



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VEGETACIÓN SUBMARINA EN LA  
HIDRODINÁMICA MARINA Y EN LA ESTABILIDAD DE PLAYAS

MODALIDAD DE GRADUACIÓN: TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
IVÁN ARTURO GARCÍA MARTÍNEZ

TUTOR PRINCIPAL  
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE DE 2015



**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr. Escalante Sandoval Carlos A.

**Secretario:** Dr. Silva Casarín Rodolfo

**Vocal:** Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo

**1 er. Suplente:** Dra. Reyes Chávez Lilia

**2 d o. Suplente:** Dra. Martínez Vázquez Ma. Luisa

**Lugar o lugares donde se realizó la tesis:** Instituto de Ingeniería, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

-----  
FIRMA



## Agradecimientos

A mi madre y padre, Gloria Martínez Ramírez y José Aurelio García López, por su paciencia, ánimo y apoyo incondicional. No importa lo ocurrido, siempre estuvieron ayudándome cuando más lo necesitaba.

A Arlette Camacho Hernández por su amor, tiempo, alegría, consejos, ánimos, observaciones e infinita paciencia. Tu ayuda y compañía fueron una parte muy esencial para finalizar esta tesis. Cada día me alientas a seguir adelante y a seguir mejorando en todos los aspectos, gracias por estar a mi lado.

A mis compañeros y amigos de la maestría, Irais Basurto Hernández, Antonio Flores e Iskra Mejía Estrada, por todos los momentos alegres que compartimos en el aula de clase y fuera de ella. Amigos del Laboratorio de Costas y Puertos, Carlos A. Armenta Aguilar, Jesús Pinedo, Itxaso Odériz Martínez, Jesús E. Monroy Barrales, Xavier Chávez y Erika Ramírez, por sus ideas y ayuda en la realización de los experimentos en el canal de oleaje. A David Rosales Viveros por su ayuda en la fabricación de los parches de pastos marinos.

Al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin y al Dr. Rodolfo Silva Casarín por sus observaciones e ideas para la realización de esta tesis. Gracias, también, por haber confiado en mí en los 4 años que pertencí al grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería. Nunca olvidaré sus consejos y enseñanzas.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, en especial al Laboratorio de Costas y Puertos, por ofrecerme sus instalaciones para la realización de las pruebas experimentales en el canal de oleaje. El Instituto de Ingeniería fue como un segundo hogar durante 4 años y estoy muy agradecido con todas las personas que lo integran porque se volvieron una nueva familia para mí.

A CONACYT por su apoyo que me permitió estudiar una maestría. Gracias por todo.

A todos ellos, gracias.



## Resumen

La ecoingeniería es un enfoque relativamente nuevo de la ingeniería de costas que busca nuevas soluciones a las conocidas demandas sociales pero bajo la premisa de un menor impacto ambiental y paisajística al incorporar los elementos, funcionamiento y ciclos del medio natural. Atendiendo a dichas filosofías, este trabajo caracteriza el efecto hidrodinámico de las praderas de pastos marinos como medio no estructural para la protección costera. Diversas investigaciones y observaciones de campo han señalado que la presencia de pasto marino reduce la velocidad, turbulencia e intensidad del oleaje disminuyendo así el transporte de sedimentos y ayudando a la estabilidad de los mismos debido a la estructura del pasto marino (raíces, rizomas y tallos), lo que en última instancia favorece la resistencia y resiliencia de las playas. La atenuación del oleaje con vegetación marina está gobernada por la sumergencia - relación que hay entre la altura de pasto y la profundidad a la que se encuentra - , además de las características físicas de cada especie de pasto marino - ancho y altura de hoja de la planta, densidad de plantas -. El trabajo experimental presentado en esta tesis se enfoca en determinar la interacción pasto marino-oleaje cuantificando la transmisión, la reflexión y la alteración del perfil de velocidades del oleaje debidos a la presencia del pasto. Las modelaciones se realizaron en el canal de oleaje del Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, donde se tienen bajo control variables de oleaje como la profundidad, altura de ola y periodo. Se utilizaron cintas de polipropileno para simular el pasto *Thalassia testudinum*, especie representativa de las costas del atlántico mexicano.





## Abstract

Ecoengineering is a relatively new approach in coastal engineering, which focuses on finding new solutions to known social demands under the premises of less environmental and visual impacts (than traditional engineering produced) and considering the natural elements, dynamics and cycles. In agreement with those directives, the use of seagrass as a non-structural means to protect beaches is proposed herein. Several research and field observations have pointed out that seagrass is capable of reducing the velocity, turbulence and intensity of gravity waves thus reducing the sediments transport and helping to their stability due to the seagrass structure (roots, rhizomes and stems), which in turn can favor the beach stability. The wave attenuation by vegetation is governed by its submergence (the ratio between the water depth and the seagrass height) and the physical characteristics of each one of the species (leaf wide, length and density). The experimental work presented in this thesis is devoted on evaluating the seagrass-waves interaction by assessing wave transmission and reflection, as well as the alterations induced to the velocity profile by the presence of the seagrass. The physical modelling was performed in the wave flume of the Coasts and Ports Laboratory of the Engineering Institute at the Autonomous National University of Mexico; where water depth, wave height and period can be controlled. The seagrass model was made with polypropylene strips which *Thalassia testudinum* seagrass, commonly found in the Mexican Caribbean, was effectively represented with.



# Índice

Agradecimientos .....	5
Resumen.....	7
Abstract .....	9
Lista de Figuras.....	15
Lista de Tablas .....	17
Introducción .....	19
Objetivos .....	21
Organización del trabajo .....	23
1. Protección de playas y pastos marinos .....	25
1. 1 Morfología de playas.....	25
a. Perfil transversal de playas .....	26
b. Equilibrio de playas .....	28
c. Transporte de sedimentos .....	28
d. Erosión de playas.....	29
e. Formaciones derivadas de la erosión y deposición costera.....	30
1. 2 Protección/restauración de playas .....	30
a. Estrategias de actuación .....	30
b. Fases de trabajo y evaluación .....	31
1. 3 Medios de protección de playas .....	31
1. 4 Pastos marinos .....	33
a. Características morfológicas de los pastos marinos .....	34
b. Características biológicas de los pastos marinos .....	35
c. Distribución de los pastos marinos en México.....	35
d. Problemática y conservación de pastos marinos en México .....	38
e. Los pastos marinos como alternativa no estructural de protección costera.....	39
2. Estado del arte .....	41
2. 1 Variables que intervienen en la interacción pasto marino-oleaje .....	41
2. 2 Modelos de evolución de la altura de ola .....	42
a. Kobayashi et al. (1993).....	42
b. Dalrymple et al. (1984) y Méndez y Losada (2004).....	45
2. 3 Coeficiente de arrastre ( $C_D$ ).....	47

a.	Relación $C_D-R_e$ .....	48
b.	Relación $C_D-K_c$ .....	50
2. 4	Fenómenos que se presentan en la interacción pasto marino-oleaje.....	51
3.	Modelo experimental.....	53
3. 1	Representación de los pastos marinos .....	53
a.	Fabricación de los pastos marinos .....	54
3. 2	Canal de oleaje .....	55
3. 3	Instrumentación .....	56
a.	Sensores de nivel.....	56
b.	Descripción de la calibración de los sensores de nivel .....	56
c.	Frecuencia de muestreo.....	57
d.	Medición de perfil de velocidades con UVP.....	58
e.	Ventajas del método UVP .....	61
3. 4	Análisis de datos.....	61
a.	Conversión de voltaje a altura de ola.....	61
b.	Cálculo de la onda reflejada .....	62
c.	Cálculo del coeficiente transmisión .....	63
d.	Cálculo del coeficiente de disipación .....	63
e.	Perfil de velocidades .....	64
3. 5	Condiciones modeladas .....	64
a.	Profundidades .....	64
b.	Alturas de ola y periodos. Criterios de semejanza .....	65
c.	Ubicación de los sensores de nivel.....	68
d.	Frecuencia de muestreo.....	69
4.	Resultados .....	71
4. 1	Análisis gráfico de las pruebas .....	71
4. 2	Coeficiente de reflexión .....	74
4. 3	Coeficiente de transmisión .....	75
4. 4	Coeficiente de disipación de energía .....	78
4. 5	Análisis de la evolución de la altura de ola sobre los pastos marinos .....	79
4. 6	Determinación del parámetro de decaimiento ( $ki, \beta$ ) .....	84
4. 7	Determinación del coeficiente de arrastre, $CD$ .....	87

4.8	Análisis de velocidades medidas con los sensores UVP .....	92
5.	Conclusiones.....	97
6.	Referencias.....	99



## Lista de Figuras

Figura 1. 1 Esquema conceptual de la ecuación de continuidad del sedimento. ....	26
Figura 1. 2 Pedrozo, A. (2011). Terminología del perfil de playas [Figura]. Procesos costeros y morfodinámica de playas. ....	27
Figura 1. 3 Silva y Mendoza (2012c). Formaciones costeras asociadas a la erosión. [Figura]. Morfodinámica de playas. ....	30
Figura 1. 4 Medios rígidos de protección costera: (a) Espigón, (b) muros costeros, (c) revestimientos y (d) geotubos. ....	32
Figura 1. 5 Medios flexibles o blandos de protección costera: (a) arrecifes artificiales y (b) rellenos de playas. ....	33
Figura 1. 6 Partes de una fanerógama marina. ....	35
Figura 1. 7 Ubicación de las especies de pasto marino que se encuentran en territorio mexicano. (a) <i>Halodule beaudettei</i> , (b) <i>Halodule wrightii</i> , (c) <i>Halophila decipiens</i> , (d) <i>Halophila engelmanni</i> , (e) <i>Phyllospadix scouleri</i> , (f) <i>Phyllospadix torreyi</i> , (g) <i>Syringodium filiforme</i> , (h) <i>Thalassia testudinum</i> y (i) <i>Zostera Marina</i> . ....	37
Figura 2. 1 Variación del coeficiente de amortiguamiento en el modelo exponencial. ....	43
Figura 2. 2 Variación del coeficiente de amortiguamiento (KV) en el modelo de fraccionario. ....	45
Figura 2. 3 Comparación de los coeficientes de amortiguamiento obtenidos en el modelo exponencial y fraccionario. ....	47
Figura 3. 1 Construcción de un haz foliar con cintas de polipropileno. ....	53
Figura 3. 2 Marcos de aluminio, de 1.0 m de largo y 0.79 m de ancho, con una densidad de 800 haces foliares por metro cuadrado. ....	54
Figura 3. 3 Esquema del canal de Instituto de Ingeniería. Las unidades se encuentran en metros. ....	55
Figura 3. 4 Sensores de nivel (a) y posiciones para su calibración (b). ....	57
Figura 3. 5 Descripción del método de medición UVP. ....	58
Figura 3. 6 Rango de velocidad medible ( $V_{\text{range}}$ ) y profundidad máxima medible ( $P_{\text{max}}$ ). ....	59
Figura 3. 7 Parte trasera de la unidad de control con 20 entradas de transductores. ....	60
Figura 3. 8 Ubicación de los sensores de velocidad UVP. Unidades en metros. ....	61
Figura 3. 9 Largo del pasto, $L_s$ , y profundidad del fondo del pasto, $h_p$ . ....	65
Figura 4. 1 Flexibilidad de los pastos marinos para diferentes condiciones de oleaje. Dirección del oleaje de izquierda a derecha. ....	72
Figura 4. 2 Evolución de la altura de ola antes, durante y después de la longitud de los pastos marinos. Fotografías tomadas de una modelación con condiciones $H = 0.10\text{m}$ , $T = 1.6\text{s}$ y $h = 0.30\text{m}$ . (1.a) y (1.b) seis metros antes de los pastos, (2.a) y (2.b) al inicio de los pastos, (3.a) y (3.b) al final de la longitud de los pastos y, por último, (4.a) y (4.b) dos metros después de los pastos. Estas fotos no se ven muy bien... y si lo completas con un dibujo? ....	73

Figura 4. 3 Coeficiente de reflexión para los pastos marinos. Explicar las variables de los ejes y la simbología, para que los no-ingenieros que lean tu tesis comprendan la figura con mayor facilidad. ....	75
Figura 4. 4 Coeficiente de transmisión para los pastos marinos. Explicar las variables de los ejes para que los no-ingenieros comprendan mejor tu tesis .....	76
Figura 4. 5 Comparación de datos laboratorio con la Ecuación 4.1.....	77
Figura 4. 6 Comparación de los coeficientes de transmisión experimentales con los calculados de la Ecuación 4.1 .....	78
Figura 4. 7 Coeficiente de disipación para los pastos marinos. ....	79
Figura 4. 8 Evolución de la altura de ola sobre los pastos marinos para 4 escenarios diferentes (dos periodos, 2 sumergencias) con 12 alturas de ola.....	81
Figura 4. 9 Alturas de ola registradas a lo largo de los pastos marinos relativa a la altura de ola registrada al inicio de los pastos (Coeficiente de amortiguamiento por vegetación, KV). ....	82
Figura 4. 10 Escenarios que presentaron peraltamiento de la ola ( $KV > 1$ ).....	83
Figura 4. 11 Coeficiente de decaimiento, $k_i$ , e interpolación de isolíneas para los 56 escenarios modelados. Los puntos negros representan los escenarios donde no se presentó peraltamiento de la ola y aquellos que sí están graficados con cuadros rojos.....	85
Figura 4. 12 Coeficiente de decaimiento, $\beta$ , e interpolación para condiciones intermedias. ....	86
Figura 4. 13 Identificación de la zona de peraltamiento de la ola, $KV > 1$ .....	87
Figura 4. 14 Coeficiente de arrastre de Kobayashi et al. (1993), Ecuación 4.5, en función del número de Re.....	89
Figura 4. 15 Evaluación de la Ecuación 4.7 comparando la altura de ola medida contra la altura de ola obtenida por la ecuación.....	89
Figura 4. 16 Coeficiente de arrastre de Méndez y Losada (2004), Ecuación 4.9, en función del número de Re.....	91
Figura 4. 17 Evaluación de la Ecuación 4.9 comparando la altura de ola medida contra la altura de ola obtenida por la ecuación.....	91
Figura 4. 18 Comparación gráfica de las Ecuaciones 4.7 y 4.9 con las ecuaciones encontradas de la literatura.....	92
Figura 4. 19 Alteración del ciclo de velocidades en el sensor 2 para la prueba con $T = 2.5s$ y $H_0 = 0.1808m$ . Se presentan las mediciones de dos profundidades: una por encima de los pastos y otra por debajo de la altura de los pastos. El promedio de la velocidad en ambas profundidades se compara con la velocidad orbital teórica de la Ecuación 2.8.....	93
Figura 4. 20 Evolución del ciclo de velocidades antes, durante y después de la longitud de los pastos con $h = 0.60m$ , $T = 2.5s$ y $H_0 = 0.1808m$ .....	95
Figura 4. 21 Comparación del ciclo de velocidades en $z = -h + LV$ con respecto al ciclo de velocidades en $z < -h + LV$ . Mediciones realizadas en una profundidad de $h = 0.60m$ . ....	96



## Lista de Tablas

Tabla 1. 1 Calidad del agua para el pasto marino según la especie. No hay datos para las especies <i>Halodule beaudettei</i> , <i>Halophila engelmanni</i> , <i>Phyllospadix scouleri</i> , <i>Phyllospadix torreyi</i> y <i>Syringodium filiforme</i> . Fuente: The Ocean Biogeographic Information System (OBIS), <a href="http://www.iobis.org/mapper/">http://www.iobis.org/mapper/</a> .....	36
Tabla 2. 1 Coeficientes de decaimiento, $ki$ , obtenidos para diferentes especies para el modelo exponencial.....	43
Tabla 2. 2 Coeficientes de decaimiento, $\beta$ , obtenidos para diferentes especies para el modelo en forma de fracción.....	46
Tabla 2. 3 Coeficientes de ajuste para la Ecuación 2.8 determinados para diferentes especies de pasto y rangos de números de Reynolds, $Re$ .....	49
Tabla 2. 4 Ecuaciones empíricas determinadas que relacionan el Coeficiente de arrastre, $C_D$ , y el número de Keulegan-Carpenter, $K_C$ .....	50
Tabla 3. 1 Valores teóricos para $P_{max}$ 100 mm y 750 mm calculados para emisiones en el agua ( $c=1480$ m/s).....	60
Tabla 3. 2 Profundidades, periodos y alturas de ola modelados.....	67
Tabla 3. 3 Periodos de ola en el modelo y prototipo considerando la Ecuación 3.10 con una escala geométrica de 1:20.....	67
Tabla 3. 4 Alturas de ola en el modelo y prototipo de acuerdo con la Ecuación 3.11 considerando una escala geométrica de 1:20.....	68
Tabla 3. 5 Separaciones entre los sensores de nivel para cada periodo propuesto.....	69
Tabla 3. 6 Número de datos por registrar para cada prueba dependiendo del periodo.....	69



## Introducción

El desarrollo turístico, urbano, industrial y comercial en las costas mexicanas va en aumento, al igual que la demanda de nuevas soluciones para protegerlas de las actuaciones antrópicas locales y distantes. En muchas ocasiones, es necesario implementar medidas de protección para salvaguardar los intereses humanos, ecológicos y económicos que se encuentran en las costas. Algunas de las medidas de protección costera que se emplean tradicionalmente son: espigones, diques emergidos y sumergidos, estructuras a base de bolsas de geotextil, gaviones, recubrimientos, entre otros. Aunque existe una amplia gama de estructuras de protección costera, un nuevo enfoque en la ingeniería, la ecoingeniería, busca nuevas soluciones que incorporen la dinámica de los elementos del medio natural.

Considerando la parte biótica y abiótica, las praderas de pastos marinos son ecosistemas que permanecen sumergidos en agua marina de baja turbulencia, como en estuarios, marismas y lagunas costeras de poca profundidad (menor a 10 m). La literatura indica que la estructura de los pastos marinos (raíces, rizomas y tallos) reduce la velocidad, turbulencia e intensidad del oleaje generando una zona de calma en el interior de las hojas (Bradley y Houser, 2009). La disminución del oleaje dependerá de las características físicas de cada especie de pasto marino. Para las costas mexicanas del golfo de México y del mar Caribe, la especie más representativa de pasto marino es la *Thalassia testudinum* mientras que para las costas del Pacífico mexicano la especie representativa es la *Zostera marina* (Romeu, 1996).

Los fenómenos naturales y actividades antropogénicas están provocando pérdida ecosistemas costeros en el litoral mexicano, incluidos los pastos marinos. En México, la protección de pastos marinos se contempla en la NOM-022-SEMARNAT-2003 que establece las especificaciones para la preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar. Dentro de la norma se menciona que del año 1993 al 2000 se perdió 69,389 Ha de manglar, un 7.8 % del área total, a una tasa de deforestación anual del 1.12 %. Información en específico (extensión y/o tasa de deforestación) de los pastos marinos en territorio mexicano no existe.

Por otra parte, la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) elabora el Inventario Nacional de Humedales (INH) que contiene información de los límites, clasificación, normas de protección y aprovechamiento de los humedales. Los humedales son ecosistemas de transición entre los ecosistemas acuáticos y terrestres que están constituidos por áreas de inundación permanente o temporal, sujetas a la influencia de marea o no, y de vegetación hidrófila como son los manglares y pastos marinos (SEMARNAT et al., 2008). La información actualizada de los pastos marinos (especies, extensión, tasa de crecimiento o de pérdida) aún no está incorporada en el INH.

El entendimiento de los elementos que componen los diferentes sistemas costeros conlleva a la propuesta de nuevas soluciones para su protección. Siguiendo esta idea, es importante investigar el carácter disipativo de energía de la interacción pasto marino-oleaje para determinar su impacto en el sistema costero y evaluar su posible utilización como medio de protección costera.



## Objetivos

### Objetivo principal

El objetivo principal de este trabajo es cuantificar la disipación de energía del oleaje que genera la presencia de praderas de pastos marinos a través de coeficientes de transmisión, reflexión y el perfil de velocidades del oleaje para evaluar la posible utilización de estas praderas como medio no estructural de protección costera.

Las modelaciones se realizaron en el canal de oleaje del Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM utilizando pasto marino artificial. El pasto marino simulado corresponde a la especie de *Thalassia testudinum* y fue fabricado con cintas de polipropileno adosados a marcos de aluminio.

### Objetivos complementarios

- Recopilar información sobre información biológica, ubicación y extensión de los pastos marinos en México.
- Recopilar información de investigaciones que se han realizado acerca de la interacción pasto marino-oleaje, independientemente de la especie de pasto marino.
- Fabricar marcos de pastos marinos sintéticos que simulen la especie de pasto marino *Thalassia Testudinum*
- Modelar diversas condiciones de oleaje, en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM; y medir la superficie libre y velocidad del agua en cada una de las pruebas.



## **Organización del trabajo**

### Capítulo 1. Protección de playas y pastos marinos

Se define y describe los elementos que componen una playa y sus medios de protección; asimismo se esbozan las particularidades más relevantes de los pastos marinos, su distribución y problemática en México. Al final, se menciona las características de la interacción pasto marino-oleaje que pueden servir como protección costera.

### Capítulo 2. Estado del arte

Se presentan las ecuaciones más importantes que describen la interacción pasto marino-oleaje y se muestran los valores de parámetros obtenidos en diferentes investigaciones.

### Capítulo 3. Modelo experimental

Se detallan las características del canal de oleaje, la instrumentación utilizada y su ubicación, las condiciones modeladas (profundidades, alturas de ola y periodos) y la descripción de la fabricación de los pastos marinos artificiales.

### Capítulo 4. Resultados

Se realiza un análisis y se presentan gráficamente los resultados de las pruebas realizadas. Se explican los resultados obtenidos a través de la instrumentación utilizada y la comparación de resultados de otras investigaciones.

### Capítulo 5. Conclusiones

Se presentan las conclusiones derivadas del trabajo realizado.





## **1. Protección de playas y pastos marinos**

La costa es un ambiente dinámico desde las ópticas espacial y temporal, cuyos límites dependen de circunstancias naturales (clima, viento, oleaje, mareas, actividad biológica) y, en algunos casos, de las actividades antropogénicas de cada sitio. El Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad en su apartado de Obras Marítimas (Silva y Mendoza, 2012b) define a la costa como una franja de transición entre el medio acuático y el terrestre, de longitud y ancho variables, donde el fenómeno hidráulico y energético que gobierna es el oleaje. Dentro del espacio que abarca la costa, se encuentran zonas naturales como playas, lagunas, tierras húmedas, estuarios, manglares, dunas y acantilados. Mientras que en las zonas modificadas por las actividades antropogénicas se tienen puertos, industrias, sitios arqueológicos, áreas urbanas y establecimientos turísticos.

La playa es una formación natural en la costa compuesta de sedimento suelto, de diversos tamaños (arenas, gravas, arcillas y limos) y características (cohesivos y no cohesivos), que se extiende a partir de la línea de bajamar hacia tierra hasta donde se marca un cambio evidente del tipo de material o hasta la línea de vegetación permanente (Silva y Mendoza, 2012b). Los sedimentos que conforman a las playas pueden ser de origen marino, fluvial, terrestre o biológico y sus características físicas y químicas dependerán de cada sitio (Silva y Mendoza, 2012c). Debido a la variabilidad de los procesos que se presentan en las costas y de las características geológicas de cada lugar, en las playas se puede depositar material (acreción de la playa) o puede presentarse pérdida de material (erosión de playas). El proceso costero que domina la dinámica de las playas es el oleaje.

En materia de protección de playas, la legislación vigente en México incluye la NMX-AA-120-SCFI-2006 que establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas. La NMX-AA-120-SCFI-2006 incluye las medidas ambientales para la protección al ambiente, en las playas turísticas de México, en materia de calidad de agua, residuos sólidos, infraestructura costera biodiversidad, seguridad y servicios. También la norma indica que la conservación de la zona costera es importante para muchos países, ya que contribuye al desarrollo turístico de la región costera aumentando los beneficios para los habitantes.

### **1.1 Morfología de playas**

La morfología de playas es la rama encargada de estudiar los cambios que se producen en las playas, en el tiempo y en el espacio, debidos a la pérdida o acumulación de sedimento (Pedrozo, 2011). Para determinar estos cambios es necesario conocer la interacción que existe entre las condiciones hidrodinámicas y el sedimento del lugar estudiado.

Una manera de explicar las pérdidas o acumulación de sedimento que se producen en las playas es a través de la ecuación de continuidad del sedimento, representada en la Ecuación 1.1. Esta ecuación indica que la variación en el gasto de sedimento en las direcciones  $x$  y  $y$ , determina la cantidad de sedimento en la playa, en un instante de tiempo (Figura 1.1).

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \quad (1.1)$$

Donde

$V$  - volumen

$Q$  - transporte de sedimento

$t$  - tiempo

$x$  - coordenada transversal

$y$  - coordenada longitudinal

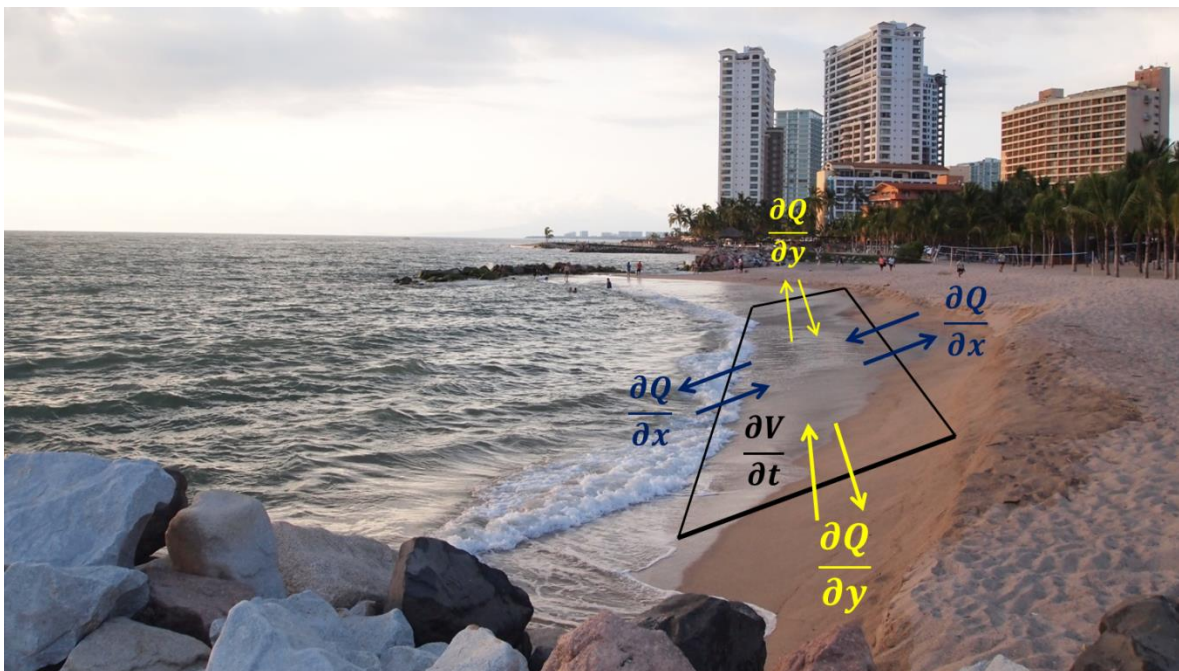


Figura 1. 1 Esquema conceptual de la ecuación de continuidad del sedimento.

### a. Perfil transversal de playas

Un perfil transversal es una gráfica de un corte imaginario perpendicular en un punto de un eje. Por lo que un perfil transversal de playa es una representación gráfica del corte perpendicular a la línea de costa.

Así como existen diversos perfiles transversales de playas, también existen diversas condiciones hidrodinámicas que los gobiernan. A pesar que se pueden encontrar diversos perfiles transversales de playas a lo largo de una línea de costa, estos perfiles tienen características morfológicas similares. En un perfil transversal de playa se pueden identificar tres zonas que dependen de la interacción del fondo con el oleaje (Figura 1.2), las cuales son: zona de rompientes, zona de transición y zona de swash (zona de lavado).

La zona de rompientes se caracteriza por ser el lugar en donde se peraltan las ondas provenientes de aguas profundas hasta que pierden estabilidad y rompen. El peraltamiento de la onda y su rotura se produce por la disminución en la profundidad del fondo marino. Los rasgos morfológicos representativos de esta zona son las barras y las depresiones. Una consecuencia de la presencia de las barras son los gradientes hidrodinámicos que se presentan en las cercanías de la costa. Las barras son muy dinámicas y tienden a moverse en respuesta a los cambios en las condiciones del oleaje. El desplazamiento de la barra hacia el mar se presenta en condiciones de tormenta, mientras que, el desplazamiento hacia la costa se presenta en condiciones de calma en donde el nivel de energía del oleaje es menor.

La zona de transición es la región del perfil transversal que se encuentra entre la zona de rompientes y la zona de swash. Lo que caracteriza a esta zona es la turbulencia que se presenta debido a la rotura de las olas. La turbulencia puede convertirse en un mecanismo para suspender los sedimentos y transportarlos a la zona de lavado.

La zona de swash o de lavado es la zona del perfil transversal de playa que presenta ascenso y descenso del oleaje. El movimiento del sedimento que compone a la playa es muy dinámico en esta zona. La longitud de esta zona depende de la pendiente de la playa, que a su vez depende del tamaño del sedimento, y de las condiciones del oleaje. Los rasgos morfológicos que se encuentran en esta zona son: la berma, la cara de la playa, el escalón y formaciones repetidas (semicírculos de la costa).

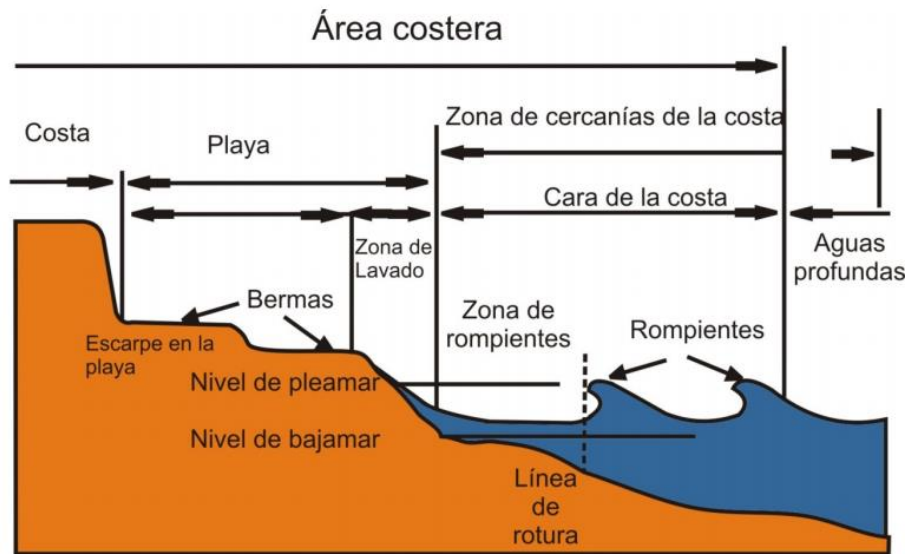


Figura 1. 2 Pedrozo, A. (2011). Terminología del perfil de playas [Figura].  
Procesos costeros y morfodinámica de playas.

Además de la clasificación por sus características físicas, el perfil transversal de playas puede clasificarse según su transporte de sedimento y su interacción con el oleaje.

De acuerdo a su transporte de sedimento, el perfil transversal de playas puede ser acumulativo o erosivo (Silva y Mendoza, 2012c). El perfil de playas acumulativo se presenta cuando hay pocas

variaciones en la pendiente y el oleaje presenta poca altura en un periodo de tiempo largo, en otras palabras, en condiciones de energía bajas. En cambio, los perfiles transversales de playas erosivas se desarrollan en condiciones de energía altas, en periodos de tiempo corto, con alturas de ola altas y permite la formación de barras.

De acuerdo a la interacción con el oleaje, el perfil transversal de playas puede ser disipativo o reflejante (Silva y Mendoza, 2012c). El perfil de playas disipativo se caracteriza por tener pendientes suaves (de 0.01 a 0.05) a diferencia del perfil reflejante que presenta pendientes pronunciadas (de 0.1 a 0.2). Otra diferencia que se puede observar de estos perfiles es el tipo de rompiente del oleaje, el perfil disipativo presenta rompientes continuas, mientras que el perfil reflejante presenta rompientes ondulantes.

### **b. Equilibrio de playas**

Las variables que influyen en el equilibrio de playas son: el tamaño del sedimento, la altura de ola incidente, el periodo de ola y el nivel de marea.

El equilibrio de playas se refiere, si la condiciones marítimas son constantes, a un estado morfológico final y constante en el cual los cambios cesan o son muy pequeños (Silva y Mendoza, 2012d). Los cambios en la morfología de una playa los provocan las condiciones marítimas a la cual está sometida, dichas condiciones pueden provocar erosión o acreción de sedimentos. Pero estas condiciones marítimas no son constantes en el tiempo ni en el espacio.

De acuerdo al estado de equilibrio, el equilibrio de playas se puede clasificar en equilibrio estático, dinámico y metaestable o hiperestático. El equilibrio estático se presenta cuando no hay aporte ni pérdida de sedimento que modifique la morfología de la playa a lo largo del tiempo. El equilibrio metaestable o hiperestático se presenta cuando en la playa se producen cambios de un estado de equilibrio a otro en periodos de tiempo cortos y dichos cambios no permiten a la playa alcanzar una estabilidad definitiva (Silva y Mendoza, 2012c).

El equilibrio en playas implica que los cambios morfológicos transversales y longitudinales también se encuentren en equilibrio. En la literatura podemos encontrar investigaciones que enfocan su estudio a cada uno de los cambios morfológicos, transversales y longitudinales, aunque separados no representan la realidad pero sirven para identificar ciertos elementos en la hidrodinámica costera que influyen en el transporte de sedimentos. El perfil transversal de equilibrio y el perfil longitudinal de equilibrio de playas tienen el mismo concepto de equilibrio de playas pero contemplando únicamente los cambios morfológicos transversales y longitudinales, respectivamente (Silva y Mendoza, 2012d).

### **c. Transporte de sedimentos**

La playa es una zona de la costa que se encuentra en constante dinámica y en donde se puede acumular o perder sedimento. Este movimiento de sedimento afecta directamente a actividades costeras (Pedrozo, 2011) como son: construcción de puertos, dragados, construcción de centrales

eléctricas costeras, defensa contra inundaciones costeras, actividades turísticas, presas, seguridad de plataformas petroleras y líneas de conducción, entre otras.

El transporte de sedimento se da por tres procesos básicos que son: incorporación, transporte y deposición (Davidson-Arnott, 2009). La incorporación del sedimento se presenta como resultado de la fricción en el fondo marino debida al flujo. El transporte se presenta cuando los granos ruedan, saltan o se deslizan a lo largo del fondo marino y se debe a la fricción existente en el fondo o por la gravedad en los casos de fondos con pendiente. La deposición es el proceso en donde el sedimento cesa su movimiento y retoma su reposo.

De acuerdo con su movimiento relativo a la línea de costa, la dirección del transporte de sedimento se puede dividir en dos: transporte longitudinal y transporte transversal. En el transporte longitudinal, el sedimento se mueve en una dirección paralela a la línea de costa; mientras que en el transporte transversal, el sedimento se mueve en una dirección perpendicular a la línea de costa.

La tasa de transporte de sedimento se define como la cantidad de sedimento por unidad de tiempo que pasa por un plano vertical de ancho unitario y que está perpendicular al flujo. Esta cantidad dependerá de las características físicas del sedimento (tamaño, densidad, masa, forma del grano, porosidad y ángulo de fricción interna) y del flujo. Las unidades con las que se expresa la tasa de transporte son unidades de volumen o masa por unidad de longitud por tiempo (ej.  $kg/m \cdot s$  o  $m^3/m \cdot s$ ). La tasa de erosión o de acreción del perfil de una playa dependerá del gradiente de la tasa de transporte de sedimento en todas las direcciones.

#### **d. Erosión de playas**

La erosión de playas se establece cuando la playa pierde más sedimento de lo que recibe, a lo largo de la costa o fuera de ella (Silva y Mendoza, 2012d). Existen dos tipos de erosión; la erosión transitoria, ocasionada por una tormenta, y erosión a largo plazo, ocasionada por la falta de abastecimiento de material a la playa. La erosión transitoria es una pérdida natural de material en la berma que sirve de defensa para eventos extremos y se produce en un corto periodo de tiempo (un día o dos), mientras que la erosión a largo plazo es una afectación que se presenta en condiciones normales y los cambios son permanentes.

Se tiene identificado las principales causas que ocasionan erosión en las playas a largo plazo y pueden clasificarse en dos tipos: naturales y por actividades antropogénicas.

Las principales causas naturales son: incremento en el nivel del mar, subsidencia (hundimiento del terreno), variaciones en el aporte de sedimentos a la zona litoral (disminución de material aportado a la costa), oleaje de tormenta, aumento en la acción eólica, transporte longitudinal (aumento en el transporte de sedimento), selección del material playero (selección y distribución de las partículas de arena por acción de las condiciones marítimas).

Las principales actividades antropogénicas que causan erosión de playas son: construcción de infraestructura en zonas de amortiguamiento (dunas y playas), destrucción de flora terrestre y

marina, retención de transporte de sedimento, reducción de aportes de sedimentos a la zona litoral, concentración de energía sobre la playa, cambios en las protecciones naturales (arrecifes, barras), cambio de las características del sedimento (rellenos de playas).

#### e. Formaciones derivadas de la erosión y deposición costera

A causa de los procesos variables que se presentan a lo largo de la costa, las formas costeras se pueden clasificar de acuerdo con la tasa de transporte que presenten, ya sea de acreción o de erosión.

De acuerdo con la tasa de acreción podemos encontrar formas costeras como: flechas, barreras, tómbolos, barras y bajos. En las costas donde se presenta una tasa de erosión se presentan formas como (Figura 1.3): acantilados marinos, puntas rocosas (salientes, promontorios), ensenadas, arcos marinos, cuevas marinas (cavernas, bóvedas), chimeneas marinas (bufaderas), columnas marinas (pilastras, hitos, islas de rocas), plataformas de abrasión (plataforma construida por las olas), bahías y terrazas marinas (plataforma cortada por olas) (Silva y Mendoza, 2012c).

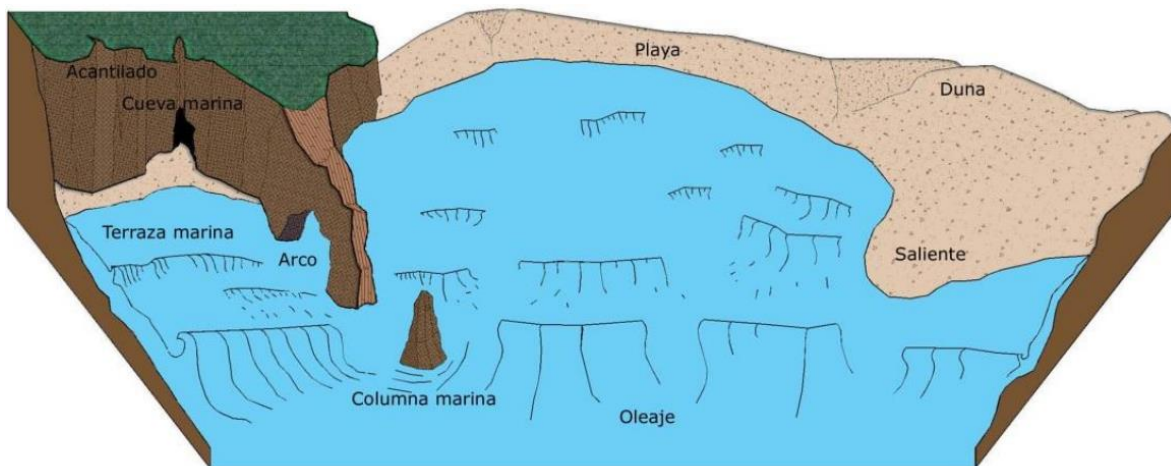


Figura 1. 3 Silva y Mendoza (2012c). Formaciones costeras asociadas a la erosión. [Figura]. Morfodinámica de playas.

## 1.2 Protección/restauración de playas

### a. Estrategias de actuación

En el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad en su apartado de Obras Marítimas (Silva y Mendoza, 2012d) se proponen estrategias para hacer frente a situaciones de erosión de playas, las cuales se enlistan a continuación:

- Estrategia de acomodación o retirada. Se basa en el reacomodo de los bienes que se encuentren en la zona de afectación a zonas seguras y compatibles con la estabilidad dinámica de la playa.
- Estrategia de prevención y corrección. Si se identifican las causas de la erosión de la playa y existe forma de actuar, se opta por soluciones que eliminen, disminuyan y corrijan el problema.

- Estrategia de protección y defensa. Consiste en la construcción de estructuras que eviten el retroceso de la línea de costa.
- Estrategia de regeneración. Se trata de recuperar las condiciones en las cuales la playa no presentaba problemas de erosión.
- Estrategia nula. Se trata de que la playa se recupere naturalmente, sin embargo, es una medida muy cuestionable ya que se puede agravar el problema en un tiempo que se pudo proteger la playa.

## **b. Fases de trabajo y evaluación**

Considerar el problema de erosión de las playas como un sistema es importante para encontrar una solución óptima, en la cual se tiene que tomar en cuenta aspectos sociales, económicos y políticos. Las fases de trabajo y evaluación que conllevan a una solución óptima deben incluir lo siguiente (Silva y Mendoza, 2012d):

- Diagnóstico. Entender las condiciones ambientales y determinar las posibles causas de la erosión.
- Anteproyecto. Estudiar las alternativas de solución.
- Diseño. Elección y cálculo detallado de la alternativa de solución óptima.
- Implementación. Llevar a cabo el proyecto.
- Seguimiento y evaluación del proyecto. Comprobar en campo que la solución está funcionando de acuerdo al diseño, corregir situaciones no contempladas y dar mantenimiento a la estructura.
- Desmantelamiento. Retirar la estructura al concluir su vida útil o cuando las condiciones ya no son seguras ni estables.

## **1.3 Medios de protección de playas**

En función del grado de afectación a la costa y especialmente al transporte litoral de sedimentos, los medios de protección que se llevan a cabo pueden clasificarse en: rígidos o duros y blandos o flexibles (Silva y Mendoza, 2012d).

El objetivo principal de los medios rígidos o duros es mantener la línea de costa en una posición colocando o construyendo estructuras que, como su nombre lo dice, rigidicen un tramo de costa. Este tipo de actuaciones implican modificar, en gran medida, el comportamiento hidrodinámico y el transporte de sedimento en las playas. Dentro de este tipo de soluciones encontramos las estructuras de ingeniería tradicional (Figura 1.4) como son: los espigones, diques emergidos y sumergidos, revestimientos permeables y muros longitudinales, revestimientos impermeables y muros costeros, revestimientos de madera, estructuras a base de bolsas de geotextil, geotubos, gaviones, buques hundidos, entre otras.

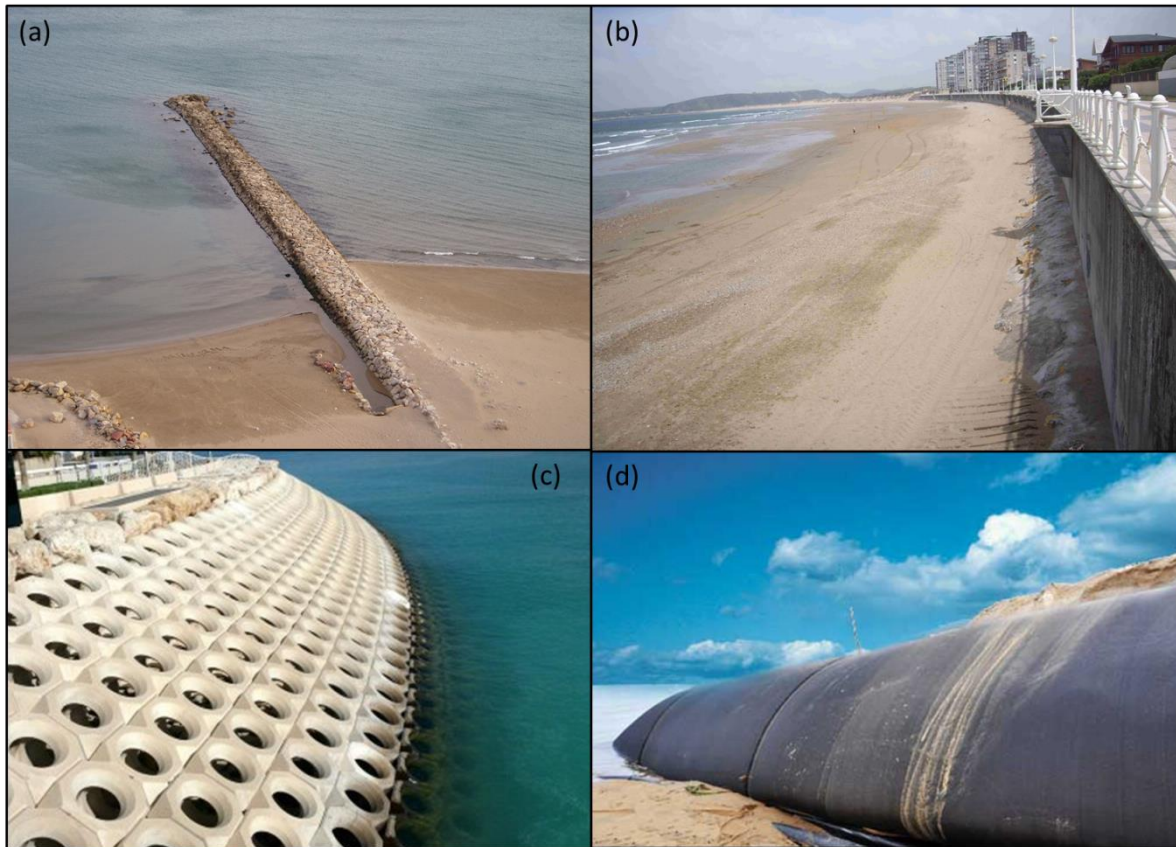


Figura 1. 4 Medios rígidos de protección costera: (a) Espigón, (b) muros costeros, (c) revestimientos y (d) geotubos.

En cambio, en los medios de protección blandos o flexibles no se usan estructuras y se busca no interrumpir el transporte de sedimento. La actuación principal de esta categoría es la regeneración artificial de playas (relleno de playas) y también se añade las actuaciones que se enfocan a evitar la pérdida de vegetación terrestre y marina. La solución que proporciona este tipo de medios de protección no permite usarlos de forma puntual o en regiones reducidas de las playas ni permite implementarlos en casos severos de erosión. Los medios de protección que están dentro de esta categoría son las llamadas soluciones ecológicas o de eco-ingeniería y son (Figura 1.5): sembrado de vegetación en las dunas costeras, siembra de algas y pasto marino, regeneración de playas, construcción de dunas costeras, arrecifes artificiales, entre otros.



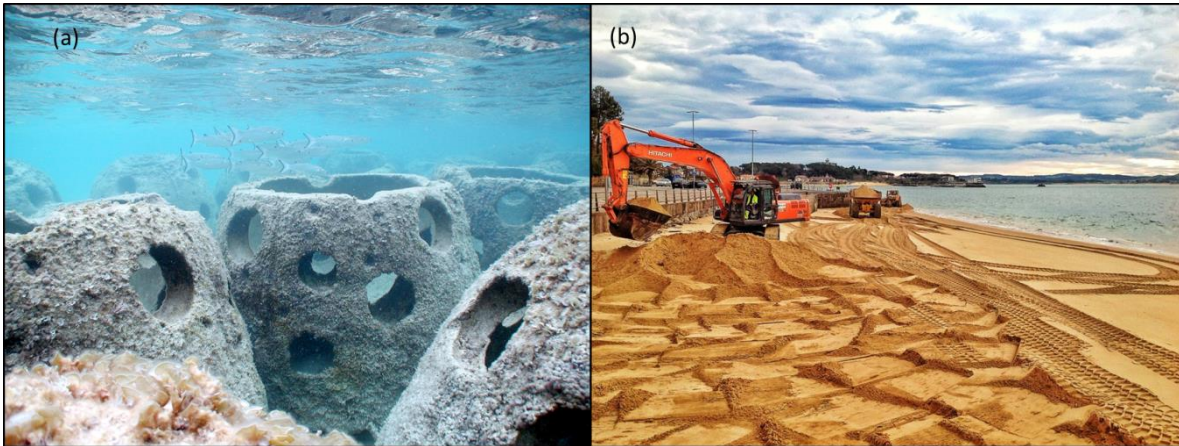


Figura 1. 5 Medios flexibles o blandos de protección costera: (a) arrecifes artificiales y (b) rellenos de playas.

La selección de un tipo de medio de protección dependerá de las condiciones de cada caso. En condiciones en donde las causas erosivas no se corrijan o se eliminen, se requiere hacer uso de ambos tipos de medio de protección donde el objetivo será aportar material de manera artificial y retenerlo en un tramo de costa. Esto solo aplica en condiciones severas en donde es necesario actuar inmediatamente. También hay que tomar en cuenta que las soluciones se proponen para todo el sistema, en este caso el sistema litoral, y hay que elegir la alternativa con el menor número de afectaciones.

Por otra parte, existe otro medio de protección que tampoco implica el uso de estructuras pero consiste en desplazar la infraestructura existente de la zona afectada a zonas seguras. Este tipo de solución implica aceptar el retroceso de la línea de costa y permitir que las condiciones naturales lleguen a un nuevo estado de equilibrio dinámico. Sin embargo, este medio de protección es una solución cuyos beneficios se observarán a largo plazo y solo puede aplicarse en zonas de poco valor ecológico, económico, político y social.

#### **1.4 Pastos marinos**

Los pastos marinos, o también conocidos como praderas de pastos marinos, fanerógamas marinas, praderas de fanerógamas o ceibadales, son ecosistemas que permanecen sumergidos en agua marina, por lo general, en estuarios de poca profundidad (menores a 10 metros), marismas, lagunas costeras y en zonas someras de las plataformas continentales. Crecen en diferentes tipos de sustratos como lodo, arena fina o gruesa, arcilla y algunas especies pueden crecer incluso en roca, pero todo depende del tamaño y grosor de la raíz del pasto. Se encuentran en extensiones amplias y densas. Cada especie de pasto marino requiere diferentes condiciones ambientales para su desarrollo y crecimiento (penetración de luz solar, temperatura, oleaje, corrientes, salinidad, disponibilidad de semillas, concentración de nutrientes y contaminantes), pero en general, los pastos marinos crecen sitios con clima tropical y templado. Además, poseen flores y frutos muy parecidos a las plantas terrestres. Forman el único grupo de plantas vasculares (con raíces y hojas) con las características fisiológicas y biológicas para sobrevivir sumergidas en agua de mar (Hoil, 2012).

Los pastos marinos comprenden cerca del 0.02 % de las plantas fanerógamas y forman un sistema ecológico más importante en términos de biomasa, producción y formación de hábitats siendo una fuente importante de nutrientes. Sobre sus hojas existe actividad de otros organismos como algas, esponjas, balanos y caracoles que sirven de alimento para otros organismos como moluscos, crustáceos, estrellas de mar y peces aumentando la productividad de los ecosistemas costeros. Existen otros animales, como los manatíes, que merodean dentro de los pastos marinos y ayudan a infiltrar la luz solar. Otros animales se alimentan directamente de los pastos marinos como la tortuga verde y algunos peces (Hoil, 2012).

#### **a. Características morfológicas de los pastos marinos**

Los pastos marinos son plantas compuestas por unidades ramificadas que se repiten durante su crecimiento. Las ramificaciones están compuestas por una serie de módulos: hojas, vaina, raíces, rizomas y tallo (Figura 1.4). A continuación se describe cada uno de los módulos (Hoil, 2012):

##### – Hojas

Generalmente, las hojas tienen forma de cintas largas y angostas pero en algunas especies son de forma ovalada (*Halophila decipiens*) o de forma cilíndrica (*Syringodium filiforme*). La longitud de las hojas varía según la especie, algunas pueden tener sólo dos centímetros de longitud (*Halophila decipiens*) y otras pueden tener más de cuatro metros de longitud (*Zostera caulescens*). El ancho de las hojas formado por capas delgadas de células y varía según la especie, desde 90 µm (*Halophila* spp.) hasta 500 µm de ancho (*Enhalus* spp.).

Por la forma del acomodo de las células, los pastos marinos presentan un gran número de espacios que permiten la flotabilidad de sus hojas y permanecen erguidos ante el doblamiento que produce el flujo del oleaje.

##### – Vainas

Las vainas tienen forma de tubo y sirven como base para las hojas. Por lo regular, la vaina se encuentra cubierta de sedimento. Además de servir como base para las hojas, las vainas protegen y permiten nuevas formaciones de hojas.

##### – Raíces

Las raíces de los pastos marinos, que sirven como un sistema de anclaje al fondo marino, varían en tamaño y forma. Dependiendo de la especie, las raíces pueden tener un grosor de 0.18 mm hasta 3.5 mm. La longitud de las raíces puede ser diminuta o puede alcanzar una longitud de cinco metros. Pueden tener ramificaciones (*Halodule*, *Syringodium*) o no (*Enhalus acoroides*, *Thalassia testudinum*), dependiendo de la especie.

##### – Rizomas

Los rizomas de los pastos marinos son tallos horizontales y verticales, se desarrollan debajo de la superficie del sedimento y son responsables de la distribución espacial de estas plantas. También, los rizomas se pueden vincular con otras ramificaciones vecinas.

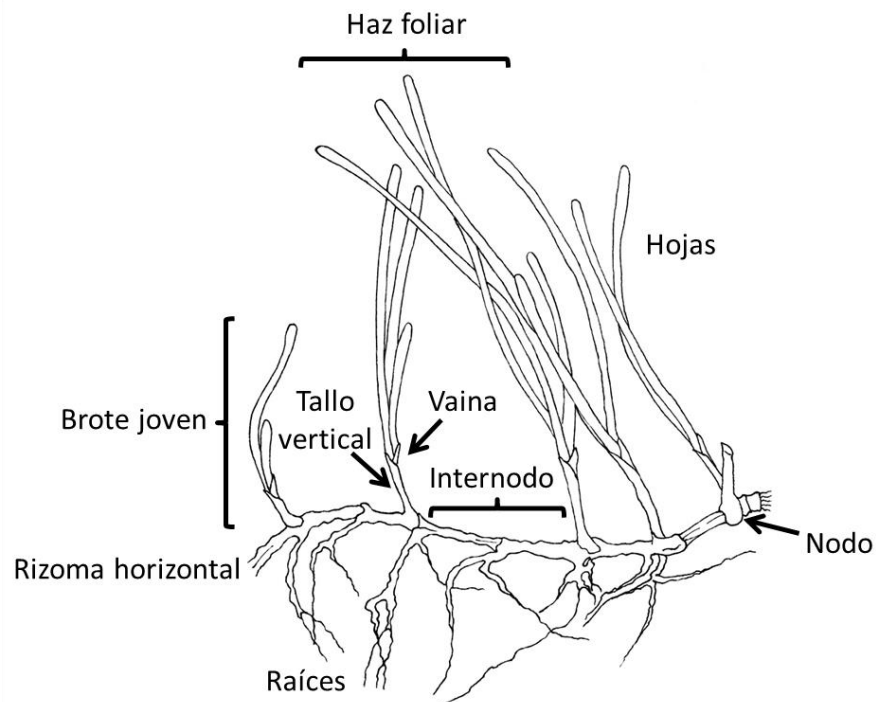


Figura 1. 6 Partes de una fanerógama marina.

### b. Características biológicas de los pastos marinos

Los pastos marinos se reproducen de dos maneras (según la especie): sexual y asexual. La primera implica la producción y germinación de semillas con la formación de flores y frutos, mientras que la segunda consiste en producir copias de una misma planta (plantas clonales) a partir de una sección de la raíz denominada rizoma.

El ciclo de reproducción de las praderas marinas está muy relacionado con factores ambientales como la temperatura, turbiedad, salinidad, radiación lumínica, calidad del sustrato, intensidad de la dinámica del oleaje. Además, la actividad biológica de los pastos marinos aumenta la producción de oxígeno, filtra los nutrientes y los contaminantes, regenera nutrientes, producción y exportación orgánica, acumula materia orgánica y sirve como almacenamiento de carbono.

### c. Distribución de los pastos marinos en México

En México se hallan 6 géneros de fanerógamas marinas que incluyen 9 especies. Las especies que se encuentran en territorio mexicano (Green y Short, 2003) son: *Halodule beaudettei*, *Halodule wrightii*, *Halophila decipiens*, *Halophila engelmanni*, *Phyllospadix scouleri*, *Phyllospadix torreyi*, *Syringodium filiforme*, *Thalassia testudinum* y *Zostera Marina* (Figura 1.5). La *Halodule beaudettei* y *Halodule wrightii* se consideran sinónimos para algunos autores y bases de datos. Aunque existe

información de la ubicación para cada especie de pasto marino, se desconoce la superficie total que abarca cada especie en territorio mexicano.

En las costas mexicanas del golfo de México y el mar Caribe, están distribuidas seis especies de pasto marino (Figura 1.5): *Halodule beaudettei*, *Halodule wrightii*, *Syringodium filiforme*, *Halophila decipiens*, *Halophila engelmanni* y *Thalassia testudinum*. El pasto marino más abundante en las costas del Atlántico mexicano es la *Thalassia testudinum* (Green y Short, 2003).

Las especies de pasto marino más abundante en el Pacífico mexicano es la *Zostera marina* y la *Halodule wrightii* que crecen principalmente en el mar de Cortés (golfo de California) y en el sur de México, respectivamente (Figura 1.5). En el Pacífico mexicano también se encuentran las especies *Phyllospadix scouleri*, *Phyllospadix torreyi* y en menor proporción la *Halophila decipiens*. Las costas que quedan enfrente de la trinchera mesoamericana, desde Jalisco hasta Chiapas, es la zona con menor cantidad de registros de pastos marinos. El cambio de pendiente pronunciado en esta zona disminuye las zonas de aguas de someras y zonas de calma lo que impide el crecimiento de pastos marinos. Pero la especie que persiste en esta zona es la *Halodule wrightii*.

La distribución de los pastos marinos dependerá de la ubicación geográfica y la calidad del agua (Tabla 1.1). Cada especie de pasto marino crece en diferentes condiciones ambientales y de profundidad. En la Tabla 1.1 se describen las características del agua para 4 especies de pasto marino, para el resto no se encontró información en las bases de datos.

Tabla 1. 1 Calidad del agua para el pasto marino según la especie. No hay datos para las especies *Halodule beaudettei*, *Halophila engelmanni*, *Phyllospadix scouleri*, *Phyllospadix torreyi* y *Syringodium filiforme*.  
Fuente: The Ocean Biogeographic Information System (OBIS), <http://www.iobis.org/mapper/>

Especie	Profundidad muestreo (m)	Temperatura (°C)	Nitratos (umol/l)	Salinidad (PPS)	Oxígeno (ml/l)	Fosfato (umol/l)	Silicato (umol/l)
<i>Halodule wrightii</i>	1-5	26.40	0.43	37.10	4.71	0.108	2.52
<i>Halophila decipiens</i>	1-31	26.30	0.44-0.70	37.10	4.71	0.118	1.51-2.58
<i>Thalassia testudinum</i>	2-6	22.96	0.18	36.49	4.97	0.037	0.87
<i>Zostera Marina</i>	0-38	11.76-28.83	0.10-7.12	18.80-35.36	4.46-6.50	0.200-0.439	2.49-14.71

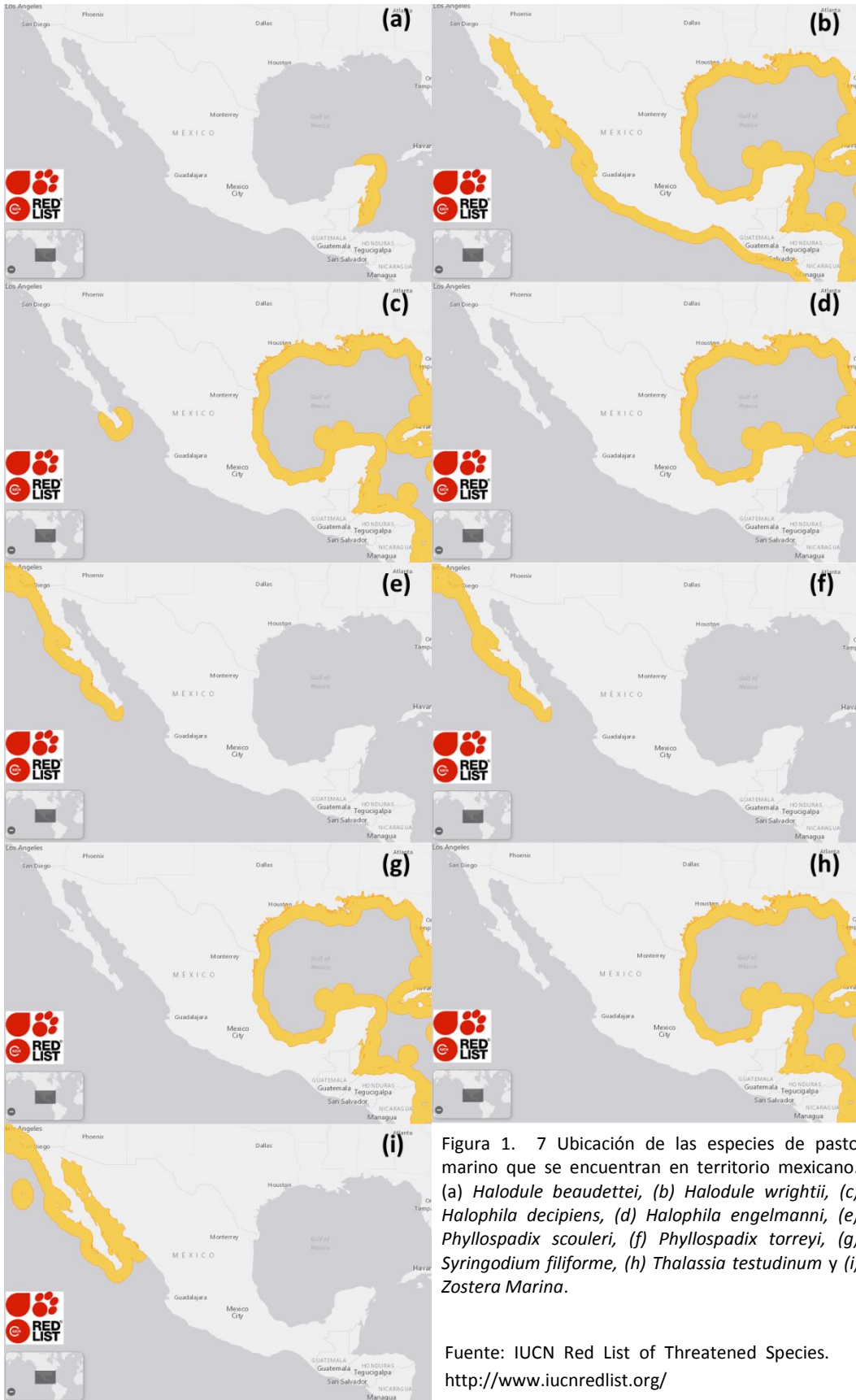


Figura 1. 7 Ubicación de las especies de pasto marino que se encuentran en territorio mexicano. (a) *Halodule beaudettei*, (b) *Halodule wrightii*, (c) *Halophila decipiens*, (d) *Halophila engelmanni*, (e) *Phyllospadix scouleri*, (f) *Phyllospadix torreyi*, (g) *Syringodium filiforme*, (h) *Thalassia testudinum* y (i) *Zostera Marina*.

Fuente: IUCN Red List of Threatened Species. <http://www.iucnredlist.org/>

#### **d. Problemática y conservación de pastos marinos en México**

En México, la protección de pastos marinos se contempla en la NOM-022-SEMARNAT-2003 que establece las especificaciones para la preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar. En la Norma Oficial Mexicana, los humedales costeros se definen como ecosistemas de transición entre aguas continentales y marinas, cuya vegetación se caracteriza por ser halófito, estacional o permanente, y que dependen de la circulación continua del agua salobre y marina. Asimismo, se incluyen las regiones marinas de no más de 6 metros de profundidad con relación al nivel medio de la marea más baja. Los componentes de un humedal costero comprenden a las comunidades vegetales y zonas de inundación con procesos geomicrobianos cuya integridad está íntimamente ligada a la dinámica hidrológica propia del humedal costero. Los pastos marinos y arrecifes coralinos de la franja costera también se contemplan dentro del sistema de humedales.

Dentro de lo que contempla la NOM-022-SEMARNAT-2003 es evitar la construcción de obras de canalización, interrupción de flujo o desvío de agua que ponga en riesgo la dinámica e integridad ecológica de los humedales costeros, a menos que promueva la regeneración del humedal costero. Pasa lo mismo con el establecimiento de infraestructura marina fija (diques, rompeolas, muelles, marinas y bordos). La NOM-022-SEMARNAT-2003 también prohíbe el vertimiento de agua que contenga contaminantes orgánicos y químicos, sedimentos, carbón, metales pesados, solventes, grasas, aceites combustibles o modifiquen la temperatura del cuerpo de agua; alteren la dinámica natural, dañe el ecosistema o a sus componentes vivos. Las descargas controladas deberán ser tratadas y cumplir con las normas establecidas.

Referente a las actividades productivas como la agropecuaria, acuícola intensiva, infraestructura urbana o alguna otra que sea aledaña o colindante con la vegetación de un humedal costero; la Norma Oficial obliga dejar una franja de protección de 100 m como mínimo a partir del límite de la vegetación, en la cual no se permitirá actividades productivas o de apoyo. A continuación se enlistan las actividades que quedan prohibidas realizar en los humedales costeros:

- Relleno, desmonte, quema y desecación de vegetación de humedal costero.
- Zonas de tiro o disposición del material de dragado dentro del manglar.
- Instalación de granjas camaronícolas industriales intensivas.
- Introducir ejemplares o poblaciones que provoquen un daño inminente a los humedales costeros.

Referente a las actividades turísticas, la NOM-022-SEMARNAT-2003 menciona que las actividades de turismo náutico en los humedales costeros deben llevarse a cabo de tal forma que se evite cualquier daño al entorno ecológico, así como a las especies de fauna silvestre que en ellos se encuentren. Los motores fuera de borda deberán ser operados a bajas velocidades (no mayor de 8 nudos), y evitando zonas donde haya especies en riesgo como el manatí. La infraestructura turística ubicada dentro de un humedal costero debe ser de bajo impacto, con materiales locales, de preferencia en palafitos que no alteren el flujo superficial del agua, en áreas lejanas de sitios de anidación y percha de aves acuáticas, y además requiere de zonificación, monitoreo y de informes

preventivos. Los estudios de impacto ambiental y ordenamiento deberán considerar un estudio integral de la unidad hidrológica donde se ubican los humedales costeros.

En la Norma se menciona que en 1993 la cobertura de manglar en México era de 956,149 Ha, según datos del INEGI, y en el 2000 la superficie cubierta por manglar se redujo a 886,760 Ha, según datos del Inventario Nacional Forestal. Entre estos años la reducción fue del 7.8 %, con una pérdida en promedio de 9,913 Ha al año o a una tasa de deforestación anual del 1.12 %. Es importante señalar que en México no existe información acerca de la extensión que abarcan las diferentes especies de pasto marino ni mucho menos tasa de deforestación.

Por otra parte, México pertenece al convenio internacional RAMSAR desde 1986 el cual su objetivo principal es conservar y hacer uso racional de los humedales, conservando la biodiversidad del sistema y el bienestar de las comunidades humanas. México cuenta con 142 sitios RAMSAR y una extensión aproximada de 8,888,766 Ha de humedales, según datos del INEGI (2014). Algunos de los sitios RAMSAR que protegen a los pastos marinos se enlistan a continuación:

- Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, Quintana Roo
- Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo
- Parque Nacional Arrecifes de Xcalak, Quintana Roo
- Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, Veracruz
- Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche
- Reserva de la Biosfera Ría Celestún, Yucatán
- Reserva de la Biosfera Ría Lagartos, Yucatán
- Reserva de la Biosfera Sian Ka'an, Quintana Roo
- Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro, Quintana Roo
- Reserva de la Biosfera Complejo Lagunar Ojo de Liebre, Baja California Sur

Actualmente, la Comisión Nacional del Agua le compete llevar y mantener el Inventario Nacional de Humedales (INH) el cual permite identificar, ubicar y delimitar las zonas de humedales en un mapa. El INH contiene información general de los humedales pero no existe información específica de los pastos marinos en México como ubicación y extensión.

#### **e. Los pastos marinos como alternativa no estructural de protección costera**

El aumento en las diversas actividades costeras ha llevado a modificar el entorno costero para proteger y aumentar la productividad de las mismas. Dentro de las modificaciones que se realizan en las costas están los dragados en los accesos de los puertos, construcción y colocación de estructuras de protección costera, rellenos de playas, apertura de barras costeras y eliminación de cobertura vegetal marina y terrestre. A pesar de que las soluciones que existen actualmente son muy diversas, la demanda de nuevas soluciones para protección de playas va en aumento, además, se requiere que estas soluciones tengan el menor impacto en los procesos ecológicos y tengan el menor impacto visual posible. Una de las propuestas para esta demanda es la

utilización/conservación de pasto marino como un medio no estructural para protección de playas.

Observaciones de campo han concluido que la presencia de los pastos marinos enfrente de las costas disminuye la velocidad, intensidad y turbulencia del oleaje como también se reduce la suspensión de sedimentos (Grady, 1981; García y Duarte, 2001; López y García, 1998). Además de disminuir la suspensión de sedimentos, los rizomas y las raíces de los pastos pueden ayudar a fijar y acumular sedimentos; sin embargo, la fijación dependerá de la densidad de los rizomas y el tipo de raíz de cada especie (Heiss et al., 2000). Los efectos de fricción producidos por la presencia de la *Thalassia Testudinum* disminuyen la velocidad del oleaje al interior del follaje (Hoil, 2012) y también existe un aumento en la velocidad del oleaje al exterior del follaje y depende de la biomasa, ancho y altura de hoja de cada especie de pasto lo cual coincide con observaciones de campo (Bradley y Houser, 2009) que indican que la altura significativa de la ola aumenta un 20 % en los primeros 5 metros de pradera de *Thalassia testudinum* y después se presenta la disminución exponencial de la altura de ola en el resto de la pradera. Además, la velocidad al interior del follaje de las especies *Zostera marina*, *Thalassia testudinum* y *Halodule wrightii* puede ser de dos a diez veces más lenta que la velocidad al exterior del follaje (Ackerman, 1986; Gambi et al., 1990). La disminución del oleaje depende de la densidad de las hojas y la profundidad a la que se encuentran los pastos marinos (Anderson y Smith, 2014). El coeficiente de decaimiento varía en función del número de Reynolds, calculado usando el ancho de las hojas y la velocidad del movimiento oscilatorio sobre los pastos marinos (Bradley y Houser, 2009). Las características físicas de cada especie de pasto marino, en especial, la densidad de los haces foliares varía de acuerdo a la estación del año y de la posición geográfica en la que se encuentren (van Tussenbroek, 1995). La mayor densidad de haces foliares la encontraremos en verano, mientras que la menor densidad en invierno (van Tussenbroek, 1995).



## 2. Estado del arte

La interacción pasto marino-oleaje es importante estudiarla para determinar su efectividad y sus limitaciones como uso de protección costera. Aunque existen investigaciones del tema, el potencial uso de los pastos marinos como mecanismo de reducción del oleaje no está completamente entendido (Ozeren y Wren, 2010). Es necesario obtener conocimiento del tema para evitar daños en la costa.

Las investigaciones de laboratorio han estudiado las variaciones que existen en el oleaje con la presencia de diferentes especies de pasto marino, representadas naturalmente (Fonseca y Fisher, 1986; Ozeren y Wren, 2010) o artificialmente (Sánchez-González et al., 2011; Stratigaki et al., 2011; Hoil, 2012; Koftis et al., 2013; Anderson y Smith, 2014). También se han realizado observaciones de campo que estudian el movimiento oscilatorio de las hojas y la evolución del oleaje con presencia de pasto marino conformado por diferentes especies de pasto marino (Bradley y Houser, 2009).

En este capítulo se describen las principales variables que intervienen en el fenómeno de la interacción del oleaje con el pasto marino, los modelos de evolución de la altura del oleaje, descripción del coeficiente de arrastre y los fenómenos que se presentan debido a la interacción.

### 2.1 Variables que intervienen en la interacción pasto marino-oleaje

Diferentes investigaciones destacan que los principales factores físicos y biológicos que intervienen en la interacción pasto marino-oleaje son: el largo del parche de pasto marino ( $x$ ), la densidad ( $N$ ), el diámetro o ancho ( $b_V$ ), la altura ( $L_V$ ), la biomasa y la flexibilidad de la especie. Las modelaciones de Tang et al. (2015) demostraron que la atenuación del oleaje tiene gran variabilidad para diferentes condiciones de rigidez, diámetro y densidad de hojas de los pastos marinos.

Por otra parte, las condiciones del oleaje que intervienen en el fenómeno son: la sumergencia ( $L_V/h$ ) y el periodo de ola o longitud de onda. La atenuación del oleaje no depende de la altura de ola incidente ( $H_0$ ) (Lima et al., 2006; Sánchez-González et al., 2011). Estas variables son válidas tanto para oleaje regular y oleaje irregular (Manca et al., 2012). Además, números de sumergencias altos producen mayor reducción en la altura de ola y reducción en la velocidad del flujo en la parte interior de la vegetación marina (Manca et al., 2012).

Por lo tanto, la protección más favorable se tendrá con la presencia de las especies de pastos marinos más largos, de larga vida y de crecimiento lento, con biomasa independiente a las fluctuaciones del clima (estaciones del año) y con la máxima posición vertical bajo condiciones hidrodinámicas severas (rigidez de la planta) (Ondiviela et al., 2014). Además, las condiciones óptimas para que los pastos marinos funcionen como protección costera son en aguas someras y ambientes con oleaje poco energético, con gran interacción entre el flujo del agua y los pastos marinos (Manca et al., 2012; Ondiviela et al., 2014).

## 2.2 Modelos de evolución de la altura de ola

Las investigaciones se enfocan en estudiar la evolución de la altura y la velocidad de la ola a lo largo de parches de pasto marino, de donde se han propuesto y comprobado diferentes ecuaciones que permiten cuantificar el amortiguamiento con variables que dependen de las características físicas de los pastos marinos (Dalrymple et al., 1984; Kobayashi et al., 1993; Méndez y Losada, 2004). Para determinar la disminución de la altura de ola se utilizan generalmente dos modelos: el modelo exponencial propuesto por Kobayashi et al. (1993) y el modelo en forma de fracción propuesto por Dalrymple et al. (1984) y Méndez y Losada (2004). Los modelos mencionados calculan el coeficiente de amortiguamiento como función de un parámetro de decaimiento el cual se utiliza para calcular el coeficiente de arrastre y relacionarlo con el número de Reynolds o el número de Keulegan-Carpenter.

A continuación se describen los modelos utilizados en este trabajo y las ecuaciones que relacionan el parámetro de decaimiento con el coeficiente de arrastre.

### a. Kobayashi et al. (1993)

El modelo exponencial (Kobayashi et al., 1993), Ecuación 2.1, calcula el coeficiente de amortiguamiento por vegetación,  $K_V$ , con el parámetro de decaimiento,  $k_i$ , y la longitud en planta del parche de vegetación,  $x$ . Debido a la no linealidad de la Ecuación 2.1, se puede deducir que en los primeros metros de la longitud del pasto marino se presenta la mayor disminución en la altura del oleaje lo que concuerda con las pruebas de laboratorio (Manca et al., 2012), tanto para oleaje regular e irregular, y observaciones de campo (Bradley y Houser, 2009).

El parámetro de decaimiento,  $k_i$ , depende de las características físicas del oleaje (altura de ola incidente, periodo, profundidad) y de la morfología de la vegetación (densidad, arreglo, geometría y rigidez de las hojas) como lo determinó Kobayashi et al. (1993) en la Ecuación 2.2. La influencia del parámetro de decaimiento,  $k_i$ , en el coeficiente de amortiguamiento se observa en la Figura 2.1.

$$K_V = \frac{H}{H_0} = e^{-k_i x} \quad (2.1)$$

Donde:

$K_V$  - Coeficiente de amortiguamiento por vegetación

$H$  - altura de ola [m]

$H_0$  - altura de ola incidente [m]

$k_i$  - parámetro de decaimiento [ $m^{-1}$ ]

$x$  - distancia de cálculo sobre la vegetación [m]

El parámetro  $k_i$  varía para cada especie de pasto marino y toma valores desde 0.004 (Bradley y Houser, 2009) hasta 0.1924 (Sánchez-González et al., 2011). En la Tabla 2.1 se resumen algunos valores de  $k_i$  para diferentes especies obtenidos en laboratorio y en campo.

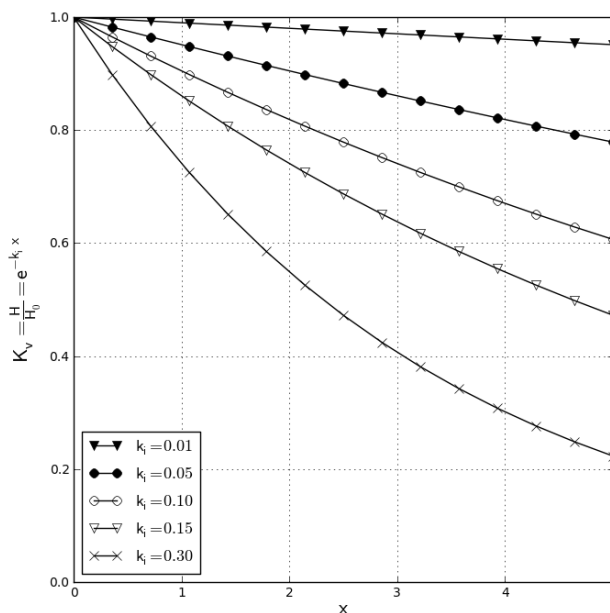


Figura 2. 1 Variación del coeficiente de amortiguamiento en el modelo exponencial.

Tabla 2. 1 Coeficientes de decaimiento,  $k_i$ , obtenidos para diferentes especies para el modelo exponencial.

Estudio	Especie		Oleaje regular $k_i$ ( $m^{-1}$ )	Oleaje irregular $k_i$ ( $m^{-1}$ )	$N_V$ (plantas $m^{-2}$ )	$L_V$ (m)
Kobayashi et al. (1993)	No especificado	Laboratorio	0.015~0.101	-	110; 149	0.25
Bradley y Houser (2009)	<i>Thalassia testudinum</i> <i>Halodule wrightii</i>	Campo	-	0.004~0.101	1100	0.25~0.30
Sánchez-González et al. (2011)	<i>Posidonia Oceanica</i> (artificial)	Laboratorio	0.0139~0.1924	0.0115~0.1716	40000	0.10
Ysebaert et al. (2011)	<i>Scirpus mariqueter</i>	Campo	-	0.01~0.055	2352 ±355	0.38±0.04
Ysebaert et al. (2011)	<i>Spartina alterniflora</i>	Campo	-	0.03~0.125	334 ±12	0.84±0.63
Manca et al. (2012)	<i>Posidonia oceanica</i>	Laboratorio	0.004~0.025	-	180; 360	0.35~0.55
Jadhav y Chen (2013)	<i>Spartina alterniflora</i>	Campo	-	0.01~0.06	422	0.22
Anderson y Smith (2014)	<i>Spartina alterniflora</i> (artificial)	Laboratorio	-	0.020~0.121	200; 400	0.415

Kobayashi et al. (1993) dedujo la Ecuación 2.2 a partir de la ecuación de conservación de la energía y la fuerza de arrastre, la cual relaciona el parámetro de decaimiento  $k_i$  con el coeficiente de arrastre,  $C_D$ , y fue validada con datos experimentales. Los coeficientes de arrastre calculados con la Ecuación 2.2 varían con los experimentales debido a la flexibilidad de la vegetación, variable que no fue contemplada en la deducción de la ecuación.

$$k_i = \frac{1}{36\pi} C_D b_V N \frac{c}{c_g} \frac{g^2 k^2}{\sigma^4} \frac{\sinh(3kL_V) + 9\sinh(kL_V)}{\cosh^3(kh)} (kH_0) \quad (2.2)$$

Donde:

- $C_D$  - coeficiente de arrastre
- $b_V$  - área de planta por unidad de altura de cada planta normal a  $u$  [m]
- $N$  - número de plantas por unidad horizontal de área [m<sup>-2</sup>]
- $g$  - aceleración de la gravedad [m s<sup>-2</sup>]
- $k$  - número de onda [m<sup>-1</sup>]
- $\sigma$  - frecuencia angular [s<sup>-1</sup>]
- $L_V$  - alto de hoja de la planta [m]
- $h$  - profundidad [m]
- $H_0$  - altura de ola incidente [m]

Sánchez-González et al. (2011) dedujo una expresión muy similar a la de Kobayashi et al. (1993) pero con un coeficiente experimental,  $\alpha$ , que representa el efecto del peraltamiento en la atenuación del oleaje, Ecuación 2.3.

$$k_i = \frac{1}{9\pi} C_D b_V N \frac{1}{n} \frac{g^2 k^2}{\sigma^4} \frac{\sinh(3kL_V) + 9\sinh(kL_V)}{\cosh^3(kh)} (kH_0)^\alpha \quad (2.3)$$

$$n = \frac{C_g}{C}$$

Donde:

- $\alpha$  - coeficiente de peraltamiento
- $C_g$  - celeridad de grupo [m s<sup>-1</sup>]
- $C$  - celeridad [m s<sup>-1</sup>]

**b. Dalrymple et al. (1984) y Méndez y Losada (2004)**

El modelo de Dalrymple et al. (1984) y Méndez y Losada (2004) se muestra en la Ecuación 2.4 y utiliza el parámetro de decaimiento,  $\beta$ , que, al igual que el parámetro  $k_i$ , depende de las características del oleaje y de la morfología de la vegetación. En la Figura 2.2 se observa el comportamiento del parámetro  $\beta$  en la determinación del coeficiente de amortiguamiento,  $K_V$ .

La evolución del oleaje en el modelo propuesto por Dalrymple et al. (1984) y Méndez y Losada (2004), Ecuación 2.4, se comporta de manera muy similar al modelo de Kobayashi et al. (1993), Ecuación 2.1, para valores muy pequeños de  $\beta$  y  $k_i$  como se puede observar en la Figura 2.3.

$$K_V = \frac{H}{H_0} = \frac{1}{1 + \beta x} \quad (2.4)$$

Donde:

$\beta$  - coeficiente de decaimiento [ $m^{-1}$ ]

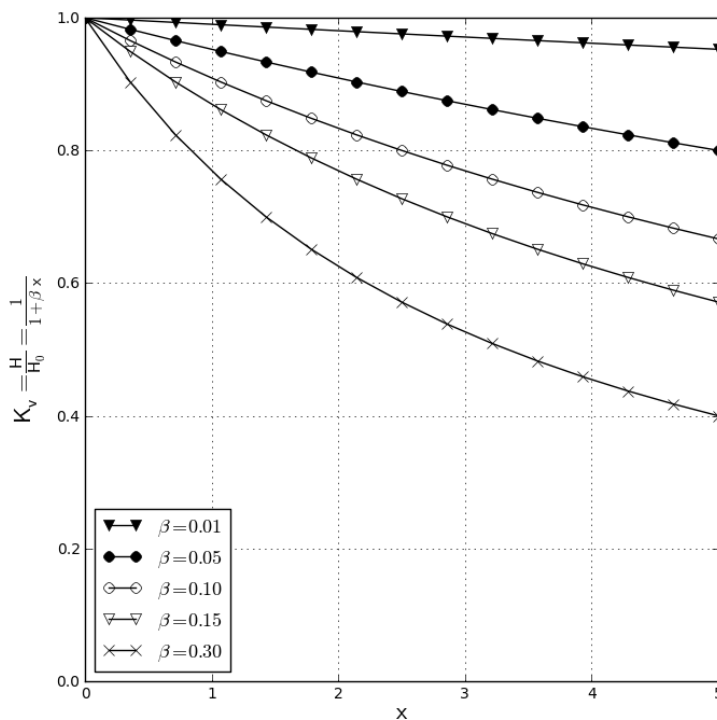


Figura 2. 2 Variación del coeficiente de amortiguamiento ( $K_V$ ) en el modelo de fraccionario.

Dalrymple et al. (1984) y Méndez y Losada (2004) presentaron la Ecuación 2.5 deducida a partir de la ecuación de conservación de la energía. Como se puede observar en la Ecuación 2.5, el parámetro  $\beta$  se encuentra en función del coeficiente de arrastre (determinado para cada especie de pasto), características físicas del pasto marino y de las condiciones del oleaje. Además, Méndez

y Losada (2004) presentaron una expresión deducida particularmente para oleaje irregular (Ecuación 2.6).

$$\beta = \frac{4}{9\pi} C_D b_V N \frac{\sinh(kL_V) + 3 \sinh(kL_V)}{(\sinh 2kh + 2kh) \sinh kh} (kH_0) \quad (2.5)$$

Donde:

- $\beta$  - coeficiente de decaimiento [ $m^{-1}$ ]
- $C_D$  - coeficiente de arrastre
- $b_V$  - área de planta por unidad de altura de cada planta normal a  $u$  [m]
- $N$  - número de plantas por unidad horizontal de área [ $m^2$ ]
- $k$  - número de onda [ $m^{-1}$ ]
- $L_V$  - alto de hoja de la planta [m]
- $h$  - profundidad [m]
- $H_0$  - altura de ola incidente [m]

$$\tilde{\beta} = \frac{1}{3\sqrt{\pi}} \tilde{C}_D b_V N \frac{\sinh(kL_V) + 3 \sinh(kL_V)}{(\sinh 2kh + 2kh) \sinh kh} (kH_{rms,0}) \quad (2.6)$$

Donde:

- $\tilde{\beta}$  - coeficiente de decaimiento promedio [ $m^{-1}$ ]
- $\tilde{C}_D$  - coeficiente de arrastre promedio
- $H_{rms,0}$  - altura de ola cuadrática media incidente [m]

Los coeficientes de decaimiento,  $\beta$ , determinados en diferentes estudios se encuentran resumidos en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Coeficientes de decaimiento,  $\beta$ , obtenidos para diferentes especies para el modelo en forma de fracción.

	<b>Especie</b>		$\beta$ ( $m^{-1}$ )	$\tilde{\beta}$ ( $m^{-1}$ )	$N_V$ (plantas $m^{-2}$ )	$L_s$ (m)
Méndez y Losada (2004)	Laminaria hyperborea (artificial)	Laboratorio	-	No especificado	1200	0.20
Koftis et al. (2013)	<i>Posidonia Oceanica</i> (artificial)	Laboratorio	-	0.005~0.035	180; 360	0.55

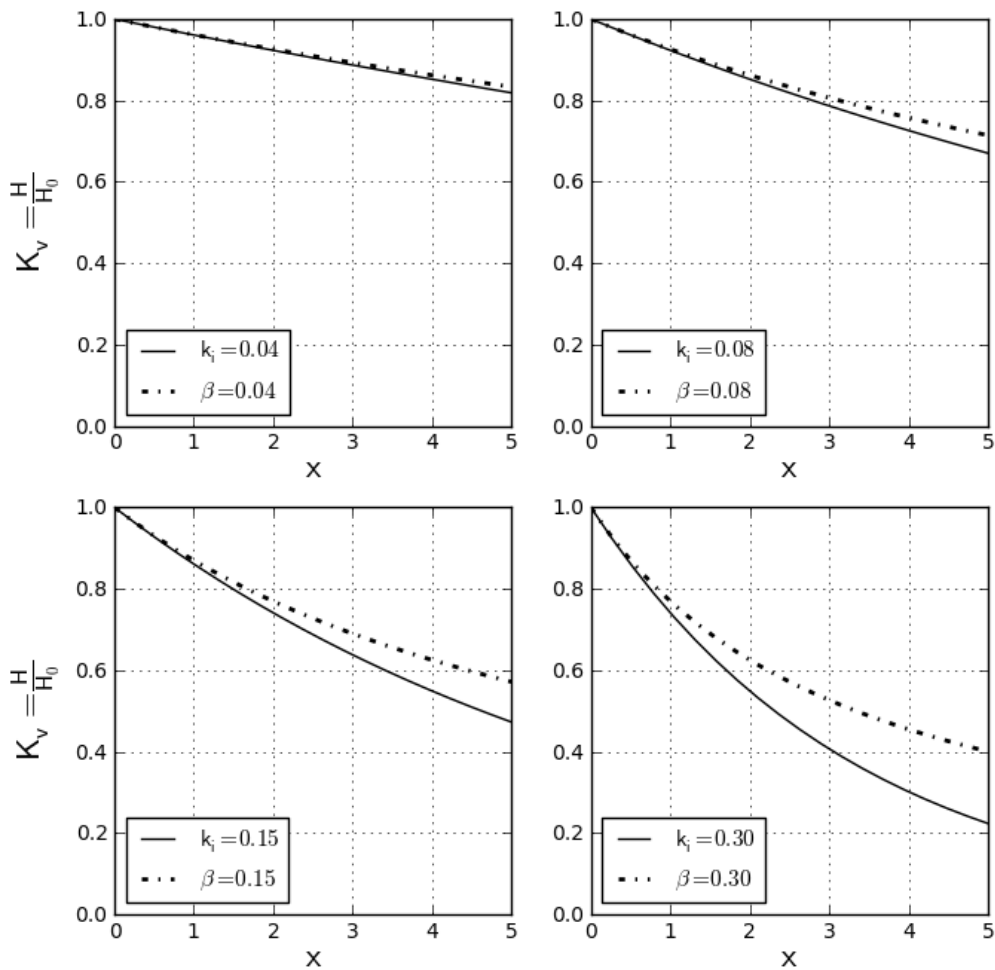


Figura 2. 3 Comparación de los coeficientes de amortiguamiento obtenidos en el modelo exponencial y fraccionario.

La Ecuación 2.5 de Dalrymple et al. (1984) es muy útil para determinar el coeficiente de decaimiento  $\beta$  para condiciones de oleaje regulares de oleaje, como el oleaje que se ocupa principalmente en investigaciones de laboratorio. Y la aplicación principal de la Ecuación 2.6 de Méndez y Losada (2004) es para oleaje irregular que se presenta en condiciones naturales.

### 2.3 Coeficiente de arrastre ( $C_D$ )

El coeficiente de arrastre,  $C_D$ , es una cantidad adimensional que indica cual es la resistencia o arrastre de un objeto en un fluido y depende de la geometría del objeto y de los parámetros que describan el comportamiento del fluido (número de Reynolds). Comúnmente el coeficiente  $C_D$  se relaciona con las características del fluido descrito con el número de Reynolds o el número de Keulegan-Carpenter.

### a. Relación $C_D$ - $R_e$

La ecuación que relaciona el coeficiente de arrastre y el comportamiento del fluido descrito con el número de Reynolds depende de tres coeficientes de ajuste  $\alpha_R, \beta_R$  y  $\gamma_R$  (Ecuación 2.7). Los coeficientes de ajuste son determinados para cada especie de pasto.

$$C_D = \alpha + \left(\frac{\beta}{R_e}\right)^\gamma \quad (2.7)$$

$$R_e = \frac{u_{c0} b_V}{\nu}$$

Donde:

$\alpha, \beta, \gamma$  - coeficientes de ajuste

$R_e$  - número de Reynolds

$u_{c0}$  - velocidad característica, velocidad máxima orbital sobre los pastos  
( $z = -h + L_V$ ) [ $m s^{-1}$ ]

$b_V$  - área de planta por unidad de altura de cada planta normal a  $u$  [m]

$\nu$  - viscosidad cinemática del fluido [ $m^2 s$ ]

La máxima velocidad orbital sobre los pastos, normal a  $u$  se puede determinar con la Ecuación 2.8 deducida a partir de la ecuación de velocidad de las partículas utilizada en teoría lineal.

$$u_{c0} = \frac{H_0 g k \cosh(kL_V)}{2 \sigma \cosh(kh)} \quad (2.8)$$

Donde:

$u_{c0}$  - velocidad característica normal a  $u$  (máxima velocidad sobre los pastos) [ $m s^{-1}$ ]

$g$  - gravedad [ $m s^{-2}$ ]

$k$  - número de onda [ $m^{-1}$ ]

$H_0$  - altura de ola incidente (al inicio de la vegetación) [m]

$h$  - profundidad [m]

$L_V$  - alto de hoja del pasto [m]



Los coeficientes de ajuste  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  determinados de diferentes trabajos de investigación se muestran en la Tabla 2.3. Dichos coeficientes fueron determinados para diferentes rangos de número de Reynolds (condiciones de oleaje) y son comparados en la Figura 2.4. De la Figura 2.4 se deduce que a grandes velocidades del flujo el coeficiente de arrastre tiende a ser constante. Cabe mencionar que los trabajos de investigación han utilizado muestras naturales de pasto marino y también representaciones artificiales de diferentes especies de pasto marino.

Tabla 2. 3 Coeficientes de ajuste para la Ecuación 2.8 determinados para diferentes especies de pasto y rangos de números de Reynolds,  $R_e$ .

Autor	Especie	$R_e$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Kobayashi et al. (1993)	No especificado	$2200 < R_e < 18000$	0.08	2200	2.4
Méndez y Losada (1999)	Macroalga	$2300 < R_e < 20000$	0.40	4600	2.9
Bradley y Houser (2009)	<i>Thalassia testudinum</i> , <i>Halodule</i>	$200 < R_e < 800$	0.1	925	3.16
Cavallaro et al. (2010)	<i>Posidonia oceanica</i> (artificial)	$4000 < R_e < 9500$	0	2100	1.7
Koftis et al. (2013)	<i>Posidonia oceanica</i> (artificial)	$1000 < R_e < 3200$	0	2400	0.77
Anderson y Smith (2014)	<i>Spartina alterniflora</i> (artificial)	$533 < R_e < 2296$	0.76	744.2	1.27

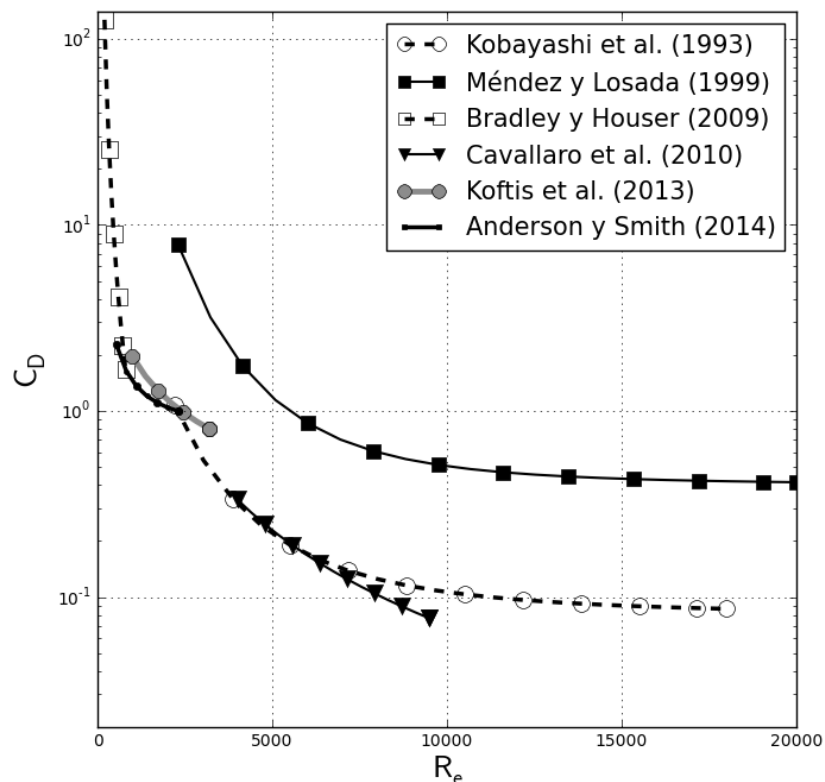


Figura 2.4 Comparación gráfica de los modelos  $C_D$ - $R_e$  (Coeficiente de arrastre - Número de Reynolds) de la Tabla 2.3. Donde  $C_D$  es la resistencia de un objeto al movimiento de un fluido y  $R_e$  representa las características del fluido.

### b. Relación $C_D$ - $K_C$

El número de Keulegan-Carpenter,  $K_C$ , o también llamado número de periodo, está definido en la Ecuación 2.9 y dentro de la dinámica de fluidos es muy utilizado. El número  $K_C$  también se encuentra relacionado con el coeficiente de arrastre y algunas ecuaciones determinadas por diferentes autores se encuentran detalladas en la Tabla 2.4. Las relaciones  $C_D - K_C$  de la Tabla 2.4 se encuentran comparadas en la Figura 2.5 donde también se aprecia el rango de validez de cada ecuación.

$$K_C = \frac{u_{c0}T}{b_V} \quad (2.9)$$

Donde:

$b_V$  - área de planta por unidad de altura de cada planta normal a  $u$  [m]

$u_{c0}$  - velocidad característica (máxima velocidad sobre los pastos) [ $m\ s^{-1}$ ]

$T$  - periodo [s]

Tabla 2. 4 Ecuaciones empíricas determinadas que relacionan el Coeficiente de arrastre,  $C_D$ , y el número de Keulegan-Carpenter,  $K_C$ .

Autor	Especie	$K_C$	$C_D$
Méndez y Losada (2004)	<i>Laminaria hyperborea</i> (artificial)	$3 < K_C < 59$	$\tilde{C}_D = 0.47e^{-0.052K_C}$
Sánchez-González et al. (2011)	<i>Posidonia Oceanica</i> (artificial)	$15 < K_C < 425$	$C_D = \frac{22.9}{K_C^{1.09}}$
Jadhav y Chen (2013)	<i>Spartina alterniflora</i>	$25 < K_C < 135$	$\tilde{C}_D = \frac{70}{K_C^{0.86}}$
Anderson y Smith (2014)	<i>Spartina alterniflora</i> (artificial)	$26 < K_C < 112$	$C_D = 1.10 + \left(\frac{27.4}{K_C}\right)^{3.08}$

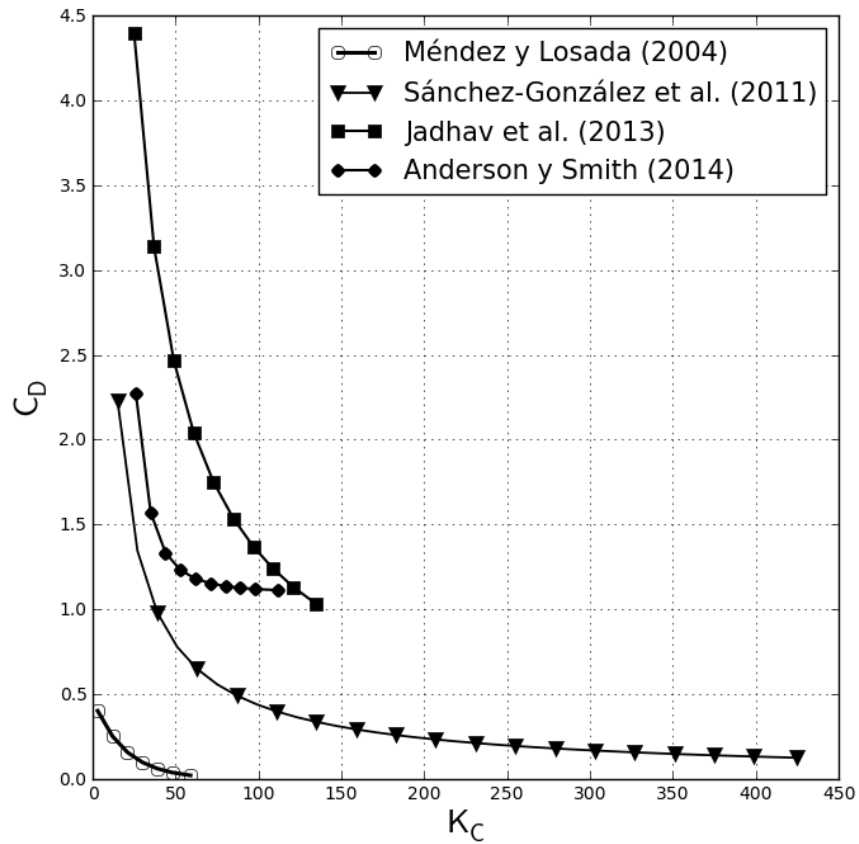


Figura 2.5 Comparación gráfica de los modelos  $C_D$ - $K_C$  (Coeficiente de arrastre - Número de Keulegan-Carpenter) de la Tabla 2.4. Donde  $C_D$  es la resistencia de un objeto al movimiento de un fluido y  $K_C$  representa las características del fluido.

## 2.4 Fenómenos que se presentan en la interacción pasto marino-oleaje

La propagación del oleaje a través de los pastos marinos continúa siendo una importante área de investigación (Blackmar et al., 2013). Investigaciones han hallado comportamientos del oleaje que pueden perjudicar la protección de la costa como son: el peraltamiento del oleaje, generación de turbulencia y generación de corrientes alrededor y sobre los pastos marinos.

El peraltamiento del oleaje es un fenómeno que se presenta principalmente por la disminución de la profundidad y reducción en la velocidad del oleaje (someramiento), lo que provoca que parte de la energía cinética del oleaje se transforme en energía potencial, es decir, hay un aumento en la altura de la ola. Bradley y Houser (2009) observaron que la altura de ola significativa se incrementó un 20 % en los primeros 5 metros de pastos marinos y después se presentó la disminución exponencial en el resto de los pastos marinos

Un flujo turbulento se caracteriza por movimientos caóticos y por la presencia de vórtices. Pujol y Nepf (2012) encontraron que la turbulencia en el fondo marino es siempre mayor con la presencia

de vegetación marina y lo atribuyen al aumento en la velocidad orbital por disminución de profundidad debido a la presencia de vegetación marina.

Las corrientes de retorno es el movimiento del agua de la playa hacia el mar y las corrientes hacia la costa es el movimiento del agua con dirección hacia tierra (Silva y Mendoza, 2012b). Teniendo en cuenta un parche de pasto marino finito, la presencia de vegetación marina cercana a la costa genera corrientes hacia la costa en las zonas sin vegetación y corrientes de retorno en la zona con vegetación (Ma et al., 2013). Además, en los límites del parche de pasto marino se generan fuertes vórtices y corrientes.

Otro factor que se debe considerar en la interacción del pasto marino-oleaje es la presencia de más de una especie de pasto marino en las costas. En este caso, si se tienen los coeficientes de amortiguamiento individuales de dos tipos de vegetación, la combinación lineal de los coeficientes puede usarse para calcular la atenuación del oleaje de un parche de vegetación heterogénea (Blackmar et al., 2013). Por lo tanto, es válido estudiar especies de pasto marino por separado y encontrar sus coeficientes de amortiguamiento individuales.

### 3. Modelo experimental

El estudio de la interacción de los pastos marinos con el oleaje no ha sido plenamente resuelto desde el punto de vista de la simulación numérica debido a que diversos factores no se han representado adecuadamente como la flexibilidad de los pastos, la turbulencia que generan, la mecánica de las hojas y las raíces y otros. Existen estudios (Dalrymple et al., 1984; Kobayashi et al., 1993; Méndez y Losada 2004; Sánchez-González et al., 2011) cuya metodología de trabajo es resolver el fenómeno matemáticamente, en primera instancia, y después validar las expresiones matemáticas con datos experimentales. Por otra parte, otros autores (Bradley y Houser, 2009; Hoil, 2012; Anderson y Smith, 2014) obtienen expresiones a partir de datos experimentales. En este trabajo se opta por la segunda opción.

Por lo anterior y para obtener datos experimentales es necesario construir un modelo físico capaz de representar una especie de pasto marino que se encuentre en las costas mexicanas, que sea de fácil manipulación y de funcionamiento mecánico lo más cercano al pasto marino real. Por lo que se optó por utilizar el diseño realizado por Hoil (2012), un diseño que contempla las características físicas (ancho, largo, espesor, densidad, arreglo de hojas) adaptadas a materiales sintéticos disponibles.

#### 3.1 Representación de los pastos marinos

La representación artificial de los pastos marinos *Thalassia testudinum* se llevó a cabo mediante el uso de cintas de polipropileno de 0.5 pulgadas de ancho. Las dimensiones y el arreglo de las hojas de los pastos marinos artificiales se basaron en el trabajo realizado por Hoil (2012). Las principales características que Hoil (2012) tomó en cuenta para diseñar el pasto marino artificial fueron el tamaño, la longitud, el grosor y el arreglo alométrico del crecimiento de las hojas. En dicho trabajo, el arreglo alométrico de las hojas se propone la utilización de 4 tamaños de hojas (de acuerdo a su edad) para formar un haz foliar (Figura 3.1): la primera hoja de 7 cm, la segunda de 19.5 cm, la tercera hoja de 22 cm y la cuarta de 25 cm.

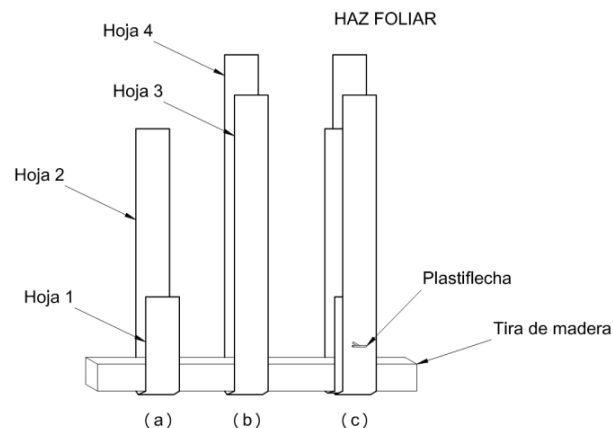


Figura 3.1 Construcción de un haz foliar con cintas de polipropileno.

Para representar el efecto de la rigidez en el fondo, los arreglos de hojas (haces foliares) se fijaron a tiras de madera que a su vez se adosaron a un marco de aluminio, el cual tenía una capa de malla de plástico. Para las pruebas de laboratorio se elaboraron 5 marcos de aluminio de 1 metro de largo y 0.79 m de ancho para que cubrieran el ancho del canal y alcanzar 5 m de longitud de pasto (Figura 3.2). La densidad de los haces foliares que se utilizó para el estudio fue de 800 haces foliares por metro cuadrado.



Figura 3. 2 Marcos de aluminio, de 1.0 m de largo y 0.79 m de ancho, con una densidad de 800 haces foliares por metro cuadrado.

#### **a. Fabricación de los pastos marinos**

La fabricación de los pastos marinos se realizó en el laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Para ello se emplearon cintas de polipropileno de 0.5" de ancho que se cortaron con un alambre fino utilizado como resistencia junto con un eliminador con regulador de voltaje. Cada corte consideró la longitud necesaria para representar dos hojas de pasto, más una longitud extra para facilitar la colocación de los haces en las tiras de madera, como se ilustra en la Figura 3.1. La ubicación de los haces foliares se determinó de manera aleatoria tomando en cuenta la densidad de 800 haces foliares por metro cuadrado, densidad media para la *Thalassia testudinum* (Hoil, 2012). Al final, cuando se arma el paquete de cintas de polipropileno para formar un haz foliar y ubicarse en la cinta de madera, éstas se unen con una plastiflecha que se coloca con una pistola etiquetadora. Además, para que no se desplazaran como resultado de su interacción con el oleaje, las cintas de polipropileno se sujetaban a una malla de plástico delgada ubicada debajo de las cintas de madera.

### 3.2 Canal de oleaje

Los experimentos se llevaron a cabo en el laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. El laboratorio cuenta con un canal de oleaje de 37 m de largo, 0.80 m de ancho y 1.20 m de alto. Parte de las paredes del canal están construidas con acero inoxidable y otras partes con un cristal de 20 mm de espesor que permiten observar y grabar el comportamiento del oleaje con el modelo objeto de estudio. El fondo del canal es horizontal y está construido de acero inoxidable. Cabe mencionar que el fondo del canal puede modificarse colocando materiales como grava, arena, estructuras, placas de acero o madera, etc. Los pastos marinos se colocaron a 15.5 m de distancia de la pala y una playa de grava, disipadora de energía, en los últimos 4.0 m del canal (Figura 3.3). El coeficiente de reflexión  $K_r$  de la playa disipadora, calculado con el método de Mansard y Funke (1980), fue de 25 % como máximo. Dicho coeficiente de reflexión se tomó en cuenta para los cálculos posteriores para el pasto marino.

El llenado del canal se realiza con la ayuda de 3 bombas de 10 hp que permiten el llenado con agua por dos extremos del canal. El nivel máximo de llenado del canal es de 0.80 m.

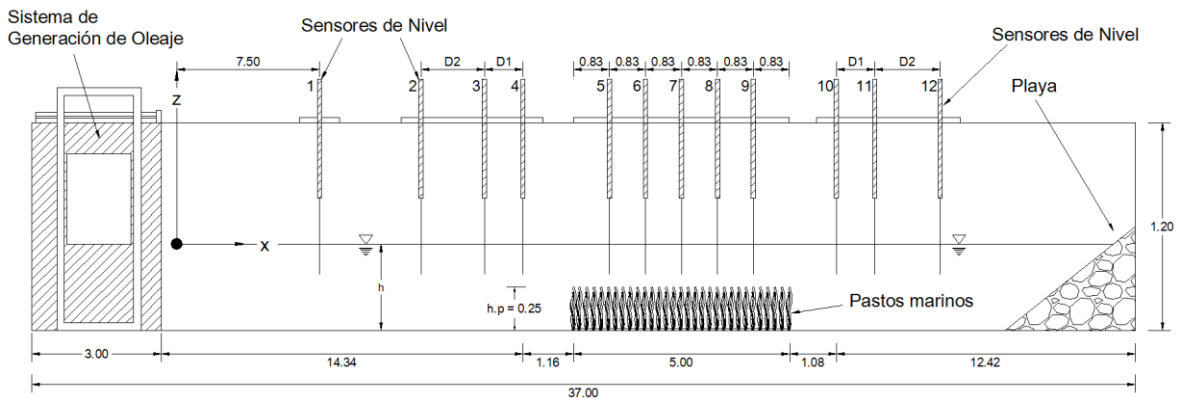


Figura 3. 3 Esquema del canal de Instituto de Ingeniería. Las unidades se encuentran en metros.

El canal está equipado con un generador tipo pistón unido a una placa que produce oleaje regular e irregular y que se puede operar mediante una computadora equipada con un programa proporcionado por el fabricante HR Wallingford. En el programa HR WaveMaker se ingresan datos como la frecuencia (Hz) y la altura de ola (m) para generar oleaje regular o un archivo con el espectro deseado para generar oleaje irregular. Además, el sistema generador de oleaje cuenta con un sistema de absorción dinámica de las ondas re-reflejadas.

La altura máxima de ola que se podría generar dentro del canal se calcula mediante la expresión de McCowan (1981), la cual se muestra en la Ecuación 3.1. Dicha ecuación es válida para oleaje modelado en laboratorio.

$$H_b = 0.50 * h \quad (3.1)$$

Donde:

$H_b$  - altura de ola de rotura [m]

$h$  - profundidad [m]

Pero el coeficiente de la expresión puede variar debido al sistema de generación de oleaje y la profundidad del ensayo, es decir, la relación de McCowan (1981) no cumple para el canal. Las expresiones para determinar la altura máxima de ola para periodos cortos ( $T < 1.0s$ ) es  $H_b = 0.35 * h$ ; y para periodos largos ( $T > 1.0s$ ) es  $H_b = 0.40 * h$  (expresiones empíricas válidas para el canal del Instituto de Ingeniería).

### 3.3 Instrumentación

#### a. Sensores de nivel

El canal de oleaje del Instituto de Ingeniería utiliza sensores de nivel para medir la superficie libre que funcionan registrando la variación del voltaje durante el ascenso y descenso del agua durante la prueba experimental. Posteriormente, las variaciones de voltaje registradas se convierten a elevaciones, relativas a un nivel medio calibrado, relacionadas con la sumergencia del sensor. El largo de los sensores es de 0.60 m y ofrecen una precisión de 0.1 mm.

La variación de la superficie del agua, para estos ensayos, se registró utilizando 12 sensores de nivel distribuidos a lo largo del canal (Figura 3.1): 1 sensor testigo a 7 m de la pala, 3 sensores antes de la zona de pastos, 5 sensores en la zona de pastos y 3 sensores después de la zona de pastos.

#### b. Descripción de la calibración de los sensores de nivel

En cada inicio de ensayos, cambio de profundidad o cambio de ubicación de sensores es necesario realizar una calibración para los sensores de nivel.

La calibración consiste en determinar un nivel de referencia,  $n_m=0$ , registrando tres posiciones de profundidad de cada sensor. El procedimiento de calibración mostrado en la Figura 3.4, se describe a continuación:

- Se posicionan los sensores en el punto cero para calibrar el voltaje en cero en la consola de control y establecer el nivel de referencia en cero centímetros en el programa desarrollado por el Grupo de Costas y Puertos nombrado *calib*.
- A continuación se ubican los sensores en el segundo punto, positivo o negativo, y se establece el nivel de referencia en centímetros (con el signo según su posición) en el programa *calib*.
- Después se colocan los sensores en un tercer punto y se establece el nivel de referencia en centímetros (con el signo según su posición) en el programa *calib*.
- Finalmente, el programa escribe un archivo con extensión *.cal* donde se muestran los coeficientes de correlación obtenidos de los ajustes lineales para cada sensor. La



calibración se considere aceptable si los coeficientes de correlación se encuentran entre 1 y 0.9999, si no se repite el procedimiento de calibración.

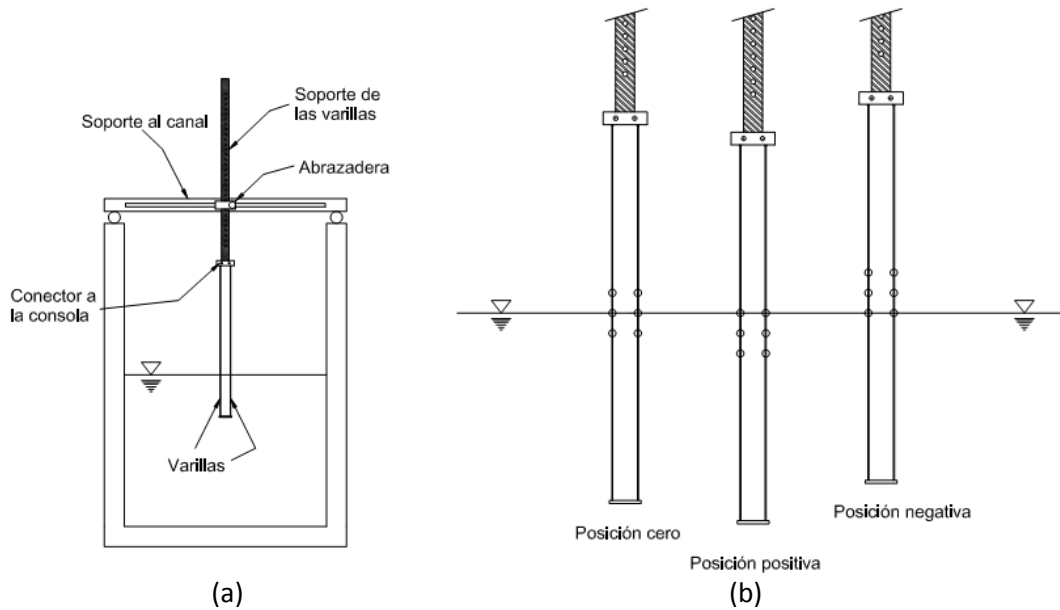


Figura 3. 4 Sensores de nivel (a) y posiciones para su calibración (b).

### c. Frecuencia de muestreo

El número de datos que se obtienen en cada prueba depende del número de olas que se requieran registrar, del periodo con el cual se esté trabajando y de la frecuencia de registro de datos por segundo; dicho número puede obtenerse con la Ecuación 3.2. El coeficiente 512 de la Ecuación 3.2 se emplea para asegurar la obtención de un múltiplo de éste, de tal forma que sea más fácil almacenar la información de los sensores en un archivo.

$$n_{datos} = ENTERO \left( \frac{n_{olas} * T * f_R}{512} \right) * 512 \quad (3.2)$$

Donde:

$n_{datos}$  - número de datos para la prueba

$n_{olas}$  - número de olas, entero

$T$  - periodo [s]

$f_R$  - frecuencia de registro de datos [1/s]

$ENTERO$  - función redondeo al entero superior más próximo

#### d. Medición de perfil de velocidades con UVP

La medición mediante UVP (Ultrasound Velocity Profile, por sus siglas en inglés) permite la obtención de un perfil de velocidades, en un instante de tiempo, en el flujo de un líquido a lo largo del eje de un haz ultrasónico ( $L_m$ ) emitido y detectado mediante un transductor o sensor ultrasónico. Cuando la emisión ultrasónica golpea una pequeña partícula en el líquido, parte de la emisión se dispersa y otra parte regresa al sensor (eco). El método de medición UVP utilizado en el laboratorio de Costas y Puertos fue desarrollado por la empresa MET-FLOW. El funcionamiento del UVP se describe en la Figura 3.5 con un ejemplo de un flujo a superficie libre.

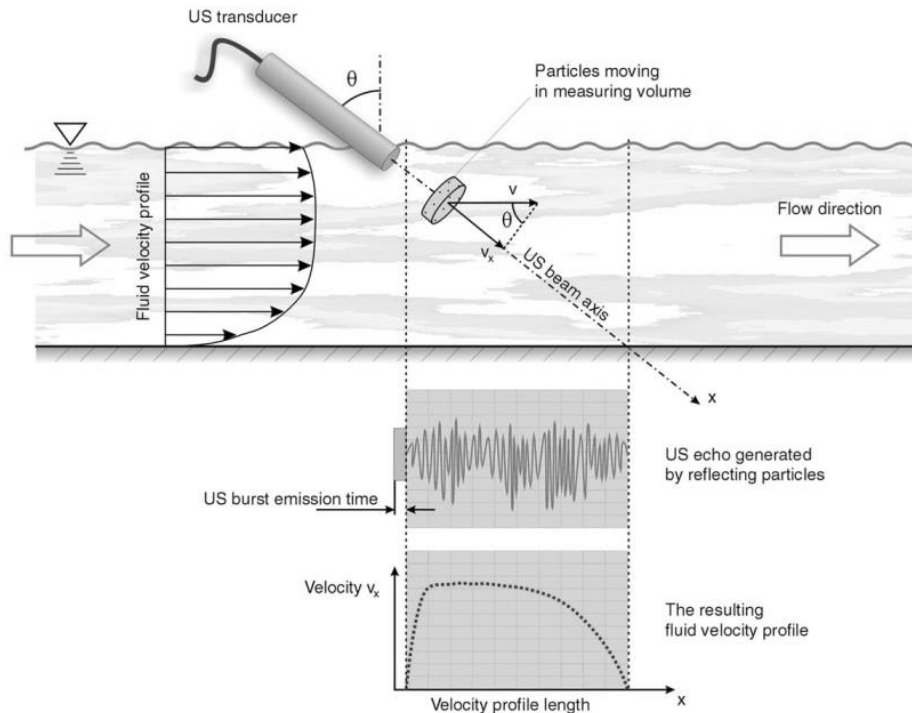


Figura 3. 5 Descripción del método de medición UVP.

El eco regresa al sensor después de un retraso de tiempo, Ecuación 3.3.

$$t = \frac{2x}{c} \quad (3.3)$$

Donde:

- $t$  - tiempo de retraso entre la emisión y la recepción de la señal [s]
- $x$  - distancia entre la partícula de dispersión y el sensor [m]
- $c$  - velocidad del sonido en el líquido [m/s]

La velocidad con la que viaja una partícula a lo largo del eje acústico se puede determinar mediante la ecuación del efecto Doppler ajustada, Ecuación 3.4.

$$\frac{v}{c} = \frac{f_d}{2f_0} \quad (3.4)$$

Donde:

$v$  - velocidad de la componente dentro del eje  $Lm$  del sensor [m/s]

$c$  - velocidad del sonido en el líquido [m/s]

$f_d$  - frecuencia reflejada debida al efecto Doppler [Hz]

$f_0$  - frecuencia emitida por el sensor [Hz]

Si la medición del tiempo de retraso,  $t$ , y de la frecuencia reflejada debida al efecto Doppler,  $f_d$ , es exitosa es posible calcular la posición y la velocidad de las partículas suspendidas en el fluido a estudiar. Entonces, si las partículas son lo suficientemente pequeñas para desplazarse junto con el fluido, se puede suponer que las velocidades calculadas para las partículas también lo son para el fluido y el método nos permite obtener velocidades a diferentes profundidades creando un perfil de velocidades.

El sistema que requiere el UVP para su correcto funcionamiento consta de tres elementos: transductores o sensores ultrasónicos, una consola de control y un software.

Los transductores o sensores ultrasónicos que provee el fabricante emiten cinco diferentes frecuencias (0.5, 1, 2, 4 y 8 MHz). Para cada frecuencia emitida el rango de velocidad medible (Figura 3.6) y la resolución de la velocidad cambia (Tabla 3.1). Los sensores que se ocuparon para este estudio fueron de 0.5 MHz con un diámetro de 23mm.

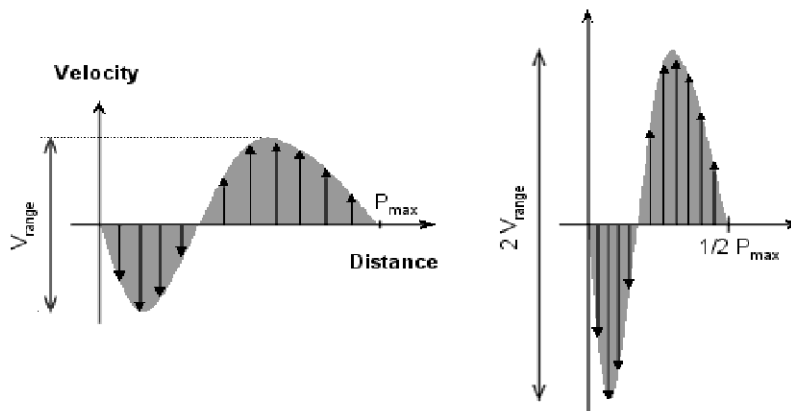


Figura 3. 6 Rango de velocidad medible ( $V_{range}$ ) y profundidad máxima medible ( $P_{max}$ ).

Tabla 3. 1 Valores teóricos para  $P_{max}$  100 mm y 750 mm calculados para emisiones en el agua ( $c=1480$  m/s)

$f_0$ [MHz]	$P_{max}$ [mm]	$V_{range}$ [mm/s]	$\Delta V$ [mm/s]
0.5	100	10952	42.78
	750	1460	5.70
1	100	5476	21.39
	750	730	2.85
2	100	2738	10.70
	750	365	1.43
4	100	1369	5.35
	750	183	0.71
8	100	685	2.68
	750	91	0.36

La unidad de control junto con el software proporcionado por el fabricante se utiliza para indicar las características de emisión y observar los resultados previos de los transductores. La unidad permite conectar hasta 20 transductores (Figura 3.7) y se puede seleccionar, en el programa, el orden de encendido como también un tiempo de espera para iniciar la medición. La unidad de control se conecta a la computadora mediante una conexión Ethernet. La línea de voltaje con la que trabaja la unidad de control es de 250V 20A.



Figura 3. 7 Parte trasera de la unidad de control con 20 entradas de transductores.

La obtención de la evolución del perfil de velocidades sobre los pastos marinos se hizo mediante el uso de seis sensores de velocidad UVP (Figura 3.8): 1 sensor 1.20 m antes de los pastos, 4 sensores a lo largo de los pastos y 1 sensor 1.20 m después de los pastos.

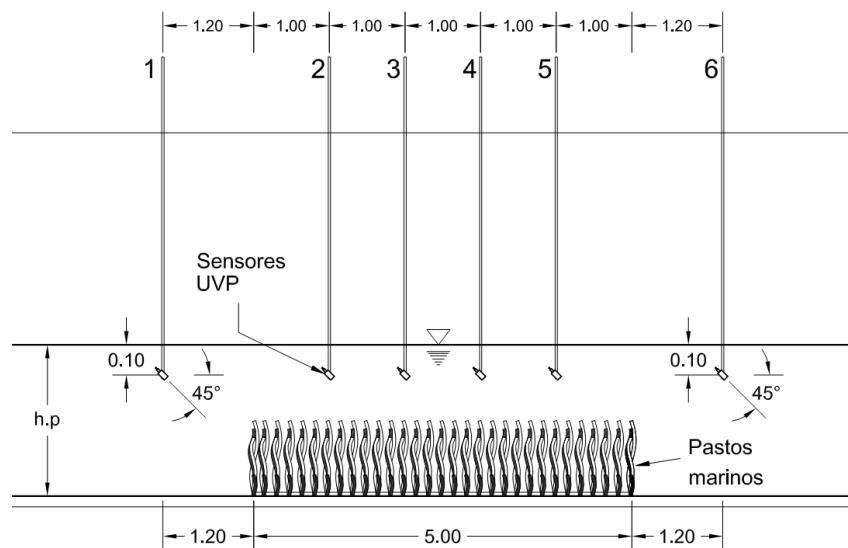


Figura 3. 8 Ubicación de los sensores de velocidad UVP. Unidades en metros.

#### e. Ventajas del método UVP

- El tamaño del sensor (8 mm de diámetro) permite colocarlo dentro del líquido generando solo una pequeña perturbación en el flujo.
- Cubre un amplio rango de velocidades mediante el uso de sensores de diferentes rangos de frecuencia de emisión de sonido.
- El sensor ultrasónico puede aplicarse en fluidos opacos como agua residual, metales líquidos o productos químicos.
- El tiempo de medición de laboratorio se reduce drásticamente al medir el perfil de velocidades a lo largo del eje del haz en un instante de tiempo.
- El método que ocupan los sensores permite realizar mediciones multi-dimensionales de un fluido.
- Pueden detectar la dirección del fluido para cada posición, por lo tanto, también se puede determinar un vector de velocidad.
- Los sensores UVP no requieren calibración debido a que la frecuencia reflejada por el efecto Doppler está directamente relacionada con la velocidad.
- La única condición que debe cumplir el fluido a estudiar es que debe contener suficientes partículas de cierto tamaño donde se pueda originar un eco del ultrasonido emitido.

### 3.4 Análisis de datos

#### a. Conversión de voltaje a altura de ola

Las variaciones de voltaje que se miden en los sensores de nivel, se guardan utilizando el programa del Grupo de Costas y Puertos llamado WDC. El programa WDC realiza la escritura de los datos en un archivo cuyo nombre está formado por la fecha y hora de la medición con extensión .TXT. Para utilizar el programa WDC se ingresan los datos: número de sensores a utilizar, número de datos y frecuencia de toma de datos.

Cuando ya se tienen los archivos con extensión .TXT y .CAL obtenidos del programa WDC, estos archivos se usan como datos de entrada para el programa LEEWDC.EXE que realiza la conversión de voltaje a elevaciones (m) de la superficie libre del agua. Para que funcione correctamente el programa LEEWDC.EXE, los datos se ingresan en un archivo de entrada con el nombre de INPUTWDC.EXE donde también se indica el nombre de salida de dos archivos con extensión .DAT y .TXT. El archivo de salida .DAT incluye la variación de la superficie del agua en el tiempo para cada sensor. El segundo archivo de salida, .TXT, contiene el análisis y estadística del oleaje del archivo .DAT mostrando datos como  $H_{1/2}$ ,  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$  y  $H_{1/100}$  en centímetros;  $T_{1/2}$ ,  $T_{1/3}$ ,  $T_{1/10}$  y  $T_{1/100}$  en segundos.

### b. Cálculo de la onda reflejada

La altura de ola reflejada se define como la diferencia entre la altura de ola total y la altura de ola incidente, como se muestra en la Ecuación 3.5. La altura de ola total se obtiene de la medición del sensor ubicado justo antes de los pastos marinos. El cálculo de la altura de ola incidente se obtiene despejándola de la Ecuación 3.5 y es necesario haber calculado antes la altura de ola reflejada utilizando el coeficiente de reflexión.

$$H_r = H_T - H_i \quad (3.5)$$

Donde:

$H_T$  - altura de ola total [m]

$H_i$  - altura de ola incidente [m]

$H_r$  - altura de ola reflejada [m]

El cálculo para obtener la altura de ola reflejada se deduce mediante el coeficiente de reflexión ( $K_r$ ) calculado con el modelo de separación de ondas incidentes y reflejadas codificado en el programa REFLAB.EXE. El programa utiliza la variación de la superficie del agua en el tiempo y arroja un archivo de salida que contiene el coeficiente de reflexión calculado por dos métodos – Mansard y Funke (1980) y Goda (1976). Para que funcione correctamente el programa, se tiene que ingresar el nombre de archivo con la serie de tiempo, los tres sensores de nivel a ocupar en el cálculo, la separación de los sensores con cuales se requiere hacer el cálculo, la profundidad del ensayo, las frecuencias mínima y máximas de análisis, y el nombre del archivo de salida. Los tres sensores de nivel a ocupar en el cálculo del coeficiente de reflexión de los pastos marinos deben ser los que están ubicados antes de los pastos marinos, es decir, los sensores de nivel 2, 3 y 4 (Figura 3.3).

Una vez ejecutado el programa REFLAB.EXE, se obtiene un archivo con la información del coeficiente de reflexión calculado. El coeficiente de reflexión está relacionado con la altura de ola reflejada y la altura de ola total como se muestra en la Ecuación 3.6, de la cual se puede obtener la altura de ola reflejada despejándola de la ecuación.

$$H_T = H_r * \left( \frac{1}{K_r} + 1 \right) \quad (3.6)$$

Donde:

$H_T$  - altura de ola total [m]

$H_r$  - altura de ola reflejada [m]

$K_r$  - coeficiente de reflexión, adimensional

Una vez que ya se tiene calculada la altura de ola reflejada, se puede obtener la altura de ola incidente de la Ecuación 3.5 la cual es necesaria para cálculos posteriores.

### c. Cálculo del coeficiente transmisión

El coeficiente de transmisión ( $K_t$ ) se define como relación de la altura de ola transmitida y la altura de ola incidente como se muestra en la Ecuación 3.7. La altura de ola incidente se calcula con la Ecuación 3.5 y la altura de ola transmitida se obtiene del sensor inmediatamente después de los pastos, es decir, el sensor de nivel número 10.

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (3.7)$$

Donde:

$H_t$  - altura de ola transmitida [m]

$H_i$  - altura de ola incidente [m]

$K_t$  - coeficiente de transmisión adimensional

A la altura de ola total medida en el sensor de nivel número 10, sensor ubicado después de los pastos, se le aplicaron los mismos cálculos de la Ecuación 3.5 y Ecuación 3.6 para que la altura de ola total se le reduzca la altura de ola reflejada por la playa disipadora colocada al final del canal. De esta manera se puede obtener una altura de ola transmitida más nítida, es decir, sin acumular la altura de ola reflejada por la playa disipadora.

### d. Cálculo del coeficiente de disipación

El coeficiente de disipación ( $K_D$ ) se define como la energía disipada por los pastos marinos descrita en la Ecuación 3.8. La Ecuación 3.8 se deduce a partir de la ecuación de energía total media asociada al movimiento oscilatorio la cual toma en cuenta la suma de la energía cinética, debida al movimiento de las partículas del flujo, y de la energía potencial, debida al desplazamiento de la superficie libre del agua (Silva y Mendoza, 2012a).

$$K_D = 1.0 - K_r^2 - K_t^2 \quad (3.8)$$

Donde:

$K_D$  - coeficiente de disipación de energía, adimensional

$K_r$  - coeficiente de reflexión, adimensional

$K_t$  - coeficiente de transmisión, adimensional

### e. Perfil de velocidades

El archivo de salida que genera el programa de MET-FLOW es un archivo con extensión .TXT que contiene toda la información registrada por los seis sensores: número de canales, total de perfiles medidos, tiempo de inicio de la medición, velocidad del sonido en el medio, máxima profundidad medible, el rango de velocidad medible, la ventana de medición, una tabla con la información de los sensores utilizados, un vector con el número de perfiles medidos, un vector con el tiempo de cada perfil medido y al final una matriz con la información registrada por los todos sensores UVP utilizados en la prueba.

La matriz con la información de las velocidades registradas está acomodada de manera que las filas representan la variación en el tiempo de la velocidad para cada canal y las columnas son los perfiles de velocidad medidos en cada instante de tiempo. El programa del proveedor permite dividir la matriz en diferentes archivos de tal manera que cada archivo representa la medición registrada para cada sensor UVP utilizado en la prueba. Se utilizaron 6 sensores UVP (Figura 3.8) para profundidades  $h \geq 40$  cm y para profundidades  $h < 35$  cm únicamente se utilizaron, por limitaciones de los sensores, dos sensores UVP, los números 1 y 6 que corresponden al oleaje incidente y transmitido.

Los datos de los archivos de salida se manipularon en el lenguaje de programación PYTHON para realizar la estadística de los registros. La estadística que se realizó consistió en la obtención de un perfil con los promedios cuadráticos medios de cada canal y la creación de gráficas de interpretación de los resultados.

## 3.5 Condiciones modeladas

### a. Profundidades

Las profundidades seleccionadas para este trabajo fueron a partir del largo del pasto, es decir, 0.25 m de profundidad y se fue incrementando en 5 cm hasta alcanzar una profundidad de 0.60 m. Obteniendo así, 8 profundidades o sumergencias a modelar (Tabla 3.2).

El concepto de sumergencia (Figura 3.9) se le conoce a la relación que existe entre el largo del pasto y la profundidad a la que se encuentra el fondo del pasto representada en la Ecuación 3.9.



$$\lambda = \frac{L_s}{h_p} \quad (3.9)$$

Donde:

$\lambda$  - sumergencia, adimensional

$L_s$  - largo del pasto [m]

$h_p$  - profundidad del fondo del pasto [m]

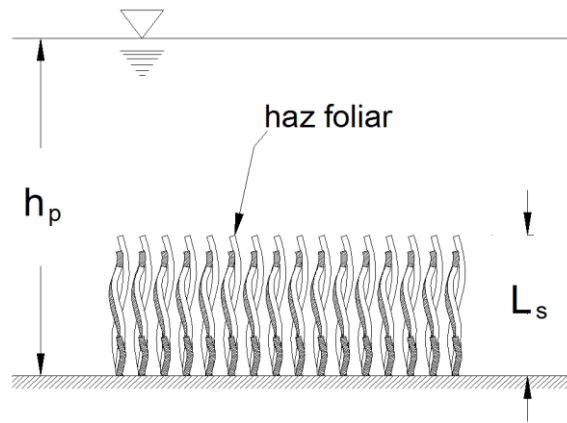


Figura 3. 9 Largo del pasto,  $L_s$ , y profundidad del fondo del pasto,  $h_p$ .

### b. Alturas de ola y periodos. Criterios de semejanza

Aunque se reconoce que los modelos ocupados en laboratorio para su estudio poseen limitaciones que reducen la similitud entre modelo y el prototipo (esto se puede evitar optando por escalas cercanas a la natural) es inevitable hacer uso de modelos físicos pero es posible cuantificar la influencia de los efectos de escala y corregirlos en el proceso de extrapolación a prototipo. De acuerdo con el Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE (Silva y Mendoza, 2012d), en la sección de Obras Marítimas, a pesar de las limitaciones que conlleva utilizar modelos a escala en laboratorio, el diseño de estructuras costeras y portuarias son verificados y refinados con modelos físicos.

No obstante, en este estudio se trabajó con la escala real de los pastos marinos (escala natural). Los criterios de semejanza establecidos a continuación se definen para una posible utilización de los pastos marinos de manera artificial con una escala diferente a la natural.

Los criterios de semejanza de Froude se adoptan si es que las fuerzas de gravedad y las fuerzas de inercia son predominantes, como es el caso de los modelos de simulación de oleaje. Utilizando la ley de semejanza de Froude más la ley de semejanza geométrica podemos encontrar las características geométricas y físicas que relacionan el modelo a escala con el prototipo.

Para que los aspectos de interés del modelo se comporten de manera similar en el prototipo se requiere que el número de Ursell (Ecuación 3.9) cumpla con  $U \ll \frac{32\pi^2}{3}$ , si se cumple la teoría lineal de ondas puede aplicarse en el estudio (Ursell, 1953).

$$U = \frac{H L^2}{h^3} \quad (3.10)$$

Donde:

$H$  - altura de ola [m]

$L$  - longitud de onda [m]

$h$  - profundidad del fondo del pasto [m]

Los periodos de onda en el prototipo de los pastos marinos se calculan con la Ecuación 3.11, dicha ecuación proviene de la ley de semejanza de Froude. Mientras que la altura de ola en el modelo se multiplica por la escala para conocer la altura de ola en el prototipo cumpliendo con la ley de semejanza geométrica, como se especifica en la Ecuación 3.12.

$$T_{prototipo} = T_{modelo} * \sqrt{\lambda} \quad (3.11)$$

$$H_{prototipo} = H_{modelo} * \lambda \quad (3.12)$$

Donde:

$H_{prototipo}, T_{prototipo}$  - altura de ola y periodo en el prototipo [s]

$H_{modelo}, T_{modelo}$  - altura de ola y periodo en el modelo [s]

$\lambda$  - escala geométrica del modelo, adimensional

Los periodos y alturas de ola modelados en el canal de oleaje se resumen en la Tabla 3.2. Eligiendo como ejemplo una escala geométrica de los pastos marinos de 1:20 y aplicando las Ecuaciones 3.11 y 3.12, los periodos y las alturas de ola que actuarían en el prototipo se especifican en las Tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3. 2 Profundidades, periodos y alturas de ola modelados.

<b>Profundidad h (m)</b>	<b>Periodo T (s)</b>	<b>Alturas de ola H (m)</b>
0.25	0.7	0.04
0.30	1.0	0.06
0.35	1.3	0.08
0.40	1.6	0.10
0.45	1.9	0.12
0.50	2.2	0.14
0.55	2.5	0.16
0.60		0.18

Tabla 3. 3 Periodos de ola en el modelo y prototipo considerando la Ecuación 3.10 con una escala geométrica de 1:20.

<b>T modelo (s)</b>	<b>T prototipo (s)</b>
0.7	3.13
1.0	4.47
1.3	5.81
1.6	7.16
1.9	8.50
2.2	9.84
2.5	11.18

Tabla 3. 4 Alturas de ola en el modelo y prototipo de acuerdo con la Ecuación 3.11 considerando una escala geométrica de 1:20.

H modelo (m)	H prototipo (m)
0.04	0.8
0.06	1.2
0.08	1.6
0.10	2
0.12	2.4
0.14	2.8
0.16	3.2
0.18	3.6

### c. Ubicación de los sensores de nivel

Como ya se mencionó, la variación de la superficie del agua se registró utilizando 12 sensores de nivel distribuidos a lo largo del canal (Figura 3.1): 1 sensor testigo a 7 m de la pala, 3 sensores antes de la zona de pastos, 5 sensores en la zona de pastos y 3 sensores después de la zona de pastos.

El cálculo de reflexión del oleaje mediante el método de Baquerizo (1995) requiere colocar tres sensores de nivel a una separación mínima,  $\pi/10k$ , y una máxima,  $9\pi/10k$ , donde  $k$  es el número de onda. Este requerimiento se debe a que los tres sensores de nivel necesitan estar colocados de tal manera que en un instante de tiempo no queden distanciados a más de una longitud de onda,  $L$ . Debido a lo anterior, en la distribución de los 12 sensores de nivel existen dos grupos de 3 sensores (Figura 3.3): uno para calcular la reflexión de los pastos y otro para calcular la reflexión que arriba a los pastos de la playa.

Las separaciones calculadas, Tabla 3.5, se expresan en las variables  $D1$  y  $D2$  (Figura 3.3) las cuales servirán para los dos grupos de sensores: el primero grupo formado por los sensores 2,3 y 4; y el segundo grupo formado por los sensores 10, 11 y 12. Los cálculos tomaron en cuenta los diferentes periodos y profundidades propuestos.

Tabla 3. 5 Separaciones entre los sensores de nivel para cada periodo propuesto.

T (s)	D1 (m)	D2 (m)	Total (m)
0.7	0.23	0.29	0.52
1.0			
1.3	0.89	0.73	1.12
1.6			
1.9	0.89	1.51	2.40
2.2			
2.5			

Los cinco sensores restantes (5, 6, 7, 8 y 9) ubicados sobre los pastos marinos se utilizaron para registrar la evolución de la superficie libre del agua en dicha longitud (Figura 3.3).

#### d. Frecuencia de muestreo

El número de datos registrados en cada prueba, para los periodos propuestos y la frecuencia de muestreo, se presentan en la Tabla 3.6; dicho número se calculó con la Ecuación 3.2, teniendo en cuenta que para cada prueba se estaban registrando 200 olas, de las cuales las 100 últimas se utilizaron para los cálculos realizados en el presente trabajo.

Tabla 3. 6 Número de datos por registrar para cada prueba dependiendo del periodo.

$n_{olas}$	T (s)	$f_R$ (1/s)	$n_{datos}$
200	0.7	100	14848
	1.0		20992
	1.3		26624
	1.6		32768
	1.9		38912
	2.2		44544
	2.5		50688



## 4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las 168 pruebas realizadas en el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería. Antes de empezar con el análisis numérico de los resultados, el capítulo cuenta con un análisis gráfico de las pruebas realizadas. Como parte de este análisis, se muestran fotografías de la interacción del oleaje con los pastos, después se presentan los resultados que caracterizan la interacción de un obstáculo con el oleaje, esto es, la reflexión, la transmisión y la disipación de energía que generan los pastos ensayados.

Posteriormente se incluye el análisis de las alturas de ola medidas por encima de los pastos, de donde se deducen expresiones que relacionan el decaimiento de la altura de ola a lo largo de la longitud de los pastos con la velocidad característica del fluido. Y al final se muestra el análisis de las velocidades obtenidas de los sensores UVP utilizados en las pruebas de laboratorio.

Las alturas de ola mostradas en este capítulo serán las alturas cuadráticas medias ( $H_{RMS}$ ) medidas en los sensores de nivel las cuales sólo se designará únicamente con  $H$  (sin el subíndice RMS).

### 4.1 Análisis gráfico de las pruebas

Este análisis es de tipo cualitativo y parte de observaciones realizadas durante las pruebas. Dichas observaciones ayudan a comprender de manera conceptual el comportamiento de los pastos ante la acción del oleaje.

Unas de las características físicas de los pastos marinos es su flexibilidad. En la Figura 4.1 se puede apreciar la flexibilidad del pasto para 9 condiciones de oleaje. De la misma figura, se observa que el doblamiento de los pastos depende en mayor grado de la profundidad ( $h$ ) y del periodo del oleaje ( $T$ ), a comparación de la altura de ola ( $H$ ) que influye en menor medida. El doblamiento que alcanzan los pastos está relacionado directamente con la celeridad de la onda ( $c$ ). Esto se debe a que la celeridad de la onda ( $c = L/T$ ) es proporcional a la longitud de onda ( $L$ ) y esta a su vez es mayor mientras el periodo y la profundidad aumentan como se aprecian en las fotografías. Este fenómeno se detalla más adelante en el capítulo en las expresiones que relacionan el decaimiento de la altura de ola con la velocidad característica del fluido sobre los pastos marinos.

Como se describe más adelante, la disminución de la altura de ola depende de la velocidad del fluido y de la longitud total de los pastos. Las fotografías de las ondas modeladas capturadas antes, durante y después de la longitud de los pastos marinos se muestran en la Figura 4.2. La modelación tuvo condiciones de  $H = 0.10$  m,  $T = 1.6$  s y  $h = 0.30$  m. De dicha figura se puede observar la evolución de la altura de ola en 4 posiciones diferentes: (1.a) y (1.b) seis metros antes de los pastos, (2.a) y (2.b) al inicio de los pastos, (3.a) y (3.b) al final de la longitud de los pastos y, por último, (4.a) y (4.b) dos metros después de los pastos. Las letras a y b corresponden a las fotografías de la cresta y valle de la onda, respectivamente. La altura deducida de las figuras (1.a) y (1.b) fue de 15 cm aproximadamente; de (2.a) y (2.b), de un poco menos de 15 cm; de (3.a) y (3.b), alrededor de 5 cm y de (4.a) y (4.b), un poco más de 4 cm. La reducción de la altura de ola fue de 70%. Estas mediciones se realizaron con mucha más precisión usando los sensores de nivel.

De la misma Figura 4.2 se puede observar el cambio de flexibilidad de las hojas del pasto marino de acuerdo con su posición dentro de la longitud del pasto. Como se vaya reduciendo la altura de ola en la posición de los pastos, el doblé de la hoja se irá reduciendo como se puede apreciar comparando las figuras (2.a) y (3.a). También es observable la turbulencia que generan los pastos en el flujo, figuras (2.a) y (2.b).

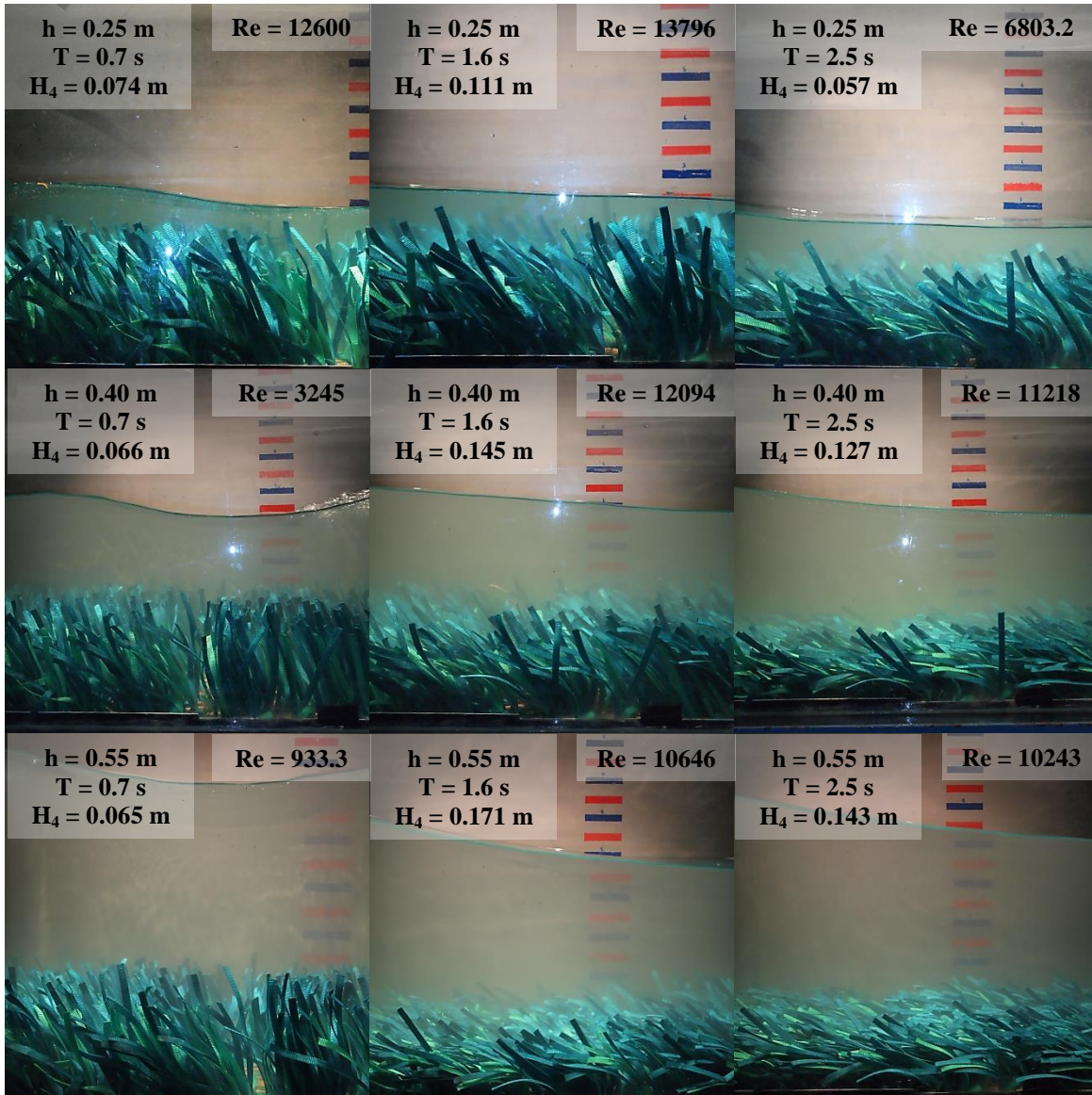


Figura 4. 1 Flexibilidad de los pastos marinos para diferentes condiciones de oleaje.  
Dirección del oleaje de izquierda a derecha.



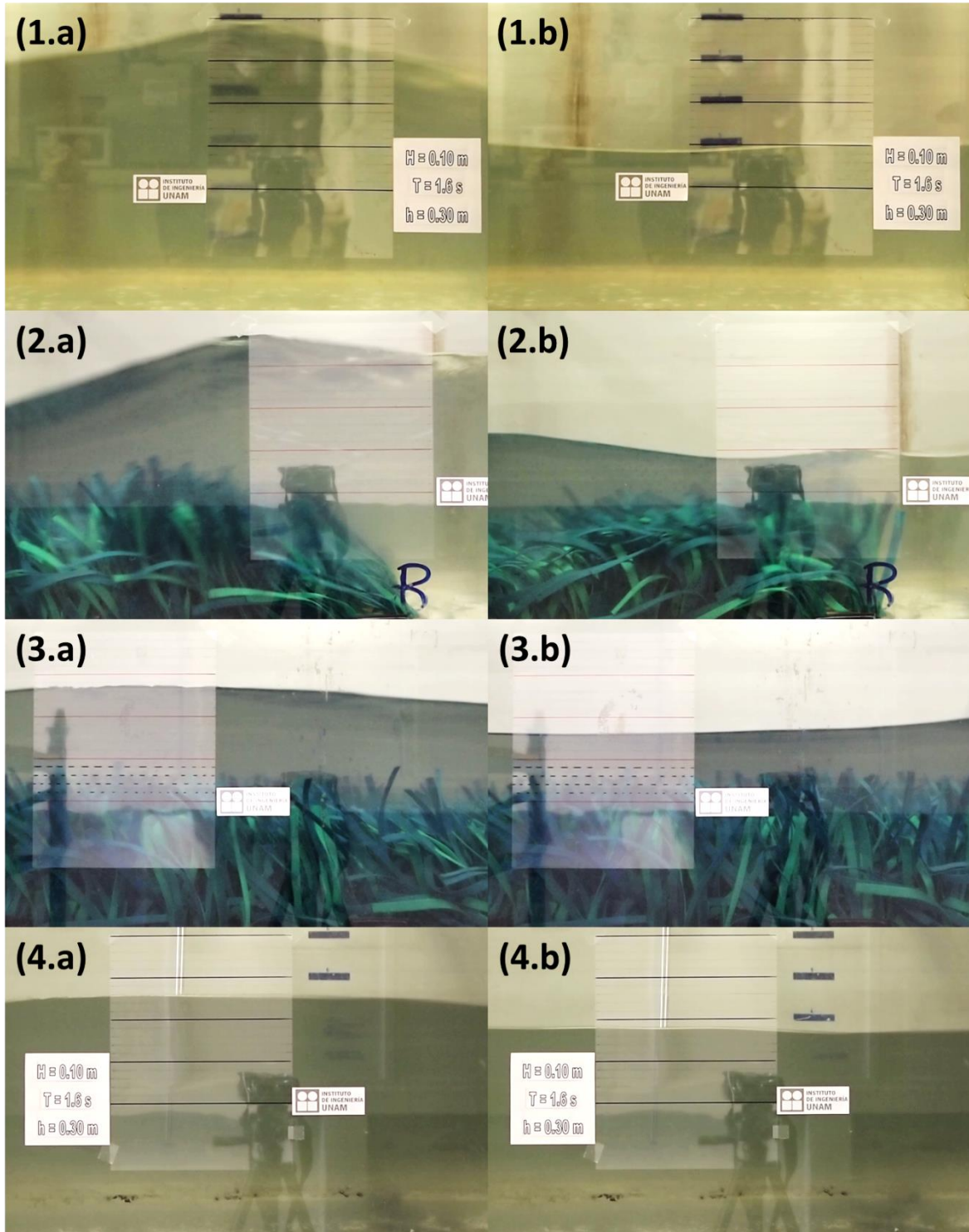


Figura 4. 2 Evolución de la altura de ola antes, durante y después de la longitud de los pastos marinos. Fotografías tomadas de una modelación con condiciones  $H = 0.10m$ ,  $T = 1.6s$  y  $h = 0.30m$ . (1.a) y (1.b) seis metros antes de los pastos, (2.a) y (2.b) al inicio de los pastos, (3.a) y (3.b) al final de la longitud de los pastos y, por último, (4.a) y (4.b) dos metros después de los pastos.

## 4.2 Coeficiente de reflexión

Al procesar los datos obtenidos de los sensores de nivel de las pruebas, se calcularon los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación de energía que son los parámetros más importantes que se necesitan para comprender el funcionamiento de un elemento dispuesto para la disipación de la energía del oleaje. En este apartado se describe el coeficiente de reflexión para las diferentes condiciones de oleaje modeladas.

La reflexión es una característica de los obstáculos que se oponen al flujo oscilatorio. La cantidad de energía reflejada por cada elemento depende de su geometría y el material de construcción. Los pastos marinos se pueden considerar como un obstáculo en la trayectoria de las olas y, para el análisis de la onda reflejada, su comportamiento se puede considerar similar al de una estructura sumergida y rebasable. Es importante mencionar que el fenómeno de la reflexión en estructuras sumergidas depende considerablemente de la profundidad a la que se encuentre la estructura, dicha profundidad se cuantifica con el parámetro llamado francobordo ( $F_b$ ) que es la distancia que hay del nivel medio del mar a la cresta de la estructura. Para el caso de los pastos marinos, el francobordo se considera como la profundidad ( $h$ ) de la prueba menos el alto de hoja de los pastos ( $L_v$ ).

El cálculo del coeficiente de reflexión se llevó a cabo de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 3 y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.3. El coeficiente de reflexión se encuentra en función del francobordo del pasto relacionado con la altura de ola incidente. Además, la Figura 4.3 identifica el periodo modelado para cada prueba para observar el comportamiento del coeficiente en función del periodo. El rango de coeficientes de reflexión obtenidos se encuentra desde  $K_r = 0.014$  hasta  $K_r = 0.21$  con un promedio de  $\overline{K_r} = 0.0747$ . El periodo que presentó los menores coeficientes de reflexión fue de 1.0 s.

El coeficiente de reflexión resulta ser muy homogéneo en función del parámetro  $F_b/H_i$ , lo cual puede ser debido a que las modelaciones estuvieron en un rango donde la profundidad menor fue el de la altura del pasto marino. Es necesario hacer modelaciones que cubran el rango donde la profundidad es menor a la altura del oleaje para que se pueda ajustar una curva a los resultados.

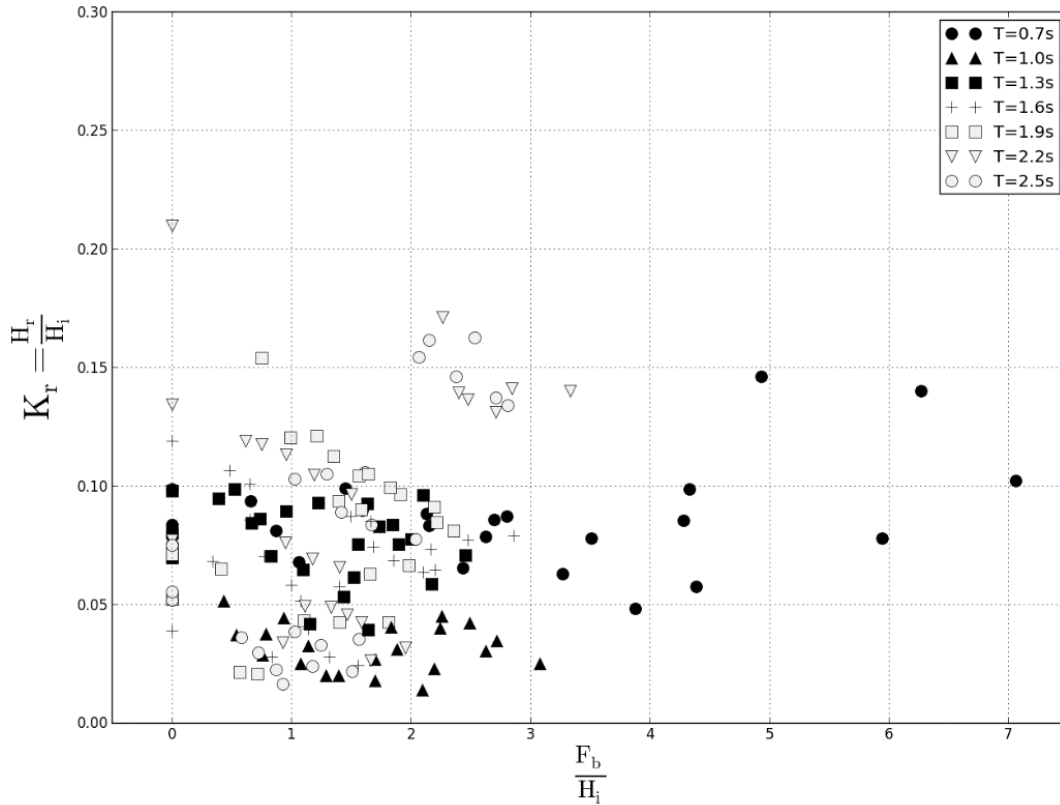


Figura 4. 3 Coeficiente de reflexión, cantidad de energía reflejada, para los pastos marinos. Donde  $K_r$  es el coeficiente de reflexión;  $F_b/H_i$ , la relación del francobordo y la altura de ola incidente;  $T$ , periodo del oleaje.

### 4.3 Coeficiente de transmisión

El coeficiente de transmisión,  $K_t$ , es un parámetro importante que se necesita conocer de una estructura de protección costera ya que este parámetro indica la cantidad de energía del oleaje incidente que es capaz de pasar la estructura. Dicho coeficiente se define como la relación de altura de ola transmitida entre la altura de la ola reflejada. Por lo tanto, la altura de ola transmitida será proporcional al coeficiente de transmisión. A menor coeficiente de transmisión, la altura de ola transmitida será menor (mayor eficiencia de la estructura). Con esta información se podrá identificar cuáles son las condiciones óptimas para una mayor eficiencia de los pastos y en cuáles se presenta lo contrario.

En consecuencia, es importante realizar un análisis más detallado del coeficiente de transmisión. Los coeficientes obtenidos, a partir de los cálculos definidos en el Capítulo 3, se resumen en la Figura 4.4. Al igual que el coeficiente de reflexión, la Figura 4.4 muestra en el eje de las abscisas el parámetro adimensional definido como el francobordo en relación con la altura de ola incidente. Además de graficar lo anterior, la figura identifica el periodo modelado para cada prueba realizada.

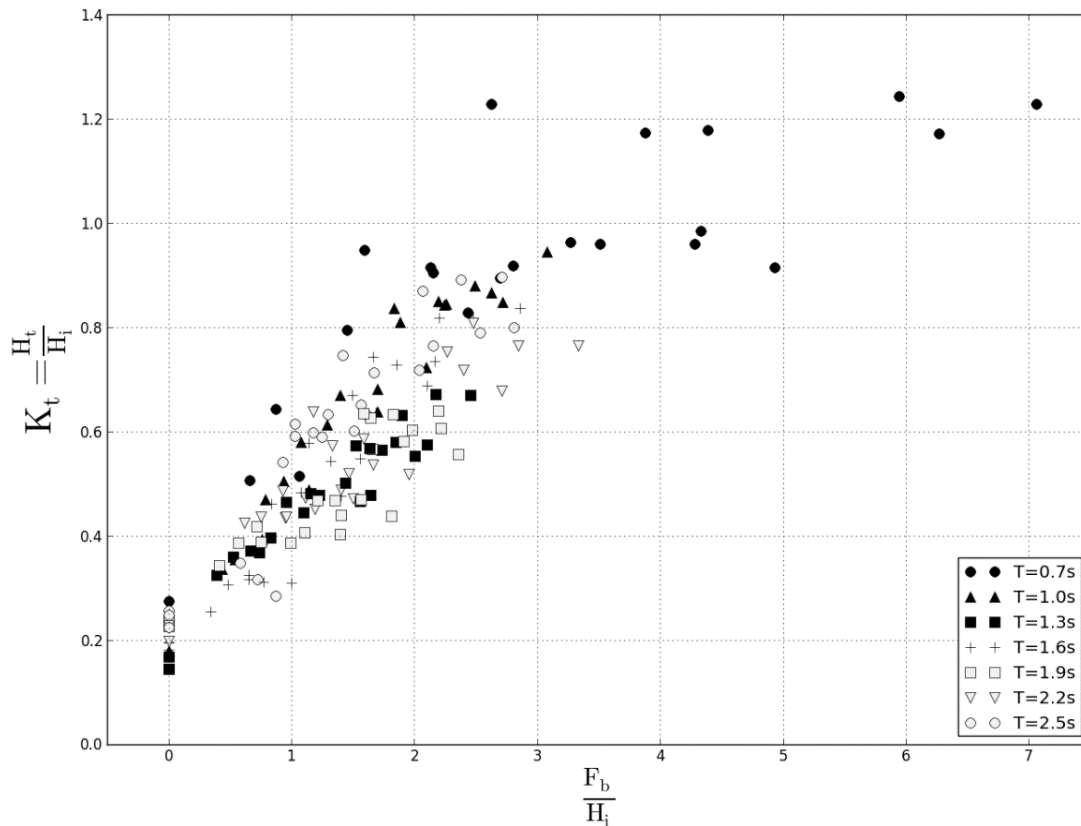


Figura 4. 4 Coeficiente de transmisión, cantidad de energía transmitida, para los pastos marinos. Donde  $K_t$  es el coeficiente de transmisión;  $F_b/H_i$ , la relación del francobordo y la altura de ola incidente;  $T$ , periodo del oleaje.

Analizando la figura, se puede observar la tendencia del coeficiente de transmisión en relación al francobordo; a menor  $F_b$ , menor es el coeficiente  $K_t$ . Cuando la profundidad de las pruebas es la misma que la altura de los pastos, es decir, en el momento que  $F_b/H_i = 0.0$  el coeficiente de transmisión promedio es de  $K_t = 0.21$ . Por otra parte, la dispersión de los resultados aumenta junto con el parámetro adimensional  $F_b/H_i$ .

Otra característica es que en la medida que el parámetro adimensional  $F_b/H_i$  aumenta, el coeficiente de transmisión tendría que alcanzar la unidad como valor máximo, sin embargo, en algunas condiciones modeladas se supera, lo que presuntamente puede presentarse un fenómeno llamado someramiento. El peraltamiento se presentó para 6 pruebas con condiciones: ( $T = 0.7$  s,  $h = 0.60$  m,  $H_i = 0.056$  m), ( $T = 0.7$  s,  $h = 0.45$  m,  $H_i = 0.052$  m), ( $T = 0.7$  s,  $h = 0.50$  m,  $H_i = 0.057$  m), ( $T = 0.7$  s,  $h = 0.40$  m,  $H_i = 0.057$  m), ( $T = 0.7$  s,  $h = 0.60$  m,  $H_i = 0.050$  m) y ( $T = 0.7$  s,  $h = 0.55$  m,  $H_i = 0.051$  m). Estas pruebas se presentaron en el menor periodo modelado,  $T = 0.7$  s, y se presentaron en una profundidad mayor a 0.40 m. Además, la altura de ola incidente de estas seis pruebas es pequeña,  $0.050 \text{ m} \leq H_i \leq 0.057 \text{ m}$ , con una altura promedio de  $\bar{H}_i = 0.054$  m. El fenómeno también se identificó en las gráficas de evolución de la altura de ola registrada en los sensores de nivel a lo largo de los pastos marinos, las cuales se detallan más adelante de este capítulo.

Para los resultados mostrados en la Figura 4.4 se ajustó una curva para el coeficiente  $K_t$ , Ecuación 4.1, en función del parámetro  $F_b/H_i$  y que representa la transmisión de oleaje que permite una longitud de 5 metros de pasto marino. Cabe mencionar que para el ajuste de la curva no se tomaron en cuenta los seis datos que su coeficiente de transmisión fue mayor a uno. El coeficiente de correlación obtenido para la Ecuación 4.1 fue de  $R^2 = 0.832$ . La Figura 4.5 muestra la comparación de la curva de ajuste con los datos obtenidos en laboratorio y se alcanza a apreciar que la dispersión de los resultados aumenta en la misma medida que el coeficiente de transmisión va aumentando.

$$K_t = 1.352 \{0.9724 - e^{[-0.2914 \cdot (F_b/H_i + 0.658)]}\}$$

$$\text{para } 0.0 \leq \frac{F_b}{H_i} < 4.93 \quad (4.1)$$

$$K_t < 1$$

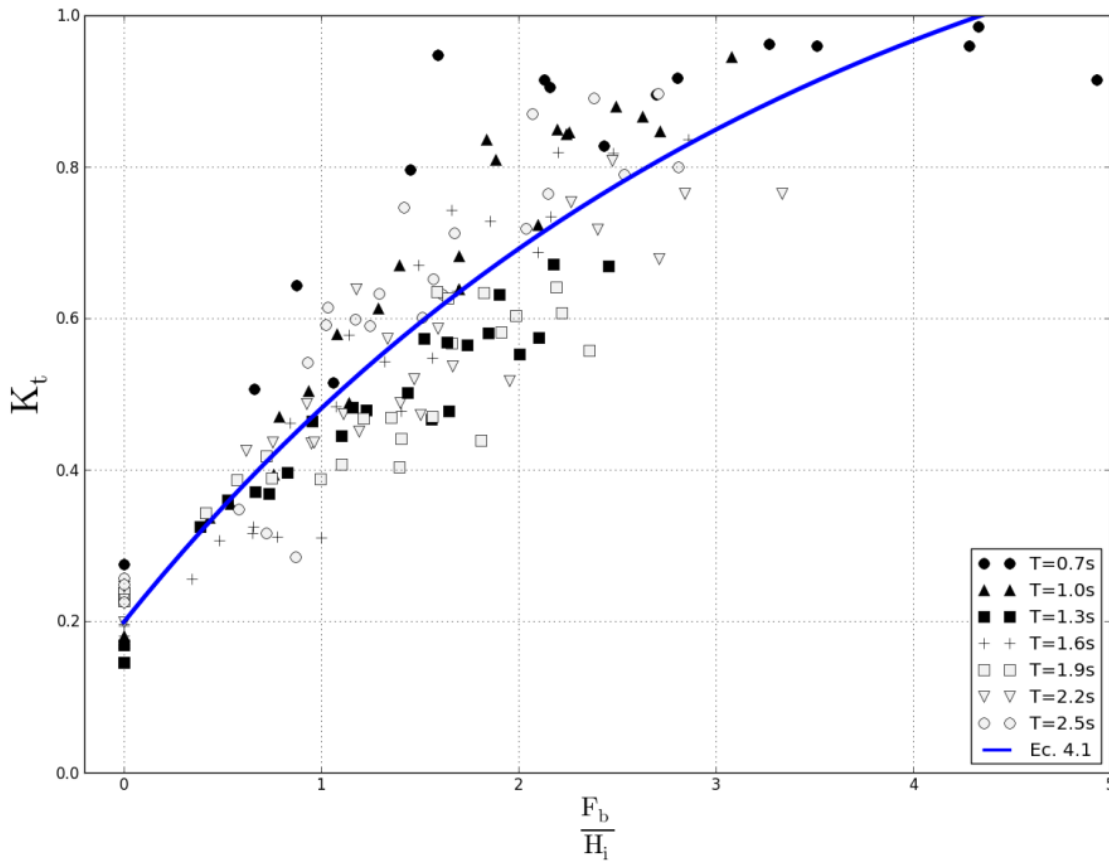


Figura 4. 5 Comparación de datos laboratorio con la Ecuación 4.1.

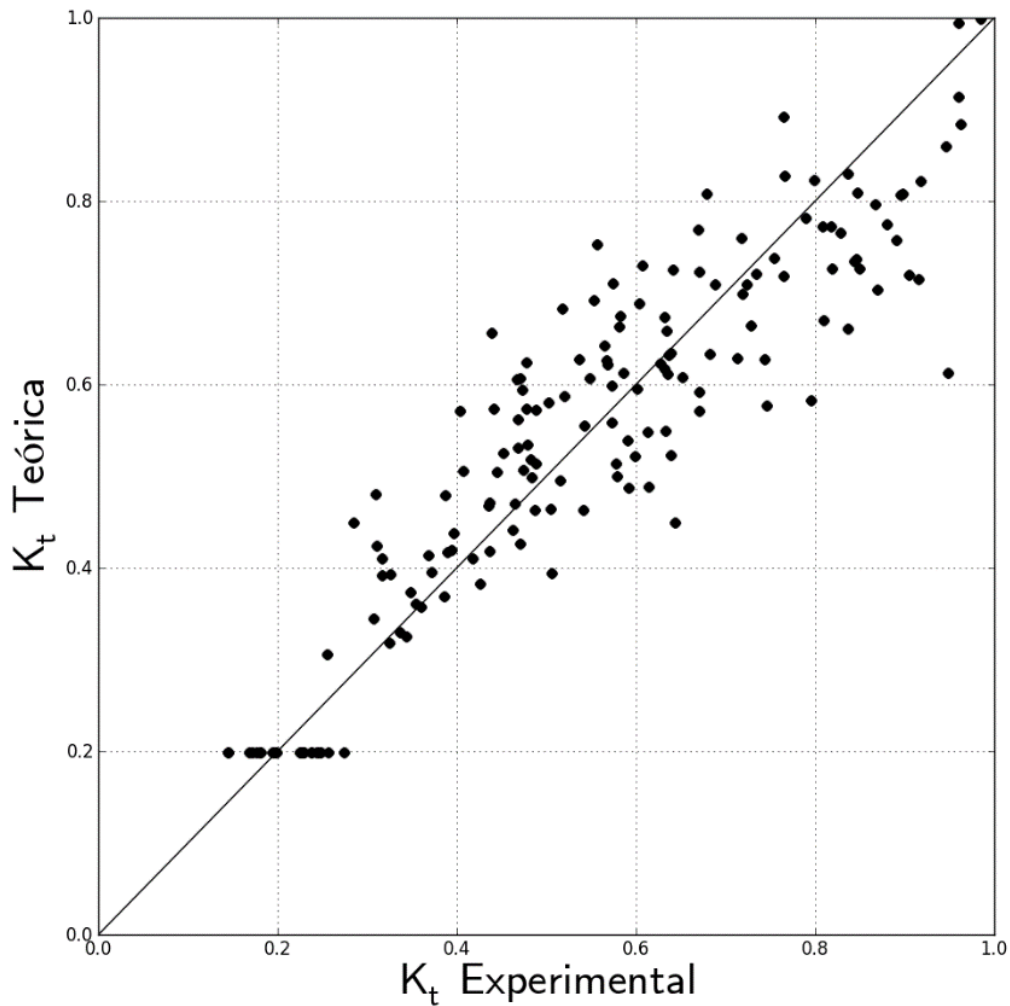


Figura 4. 6 Comparación de los coeficientes de transmisión experimentales con los calculados de la Ecuación 4.1

#### 4. 4 Coeficiente de disipación de energía

El coeficiente de disipación está relacionado con el coeficiente de reflexión y el de transmisión como se indica en la Ecuación 4.2. Dicho coeficiente indica la cantidad de energía que disipa la estructura, en este caso, los pastos marinos.

$$K_D = 1 - K_r^2 - K_t^2 \quad (4.2)$$

Los coeficientes de disipación calculados para cada prueba se presentan en la Figura 4.7. De dicha figura se puede apreciar que la disipación de energía tiene mayor dependencia del coeficiente de transmisión,  $K_t$ , que del coeficiente de reflexión,  $K_r$ . Este comportamiento se esperaba ya que los valores del coeficiente de reflexión presentan menos dispersión que los de transmisión en relación al parámetro adimensional  $F_b/H_i$ . Por tal motivo, el coeficiente de disipación de energía disminuye mientras el parámetro  $F_b/H_i$  aumenta, en otras palabras, la capacidad de disipar

energía del oleaje se va perdiendo mientras a mayor profundidad se encuentren los pastos marinos. En la misma Figura 4.7 se observan puntos que su coeficiente de disipación es menor a cero y estos puntos corresponden a los casos en los que se presentó un aumento en la altura de ola transmitida.

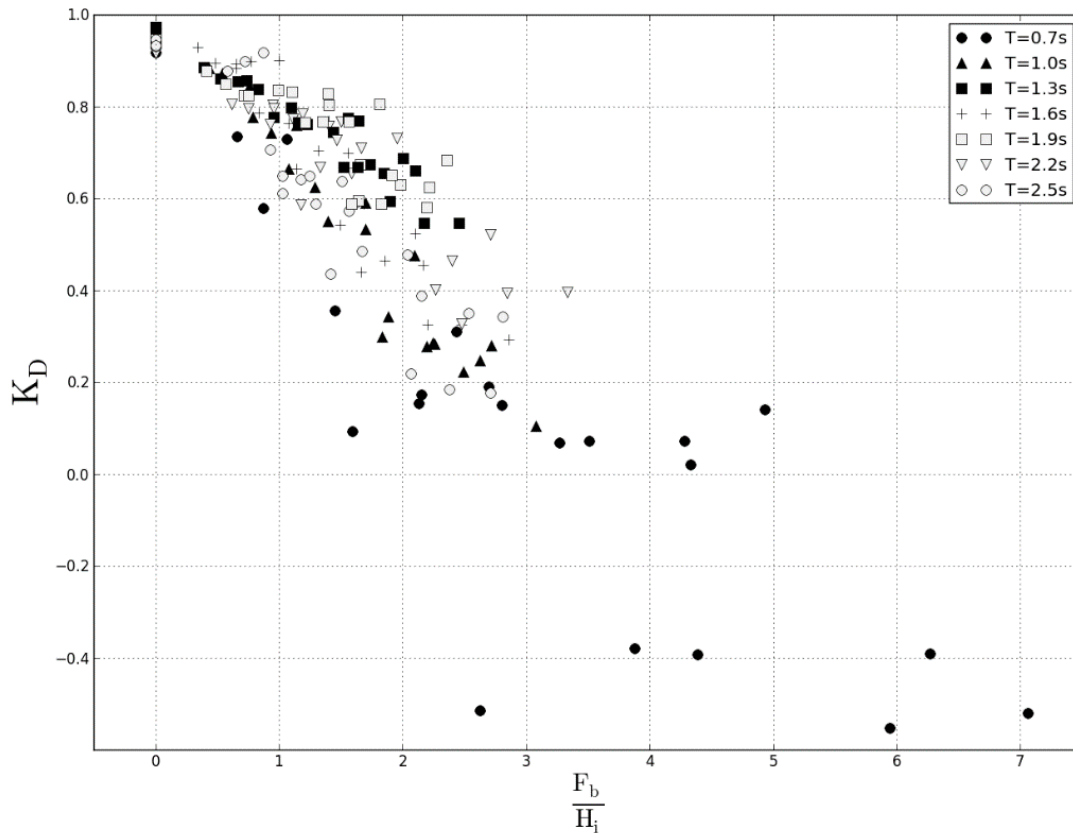


Figura 4. 7 Coeficiente de disipación, cantidad de energía disipada por la estructura, para los pastos marinos. Donde  $K_D$  es el coeficiente de disipación;  $F_b/H_1$ , la relación del francobordo y la altura de ola incidente;  $T$ , periodo del oleaje.

#### 4. 5 Análisis de la evolución de la altura de ola sobre los pastos marinos

Los resultados que se han mostrado al momento (coeficiente de reflexión, transmisión y disipación) contemplan a los pastos marinos como una estructura sin cambios en sus características físicas y geométricas, variando únicamente la profundidad ( $h$ ) en la que se encuentran. Dos características geométricas y físicas importantes de los pastos marinos es su longitud (5 m en este estudio) y su densidad (800 haces foliares por  $m^2$ ) que varían para cada especie de acuerdo a las condiciones hidrodinámicas del oleaje, nutrientes en el agua, tiempo de luz y temperatura (Hoil, 2012). Además dichas características no sólo varían con respecto a la región geográfica sino también con relación a la época del año, presentándose las máximas densidades en el verano y las menores en el invierno (Hoil, 2012). Debido a esta variabilidad, es importante tener expresiones que permitan describir el comportamiento de la altura de ola dada

una longitud de pasto y una densidad. En este apartado se explica el comportamiento de la altura de la ola medida en los sensores de nivel colocados sobre los pastos marino para pasar a continuación con la determinación de los coeficientes de decaimiento de las expresiones más importante de la literatura que contemplan las características físicas y geométricas de los pastos marinos.

En la Figura 4.8 se muestra el efecto y evolución de la altura de la ola debido a la presencia de los pastos marinos. En dicha figura se muestran los resultados de 12 pruebas, de 168 en total, en 4 escenarios diferentes (dos periodos y dos sumergencias). Los puntos graficados corresponden a 7 sensores de nivel (sensor 4 al 10, ver Figura 3.1) ubicados sobre los 5 metros de pasto marino modelados en el canal.

De acuerdo con varios autores (Kobayashi et al., 1993; Méndez y Losada, 2004; Lima et al., 2006; Sánchez-González et al., 2011) la disminución de la altura de ola depende principalmente del factor de sumergencia,  $\lambda = L_V/h$ , como se aprecia en la Figura 4.8, fenómeno muy parecido al ocurrido con el parámetro  $F_b/H_i$  en el coeficiente de transmisión,  $K_t$ . Cuando la sumergencia tiende a ser igual a uno, es decir, cuando la profundidad se reduce, la altura de ola a lo largo del pasto disminuye de forma exponencial; mientras que a menor sumergencia, la atenuación de la altura de ola tiende a ser lineal.

La altura de ola incidente no es un factor importante para la disminución de la altura de ola a lo largo del pasto marino (Kobayashi et al, 1993; Méndez y Losada, 2004; Freire Lima et al, 2006; Sánchez-González et al., 2011). En la Figura 4.8 se puede apreciar que la altura de ola disminuye en la misma proporción independientemente de la altura de ola al inicio de los pastos marinos en  $x = 0$ . Para apreciar mejor este comportamiento es conveniente relacionar las alturas de ola con respecto a la altura de ola registrada al inicio de los pastos, es decir, la altura de ola registrada en  $x = 0$ . Al hacer dicha relación de alturas de ola se obtiene un coeficiente de reducción de altura de ola por vegetación,  $K_V$ , que es función de una distancia  $x$  que representa la longitud del pasto marino, Figura 4.9. La variación de  $K_V$  con respecto a la altura de ola modelada es mínima a lo largo del pasto marino, en otras palabras, a lo largo de la distancia  $x$ .



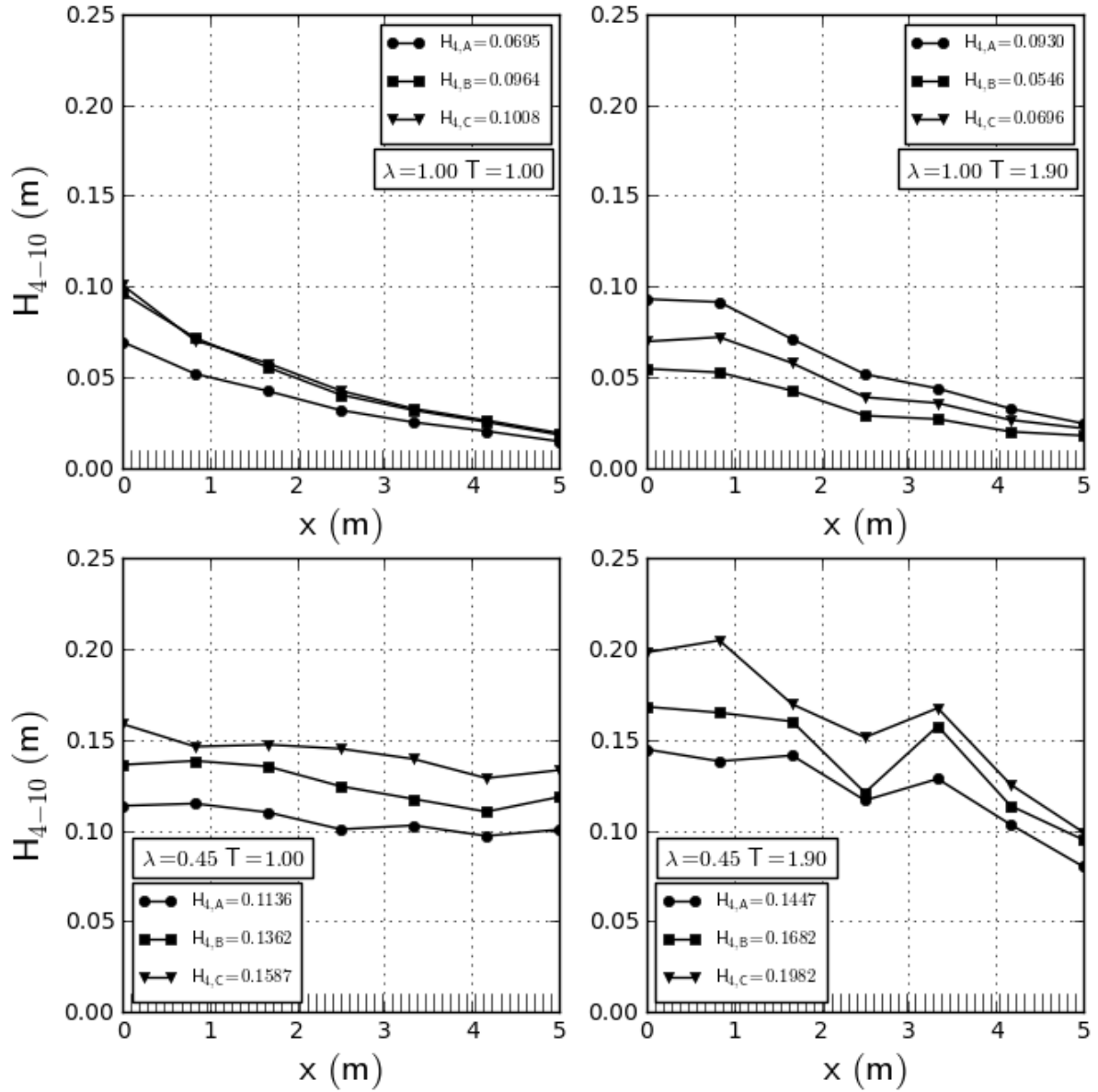


Figura 4. 8 Evolución de la altura de ola sobre los pastos marinos para 4 escenarios diferentes (dos periodos, 2 sumergencias) con 12 alturas de ola.

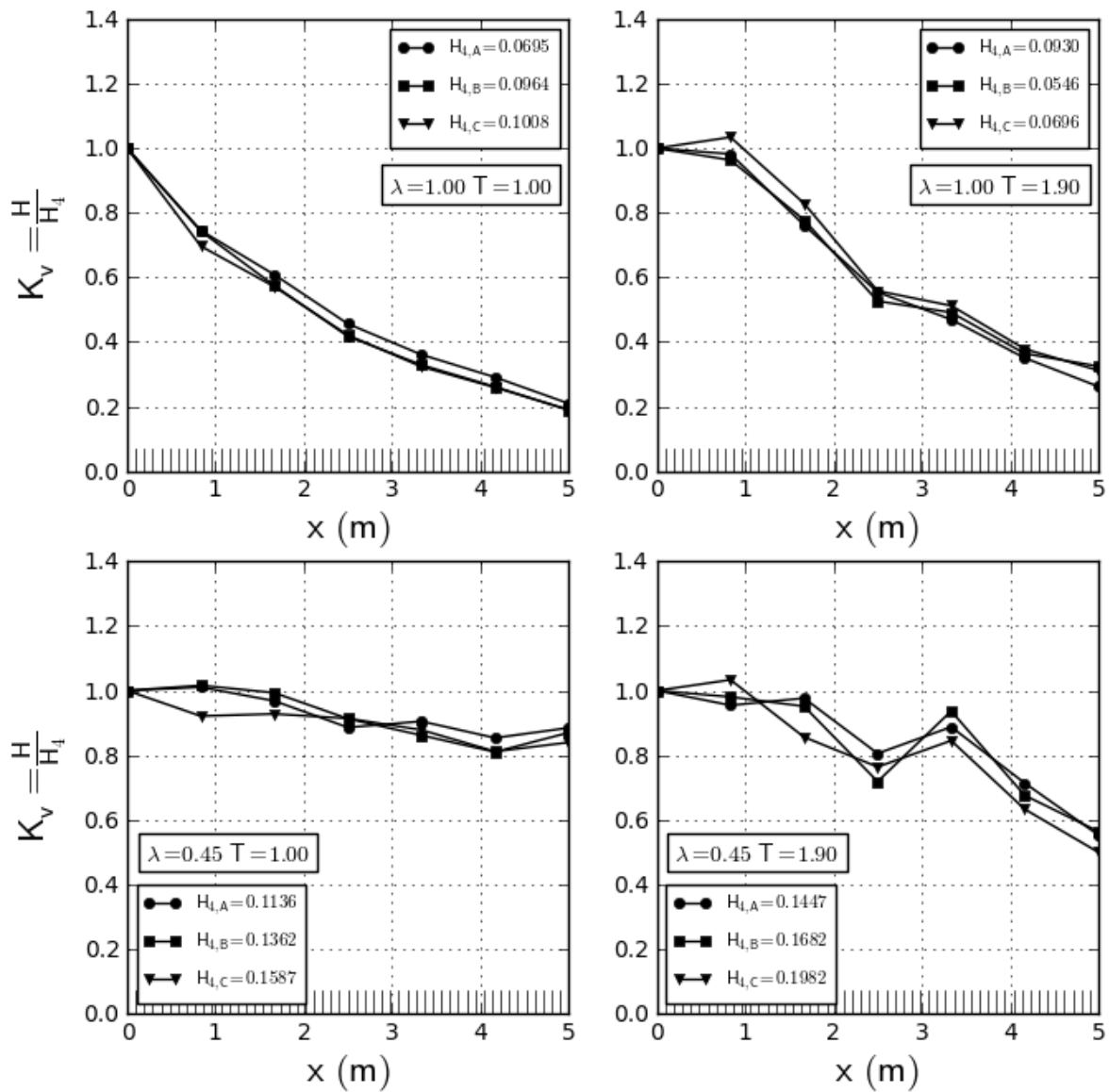


Figura 4. 9 Alturas de ola registradas a lo largo de los pastos marinos relativa a la altura de ola registrada al inicio de los pastos (Coeficiente de amortiguamiento por vegetación,  $K_V$ ).

Además del comportamiento descrito anteriormente, al analizar los 56 escenarios (8 profundidades x 7 periodos = 56 escenarios) que se modelaron, se detectó que en 29 escenarios el coeficiente de reducción de altura de ola por vegetación fue mayor a uno,  $K_V > 1$ , lo que indica que la altura de ola aumentó en lugar de disminuir, este fenómeno es conocido como peraltamiento de la ola. En la Figura 4.10 se encuentran 4 escenarios que muestran el aumento en la altura de ola en donde al menos hubo un punto con  $K_V > 1$ . Las condiciones de los escenarios en que se presentó el peraltamiento de la ola fueron de  $T = 0.7s$ ,  $T \geq 2.2$  y  $\lambda \leq 0.5$ .

En 2009, Bradley y Houser presentaron los resultados de una investigación de campo de la interacción del oleaje con pastos marinos de la especie *Thalassia testudinum*, en costas de la

Florida, en el Golfo de México. En dicho trabajo observaron que la altura de ola incidente se incrementó alrededor del 20 % en los primeros 5 metros de los pastos y después de estos la altura de ola disminuyó de forma exponencial. Este comportamiento se aprecia en los resultados de la Figura 4.10, inmediatamente después de alcanzar el máximo incremento de la altura de ola se presenta el decaimiento. La forma del decaimiento que se presenta después del peraltamiento depende de la sumergencia, como ya se mencionó anteriormente, a mayor sumergencia el decaimiento es de forma exponencial y a menor sumergencia es de forma lineal.

El análisis de las Figuras 4.8 a 4.10 se retomará en el siguiente apartado para realizar el cálculo de un parámetro de decaimiento, el cual integra todos los resultados y observaciones disponibles en la literatura hasta el momento.

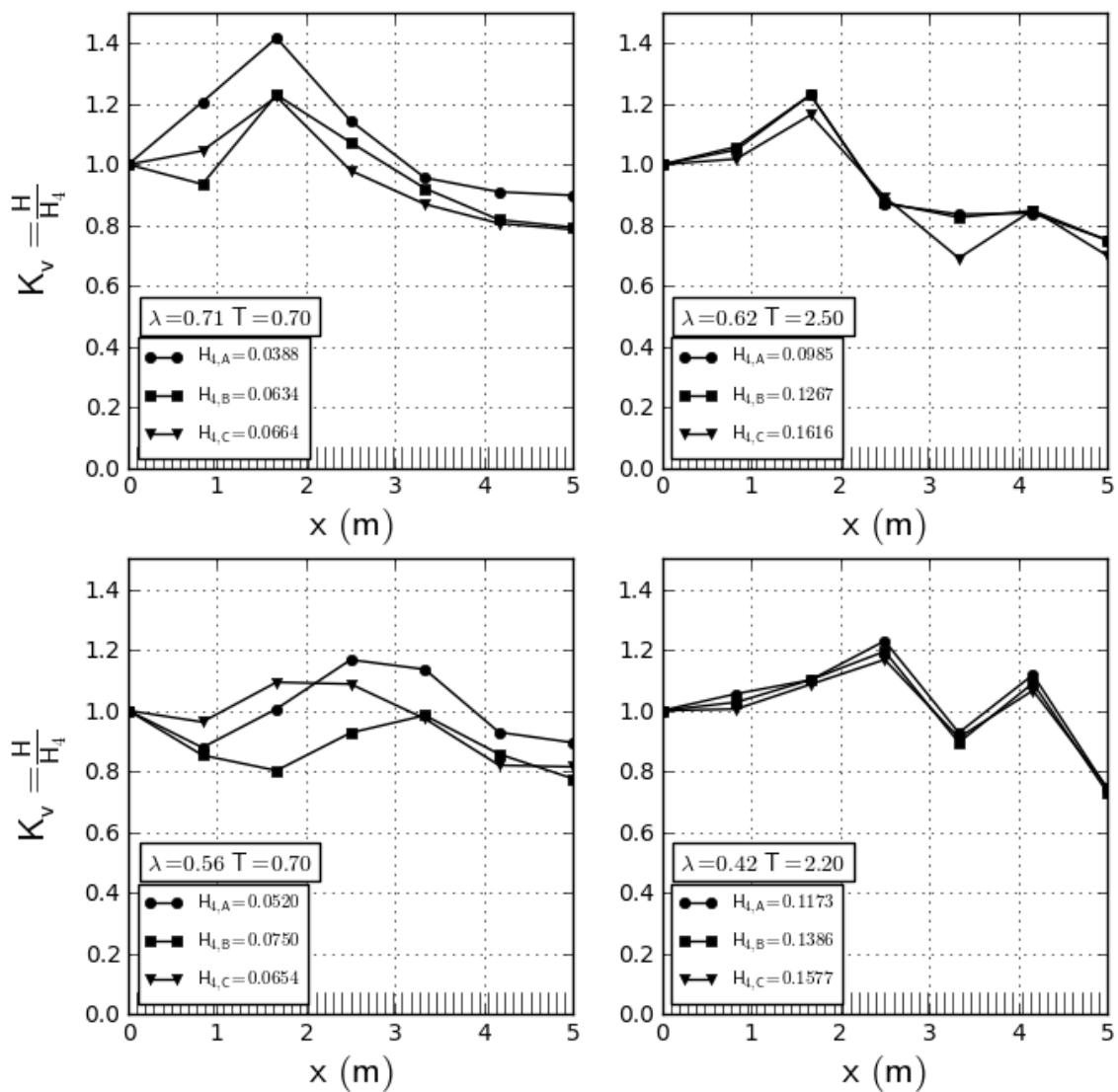


Figura 4. 10 Escenarios que presentaron peraltamiento de la ola ( $K_v > 1$ ).

## 4.6 Determinación del parámetro de decaimiento ( $k_i, \beta$ )

La forma de decaimiento de la altura de ola, como se mencionó anteriormente, en ciertas condiciones presenta un comportamiento exponencial y en otras lineal. Debido a estas observaciones, en 1993, Kobayashi presentó su modelo de forma exponencial representado en el Ecuación 4.3. En dicha ecuación el coeficiente de amortiguamiento de la altura de ola,  $K_V$ , depende de un parámetro de decaimiento,  $k_i$ , y de una longitud de pasto o distancia,  $x$ .

Teniendo en cuenta la Ecuación 4.3, se ajustó un valor de  $k_i$  para cada una de las 168 pruebas realizadas en laboratorio. Después, para cada uno de los 56 escenarios modelados, se promedió un valor de  $k_i$  partiendo de la premisa de que la disminución de la altura de ola no depende de la altura de ola incidente. Finalmente, los 56 valores de  $k_i$  que se obtuvieron del ajuste se graficaron en un mapa el cual permitió obtener isolíneas interpoladas a partir de los puntos graficados, Figura 4.11. Dicho mapa muestra en el eje de las abscisas la relación del periodo con el largo de la hoja del pasto,  $T/L_V$ , y en el eje de las ordenadas el factor de sumergencia,  $\lambda = L_V/h$ . La Figura 4.11 también cuenta con una escala de colores para que los valores  $k_i$  puedan ser interpretados fácilmente.

$$K_V = \frac{H}{H_0} = e^{-k_i x} \quad (4.3)$$

Donde

$K_V$  - coeficiente de amortiguamiento por vegetación

$H$  - altura de ola [m]

$H_0$  - altura de ola incidente [m]

$k_i$  - parámetro de decaimiento [ $m^{-1}$ ]

$x$  - distancia de cálculo sobre la vegetación [m]

Dalrymple et al. (1984) y Méndez y Losada (2004) proponen la Ecuación 4.4 para describir el amortiguamiento de la altura de ola sobre los pastos marinos. El comportamiento de los coeficientes de decaimiento  $\beta$  y  $k_i$  es de manera similar como se detalló en el capítulo 2. Al igual que  $k_i$ , se ajustaron valores de  $\beta$  para las 168 pruebas realizadas y para los 56 escenarios modelados se promedió un valor de  $\beta$ . Al final se obtuvo la Figura 4.12 que se interpreta de la misma manera que la Figura 4.11.

Como se mencionó en el capítulo 2, los coeficientes  $\beta$  y  $k_i$  dependen de las características físicas del pasto marino, de las condiciones del oleaje y de un coeficiente de arrastre. Al final se llega a una expresión que relaciona el coeficiente de arrastre con las velocidades del flujo, utilizando el número de  $R_e$ . Dicha expresión se detalla más adelante.

$$K_V = \frac{H}{H_0} = \frac{1}{1 + \beta x} \quad (4.4)$$

Donde

$\beta$  - coeficiente de decaimiento [ $m^{-1}$ ]

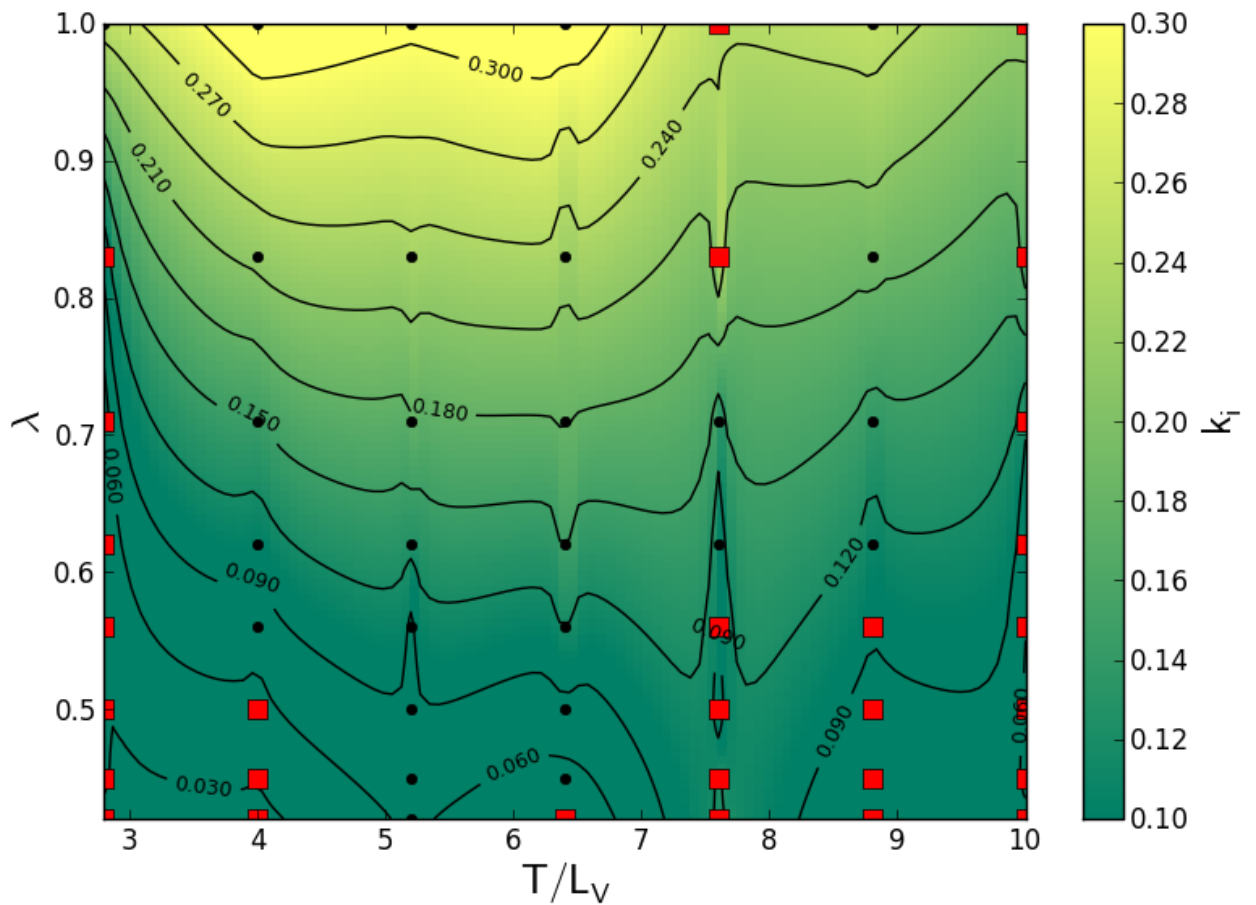


Figura 4. 11 Coeficiente de decaimiento,  $k_i$ , e interpolación de isóneas para los 56 escenarios modelados. Los puntos negros representan los escenarios donde no se presentó peraltamiento de la ola y aquellos que sí están graficados con cuadros rojos.

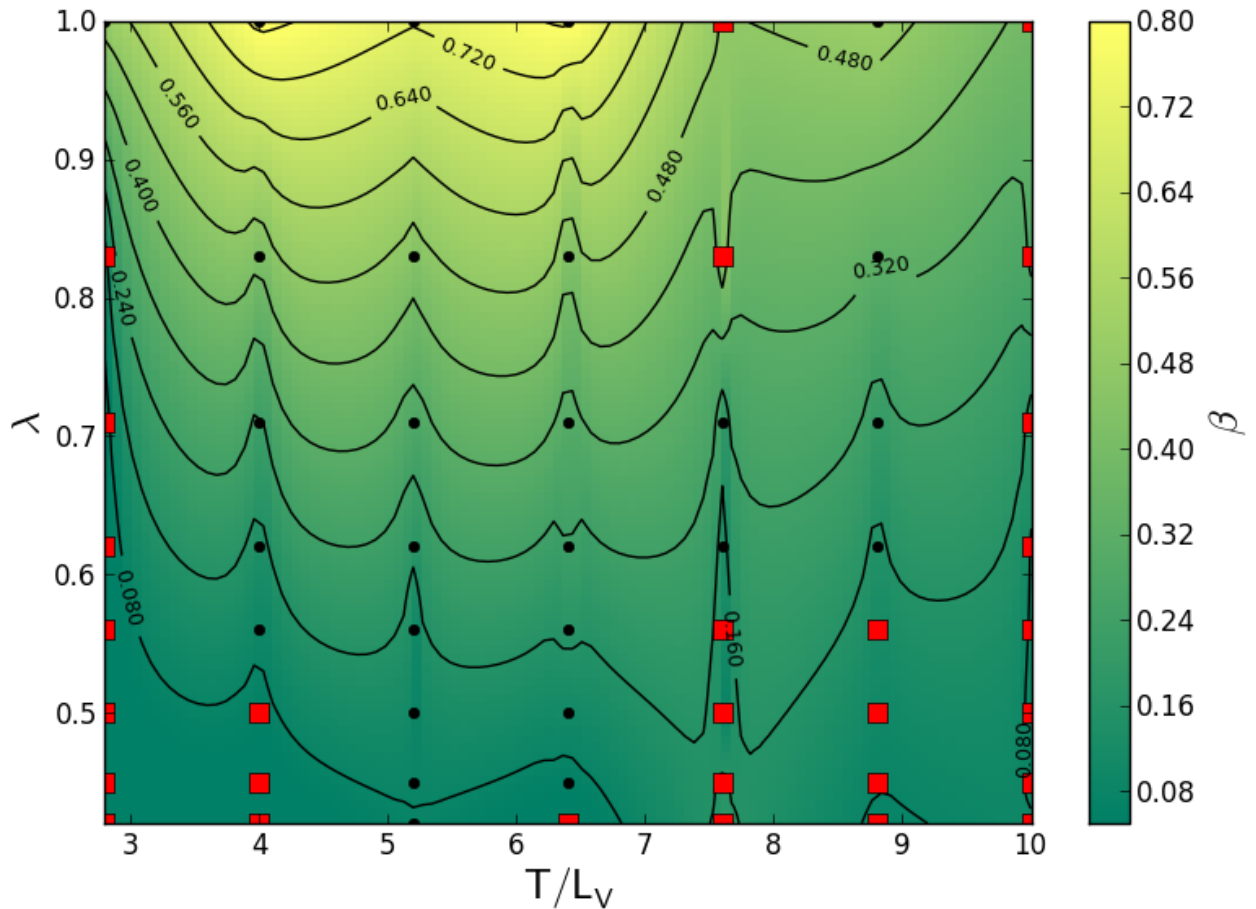


Figura 4. 12 Coeficiente de decaimiento,  $\beta$ , e interpolación para condiciones intermedias.

El fenómeno del peraltamiento de la ola, que se identificó en apartados anteriores, también se contempló en las Figuras 4.11 y 4.12; los escenarios donde se presentó este fenómeno ( $K_V > 1$ ) fueron graficados con cuadros rojos y aquellos en donde no ( $K_V < 1$ ) fueron graficados con puntos negros. En total fueron 29 escenarios de 56 en donde se presentó el peraltamiento de la ola, los cuales se agruparon en una zona de peraltamiento, como se puede observar en la Figura 4.13, excepto tres escenarios localizados en  $T/L_V = 7.6$  y  $\lambda \geq 0.555$ . Es importante seguir identificando esta zona de peraltamiento para evitar un comportamiento no deseado de los pastos marinos sobre el oleaje.

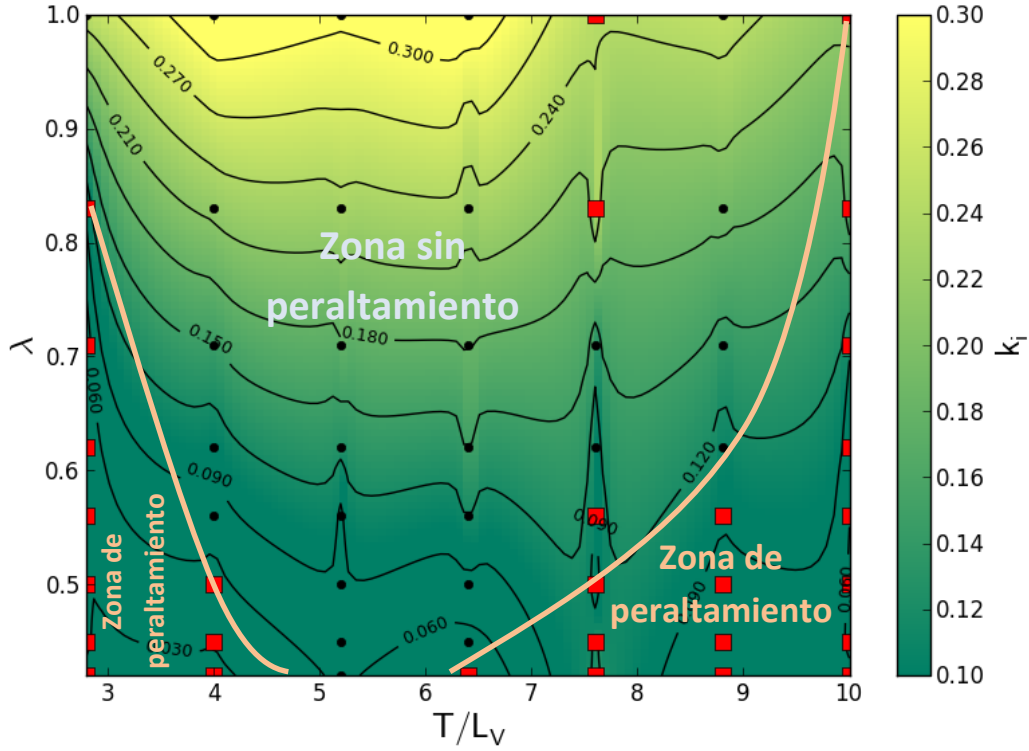


Figura 4. 13 Identificación de la zona de peraltamiento de la ola,  $K_V > 1$ .

#### 4.7 Determinación del coeficiente de arrastre, $C_D$

El coeficiente de arrastre,  $C_D$ , es una cantidad adimensional que indica cual es la resistencia de un objeto al movimiento del fluido. Kobayashi et al. (1993) presentó junto con su modelo la Ecuación 4.5 que relaciona el parámetro de decaimiento,  $k_i$ , con las características físicas del oleaje y las geométricas y físicas de los pastos marinos. Para cada una de las 168 pruebas realizadas para este trabajo se calculó su correspondiente coeficiente de arrastre utilizando la Ecuación 4.5. Es común encontrar en la literatura que el coeficiente de arrastre se relacione con el número de Reynolds, como se muestra en la Figura 4.14. Esto nos permite relacionar las velocidades del flujo con la resistencia del objeto que se opone al movimiento.

$$k_i = \frac{1}{36\pi} C_D b_V N \frac{c}{c_g} \frac{g^2 k^2 \sinh(3kL_V) + 9 \sinh(kL_V)}{\sigma^4 \cosh^3(kh)} (kH_0) \quad (4.5)$$

Donde

$C_D$  - coeficiente de arrastre

$b_V$  - área de planta por unidad de altura de cada planta normal a  $u$  [m]

$N$  - número de plantas por unidad horizontal de área [m<sup>-2</sup>]

- $g$  - aceleración de la gravedad [ $m\ s^{-2}$ ]  
 $k$  - número de onda [ $m^{-1}$ ]  
 $\sigma$  - frecuencia angular [ $s^{-1}$ ]  
 $L_V$  - alto de hoja de la planta [m]  
 $h$  - profundidad [m]  
 $H_0$  - altura de ola incidente [m]

$$R_e = \frac{u_{c0} b_V}{\nu} \quad (4.6)$$

Donde

- $R_e$  - número de Reynolds  
 $u_{c0}$  - velocidad característica, velocidad máxima orbital  
sobre los pastos ( $z = -h + L_V$ ) [ $m\ s^{-1}$ ]  
 $b_V$  - área de planta por unidad de altura de cada planta normal a  $u$  [m]  
 $\nu$  - viscosidad cinemática del fluido [ $m^2\ s$ ]

Al observar el comportamiento de los datos de la Figura 4.14, se ajustó una curva que tomó en cuenta la forma de las ecuaciones presentadas en otros estudios (Kobayashi et al., 1993; Méndez y Losada, 1999; Bradley y Houser, 2009; Cavallaro et al., 2010; Koftis et al., 2013; Anderson y Smith, 2014) obteniendo la Ecuación 4.7 con un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0.9493$ . Hay que recordar que el coeficiente de arrastre de la Ecuación 4.7 está determinado para el modelo de decaimiento y el coeficiente  $k_i$  presentado por Kobayashi et al. (1993), de ahí el subíndice KOB.

La Figura 4.15 muestra la evaluación de la Ecuación 4.7 comparando la altura de ola medida contra la altura de ola obtenida por la ecuación. De la figura se observa que la dispersión de los resultados incrementa al ir aumentando la altura de la ola. La ecuación propuesta se acerca al ajuste perfecto con alturas de olas bajas.

$$C_{D,KOB} = 0.183 + \left( \frac{3095.0}{R_e} \right)^{2.242} \quad (4.7)$$

Donde

- $\alpha, \beta, \gamma$  - coeficientes de ajuste  
 $R_e$  - número de Reynolds



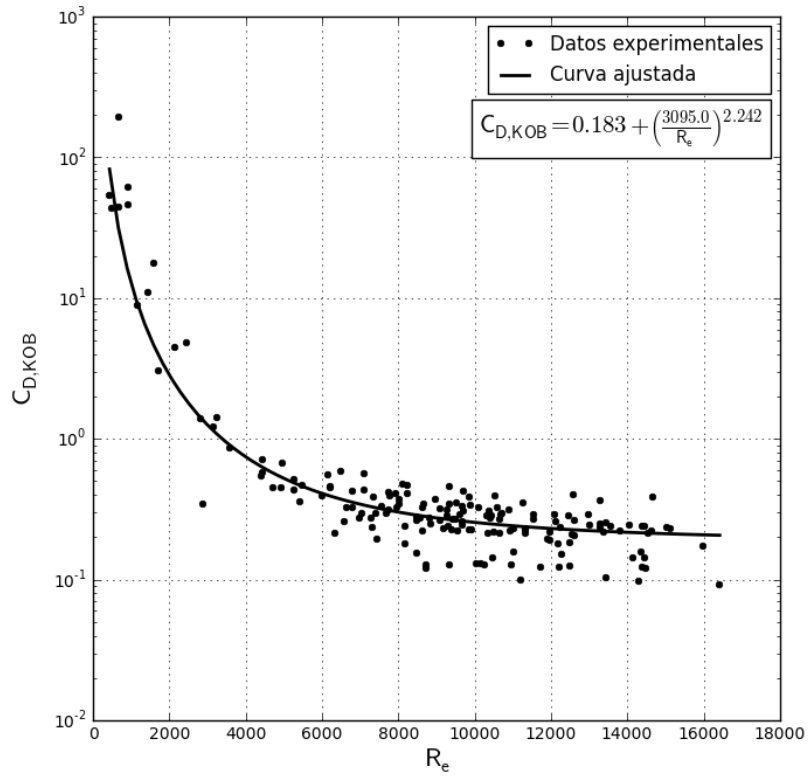


Figura 4. 14 Coeficiente de arrastre de Kobayashi et al. (1993), Ecuación 4.5, en función del número de  $R_e$ .

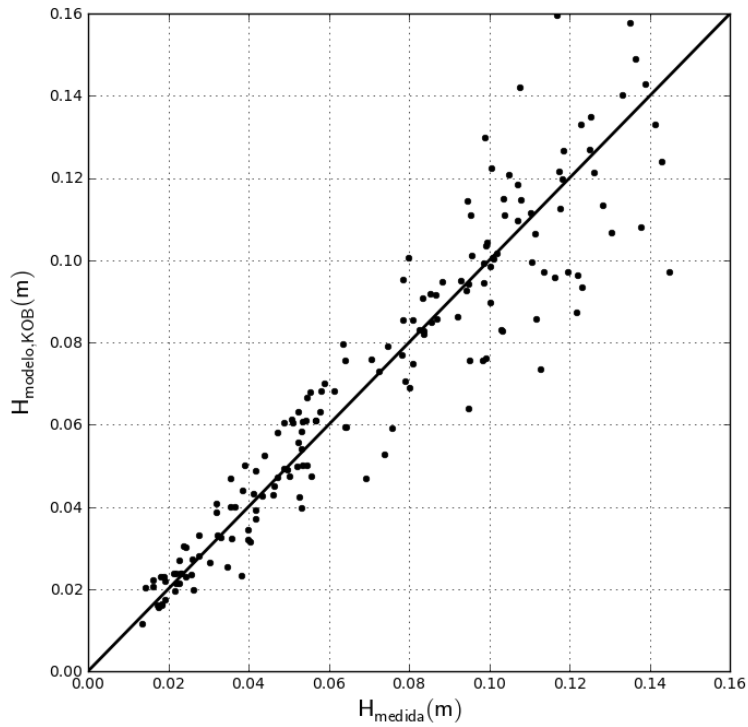


Figura 4. 15 Evaluación de la Ecuación 4.7 comparando la altura de ola medida contra la altura de ola obtenida por la ecuación.

Retomando el modelo de Méndez y Losada (2004), la relación que existe entre el coeficiente de decaimiento,  $\beta$ , con el coeficiente de arrastre,  $C_D$ , está descrita en la Ecuación 4.8 deducida matemáticamente por Méndez y Losada (2004). Al igual que el parámetro  $k_i$  del modelo de Kobayashi et al. (1993), el coeficiente  $\beta$  depende de las características del oleaje, características físicas y geométricas de la vegetación.

$$\beta = \frac{4}{9\pi} C_D b_V N \frac{\sinh(kL_V) + 3 \sinh(kL_V)}{(\sinh 2kh + 2kh) \sinh kh} (kH_0) \quad (4.8)$$

Donde

- $\beta$  - coeficiente de decaimiento [ $m^{-1}$ ]
- $C_D$  - coeficiente de arrastre
- $b_V$  - área de planta por unidad de altura de cada planta normal a  $u$  [m]
- $N$  - número de plantas por unidad horizontal de área [ $m^2$ ]
- $k$  - número de onda [ $m^{-1}$ ]
- $L_V$  - alto de hoja de la planta [m]
- $h$  - profundidad [m]
- $H_0$  - altura de ola incidente [m]

De la misma manera en que se calculó el coeficiente  $C_{D,KOB}$  con la Ecuación 4.5, se utiliza la Ecuación 4.8 para determinar  $C_{D,MEN}$  pero ahora para el modelo de Méndez y Losada (2004) como lo indica su subíndice. Después se relacionó el coeficiente  $C_{D,MEN}$  con el número de Reynolds y se graficaron los resultados en la Figura 4.16. La Ecuación 4.9 fue el ajuste que resultó de la relación de  $C_{D,MEN}$  y  $R_e$  con un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0.9497$ .

En la Figura 4.17 se observa que la dispersión de los resultados de la Ecuación 4.9 se presenta para alturas de ola mayores y el mejor ajuste se presenta en las alturas de ola menores.

$$C_{D,MEN} = 0.326 + \left( \frac{3102.0}{R_e} \right)^{2.421} \quad (4.9)$$

Donde

- $\alpha, \beta, \gamma$  - coeficientes de ajuste
- $R_e$  - número de Reynolds

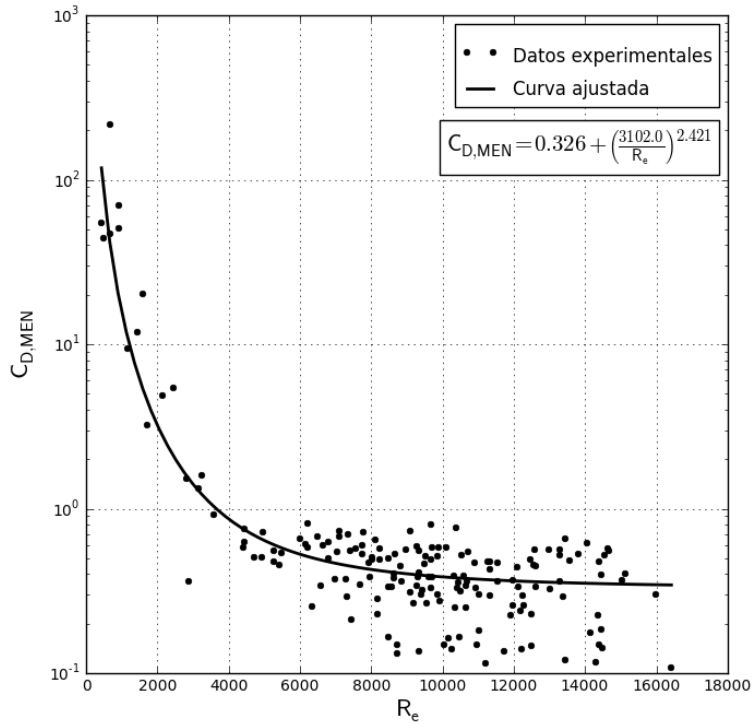


Figura 4. 16 Coeficiente de arrastre de Méndez y Losada (2004), Ecuación 4.9, en función del número de  $R_e$ .

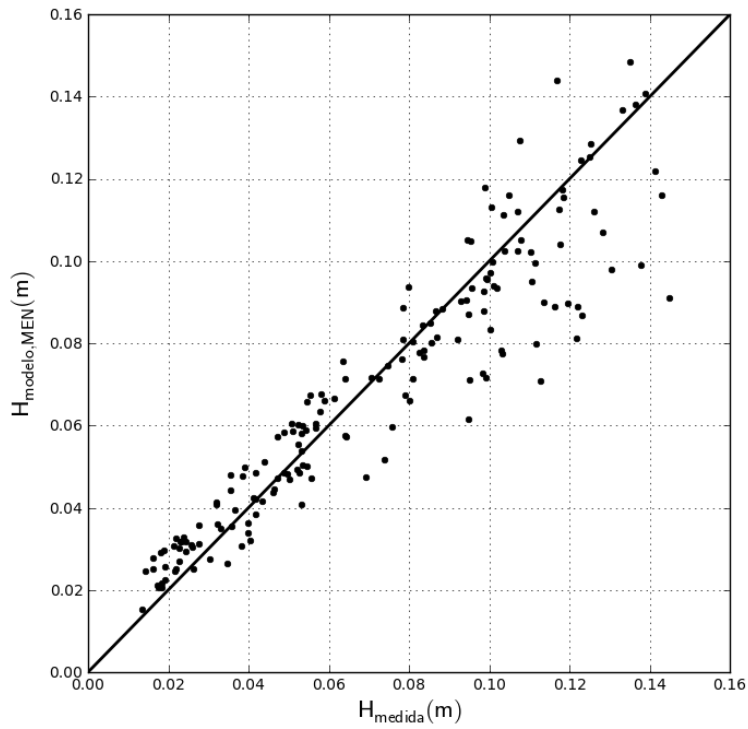


Figura 4. 17 Evaluación de la Ecuación 4.9 comparando la altura de ola medida contra la altura de ola obtenida por la ecuación.

Por último, la comparación de los resultados de las Ecuaciones 4.7 y 4.9 con las ecuaciones que se encontraron en la literatura, resumidas en la Tabla 2.3, se graficaron en la Figura 4.18. Cabe recordar que las ecuaciones mostradas en la Figura 4.18 de los diferentes autores fueron deducidas para diferentes especies de pasto marino (*Halodule*, *Posidonia Oceanica*, *Spartina alterniflora*) que tienen propiedades físicas y geométricas diferentes a la especie *Thalassia testudinum*. La ecuación de Bradley y Houser (2009) también estudió la especie *Thalassia testudinum* pero en condiciones naturales. Los resultados de este trabajo muestran que el coeficiente de arrastre es mayor que los presentados por Bradley y Houser (2009). Uno de los motivos de esta diferencia puede estar en el tipo de oleaje estudiado: regular para este trabajo e irregular para el trabajo de Bradley y Houser (2009).

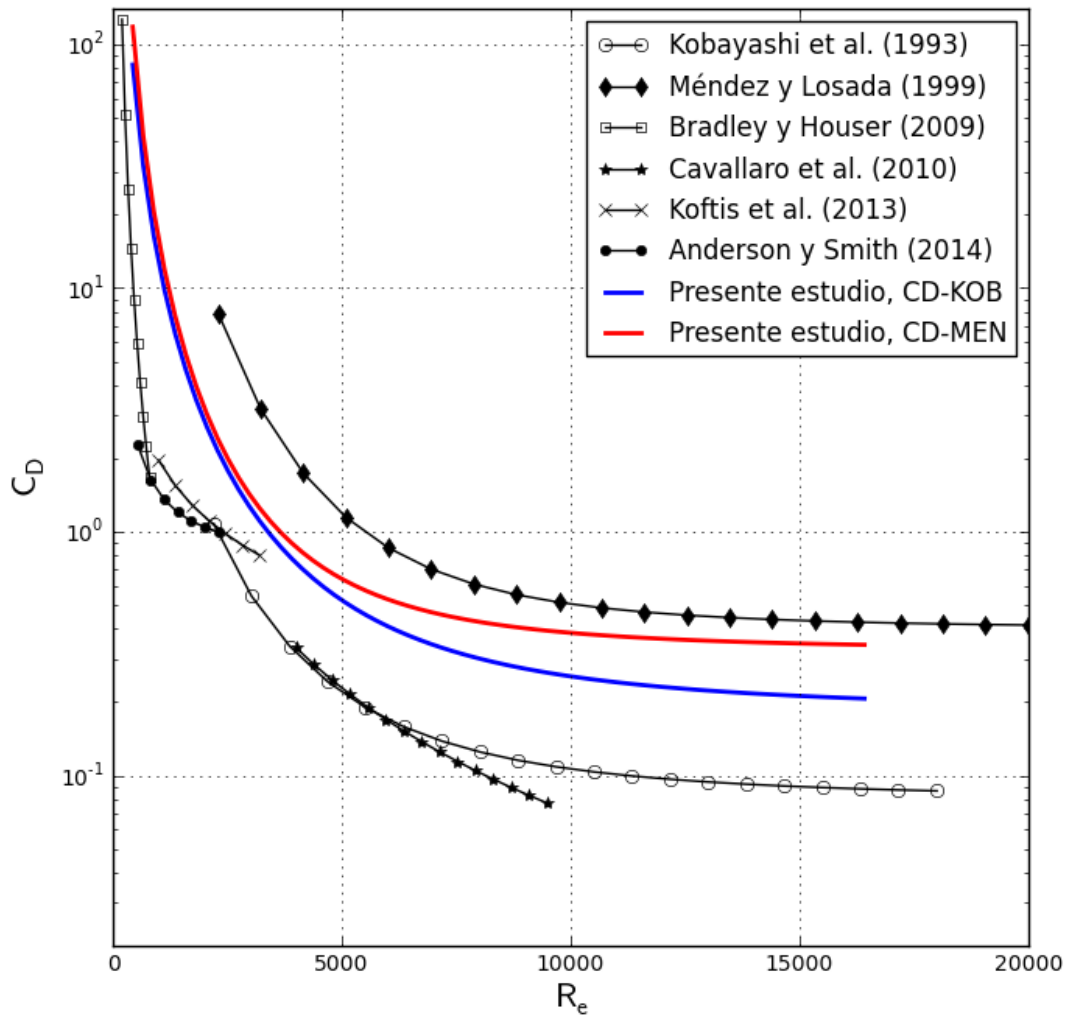


Figura 4. 18 Comparación gráfica de las Ecuaciones 4.7 y 4.9 con las ecuaciones encontradas de la literatura.

#### 4. 8 Análisis de velocidades medidas con los sensores UVP

La velocidad del flujo en la pradera de pasto marino es reducida debido a los efectos de fricción que causan las hojas del pasto marino (Fonseca y Fisher, 1986) y dependerá de la especie de pasto

marino la variación que haya de esta velocidad dentro y fuera de la pradera (Ackerman, 1986; Gambi et al., 1990). Esta alteración en la velocidad del flujo se observó en las mediciones realizadas por los sensores UVP ubicados por encima de la pradera de pasto marino. En la Figura 4.19 se muestra un ejemplo de los ciclos de velocidades medidos en el sensor 2 en  $x = 1m$  (ver Figura 3.6) con condiciones  $h = 0.60m$ ,  $T = 2.5s$  y  $H = 0.1808m$ . Las mediciones están realizadas en dos profundidades diferentes: por encima de los pastos ( $z = -h + L_V$ ) y dentro de la pradera de pasto ( $z < -h + L_V$ ). Además, se hace una comparación de las mediciones realizadas en ambas profundidades, haciendo el promedio de los ciclos medidos, con el ciclo de velocidades teórico calculado con la Ecuación 2.8. De las dos mediciones realizadas en diferentes profundidades, se observa que la medición dentro de la pradera, en  $z < -h + L_V$ , el ciclo de velocidades se perturba por la presencia de las hojas del pasto marino. El ciclo de velocidades medido en  $z = -h + L_V$  aparentemente no sufre alguna alteración pero se acelera comparándolo con el resto de los sensores, este comportamiento se describe a continuación.

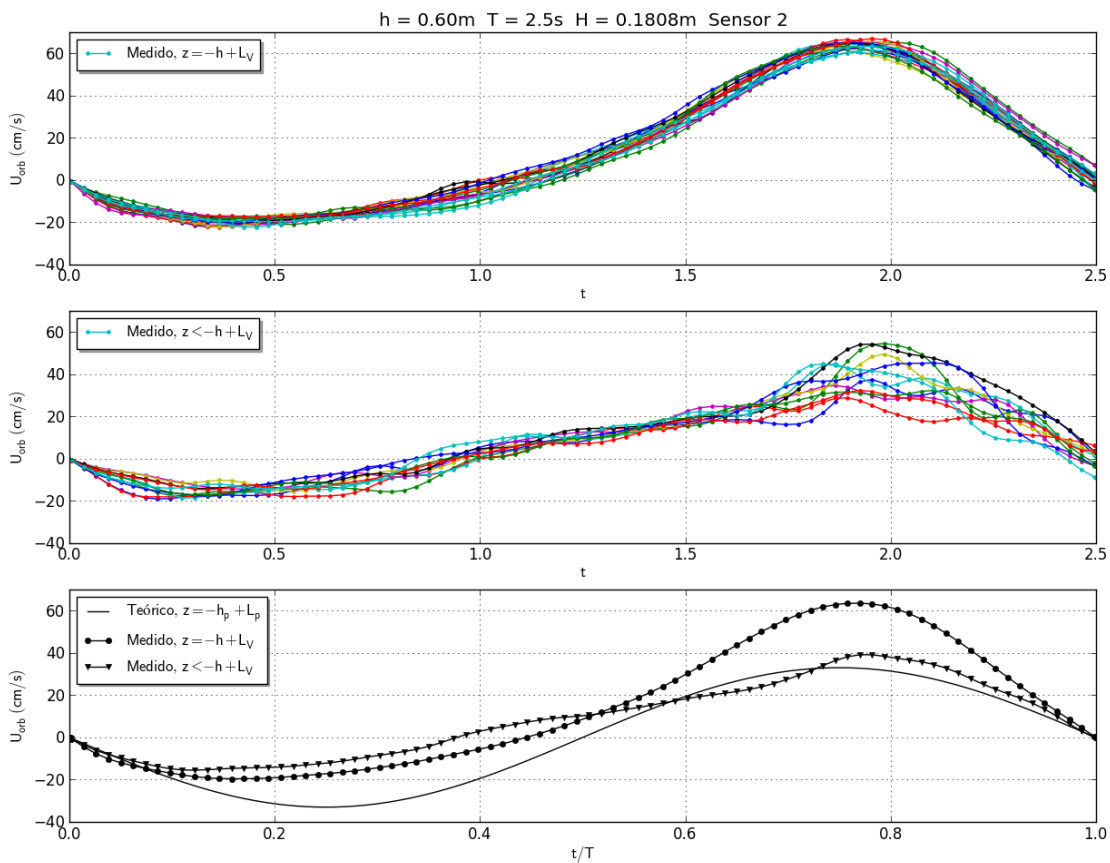


Figura 4. 19 Alteración del ciclo de velocidades en el sensor 2 para la prueba con  $T = 2.5s$  y  $H_0 = 0.1808m$ . Se presentan las mediciones de dos profundidades: una por encima de los pastos y otra por debajo de la altura de los pastos. El promedio de la velocidad en ambas profundidades se compara con la velocidad orbital teórica de la Ecuación 2.8.

La evolución del ciclo de velocidades medida en la longitud de los pastos marinos se presenta en la Figura 4.20. En total se ocuparon 6 sensores ubicados antes, en y después de la pradera submarina como se describe en la Figura 3.6. Al igual que la Figura 4.19, se presentan dos mediciones realizadas a distintas profundidades por cada sensor: el promedio de los ciclos en  $z = -h + L_V$  y

en  $z < -h + L_V$ . Los ciclos de velocidades medidos fueron comparados con la máxima velocidad teórica calculada con la Ecuación 2.8.

La evolución de las velocidades medidas en  $z = -h + L_V$  muestra que los ciclos permanecen sin perturbaciones. Al comparar los sensores que se encuentran antes y después de los pastos (sensores 1 y 2) se observa que los ciclos de velocidades en los sensores 2 al 5 presentan velocidades mayores que en los sensores 1 y 2. Para este caso, en el sensor 2 se presentó el mayor aumento en la velocidad orbital comparado con la máxima velocidad orbital teórica ( $U_{orb}/U_{maxt} \approx 2.0$ ). Si se comparan los sensores 1 y 6, se aprecia que el ciclo de velocidades de entrada ( $U_{orb}/U_{maxt} \approx 1.4$ ) se amortigua y pierde velocidad después de los pastos marinos ( $U_{orb}/U_{maxt} \approx 0.8$ ).

Por otra parte, la evolución de las velocidades medidas en  $z < -h + L_V$  muestra los ciclos con perturbaciones en los sensores 2 al 5. La perturbación se genera dentro de la longitud de los pastos marinos al comparar el sensor 1 que se encuentra antes de los pastos y el sensor 2 que está dentro de la longitud de los pastos. Pero al salir el flujo de la longitud de los pastos, el ciclo de velocidades pierde la perturbación y se estabiliza como se puede observar al comparar los sensores 5 y 6. De la gráfica del sensor 3, se observa que la menor velocidad orbital registrada en la profundidad  $z < -h + L_V$  se encuentra aproximadamente a la mitad de la longitud total del pasto marino ( $U_{orb}/U_{maxt} \approx 0.3$ ).

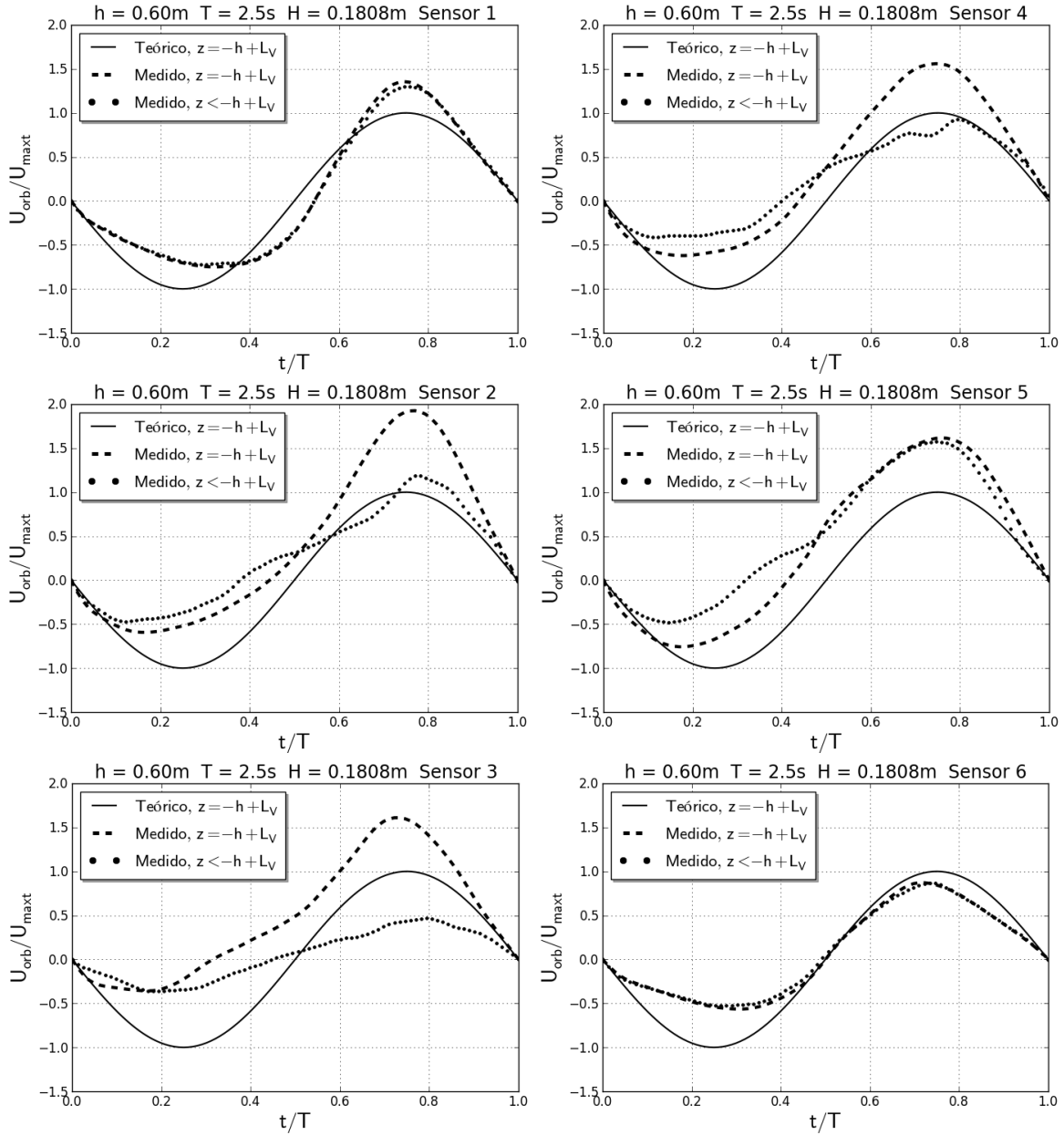


Figura 4. 20 Evolución del ciclo de velocidades antes, durante y después de la longitud de los pastos con  $h = 0.60m$ ,  $T = 2.5s$  y  $H_0 = 0.1808m$ .

En la Figura 4.21 se realizó una comparación de las velocidades medidas en  $z = -h + L_V$  con respecto a las velocidades medidas en  $z < -h + L_V$  para las pruebas con  $h = 0.60m$ . En la Figura 4.21 se encuentran 6 gráficas correspondientes al número de sensores UVP utilizados en las pruebas ubicados de acuerdo a la Figura 3.6, donde  $x = 0 m$  es el inicio de los pastos marinos. De la Figura 4.21, un coeficiente mayor a uno indica que la medición en  $z = -h + L_V$  fue mayor a la medición en  $z < -h + L_V$  o lo contrario si el coeficiente es menor a uno. Si el valor del coeficiente es cercano a uno indica que la diferencia entre las velocidades medidas en cada profundidad es menor, pero si el coeficiente se aleja de uno indica una diferencia mayor.

Teniendo en cuenta lo escrito en el párrafo anterior se observa que las mayores diferencias entre las mediciones se encuentran en los sensores del 2 al 5 que corresponden a los sensores colocados por encima del parche de pasto marino. Además, estas diferencias aumentan con respecto al periodo teniendo su mayor diferencia cuando el periodo es  $T = 1.9s$ . De la misma figura, se puede observar que los sensores que se encuentran a la entrada, sensor 1, y a la salida, sensor 6, son los que presentan un coeficiente cercano a uno, es decir, la diferencia entre las velocidades de cada profundidad es menor.

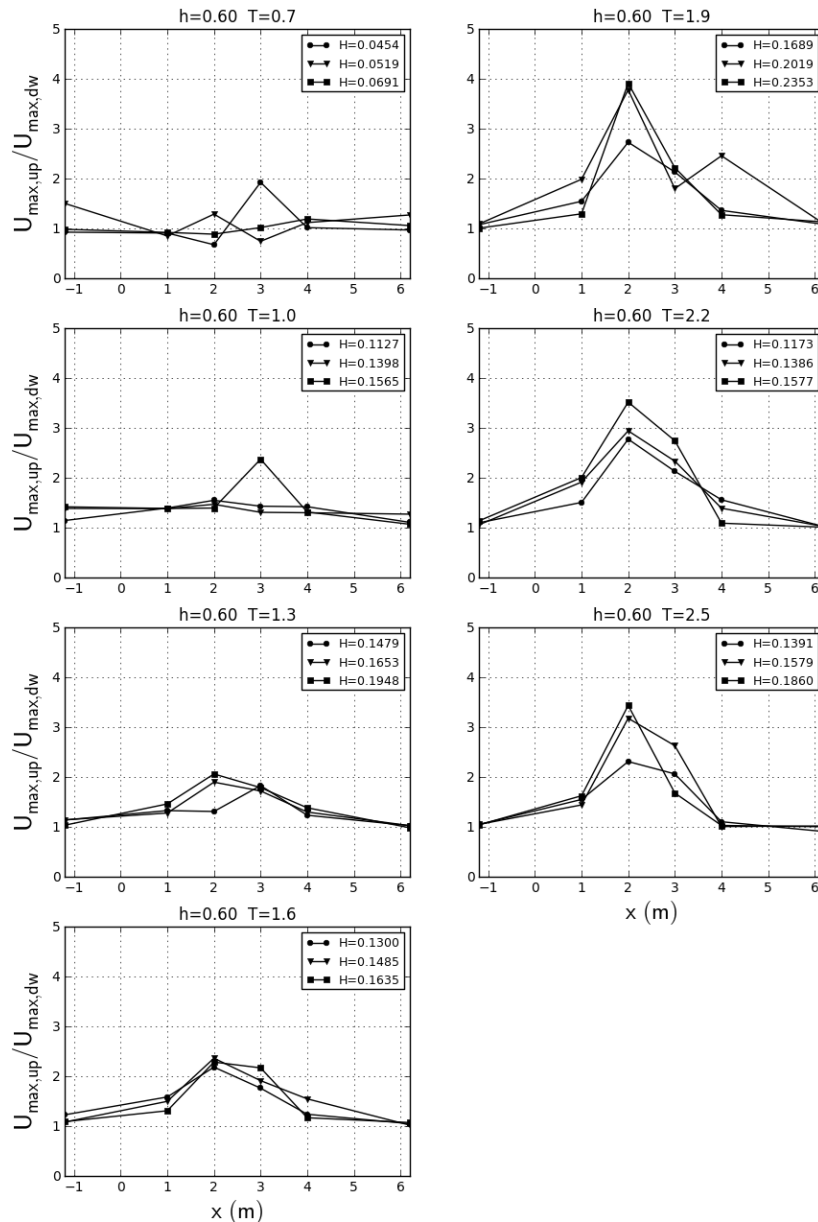


Figura 4. 21 Comparación del ciclo de velocidades en  $z = -h + L_V$  con respecto al ciclo de velocidades en  $z < -h + L_V$ . Mediciones realizadas en una profundidad de  $h = 0.60m$ .



## 5. Conclusiones

El principal objetivo de este estudio fue cuantificar el efecto de una tipología de pasto marino sobre el oleaje. La evaluación se realizó determinando la transmisión, reflexión y el perfil de velocidades del oleaje. El pasto marino modelado fue la *Thalassia testudinum*, especie representativa de las costas del Atlántico mexicano. Los efectos en el oleaje fueron estudiados antes (reflexión), durante (evolución de la altura del oleaje) y después (transmisión) del parche de pasto marino. Las modelaciones físicas se realizaron en el canal de oleaje del Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM utilizando una representación artificial, propuesta por Hoil (2012), de los pastos marinos *Thalassia testudinum* mediante el uso de cintas de polipropileno de 0.5 pulgadas de ancho. En el canal se realizaron un total de 168 pruebas con oleaje regular conformadas por ocho profundidades, siete periodos y tres alturas de ola sobre una longitud de pasto marino de 5 metros.

Para entender la hidrodinámica del oleaje con la presencia de pastos marinos en el fondo marino se realizó lo siguiente: primero, se identificó las variables del oleaje (profundidad, periodo y altura del oleaje) de cuales depende la interacción entre estos dos elementos y segundo, limitó las condiciones en las cuales los pastos marinos trabajan de forma óptima, es decir, en qué condiciones de oleaje se presenta la mayor disipación del oleaje.

De las observaciones gráficas y numéricas de los resultados se encontró que la variable que gobierna la interacción es la profundidad; seguida del periodo y en menor medida de la altura del oleaje incidente.

El coeficiente de reflexión de los pastos marinos *Thalassia testudinum* es muy homogéneo respecto a la profundidad teniendo un promedio de  $\overline{K_r} = 0.0747$ , con un rango de coeficientes de  $K_r = 0.014$  hasta  $K_r = 0.21$ . Los resultados del coeficiente de transmisión mostraron una tendencia clara al variar la profundidad, donde a menor profundidad menor es el coeficiente de transmisión. El ajuste que resultó de los resultados para el coeficiente de transmisión está presentado en la Ecuación 4.1. Pero en 6 pruebas se calculó un coeficiente de transmisión mayor a uno que indica un aumento en la altura del oleaje por efecto del pasto marino en los casos en donde  $T = 0.7 s$ ,  $h \geq 0.40 m$  y  $0.050 m \leq H_i \leq 0.057 m$ .

Los modelos de Kobayashi et al. (1993) y Méndez y Losada (2004) se utilizaron para describir la evolución de la altura del oleaje en la longitud de los pastos marinos; sin embargo, no pudieron ser ajustados a todos los resultados de las pruebas realizadas. Esto se debe a que, en algunas pruebas, se observó un aumento en la altura de la ola registrada en alguno de los 5 sensores ubicados a lo largo de los pastos marinos. Este fenómeno fue acotado en un mapa, Figura 4.13, donde se varió, principalmente, el periodo y la profundidad identificando dos zonas: una zona de peraltamiento del oleaje ( $K_V > 1$ ) y otra sin peraltamiento ( $K_V < 1$ ). La zona de peraltamiento aumenta al incrementar la profundidad y se presenta principalmente para periodos  $T \leq 1.0 s$  y  $T \geq 1.9 s$ . El peraltamiento del oleaje se detectó principalmente en el primer sensor que se colocó por encima de los pastos, es decir, al inicio de los pastos; coincidiendo con las observaciones de campo de Bradley y Houser (2009).

Las ecuaciones del coeficiente de arrastre obtenidas de forma experimental, Ecuación 4.7 y 4.9, quedaron bien ajustadas en función del número de Reynolds y la dispersión de los resultados aumenta proporcional a la altura de ola. La comparación de las ecuaciones obtenidas con las ecuaciones de la literatura muestra un comportamiento similar y dentro de los rangos del coeficiente de arrastre. Las observaciones de campo de Bradley y Houser (2009), para la misma especie de pasto marino, muestran un coeficiente de arrastre menor a los de este estudio y esto se debe por la diferencia que ocasiona al modelar oleaje regular.

La velocidad del flujo disminuye drásticamente, pero aumenta la perturbación en el flujo, a una profundidad por debajo de la altura de los pastos marinos debido a los efectos de fricción que causan las hojas. A una profundidad por encima de la altura de los pastos, la velocidad del flujo va aumentando hasta a alcanzar una máxima velocidad a una distancia de 2 metros después del inicio de la longitud de los pastos. Esto se debe a la disminución de la profundidad efectiva que provoca la presencia del parche de pastos marinos.

En virtud de lo observado y de los análisis que se llevaron a cabo, los pastos tienden a disipar mayor energía del oleaje cuando la profundidad es igual a la altura de las hojas, y se presenta un incremento de la energía potencial –al inicio de la longitud de los pastos– en diferentes condiciones: al aumentar la profundidad, en periodos  $T \leq 1.0 s$  y  $T \geq 1.9 s$ ; por ello, el uso de pastos como elemento de protección de la costa es recomendable cuando la profundidad es mínima, pero considerando que debe haber una longitud mínima de pasto. El diseño de la pradera depende del ancho y la altura de la hoja, la densidad de plantas, la profundidad y la longitud del parche de pasto marino.

Para finalizar, al proponer la utilización de pastos marinos como medio de protección costera no pretende ser una solución única y general, la combinación de soluciones estructurales (arrecifes artificiales, diques sumergidos, bolsas de geotextil, buques hundidos) y no estructurales (restauración de dunas costeras, restauración de vegetación terrestre y marina) ayudará a proteger de una manera más adecuada la línea de costa.

## 6. Referencias

- Ackerman, J. (1986). Mechanistic implications for pollination in the marine angiosperm *Zostera marina*. *Aquatic Botany*, Vol. 24(4): pp. 343-353.
- Anderson, M. y Smith, J. (2014). Wave attenuation by flexible, idealized salt marsh vegetation. *Coastal Engineering*, Vol. 83: pp. 82-92.
- Blackmar, P.J., Cox, D.T. y Wu, W.C. (2014). Laboratory observations and numerical simulations of wave height attenuation in heterogeneous vegetation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 140: pp. 56-65.
- Bradley, K. y Houser, C. (2009). Relative velocity of seagrass blades: Implications for wave attenuation in low-energy environments. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, F01004.
- Cavallaro, L., Lo R., C., Paratore, G., Viviano, A. y Foti, E. (2010). Response of *Posidonia oceanica* plants to wave motion in shallow-waters - preliminary experimental results. *Coastal Engineering* 2010.
- Dalrymple, R.A., Kirby, J.T. y Hwang, P.A. (1984). Wave diffraction due to areas of energy dissipation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 110: pp. 67-79.
- Davidson-Arnott, R. (2009). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Cambridge University Press, New York, USA.
- Fonseca, M.S. y Fisher, J.S. (1986). A comparison of canopy friction and sediment movement between four species of seagrass with reference to their ecology and restoration. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 29: pp. 15-22.
- Gambi, M., Nowell, A. y Jumars, P. (1990). Flume observations on flow dynamics in *Zostera marina* (eelgrass) beds. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 61: pp. 159-169.
- García, E. y Duarte, C. (2001). Sediment retention by Mediterranean *Posidonia oceanica* meadow: the balance between deposition and resuspension. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 52(4): pp. 505-514.
- Goda, Y. y Suzuki, Y. (1976) Estimation of incident and reflected waves in random wave experiment. *Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, Hawaii*, pp. 628-650.
- Grady, J. (1981). Properties of seagrass and sand flat sediments from the intertidal zone of St. Andrew Bay, Florida. *Estuaries*, Vol. 4(4): pp. 335-344.
- Green, E.P. y Short, F.T. (2003). *World Atlas of Seagrasses*. UNEP World Conservation Monitoring Centre. University of California Press, Berkeley, USA.

Heiss, W., Smith, A. y Keith, P. (2000). Influence of the small intertidal seagrass *Zostera novazelandica* on linear water flow and sediment texture. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, Vol. 34(4): pp. 689-694.

Hoil, J. (2012). *Efectos de los pastos marinos en la estabilidad de playas*. Tesis de maestría, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México.

Jadhav, R.S. y Chen, Q. (2013). Probability distribution of wave heights attenuated by salt marsh vegetation during tropical cyclone. *Coastal Engineering*, Vol. 82: pp. 47-55.

Kobayashi, N., Raichle, A.W. y Asano, T. (1993). Wave attenuation by vegetation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 119: pp. 30-48.

Koftis, T., Prinos, P. y Stratigaki, V. (2013). Wave damping over artificial *Posidonia oceanica* meadow: A large-scale experiment study. *Coastal Engineering*, Vol. 73: pp. 71-83.

Lima, S.F., Neves, C.F. y Luzzi R., N.M. (2006). Damping of gravity waves by fields of flexible vegetation. *Coastal Engineering*, 2006.

López, F. y García, M. (1998). Open-channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport modelling. *Water Resources Research*, Vol. 34(9): pp. 2341-2352.

Ma, G., Kirby, J.T., Su, S.F., Figlus, J. y Shi, F. (2013). Numerical study of turbulence and wave damping induced by vegetation canopies. *Coastal Engineering*, Vol. 80: pp. 68-78.

Manca, E., Cáceres, I., Alsina, J.M., Stratigaki, V., Townend, I., Amos, C.L. (2012). Wave energy and wave-induced flow reduction by full-scale model *Posidonia oceanica* seagrass. *Continental Shelf Research*, Vol. 50-51: pp. 100-116.

Mansard, E.P.D. y Funke, E.R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least square method. *Proceedings 17th Coastal Engineering Conference, Sydney, Australia*, Vol. 1: pp. 154-172.

McCowan, J. (1894). On the highest wave of permanent type. *Philosophical Magazine*, Vol. 38: pp. 351-358.

Méndez, F.J. y Losada, I.J. (1999). Hydrodynamics induced by wind waves in a vegetation field. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104: pp. 18383-18396.

Méndez, F.J. y Losada, I.J. (2004). An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal Engineering*, Vol. 51: pp. 103-118.

Ondiviela, B., Losada, I.J., Lara, L.J., Maza, M., Galván, C., Bouma, T.J. y van Belzen, J. (2014). The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate. *Coastal Engineering*, Vol. 87: pp. 158-168.

Ozeren, Y. y Wren, D.G. (2010). Laboratory measurements of wave attenuation through model and live vegetation. *Coastal Hazards*, Enero: pp. 45-56.

Pedrozo, A. (2011). *Procesos costeros y morfodinámica de playas*. Apuntes de clase, México DF, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Pujol, D. y Nepf, H. (2012). Breaker-generated turbulence in and above a seagrass meadow. *Continental Shelf Research*, Vol. 49: pp. 1-9.

Romeu, E. (1996). Pastos marinos, una cuna para la biodiversidad. CONABIO. *Biodiversitas* Vol. 5: pp. 10-14.

Sánchez-González, J.F., Sánchez-Rojas, V. y Memos, C.D. (2011). Wave attenuation due to *Posidonia oceanica* meadows. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49: pp. 503-514.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM-022-SEMARNAT-2003. Diario Oficial de la Federación, México, 10 de abril de 2003.

SEMARNAT, INEGI, CONABIO, CONANP, INE y CONAGUA (2008). *Documento Estratégico Rector del Inventario Nacional de Humedales*. Semarnat, México, D.F. 57 pp.

Silva, R. y Mendoza, E. (2012a). Anexo 1. En Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería, UNAM. *Manual de Diseño de Obras Civiles: A.2.13. Hidráulica Marítima*. México. pp. A.13.13-1 - A.13.13-74.

Silva, R. y Mendoza, E. (2012b). Anexo 7. En Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería, UNAM. *Manual de Diseño de Obras Civiles: A.2.13. Hidráulica Marítima*. México. pp. A.13.9-1 - A.13.9-56.

Silva, R. y Mendoza, E. (2012c). Morfodinámica de playas. En Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería, UNAM. *Manual de Diseño de Obras Civiles: A.2.13. Hidráulica Marítima*. México. pp. A.13.8-1 - A.13.8-76.

Silva, R. y Mendoza, E. (2012d). Proyectos de protección de playas. En Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería, UNAM. *Manual de Diseño de Obras Civiles: A.2.13. Hidráulica Marítima*. México. pp. A.13.10-1 - A.13.10-44.

Stratigaki, V., Manca, E., Prinos, P., Losada, I.J., Lara, J.L., Sclavo, M., Amos, C.L., Cáceres, I. y Sánchez-Arcilla, A. (2011). Large-scale experiments on wave propagation over *Posidonia oceanica*. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49: pp. 31-43.

Tang, J., Shen, S. y Wang, H. (2015). Numerical model coastal wave propagation through mild slope zone. *Coastal Engineering*, Vol. 97: pp. 53-59.

Ursell, F. (1953). The long-wave paradox in the theory of gravity waves. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 49: pp. 685-694.

van Tussenbroek, B. (1995). *Thalassia testudinum* leaf dynamics in a Mexican Caribbean coral reef lagoon. *Marine Biology*, Vol. 122(1): pp. 33-40.

Ysebaert, T., Yang, S., Zhang, L., He, Q., Bouma, T.J. y Herman, P.M.J. (2011). Wave attenuation by two contrasting ecosystem engineering salt marsh macrophytes in the intertidal pioneer zone. *Eco-Healthy Estuarine Wetlands*, Vol. 31: pp. 1043-1054.