



INTRODUCCIÓN

1.- IMPORTANCIA

La península de Yucatán es una región que posee una belleza natural sin igual, con ambientes variados, tales como manglares y humedales, zonas selváticas y arqueológicas muy importantes, que permiten desarrollos de gran interés económico, turístico o ambiental; ejemplo de ello es la isla barrera de Cancún y la zona de la Riviera Maya, por lo cual la península de Yucatán se está convirtiendo en la capital turística de la República Mexicana.

Por lo anterior, las actividades económicas que se llevan a cabo en esta región del país son de gran relevancia debido a que son la base del desarrollo de la zona, por lo cual mantener una línea de costa con las mejores condiciones es una prioridad. Para llevar a cabo lo antes mencionado, el estudio de la dinámica marina predominante de la zona, consecuencia de las fuerzas de la naturaleza y de las actividades humanas, requiere contar con elementos con los cuales los intereses económicos, que se traducen en proyectos de infraestructura, puedan decidir si es conveniente o no la inversión.

Para poder establecer la vulnerabilidad que tiene la costa de la Península de Yucatán es necesario, entre otros factores, determinar la velocidad de caída de las arenas que conforman las playas, dado que este parámetro tiene una participación muy importante en los procesos de la dinámica de sedimentos, ya que con base a éste se determina la capacidad de acumulación de material, el transporte del mismo longitudinal y/o transversalmente y la erosión, tales procesos como consecuencia de las fuerzas que tiene lugar en la línea de costa, como es el oleaje, las corrientes marinas existentes y el viento (condiciones ordinarias), además de las mareas de tormenta (condiciones extraordinarias).

Al final, lo que se busca es contar con elementos técnicos que garanticen que las playas tengan la calidad necesaria para el desarrollo de la región, es decir, tener las condiciones óptimas considerando en la medida de lo posible todos los factores que se ven involucrados dando como resultado la morfología que a la fecha posee la línea costera de la península de Yucatán.

2.- ESTADO DEL ARTE

En este apartado se expone el estado que guarda la práctica de la ingeniería de costas en el ámbito de la velocidad de caída como factor involucrado en la dinámica que se lleva a cabo en la línea de costa; es claro que la meta es alta y muy extensa, por lo cual seguramente lo expuesto a continuación resultará en la generación de nuevas líneas de investigación. Como un aspecto importante para el desarrollo de este trabajo, se describen los elementos que participan en la determinación de la velocidad de caída de partículas que para el caso son arenas, así como algunas de las expresiones que se utilizan para llevar a cabo dicho fin.

La velocidad de caída tiene una fuerte influencia en el transporte en suspensión, en perfiles de equilibrio (la forma que adquieren, así como su evolución), y la morfología que adquiere una playa.

Dean (1973) determinó que la velocidad de caída se ve involucrada en el siguiente parámetro $H/W_f T$ el cual es utilizado para determinar modelos a escala con el fin de evaluar perfiles característicos en pruebas de laboratorio; además el siguiente parámetro $\pi W_f / (gT)$ es usado para discriminar entre azolve y erosión de material, en donde H es la altura de ola, T es el periodo de ola, W_f la velocidad de caída del material y g la aceleración de la gravedad. Dalrymple y Thompson (1976) determinaron que la velocidad de caída es utilizada para predecir el ángulo de inclinación de un perfil de playa. Wright y Short (1984) desarrollaron una extensa clasificación de la morfología de playas en donde se ve involucrado tal parámetro. Kriebel et al. (1986) hizo un estudio con el cual amplió el trabajo de Dean (1973). Dicho trabajo mostró que la velocidad de caída es utilizada para relacionar la escala para la evolución de un perfil de playa bajo condiciones erosivas, pero no para condiciones de acreción. Los anteriores autores son algunos de varios que han desarrollado investigaciones en torno a la velocidad de caída.

La determinación de la velocidad de caída de sedimentos es un aspecto fundamental en el estudio de transporte de sedimentos, especialmente cuando la suspensión de material es un proceso dominante. Por ejemplo, un error en la estimación de la velocidad de caída puede ser ampliada por un factor de tres o más en el cálculo de la carga de transporte de material suspendido. A pesar de su importancia, resulta difícil obtener sus valores reales in situ, y en la mayoría de los casos son obtenidos de experimentos de laboratorio o estimados por fórmulas empíricas.

2.1.- Ecuaciones de velocidad de caída

A menudo la velocidad de caída ha sido calculada para partículas redondas (Gibbs *et al.* 1971), siendo la Ley de Stokes la base del cálculo de la misma; no obstante, tiene ciertos límites para su utilización, pues su génesis surge de la idealización de considerar partículas con forma esférica. Sin embargo, al tener presente que las partículas difieren de esta forma, como consecuencia se tiene que la velocidad de caída será menor que la de una partícula con forma de esfera, por tal motivo, la expresión de Stokes resulta poca práctica para su aplicación y se hace necesario modificar esta ecuación para que los resultados que se obtengan de su aplicación sean los más parecidos posibles a las condiciones que se presentan en la naturaleza.

Debido a lo anterior, diversos autores han desarrollado expresiones empíricas ajustándolas de la mejor manera a sus resultados experimentales (por ejemplo, Graf 1971; Hallermeier 1981; Dietrich 1982; Van Rijn 1984; Cheng 1997; Ahrens 2000; entre otros). A continuación se presentan las relaciones empíricas más utilizadas para fines ingenieriles y que de una forma u otra han intentado integrar una serie de parámetros experimentales que tienen el propósito de solucionar tal limitación.

2.1.1.- Cheng (1997)

La ecuación de velocidad de caída propuesta por Cheng (1997) indica una explícita relación entre el número de Reynolds (Re) y un parámetro adimensional de la partícula. La expresión es aplicable cuando el $Re < 1$ y para altos valores del mismo.

Un prerrequisito para asegurarse de un análisis cualitativo en lo que se refiere a transporte de sedimentos es tener conocimiento de la velocidad de caída (W_f) de partículas. Varios intentos han tenido lugar para calcular la misma, pero la mayoría de los resultados son consecuencia de considerar partículas esféricas. Básicamente hay dos formas de calcular tal parámetro, la primera de ellas es considerar los granos como esferas y con $Re < 1$, para lo cual la ley de Stokes resulta la mejor opción. El otro camino es considerar las partículas como tales, para lo cual la determinación de la velocidad de caída incluyen tabulaciones y diagramas que consisten en familias de curvas apoyadas en resultados experimentales, por ejemplo Schiller y Naumann (1933) y U.S. Inter – Agency Committee (1957). Este segundo camino es aplicable para un amplio rango del número de Re , sin embargo su aplicación no resulta nada práctica. El objetivo de Cheng fue determinar una expresión de velocidad de caída aplicable a un extenso rango de valores del número de Re , con lo cual se estaría evitando utilizar diagramas y tabulaciones. Por lo tanto, el camino que siguió el autor para desarrollar la expresión en cuestión se describe a continuación: Cheng partió de la solución que obtuvo Stokes (1851) de una partícula esférica desplazándose en un fluido en reposo:

$$W_f = \frac{1}{18} \frac{\Delta g d^2}{\nu} \quad (1)$$

en donde:

$\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$, adimensional

ρ_s = densidad de la partícula, en kg/m^3

ρ = densidad del fluido, en kg/m^3

g = aceleración de la gravedad, m/s^2

Desafortunadamente, la ecuación (1) es válida para números de $Re \leq 1$. Ahora, al igualar la fuerza de peso efectiva con la fuerza de arrastre, resulta que:

$$(\rho_s - \rho)gd^3 \frac{\pi}{6} = C_D d^2 \frac{\pi}{4} \frac{\rho W_f^2}{2} \quad (2)$$

El coeficiente de arrastre puede ser expresado como:

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{\Delta g d}{W_f^2} \quad (3)$$

Al sustituir (1) en (3), se obtiene la relación entre el número de Reynolds (Re) y el coeficiente de arrastre (C_D), a través del índice de flotación de Arquímedes (A), éste último dependiente del factor de forma de la partícula:

$$C_D = \frac{A}{Re} \quad (4)$$

Para la solución de Stokes, “A” es igual a 24, que es el valor correspondiente a partículas esféricas. El efecto que tiene la forma de la partícula sobre el C_D no tiene una tendencia, es decir, para valores pequeños del número de Re tal efecto es bajo, mientras que para altos Re tal variación es más apreciable (Schulz *et al.* 1954). De acuerdo a Cheng, el factor de forma de partículas que se sedimentan son menores que la unidad, mientras que para arenas naturales, él estableció dicho factor cercano a 0.7. La tabla 1 muestra el valor de “A” el cual ronda alrededor de 32, basado en el trabajo de diversos investigadores.

Tabla 1 Coeficientes de arrastre de partículas sedimentarias para valores extremos del número de Reynolds, Cheng (1997)

Autor	C_D (bajos Re)	C_D (altos Re)
Sha (1956)	32/Re	1.0
Concharov (1962)	32/Re	1.2
Zhang (1989)	34/Re	1.2
Van Rijn (1989)	24/Re	1.1
Raudkivi (1990)	32/Re	1.2
Zhu y Cheng (1993)	32/Re	1.2

Para la condición de números de Re elevados ($1000 - 10^5$), el C_D para esferas tiene un valor promedio igual a 0.4. Para partículas naturales, el C_D está entre 1.0 a 1.2, tal como muestra la tabla 1.

Como la ecuación de Stokes está limitada a $Re \leq 1$, los esfuerzos se han canalizado a desarrollar un método para ampliar la ecuación (4) con lo cual se pueda tomar un rango de valores más amplio del número de Re. Algunas correlaciones empíricas para determinar la velocidad de caída de partículas individuales pueden encontrarse en la literatura, por ejemplo Oseen (1927), Sha (1956), Zanke (1977) y Raudkivi (1990).

A la luz de todos estos resultados, la siguiente relación entre el C_D y el número de Re, se asume que para partículas sedimentarias naturales:

$$C_D = \left[\left(\frac{A}{Re} \right)^{1/m} + B^{1/m} \right]^m \quad (5)$$

en donde A y B son constantes y m es un exponente. La ecuación (5) satisface simultáneamente las dos condiciones extremas, es decir, para Re bajos y altos. Tal y como puede apreciarse en (5), el C_D es inversamente proporcional al Re con valores pequeños y se convierte en una constante para elevados números de Re. De acuerdo a la tabla 1, A puede tomar un valor de 32 y B igual a 1 para la mayoría de las investigaciones.

Como la relación entre el C_D y el Re para valores extremos del número de Reynolds no se ve afectada sensiblemente por m en (5); este exponente puede ser estimado mediante el ajuste de la misma ecuación con resultados experimentales para valores intermedios en el rango del número de Re , esto es, $1 < Re < 1000$. Basado en datos experimentales de Concharov (Ibad – Zade 1992), Zegzda (1934), Arkhangel'skii (1935), y Sarkisyan (1958) para partículas de arena de cuarzo, el valor promedio de m fue de 1.5. Por tanto, con los valores anteriores propuestos para A , B y m , la ecuación (5) puede ser reescrita como:

$$C_D = \left[\left(\frac{32}{Re} \right)^{1/1.5} + 1 \right]^{1.5} \quad (6)$$

La ecuación anterior es la relación general entre el C_D y el número de Re para partículas sedimentarias naturales.

Utilizando un parámetro adimensional d_* definido como:

$$d_* = \left(\frac{\Delta g}{\nu^2} \right)^{1/3} d \quad (7)$$

Al hacer simultaneo (7) y (3), resulta:

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{d_*^3}{Re^2} \quad (8)$$

Sustituyendo (8) en (6), se obtiene la ecuación (9), que puede ser utilizada para evaluar la velocidad de caída de partículas naturales, específicamente arenas.

$$\frac{W_f d}{\nu} = \left(\sqrt{25 + 1.2 d_*^2} - 5 \right)^{1.5} \quad (9)$$

2.1.2.- Ahrens (2000)

Durante varias décadas el estudio de la velocidad de caída de sedimentos costeros como parámetro para caracterizar a los mismos ha venido creciendo de manera importante. La ecuación desarrollada por el autor fue con la intención de contar con una expresión que fuera aplicable a un amplio rango de condiciones. Tal expresión fue calibrada para arenas de cuarzo en las dos condiciones extremas del número de Re , considerando la variación de la viscosidad cinemática, tanto para agua salada como para agua potable.

El desarrollo que hizo Ahrens para determinar su expresión de velocidad de caída fue la siguiente: partiendo de las sugerencias hechas por Hallermeier (1981), le fue posible proponer la siguiente igualdad:



$$Re = CLA + CT\sqrt{A} \quad (10)$$

donde:

A = índice de flotación de Arquímedes

CL y CT = coeficientes que dependen de A

El número de Reynolds está determinado por medio de la expresión (11), mientras que el índice de flotación de Arquímedes se define en (12):

$$Re = \frac{W_f d}{\nu} \quad (11)$$

$$A = \frac{\Delta g d^3}{\nu^2} \quad (12)$$

donde:

W_f = velocidad de caída

d = diámetro de la partícula

ν = viscosidad cinemática del fluido

Resolviendo la ecuación (10) para la velocidad de caída:

$$W_f = \frac{CL \Delta g d^2}{\nu} + CT\sqrt{\Delta g d} \quad (13)$$

El primer término de la ecuación (13) está asociado al régimen de flujo laminar y el segundo al régimen de flujo turbulento. Los coeficientes CL y CT fueron determinados por error y ensayo para minimizar el error y comparando con los resultados experimentales de Hallermeier (1981) para el rango de valores de arenas de cuarzo, $1.58 \leq \Delta \leq 1.67$. Las siguientes relaciones fueron desarrolladas para determinar los coeficientes anteriores:

$$CL = 0.055 \tanh[12A^{-0.59} e^{-0.0004A}] \quad (14)$$

$$CT = 1.06 \tanh[0.016A^{0.50} e^{(-120/A)}] \quad (15)$$

Observaciones hechas a la ecuación de Ahrens.

- La ecuación de Ahrens está calibrada para arenas de cuarzo. Las arenas de la península de Yucatán son calcáreas (de roca caliza).
- Ahrens calcula la viscosidad cinemática del fluido de la siguiente manera:

$$\nu \text{ (cm}^2 \text{ / s)} = c_0 + c_1 F + c_2 F^2 \quad (16)$$

donde:

F = temperatura, en °C, para el rango de $0^\circ \leq F \leq 30^\circ$

$c_0 = 0.0178$ (agua potable)

$$c_0 = 0.0182 \text{ (agua salada)}$$

$$c_1 = -0.000529$$

$$c_2 = 0.0000069$$

O también se puede obtener los valores de ν de la siguiente tabla:

Tabla 2 Valores observados y calculados de la viscosidad cinemática, Ahrens (2000)

Temperatura °C	ν observada (agua potable) cm ² /s	ν calculada (agua potable) cm ² /s	ν observada (agua salada) cm ² /s	ν calculada (agua salada) cm ² /s
0	0.0179	0.0178	0.0183	0.0182
5	0.0152	0.0153	0.0156	0.0157
10	0.0131	0.0132	0.0135	0.0136
15	0.0114	0.0114	0.0119	0.0118
20	0.0100	0.0100	0.0105	0.0104
25	0.0089	0.0089	0.0094	0.0093
30	0.0080	0.0081	0.0085	0.0085

- c) Ahrens desarrolló la fórmula en cuestión con la finalidad de tener una ecuación continua en todo el rango para A, lo que no sucede con Hallermeier.

2.1.3.- Jiménez – Madsen (2003)

La fórmula que presentan los autores es una expresión para calcular la velocidad de caída para partículas con tamaños que oscilan entre 0.063 a 1 mm de diámetro. La ecuación ha sido desarrollada apoyándose en los trabajos previos de Dietrich (1982), la cual predice una velocidad de caída adimensional W_* como función de un parámetro igualmente adimensional fluido – sedimento (S_*); el trabajo de Jiménez – Madsen recomienda utilizar la fórmula con un factor de forma de 0.7 y una redondez de 3.5 para partículas naturales.

El procedimiento desarrollado por los autores fue el siguiente: la velocidad de caída (W_f) de una esfera en reposo puede ser estimada al considerar el equilibrio entre el peso efectivo y la fuerza de arrastre, tal y como se muestra en la ecuación (16).

$$\Delta\rho g d^3 \frac{\pi}{6} = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{\pi}{4} d^2 W_f^2 \quad (16)$$

Reacomodando (16), la velocidad de caída puede quedar como función de una velocidad de caída adimensional (17), en donde C_D es función del número de Reynolds (18):

$$W_* = \frac{W_f}{\sqrt{\Delta\rho g d}} = \sqrt{\frac{4}{3C_D}} \quad (17)$$

$$Re = \frac{W_f d}{\nu} = 4W_* S_* \quad (18)$$

donde S_* es el parámetro fluido – sedimento introducido por Madsen y Grant (1976), dado por:

$$S_* = \frac{d}{4\nu} (\sqrt{\Delta g d}) \quad (19)$$

La ley de Stokes es válida para valores pequeños del número de Re ($Re < 1$), y C_D es igual a $24/Re$; considerando $C_D \cong \text{constante} \cong 0.4$ para $10^3 \leq Re \leq Re_{\text{crit}} \cong 3 \times 10^5$ (Schlichting 1960). Tomando en cuenta lo anterior en (17) y (18) conduce a limitar valores para la W_* de partículas esféricas:

$$W_* = \begin{cases} \frac{S_*}{4.5} & S_* < 1 \\ 1.83 & 150 < S_* < 4 \times 10^4 \end{cases} \quad (20)$$

En el contexto de esferas de cuarzo en agua, los límites dados por (20) corresponden a diámetros $d < 0.1$ mm ($S_* < 1$) y para 3 mm $< d < 12$ cm. Lo anterior corresponde a un amplio rango de transición de S_* ($1 < S_* < 150$), por lo cual no es sencilla la solución analítica. Como ejemplo, Dietrich (1982) desarrolló una expresión para calcular la velocidad de caída de esferas para un amplio rango de valores del número de Re (equivalente a S_*) ajustando tal expresión a un polinomio de cuarto grado con sus datos experimentales (252 resultados).

Siguiendo el comportamiento de (20), los autores adoptaron una expresión general para la W_f de partículas sedimentarias:

$$\frac{1}{W_*} = A + \frac{B}{S_*} \quad (21)$$

en donde A y B son constantes que pueden ser determinadas ajustando (21) a los datos experimentales de Jiménez - Madsen para asegurar estar dentro del rango de valores de S_* . Es posible obtener una expresión de C_D en términos de Re utilizando (21), además de expresar a W_* en términos de C_D empleando (17), y S_* en términos de Re usando (18):

$$C_D = \frac{1}{3} \left(A + \sqrt{A^2 + \frac{16B}{Re}} \right)^2 \quad (22)$$

Resumiendo, para calcular la W_f de partículas con densidad ρ_s y diámetro nominal d_N , en un fluido en reposo con densidad ρ y viscosidad cinemática ν , Jiménez – Madsen desarrollaron una expresión ajustando de un mejor manera la fórmula de Dietrich (1982) y que se muestra en (23), donde S_* se define en (24):

$$W_* = \frac{W_f}{\sqrt{\Delta g d_N}} = \left(A + \frac{B}{S_*} \right)^{-1} \quad (23)$$

$$S_* = \frac{d_N}{4\nu} (\sqrt{\Delta g d_N}) \quad (24)$$

En varias aplicaciones, el diámetro del tamiz es utilizado para caracterizar el sedimento de arenas de cuarzo (d_s). Para tales aplicaciones, $d_N = d_s/0.9$ con $A = 0.954$ y $B = 5.12$, que corresponde a un $CSF = 0.7$ y $P = 3.5$. Al considerar esto, la ecuación (23) queda como se muestra en (25) y que es la empleada en esta tesis para el cálculo de la velocidad de caída teórica de este autor:

$$W_f = \left(0.954 + \frac{5.12}{S_*} \right)^{-1} \sqrt{\Delta g d_N} \quad (25)$$

2.1.4.- Camenen (2007)

La presente fórmula toma en cuenta de manera importante la forma y redondez de las partículas. Las relaciones que forman parte en el cálculo de la velocidad de caída son resultado de considerar varios tamaños, formas, redondeces y densidades de partículas; la fórmula, por tanto, podría ser aplicada a cualquier partícula.

Para partículas individuales, la velocidad de caída puede ser determinada como se ha mencionado en los apartados anteriores, es decir, con la solución de Stokes (1851) para $Re \leq 1$. Por otra parte, para $Re > 10^5$, el coeficiente de arrastre se comporta como una constante (Dallavalle 1948, Schlichting 1979). La mayoría de las fórmulas empíricas (Julien 1995; Soulsby 1997; Cheng 1997; Ahrens 2000; Guo 2002) están basadas para estas condiciones extremas del número de Reynolds. Además, tales fórmulas son solo función de un diámetro nominal medio y no toman en cuenta el efecto de manera directa de la forma y la redondez de las partículas. De esta manera el objetivo del autor fue el de proporcionar una fórmula general y simple para cualquier tamaño de grano considerando dos factores: el CSF (factor de forma de Corey) y P (redondez).

El desarrollo de su fórmula empírica toma como base a Cheng (1997), expresando la velocidad de caída como sigue:

$$W_f = \frac{\nu}{d} Re = \frac{\nu}{d} \left[\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{A}{B} \right)^{2/m} + \left(\frac{4}{3} \frac{d_*^3}{B} \right)^{1/m}} - \frac{1}{2} \left(\frac{A}{B} \right)^{1/m} \right]^m \quad (26)$$

donde los coeficientes A, B y m varían acorde al material que se trate y a los autores (ver tabla 3).

Tabla 3 Coeficientes A, B y m involucradas en la ecuación (26), Camenen (2007)

<i>Autor</i>	<i>Material</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>m</i>
Dallavalle (1948)	Partículas esféricas	24.00	0.40	2.00
Julien (1995)	Arenas naturales	24.00	1.50	1.00
Soulsby (1997)	Arenas naturales	26.40	1.27	1.00
Cheng (1997)	Arenas naturales	32.00	1.00	1.50

Además de Cheng (1997), el autor toma como referencia otras expresiones empíricas:

Ahrens (2000)

$$Re = CL A + CT \sqrt{A} \quad (27)$$

Guo (2002)

$$Re = \frac{d_*^3}{24 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) d_*^{3/2}} \quad (28)$$

Para partículas esféricas, Guo propuso una fórmula similar con factores de 18 y $1/\sqrt{3}$ en vez de 24 y $\sqrt{3}/2$, respectivamente.

Jiménez – Madsen (2003)

$$Re = \frac{\sqrt{A}}{C_1 + \frac{C_2}{\sqrt{A}}} \quad (29)$$

donde:

A = índice de flotación de Arquímedes

CL = coeficiente para régimen laminar

CT = coeficiente para régimen turbulento

$C_1 = A$

$C_2 = 4B$, (A y B son los coeficientes propios de Jiménez y Madsen)

Algunas otras relaciones fueron propuestas pero a menudo corresponden a un conjunto de ecuaciones que dependen del régimen del flujo. Y en algunos casos, ellas no son aplicables a todo el rango de valores (ver comparaciones en Cheng (1997); Jiménez – Madsen (2003); entre otras) que pueden inducir problemas numéricos.

El factor de forma de las partículas generalmente es cuantificado por el factor de Corey (1949), el cual está definido por $CSF = \frac{c}{(ab)^{0.5}}$, donde a, b y c son los ejes largo, intermedio y corto de una partícula con forma de elipsoide, respectivamente.

Entre más cercano a cero sea el CSF, más plana será la partícula o tenderá a una forma muy alargada y, por el contrario, entre más cercano a 1, la partícula se asemejará a una esfera. Dietrich (1982) realizó un estudio exhaustivo en torno a esto, mostrándose en la figura 1 tal esfuerzo.

Otro factor importante a considerar es la redondez (P), que es usualmente considerada para analizar la forma natural esférica y aplanada de las partículas. Desde un punto de vista práctico, P puede ser estimada utilizando la escala de Briggs *et al.* (1962), variando de 0 (perfectamente angular) a 6 (perfectamente redondeada), en donde valores usuales de $P = 2.0$ para granos aplanados y $P = 3.5$ para arenas naturales.

En la figura 2, el Re está basado en las relaciones de Dietrich (1982) contra el d_* para partículas elípticas. Esto parece que P también afecta la velocidad de caída, afectándola sobremanera para Re altos. De las observaciones de Dietrich, P afecta más a partículas esféricas que a partículas elípticas.

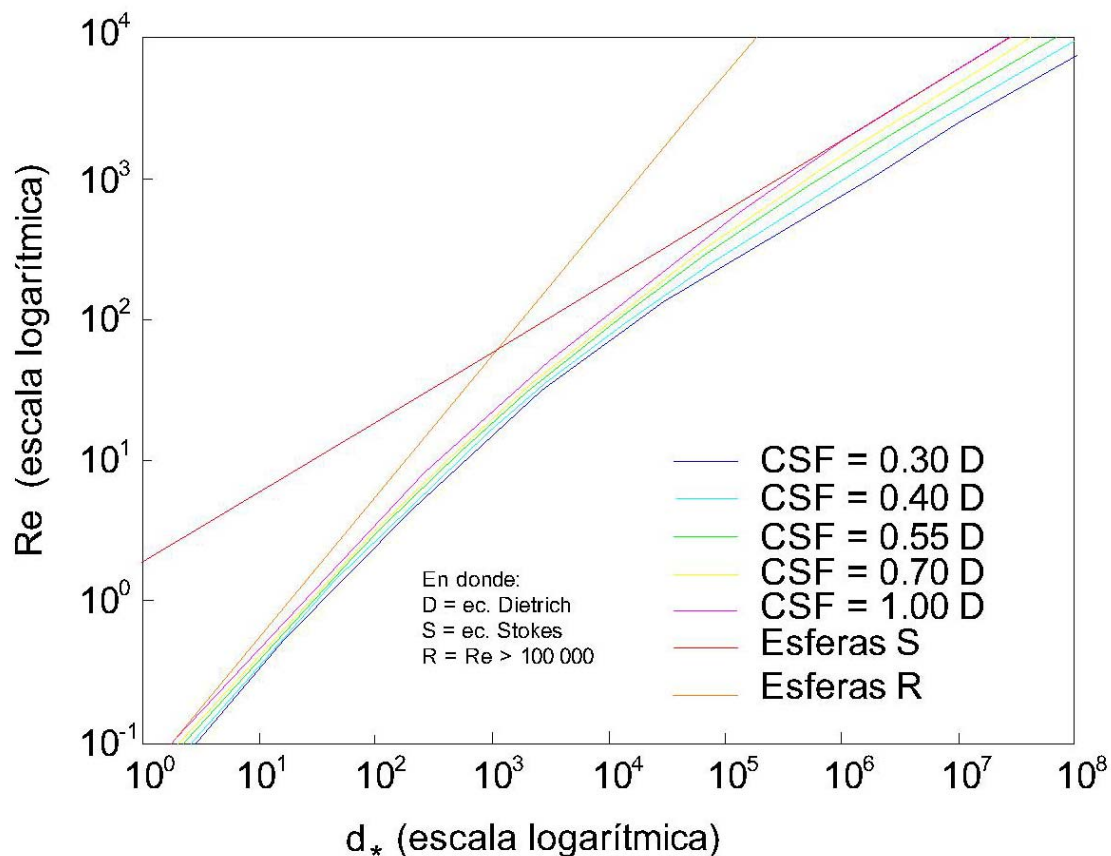


Figura 1 Número de Reynolds como funciones del parámetro adimensional de la partícula d_* y el factor de Corey CSF acordes a la ecuación propuesta por Dietrich, Camenen (2007)

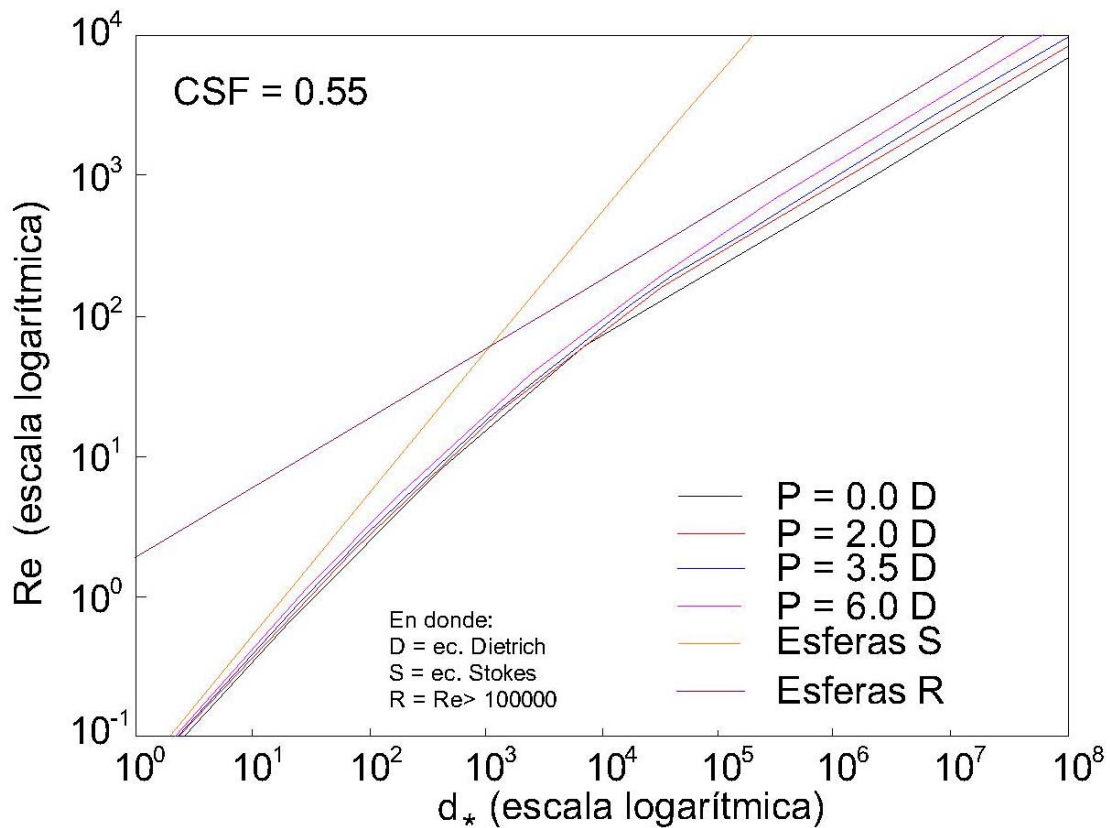


Figura 2 Número de Reynolds como función de d_* y de la redondez, acorde a la expresión empírica propuesta por Dietrich para partículas elípticas, Camenen (2007)

Utilizando los resultados de Dietrich, es posible calibrar las variables A , B y m de la ecuación (26) como funciones del CSF y de P empleando funciones sinusoidales simples. Tales calibraciones fueron hechas con el conjunto de datos experimentales obtenidas en el trabajo de Dietrich. A continuación se presentan las relaciones que participan en el cálculo de la velocidad de caída, así como las curvas que les dieron origen.

$$\begin{aligned}
 A &= a_1 + a_2 \left[1 - \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} CSF \right) \right]^{a_3} \\
 B &= b_1 + b_2 \left[1 - \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} CSF \right) \right]^{b_3} \\
 m &= m_1 \text{sen}^{m_2} \left(\frac{\pi}{2} CSF \right)
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

donde:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 24; \quad b_1 = 0.39 + 0.22(6 - P); \quad m_1 = 1.2 + 0.12P \\
 a_2 &= 100; \quad b_2 = 20; \quad m_2 = 0.47 \\
 a_3 &= 2.1 + 0.06P; \quad b_3 = 1.75 + 0.35P
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

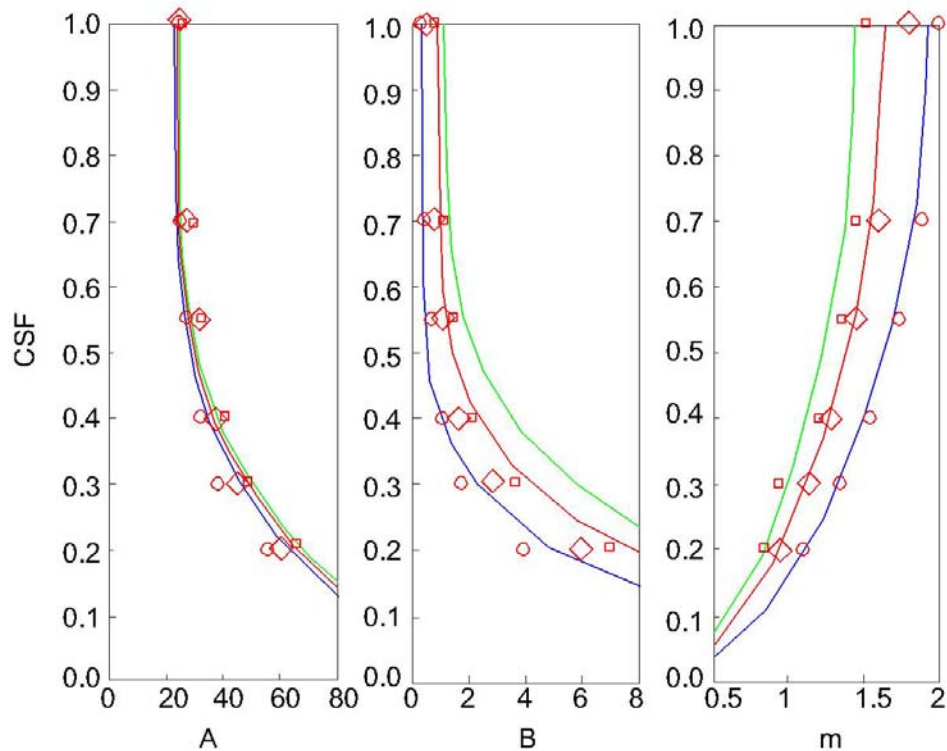


Figura 3 Calibración de los coeficientes A, B y m como funciones del CSF y P utilizando los resultados de Dietrich (1982), representados con círculos para un $P = 6$, diamantes para un $P = 3.5$ y cuadrados para un $P = 2$. La ecuación (30) está representada por las tres líneas que se muestran, para la línea azul corresponde un $P = 6.0$, para la línea de roja un $P = 3.5$ y para la línea verde un $P = 2.0$

Por último, cabe señalar que para esferas ($CSF = 1$ y $P = 6$), A, B y m de (30) se reducen a valores propuestos por Dallavalle (1948). Asumiendo una arena típica ($CSF = 0.7$ y $P = 3.5$), los coeficientes antes mencionados se reducen a coeficientes dados por Cheng, excepto para A, cuyo valor sería 32.

3.- OBJETIVO

Como parte de la caracterización que se está realizando en la línea de costa de la península de Yucatán, la velocidad de caída del material que forma parte de las playas de tal región resulta indispensable. Por tal motivo, el objetivo de esta tesis es determinar la o las formulaciones empíricas que puede utilizarse para llevar a cabo la caracterización de la velocidad de caída en la línea costera de la península de Yucatán.

De esta manera, al contar con expresiones que representen la realidad de la velocidad de caída de la mejor manera posible, se tendrá una mejor precisión de los resultados, lo cual inducirá menores errores en la estimación de las tasas de transporte de sedimentos.

Con la determinación de las expresiones que mejor reproduzcan el comportamiento mecánico de las arenas, se estará en la posibilidad de categorizar a la región en estudio tanto por estado de la República Mexicana (por el momento



Quintana Roo, Yucatán y Campeche), como por zona del perfil de playa (zona backshore, foreshore y offshore).

4.- METODOLOGÍA

La metodología que se llevó a cabo y tomando en cuenta la instrumentación empleada conllevaron a un modelo de medición sencillo, y aún cuando su naturaleza es simple, se cuidó que los resultados que se obtuvieran llevaran consigo un error mínimo inherente debido a la participación del ser humano y de las posibles imperfecciones que tuviera la instrumentación empleada.

Como se verá más adelante, la metodología empleada resulta conveniente para su uso, consolidándose de esta manera un método de trabajo para determinar este parámetro que, como se pudo apreciar en el estado del arte, resulta indispensable tener a la mano su valor numérico, el cual se ve involucrado en muchas aplicaciones.

5.- ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La presente tesis fue desarrollada de tal manera que se hace un recorrido por un marco teórico, en el cual se encuentran inmersos las fuerzas y procesos presentes en el ambiente costero, haciendo sentir lo anterior específicamente en el perfil de playa, para que de esta manera se esté aterrizando en uno de los parámetros que participa activamente en esta dinámica, que es la velocidad de caída del material en cuestión.

Siguiendo esta línea, se hace una revisión de los elementos integrados en el cálculo de la velocidad de caída, y al mismo tiempo tales elementos forman parte de la caracterización que se está realizando en las playas mexicanas, en particular de las playas de la península de Yucatán.

En una tercera parte o sección del presente trabajo, se describe la metodología empleada así como el modelo que se utilizó, con lo cual se pudo obtener las mediciones suficientes y necesarias para el cálculo de la velocidad de caída.

En un cuarto apartado se realizó el análisis de las mediciones hechas en el laboratorio, resultando a partir de ello las ecuaciones de velocidad de caída de mejor comportamiento o de mejor ajuste a los datos experimentales, permitiendo de esta manera una zonificación de la península de Yucatán por ecuación.

Finalmente, en una última sección que conforma el presente estudio, se abordan las conclusiones derivadas de este análisis, presentando de manera breve la interpretación de los resultados obtenidos, además de confirmar una metodología de laboratorio que resulta práctica para su aplicación, y adicionalmente tener a la mano resultados experimentales que avalen la aplicación de expresiones que permitan obtener este parámetro tan importante.