217
	Punta Brava 1	-86.911011	20.812072
	Punta Brava 2	-86.902331	20.815619
	Punta Brava 3	-86.898100	20.832100
	Punta Allen	-87.474300	19.797600
	Holbox	-87.382900	21.523200
	Kanai~		
	Beach Paraiso Yalma Kan*	-86.779100	21.036315
	Carissa Palma*	-86.747590	21.131288
	Club Regina*	-86.781680	21.039634
	F. A. Condesa*	-86.772200	21.080703
	Gran Caribe Real*	-86.754390	21.120601
	Gran Melia*	-86.771210	21.083382
	Hilton*	-86.777370	21.066047
	Hilton cerca de corral*	-86.776700	21.068025
	Hyatt Cancún Caribe*	-86.753500	21.122619
	Ritz Carlton*	-86.767450	21.093017
	Royal Sands*	-86.765620	21.097672
	Royal Solaris*	-86.781800	21.049700
	Sheraton*	-86.760610	21.109421
	El Pueblito~	-86.779890	21.057911
	Chelem MC41	-89.748100	21.255100
	Telchac	-89.279100	21.341900
Estado de Yucatán	UAY	-89.523100	21.311700
	ECCA	-89.817400	21.254000
	Progreso	-89.651100	21.288700
	Dzilam	-88.930900	21.386000
Estado de Campeche	Bahía de Tortugas		
	Isla del Carmen		
	Punta Xen		

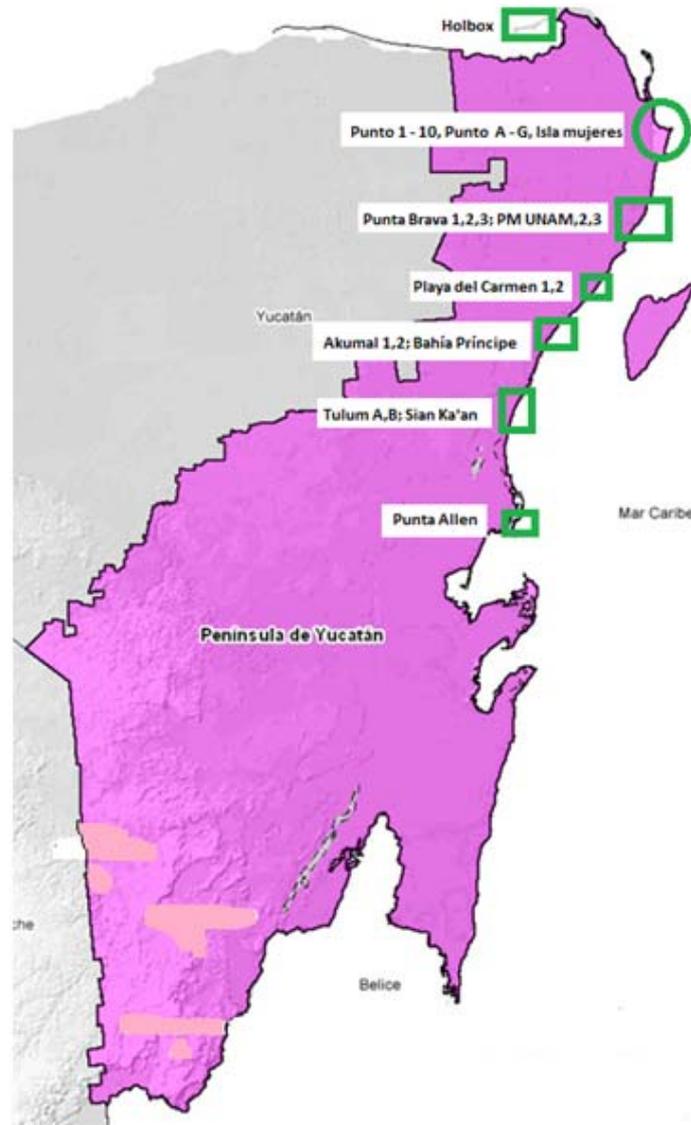


Figura II.2 Sitios muestreados en el estado de Quintana Roo, México. Imagen modificada (fuente: portal del INEGI)

En Cancún se extrajeron muestras de 14 sitios, una muestra por sitio correspondiente a la línea de playa, obteniendo granos de 0.2501 mm a 0.6318 mm de diámetro (D_{50} teórico) y comparando con otros sitios de la península, en esta región se tienen granos de diámetro relativamente grande.

En el estado de Yucatán, se extrajeron 4 muestras para cada uno de los 6 sitios que se muestrearon y que de igual forma corresponden a las diferentes zonas del perfil de playa, observándose en la figura II.3 su ubicación de manera general.

Por último, para el estado de Campeche, en el sitio de Isla del Carmen sólo se tomaron muestras de las zonas backshore y foreshore; en el sitio Punta Xen se tomó una muestra que corresponde a la zona backshore y en el sitio Bahía de Tortugas se recogieron tres muestras que pertenecen a las tres distintas zonas del perfil de playa, como se puede apreciar en la figura II.4.

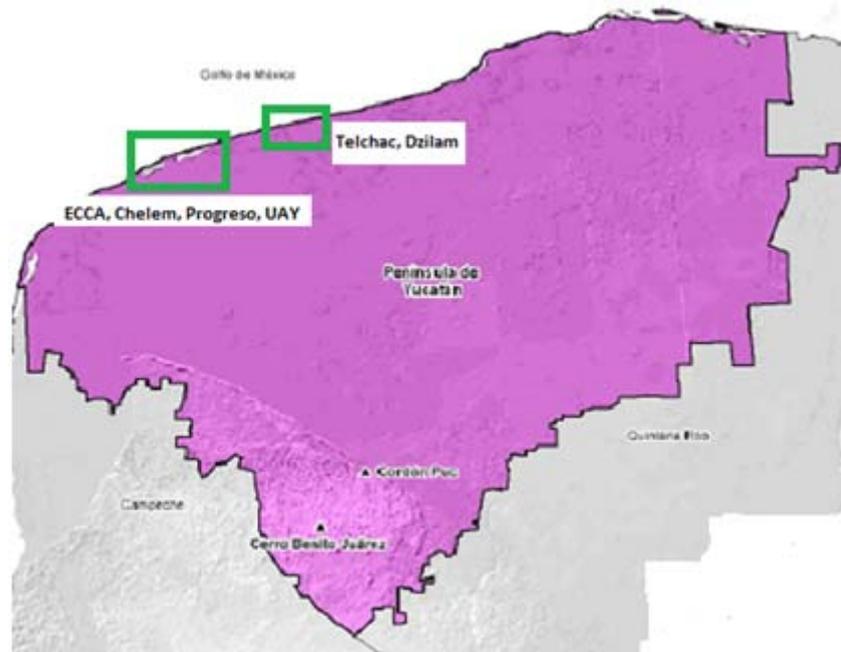


Figura II.3 Sitios muestreados en el estado de Yucatán, México. Imagen modificada (fuente: portal del INEGI)

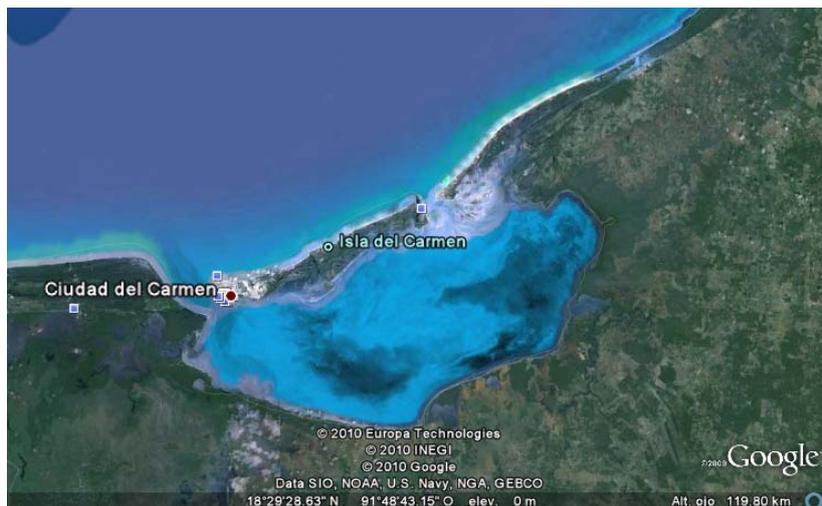


Figura II.4 Isla del Carmen, sitio muestreado en el estado de Campeche, México. Imagen satelital

II.3.- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS ARENAS EN EL LABORATORIO

Esta caracterización se realizó siguiendo los pasos mencionados en el apartado II.1 de esta sección. A continuación se explica con mayor detalle cada uno de ellos.

II.3.1.- Análisis granulométrico

La finalidad de esto es obtener la distribución por tamaños de las partículas en una muestra de suelo. El ensayo es importante porque los criterios de aceptación de suelos para ser usados en diques o presas, en carreteras (bases o subases), etc, dependen de este análisis.

Para obtener esta distribución es necesario tamizar el material y con ello obtener los porcentajes de pesos retenidos en cada una de las mallas (ver tabla II.2). Previo a esto hay una metodología que se puede encontrar en la literatura sin mayor problema. Se utilizaron polinomios de Hermite para determinar los valores correspondientes a los diámetros nominales (d_5 , d_{10} , d_{16} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{75} , d_{84} , d_{95}).

Tabla II.2 Tamices de acuerdo a la ASTM

Tamiz (ASTM)	Tamiz (mm)	Abertura real (mm)	Tipo de suelo	
3"	80	76.120	GRAVA	
2"	50	50.800		
1 1/2 "	40	38.100		
1"	25	25.400		
3/4 "	20	19.050		
3/8 "	10	9.520		
N° 4	5	4.760		
N° 10	2	2.000	ARENA	Arena gruesa
N° 20	0.90	0.840		Arena media
N° 40	0.50	0.420		
N° 60	0.30	0.250		
N° 140	0.10	0.105		
N° 200	0.08	0.074		
				Arena fina

Los parámetros estadísticos (tendencia central y de dispersión) y la distribución de tamaños fueron calculados con el fin de obtener el grado de clasificación y el posible mecanismo de depósito del material (Ruiz, 2007). El procedimiento y las ecuaciones que se utilizaron para realizar lo anterior se menciona en el anexo VI.I.

II.3.2.- Propiedades físicas básicas de la muestra.

En esta etapa del análisis, el cálculo del valor de la densidad relativa de las muestras (S_s) es lo primero que se determinó, pues las demás propiedades físicas (relación de vacíos, densidad relativa del material dentro del agua, peso específico de las partículas de la muestra en kg/m^3 y densidad de las partículas en kg/m^3) están condicionadas por el valor que éste posea.

La *densidad relativa* de las muestras S_s se determinó con la siguiente ecuación:

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{fw} - W_{fsw}} \quad (\text{II.1})$$

donde:

W_s = peso del material (50 gr).

W_{fw} = peso del matraz con una porción de la muestra y con agua destilada hasta la marca de aforo de éste.

W_{fsw} = peso del matraz con la porción de la muestra y con el agua destilada después de haber sido expuesto a un calentamiento con glicerina

La porción de muestra con la que se trabajó para este cálculo es el que pasa a través del tamiz de 5x5" (4.00 mm).

La relación de vacíos se calculó con la siguiente expresión:

$$V_r = \frac{V_m S_s \gamma_0}{W_m} - 1 \quad (II.2)$$

donde:

V_m = volumen del cristizador utilizado, cm^3

W_m = peso del volumen de la arena dentro del cristizador, g.

S_s = densidad relativa del material, adimensional

γ_0 = peso específico del agua destilada a 4°C de temperatura, kg/m^3 .

V_r = relación de vacíos, adimensional.

En la expresión el volumen y peso de la arena tienen unidades de m^3 y kg, respectivamente.

La densidad relativa de la muestra dentro del agua se determinó de manera sencilla y con la siguiente igualdad:

$$\Delta = S_s - 1 \quad (II.3)$$

donde:

S_s = densidad relativa del material

Δ = densidad relativa del material dentro del agua, adimensional

El peso específico de las partículas del material se obtuvo de la relación siguiente:

$$\gamma_s = S_s \gamma_0 \quad (II.4)$$

en donde γ_s es el peso específico de las partículas, en kg/m^3

La densidad de las partículas de la muestra se conoció aplicando la siguiente expresión:

$$\rho_s = \Delta \rho + \rho = (S_s - 1)\rho + \rho \quad (II.5)$$

donde:

ρ_s = densidad de las partículas, en kg/m^3 .

ρ = densidad del agua, con un valor igual a $1027 \text{ kg}/\text{m}^3$ (valor para agua salada).

II.3.3.- Ángulo de reposo natural del material.

El ángulo de reposo natural es aquel formado por un plano horizontal – que en este caso es el fondo marino – y por aquel plano inclinado en el cual las partículas inician su rodamiento. Este ángulo puede verse disminuido por los siguientes factores: menor tamaño de la partícula, menor rugosidad de la superficie de la partícula, mayor esfericidad de la partícula, mayor homogeneidad entre las partículas, principalmente.

En el laboratorio este ángulo se determinó básicamente colocando arena en una caja de plástico transparente, la cual una de sus paredes era desprendible. A continuación se desprendía dicha pared para que de esta forma el sedimento por simple gravedad deslizará y de esta forma se obtuvo este ángulo.

II.3.4.- Propiedades del mezclado agua – sedimento.

En esta etapa, se obtuvieron los siguientes datos de las muestras: volumen de la concentración, concentración de la masa, porosidad, densidad de suspensión, permeabilidad específica, coeficiente de permeabilidad, gradiente de presión para alcanzar la licuefacción y la velocidad mínima del flujo de agua para alcanzar el estado de licuefacción.

El volumen de concentración se determinó con la siguiente expresión:

$$C = \frac{1}{1 + V_r} \quad (II.6)$$

donde:

C = volumen de concentración, adimensional

V_r = relación de vacíos, adimensional

La masa de concentración se calculó como sigue:

$$\rho_{cas} = \frac{\rho_s}{1 + V_r} \quad (II.7)$$

donde:

ρ_{cas} = masa de concentración, kg/m^3

ρ_s = densidad de las partículas, kg/m^3 .

La porosidad se obtuvo con la siguiente relación:

$$P_{or} = \frac{V_r}{1 + V_r} \quad (II.8)$$

La densidad de suspensión se conoció utilizando la siguiente igualdad:

$$\rho_{sus} = \frac{\rho V_r + \rho_s}{1 + V_r} \quad (II.9)$$

donde ρ_{sus} en kg/m^3 .

La permeabilidad específica del material se consiguió a partir de la expresión:

$$kp = 0.011(d_{50})^2 \quad (II.10)$$

donde:

k_p en m^2

d_{50} = diámetro nominal correspondiente al 50 percentil de la distribución de sedimentos, en m.

El coeficiente de permeabilidad (m/s) fue calculado con ayuda de la ecuación siguiente:

$$cp = \frac{g \times kp}{v} \quad (II.11)$$

El gradiente de presión se define como el valor en el cual la arena comience a comportarse como un fluido. Para calcular dicho valor, se utilizó la siguiente igualdad:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{wf} = g(\rho_s - \rho)(1 - P_{or}) \quad (II.12)$$

Donde:

$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{wf}$ = gradiente de presión, en N/m^3 .

g = aceleración de la gravedad, m/s^2 .

La velocidad mínima del flujo para alcanzar la licuefacción se determinó con la siguiente relación:

$$W_{mf} = \frac{v}{d_{50}} \left\{ \left[10.36^2 + 1.049 P_{or}^{4.7} d_*^3 \right]^{0.5} - 10.36 \right\} \quad (II.13)$$

La variable d_* es el factor de Yalin o parámetro adimensional de la partícula. Dicho valor se calculó con la igualdad:

$$d_* = \left[\frac{g\Delta}{v^2} \right]^{1/3} d_{50} \quad (II.14)$$

donde v es la viscosidad cinemática del agua en m^2/s .

II.3.5.- Umbrales de movimiento de la partícula en el fondo marino.

Los umbrales (fronteras) de movimiento se obtuvieron a partir de aplicar una metodología la cual es la siguiente:

1. Se calculó el parámetro sedimento – fluido (S_*)
2. Se determinó el factor de Shields crítico a partir del dato anterior.
3. Se obtuvo la magnitud de la velocidad del esfuerzo crítico como una función del parámetro de Shields crítico, en m/s.
4. Se determinó tomando en cuenta el dato del inciso 3 y la densidad del agua el esfuerzo cortante crítico al que se ven sujetas las partículas, en N/m^2 .
5. Al final se evaluaron los números de Reynolds, de Rouse y el índice de flotación de Arquímedes (A).

El número de Reynolds se determinó con la finalidad de saber qué tipo de fondo teórico se puede llegar a formar con las características de las arenas en estudio. El índice de flotación de Arquímedes se calculó para inferir qué tipo de flujo influiría sobre el comportamiento de la movilidad del sedimento. El número de Rouse tiene el propósito de indicar el tipo de movimiento que puede presentar el material, tomando en cuenta las propiedades físicas de la partícula. Finalmente se calculó la velocidad de caída de las partículas con las 12 formulaciones empíricas vistas anteriormente en este trabajo, sólo que estas velocidades fueron calculadas con el d_{50} teórico correspondiente a cada muestra. Las expresiones para el cálculo de lo antes dicho fueron:

Parámetro fluido – sedimento:

$$S_* = \frac{d_{50}}{4\nu} \sqrt{\Delta g d_{50}} \quad (II.15)$$

Parámetro de Shields crítico:

$$x = \log_{10}(S_*) \quad (II.16)$$

$$\psi = 0.02235x^5 - 0.06043x^4 + 0.20307x^3 + 0.54252x^2 - 0.636397x - 1.03167 \quad (II.17)$$

$$\psi_{cr} = 10^\psi \quad (II.18)$$

Velocidad del esfuerzo cortante crítico:

$$u_{*cr} = \sqrt{\Delta g d_{50} \psi_{cr}} \quad (II.19)$$

Esfuerzo cortante crítico:

$$\tau_{cr} = \rho u_{*cr}^2 \quad (II.20)$$

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{u_{*cr} d_{50}}{\nu} \quad (II.21)$$

Como se dijo antes, el número de Reynolds sirve para conocer de manera teórica la configuración del fondo marino. La siguiente tabla muestra la clasificación a

partir de este resultado que utiliza el CEM – Coastal Sediment Properties, U.S. Army Corps of Engineers:

Tabla II.3 Configuración del fondo marino a partir del número de Reynolds, Ruíz (2007)

Rango	Configuración del fondo
$Re < 10$	Fondo con ripples
$10 \leq Re \leq 100$	Fondo con dunas
$Re > 100$	Fondo plano

Índice de flotación de Arquímedes:

$$A = d_*^3 \quad (II.22)$$

La siguiente tabla indica el tipo de flujo que influye sobre el inicio de movimiento del sedimento:

Tabla II.4 Clasificación del flujo a partir del índice de flotación de Arquímedes, Ruíz (2007)

Rango	Tipo de flujo
$A < 39$	Flujo laminar
$10 \leq A \leq 10\,000$	Flujo transitorio
$A > 10\,000$	Flujo turbulento

Número de Rouse (modo de transporte de material):

$$Rouse = \frac{W_f}{\gamma_d u_{*cr} \kappa} \quad (II.23)$$

donde:

γ_d = factor que describe la diferencia entre la difusión del fluido en el cual se encuentra la partícula y la partícula o sedimento ($\cong 1$), en kg/m^3 .

κ = es la constante de Von Karman, adimensional.

W_f = velocidad de caída de la partícula o sedimento, en m/s.

Tabla II.5 Modo de transporte del material o sedimento a partir del número de Rouse, Ruíz (2007)

Rango	Movimiento
$Rouse > 7.5$	Arrastre o rodamiento
$2.5 \leq Rouse \leq 7.5$	Saltación
$0.8 \leq Rouse < 2.5$	Suspensión
$Rouse < 0.8$	Suspensión sin transporte

Otros dos datos que se determinaron fueron el parámetro de escala del sedimento (A_p) y el criterio de suspensión de Bagnold (P_b).

El parámetro de escala del sedimento se utiliza para conocer el perfil de equilibrio que una playa puede llegar alcanzar. Para su cálculo se utilizó la siguiente igualdad:

$$A_p = 2.23 \exp\left(\frac{-1.24}{A^{1/3}}\right) (d_{50})^{1/3} \quad (II.24)$$

El criterio de suspensión de Bagnold determina cuando los sedimentos pueden considerarse como transporte en suspensión; para tal caso, se usó la siguiente expresión:

$$P_b = \frac{u_{*cr}}{W_f} \quad (II.25)$$

donde P_b es el criterio de suspensión de Bagnold, adimensional.

II.3.6.- Tamaño y forma de los granos

Aunque existen diversas fórmulas para calcular el factor de forma del sedimento, la que más se utiliza es la de Corey. En esta etapa del análisis se hizo un análisis fotográfico de las muestras para que con ello se obtuviera las dimensiones de las partículas: largo (a), ancho (b) y espesor del sedimento (c). La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$CSF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (II.26)$$

II.3.7.- Medición de la velocidad de caída.

La medición de la velocidad de caída experimental es la etapa adicional que se incorporó a esta caracterización (Alcérreca, 2009).

El objetivo en este punto fue seleccionar granos con un d_{50} cercano al d_{50} teórico, proveniente del análisis granulométrico. Para esto se realizó un análisis fotográfico y de esta forma se supo cuales eran los granos adecuados. El número de granos seleccionados por ensayo se menciona en la siguiente sección.

Después de esto se dejaban caer en una probeta con agua uno por uno. La caída de los granos se grabó con una cámara de video. La distancia recorrida por los granos y la resolución de la cámara de video en cada ensayo estuvieron en función del tamaño de los granos.

Por último, se realizó un análisis de los videos con lo cual se obtuvieron los tiempos de recorrido de cada uno de los granos. Conociendo la distancia y este tiempo es como se calculó la velocidad de caída de cada uno de los granos seleccionados. Los resultados se muestran en la siguiente sección.