



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTUDIO DE EROSIÓN EN HOLBOX
DESPUÉS DEL HURACÁN WILMA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

CHRISTIAN GARRIDO VELASCO

TUTORA PRINCIPAL

DRA. ANA MARÍA MARTÍNEZ VAZQUEZ



MÉXICO, D.F.

2007



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	Prof. FRANCISCO LOPEZ SERRANO RAMOS
Vocal	Prof. JUAN MARIO MORALES CABRERA
Secretario	Prof. ANA MARIA MARTINEZ VAZQUEZ
1er. Suplente	Prof. MARIANO PEREZ CAMACHO
2º. Suplente	Prof. ALFONSO DURAN MORENO

Sitio en donde se desarrolló el tema:

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Nombre completo y firma del asesor del tema

DRA. ANA MARIA MARTINEZ VAZQUEZ

Nombre completo y firma del sustentante

CHRISTIAN GARRIDO VELASCO

Dedico esta tesis . . .

Las obras y la palabra de Dios

Al músico principal. Salmo de David.

Los cielos cuentan la gloria de Dios, y el firmamento anuncia la obra de sus manos.

Un día emite palabra a otro día, y una noche declara a otra noche sabiduría.

No hay lenguaje, ni palabras, ni es oída su voz.

Por toda la tierra salió su voz, y hasta el extremo del mundo sus palabras.

En ellos puso tabernáculo para el sol;
Y éste, como esposo que sale de su tálamo, se alegra cuál gigante para correr el camino.
De un extremo de los cielos es su salida, y su curso hasta el término de ellos; y nada hay
que se esconda de su calor.

La ley de Jehová es perfecta, que convierte el alma;
El testimonio de Jehová es fiel, que hace sabio al sencillo.
Los mandamientos de Jehová son rectos, que alegran el corazón; el precepto de Jehová
es puro, que alumbra los ojos.
El temor de Jehová es limpio, que permanece para siempre; los juicios de Jehová son
verdad, todos justos.
Deseables son más que el oro, y más que mucho oro afinado; y dulces más que la miel,
y que la que destila el panal.

Tu siervo es además amonestado con ellos; en guardarlos hay grande galardón.
¿Quién podrá entender sus propios errores? Líbrame de los que me son ocultos.
Preserva también a tu siervo de las soberbias; que no se enseñoreen de mí; entonces seré
íntegro, y estaré limpio de gran rebelión.
Sean gratos los dichos de mi boca y la meditación de mi corazón delante de ti, Oh
Jehová, roca mía, y redentor mío.

Salmos 19:1-14

A mis padres

Quienes con tanto ahínco, amor y sacrificio nunca han dejado de demostrarme su apoyo
y su cariño. Les agradezco infinitamente por los valores de trabajo y esfuerzo constante
que siempre me inculcaron.

A mi hermano

Por las interminables horas de compañía, amor, alegría, juegos, consejos, pláticas y
discusiones.

A mis abuelos

Por su tiempo, sus consejos, sus cuidados, su bendición, su calor y su apoyo
incondicional.

A mi familia

Por todos esos maravillosos recuerdos de navidades, primadas, fiestas, risas y travesuras con los primos que nunca fueron descubiertas, y de los regaños por las que sí lo fueron.

A todos mis amigos

Los de la infancia y la inocencia, los de la primaria y el juego, la banda de la prepa 6 y el relajo, los de la facultad con sus desveladas, proyectos y el dominó. Con quienes he compartido tantos reveses, consejos, viajes, anécdotas y desventuras.

A mis maestros

Gracias por sus enseñanzas en la escuela y en la vida, por ayudarme a ser menos ignorante, por todas las veces que escucharon y respondieron mis preguntas. Gracias por motivarme continuamente para ser un mejor estudiante y un mejor ser humano.

A la memoria de

Mi querida y amada abuelita Ada Esther Muñoz Garrido y de mi primo Luis García Sinta, que en paz descansen.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP) que por medio de Juan Pérez y de Francisco Remolina nos brindaron todo su apoyo.

También queremos agradecer al Laboratorio de Ingeniería Química por prestarnos el tamiz para realizar nuestras mediciones.

Y por último queremos agradecer al taller del Instituto de Investigaciones en Materiales por su apoyo para la construcción del tubo de plástico con el que pudimos realizar los experimentos de velocidad de caída del sedimento en una columna de agua.

CONTENIDO

		Página
	DEDICATORIAS	3
	AGRADECIMIENTOS	5
Capítulo I.	INTRODUCCION	7
Capítulo II.	ANTECEDENTES	22
	OBJETIVOS	25
Capítulo III.	PARTE EXPERIMENTAL	26
Capítulo IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
Capítulo V.	CONCLUSIONES	54
	BIBLIOGRAFIA	56

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son la interfase entre el mar y la tierra firme, por lo que son ambientes geológicos únicos tanto en su composición como en los procesos físicos que los afectan. Muchas costas cuentan con playas compuestas por sedimento suelto como grava, arena o arcilla y todas sufren de la acción constante de las olas, las corrientes y los vientos. A pesar de los distintos climas que existen alrededor del mundo y de las variaciones en la composición de la línea de costa, la naturaleza y el comportamiento de las playas es en su mayoría muy parecido.

El mar es uno de los depósitos de la energía proveniente de nuestra estrella solar, ya que no sólo regula la temperatura de nuestro planeta. También captura a la energía solar a través del movimiento del agua en forma de olas (Kinsman, 1965), las cuales se producen por el movimiento de grandes masas de aire sobre la vasta superficie del océano, movimiento que a su vez es generado por una diferencia de temperatura. Las olas transportan la energía recibida a lo largo de enormes distancias, gracias a que la resistencia del agua a fluir (viscosidad) es baja. Toda esta energía acumulada se transmite a una pequeña franja de tierra distribuida alrededor de las cuencas de los océanos del mundo, donde las olas finalmente rompen y la energía derivada del viento se disipa en forma de una caótica turbulencia, que moviliza y suspende el sedimento que compone la playa.

La franja de tierra donde las olas rompen se conoce como “zona surf” (USACE, 1995). El rompimiento de las olas también crea corrientes cercanas a la playa que hacen fluir al agua de manera paralela o perpendicular a la costa. Las corrientes de agua pueden acarrear al sedimento y transportar volúmenes de arena de hasta cientos o miles de metros cúbicos al año. La cantidad depende de las características geológicas del lugar. Distintas cantidades generan la extraordinaria diversidad en las formas y las características de las líneas costeras del mundo, que son el resultado del ambiente y de los procesos geológicos locales.

Debido a la gran diversidad de las zonas costeras, y a la necesidad de estudiar la dinámica de las costas para evitar o prevenir la erosión de las playas, surge la idea de hacer una clasificación.

Dentro de la clasificación de las distintas formas y configuraciones de las zonas costeras del mundo encontramos una de particular interés conocida como "isla de barrera" (Capurro, 2003), que se encuentra a lo largo una buena extensión litoral de nuestro planeta. Las islas de barrera predominan en latitudes medias y en áreas de pequeños cambios en la altura de la marea. En nuestro país se presentan dentro de la zona costera de la península de Yucatán, desde las cercanías de Isla Aguada Campeche, hasta Chetumal, Quintana Roo. Abarcan una longitud aproximada de 1,100 Km lo que representa el 9.89 % de los 11,122 Km. de litoral (no insular) con los que cuenta el país.

La isla de barrera es una porción de tierra que está en continuo movimiento, y cuya forma cambia de manera continua. En su ciclo natural sufre el desgaste de la isla en su lado oceánico y su crecimiento en el costado lagunar, por lo que en este tipo de islas la erosión es parte del proceso natural. El resultado final es un litoral sin playas con una línea de costa cubierta por manglares profusos que llegan hasta su contacto con el mar (Capurro, 2003). Esto muestra que un factor que evita el movimiento de este tipo de islas es la vegetación, ya que al crecer árboles las raíces evitan la erosión y le proporcionan cohesión al sedimento. Otro factor que ayuda a disminuir el problema de la erosión, y que se encuentra presente en la mayoría de los litorales caribeños, es la presencia de una extensa barrera de arrecifes de coral a flor de agua, que actúa como rompeolas y amortigua la erosión generada por las olas y las corrientes. En este caso el proceso consiste en disminuir la fuerza de las olas. De esta forma podemos decir que existen dos formas de disminuir la erosión: con vegetación que ayuda a fijar el sedimento, o con rompeolas o arrecifes de coral que disminuyen la fuerza de las olas.

Tanto para el estudio de las islas de barrera como para el análisis de la erosión en distintas zonas costeras, un parámetro importante que es necesario conocer es el perfil de playa.

El perfil de playa es un corte imaginario y longitudinal perpendicular a la línea de costa (USACE, 1995), que generalmente está constituido por el mar abierto, el mar cerca de la playa o superficial, la playa, la zona surf y la costa o litoral, como se muestra en la Figura 1. La forma del perfil de playa es el resultado de la suma de las fuerzas naturales que actúan sobre la arena, siendo las olas la principal causa de cambio. Las olas disipan la energía que transportan cuando se impactan con el frente de la playa y generan dos tipos de corrientes. La primera corriente se desplaza a lo largo y la segunda se desplaza ortogonal a la línea de playa (Dean and Dalrymple, 1991). Estas corrientes son sumamente importantes porque son las responsables de realizar el transporte de sedimentos, ya sea suspendiendo o depositando la arena, y su efecto se traduce finalmente en zonas de erosión y sedimentación a lo largo de la playa.

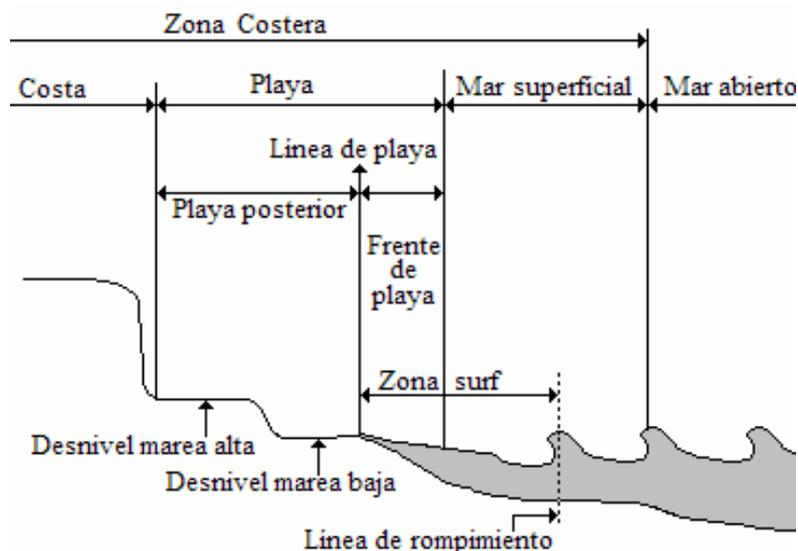


Figura 1. Perfil de playa, se reconocen los distintos términos utilizados (adaptado del Engineer Manual 1110-2-1810, 1995).

Al ser las olas la principal causa de cambio en la playa, la parte del perfil que más se ve afectada es la zona comprendida entre la línea de rompimiento (donde comienzan a romper las olas) y la línea de playa (la línea que divide la

arena seca de la arena mojada), que es precisamente la “zona surf”, y que también es la más dinámica (USACE, 1995).

En esta tesis se estudia en específico el caso de erosión de Holbox una isla de barrera situada en la costa de la península de Yucatán, para lo cual se analizarán los aspectos más importantes como son el tamaño de la partícula de arena, las características físicas de la costa y el movimiento de las olas. En la isla de Holbox, al igual que en otros sitios, es de particular importancia entender las variables que más contribuyen a la erosión de la playa, con el objeto de poder controlarla. La erosión afecta la economía de la comunidad, ya que la pérdida de playa amenaza la extensión territorial de las propiedades. Al ser una isla de 5 Km de ancho aproximadamente, la erosión se vuelve un problema grave para la supervivencia del pueblo. En este sentido, el objetivo principal del trabajo es estudiar los aspectos que más afectan la erosión de la playa, para con esto dar elementos para su prevención. Para este estudio es fundamental utilizar conocimientos de fenómenos de transporte como el transporte de masa y de energía, también se necesitan emplear algunas de las relaciones entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de rozamiento que se expresan como números adimensionales y que describen el comportamiento del fluido.

El presente trabajo de investigación fue motivado por dos razones importantes. La primera se refiere a la prioridad ambiental por preservar un área protegida, ya que la erosión amenaza la existencia de un ecosistema con una gran biodiversidad, tanto de aves terrestres migratorias que hacen de Holbox su primer sitio de descanso, como de especies protegidas reportadas en el área como lo son las tortugas marinas y el manatí.

El segundo motivo que nos impulsó a estudiar el problema de la erosión responde a las preocupaciones de la comunidad de la isla, que encuentra sus actividades económicas en la pesca y principalmente en el turismo, ya que la erosión natural de la playa es agudizada por la presencia de los espigones y no sólo amenaza la supervivencia del pueblo entero a largo plazo, también la economía sufre los estragos de la erosión en el corto plazo. El problema

económico se relaciona con la pérdida de la playa del terreno de los hoteles. De acuerdo a la legislación vigente establecida en la Ley General de Bienes Nacionales publicada el 20 de mayo de 2004 (Artículo 119, fracción I), cuando la costa presente playas, la Zona Federal Marítimo Terrestre (ZFMT) estará constituida por la faja de 20.00 metros de ancho de tierra firme, transitable y contigua a las playas (ver Figura 2). Por playa se entiende (Artículo 29, fracción IV), las partes de tierra que por virtud de la marea cubre y descubre el agua, desde los límites de mayor reflujó hasta los límites de mayor flujo anuales, es decir desde la bajamar hasta el pleamar. Como la playa se está perdiendo, la ZFMT está cada vez más cerca de los límites del terreno de los hoteles, incluso parte de los hoteles ya se encuentran en la ZFMT. Por ley los inmuebles que se encuentran en esta zona pasan a ser propiedad del estado.

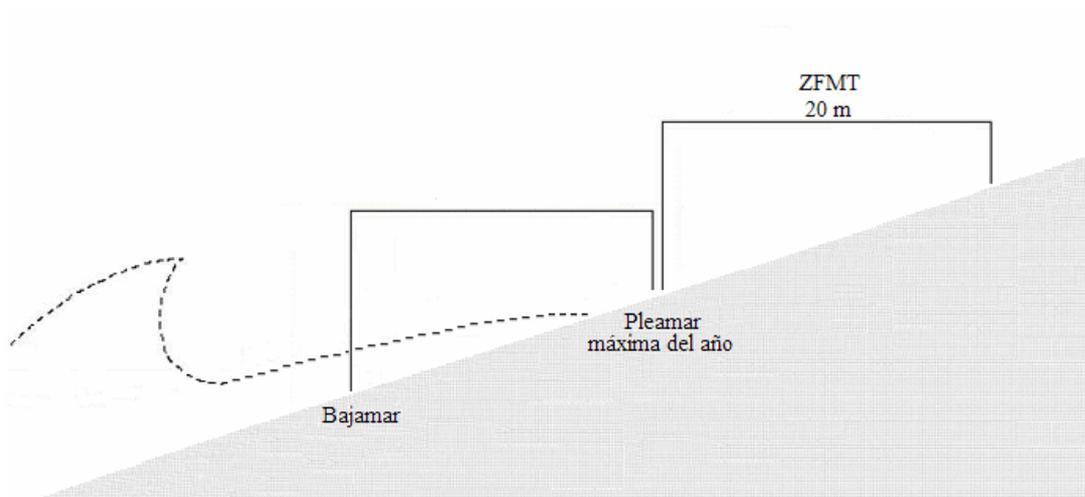


Figura 2. Esquema de la Zona Federal Marítimo Terrestre (ZFMT).

Estas dos razones, la pérdida de un área natural protegida y la pérdida de la propiedad de los hoteles, nos motivaron a estudiar el problema para dar elementos para su prevención.

La isla de Holbox es una "isla de barrera", es decir, una isla que acumula sedimentos como producto de la erosión marina y de los procesos hidrodinámicos costeros. Es una extensa isla sedimentaria, paralela a la línea de costa continental, con lagunas costeras someras y humedales que las separan entre sí. La isla de Holbox de aproximadamente 80 km² está situada

en la punta noreste de la península de Yucatán, justo en la frontera que divide al Mar Caribe del Golfo de México, entre los paralelos 21°29'02" y 21°27'47" latitud norte y los meridianos 87°21'21" y 87°19'50" longitud oeste, (Figura 3). Se encuentra en el Municipio de Lázaro Cárdenas, en la porción Noroeste del Estado de Quintana Roo. Forma parte del Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) conocida como Yum Balam, que fue decretada Área Natural Federal Protegida el 6 de junio de 1994, de acuerdo a lo que se publicó en el Diario Oficial de la Federación. El área natural protegida de Yum Balam tiene una superficie de 154,052.25 Ha. En Holbox no existe la barrera coralina que se encuentra en Cancún por ejemplo, por lo que la isla está en general poco protegida contra la erosión.



Figura 3. Península de Yucatán. Holbox se encuentra en el recuadro.

Según el censo de población del INEGI del 2000, en Holbox se encuentran 1276 habitantes. Para el 2003, año en que se llevó a cabo un estudio socioeconómico, se contaron 2100 personas, lo que muestra la alta tasa de crecimiento de la población. La infraestructura urbana en la isla es muy pobre, contando con casas, mini supermercados, pequeños hoteles, cabañas, un palacio municipal, una escuela primaria y una pequeña planta de luz que

funciona con diesel. Los caminos no están pavimentados y los únicos vehículos motorizados son motocicletas de tres llantas y carros de golf. La población se dedica principalmente a la pesca y al turismo. Es una zona decretada Área Natural Protegida ya que cumple ciertas características, como tener un hábitat de importancia para especies migratorias y poseer diversidad y riqueza biológica, lo que se refleja en la existencia de especies endémicas, raras y en peligro de extinción. En la isla también se encuentran vestigios arqueológicos y se registran acervos culturales e históricos de los indígenas de la región.

El problema en Holbox se remonta cuarenta años atrás aproximadamente cuando el amarillamiento letal del cocotero (una enfermedad que afecta principalmente especies dentro de la familia *Palmae*) atacó las palmeras de la isla (S.J. Eden-Green, 1995). Una vez que la enfermedad aparece en una región o isla la población de cocoteros disminuye hasta en un 80%. Los cocoteros no sólo protegen a la playa del desgaste del mar, sino también del efecto erosivo del aire (Hsu, 1988). Por ello se cree que la erosión se convirtió en un problema al desaparecer las palmeras. Para intentar remediar el problema el gobierno llevó a cabo la construcción de seis espigones en 1970, a los cuales les siguieron doce más en 1980. Un espigón es una estructura perpendicular a la costa (ver Figura 4), diseñada para atrapar arena del sistema litoral o para mantener arena en un lugar determinado. Son instalados ya sea como una estructura simple o en grupo. Cuando son colocados en grupo se conocen como campo de espigones. Los espigones se construyen con la intención de disminuir la erosión de la costa, o para evitar la sedimentación en zonas que por motivos marítimos necesitan mantener cierta profundidad. A pesar de que se construyen con otro propósito en ocasiones los espigones promueven la erosión, ya que no permiten el paso del transporte horizontal de sedimentos que lo transporta y deposita en la playa (Fulford, 1985), lo que ocasiona que las corrientes depositen el sedimento transportado en otro sitio.

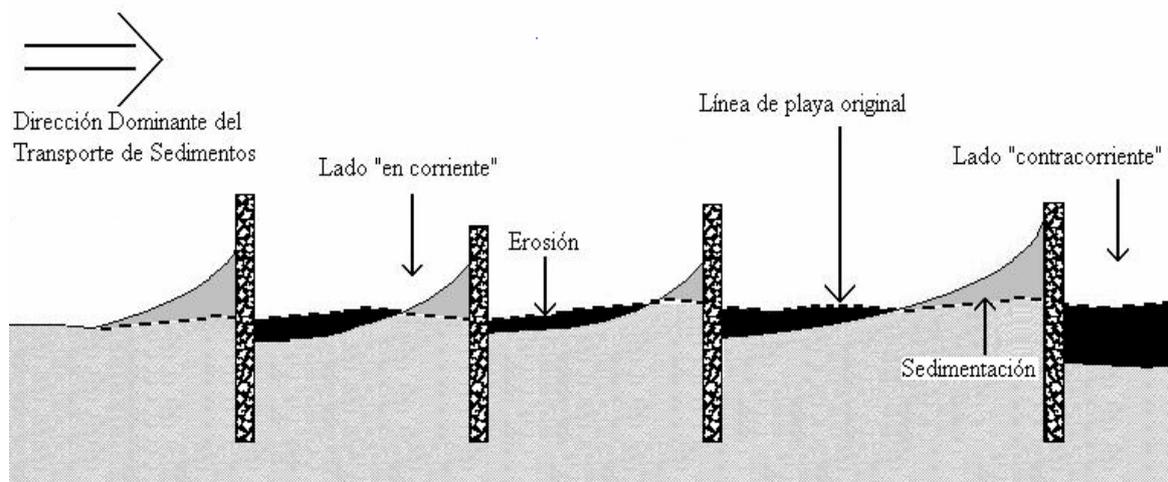


Figura 4. Efectos de la interacción de los espigones con el transporte de sedimentos.

La acumulación de la arena alrededor de los espigones nos puede indicar la dirección dominante del transporte de sedimentos que se desplaza a lo largo de la línea de playa (USACE, 1995), al cual llamaremos simplemente transporte horizontal de sedimentos.

Podemos identificar la dirección dominante del transporte horizontal gracias a la modificación que los espigones generan en la línea de playa original, que se transforma de una línea continua con cambios suaves en su pendiente a una accidentada con forma de "dientes". El problema con los espigones es que al mismo tiempo que generan la sedimentación de la arena en el lado del espigón que está "en corriente" a la dirección dominante del transporte, también producen una amplificación de la erosión en el lado que está "contra corriente" a la dirección dominante del transporte horizontal de sedimentos (ver Figura 4).

Con la presencia de los espigones, lo que más se afecta es el perfil de playa, los estudios muestran que éste varía con la profundidad del agua y con la distancia mar adentro a partir de la línea de playa (Dean and Dalrymple, 2002). Para un grano de arena de un tamaño dado habrá un único *perfil de playa en equilibrio* con una cierta marea y oleaje característicos de la playa; esto es, las fuerzas destructivas y constructivas que actúan sobre los granos de arena están balanceadas. Si cualquiera de estas condiciones de oleaje y marea se altera, como por ejemplo en una situación de tormenta o huracán (como

Wilma), se formará un nuevo perfil y el anterior evolucionará hacia una nueva forma en equilibrio.

Los principales factores responsables de la forma del perfil de la playa son (Dean and Dalrymple, 2002):

- Tamaño del sedimento.
- Altura de la ola.
- Periodo de la ola.
- Nivel del agua.

TAMAÑO DEL SEDIMENTO

El tamaño del sedimento es el diámetro de la partícula de arena y se mide al hacer pasar el sedimento por una serie de tamices. Los tamices son tambores de metal que se colocan uno sobre el otro y que en su extremo inferior tienen una malla de metal con una apertura característica, donde el tambor anterior tiene una apertura de malla más grande que el siguiente tambor. Relacionada con el tamaño, una propiedad hidrodinámica importante de la partícula de arena es su velocidad de caída, que es la velocidad final que alcanza al caer bajo la acción de la gravedad en una columna de agua. La velocidad de caída depende del tamaño del sedimento suspendido y de la densidad del agua. Así, una partícula grande permanecerá suspendida por menos tiempo en la columna que una partícula más chica.

ALTURA DE LA OLA

La altura de la ola es la distancia vertical que separa la cresta de la ola del valle, la depresión más baja de la ola (marcada con la letra H en la Figura 5). En su mayor parte las olas son generadas por la fuerza cortante del aire. Estas olas transportan la energía a través de distancias muy grandes, y se caracterizan porque su velocidad es independiente de la profundidad del mar, pero dependiente de su propia longitud de ola (Havelock, 1918). La energía de una ola está relacionada con el cuadrado de su altura y generalmente se mide

en energía por unidad de área de superficie de agua. Si definimos la altura de la ola como H, la energía por área de superficie es (Dean and Dalrymple, 2002):

$$E = \frac{1}{8} * \rho * g * H^2 \quad (1)$$

En donde ρ es la densidad del agua en kg/m^3 y g es la aceleración de la gravedad. La energía de la ola es lo que finalmente produce el movimiento del sedimento, por lo que se considera a la altura de las olas de una región en particular como uno de los principales factores responsables de la forma del perfil de playa.

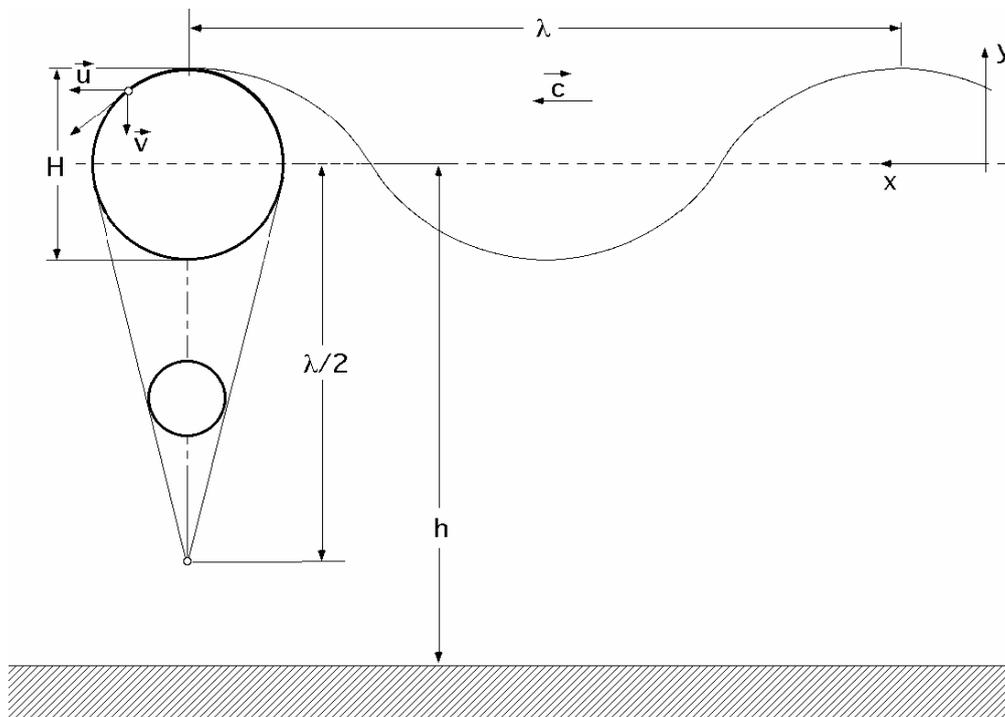


Figura 5. Modelo de ola lineal donde: λ es la longitud de la ola, h es la profundidad desde el nivel medio del agua hasta el lecho, H es la distancia entre el valle y la cresta de la ola y c es la velocidad a la que viaja la ola.

PERIODO DE LA OLA

El periodo es el tiempo que separa el paso de dos crestas sucesivas delante de un punto fijo. Las olas con periodos grandes provocan que el sedimento se transporte hacia la playa y que la línea de playa crezca hacia el mar (Dean and Dalrymple, 2002), ya que la inclinación promedio de la pendiente de la playa es

mayor para estas olas que para otras de periodos menores. Esto está relacionado fuertemente con la velocidad de caída del sedimento, ya que las olas suspenden el sedimento y si éste cae al lecho antes de que otra ola llegue, entonces el sedimento se queda en la zona surf. Si el sedimento continúa suspendido cuando llega una segunda ola, el reflujó de ésta lo desplazará hacia fuera de la zona surf.

NIVEL DEL AGUA

El nivel del agua es la distancia vertical que separa el lecho marino y la superficie del mar. Otra forma de llamarlo es la profundidad del mar que se mide por medio de una batimetría. El aumento del nivel del agua requiere de un nuevo perfil de equilibrio, uno más elevado y desplazado hacia la línea de playa. Esto provoca que haya una recesión de la línea de playa y que el sedimento sea transportado hacia el mar.

La zona que comprende nuestro caso de estudio, la zona surf, es la más dinámica de la playa y es precisamente esta característica, el cambio en su forma con respecto al tiempo, lo que la hace tan difícil de estudiar. En la actualidad existen muchos modelos matemáticos que permiten predecir su forma futura, pero para que los resultados sean “reales” se necesitan muchos datos de muchas variables durante un largo periodo de tiempo (mínimo de un año), con el afán de reducir el error en los resultados. Muchos de estos datos son imposibles de reunir si no se cuenta con los aparatos necesarios. Es por ello que para simplificar el presente estudio de erosión recurrimos primero al modelo de ola lineal (Airy, 1845) para calcular la altura de las olas, después al modelo de Larson (Dean and Dalrymple, 2002) para calcular la energía de las olas transmitida y disipada en la playa. Por último también fue necesario calcular parámetros adimensionales como el número de Reynolds y el número de Shields, a partir de las características presentes en Holbox. Con esto se puede modelar el grado de erosión en la región.

MODELO DE OLA LINEAL

La mayoría de las olas que estamos acostumbrados a observar en la superficie del mar son olas cortas o de viento, en donde la velocidad c es independiente de la profundidad h pero dependiente de la propia longitud de onda λ (ver Figura 5). Por otra parte, la altura de la ola H sí depende de la profundidad del mar. El modelo más simple para describir el movimiento del agua es el modelo de ola de Airy o modelo de ola lineal, que se basa en las siguientes suposiciones: a) el agua se comporta como un fluido incompresible; b) el movimiento del flujo es irrotacional (implica que el agua no tiene viscosidad, lo que es una suposición falsa, pero funciona bastante bien); c) las olas tienen amplitudes muy pequeñas; y d) el lecho es plano e impermeable. De hecho la última suposición es la principal razón por la que se decidió utilizar esta teoría. Tanto en Holbox como en el resto de la península de Yucatán la distancia entre la superficie y el lecho marino (profundidad del mar) es corta y constante a lo largo de distancias muy grandes, ya que a los 5 Km. mar adentro la profundidad no rebasa los 5m, como se verá mas adelante en este estudio.

El modelo de ola lineal relaciona la longitud de onda con el periodo de la ola y la profundidad del mar. A esa relación se le llama relación de dispersión de frecuencias de olas ya que las que tienen periodos grandes se desplazan más rápido que las olas con periodos cortos. Esta relación se expresa a continuación:

$$k_1 = \frac{2 * \pi}{\lambda},$$
$$\lambda = \frac{g}{2 * \pi} * T^2 * \tanh^*(k_1 * h_b)$$

donde k_1 es el número de olas y h_b es la profundidad. Esta ecuación muestra que la longitud de onda de la ola decrece monotónicamente a medida que decrece la profundidad, debido al comportamiento de la función $\tanh(k_1 * h_b)$ que aumenta linealmente con valores pequeños de h_b , pero después se vuelve asintótica a la unidad en profundidades grandes. La ecuación es difícil de

resolver debido a que la longitud de onda de la ola aparece en el argumento de la tangente hiperbólica, por lo que es necesario iterar para encontrar una solución.

MODELO DE LARSON

Este modelo contempla que el perfil de playa se encuentra en un equilibrio dinámico y se basa en el hecho de que la turbulencia en la zona surf, generada por el rompimiento de las olas, es la fuerza transformadora dominante y responsable de este constante cambio; sin embargo, no toma en consideración fenómenos climáticos que se presentan unas cuantas veces al año o cada cien años, como lo son los huracanes y los tsunamis.

El modelo se basa en un concepto muy simple. Una parte de la energía que transporta la ola será disipada en la playa, generando resaca que moviliza el sedimento. Al suspenderlo en la columna de agua la energía restante también transporta al sedimento, ya que la ola no se queda sin energía sino que “rebota” y regresa al mar arrastrando consigo partículas de arena. En otras palabras, la cantidad de turbulencia se representa por la cantidad de energía disipada por unidad de volumen de agua de la ola al momento de romper.

Ahora bien, si consideramos que el sedimento con un diámetro dado es capaz de disipar una cierta cantidad de energía de ola por unidad de volumen de agua, entonces la energía disipada por unidad de volumen puede ser considerada como representativa de la turbulencia por unidad de volumen. Esta disipación uniforme de la energía por unidad de volumen para un grano de arena de un diámetro dado la llamaremos D^* ($\text{Kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{m}^{-1}$). La aproximación de la energía disipada depende de la profundidad de la ola que se impacta en la playa y se expresa de la siguiente manera:

$$D * = \frac{K}{8} * \rho * g * \sqrt{g * h_b} * (\kappa^2 - \gamma^2)$$

donde K (s) es una constante empírica tomada como 0.17, ρ (Kg*m⁻³) es la densidad del agua, g (m*s⁻²) es la gravedad, h_b (m) es la profundidad a la que rompe la ola, κ es la relación de la profundidad del mar entre la altura de la ola cuyo valor es 0.8. Por último γ es la relación de la profundidad del mar entre la altura de la ola al momento de romper y su valor es de 0.4. Esta relación se refiere a la situación que ocurre cuando la ola alcanza una cierta profundidad y ya no se puede soportar así misma, se vuelve inestable y finalmente rompe (Dean and Dalrymple, 2002).

MOVIMIENTO INCIPIENTE DE ARENA

En este punto es preciso señalar que el modelo de ola lineal nos sirve para calcular la altura y la profundidad a la que rompe la ola. Con esta información y el modelo de Larson podemos predecir la cantidad de energía que será liberada en la playa. Para predecir si esta energía disipada en la playa será suficiente para generar el desplazamiento del sedimento de su lugar de descanso original, es necesario recurrir a la relación de dos números adimensionales. El primero es el número de Reynolds que por lo general se usa para indicar la velocidad de flujo de un fluido dentro de una tubería, pero que en este contexto se usa para indicar la velocidad a la que se mueve la partícula de arena y se define como $Re = (w * d) / \nu$, donde w es la velocidad de caída del sedimento, d es el diámetro del sedimento y ν es la viscosidad cinemática. El otro parámetro adimensional que necesitamos para predecir el movimiento del sedimento es el número de Shields (Ψ), que es una relación entre el peso sumergido de la partícula de arena que la mantiene inmóvil y la fuerza cortante en el lecho que actúa para movilizar el sedimento. Se define como

$$\Psi = \frac{\tau}{g * d * (\rho_a - \rho)}$$

donde τ es la fuerza cortante en el lecho, ρ_a es la densidad de la arena, ρ es la densidad del agua, g es la gravedad y d es el diámetro de la partícula de arena. En este punto nos enfrentamos con un problema y es que para calcular la fuerza cortante necesitamos conocer el coeficiente de fricción en el lecho, que sólo se puede obtener experimentalmente. Es por eso que sustituimos la fuerza cortante por el parámetro A , que es la mitad de la excursión orbital de la partícula de arena durante el tiempo que transcurre entre el paso de dos olas sucesivas, y se define como:

$$H = \kappa * h_b, \sigma = \frac{2 * \pi}{T}, k_1 = \frac{2 * \pi}{\lambda}$$

$$A = \frac{H * \sigma}{2 * \sinh * (k_1 * h_b)}$$

donde σ es la velocidad angular, H es la altura de la ola y k_1 es el número de olas.

El número de Shields nos indica si el lecho de arena está en movimiento y en qué forma se está moviendo. Esto se traduce finalmente en la forma del lecho de arena, ya que al desplazarse se producen “arrugas” en el piso. Una vez que el sedimento se encuentre suspendido en la masa de agua, su lugar final de descanso dependerá de la interacción entre los dos diferentes tipos de transporte de sedimentos generados por las olas. En el caso de Holbox, se mencionó anteriormente que debido a la presencia y orientación de los espigones (perpendiculares a la línea de playa), el transporte horizontal de sedimentos dentro de la zona surf es inexistente, ya que al mantener contacto con la playa la corriente horizontal desaparece al chocar contra los espigones. Es por esta razón que la forma del perfil de playa se debe exclusivamente a la acción del transporte de sedimentos ortogonal a la línea de playa. Finalmente para poder resolver el problema de la erosión en Holbox, primero es necesario conocer las características hidrodinámicas y granulométricas del área afectada.

ANTECEDENTES

En este trabajo de investigación se complementa y completa el tema tratado en la tesis “Análisis de la erosión en la playa de Holbox” (Cruz, 2005), cuyo objetivo fue determinar las causas principales que promueven la erosión de la isla de Holbox, estudiar el efecto que han tenido los espigones en la dinámica de la zona, realizar mediciones del oleaje y el tipo de sedimento en la costa de la isla, y buscar nuevas propuestas para solucionar el problema de la erosión en la isla. En aquel trabajo se hicieron entrevistas a los pobladores para conocer el estado previo de la isla, análisis de fotografías aéreas realizadas en el 2003, medición de la granulometría de la arena de la zona (estudio que realizamos de manera conjunta) y finalmente se realizaron cálculos de algunas características de las olas.

Las hipótesis en las que se basó el trabajo previo contemplan el proceso natural de erosión en las “islas de barrera” y su aceleración por la presencia de la población que realiza actividades como la destrucción de la vegetación, la remoción de arena y el barrido del sargazo. Además, se analizaron los efectos de los espigones que evitan el transporte de sedimento a lo largo de la playa, que como ya dijimos aceleran la erosión de la isla. En el trabajo previo se establece que existen otras estructuras como rompeolas y arrecifes artificiales que ayudan a detener el problema de la erosión, además tienen otros beneficios adicionales ya que en el caso de los rompeolas dan protección a la playa de los huracanes, y los arrecifes artificiales crean un medio ambiente más favorable para las especies acuáticas. En ese trabajo se reportó (Cruz, 2005) que la erosión que afecta la isla se aceleró por acciones como la destrucción de vegetación y la construcción de gruesos espigones.

A partir de los estudios previos (Cruz, 2005); (Capurro, 2003) se sabe que el oleaje que se presenta en Holbox es moderado y transmite poca energía, pero debido al pequeño tamaño del diámetro del sedimento esta energía es suficiente para generar erosión en toda la costa. Hoy se piensa que la desaparición de los espigones es indispensable para poder controlar la erosión. De las entrevistas, el cálculo de oleaje y el estudio granulométrico se puede

afirmar que los arrecifes artificiales pueden moderarla. Los rompeolas son capaces de disminuir la energía de las olas para que la erosión se vea disminuida drásticamente.

Con el objeto de entender mejor el fenómeno de erosión y los factores que la afectan en presencia de huracán, en este trabajo analizamos la dinámica de la playa de Holbox a través del parámetro de Shields y la erosión provocada por el paso del huracán Wilma por medio de un análisis de fotografías aéreas. Para finalizar con los antecedentes a continuación se reportan las características del huracán Wilma.

EL HURACÁN WILMA

La segunda semana de octubre de 2005, una gran y compleja zona de bajas presiones se desarrolló sobre el Atlántico oeste y el este del Caribe con varias zonas de tormenta eléctrica. Esta área de clima perturbado se fue organizando lentamente hasta convertirse en una depresión tropical al cabo de 24 horas, el 15 de octubre. Posteriormente se convirtió en una fuerte tormenta tropical a las 5 de la mañana del 17 de octubre. El mecanismo de la tormenta consistió en un movimiento lento por las aguas cálidas que fue reforzándose continuamente hasta que se convirtió en un huracán el 18 de octubre, lo que le convirtió en el 12º huracán de la temporada.

Wilma comenzó una rapidísima intensificación la tarde del día 18, hasta llegar a ser un potente huracán de categoría 5 con vientos que llegaban a los 280 km/h. El 21 de octubre Wilma tocó tierra en la península de Yucatán como un poderoso huracán categoría 4, con vientos por encima de los 241 km/h. El ojo del huracán pasó primero sobre la isla de Cozumel, antes de tener su primer contacto “oficial” sobre la península cerca de Playa del Carmen, en el estado de Quintana Roo. Algunas partes de Cozumel experimentaron la calma en el ojo de Wilma por varias horas, con cielos azules y algunos momentos soleados. El ojo de diámetro de 130 km se movió lentamente hacia el norte, pasando justo al oeste de Cancún. El 22 de octubre mantuvo su curso hacia el norte de la península con una velocidad de 6 km/h y se encontraba a 65 km al

Norte de Cancún y a 105 km el este de Tizimin, con vientos sostenidos de 155 km/h y rachas de 195 km/h lo que provocó olas de 5 a 8 m de altura en la península desde la punta de Quintana Roo hasta la riviéra maya. Diversas zonas de la península de Yucatán tuvieron vientos de huracán por más de 24 horas consecutivas. Wilma comenzó a acelerar en las primeras horas del 23 de octubre, abandonó la península por su extremo noroeste y se internó en el Golfo de México como un huracán categoría 2, con vientos de 140 km/h.

Para poder alcanzar nuestros objetivos hemos recabado información acerca de cómo otros países han combatido el problema de la erosión de costas y cuál ha sido la metodología. Nos hemos apoyado en las similitudes encontradas para desarrollar nuestros propios procedimientos, tratando de responder a las características únicas de nuestro problema. Con base en todo lo anteriormente expuesto, los objetivos de este trabajo son:

OBJETIVOS

El objetivo planteado en esta tesis es responder a las siguientes preguntas:

1. ¿Cuánto se modifica la cantidad de energía disipada en la playa en condiciones de huracán?.
2. ¿Cómo afectan la profundidad del mar, la altura y la frecuencia de las olas al transporte de sedimentos en condiciones normales y de huracán?.
3. ¿Cuánto se agudizó el problema de la erosión de la playa con el paso del huracán Wilma?.
4. ¿Cómo se alteró el perfil de playa debido a la interacción del huracán con los espigones?

HIPÓTESIS

Las hipótesis o premisas en las que nos basamos para abordar el problema presentado en este trabajo de investigación son las siguientes:

1. En condiciones ambientales normales la principal fuente de energía para el desplazamiento del sedimento es la turbulencia generada por el impacto de las olas en la playa.
2. Dado que la península de Yucatán se caracteriza por su prolongada plataforma continental, que se refleja en tener poca profundidad a lo largo de grandes extensiones, es posible usar el modelo de ola lineal y el de Larson para calcular la energía transportada por las olas.
3. El impacto del huracán Wilma en términos de la erosión de la playa de Holbox fue maximizado debido a la presencia de los espigones.

PARTE EXPERIMENTAL

La primera fase para abordar el problema consistió en la caracterización de la zona de estudio. Fue necesario conocer la distribución del tamaño del diámetro de la arena. Para lograrlo se realizó un análisis de granulometría y una vez que conocimos la distribución de tamaños, fue necesario analizar la velocidad de caída de la partícula para cada tamaño de diámetro encontrado en el análisis de granulometría. También es fundamental conocer la forma del perfil de playa, debido a que la presencia de los espigones modifica la zona surf y transforma el perfil en uno que no es "natural". Las características de la playa las obtuvimos tanto por una medición "in situ" de la longitud de los espigones, como de la medición de acumulación de arena que realizamos en dos distintas ocasiones. La primera medición fue realizada el 28 de enero del 2005 y la segunda fue realizada después del paso del huracán Wilma el 3 de febrero del 2006. Otra parte del trabajo experimental consistió en recavar información de la profundidad del mar que se presenta en Holbox fue un estudio de batimetría. Finalmente, para poder comparar las condiciones de nuestro sistema antes y después del paso del huracán Wilma se realizó un análisis comparativo de dos distintas series de fotografías aéreas tomadas antes y después del paso del huracán.

En la segunda fase del trabajo, y una vez recopilada toda la información necesaria, se calculó la energía transmitida a la playa por las olas. Partiendo de la suposición de que son las olas las que generan la turbulencia que suspende al sedimento, se calculó la energía necesaria para desplazar el sedimento cuyo tamaño de diámetro se encuentra en Holbox, mediante el modelo de ola lineal y el modelo de Larson. Finalmente, a partir de los datos de velocidad de caída de la partícula de arena y de la profundidad del mar pudimos cuantificar la velocidad del movimiento del lecho de arena realizando el cálculo de dos parámetros adimensionales conocidos como número de Reynolds y número de Shields.

Para realizar el análisis de granulometría de la playa se escogieron dos lugares que creemos pueden representar al sistema. Se encuentran al principio

de la serie de espigones (Chimay) y en la parte media de la misma (Faro Viejo). El método fue el siguiente: se tomaron muestras de arena en la zona de la línea de playa (sitio 1), y siguiendo una línea recta en dirección mar adentro el siguiente punto de muestreo fue a 5 m. (sitio 2) y a 10 m. (sitio 3) del primer sitio (ver Figura 6). Las muestras se dejaron secar en el lugar donde se recolectaron y posteriormente se realizaron mediciones con un tamizador en el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM.

Se tomaron 100 g de cada una de las seis muestras recolectadas. La arena se colocó en una serie de seis tamices apilados uno sobre el otro con un rango de abertura de malla que oscila entre los 1.18 y los 0.00432 mm. Al conjunto de tamices se le denomina tambor. Posteriormente este tambor era colocado en el tamizador durante un tiempo promedio de 30 minutos, al término del cual se pesó cada uno de los tamices para conocer la distribución de tamaño.

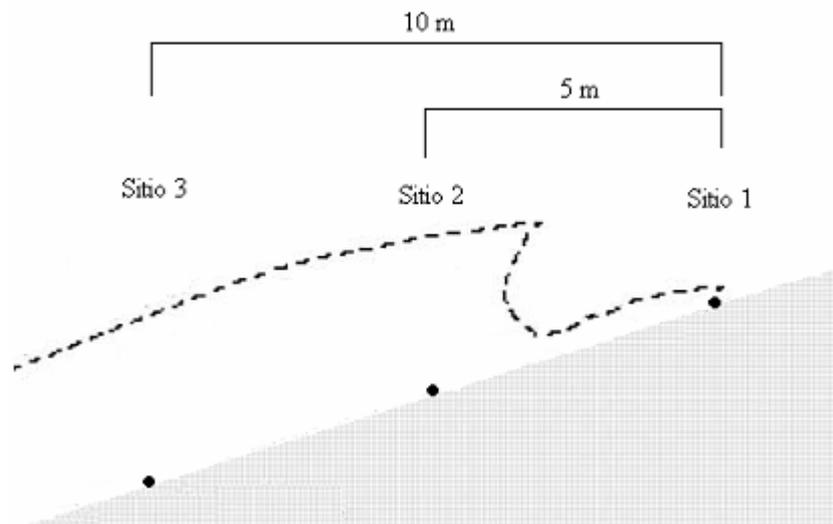


Figura 6. Localización de los sitios de muestreo.

Para conocer la velocidad de caída de la arena se diseñó un experimento que consistió en dejar caer arena, previamente tamizada y pesada, por un tubo de acrílico de 1.80 m. de altura y 5.8 cm. de diámetro. El tubo se llenó de agua de mar de Holbox. Al tubo se le colocó una base de acrílico en su parte inferior y se le pusieron dos marcas separadas por una distancia de 1.50 m. El experimento consistió simplemente en tomar el tiempo que tardaba la arena al caer, en pasar por esas dos marcas. Debido a que en un principio no se

contaba con agua de mar de Holbox, los primeros experimentos se realizaron con agua salada de pecera. Estos datos se compararon con los obtenidos con el agua de Holbox.

Para los datos de la batimetría se utilizó un batímetro, que es un aparato cuyo funcionamiento se parece mucho al sonar de los murciélagos. Emite una onda de radio y mide el tiempo que tarda esta onda en rebotar con el lecho marino y regresar al aparato. Se toma en cuenta la velocidad de la lancha y se calcula la profundidad del mar. Con el batímetro instalado en una lancha recorrimos un gran tramo de la isla siguiendo una línea imaginaria paralela a la costa (punto 1 de la Figura 7), desde Faro Viejo hasta Chimay. En Chimay giramos hacia mar adentro en línea recta y perpendicular a la línea de costa (indicado con 2 en la Figura 7). Se recorrió una gran distancia hasta que el batímetro midió 5 m de profundidad. Después se regresó a la orilla en una diagonal (punto 3 de la Figura 7) hasta el punto de partida. En el recorrido se formó un triángulo, y se comprobó que la profundidad en esta zona es pequeña y poco variable.

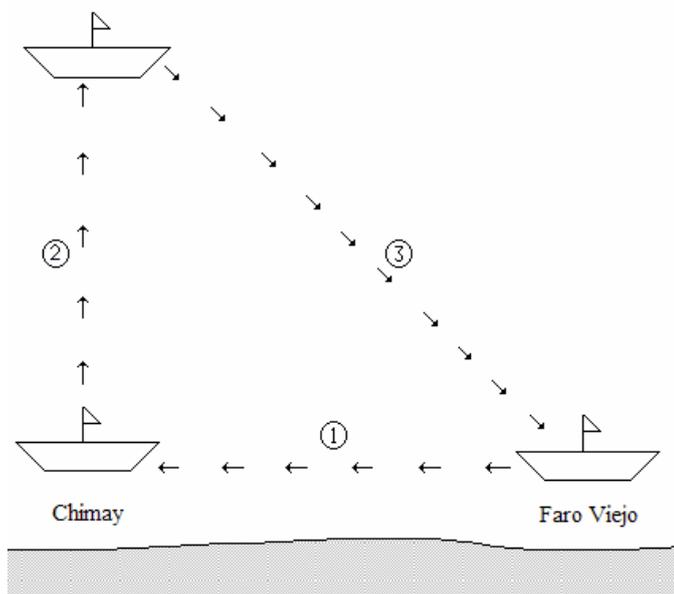


Figura 7. Recorrido con el batímetro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los cuadros con los resultados del análisis granulométrico de la playa. Este análisis fue realizado de manera conjunta con Nicolas Bournazou por lo que también está reportado en su tesis “Análisis de la erosión en la playa de Holbox”:

Sitio	# malla	Abertura (mm)	Sedimento (g)	% peso
Faro Viejo	16	1.18	0.94	0.940
Punto 01	35	0.5	3.63	3.630
Antes del	70	0.21	6.73	6.731
Pleamar	190	0.105	72.67	72.676
(seco)	200	0.074	15.85	15.851
	300	0.00432	0.17	0.170
	Fondo	----	0.001	0.001
Tot. Inicial:	100.04	Tot. Final:	99.991	

Sitio	# malla	Abertura (mm)	Sedimento (g)	% peso
Faro Viejo	16	1.18	0.0	0
Punto 02	35	0.5	0.08	0.080
A 5 m del	70	0.21	2.06	2.060
Pleamar en	190	0.105	76.66	76.675
Dirección	200	0.074	20.51	20.514
Hacia el mar	300	0.00432	0.67	0.670
	Fondo	----	0.001	0.001
Tot. Inicial:	100.0	Tot. Final:	99.981	

Sitio	# malla	Abertura (mm)	Sedimento (g)	% peso
Faro Viejo	16	1.18	22.87	22.903
Punto 03	35	0.5	9.77	9.784
A 10 m del	70	0.21	4.48	4.485
Pleamar en	190	0.105	42.32	42.380
Dirección	200	0.074	19.57	19.600
Hacia el mar	300	0.00432	0.81	0.811
	Fondo	----	0.04	0.040
Tot. Inicial:	100.09	Tot. Final:	99.859	

Sitio	# malla	Abertura (mm)	Sedimento (g)	% peso
Chimay	16	1.18	0.94	0.94
Punto 01	35	0.5	15.83	15.83
Antes del	70	0.21	21.17	21.17
Pleamar	190	0.105	56.5	56.5
(seco)	200	0.074	5.43	5.43
	300	0.00432	0.07	0.07
	Fondo	----	0.01	0.01
Tot. Inicial:	100.07	Tot. Final:	99.953	

Sitio	# malla	Abertura (mm)	Sedimento (g)	% peso
Chimay	16	1.18	2.08	2.08

Punto 02	35	0.5	5.66	5.66
A 5 m del	70	0.21	14.12	14.12
Pleamar en	190	0.105	71.95	71.95
Dirección	200	0.074	5.9	5.9
Hacia el mar	300	0.00432	0.08	0.08
	Fondo	----	0.01	0.01
Tot. Inicial:	100.02	Tot. Final:	99.8	

Sitio	# malla	Abertura (mm)	Sedimento (g)	% peso
Chimay	16	1.18	19.15	19.15
Punto 03	35	0.5	22.65	22.65
A 10 m del	70	0.21	13.45	13.45
Pleamar en	190	0.105	37.83	37.83
Dirección	200	0.074	6.28	6.28
Hacia el mar	300	0.00432	0.11	0.11
	Fondo	----	0.01	0.01
Tot. Inicial:	100.06	Tot. Final:	99.48	

Promedio	# malla	Abertura (mm)	Sedimento (g)	% peso
total de todos	16	1.18	45.98	7.68
los puntos de	35	0.5	57.62	9.62
los sitios.	70	0.21	62.01	10.35
	190	0.105	357.93	59.75
	200	0.074	73.54	12.28
	300	0.00432	1.91	0.32
	Fondo	----	0.072	0.01
Tot. Inicial:	100.09	Tot. Final:	599.064	

A continuación se presenta la grafica de distribución de tamaños de diámetro (figura 8) del sedimento que compone la playa en Holbox y que se obtiene del promedio de todos los puntos. En esta gráfica se aprecia a primera vista que el tamaño de diámetro de sedimento que se encuentra en mayor proporción en la playa es el de 0.105 mm (aprox. 60 %). Con este valor se calculó el número de Shields cuando se compara el desplazamiento del sedimento con la profundidad del mar.

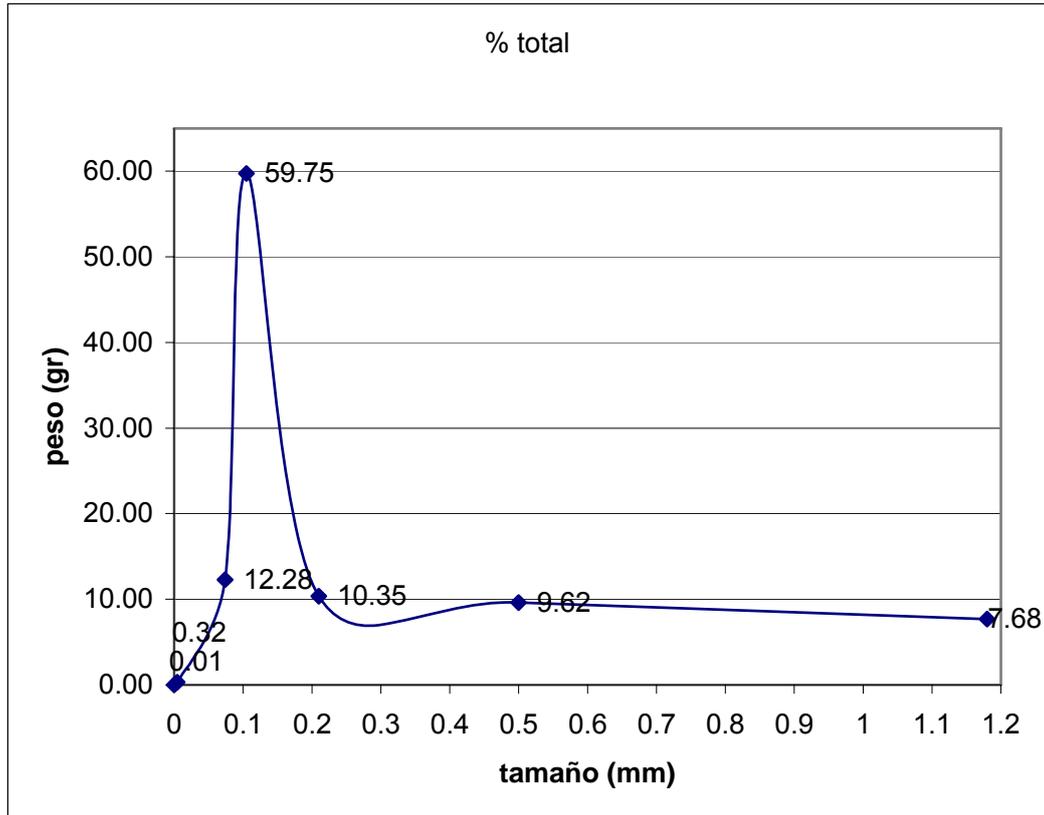


Figura 8. Gráfica de distribución de tamaños de arena.

A continuación se anexan los resultados obtenidos en el experimento de velocidad de caída de la arena en un tubo lleno con agua, tanto el que se llevó a cabo con agua de pecera salada, como el que se realizó con agua de mar.

Los resultados que se muestran en las tablas son el promedio de 10 mediciones hechas para cada diámetro de partícula.

Agua de pecera

Diámetro (mm)	Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)
0.5	22.71	7.62
0.21	35.95	4.44
0.105	74.64	2.17
0.074	239.49	0.69

Agua de mar

Diámetro (mm)	Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)
0.5	43.59	3.69
0.21	68.14	2.28
0.105	132.57	1.13
0.074	231.28	0.69

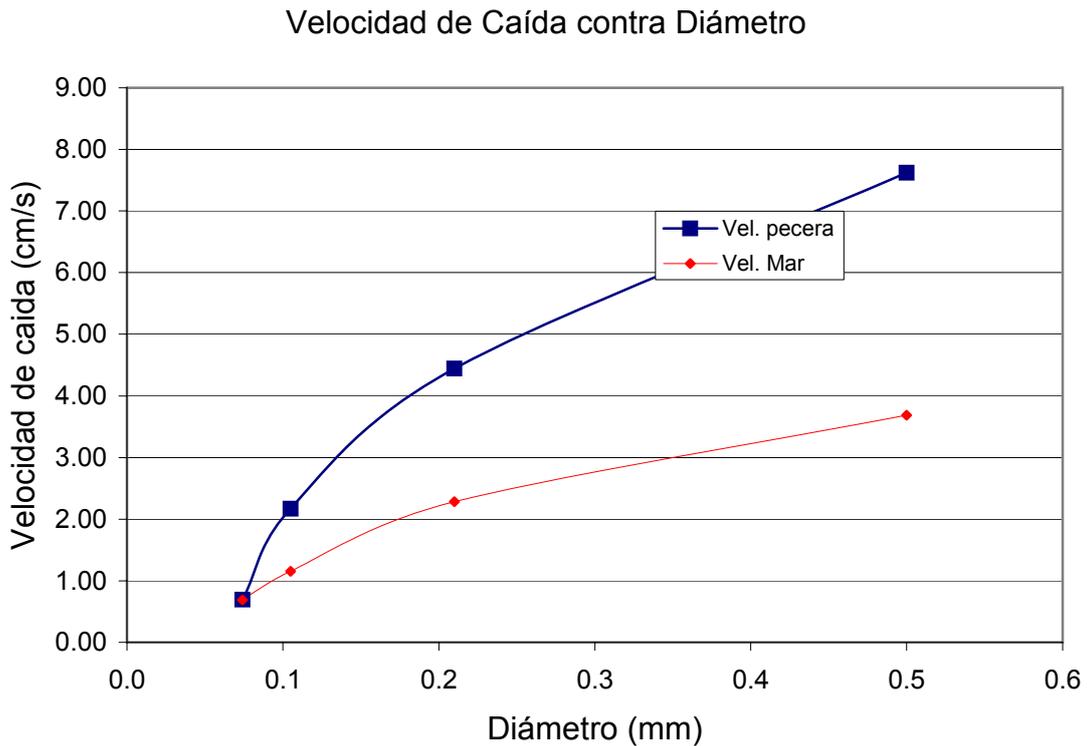


Figura 9. Gráfica de la velocidad de caída del sedimento a distintos diámetros.

De la figura 9 se observa claramente que las partículas de arena caían con mayor velocidad en el caso del agua de pecera que en el agua de mar. Esto se debe a que a pesar de que el agua de pecera tiene NaCl disuelta en ella, su viscosidad es menor que la del agua de mar que está compuesta no sólo por NaCl sino que tiene muchas más sales disueltas, como carbonatos y silicatos entre otras. Es por ello que para medir el tiempo de caída del sedimento en agua de mar los experimentos no se deben de realizar con agua de pecera, porque los resultados obtenidos son muy diferentes.

A continuación se presenta el gráfico que obtuvimos al introducir los datos de batimetría en el programa de GENESIS su nombre proviene de las siglas Generalized Model for Simulating Shoreline Change (Hanson and Kraus, 1989).

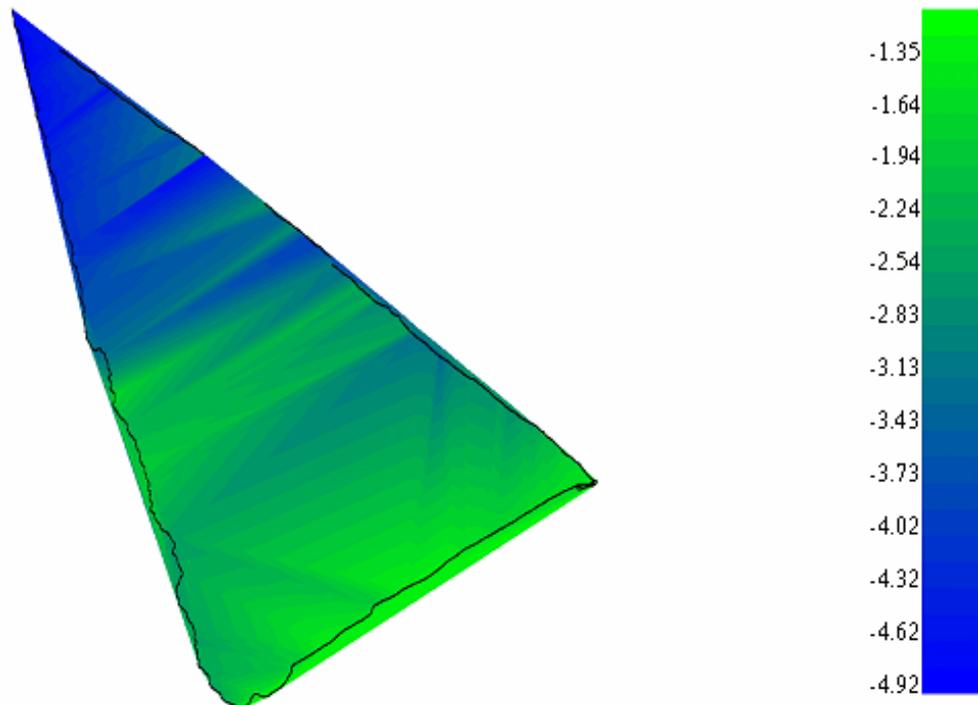


Figura 10. La profundidad aparece en metros y por convención los números se escriben con signo negativo.

Con toda esta información recopilada procedemos al cálculo de la energía transportada por las olas así como a la movilidad del lecho de arena.

CÁLCULO DE LA ENERGÍA DISIPADA EN LA PLAYA Y DEL PARÁMETRO DE SHIELDS

En esta parte se muestran los cálculos que realizamos empleando el modelo de Larson para obtener la energía disipada en la playa tanto en condiciones normales como en huracán, así como el cálculo del número de movilidad de Shields. D^* es la disipación uniforme de energía por unidad de volumen de agua para un tamaño de arena dado, ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad y h_b es la profundidad a la que rompe la ola.

En condiciones normales la profundidad es pequeña, de 1.0 a 1.5 m, pero cuando existe un huracán es mucho mayor, de 5.0 a 8.0 m. Los cálculos siguientes fueron realizados con una profundidad que se encontrara dentro del rango, (1.19 y 6.5 m, respectivamente):

a) Condiciones Normales

$$D^* = \frac{K}{8} * \rho * g * \sqrt{g * h_b} * (0.8^2 - 0.4^2) = 353.85 \text{ J/m}^3$$

$$K = 0.17 \text{ s/m} \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2; \rho = 1035 \text{ kg/m}^3; h_b = 1.19 \text{ m}$$

b) Condiciones de Huracán

$$D^* = \frac{K}{8} * \rho * g * \sqrt{g * h_b} * (0.8^2 - 0.4^2) = 826.99 \text{ J/m}^3$$

$$K = 0.17 \text{ s/m} \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2; \rho = 1035 \text{ kg/m}^3; h_b = 6.5 \text{ m}$$

En este cálculo es claro que en una situación de huracán las olas transportan más del doble de energía de lo que transportan en condiciones normales, lo que se traduce finalmente en una erosión mucho mayor.

Para obtener el número de Shields necesitamos conocer el periodo de las olas (T), pero desafortunadamente no fue posible medirlo por falta de los instrumentos adecuados, por lo que para construir la gráfica se utilizó un rango de periodos que se sabe se presentan en las playas del caribe mexicano. También es necesario conocer la longitud de la ola, nuevamente dado que no existen los instrumentos adecuados no fue posible utilizar valores reales, pero debido a que estamos utilizando el modelo de ola lineal es posible calcularlo a partir del periodo de las olas. Es necesario iterar para obtenerlo. Las variables empleadas para su cálculo son: pi, la gravedad, la distancia entre el lecho marino y la superficie del mar h_b y el tiempo que transcurre entre el paso de dos olas consecutivas (T). Dado que desconocemos este valor empleamos uno supuesto igual a 5 segundos.

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}; \rho = 1035 \frac{kg}{m^3}; h_b = 1.19 m; T = 5 s$$

$$L = \frac{g * T^2}{2 * \pi} \tanh\left(\frac{2 * \pi * h_b}{L}\right) = \frac{9.81 * 5^2}{2 * \pi} * \tanh\left(\frac{2 * \pi * 1.19}{L}\right) \textit{iterando}$$

$$L = 16.5367 m$$

Una vez que obtuvimos la longitud de la ola (L), podemos calcular el número de olas k_1 y también podemos calcular la velocidad angular σ para distintos valores de T. En este caso utilizamos T= 2, 5, 10, 15 y 20 segundos. Sólo presentamos el cálculo para T= 5, como ejemplo:

$$L = 16.5367 m$$

$$k_1 = \frac{2 * \pi}{L} = \frac{2 * \pi}{16.5367} = 0.3800$$

$$\sigma = \frac{2 * \pi}{T} = \frac{2 * \pi}{5} = 1.2566$$

Después calculamos la altura de la ola H (nuevamente el modelo de ola lineal nos permite calcular este parámetro difícil de medir), a partir de la profundidad del lecho h_b . Ya con todos estos datos es posible calcular el parámetro A que es la mitad de la excursión de la partícula de sedimento en el transcurso de tiempo entre una ola y otra, y está relacionado con el tamaño de la partícula de arena. Finalmente calculamos el número adimensional de Shields, para distintos valores de profundidad (h_b) que variaron desde una “natural” hasta la que se presenta en condiciones de huracán y donde ρ_s es la densidad de la arena.

A continuación presentamos como ejemplo el cálculo de Ψ para T = 5. Lo mismo hicimos para los distintos valores de T. Así calculamos Ψ para distintos valores de h_b y T, como se puede observar en la gráfica.

$$H = \kappa * h_b = 0.8 * 1.19 = 0.9520$$

$$A = \frac{H * \sigma}{2 * \sinh * (k_1 * h_b)} = \frac{0.9520 * 1.2566}{2 * \sinh * (0.3800 * 1.19)} = 1.2789$$

$$\Psi = \frac{A^2}{g * d * (\rho_s - \rho)} = \frac{1.2789^2}{9.81 * 0.000105 * (1250 - 1035)} = 7.3856$$

A continuación se presentan las gráficas generadas por el algoritmo de cálculo arriba mencionado.

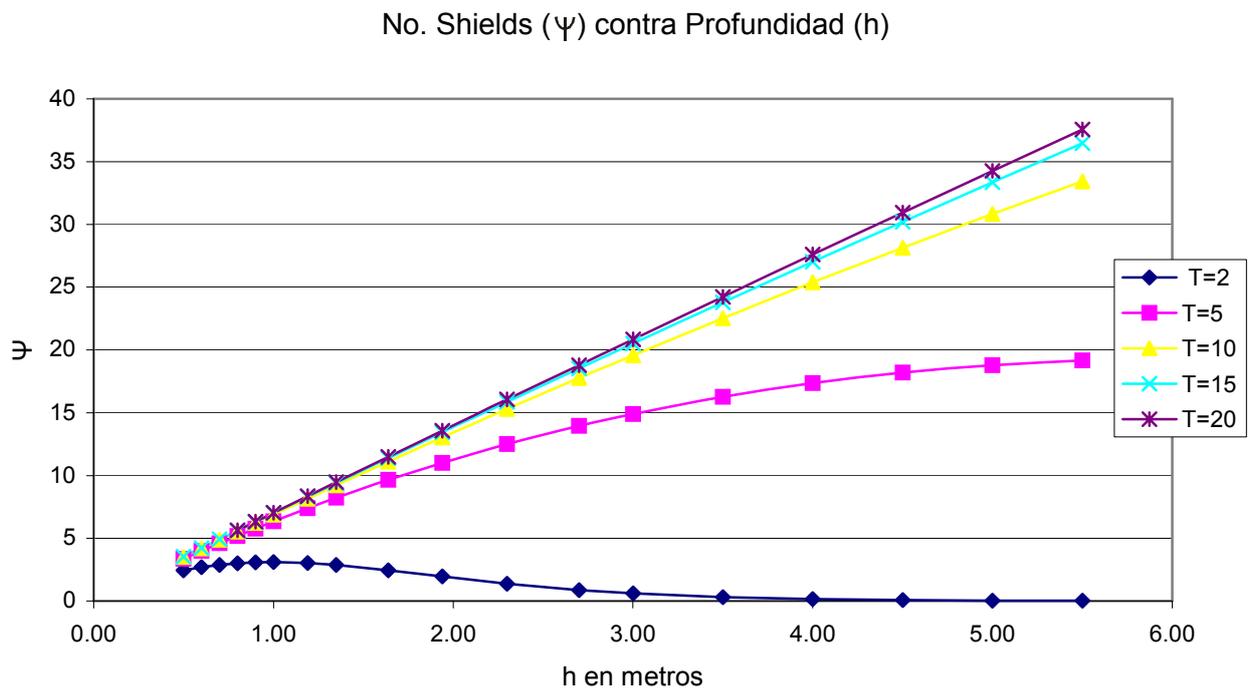


Figura 11. Gráfica del número de Shields a distintas profundidades.

De la figura 11 se observa la relación directamente proporcional entre la profundidad del mar y la movilidad del lecho de arena, ya que conforme aumenta la profundidad (para olas de periodos mayores a los 2 s), la movilidad del lecho arenoso para partículas de 0.105 mm de diámetro se incrementa drásticamente. El caso de las olas con una periodicidad de 2 segundos es muy especial, ya que pareciera dar la impresión de que no se mueve pero lo que realmente pasa es que debido al gran número de olas (30 por minuto) el sedimento ya no se encuentra en el lecho sino que esta totalmente suspendido. Hay que recordar que el número de Shields predice la movilidad del sedimento

en el lecho, no en la columna de agua que es donde se encuentra el sedimento en este caso.

Para la gráfica de la figura 12 fue necesario realizar nuevamente el cálculo del número de Shields y del número de Reynolds, que tradicionalmente nos indica la velocidad del flujo de agua en una tubería, pero en este caso en particular por la forma en que lo obtuvimos nos indica la velocidad de la partícula de arena en la columna de agua. Para el cálculo del número de Reynolds se utilizaron los datos del experimento de velocidad de caída de partícula w , donde ν es la viscosidad cinemática y d el diámetro del sedimento. El cálculo se realizó para todos los valores de diámetro de sedimento encontrado en Holbox. En el ejemplo de cálculo que se muestra a continuación empleamos el valor del diámetro que se encuentra en mayor proporción en la playa y representa el segundo punto de la grafica (indicado con un triángulo) en condiciones normales.

$$Re = \frac{d * w}{\nu} = \frac{0.000105 * 0.0115}{0.00000096} = 1.223$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2; \rho = 1035 \text{ kg/m}^3; h_b = 1.5 \text{ m}; T = 15 \text{ s}; h_b = 1.5 \text{ m}$$

$$L = \frac{g * T^2}{2 * \pi} \tanh\left(\frac{2 * \pi * h_b}{L}\right) = \frac{9.81 * 15^2}{2 * \pi} * \tanh\left(\frac{2 * \pi * 1.5}{L}\right) \text{ iterando}$$

$$L = 57.283 \text{ m}$$

$$k_1 = \frac{2 * \pi}{L} = \frac{2 * \pi}{57.283} = 0.11$$

$$\sigma = \frac{2 * \pi}{T} = \frac{2 * \pi}{15} = 0.419$$

$$H = \kappa * h_b = 0.8 * 1.5 = 1.2$$

$$A = \frac{H * \sigma}{2 * \sinh(k_1 * h_b)} = \frac{1.2 * 0.419}{2 * \sinh(0.11 * 1.5)} = 1.521$$

$$\Psi = \frac{A^2}{g * d * (\rho_s - \rho)} = \frac{1.521^2}{9.81 * 0.000105 * (1250 - 1035)} = 10.442$$

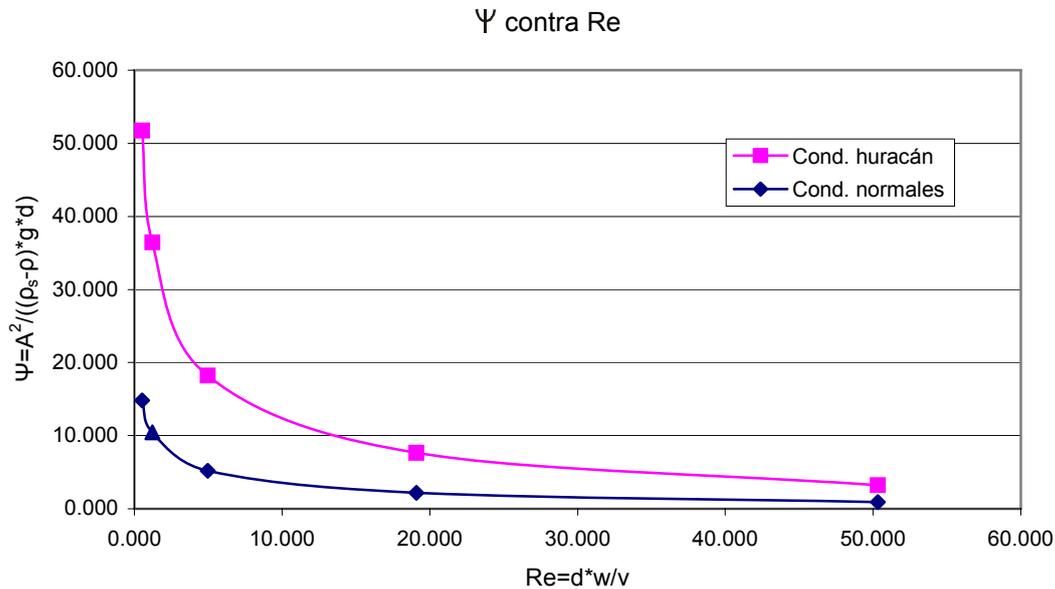


Figura 12. Gráfica del número de Shields contra el número de Reynolds

En la figura 12 se observa que para tamaños de diámetro de 1.18 y 0.5 mm (los últimos dos puntos a la derecha) no hay una diferencia muy grande en la movilidad del lecho en condiciones normales y las que se presentan en situación de huracán, pero para tamaños de diámetro de 0.21 mm y menores (que del análisis granulométrico sabemos que son los tamaños que componen más del 70% de la playa), la diferencia de magnitud para Ψ (la movilidad del lecho) en condiciones de huracán es más de tres veces la que se presenta en condiciones normales, lo que explica que la erosión sea mucho más grave.

En las figuras 11 y 12 se observa que la relación entre el número de Shields y la profundidad, para periodos de ola mayores a 2 segundos, es lineal. Esto quiere decir que la erosión en la playa crece de manera directamente proporcional a la periodicidad de las olas, y cuando existen condiciones de oleaje de tormenta como con Wilma, la erosión que sufre la playa es muy grande. También se observa que la relación entre el número de Shields y el número de Reynolds es inversamente proporcional, que es algo que se esperaba ya que mientras la movilidad del sedimento aumenta para diámetros de sedimento cada vez más chicos, la velocidad con que se desplaza la

partícula de arena por efecto de la gravedad hacia el lecho disminuye proporcionalmente con el diámetro del sedimento. También es muy evidente el efecto producido por el aumento de la profundidad, que incrementa de una manera dramática la erosión sufrida por la playa. La razón de que este incremento sea tan grande es debido a que ahora la partícula de arena tarda más tiempo en recorrer la distancia que la separa del lecho marino y al permanecer más tiempo suspendida en el agua puede ser transportada más lejos de su lugar original.

Así empleando los parámetros característicos de Holbox en las ecuaciones correspondientes se puede apreciar la magnitud de la erosión provocada por el huracán Wilma, a través de un modelo relativamente sencillo.

CAMBIO EN EL ESTADO DEL SISTEMA REGISTRADO POR FOTOGRAFÍAS AÉREAS.

En esta parte de la discusión del problema compararemos la forma del perfil de playa antes y después del paso de un huracán (Wilma), que es un evento que por lo regular se presenta cada 3 y 8 años, aunque en muy contadas ocasiones puede presentarse dos veces en un mismo año. Este análisis es posible porque contamos con dos distintas series de fotografías aéreas de la isla. La primera fue tomada el 16 de diciembre 2003 y la segunda serie fue tomada 3 días después del paso del huracán, el 27 de octubre del 2005. El objetivo de esta comparación es mostrar el distinto comportamiento del perfil de playa y cuantificar los daños en términos de erosión, tanto en condiciones normales como en condiciones de huracán.

En condiciones normales en Holbox, la presencia de los espigones que mantienen contacto con la playa interrumpe el transporte horizontal de sedimentos en la zona surf (ver figura 3), por lo que este transporte se presenta después del final de los espigones, lo que produce la formación de un banco de arena paralelo a la playa (figura 13). En el caso en que los espigones han sido superados por la erosión, esto es que ya no mantienen contacto con la playa y por ende ya no retienen sedimento, es cuando el transporte horizontal de

sedimentos se desplaza hacia la línea de playa y regresa a ser el que se presenta en una playa sin espigones.

En la figura 13 se presenta una panorámica aérea de la línea de playa de Holbox antes del paso del huracán Wilma, donde se puede apreciar el banco de arena mencionado anteriormente. En ella se han numerado los espigones para su identificación. Esta numeración es la que utilizaremos para continuar con el análisis.



Figura 13. Donde se muestran todos los espigones y también se puede apreciar la franja de transporte horizontal de sedimentos, paralela a la playa al final de los espigones.

En la figura 14a se compara el estado de la línea de playa antes (a la izquierda) y después del paso del huracán (a la derecha), donde se observa la desaparición de la vegetación que proporciona cohesión a la arena y el retroceso en la línea de playa. Durante este fenómeno climatológico la altura del nivel del mar aumenta hasta 3 m y las olas, que normalmente se caracterizan por tener una altura menor a 1 m, llegan a medir entre 5 y 8 m.

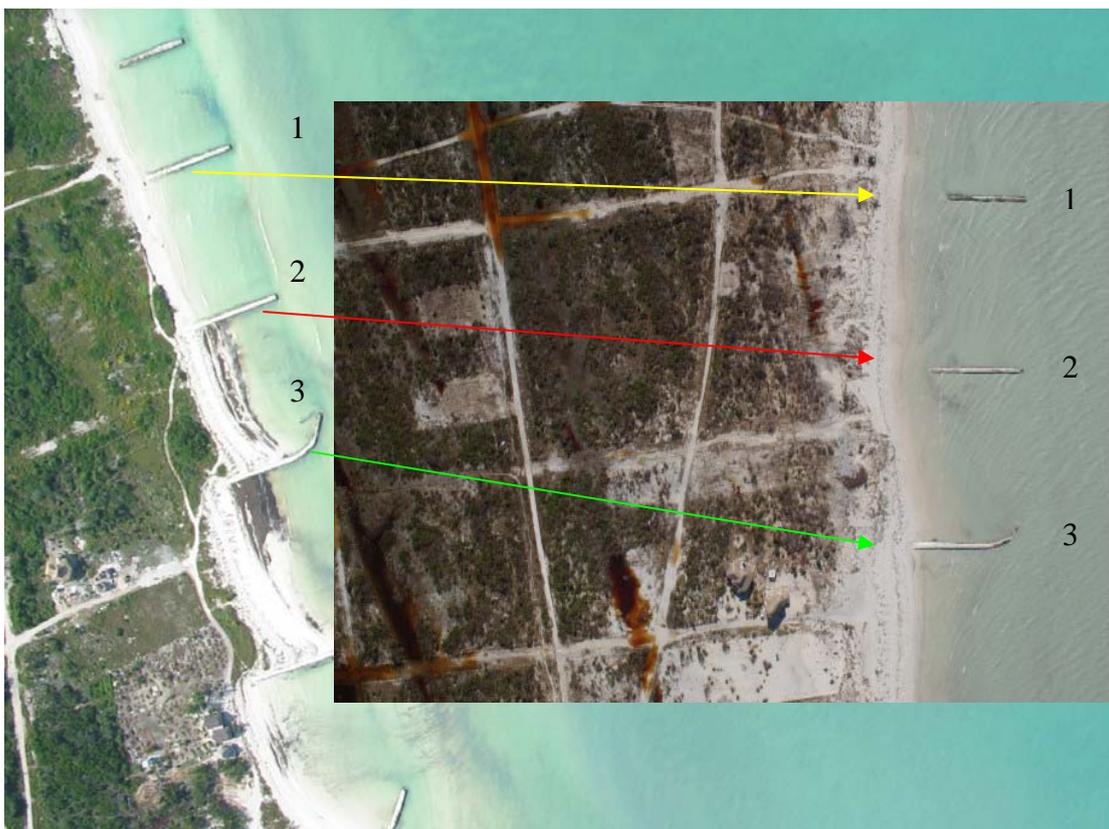


Figura 14a. Espigones del uno al tres, donde se señala la arena erosionada por el huracán.

En la figura 14b señalamos cuantos metros retrocedió la línea de playa. En el espigón 1 que ya había sido rebasado por la erosión, la línea de playa retrocedió de 3.8 hasta 12.3 m. El caso del espigón 2 es aún más grave ya que de tener 15 m de arena acumulada en uno de sus costados ahora se encuentra a 15 m de la línea de playa. En el espigón 3 la fuerza con la que las olas azotaron la playa fue tan grande que incluso sufrió daños estructurales, ya que la parte curvada que funcionaba como un rompeolas fue destruida. En esta zona la acumulación de arena pasó de 32.2 a 5 m, mientras que en el otro lado de este mismo espigón pasó de 18,6 a 10 m. Esto que nos indica que al desaparecer la parte curvada el espigón perdió su efectividad para sedimentar arena.

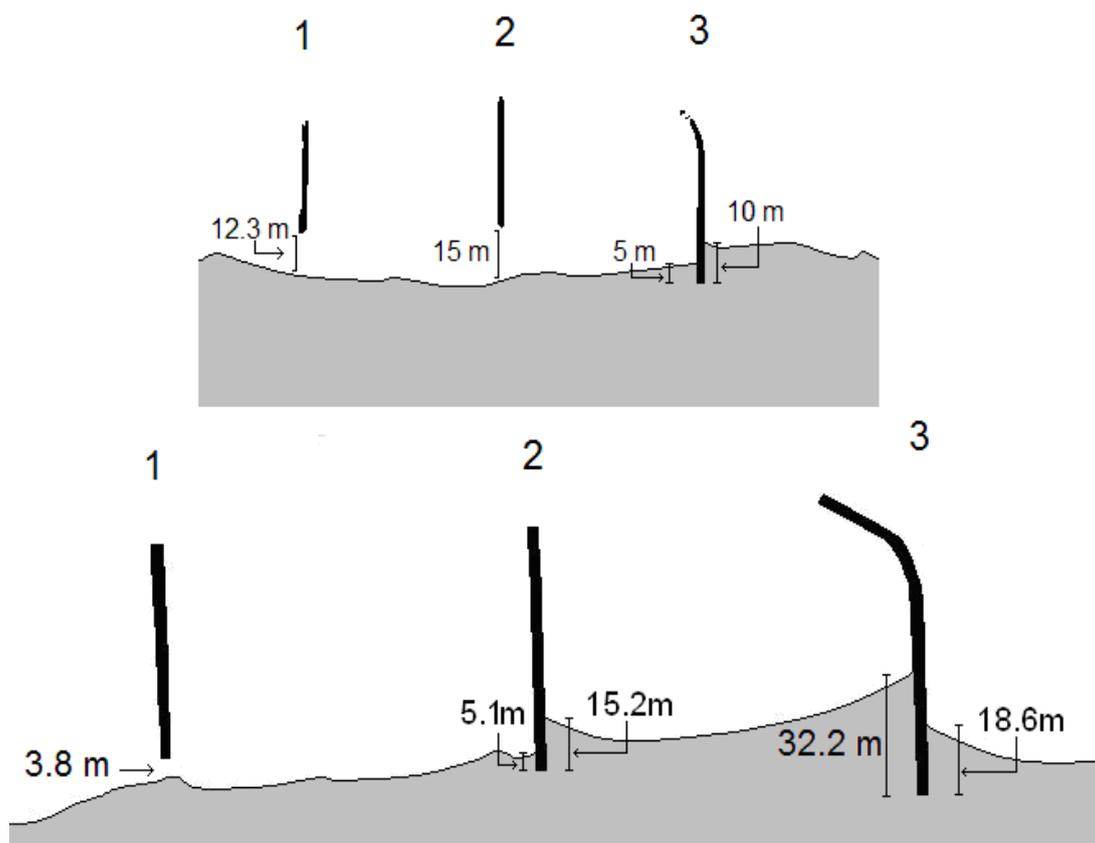


Figura 14b. Espigones del uno al tres, en la parte superior son las medidas después del huracán y en la parte inferior las medidas antes del huracán.

En la figura 15, tomada antes del huracán se muestra la característica de los espigones curvos. Lo que ocurre es que la acumulación de arena no se presenta en el lado que esta “frente” a la corriente, sino del costado donde se encuentra la curvatura, que es lado contra corriente. Esto se debe, como ya mencionamos, a que la misma curvatura funciona como un rompeolas, ya que las olas antes de chocar con el espigón se difractan y parece que se “doblan” y al hacerlo pierden parte de su energía cinética y ya no son capaces de suspender el sedimento, por lo que se deposita arena en este lugar. De hecho la presencia de esta curvatura también afecta al banco de arena, ya que se puede apreciar en la fotografía un cambio en su color que se torna más oscuro. En la fotografía señalamos la acumulación de arena y la pérdida de arena alrededor de cada espigón.

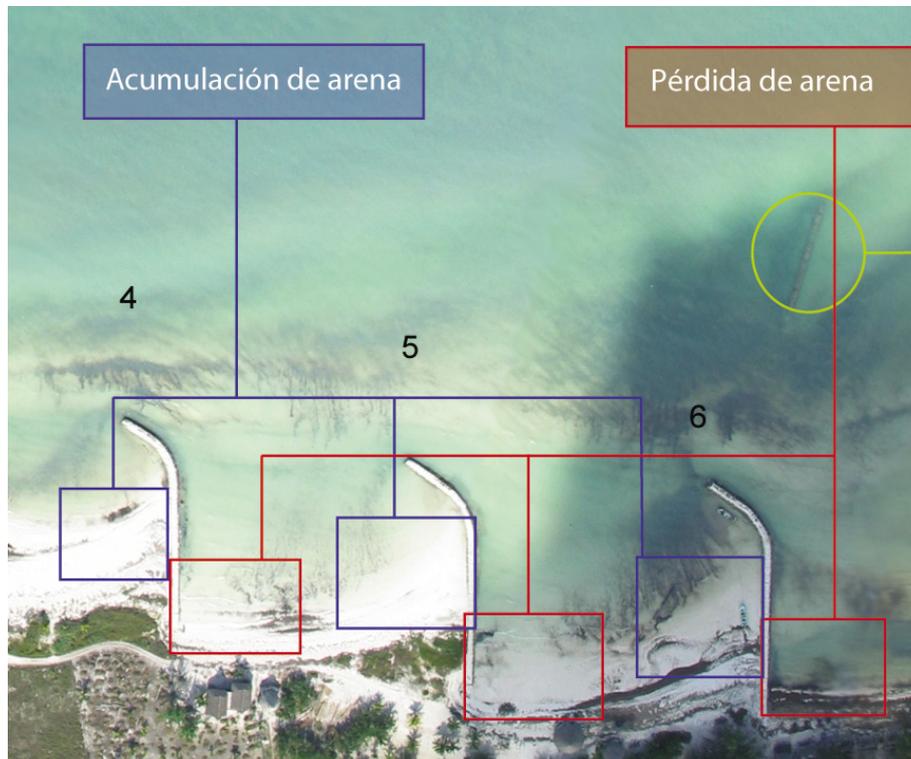


Figura 15. Cuarto, quinto, y sexto espigón de izquierda a derecha, donde se señala la sedimentación de arena del lado con cuña.

En la figura 16a se compara el estado de los espigones 5, 6 y 7 antes (a la izquierda) y después (a la derecha) del paso del huracán. En las fotos se observa la desaparición de la vegetación y de la duna de arena paralela a la playa, y también se muestra la nueva forma que tomó el perfil de playa que tuvo zonas de erosión de arena, pero también de sedimentación, ya que la interacción de las olas con la parte curvada de los espigones no es la misma cuando la profundidad es normal de 1 a 1.5 m y funcionan como rompeolas, que cuando la profundidad aumenta hasta 3 m y funcionan como arrecifes. En esta profundidad mayor vuelve a presentarse un transporte de sedimentos paralelo a la playa que altera el perfil anterior.



Figura 16a. Donde se señala el efecto de la erosión por el huracán en los espigones 5, 6.

En la figura 16b se muestra la magnitud del cambio en la posición de la línea de playa. En el espigón 5 pasa de 40.1 a 33 m de arena acumulada del lado de la curvatura y del otro lado creció de 3.7 a 5 m de arena. En el caso del espigón 6 pasó de 31 a 32.5 m de arena acumulada en el lado de la curvatura y del otro lado disminuyó de 11 a 8 m de arena sedimentada. En el espigón 7 la acumulación de arena crece de 14.6 a 36.5 m en el lado curvado y en el otro lado también crece de 21.9 a 55 m de arena acumulada. Esto sucede por dos razones. La primera es que al aumentar la profundidad las olas que chocan con la parte curvada del espigón generan corrientes que transportan el sedimento anormalmente y la segunda es que en esta parte era donde la duna de arena se encontraba más cerca de la playa, así que el efecto del huracán fue desplazar la duna de arena hacia la playa lo que creó una zona muy marcada de sedimentación y que de hecho es la única zona donde hubo depósito de arena.

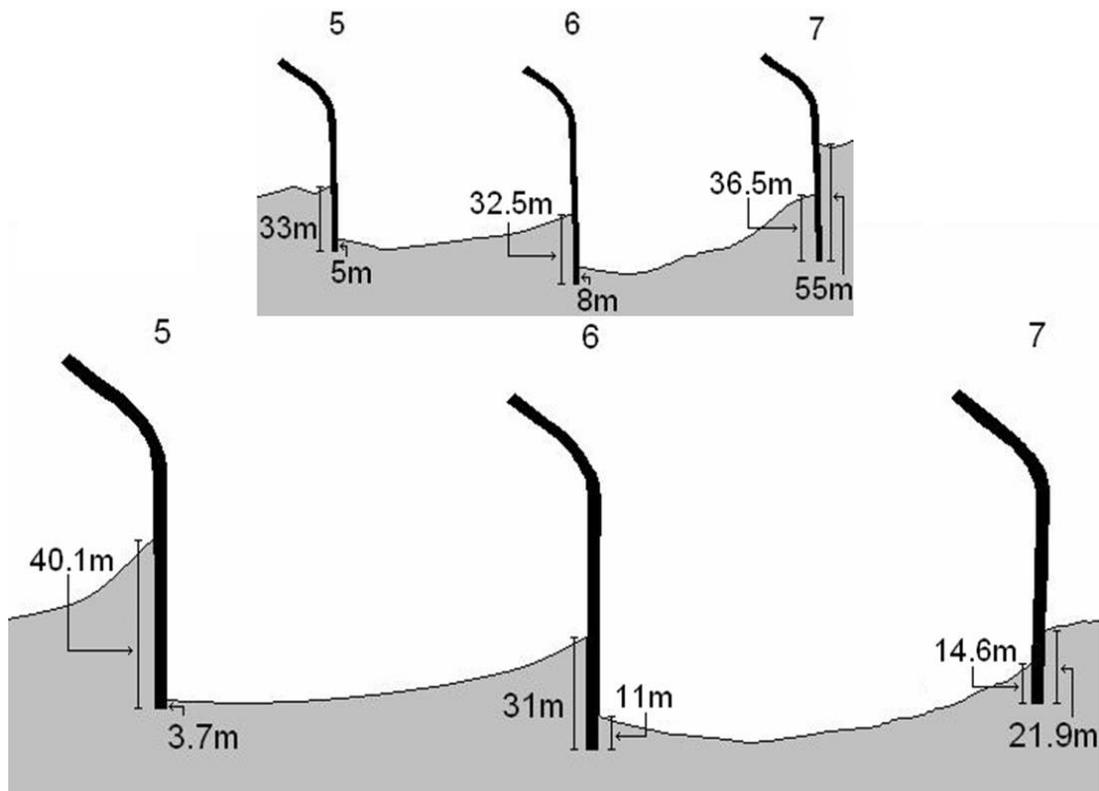


Figura 16b. En la parte superior se muestran las medidas del perfil de playa después de Wilma en 2006 y en la parte inferior las medidas del perfil en 2003.

En la figura 17 se compara el estado de los espigones 8, 9 y 10 antes (a la izquierda) y después (a la derecha) del paso del huracán. Se observa la desaparición de la vegetación, el deterioro de los inmuebles de los hoteles, la erosión de la playa y el daño que sufrieron los espigones 9 y 10 ya que su longitud disminuyó; y en el caso del espigón 9 el retroceso de la línea de playa está a punto de rebasarlo. Además la punta de la estructura está hundiéndose.



Figura 17. Erosión en los espigones 8 al 10.

En la figura 18 se señala la distancia que retrocedió la línea de playa. En el espigón 9 pasó de 9.1 a 8 m de arena acumulada en su lado en corriente y del otro lado paso de 5.5 a 5 m de arena acumulada. El espigón 10 pasó de 18 a 17.5 m de arena acumulada en su lado en corriente y del otro lado pasó de 11.5 a 9.7 m de arena acumulada. El problema con el hundimiento del espigón 9 es que perdió la arena que se encontraba debajo del espigón y que le brindaba soporte. El resultado final será el hundimiento de la estructura como ocurrió en los primeros espigones rectos que se colocaron hace muchos años.

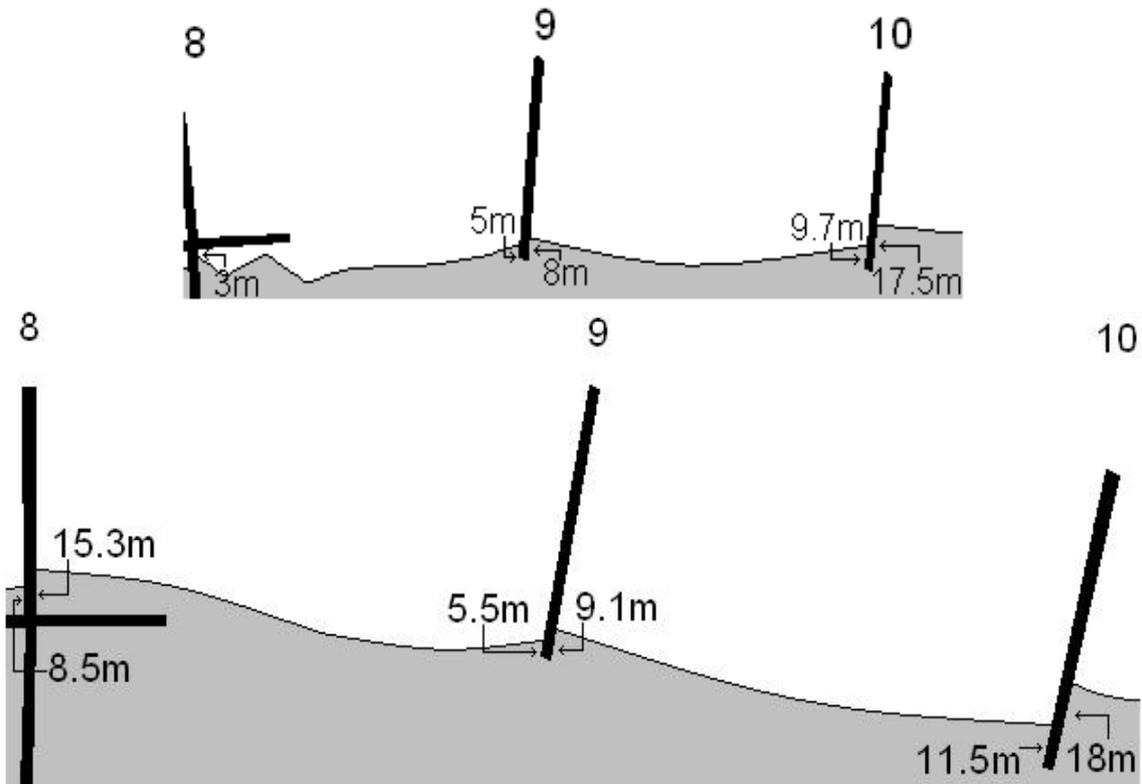


Figura 18. Espigones 8, 9 y 10 arriba se muestra la línea de playa después del huracán y abajo la línea de playa antes del huracán

Finalmente en la figura 19 se muestra con detalle tanto la situación como las medidas del espigón 8 que es el único en forma de cruz. Este había sido el más efectivo para acumular arena debido al efecto de rompeolas de la cruz, y también sufrió una gran erosión lo que produjo un retroceso en la línea de playa. Antes del huracán pasaba después de la cruz a 15.3 m y ahora se encuentra a 3 m antes de la estructura en cruz.

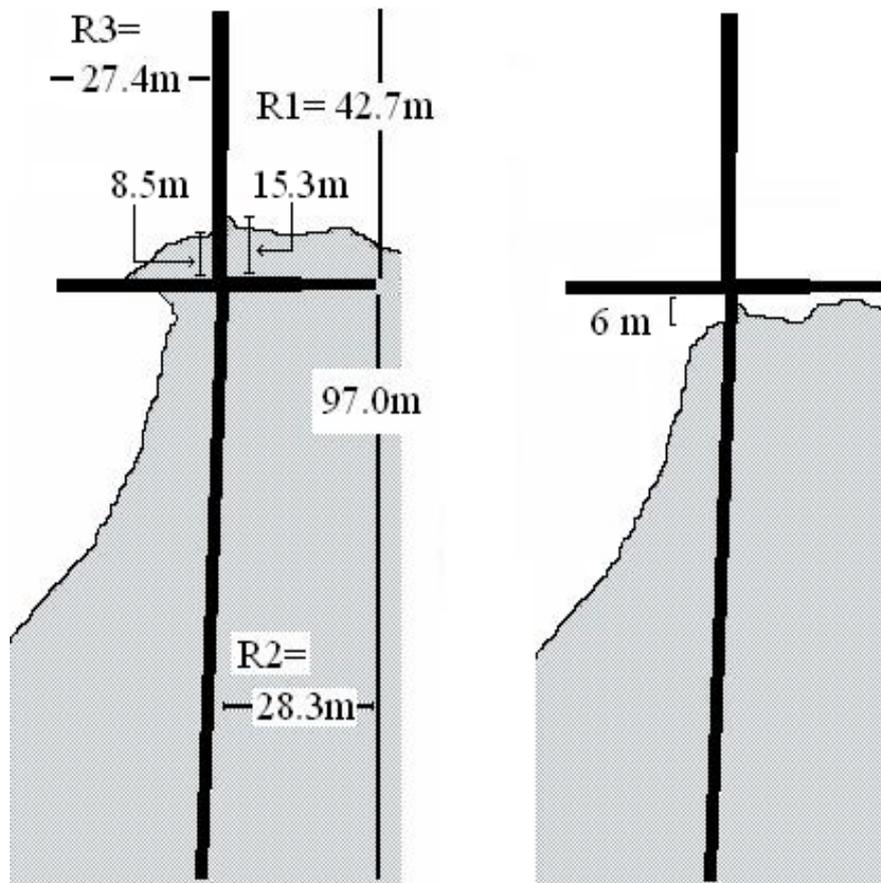


Figura 19. Espigón 8 antes y después del huracán.

Lamentablemente no contamos con más fotografías aéreas que nos muestren la erosión de la playa en la zona de los últimos espigones rectos. Solamente tenemos las medidas que realizamos en febrero del 2006, donde la pérdida de arena incluso reveló la existencia de un espigón más que hasta ese momento había permanecido enterrado en la playa.

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LA EROSIÓN DE LOS ESPIGONES.

En esta parte presentamos los resultados obtenidos en la medición de los espigones realizada el 28 de enero del 2005, que se resumen en la Tabla 1. La primera columna consta de los números de los espigones, la segunda describe la forma de éstos, la tercer columna muestra la longitud de los espigones de extremo a extremo, con los espigones curvos fue necesario dividirlos en tres secciones rectas (R1, R2, R3) para poder conocer su longitud. Las columnas 7 a 9 describen características de los costales que componen cada espigón,

como lo son largo, ancho y su altura ya que los espigones están formados por costales de concreto, se contaron el número de costales que componen la longitud de cada espigón. Estos datos se encuentran en la columna 10. En las últimas dos columnas se incluyen las medidas de la distancia entre el comienzo del espigón y la línea de playa (límite entre la arena húmeda y la arena mojada), tanto de su lado en corriente (derecha del espigón en la foto de la figura 15), como del lado contra corriente (izquierda del espigón en la foto de la figura 15). En los casos en que los espigones ya estaban hundidos (que no mantenían contacto con la arena seca), se midió la distancia a la que se encontraban de la línea de playa.

Espigón	Forma	Longitud (m)	R1	R2	R3	costal				línea de playa	
						L (m)	A (m)	H (cm)	#	contra corriente	en corriente
0	recto	35.1				2.7	1.85		15	-15.2	-
1	recto	45 (42.3)				2.74	1.85	0.6	17	-8.9	-
2	recto	50.8				2.8	1.75	0.55	18	-1.5	-
3	curvo	63.3	13.2	12.5	42.5	2.8	2	0.5	26	23.5	16.2
4	curvo	73.3	11.3	10.5	53.3	2.6	1.85	0.5	30	44.6	10.2
5	curvo	77.4	16.3	14.9	52.9	2.65	1.8	0.56	32	42.4	5.6
6	curvo	81.05	17.5	11.6	63.8	2.75	1.8	0.63	35	37	9
7	curvo	83.8	13.9	13.2	59.2	2.65	1.8	0.6	35	24.8	52
8	en cruz *	139.7	42.7	28.3	27.4	-----	-----	-----	---	-----	-
9	recto	52.9				3.3	1.84	0.48	15	-11.3	-
10	recto	57.3				3.1	1.8	0.54	18	12.5	19.86
11	recto	56.5				3.4	2.05	0.45		12.1	32.5
12	recto	49.2				3.2	2	0.47	14	21.3	31.7
13	recto	45.3				3.3	1.9	0.48	13	24.3	34.7
14	recto	40.1				3.3	2	0.46	12	25.8	31.4

Tabla 1. Características de los espigones.

* La longitud, R1, R2 y R3 de éste espigón se explican en la Figura 15

Para el análisis cuantitativo de las fotografías aéreas la metodología realizada fue que a partir del tamaño de los espigones y de las fotografías aéreas se determinó el factor de la escala, después calculamos la distancia entre el comienzo del espigón y la línea de playa a cada lado. Nuevamente en el caso de los espigones que se encontraban hundidos se calculó la distancia a la que se encontraban de la línea de playa.

Por último se realizó otra serie de mediciones el 3 de febrero del 2006. Con estos datos fue posible comparar el estado del sistema desde el 2003 hasta el 2006. De esta comparación se pudo conocer la secuencia en el cambio de la línea de playa a cada lado del espigón de todos los espigones en un lapso de tiempo que es de aproximadamente 3 años. Los resultados de éste análisis aparecen en la Tabla 2.

Espigón	Longitud (m)	Foto de la dist. al ini.		Dist. al ini. de la línea		Dist. al ini. de la línea	
		16 de diciembre 2003		28 de enero 2005		3 de febrero 2006	
		contra corriente (m)	en corriente (m)	contra corriente (m)	en corriente (m)	contra corriente (m)	en corriente (m)
0	35.1	-6.8	-	-15.2	-	-20	-
1	45	-3.8	-	-8.9	-	-12.3	-
2	50.8	5.1	15.2	-1.5	-	-15	-
3	63.3	32.2	18.6	23.5	16.2	5	10
4	73.3	44	5.1	44.6	10.2	17.5	12
5	77.4	40.1	3.7	42.2	5.6	33	5
6	81.0	31	11	37	6	32.5	8
7	83.8	14.6	21.9	24.8	52	36.5	55
8	139.7	8.5	15.3	6.4	9.2	-	-
9	52.9	5.5	9.1	-11.3	-	5	8
10	57.3	11.5	18	12.5	19.8	9.7	17.5
11	56.5	11.5	19.6	12.1	32.5	12.5	25
12	49.2	16.4	19.6	21.3	31.7	16.5	22.5
13	45.3	14.7	20.8	24.3	34.7	19	29
14	40.1	17.2	22.9	25.8	31.4	17.5	20.5

Tabla 2. Resultado del análisis cuantitativo de los espigones.

Espigón	Cambio en el perfil (m) de 2003 al 2005		Cambio en el perfil (m) de 2005 al 2006	
	contra corriente	en corriente	contra corriente	en corriente
0	-8.4	-	-4.8	-
1	-5.1	-	-3.4	-
2	-6.6	-16.7	-13.5	-
3	-8.7	-2.4	-18.5	-6.2
4	0.6	5.1	-27.1	1.8
5	2.3	1.9	-9.4	-0.6
6	6.0	-5	-4.5	2
7	10.2	30.1	11.7	3
8	3.0	1.9	-6.7	-9.2

9	-16.8	-20.4	16.3	19.3
10	1.0	1.8	-2.8	-2.3
11	0.6	11.3	0.4	-7.5
12	4.9	12.1	-4.8	-9.2
13	9.6	13.9	-5.3	-5.7
14	8.6	8.5	-8.3	-10.9

Tabla 3. Muestra la evolución del perfil de playa entre 2003 y 2005, y se compara con la evolución del perfil entre 2005 y 2006, donde el signo negativo indica un retroceso en la línea de playa.

De la tabla 3 se puede observar la magnitud del cambio de la cantidad de arena erosionada en los espigones 0, 1, 2 y 3 en dos distintos intervalos de tiempo de uno y dos años, esto es el resultado de cuando un espigón ha sido superado por el perfil de playa y en esos casos cualquier espigón, no importa la forma que tenga pierde su funcionalidad, ya que cuando un espigón es alcanzado por el perfil de la playa, ya sea por su lado en corriente o en contra corriente, pierde la arena sobre la cuál esta anclado y se hunde. Con el tiempo todo el sedimento que acumuló desaparece, sin importar la cantidad de sedimento depositado en el otro lado. Al observar la tabla se puede concluir que el comportamiento de los espigones rectos sigue una tendencia más marcada de pérdida de arena en comparación con los espigones curvos (3-7), ya que en estos últimos hay una mayor variabilidad entre la sedimentación y la erosión de arena. Incluso podemos encontrar un caso excepcional, el del espigón número 7, ya que es el único en el que se ha presentado deposición de arena.

El análisis de las fotos aéreas, acompañado por el trabajo de campo que realizamos al medir los espigones y reconocer la situación, nos permiten tener un análisis del transporte de arena y la situación de los espigones en condiciones “normales”, y compararlo con una situación de huracán. A través de este estudio parece ser claro que la construcción de espigones no ayuda a mantener el perfil de playa, al contrario, contribuye a su desaparición o modificación drástica.

CONCLUSIONES

- De los cálculos realizados de la disipación de energía por unidad de volumen de agua (D^*), encontramos que debido al aumento de la profundidad del mar producido por el paso del huracán la energía de la ola aumento más del doble, de 353.85 J/m^3 a 826.99 J/m^3 para cada ola.
- De la gráfica obtenida al comparar el número de Shields contra la profundidad del mar, que varía desde condiciones normales hasta las que se presentan en una situación de huracán, se observa la fuerte relación directa entre la movilidad del lecho y el transporte de sedimentos con la altura de las olas, que a su vez dependen de la profundidad del mar. De hecho la movilidad de la arena en el fondo durante el huracán Wilma aumentó más de tres veces de la que se presenta normalmente en la isla, lo que explica el retroceso que ocurrió en la línea de playa de hasta 18 m en algunos lugares.
- El paso del huracán, como se puede observar claramente en las fotografías aéreas, provocó la pérdida de la duna de arena paralela a toda la playa y un retroceso en la línea de playa que varió desde 3 hasta 27 m en el caso más grave, con la única excepción del espigón 7 donde la línea de playa creció 30 m.
- Los espigones en Holbox fueron colocados para combatir el problema de la erosión que es generado por el impacto de las olas en la playa. En condiciones normales y al interactuar con los espigones, generan una erosión leve que requiere de años para provocar problemas a los terrenos de los hoteles; sin embargo cuando existe un huracán, al aumentar tanto la profundidad y la altura de las olas (por consiguiente la energía disipada en la playa) el efecto de la interacción con los espigones magnifica a tal grado la erosión, que en unas cuantas horas la línea de playa sufre un retroceso que en condiciones normales le tomaría años.

- La importancia principal de este trabajo radica en aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera, en el desarrollo de posibles alternativas de solución a problemas reales, como lo es la erosión en la isla de Holbox.

BIBLIOGRAFIA

- Airy, G. B. 1845. *Tides and Waves*, Encyc. Metrop, Art. 192, 241-396.
- Capurro, Luis 2003, Artículo: Un Gran Ecosistema Costero: La península de Yucatán, Revista: Avance y Perspectiva, vol. 22, pp. 69-75.
- Cooper J., Jackson D., Navas F., McKenna J. and Malvarez G. (2004). Identifying storm impacts on an embayed, high-energy coastline: examples from western Ireland. *Marine Geology* 210, (2004) 261-280.
- CRUPY Centro Regional Universitario de la Península de Yucatán.
<http://www.chapingo.mx/crupy/?s=maszona>
- Cruz, Nicolas 2005. Tesis, Facultad de Química, U.N.A.M., Análisis de la erosión en la playa de Holbox.
- Dean, R. G. 1968. "Relative Validity of Water Wave Theories," *Proc. Civil Engr. in Ocean, ASCE*, Vol 1, pp1-30.
- Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific Pub. Co., Teaneck, NJ.
- Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (2002). *Coastal Processes with engineering applications*. Cambridge University press. Cap. 1-8.
- Dibajnia M., Nairn R. and Ross P. (2004). Analysis of long-term sand accumulation at a harbor using 2DH numerical simulation. *Coastal Engineering* 51, (2004) 863-882.
- Euan, J. 2004. Información personal.

- Fulford, E. T. 1985. "Reef Type Breakwaters for Shoreline Stabilization," Proceedings, Coastal Zone 85, ASCE, NY.
- Hanson, H. and Kraus, N.C. 1989. "GENESIS – Generalized Model for Simulating Shoreline Change", Vol. 1: Reference Manual and Users Guide, Technical Report CERC-89-19, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, 427 pp.
- Havelock, T. H. 1918. "Periodic Irrotational Waves of Finite Height," *Trans. Royal Soc. of London*, Vol 95 series A, pp 37-51.
- Horn P. (2002). Beach groundwater dynamics. *Geomorphology* 48, (2002) 121-146.
- Hsu, S. A. 1988. *Coastal Meteorology*, Academic Press, San Diego, CA.
- Jones K. and Hanna E. (2004). Design and implementation of an ecological engineering approach to coastal restoration at Loyola Beach, Kleberg County Texas. *Ecological Engineering* 22, (2004) 249-261.
- Kinsman, B. 1965. *Wind Waves*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Kuhrts C., Fennel W. and Seifert T. (2004). Model studies of transport of sedimentary material in the western Baltic. *Journal of Marine Systems* 52 (2004) 167-190.
- Liu, P.-L. F. and Dalrymple, R. A. 1978. "Bottom Friction Stresses and Longshore Currents due to Waves with Large Angles of Incidence," *Jour. Marine Res.*, Vol 36, pp 357-375.
- Maged M. (2001). TOPSAR wave spectra model and coastal erosion detection. *JAG*, volume 3, Issue 4, 2001.

- SEMARNAT
<http://www.semarnat.gob.mx/qroo/zofemat/www/erosion/erosion1.shtml>
- S. J. Eden-Green and F. Ofori. 1995. "History, World Distribution and Present Status of Lethal Yellowing-Like Diseases of Palms". *Memories of the International Workshop on Lethal Yellowing-Like Diseases of Coconut*, Elmina, Ghana, November 1995. pp. 345-350
- (USACE) U.S. Army Corps of Engineers. 1993. "Wave Attenuation Over Reefs," *Coastal Engineering Technical Note, CETNI-56*, U.S. Army Engineer, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- (USACE) Engineer Manual 1110-2-1204, 31 de enero 1995
 Environmental Engineering for Coastal Shore Protection
- Wu and Liu 1984
 Wu, C-S., and Liu, P.-L. F. 1984. "Effects of Nonlinear Inertial Forces on Nearshore Currents," *Coastal Engr.*, Vol 8, pp 15-32.