



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

ANÁLISIS MORFODINÁMICO DE DUNA Y PERFIL DE PLAYA EN
PRESENCIA DE VEGETACIÓN

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

PRESENTA:
ITXASO ODÉRIZ MARTÍNEZ

TUTORES PRINCIPALES

RODOLFO, SILVA, CASARÍN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

EDGAR G., MENDOZA, BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO D. F. SEPTIEMBRE 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

RESUMEN

Las dunas son la defensa natural ante inundaciones procedentes del mar debidas a eventos climatológicos extremos. Son sistemas cuyas características están determinadas por diferentes factores, uno de los cuales es la vegetación. Su efecto se ha estudiado en la estabilización y formación de dunas, pero la influencia que tiene en la erosión por tormentas es hasta la fecha poco conocido. El propósito de este trabajo es aportar datos para un mayor entendimiento de la respuesta morfodinámica del perfil playa-duna bajo condiciones de tormentas y el papel que las plantas tienen en dicha respuesta.

El trabajo consistió en la caracterización (topografía, análisis de sedimentos y análisis del clima marítimo) del sistema dunar Farallón-La Mancha, Veracruz, con el que se explicó la formación y erosión de las dunas.

La parte más importante de la presente tesis fue la realización de un modelo físico en el canal de oleaje del II-UNAM. El programa de ensayos consistió en 24 experimentos, resultado de la combinación de dos perfiles iniciales, tres trenes de ondas y cuatro coberturas vegetales para las que se utilizó plantas de la clase *Ipomoea pes-capre*. Por último se calibró y validó el modelo numérico XBeach para los ensayos de laboratorio.

Las conclusiones principales sobre el papel de la vegetación fueron entre otras que reduce la erosión en la cara expuesta de la duna en modos de *swash* con números de Iribarren pequeños y en colapso para números de Iribarren grandes. Además la vegetación no cambia la respuesta morfológica del perfil pero sí aumenta el tiempo de resistencia de la duna.

<u>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</u>	<u>5</u>
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	5
1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	6
<u>CAPÍTULO 2. OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y METODOLOGÍA</u>	<u>7</u>
2.1 OBJETIVOS.....	7
2.2 HIPÓTESIS	8
2.3 METODOLOGÍA.....	9
<u>CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE</u>	<u>11</u>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	11
3.2 OSCILACIONES DE LA SUPERFICIE DEL MAR	11
3.2.1 ONDAS GRAVITATORIAS	11
3.2.2 ONDAS INFRAGRAVITATORIAS ASOCIADAS AL OLEAJE.....	13
3.2.3 MAREA ASTRONÓMICA	13
3.2.4 MAREA METEOROLÓGICA.....	14
3.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	14
3.4 SISTEMA PLAYA-DUNA Y SU INTERACCIÓN CON EL OLEAJE	15
3.5 MORFOLOGÍA DE LAS DUNAS.....	19
3.6 INFLUENCIA DE LA VEGETACIÓN EN LA MORFOLOGÍA DUNAR.....	20
3.7 ANTECEDENTES DE MODELOS FÍSICOS	21
3.8 MODELO NUMÉRICO	22
<u>CAPÍTULO 4. ZONA DE ESTUDIO</u>	<u>24</u>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	24
4.2 ANÁLISIS DEL CLIMA MARÍTIMO	25
4.2.1 INTRODUCCIÓN	25
4.2.2 DATOS UTILIZADOS.....	25
4.2.3 ANÁLISIS DE OLEAJE.....	26
4.2.4 ANÁLISIS DE TORMENTA.....	30
4.2.5 ANÁLISIS DE VIENTO	32
4.2.6 ANÁLISIS EXTREMAL	34
4.2.7 VARIABILIDAD DEL NIVEL DEL MAR	35
4.3 ANÁLISIS MECÁNICO DE ÁRIDOS	36
4.3.1 INTRODUCCIÓN	36
4.3.2 PARÁMETROS MECÁNICOS DEL SEDIMENTO	37
4.3.3 RESULTADOS.....	38
4.4 MORFOLOGÍA DUNAR.....	42
4.5 CONCLUSIONES	44
<u>CAPÍTULO 5. MODELO FÍSICO</u>	<u>45</u>

5.1	INTRODUCCIÓN	45
5.2	DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO Y PROGRAMA DE PRUEBAS	45
5.3	RESULTADOS	49
5.3.1	PERFILES INICIALES	49
5.3.2	ANÁLISIS HIDRODINÁMICO EN PRESENCIA DE VEGETACIÓN	52
5.3.3	ANÁLISIS MORFOLÓGICO EN PRESENCIA DE VEGETACIÓN.....	58
5.4	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	66
5.4.1	CONCLUSIONES	67
5.4.2	RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ENSAYOS	67
5.4.3	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	68
 CAPÍTULO 6. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LAS PRUEBAS FÍSICAS		69
6.1	INTRODUCCIÓN	69
6.2	DESCRIPCIÓN NUMÉRICA DEL MODELO	69
6.2.1	ONDAS CORTAS	70
6.2.2	ONDA LARGA	71
6.2.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTO	72
6.2.4	CAMBIO DEL FONDO.....	73
6.3	SENSIBILIDAD DEL MODELO	74
6.4	CALIBRACIÓN	76
6.4.1	PERFIL AT1N.....	77
6.4.2	PERFIL BT1N	78
6.5	VALIDACIÓN	80
6.5.1	CASOS AT2N Y AT3N	80
6.5.2	CASOS BT2N Y BT3N	81
6.6	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	82
 CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES		83
7.1	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	84
 BIBLIOGRAFÍA		86
 ANEXO 1		92
 ANEXO 2		106

Capítulo 1. Introducción

Los sistemas dunares son muy importantes no sólo por su valor paisajístico y como hábitat de organismos (valores intrínsecos), sino también por los bienes y servicios que prestan a la sociedad. De todos ellos cabe destacar la defensa natural, ante inundaciones por eventos extremos procedentes del mar como tormentas, huracanes y maremotos, sobre los intereses humanos, (Kobayashi, et al., 2009). Es por ello que el entendimiento de las respuestas de estos sistemas ante distintas condiciones hidrodinámicas es necesario para poder planificar un buen manejo de los mismos.

1.1 Introducción general

La interfaz por la que interactúan el ambiente marino y el terrestre es el sistema playa-duna. Esta franja de transición tiene muchas funciones como son: su capacidad de almacenar y depurar aguas contaminadas; servir de almacén de arenas para la regeneración natural de playas y bajos arenosos productivos (estos últimos en profundidades intermedias son cruciales para la disipación de energía del oleaje); por no olvidar su función de defensa frente a episodios extremos de invasión del agua de mar sobre intereses humanos, debido a huracanes, tormentas y maremotos.

El 84% de los países del planeta tienen costa (Martínez, 2010) de manera que son muchos los daños materiales y pérdidas de vidas humanas que tormentas y huracanes han producido en las civilizaciones cercanas al litoral en todo el mundo. Como ejemplos de estas catástrofes se pueden citar: después del impacto del huracán Ike en Texas, se demostró que en zonas con presencia de dunas la invasión por agua fue menor que en donde no las había (Doran, et al., 2009). Por otro lado, el tsunami que azotó las costas del sureste asiático en diciembre de 2004 alcanzó cotas más dramáticas donde no había presencia de dunas (Danielsen, et al., 2005). En México, la amenaza de las costas por huracanes se presenta anualmente. De datos obtenidos de la NOAA, en el periodo comprendido entre 1851 y 2012 a las costas mexicanas se han acercado 604 al litoral del Atlántico y 766 al del Pacífico. Aunado a esto, la presión humana (ocupación urbanística, protección y regeneración artificial rígida de playas) ha incrementado la vulnerabilidad de los ecosistemas costeros frente a perturbaciones naturales (García, et al., 2001) y (Martínez, et al., 2006). En la República Mexicana hay estudios que demuestran que en los sistemas costeros donde la duna fue eliminada a causa de construcciones hoteleras, los daños de infraestructuras tuvieron altos costes económicos, (Semarnat, 2013). Ejemplo de ello es Cancún en donde el desarrollo turístico se construyó eliminando la duna y que tuvo su primer gran evento meteorológico extremo en 1988, el huracán Gilberto. Desde entonces, la playa de Cancún tiene una baja resiliencia con poca o nula capacidad de auto-regeneración (Diez, et al., 2009).

Aunque se sabe del papel relevante de las dunas como protección ante eventos extremos y ante el aumento del nivel del mar, no se ha llegado a una comprensión completa de su proceso de formación y evolución morfológica. Esto se debe a que son sistemas altamente complejos, cuyas características están determinadas por diferentes factores en distintas escalas de tiempo y espacio como son: viento, tipo de sedimento, humedad, agentes marinos y el tipo de vegetación.

El efecto de la vegetación se ha estudiado con un enfoque en la estabilización y formación de dunas (Hesp, et al., 2011), pero el efecto que tiene en la erosión por tormentas es aún poco conocido como indican (Kobayashi, et al., 2013).

1.2 Estructura del documento

En el capítulo 2 se enumeran los objetivos del trabajo, las hipótesis iniciales y se explica el procedimiento que se va a seguir para conseguir los objetivos mencionados anteriormente.

A continuación, en el capítulo 3, se realiza un resumen de las ondas que interactúan con el sistema playa-duna, transporte de sedimentos, formación dunas y evolución del perfil de playa, una síntesis de los modelos físicos realizados hasta la fecha y una presentación de la herramienta numérica que se va a utilizar.

En el capítulo 4 se describe la zona de estudio, así como un análisis climatológico y sedimentológico del sitio.

Posteriormente en el capítulo 5 se describe el modelo físico, se presentan los resultados con su respectivo análisis.

En el capítulo 6 se presenta la calibración y validación del modelo numérico XBeach para los resultados obtenidos en laboratorio.

Por último en el capítulo 7 se exponen las conclusiones y futuras líneas de investigación.

Capítulo 2. Objetivos, hipótesis y metodología

Ya en la introducción se ha destacado la importancia de entender los sistemas dunares para realizar un manejo costero adecuado y así mantener la resiliencia de las costas y proteger los intereses humanos. En los últimos años han sido degradados muchos sistemas dunares principalmente debido a la incompatibilidad de las actividades humanas y los procesos costeros, lo cual denota un gran desconocimiento de su función en la estabilidad y protección que juegan en las costas. Dentro de estas motivaciones se contextualiza y desarrolla el presente trabajo.

El estudio se divide en tres núcleos: el estudio del sistema dunar Farallón-La Mancha, una campaña de ensayos en laboratorio y modelación numérica que consiste en la calibración y validación del modelo XBeach con los resultados de las pruebas experimentales.

El desarrollo del capítulo es el siguiente, primero se exponen los objetivos e hipótesis de partida del trabajo. Y por último se presenta la metodología seguida en cada una de ellas.

2.1 Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo último entender la respuesta morfodinámica de los perfiles de dunas ante eventos climatológicos de tormentas y su relación con el perfil de la playa, analizando la influencia que la vegetación tiene sobre ellos y dar una primera definición del papel que las plantas ejercen en la morfología de la duna ante un evento extremo.

La primera parte del trabajo consiste en el estudio del sistema dunar Farallón-La Mancha. Esta parte tiene objetivos muy acotados, pero necesarios para establecer una base de entendimiento que permita contextualizar las funciones de la vegetación. El objetivo principal es el siguiente:

- Explicar la interacción que se produce entre el factor ‘clase de sedimento’ y los agentes actuantes (viento, oleaje y mareas) en la acreción, estabilidad y erosión de la duna y plantear la necesidad del análisis del factor ‘vegetación’ y su relación con los factores actuantes.

Una vez explicado el sistema se da paso al estudio de la vegetación que, como el propio título del trabajo indica, el objetivo final es el análisis morfodinámico del perfil playa y duna bajo la presencia de vegetación. Para el desarrollo de esta parte se consideró necesario realizar una serie de ensayos, la cual consiste en 24 pruebas en las que se analizan dos perfiles de playa-duna distintos ante las actuaciones de 3 trenes de ondas bajo 4 coberturas distintas. Esta parte es el grueso de la investigación ya que es la que aportará información sobre el factor de la vegetación en la erosión de dunas por tormentas. Los objetivos principales que se pretende lograr son:

- Definir la respuesta morfológica de dos sistemas playa-duna distintos

- Analizar la relación existente entre perfil playa y la duna en una tormenta para vincular ambos sistemas, puesto que hasta la fecha se estudian como sistemas independientes.
- Analizar los diferentes modos de erosión de duna: *swash*, colapso y *overwash* con el fin interpretar la respuesta de los perfiles ante distintas condiciones hidrodinámicas.
- Analizar cualitativamente la influencia de la vegetación en la erosión dunar.
- Analizar cualitativamente la influencia de la vegetación en la respuesta hidrodinámica: rebase, nivel de agua en la zona de lavado, coeficientes de reflexión.
- Observar la influencia de dicha vegetación en la respuesta morfológica de dos perfiles de playa-duna en función de dicho factor.
- Distinguir la influencia de la vegetación para los distintos modos de erosión.

La última parte del trabajo consiste en la calibración y posterior validación del modelo numérico XBeach como herramienta para la simulación de respuestas morfológicas del perfil playa-duna ante tormentas, para lo que se plantean los siguientes objetivos:

- A partir de una serie de parámetros de calibración establecidos, determinar en qué rango el XBeach hace una buena representación de las pruebas de laboratorio para los dos perfiles ante las distintas condiciones hidrodinámicas.
- Evaluar si el XBeach es capaz de representar distintos modos de erosión: *swash*, colapso y *overwash*.

2.2 Hipótesis

Con los objetivos planteados se consideraron ciertas hipótesis de partida basadas en revisión bibliográfica. A continuación se exponen siguiendo el orden de los objetivos ya enumerados.

De la interrelación playa-duna, se sabe que son sistemas dependientes (Sherman & Bauer, 1993), pero su estudio siempre se ha realizado de manera independiente. (Hesp, 2012) dice que la relación entre la formación de duna depende de la forma (transversal) de la playa porque un frente de playa pronunciado va a separar las líneas de corriente del viento produciendo dunas más pequeñas y una playa disipativa con pendiente suave y uniforme va a producir dunas más grandes puesto que las líneas de corriente del viento llevan una trayectoria paralela a la playa lo que hace que el viento tenga más capacidad de transporte.

En lo que respecta a la relación existente en el perfil playa-duna en la respuesta ante una tormenta (van Gent, et al., 2008) y (Vellinga, 1986) dicen que no importa el perfil inicial en el perfil final siempre y cuando dicha tormenta dure el tiempo suficiente.

A partir de lo anterior, en este trabajo, se considera que el perfil de playa está relacionado con el perfil de duna en la respuesta de erosión producida por una tormenta, siendo que va a ver un transporte de la sedimentos de la duna a la playa y de la playa a la duna. Además se considera que el perfil final en la erosión será determinante en la capacidad de regeneración natural del perfil de la duna por transporte eólico.

El efecto de la vegetación se ha estudiado con un enfoque en la estabilización y formación de dunas (Hesp, et al., 2011), pero el efecto que tiene en la erosión por tormentas es aún poco conocido como indican (Kobayashi, et al., 2013) quienes también presentan un resumen del estado del arte de los estudios que se han realizado sobre el efecto de la vegetación (algas, humedales, etc.) en la propagación de ondas.

En este trabajo, entonces, se parte de la hipótesis de que las plantas reducen la erosión porque las hojas aumentan la fricción que se opone al flujo en ascenso. Además se cree que las raíces aumentan la consolidación del suelo.

2.3 Metodología

El estudio de cada bloque requirió de un procedimiento conformado por unos pasos bien definidos. Se expone para cada bloque la metodología aplicada.

Estudio del sistema dunar La Mancha- Farallón:

1. Se realizó una campaña de campo en noviembre de 2014 para contar con datos de topografía y de muestras de arena, así como información fotográfica.
2. Caracterización de los agentes actuantes.
 - 2.1. Análisis estadístico de régimen medio y extremal de ondas de corto periodo.
 - 2.2. Análisis de las variaciones del nivel del mar: marea astronómica y marea de tormenta.
 - 2.3. Análisis estadístico de régimen medio y extremal de viento.
3. Caracterización del factor de sedimento.
 - 3.1. Análisis granulométrico de las muestras en laboratorio.
 - 3.2. Evaluación de los resultados en el perfil playa-duna.
4. Relacionar la topografía con las características de los agentes actuantes y el factor del sedimento, así como la influencia en el año hidrológico.

Para la modelación física se siguió el siguiente criterio.

1. Revisión bibliográfica de modelos físicos existentes de dunas.
2. Se escogió la especie de planta a utilizar: *Ipomoea pes-caprae*.
3. Selección de los casos a modelar
 - 3.1. Se eligieron dos perfiles distintos entre varios perfiles de duna obtenidos de mediciones de la costa de Veracruz de los cuales se escogió uno de la playa Navarro, otro con berma basado en (Kobayashi 2009) que posteriormente fue modificado por observaciones realizadas en ensayos prueba.
 - 3.2. Selección de 3 trenes de onda que produjesen erosión a pie de duna, erosión en la cara expuesta y *overwash*. Para la selección de condiciones se realizaron pruebas con los perfiles en el canal. Se escogieron 2 alturas de ola, 3 periodos (corto, intermedio y largo) y una marea de tormenta.
 - 3.3. Se seleccionaron 4 coberturas, nula, baja, media, y alta. Para determinar el número de plantas en cada cobertura se midió el área de la duna a partir del nivel de agua y se midió lo que ocupaba cada planta.
4. Realización de ensayos prueba para comprobar que las condiciones simulaban lo que se quería representar. En ellos se decidió:
 - 4.1. Modificar el perfil con berma elegido.
 - 4.2. Selección de las condiciones hidrodinámicas.
 - 4.3. Metodología de la construcción de la duna y colocación de las plantas.
5. Realización de los ensayos: mediciones de la superficie libre del agua, velocidades, perfiles finales y videos.
6. Procesamiento de los datos.
7. Análisis de resultados.

Por último se procedió a realizar el estudio numérico con el modelo Xbeach.

1. Estudio de la sensibilidad del modelo.
 - 1.1. Se escogieron los parámetros en base a revisión bibliográfica.
 - 1.2. Se simularon los casos con combinaciones distintas de los parámetros elegidos.
2. Se calibró el modelo XBeach para ambos perfiles analizando los perfiles finales, con la tormenta 1 con los casos sin cobertura vegetal.
3. Se validó para las tormentas 2 y 3 la calibración realizada en ambos perfiles.

Capítulo 3. Estado del arte

3.1 Introducción

El desarrollo de este capítulo se presenta como parte introductoria y fundamental para la posterior exposición del estudio del proyecto. Se exponen los conocimientos básicos del sistema playa-duna: oleaje, transporte de sedimentos, interacción oleaje-duna, clasificación de dunas, modelos físicos realizados a lo largo de los últimos años, modelos numéricos de transporte de sedimentos existentes y se presenta la herramienta numérica utilizada.

3.2 Oscilaciones de la superficie del mar

Los criterios de clasificación de ondas que se forman en el océano son numerosos, entre otros: por fuerzas estabilizadoras, fuerzas generadoras y frecuencia. Las ondas que interactúan en los procesos morfológicos duna-playa son las ondas de gravedad, ondas infragravitatorias asociadas a éstas, marea astronómica y marea meteorológica.

3.2.1 Ondas gravitatorias

Las ondas gravitatorias se caracterizan principalmente por los siguientes factores: su altura de ola H , periodo T , profundidad a la que se propaga h , su longitud de onda L y número de onda k (ecuación 2.1). Las ondas son dispersivas en frecuencia, es decir, viajan a distinta velocidad según el periodo y la profundidad a la que se encuentren cumpliendo con la ecuación de la dispersión (ecuación 2.2).

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

Ecuación 3.1

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh)$$

Ecuación 3.2

$$\sigma = \frac{2\pi}{T}$$

Ecuación 3.3

Donde σ es la frecuencia angular y g la gravedad. Además existen parámetros adimensionales que los relacionan y caracterizan el movimiento de la ola, entre los que cabe destacar el peralte de onda (ε) que define la variación del movimiento vertical de la ola en una longitud de onda, ecuación (2.4).

$$\varepsilon = \frac{H}{L} \text{ o } kA \text{ o } kH$$

Ecuación 3.4

La energía de las ondas de gravedad tiene su origen en el viento. Éste, en contacto con el agua por rozamiento con la superficie libre del océano transmite parte de su energía a la superficie marítima generando oleaje. La zona de interacción entre el mar y el viento se

denomina *Fetch*. El crecimiento del oleaje es irregular debido a la coexistencia de ondas con frecuencias y direcciones diferentes. A dicho oleaje se le denomina mar de viento, oleaje local o *sea*. Éste se caracteriza por ser caótico y con pequeñas roturas. El oleaje en cada frecuencia tiene limitada la energía que puede contener, con el tiempo se establece un equilibrio entre la energía que el viento aporta y las pérdidas (por rotura, por transferencia a bajas frecuencias y por rozamiento con la atmósfera), es cuando se da este equilibrio que la altura de ola y el periodo alcanzan su mayor crecimiento llegando el oleaje a estar totalmente desarrollado (OTD). Una vez generado, se propaga fuera de la zona de generación, dicha propagación se rige bajo dos mecanismos de dispersión, figura 3.1:

- Dispersión angular: Como la anchura del *fetch* es finita, sólo se desarrollan determinadas direcciones de ola.
- Dispersión radial: Las componentes de mayor celeridad (bajas frecuencias) viajan más deprisa, y alcanzan la costa antes y con mayor altura de ola que los períodos más cortos. Esta dispersión agrupa a las ondas por periodos formando grupos de ondas, los cuales generan una onda forzada que en aguas profundas viaja asociada al grupo de ondas gravitatorias. En aguas someras debido a los procesos de rotura y refracción queda libre, más adelante se abordará con más detalle este proceso.

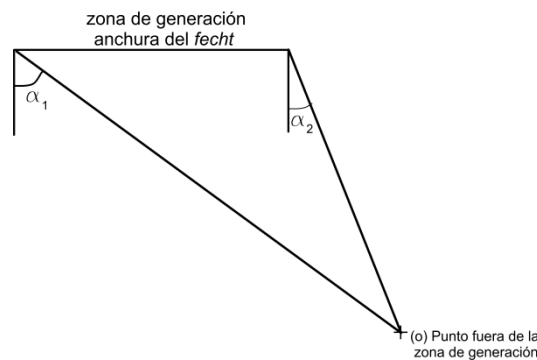


Fig. 3.1 Ventana de direcciones

Una vez que la onda llega a aguas intermedias y someras empieza a sufrir procesos de difracción, refracción, someramiento y rotura, que modifican las características del frente de ola. La difracción es una cesión lateral de energía debida a obstáculos en la batimetría que hace que se produzca un cambio en la dirección del frente de onda en torno a dicho obstáculo. La refracción es un cambio en la celeridad de la onda debido al fondo que hace que el frente se vaya propagando paralelo a las líneas batimétricas. El someramiento se produce por una disminución de la profundidad, debido a este proceso se reduce la longitud de onda incrementando el peralte del oleaje, es decir se transforma energía cinética en potencial. A partir de un determinado peralte la onda se hace inestable y deja de ser simétrica verticalmente, con la parte frontal de la cresta más tendida que la parte trasera, cuando el frente de la cresta pasa la vertical, la ola se vuelve inestable y rompe (Peregrine, 1983).

En la zona de rompientes, la conservación de la cantidad de movimiento induce variaciones en el nivel medio del mar. Antes de la rotura, los procesos de someramiento provocan una depresión creciente del nivel medio, *set-down*, que tienen un máximo en el punto de rotura. En la zona de rompientes, al contrario, el nivel medio asciende, *set-up*, alcanzando un máximo en la línea de costa. En la vertical se produce un desequilibrio en la

parte superior de la ola rota, las fuerzas motrices se dirigen hacia tierra, provocando un movimiento neto entrante en la parte superior de la columna de agua (por encima del seno de la onda) denominado corriente de resaca o *undertow*.

3.2.2 Ondas infragravitatorias asociadas al oleaje

La zona de ascenso-descenso tiene una dinámica distinta a la zona de rompiente. Los grupos de ondas provocan alteraciones temporales en las corrientes y niveles de agua debidas a:

- Liberación de onda larga forzada: los grupos de ondas fuera de la zona de rompientes llevan asociada una variación del nivel medio del mar, ascenso del nivel medio con las olas pequeñas y descenso con las olas grandes. Esta oscilación del nivel medio es una onda larga con periodo igual al del grupo de ondas, su celeridad es función del grupo y por lo tanto viaja como una onda forzada. Cuando el oleaje rompe y se destruye la estructura del grupo, la onda forzada queda libre en la zona de rompientes.
- Variación del punto de rotura y del *set up*. El punto y tipo de rotura de las olas individuales depende de sus características de altura y periodo. Las variaciones de H y T con los grupos hacen que el punto de rotura se traslade transversalmente. Las olas mayores del grupo rompen a mayor profundidad. Esto provoca una traslación del máximo *set-down* hacia el mar. Al mismo tiempo, al propagarse las olas mayores por la zona de rompientes, el *set-up* aumenta, trasladando hacia tierra la zona de ascenso-descenso. Estos movimientos de traslación y cambio del nivel medio constituyen una onda larga libre.
- Transferencia no lineal de energía a los movimientos de largo periodo. Durante el proceso de rotura se produce un intercambio gradual de la energía de la onda corta hacia los movimientos de largo periodo.

Este conjunto de oscilaciones de onda larga tipo infragravitatorio, liberados o transformados en la zona de rompientes se denomina *surf beat*. Es por ello que la hidrodinámica en la zona de ascenso es importante en el proceso erosión-acreción de la duna por oleaje. Dicho proceso es especialmente notable en playas disipativas, en estos casos la mayor parte de la energía observable en la zona de resaca o *swash* corresponde a las frecuencias infragravitatorias, por lo que la energía del *run-up* corresponde casi en su totalidad al *surf beat*. Por el contrario en el caso de las playas reflejantes, la inexistencia de zona de rompientes hace que la energía infragravitatoria contenida en la zona de ascenso-descenso sea prácticamente nula, correspondiendo la mayor parte a las oscilaciones de onda corta y a los subarmónicos correspondientes.

3.2.3 Marea astronómica

La marea astronómica está generada por las fuerzas de gravedad del sol y la luna. En el proceso de formación y erosión de dunas es de interés la variación de la elevación del nivel medio del mar que produce en la costa. Esta variación desplaza la zona de rompientes y la de lavado, ampliando el espacio de interacción oleaje-playa. Este proceso es muy importante en la formación de dunas porque según la longitud de la zona intermareal, la distribución de los sedimentos por el oleaje será distinta en el espacio de la playa, que posteriormente será transportado por el viento para formar las dunas.

3.2.4 Marea meteorológica

La marea meteorológica es una sobre elevación del nivel del mar debido a las bajas presiones y esfuerzos tangenciales de vientos sobre la superficie libre en condiciones climatológicas extremas.

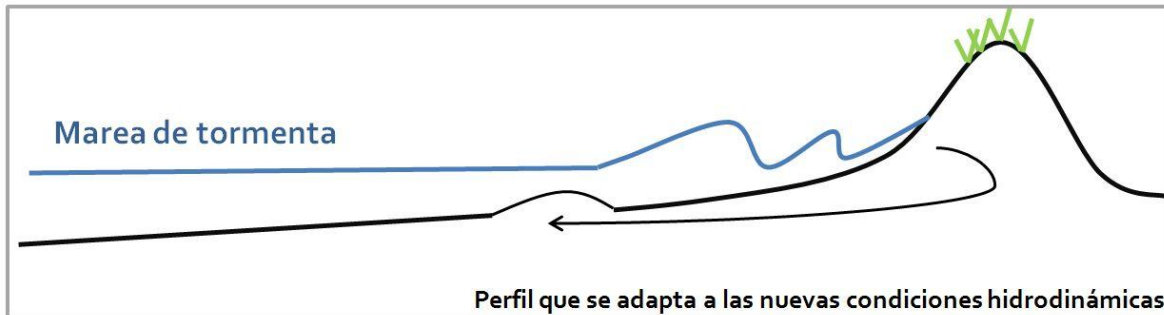


Fig. 3.2 Respuesta del perfil playa-duna ante una tormenta

Debido a ésta se produce una interacción directa entre duna-oleaje, produciendo la erosión de la duna. Al haber una sobre elevación del nivel del mar las olas alcanzan la duna, produciendo su erosión y éste sedimento es transportado mar adentro en ocasiones formando una barra, esto hace que el perfil se adapte a las nuevas condiciones hidrodinámicas haciéndolo más óptimo en lo que a disipación de energía se refiere.

3.3 Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos se produce por tres tipos de flujos que se dan en aguas someras: flujo oscilatorio, ondas infragravitarias asociadas al oleaje y por las corrientes de *undertow* y longitudinales. A continuación se explica de manera muy simplificada el transporte por flujo oscilatorio.

La capacidad del flujo oscilatorio de transportar sedimento se debe a su asimetría en aguas intermedias y someras y de la cantidad de movimiento que transmite a la capa límite. La asimetría de la onda genera una tensión tangencial media sobre el fondo que produce una transferencia de masa neta. Esto genera una corriente la velocidad de este movimiento medio, se denomina lagrangiana o de transporte de masa. El volumen de sedimento que es capaz de transportar el flujo oscilatorio depende de la variación de la tensión tangencial producida en el fondo y del campo de velocidades en un ciclo. Además se produce una transmisión de cantidad de movimiento del movimiento oscilatorio a la capa límite. La capa límite se formará y desaparecerá en cada semiperiodo, variando su grosor temporalmente. Para periodos mayores el espesor de la capa límite es mayor que para periodos menores.

El inicio del movimiento se produce cuando las condiciones de flujo superan aquellas para las cuales los granos del fondo inician el movimiento. Para que esto ocurra intervienen varios factores como la rugosidad del fondo, características morfológicas de las partículas, propiedades del sedimento, entre otros.

Para determinar el umbral de inicio de movimiento se desarrolló el parámetro de *Shields*, que es el cociente de las fuerzas perturbadoras dividido entre las fuerzas estabilizadoras. De acuerdo con el criterio de movimiento, cuando el flujo produce sobre el lecho un valor de $\varphi > \varphi_{cri}$, los granos se mueven, en caso de ser menor permanecen en reposo. En la literatura se encuentran varias expresiones para definir el parámetro de

Shields crítico, la más utilizada el definido por (Soulsby, 1997), expresada en la ecuación 2.8.

$$\psi_{cri} = \frac{0.3}{1.0 + 1.2D_*} + 0.055[1.0 - e^{-0.02D_*}]$$

Ecuación 3.5

Para obtener el valor del esfuerzo cortante en el fondo se hace uso de la ley de arrastre, de la cual también hay varias fórmulas en la literatura, ecuación 2.9.

$$\tau = \frac{1}{2} f_w u^2$$

Ecuación 3.6

$$f_w = \frac{0.06}{\log \left[\left(\frac{12 * h}{k_s} \right) \right]}$$

Ecuación 3.7

$$k_s = D_{50}$$

Ecuación 3.8

Donde u es la velocidad horizontal en el fondo, h la profundidad. f_w es el coeficiente de fricción, definido en fondos rugosos por ((Jonsson, 1963); (Schlichting, 1968)) y en fondos suaves (Soulsby, 1997). Algunos autores tienen en cuenta las variaciones del espesor de la capa límite, (Jonsson, 1963) o (Swart, 1974). (Nielsen, 2006) propuso una ecuación en la que se considera la oscilación del grosor de la capa límite.

Dependiendo de las partículas y de las condiciones del flujo el transporte se puede dar por fondo o por suspensión. Una vez superada la tensión tangencial crítica para la cual se inicia el movimiento, las partículas ruedan y deslizan una sobre la otra en las proximidades del fondo. Incrementando la tensión tangencial, algunas partículas se mueven en saltos, más o menos regulares, formando una lámina de sedimento próximo al lecho. Cuando el valor de la velocidad de corte excede la velocidad de caída de grano, las fuerzas turbulentas son mayores que el peso sumergido y la partícula queda en suspensión.

3.4 Sistema playa-duna y su interacción con el oleaje

El sistema duna-playa al interactuar con el oleaje, modifica su morfología de manera que se adapta a las condiciones climatológicas, adquiriendo la forma más eficiente para disipar energía. Este sistema sigue un modelo de proceso-respuesta y evolucionan mutuamente ajustados mediante el intercambio de sedimentos, (Sherman & Bauer, 1993), citado en (Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas, 2007). A continuación se presentan las partes morfológicas del perfil de playa y duna, la formación de las dunas y se describe la interacción que tanto la playa como la duna tienen con el oleaje. En la figura 3.3 se muestran los distintos elementos que conforman un perfil de playa. A continuación se definen algunos de ellos.

- Zona de rompientes (*Breaker Zone*): Porción del área interior en la que se propagan los bores producidos tras la rotura.
- Zona de ascenso–descenso (*Swash Zone*): que es la porción del perfil que queda alternativamente inundada y seca por los movimientos del mar de largo o corto periodo asociados al oleaje.
- Zona Intermareal (*Foreshore*): Zona de la playa comprendida entre la parte exterior de la berma y el límite de descenso del oleaje en bajamar.
- Frente de playa (*Beach Face*): Sección de la playa que queda expuesta a la acción del flujo ascendente y descendente del oleaje. En caso de marea el frente de playa queda definido por la zona de ascenso y descenso de la pleamar, denominada zona intermareal.
- Playa seca (*Backshore*): Zona del perfil de playa comprendida entre el límite de tierra de la playa y el inicio del frente de playa.
- Berma (*Berm*): zona cuasi-horizontal de la playa seca formada por la deposición de sedimento debida al oleaje. Su límite por el lado del mar es el brusco cambio de pendiente que se produce hacia el frente de playa y del lado de tierra es el pie de la duna.

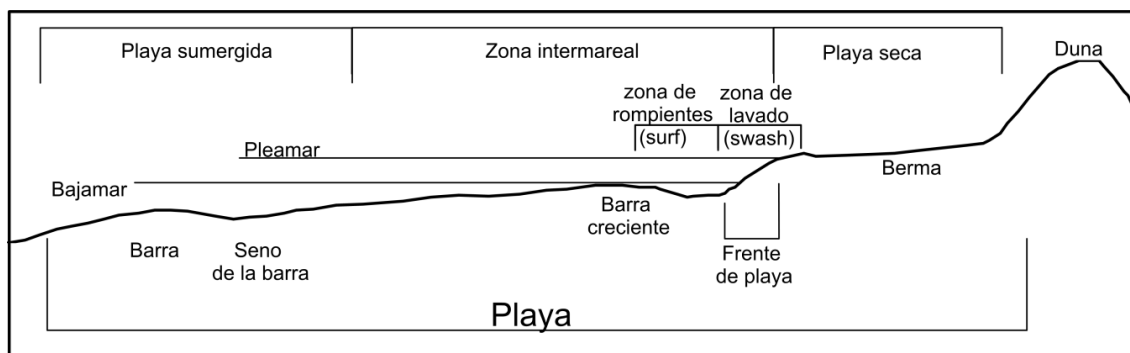


Fig. 3.3 Toponimia del perfil playa duna

El perfil playa-duna es muy flexible y dinámico, va variando adaptando su morfología a las distintas dinámicas que se presentan durante el año. Los oleajes de gran altura de ola y peralte acarrearán hacia el mar el material de la playa seca, depositándolo en la playa sumergida formando barras. Este tipo de perfil se denomina disipativo, figura (3.4a), la mayor parte de la energía se pierde por rotura y fricción, la zona de transición es amplia, presencia de barras, cusps y bajos, ocurren en playas con materiales medios y finos. En el perfil reflejante, (3.4b), la mayor parte de la energía es reflejada por una playa de pendiente pronunciada, ausencia de formaciones debido a la erosión, ocurren en playas abiertas con material grueso. Estos son perfiles extremos, aunque son los perfiles intermedios los que abundan en la naturaleza.

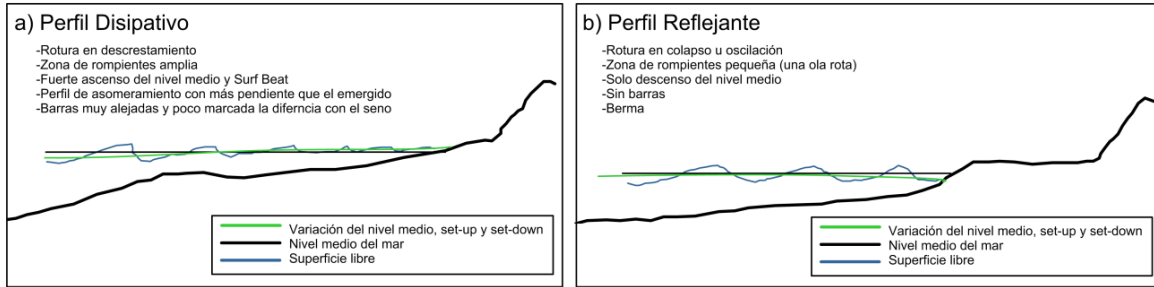


Fig. 3.4 a) perfil disipativo, b) perfil reflejante. Elaboración propia

La interacción oleaje-playa-duna se produce en condiciones de temporal, (Sallenger, 2000) describe 4 regímenes de erosión en una tormenta en el sistema playa-duna, figura 3.5, en función del máximo y mínimo run-up y de la altura de la duna, a continuación se enumeran:

1. Régimen *swash* con *run-up* en la zona intermareal, se presenta erosión en la playa y en la la parte baja de la cara expuesta de la duna.
2. Colapso con *swash* y *run-up* en la cara de la duna, se produce un escarpe en la cara de la duna.
3. *Overwash* en donde la lámina de la ola pasa por la cresta de la duna, la lamina de agua supera la duna y hay transporte de sedimento en esta dirección. Dentro de este modo (Donnelly, 2007) define 6 tipos (*crest accumulation, landward translation, dune lowering, dune destruction, barrier accretion, barrier rollover* y *barrier disintegration*).
4. *Breaching* e inundación, la duna se destruye y se produce inundación.

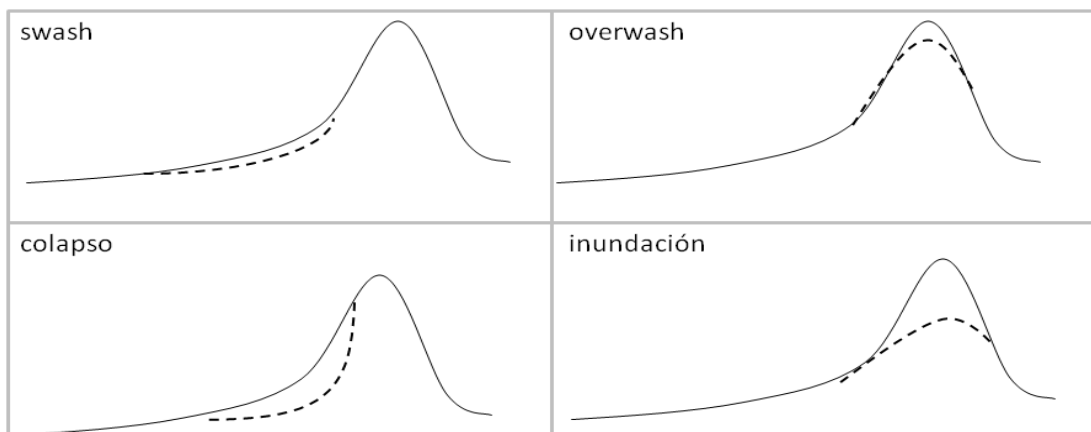


Fig. 3.5 Modos de erosión descritos por Sallenger (2000).

En lo que respecta al sistema dunar se pueden desarrollar distintos tipos de dunas en un sistema según su posición relativa a la costa, como se muestra en la figura 3.6.

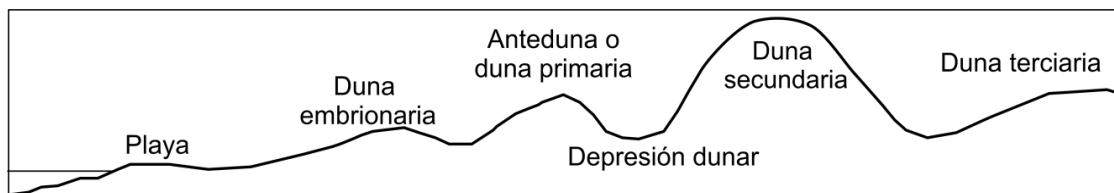


Fig. 3.6 Perfil de un sistema dunar. Modificado (Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas, 2007).

- Duna embrionaria (*incipient dune*): es la duna más joven y más cercana a la línea de costa. Esta duna está situada en una zona más hostil para la vegetación debido a la alta salinidad. Asimismo, es un ambiente muy seco, por el alto drenaje y la exposición al viento. La cobertura vegetal es muy baja, del orden del 20 %. Los oleajes de los temporales las pueden destruir, para volver a reconstruirse en los períodos de buen tiempo.
- Anteduna o duna primaria (*foredune*): se sitúa inmediatamente detrás de la duna embrionaria. Estas dunas son más antiguas y altas con orientación paralela a la línea de costa. Su cobertura parcial de vegetación puede alcanzar el orden del 80 %.
- Depresiones interdunares (*dune slacks*): se sitúan entre las antedunas y las dunas principales. Durante la temporada de mayor precipitación, el manto freático puede emerger a la superficie, formándose entonces lagos interdunarios. La disponibilidad de agua y la protección del viento hacen que la vegetación pueda llegar a cubrir prácticamente todo el suelo.
- Duna secundaria: Esta duna se sitúa hacia tierra de la depresión interdunar. En la duna secundaria las condiciones para el crecimiento de las plantas son mejores. El pH de estas dunas es más reducido, están más protegidas del viento y el ambiente contiene menos salinidad.
- Duna terciaria: tras las dunas secundarias se encuentran las dunas terciarias, a menudo completamente cubiertas de pastizales, arbustos e incluso árboles.

La duna embrionaria y el primer cordón de duna son las que tienen una relación directa con el mar y son las que muchos consideran dunas costeras. La formación de dunas costeras comienza en la playa seca de costas progradantes (que tienen una aportación neta de sedimento hacia tierra). Los granos de arena que han sido depositados por el oleaje en la berma de la playa, cuando se secan, son transportados por el viento en dirección de tierra. Debido al rozamiento del viento con la superficie terrestre se inicia la acumulación de sedimento, que se ve favorecido por la presencia de vegetación u otros obstáculos. Se forman pequeños montículos que crecen a medida que crece la planta sobre la que se forman. Cuando la abundancia de vegetación es alta, los montículos que se han formado se unen durante su crecimiento y forman una pequeña duna, de 0.5 a 1.0 m de altura, duna embrionaria. La formación de la duna costera continuará hasta que el sector de costa deje de ser progradante, o bien comience a formarse una nueva duna embrionaria, (Hesp & Martínez, 2007).

Los factores que determinan el tipo, alineación, tamaño y espaciado de las dunas son los siguientes (Flor, 2004):

1. Naturaleza de las arenas, especialmente su tamaño y clasificación. Dependiendo del tamaño de grano la distancia a la que los transporte el viento variará.

2. Duración, intensidad de vientos y su dirección respecto de la playa. Estas características son un requerimiento básico para la formación de dunas.
3. Aporte de arena al sistema dunar. La disponibilidad de un volumen excedentario arenoso en la playa suministradora adyacente, es condición indispensable.
4. Cubierta de vegetación. Introduce una rugosidad mayor en la superficie, lo que disminuye el flujo del viento sobre la misma e intercepta los granos en saltación, favoreciendo la sedimentación.
5. Topografía de la zona terrestre contigua a la playa. Es necesaria una superficie de posplaya lo suficientemente amplia.
6. Posición del nivel freático. Tiende a situarse muy superficialmente y condiciona la fijación del sedimento arenoso.
7. Grado de humedad de la zona costera. Da mayor cohesión al suelo y condiciona el tipo de colonización vegetal.

No son muchos los trabajos que se encuentran en la literatura especializada sobre la relación que hay entre la forma del perfil de playa y la duna. Hasta la fecha se sabe que la zona intermareal determina la zona en la que el oleaje actúa depositando los sedimentos que posteriormente serán transportados por el viento y serán los que formen la duna. Sin embargo el trabajo realizado por (Short & Hesp, 1982) y (Hesp, 2012) llega un poco más lejos, afirma que hay una relación entre la forma de la playa seca y el transporte de sedimentos por viento. Según la forma de la playa seca, las líneas de corriente del viento se abrirán o cerrarán, reduciendo o manteniendo su capacidad de transporte respectivamente. Por ejemplo en las playas reflejantes hay un cambio brusco de pendiente entre el frente de playa y la berma que hace que las líneas de flujo del viento se separen del suelo, en cambio en las playas disipativas dicho cambio de pendiente no existe y las líneas de corriente del viento viajan paralelas al suelo teniendo más capacidad de transporte. Esto hace que las dunas en playas reflejantes, en general, sean menores que las formadas en playas disipativas.

3.5 Morfología de las dunas

Se pueden distinguir dos tipologías de campos de dunas, los asociados a los ambientes desérticos, donde la presencia de vegetación es escasa y no determinante en la dinámica dunar y los asociados a ambientes costeros, aquellos en los que la vegetación es determinante en la formación del sistema dunar.

En la franja litoral se pueden encontrar una importante variedad de formas dunares. Igualmente la clasificación de estas formaciones es muy variada, la agrupación de estas clasificaciones puede ser de poco elaborada a mucho. Hay diferentes criterios de clasificación, por forma, ecológico o por balance sedimentario, entre otros. Por su forma se presenta la siguiente clasificación, (Flor, 2004), figura 3.7.

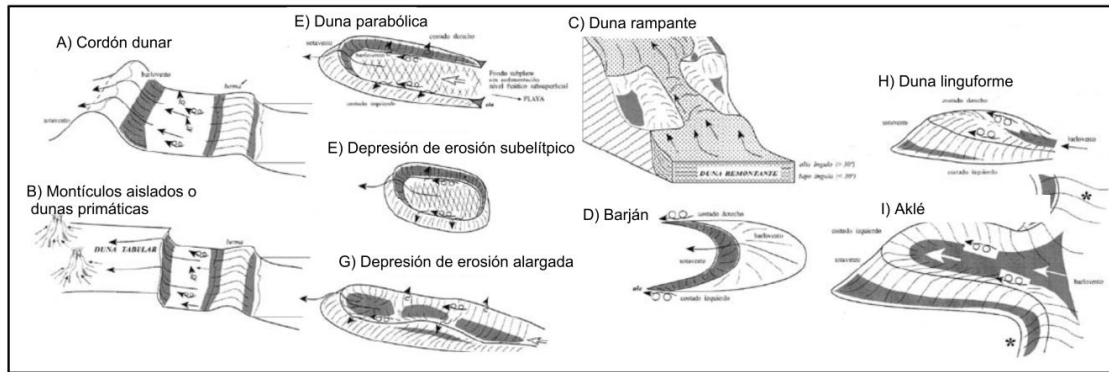


Fig. 3.7. Tipología de formas dunares, modificado de (Flor, 2004).

1. Cordón dunar simple.
2. Duna tabular: dunas prismáticas o montículos aislados.
3. Dunas remontantes o rampantes de bajo y alto ángulo.
4. Barjanes.
5. Dunas parabólicas o en forma de U.
6. Depresión o casquete subelíptico de erosión (“blowout”).
7. Depresión o casquete alargado de erosión.
8. Duna linguiforme con cresta ligeramente convexa.
9. Parte de un aklé, en este caso la forma protuberante de un sistema de barjanes coalescentes, también denominados duna barjanoides; los bordes laterales constituyen barjanes verdaderos.

Otros autores utilizan criterios ecológicos como son (Goldsmith, 1977); (Goldsmith, 1985); (Hesp, 1984). Por ejemplo (Hesp & Short, 1980) utilizan el criterio de cobertura vegetal para clasificar las dunas costeras. Usando el criterio de balance de sedimentos se encuentran los trabajos de (Klijn, 1981) o (Psuty, 1988) que define los tipos según la disponibilidad sedimentaria en las distintas fases de formación del sistema dunar. También existen otros criterios como las distintas extensiones del sistema, por ejemplo (Pye & Tsoar, 1990), 1990) sólo clasifican la zona de influencia marina directa según el aporte sedimentario.

3.6 Influencia de la vegetación en la morfología dunar

En los campos dunares en donde existe precipitación, la vegetación es determinante en la morfología de las dunas. El tipo de vegetación tiene una relación directa con la distancia desde la duna al mar debido a la salinidad de los vientos marinos y la falta de nutrientes. La distribución de la vegetación y el desarrollo de los suelos dependen a su vez de las variantes locales del clima, de la topografía, de la granulometría o de la velocidad del viento. Según sea la dinámica predominante de la zona costera (Carter, 1990)¹ y la magnitud de los temporales, los efectos sobre la vegetación de playa alta-duna varían, condicionando la composición y abundancia de especies y los caracteres morfológico funcionales de respuesta frente a este tipo de perturbación, que permitirán la supervivencia y

¹ Citado en (Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas, 2007)

recolonización de las zonas perturbadas (García, et al., 1999), (García, et al., 2001); (Hesp & Martínez, 2007).

La cobertura vegetal interactúa con el viento modificando el flujo, participa en la fijación de las arenas y modifica las características de la superficie en relación al flujo del viento (Packham & Willis, 1997)². Las líneas de corriente del viento cambian según el tipo de vegetación, la vegetación herbácea dificulta claramente el transporte de sedimentos.

Como ya se ha mencionado, la cobertura de vegetación y el tipo de especies presentes también es muy variable y es función de la región biogeográfica, el clima y la historia, estabilidad, exposición y dinámica sedimentaria existente (Hesp, 1991). Es por ello que para este estudio se ha escogido la planta *Ipomea pes-caprea*, característica de climas tropicales y subtropicales comprendidos entre la latitud 30° norte y 30° sur como es el caso de México. Es una de las especies dunares más ampliamente distribuida (Ridley, 1930); (Thorne, 1594), en todas las zonas tropicales y subtropicales del mundo. Es perenne, con flores rosadas, las semillas se dispersan por el agua. Posee una raíz larga y profunda y raíces en los nudos que suelen ser superficiales. La especie es tolerante a la exposición continua de fuertes brisas del mar cargados de salitre, aunque depende de las aguas subterráneas dulces que forman una capa sobre el agua salada (Boughey, 1957). Es una especie muy tolerante al enterramiento con arena (Martínez & Moreno-Casasola, 1996).



Fig. 3.8. Fotografía de la planta *Ipomea pes-caprea* en la playa Farallón.

3.7 Antecedentes de modelos físicos

Los modelos físicos tienen mucho valor en la investigación de ingeniería de costas puesto que con ellos se recrean condiciones controladas aportando datos que ayudan a comprender lo que ocurre en la realidad. Además son datos necesarios para validar modelos numéricos y para obtener ecuaciones empíricas con aplicabilidad a problemas reales. Muchos de los modelos analíticos y numéricos son validados con información limitada, debido a la ausencia de datos de modelación física, (Larson, et al., 2004).

En la literatura se encuentran reportados varios trabajos de modelación física 1D de dunas. (Vellinga, 1986), (Delft Hydraulics, 1982a), (Delft Hydraulics, 1982b)(Delft Hydraulics, 1984a)(Delft Hydraulics, 1984b)(Delft Hydraulics, 1987)(Delft Hydraulics, 2004)(Hydraulics, 2006)(Delft Hydraulics, 2007), (van Gent, et al., 2008), y (Kraus & Smith, 1994) estudiaron los regímenes de colapso. (Tomasicchio, et al., 2011) presentan ensayos realizados para los 3 modos de erosión descritos por (Sallenger, 2000). (Kobayashi, et al., 1996) estudian la reflexión *overtopping* y *overwash* de las dunas y comparan los resultados con las fórmulas que se tienen para estructuras. (Kobayashi, et al., 2009) evalúan los efectos de la geometría de la berma en la variación temporal de la berma y duna por erosión. (Overton, et al., 1994) estudian la fuerzas inducidas por el *swash* dependiendo del tamaño de grano y de la densidad de la duna. En esta investigación se

² Citado en (Martínez, 2010)

analizan dos perfiles de dunas con 4 coberturas distintas de vegetación, bajo 3 regímenes de erosión: *swash*, colapso y *overwash*.

3.8 Modelo numérico

Debido a la complejidad de los perfiles de playa, características y concentraciones de los sedimentos, niveles de agua interacción de diferentes ondas y corrientes, es difícil realizar un tratamiento analítico y es necesario recurrir a la modelación numérica para su estudio. Los modelos de transporte de sedimentos en dirección transversal, se pueden clasificar en dos grupos: de *ciclo abierto* y de *ciclo cerrado*, (Zheng & Dean, 1997). En los modelos *ciclo abierto* se determina el perfil final y el transporte de sedimentos mediante la concentración de sedimento y la velocidad del fluido. Los modelos *ciclo cerrado* se basan en el concepto de equilibrio de perfil de la playa (Bruun, 1954); (Dean, 1977)) y aceptan que un perfil logrará el equilibrio si se expone a las mismas condiciones durante un determinado periodo de tiempo.

Varios modelos numéricos, como EDUNE ((Kriebel, 1982); (Kriebel & Dean, 1985); (Kriebel, 1986)) SBEACH ((Larson, et al., 1989);(Larson & Kraus, 1989) y el modelo utilizado denominado Coastal Construction Control Line (CCCL) ((Chiu & Dean, 1986) se han desarrollado de acuerdo con el concepto de equilibrio de perfil de playa, *closed loop*.

XBeach (Roelvink, et al., 2009) es el modelo utilizado en este estudio. El XBeach es un modelo de *open loop*, el modelo resuelve las ecuaciones de propagación de onda, flujo, transporte de sedimentos, cambios morfológicos para condiciones espectrales de oleaje y flujo y los procesos que provoca el *surf beat*. Se resumen a continuación las ecuaciones de gobierno que utiliza el módulo de transporte de sedimentos. El modelo utiliza la ecuación de advección-difusión (Gallagher & Vreugdenhil, 1985), ecuación 2.12, para el transporte de sedimentos.

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu^E}{\partial x} + \frac{\partial hCv^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s}$$

Ecuación 3.9

Donde C representa la concentración media de sedimento que varía en la escala de tiempo de la onda, y D_h es el coeficiente de difusión del sedimento. El arrastre de sedimento se representa por T_s , dada por una aproximación basada en la profundidad de agua local y la velocidad de caída w_s .

$$T_s = \max \left(0.05 \frac{h}{w_s}, 0.2 \right) s$$

Ecuación 3.10

El valor pequeño de la ecuación 2.13 corresponde a la respuesta de sedimentos casi instantánea. El arrastre o deposición de sedimentos es determinada por la discordancia entre la concentración de sedimentos real, C , y la concentración de equilibrio, C_{eq} , que representa el término fuente en la ecuación de transporte de sedimentos. La altura del fondo varía de acuerdo con la ecuación 2.14.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{(1-p)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0$$

Ecuación 3.11

Donde p es la porosidad, f_{mor} es un factor de aceleración morfológica de $O(1-10)$ y q_x y q_y representan el transporte de sedimentos en las direcciones x , y , respectivamente, dados por la ecuaciones 2.15 y 2.16

$$q_x(x, y, t) = \left[\frac{\partial h C u^E}{\partial x} \right] + \left[D_h h \left[\frac{\partial C}{\partial x} \right] \right]$$

Ecuación 3.12

$$q_y(x, y, t) = \left[\frac{\partial h C v^E}{\partial y} \right] + \left[D_h h \left[\frac{\partial C}{\partial y} \right] \right]$$

Ecuación 3.13

A continuación se explican las fórmulas del transporte de sedimentos. La concentración del equilibrio de sedimentos se calcula mediante Soulsby-Van Rijn (Soulsby, 1997). C_{eq} viene dado por

$$C_{eq} = \frac{A_{sb} + A_{ss}}{h} \left(\left(|u^E|^2 + 0.018 \frac{u_{rms}^2}{C_d} \right)^{0.5} - u_{cr} \right)^{2.4} (1 - \alpha_b m)$$

Ecuación 3.14

Donde el sedimento es movido por la velocidad euleriana media en combinación con la velocidad orbital de la ola cerca del fondo. Para que los sedimentos se muevan la velocidad orbital y la euleriana tienen que superar la velocidad crítica de inicio de movimiento. El coeficiente de arrastre es debido solo a la velocidad de flujo. La pendiente del fondo se representa por m , α_b representa un factor de calibración. A_{ss} y A_{sb} son coeficientes de transporte por fondo o por suspensión que dependen del tamaño de grano, densidad relativa y profundidad local.

Capítulo 4. Zona de estudio

4.1 Introducción

El sistema dunar Farallón-La Mancha se ubica en una planicie costera que limita con una sierra volcánica, localizada entre las coordenadas 19°35'23.16''-19°39'41.34'' N y 96°23' 5.25''- 96°23' 4.88'' W, estado de Veracruz. El sector está caracterizado por la presencia de lagunas y llanuras palustres alargadas y estrechas entre lomeríos costeros y el litoral, (Hernández Santana, et al., 2007)

El clima en la zona se define como templado con una temperatura media de 23° C, la precipitación se reparte en dos épocas, una lluviosa y calurosa de junio a octubre, y una seca y más fría entre noviembre y mayo.

La Mancha y el Farallón son dos celdas litorales distintas pero el sistema dunar es común, como se aprecia en la figura 4.1. En las costas del centro-norte del estado de Veracruz donde las celdas litorales están limitadas por salientes rocosos el transporte sedimentario repite el mismo patrón, ver figura 4.1. Dicho patrón consiste en que el aporte sedimentario tiene origen en el sistema de lagunas costeras, las cuales presentan gran capacidad de transporte hidráulico. Dado que, ocasionalmente, las bocas de las lagunas se abren, ocurre un intercambio de sedimentos, de esta manera las playas tienen excedentes de arena de origen fluvial. En el sistema Farallón-La Mancha las lagunas que aportan material son el Llano y La Mancha, respectivamente, figura 4.1. Además, el río Tecolutla constituye la principal fuente de sedimentos que se derivan a lo largo de corrientes litorales que alimentan esta porción de la costa ((Geissert, 2006); (Ortiz & De La Lanza, 2006)).

El transporte de sedimentos tanto eólico como costero se produce de Norte a Sur marcado por las direcciones gobernantes de viento y oleaje. El promontorio rocoso actúa como un espigón perpendicular a la línea de costa que interrumpe el transporte longitudinal (dirección gobernante de norte a sur) provocando la acreción en la parte norte y erosión en la parte sur. En lo que respecta al transporte sedimentario por viento se forman sistemas dunares transgresivos que sobrepasan los macizos rocosos aportando sedimento a la playa contigua ubicada al sur del promontorio. Ejemplos de ello son los sistemas dunares de Chachalacas, las dunas ubicadas al sur de Laguna Verde, las dunas de Doña Juana y el sistema de La Antigua entre otros.

El caso del campo dunar Farallón-La Mancha es algo diferente, las dunas que pasan por el macizo rocoso han sido estabilizadas por la vegetación durante los últimos 20 años, reduciendo el aporte sedimentario a la playa de La Mancha, sin embargo hay una nueva duna transgresiva que está avanzando sobre el promontorio rocoso.

El sistema es progradante y tienen presencia de campos de dunas parabólicas muy desarrollados y estables en la parte de pos-playa. La playa de La Mancha presenta dunas embrionarias y el Farallón un cordón de dunas primarias muy desarrollado, figura 4.2, en ambos casos con cubierta



4.1. Imagen de Google Earth de parte de la costa centro de Veracruz.

vegetal de especies formadoras de dunas como *Ipomoea pres-caprae* y *Croton punctatus*.

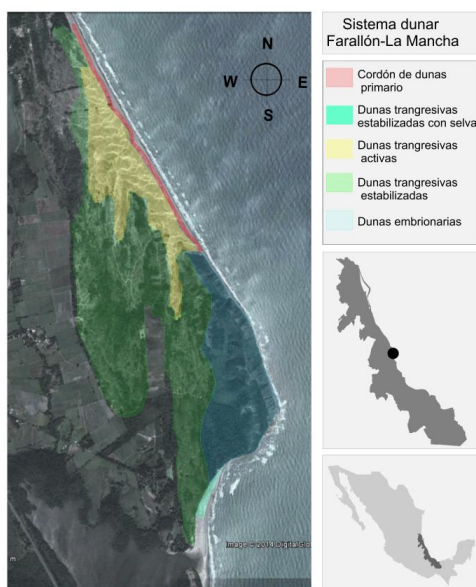


Fig. 4.2 Mapa de las tipologías de dunas presentadas en el sistema Farallón-La Mancha

Este estudio se centra en las dunas embrionarias y primarias que son aquellas que tienen una relación directa con el oleaje y las mareas. Para el análisis se exponen 3 apartados: análisis estadístico de oleaje y viento, análisis granulométrico y un breve estudio de la morfología dunar presente en ambas playas.

4.2 Análisis del clima marítimo

4.2.1 Introducción

La erosión de los sistemas dunares está altamente ligada al oleaje y otras oscilaciones presentes en la zona de rompientes, por lo que es necesario su conocimiento para poder entender sus cambios morfológicos. Este capítulo se dedica al análisis del clima marítimo (ondas de gravedad y viento) junto con el estudio de la variabilidad del mar en la zona de estudio, Farallón-La Mancha.

El orden en el que se presentan es: en primer lugar el análisis de oleaje; análisis de tormentas y análisis de viento con datos sintéticos resultantes de la simulación mediante modelos de predicción de oleaje de segundo y tercer orden. Con los que se realizó un estudio a largo plazo tanto anual como estacional. Por último se analizó la variabilidad de la superficie libre del mar por marea astronómica y de tormenta.

4.2.2 Datos utilizados

Los datos fueron generados con el modelo híbrido WAM-HURAC, (Silva, et al., 2002) y (WAMDI-Group, 1988) para el punto con coordenadas geográficas de longitud 96° W y latitud 19.5° N. Se cuenta con 552264 estados de mar horarios de 62 años, con datos que abarcan desde la hora 0 del 1 de enero de 1948 hasta la hora 23 del 31 de diciembre del año 2010.

El modelo WAM es un modelo espectral de oleaje de tercera generación desarrollado por el grupo Wave Model Development and Implementation Group (WAMDI, 1988; Günther et al., 1992), con él pueden estimarse las condiciones de oleaje generadas por la acción del viento. El WAM integra la ecuación de transporte de energía bajo un enfoque euleriano. Consiste en un modelo híbrido que resuelve la ecuación bidimensional del transporte de energía del espectro del oleaje teniendo en cuenta: el proceso de la interacción no lineal que se presenta entre las olas; la disipación de la energía del oleaje, tanto por el efecto de la rotura del oleaje en aguas profundas como por los fenómenos de fricción del fondo y percolación en aguas más someras.

Pero el modelo en casos de eventos extremos como, depresiones, tormentas tropicales y huracanes subestima los resultados. Por lo que para la generación de estos datos se utilizó el modelo paramétrico de segundo orden (Hurac). Este modelo calcula los campos de vientos y presiones atmosféricas en función del radio ciclostrofico del evento extraordinario y a partir de éstos determina los campos de presión, la altura significativa y periodo de las olas características. Los resultados de los modelos aplicados fueron validados, (Silva, et al., 2012), con los registros de las boyas 42002 y 42055 de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), ubicadas respectivamente en las latitudes 25°47'24"N y 22°12'10"N, y las longitudes 93°39'58"W y 94°0'1"W, que ratifican su bondad.

4.2.3 Análisis de oleaje.

En la playa se presentan, de manera simultánea, un conjunto de oscilaciones de diferentes periodos explicados en el apartado 2.2 'Oscilaciones de la superficie del mar'. Dentro de estas oscilaciones caben destacar las mareas (largo periodo) y el oleaje (periodos cortos). Cuando la marea desciende el oleaje interviene en cotas más bajas de la playa dejando una parte de la misma expuesta a los efectos del sol y viento. Si el viento que actúa en dirección hacia la playa es lo suficientemente intenso, parte del material que se seca será transportado hacia la costa formando una reserva de arena donde el oleaje, superpuesto a mareas en condiciones normales, no es capaz de retornarlo hacia el mar. Cuando la marea asciende, el oleaje actúa en cotas de elevación más altas de la playa alcanzando la duna (reserva natural de arena) produciendo su erosión y redistribuyendo el sedimento creando un nuevo perfil playa-duna que responde a las nuevas condiciones hidrodinámicas.

El oleaje modifica la morfología del perfil y las mareas determinan el espacio de playa en donde estas ondas cortas actúan. Es por ello que el oleaje es agente fundamental en la redistribución de los sedimentos por toda la superficie de la playa que posteriormente el viento transporta generando las dunas costeras, como consecuencia en las dunas costeras se presentan sedimentos bien graduados a diferencia de las desérticas, (Folk, 1971).

A continuación se expone un análisis con estadística descriptiva de régimen medio y de régimen extremal tanto para oleaje como para viento.

4.2.3.1 Probabilidad de excedencia de altura de ola significativa

En la figura 4.3 a) se observa la probabilidad anual de excedencia de altura de ola significativa, en la que con un 75% de probabilidad se supera una altura de ola de 0.55 m, con una probabilidad de 50% se supera una altura de ola de 0.7 m y con una probabilidad de excedencia de 0.25 se supera una altura de ola de 0.9 m.

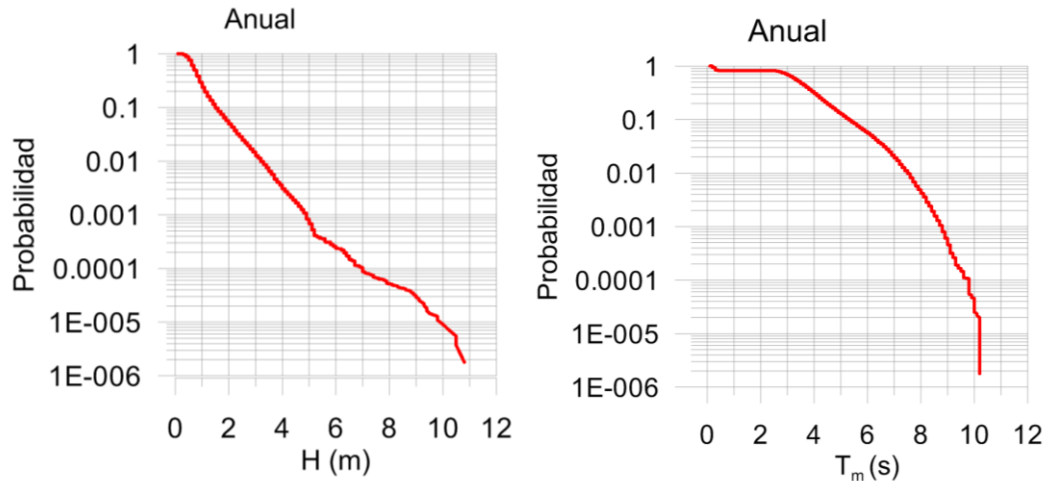


Fig. 4.3. a) Probabilidad de excedencia de altura de ola anual, b) probabilidad de excedencia de periodo medio anual

En lo que respecta al análisis estacional, se producen las máximas alturas de ola en invierno, de 0.75 m con una probabilidad de excedencia de 75% de 0.85 con probabilidad de excedencia de 50% y 1.2 m con una probabilidad de ser superado de 25%. En verano se producen las mínimas alturas de olas de 0.5 m, 0.6 y 0.65 con una probabilidad de excedencia de 75% y 50% y 25% respectivamente. En primavera y otoño se parecen mucho las alturas de ola de 0.75, 0.6 y 0.5 m con probabilidad de ser superadas respectivamente de 25%, 50% y 75%.

4.2.3.2 Probabilidad de excedencia del periodo medio

El mismo proceso se realiza para el periodo medio, resultando agrupaciones parecidas a la altura de ola significativa, aunque la hipótesis supone que son variables independientes, las alturas de ola mayores están asociadas a periodos mayores y viceversa.

En el análisis anual los periodos medios, figura 4.3 b), con probabilidades de excedencia de 25%, 50 %, 75 % respectivamente son 4.25 s, 3.4 s, 2.7 s. Los periodos menores se dan en verano, con una probabilidad de excedencia de 25, 50, y 75 % con periodos asociados de 3.5, 3.2, y 2.7 s respectivamente. En invierno se dan los mayores periodos con probabilidades de excedencia de 25%, 50% y 75 % los periodos de 4.5, 3.75, y 3.0 s respectivamente; en primavera y otoño (en el mismo orden) asociados a las probabilidades de excedencia de 25% son los periodos de 4.4 y 4.25, correspondientes a una probabilidad de excedencia de 50% son los periodos 3.75 s y 3.5 s; y con una probabilidad de excedencia de 75% los periodos 2.7 s y 2.9 s respectivamente.

4.2.3.3 Rosa de oleaje

En las rosas de oleaje se presentan las direcciones (hacia dónde va) el oleaje. Presenta una dirección gobernante NE con un 40% de probabilidad de ocurrencia con alturas de ola dominantes entre 0.5 y 1.0 m. Seguida por las direcciones ENE y NNE.

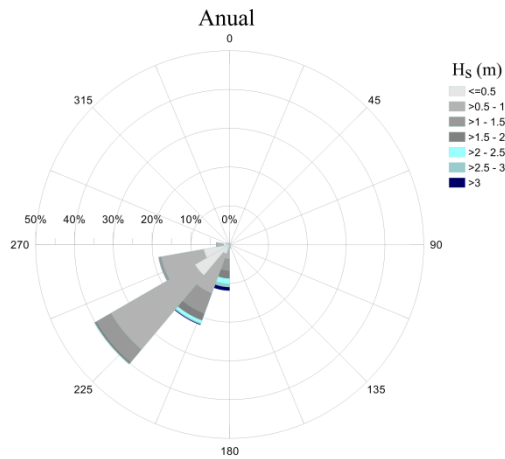
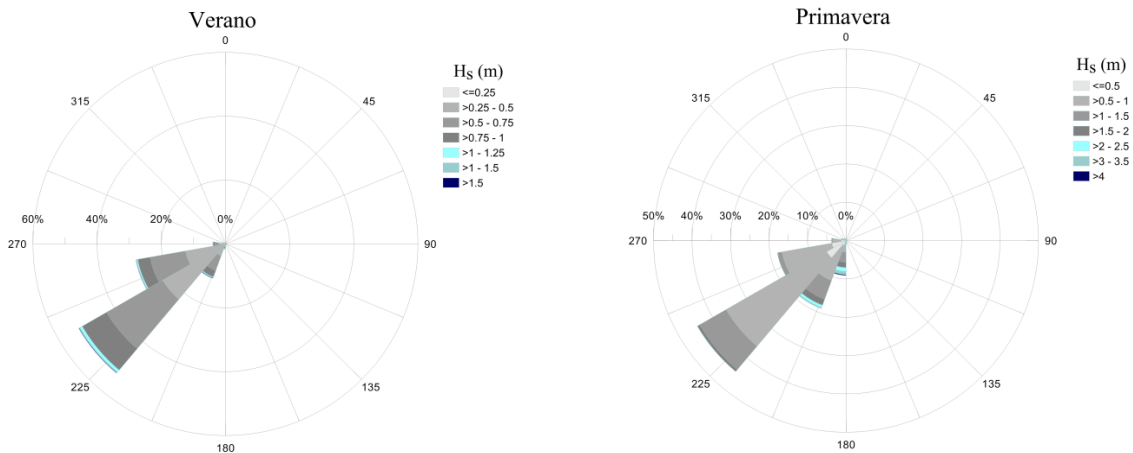


Fig. 4.4. Rosa de oleaje anual

En lo que respecta al análisis estacional, domina la dirección NE, aunque es más marcada su dominancia en las estaciones de verano y primavera con una probabilidad de ocurrencia de 50 % y 45% respectivamente. En otoño e invierno esta dirección se presenta con una probabilidad de 33% y 31%, respectivamente seguida por la dirección ENE con probabilidades de 30 y 28%, figura 4.5.

En verano y primavera predominan las condiciones de calmas y frecuencia de ocurrencia del oleaje de altura de ola significativa inferior a 1.0 m. En otoño e invierno también dominan condiciones de calma, pero se producen eventos extremos debido a los ‘Nortes’ ya mencionados.



4.5. Rosa de oleaje estacional verano y primavera.

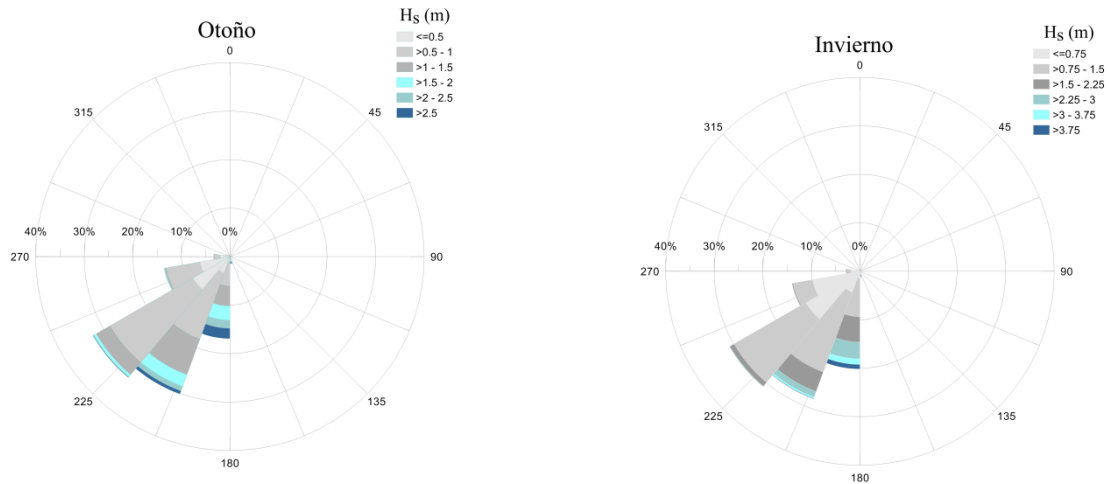


Fig. 4.6 Rosa de oleaje estacional otoño e invierno.

4.2.3.4 Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo medio, altura de ola y dirección.

A continuación se presentan la probabilidad conjunta de altura de ola y periodo medio, anual en la figura 4.7 a). En la figura 4.7 b) se presentan la probabilidad conjunta de las alturas de ola y dirección.

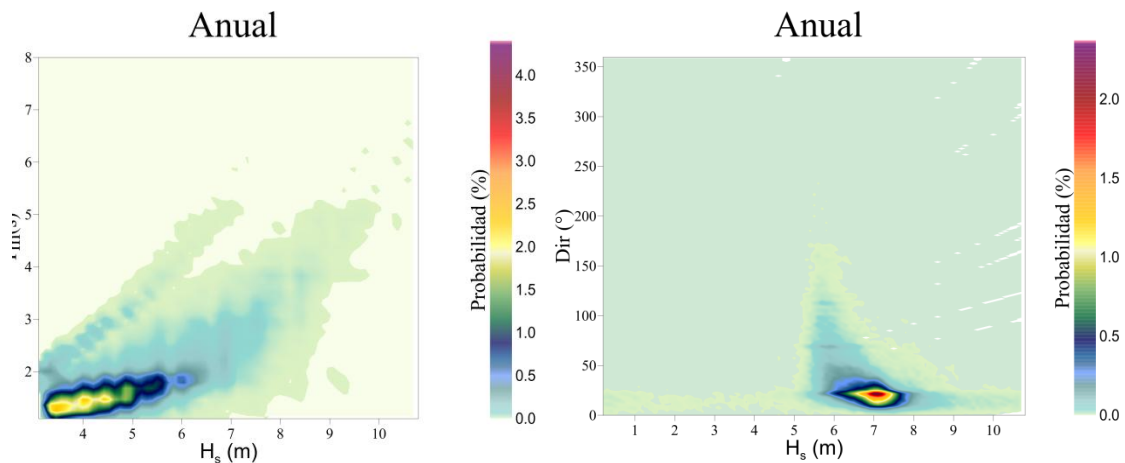


Fig. 4.7 Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo medio anual.

4.2.3.5 Analisis extremal de altura de ola

En esta sección se presenta el análisis extremal realizado con el papel probabilístico de Weibull para extremos de altura de ola. La altura de ola para un periodo de retorno de 1000 años es de 7.2 m; para un periodo de 100 años de 6.7 m, para un periodo de 4 años de 5.5 m y la altura de ola de 2.0 m tiene un periodo de retorno de 1 año. Anualmente se presentan tormentas, mas las tormentas de alturas de ola mayores a 5.0 m son eventos extraordinarios muy inusuales.

Respecto al análisis extremal estacional cabe destacar que en verano las alturas de ola son muy pequeñas pertenecientes al régimen medio.

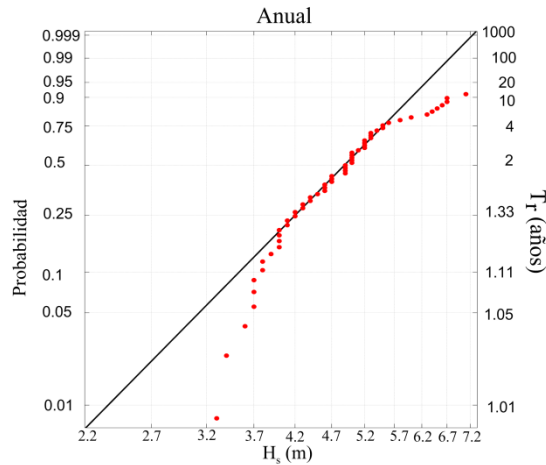


Fig. 4.8. Papel probabilístico de Weibull anual para altura de ola.

4.2.4 Análisis de tormenta

Las tormentas son de extrema importancia en la interacción de los sistemas dunares con el oleaje, ya que son en dichos eventos cuando se presenta un intercambio directo de sedimento entre el ambiente marino y el dunar.

Las tormentas se definen bajo los siguientes criterios:

5. Un umbral mínimo de alturas de ola significativa de 2.0 m de altura.
6. Si la discontinuidad de alturas de ola significativa fue menor a 12 horas se consideró como la misma tormenta.
7. La energía total de cada tormenta se normalizó con una tormenta equivalente a 2 metros de altura de ola sostenida por un intervalo igual a 24 horas.

A continuación se presentan las rosas de altura de ola, periodo pico y energía normalizada. En las que destaca la dirección dominante N seguida por la dirección NNE. Las alturas de olas dominantes rondan 2.0 y 3.0 m.

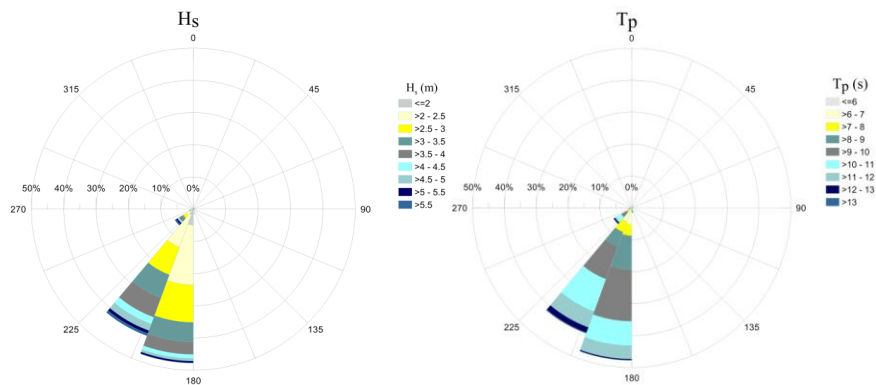


Fig. 4.9. Rosa anual de oleaje y periodo pico para tormentas.

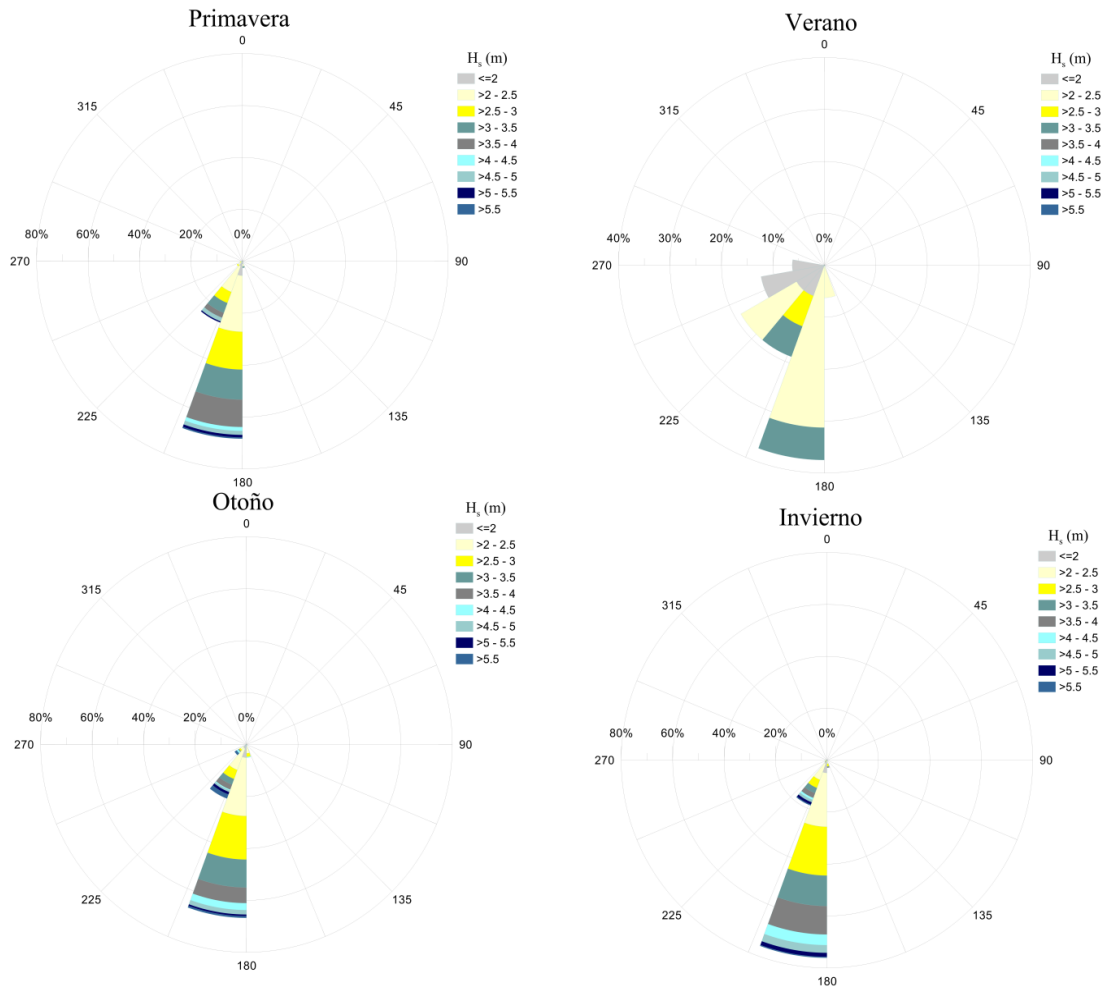


Fig. 4.10. Rosa estacional de altura de ola de tormentas.

En lo que respecta a las tormentas por estaciones, en verano se puede considerar que no hay tormentas, que es la época de régimen medio, produciéndose las tormentas en las épocas de otoño e invierno. En la figura 4.12 se muestra la gráfica de probabilidad conjunta de las alturas de ola y los periodos pico.

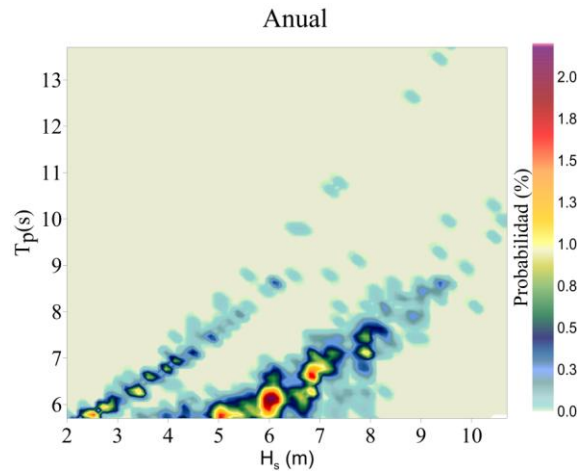


Fig. 4.11. Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo pico.

Por último se muestra la distribución de las duraciones de las tormentas: duración media y máxima de los eventos con su desviación estándar y un gráfico con un promedio de número de eventos anuales.

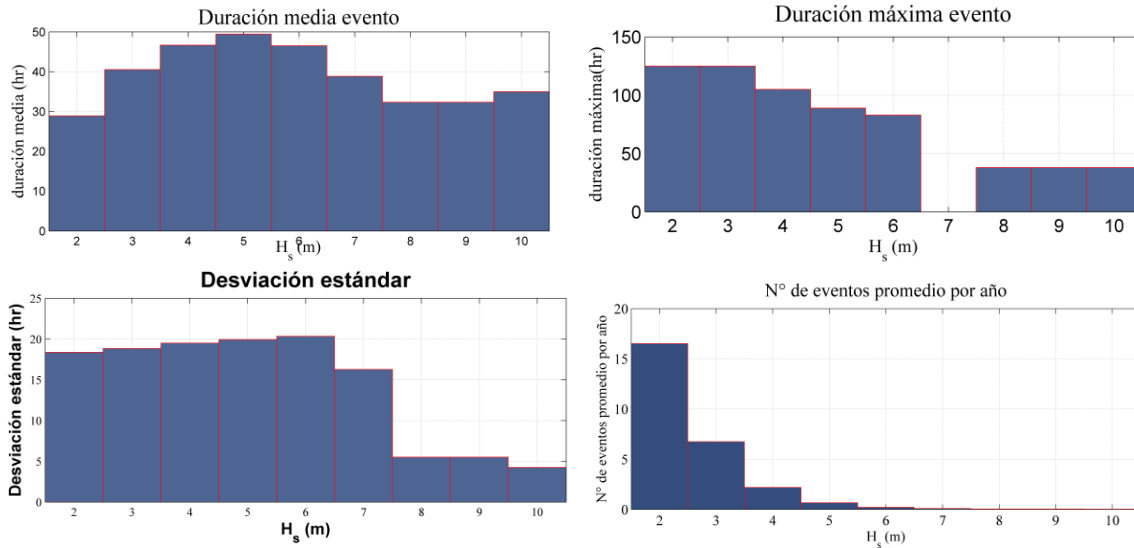


Fig. 4.12. Estudio de la duración de las tormentas

4.2.5 Análisis de viento

La playa es el área fuente de las dunas costeras, y la acción selectiva del viento sobre aquella produce una concentración de los tamaños más finos en la duna. Así, la caracterización de los vientos es muy importante para estudiar la formación de las dunas.

4.2.5.1 Probabilidad de excedencia de velocidades sostenidas

En la figura 4.14 se puede observar la probabilidad anual de excedencia de velocidades de viento sostenidas, con un 75% de probabilidad se supera 2.5 m/s, con una probabilidad de 50 % se supera 4.0 m/s y con una probabilidad de excedencia de 25% se supera 6 m/s.

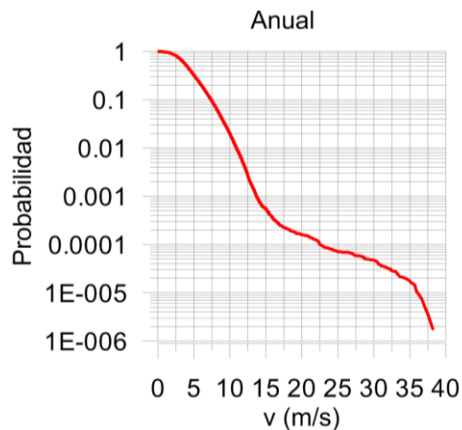


Fig. 4.13. Probabilidad de excedencia de velocidades sostenidas anual.

En lo que respecta al análisis estacional, las máximas velocidades sostenidas se producen en otoño e invierno seguidos de primavera. En invierno las velocidades con probabilidades de excedencia de 75%, 50% y 25% son 2.75 m/s, 4.0 m/s y 6.0 m/s. En otoño correspondientes a las probabilidades 75%, 50% y 25% son 3.0 m/s, 4.75 m/s, 6.5 m/s. En primavera 3.0 m/s, 4.5 m/s, 5.55 m/s. Por último la estación de verano con velocidades menores de 2.5 m/s, 4.5 m/s y 5.55 m/s.

4.2.5.2 Rosa de vientos

A continuación se presentan las rosas de vientos. Es conveniente destacar que la dirección presentada indica hacia dónde va el viento. Presenta más variabilidad que el oleaje debido a que este último está sometido a procesos de refracción y difracción, sin embargo, siguen siendo dominantes las procedentes de NE, ENE y ESE. Con mayores probabilidades de velocidades sostenidas, entre valores de 2.0 m/s y 6.0 m/s.

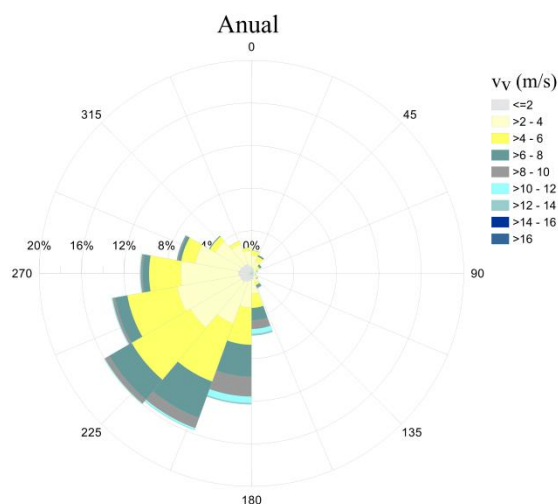
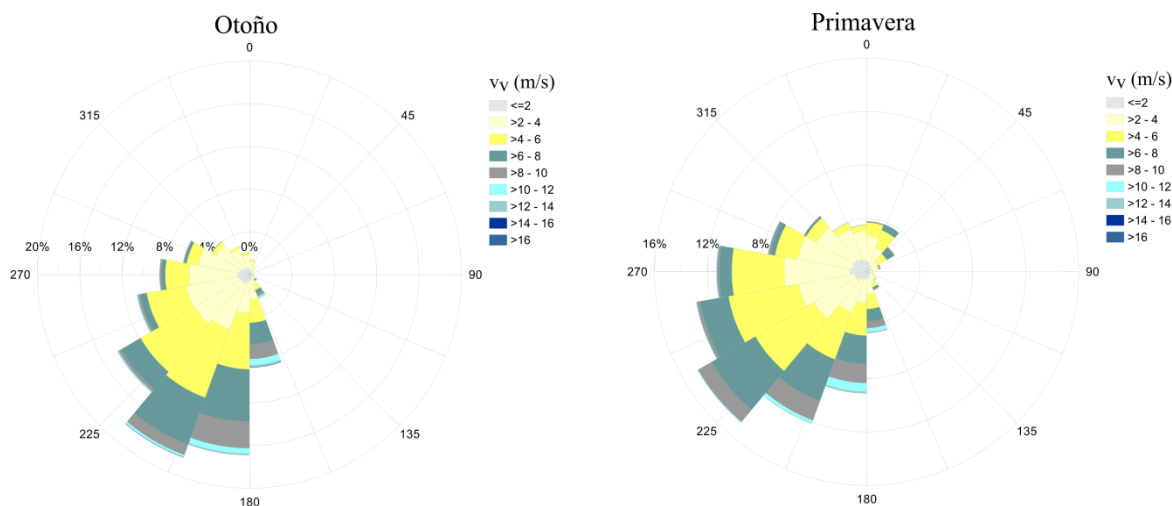


Fig. 4.14. Rosa anual de velocidades sostenidas.



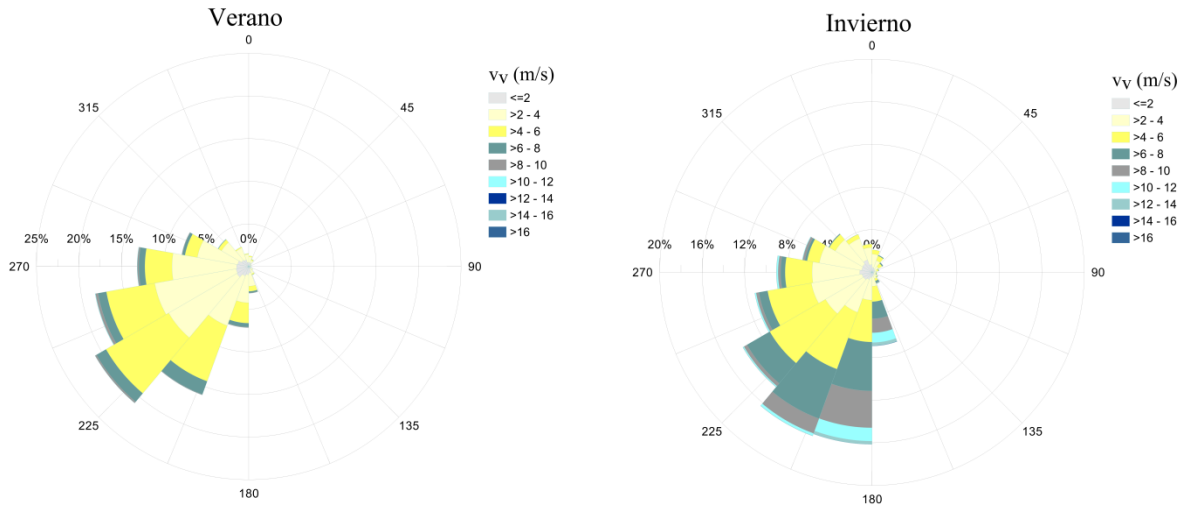


Fig. 4.15. Rosa estacional de velocidades sostenidas.

4.2.5.3 Probabilidad conjunta de velocidad sostenida y dirección

A continuación se presentan las probabilidades conjuntas de velocidades sostenidas y dirección.

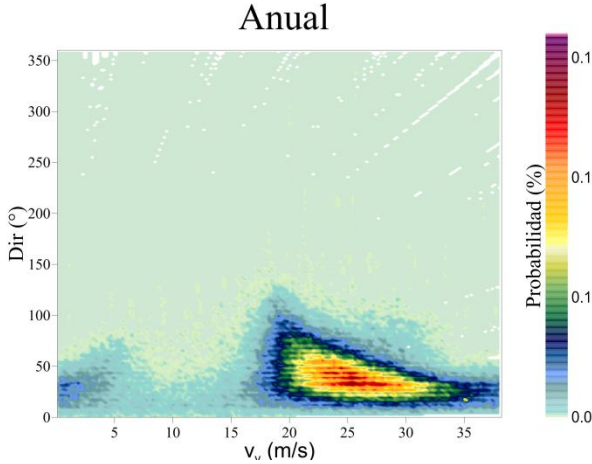


Fig. 4.16. Probabilidad conjunta de velocidad sostenida y dirección de viento.

4.2.6 Análisis extremal

También para este análisis se realizó un ajuste en el papel probabilístico de Weibull. La velocidad con periodo de retorno de 1000 años es de casi 19.0 m/s, con periodo de retorno de 10 años de 17 m/s, con periodo de 2 años de 15.5 m y con un periodo de retorno anual la velocidad es 11 m/s. Los vientos son muy intensos en la zona.

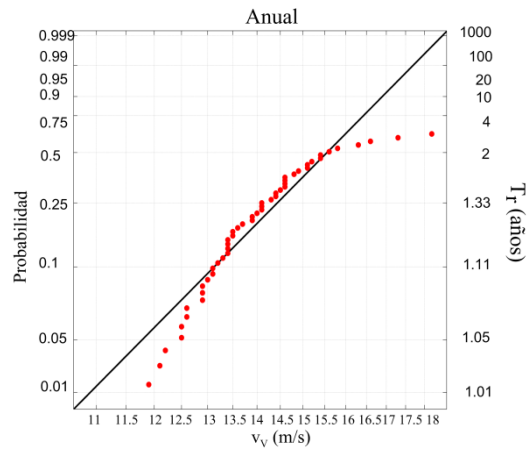


Fig. 4.17. Papel probabilístico de Weibull de velocidades sostenidas de viento anual.

4.2.7 Variabilidad del nivel del mar

El nivel del mar manifiesta las variaciones lentas de la superficie libre, debidas a la marea astronómica y meteorológica, está última se manifiesta en casos puntuales.

4.2.7.1 Marera astronómica

Las mareas astronómicas actúan en el sistema playa-duna delimitando la superficie intermareal que se descubre periódicamente durante las bajamares y es deflacionada por el viento, actuando más acentuadamente sobre la banda supramareal (Flor & Martínez, 1991).

A continuación, en la figura 4.18, se muestra una serie temporal de la amplitud de marea en 30 días comprendidos entre el 23 de diciembre de 2013 al 22 de enero de 2014 obtenidos por la boya del mareógrafo de la UNAM con coordenadas $96^{\circ} 7.4 W$, $19^{\circ} 11.5 N$ que se ubica a 50 km aproximadamente del área de estudio. La marea en la zona de estudio es de tipo mixta diurna con un rango de marea aproximadamente de 0.5 m. Las tablas numéricas de predicción de mareas de la SEMAR, indican que las pleamares máximas se dan en los meses de octubre y noviembre, y las bajamares mínimas en junio y julio.

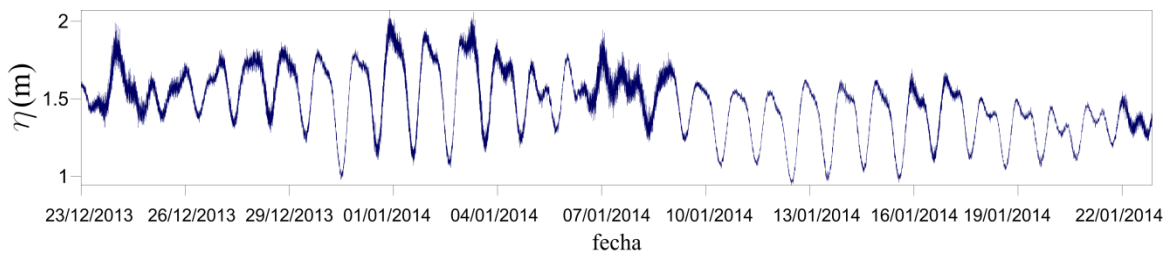


Fig. 4.18. Serie temporal de la amplitud de marea en el mes de enero de 2014.

4.2.7.2 Marea meteorológica

La marea meteorológica se produce durante las tormentas a causa de los gradientes de presiones atmosféricas, intensidad y dirección del viento. Para el estudio de la marea meteorológica se dispone de valores sintéticos de marea de tormenta en la zona obtenidos de (Durán, 2010). Se trata de resultados obtenidos con el modelo hidrodinámico *MaTO* (Posada, et al., 2008), el cual ofrece resultados de sobre-elevación del nivel del mar como función de la dirección e intensidad de vientos sostenidos. La variación del nivel del mar

evoluciona temporalmente hasta que llega un instante a partir del cual el nivel se mantiene constante y es éste el valor considerado como marea meteorológica. En la figura 4.19 se presentan las curvas de inundación por marea de tormenta en la zona costera obtenidas del documento (Silva, et al., 2012), a partir de los datos sintéticos en función de la dirección y velocidad del viento que la genera. El caso más desfavorable se da en la dirección proveniente del Este, siendo aproximadamente de un metro de inundación para vientos cercanos a 43 m/s (155 km/h).

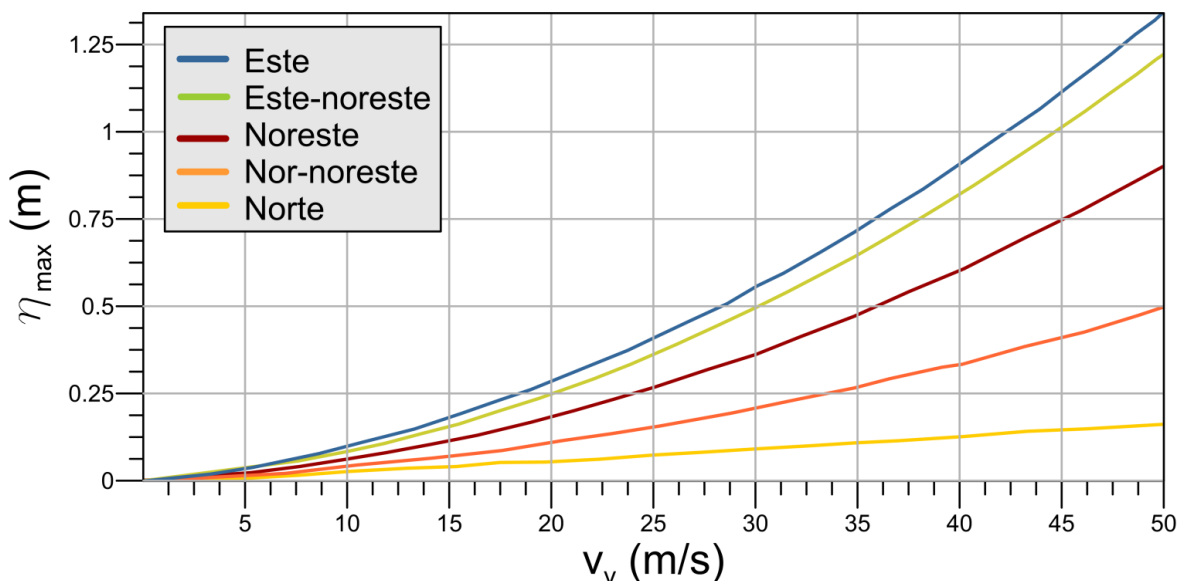


Fig. 4.19. Marea de tormenta según dirección e intensidad del viento en la zona de estudio.

4.3 Análisis mecánico de áridos

4.3.1 Introducción

La granulometría, junto a propiedades de la arena como las características de masa son útiles para adquirir una idea de las dinámicas y las tendencias de transporte a las que estuvo sometido el sedimento y así caracterizar la morfología dunar. Este subcapítulo se dedica al análisis de muestras de arena recolectadas en el área estudiada. No es un estudio plenamente concluyente, puesto que para ello se necesitarían un número mayor de muestras, sin embargo, es un complemento que indica de manera aproximada el peso que el sedimento tiene en la morfología dunar y en los factores que influyen en ella.

Ya en la literatura resalta la importancia del sedimento en la clasificación de los ambientes costeros. El número, la cantidad, el tamaño de rango, la mezcla, y la clasificación de estas poblaciones varían sistémicamente en relación con la procedencia sedimentaria o la dinámica del proceso (Visher, 1969). Se encuentran diferentes investigaciones para caracterizar sedimentológicamente el sistema playa-duna. Entre otros: a partir de las curvas acumuladas ((Spencer, 1963); (Visher, 1971)), a través de las morfoscopías de los granos de cuarzo ((Cailleux, 1943)), la forma superficial de los granos de cuarzo al microscopio electrónico ((Kuenen, 1960); (Margolis & Krinsley, 1971)), las distribuciones de las velocidades de caída del sedimento global (Reed, et al., 1975); (Taira

& Scholle, 1979) o los minerales pesados y ligeros y sus componentes de transporte ((Friedman, 1961); (Hand, 1967), sobre la redondez y esfericidad ((Sahu, 1964); (Patro & Sahu, 1977)), la modalidad y composición mecánica de las arenas ((Mason & Folk, 1958); (Binda & Hildred, 1973). También las distribuciones granulométricas sirven para reconocer los mecanismos del transporte y deposición de los sedimentos ((Hjulström, 1939); (Sahu, 1964), etc).

4.3.2 Parámetros mecánicos del sedimento

Se estudiaron perfiles de 3 dunas distintas: duna embrionaria, cordón de duna con vegetación y cordón de duna sin vegetación, en la figura 4.20 se muestra su localización. El estudio consistió en la realización de trabajo de campo con fecha noviembre de 2013, de cada perfil transversal se recolectaron 5 muestras de arenas. Posteriormente, en laboratorio se realizó el análisis granulométrico de las muestras con el equipo Camsizer. El instrumento de alta tecnología analiza las muestras de arena mediante imágenes digitales. Entre otros se analizó la morfología de grano mediante la esfericidad y la redondez. Estos parámetros tienen relevancia en las características del transporte del sedimento. La redondez se define como el grado de agudeza de las aristas y ángulos, ésta muestra la abrasión y el desgaste que la partícula ha sufrido durante el transporte. Mientras que la esfericidad expresa el grado de aproximación de la partícula a una esfera de igual volumen, esta última repercute en el comportamiento hidrodinámico. La esfericidad tiene un rango de valores comprendidos entre 0 y 1, donde este último corresponde a la esfera, se calculó mediante la ecuación 4.1.

$$SPHT = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Ecuación 4.1

Donde P es el perímetro de la proyección de la partícula en la imagen digital y A es el área de dicha proyección. Otros parámetros analizados se muestran a continuación. El factor de forma es un parámetro adimensional que relaciona la mayor y la menor dimensión de la proyección de la partícula en la imagen.

$$\frac{b}{l_3} = \frac{X_{cmin}}{X_{FEmax}}$$

Ecuación 4.2

Donde X_{cmin} es la menor dimensión y X_{FEmax} es la mayor dimensión. En lo que respecta al análisis granulométrico se obtuvieron el D_{10} , el D_{50} y el D_{90} . Son los valores de los diámetros para los que se retiene el 10, 50 y 90 % del material relativos al número de partículas. El coeficiente de uniformidad determina la uniformidad de la muestra y se expresa mediante la ecuación 4.3.

$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ecuación 4.3

Donde D_{60} es el diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 60% del suelo, en peso. La asimetría S_k , muestra si la distribución es simétrica respecto a la media y la moda. Signo positivo significa tendencia de la muestra a partículas finas y signo negativo tendencia de la muestra a partículas gruesas. Se calcula mediante la ecuación 4.4.

$$S_k = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

Ecuación 4.4

Para medir la dispersión de la población se utiliza la desviación del sedimento respecto de la media expresado por la ecuación 4.5. Ésta nos indica las oscilaciones de la energía cinética del ambiente sedimentario en relación al valor medio. También nos indica el grado de selección de la granulometría. Además refleja el tipo de agente de transporte.

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$$

Ecuación 4.5.

En la tabla 4.1 se muestran el rango de valores y su clasificación para los parámetros de desviación y asimetría según (Folk, 1974).

Tabla 4.1 Modificado de Folk (1974).

Desviación	Asimetría
Extremadamente mal graduada	1.0
4.0	Muy asimétrica positiva
Muy pobremente graduada	0.3
2.0	Asimétrica positiva
pobremente graduada	0.1
1.0	Simétrica
Moderadamente graduada	-0.1
0.7	asimétrica negativa
Moderadamente bien graduada	-0.3
0.5	Muy asimétrica negativa
Bien graduada	-1.0
0.5	
Muy bien graduada	

4.3.3 Resultados

En este apartado se muestran los resultados del análisis granulométrico de las 15 muestras recolectadas. Cabe mencionar que el análisis químico no es parte de este trabajo pero se sabe que la arena es calcárea con fragmentes biológicos calcáreos marinos y minerales de origen volcánico, de color gris- amarillenta, (Geissert & Didier, 1995).

A continuación se presentan los resultados para los diferentes perfiles, figura 4.20, cordón de duna vegetado, cordón de duna sin vegetación y duna embrionaria. En la figura 4.21 se muestran unas gráficas que representan los valores de los parámetros, D_{50} , asimetría, esfericidad, factor de forma de los tres perfiles. Posteriormente se presenta una tabla resumen de los valores presentados en las gráficas y una tabla donde se presentan los modos de transporte de sedimento según (Visher, 1969). Los resultados individuales, gráficas granulométricas y tablas resumen de cada muestra se presentan en el Anexo 2.

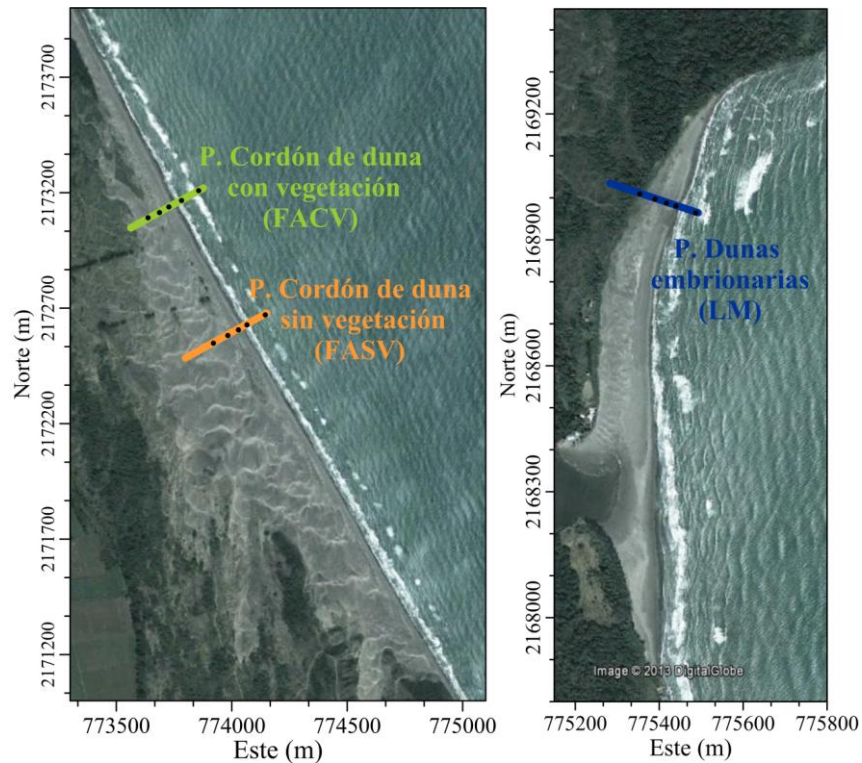


Fig. 4.20. Localización de los puntos de recolección de las muestras de arena en la zona de estudio.

Diversos autores mencionan que las dunas eólicas costeras tienen tamaños menores, clasificaciones excelentes y asimetrías positivas en relación con los de playas adyacentes, entre los que cabe destacar (Keller, 1954), (Folk, 1954), (Mason & Folk, 1958), (Folk & Ward, 1957), (Mabessone, 1963), (Duane, 1964) y (Friedman, 1961), (Visher, 1971). Se presenta en los análisis una disminución del tamaño de grano D_{50} , primera gráfica de la figura 4.21, conforme nos alejamos del mar de acuerdo con los autores mencionados en este párrafo. Cabe destacar que el grano más fino en la cara de barlovento es en la duna sin presencia de vegetación.

En el factor de forma, segunda gráfica de la figura 4.21, se produce un comportamiento inverso al de tamaño de grano cuanto más pequeño es este parámetro significa que la partícula es más alargada, lo que tiene sentido, porque cuanto menor es el tamaño grano es que la partícula estuvo sometida a un mayor desgaste.

La redondez, cuarta gráfica de la figura 4.21, muestra la abrasión y el desgaste que la partícula ha sufrido durante el transporte y se observa una tendencia clara de aumento del parámetro conforme las muestras se alejan del mar. Igualmente coincide con la esfericidad, quinta gráfica de la figura 4.21, que expresa lo que la partícula se aproxima a una esfera, las gráficas tienen la misma tendencia que el factor de forma. La esfericidad repercute en el comportamiento hidrodinámico, las partículas con esfericidad mayor son más difíciles de transportar por tener menos superficie de contacto con el fluido. Si se relaciona la esfericidad con los modos de transporte, tabla 4.3, cuando la esfericidad disminuye se da transporte por suspensión. Conforme las muestras se alejan del mar la esfericidad aumenta y el modo de transporte es por saltación. Cabe mencionar que la duna sin vegetación en la cara de barlovento presenta suspensión, a diferencia de la duna vegetada que no presenta

suspensión, esto puede ser debido a la disminución de energía creada en el medio (el aire) por la vegetación y a que el cambio de pendiente es más abrupto en la duna con vegetación.

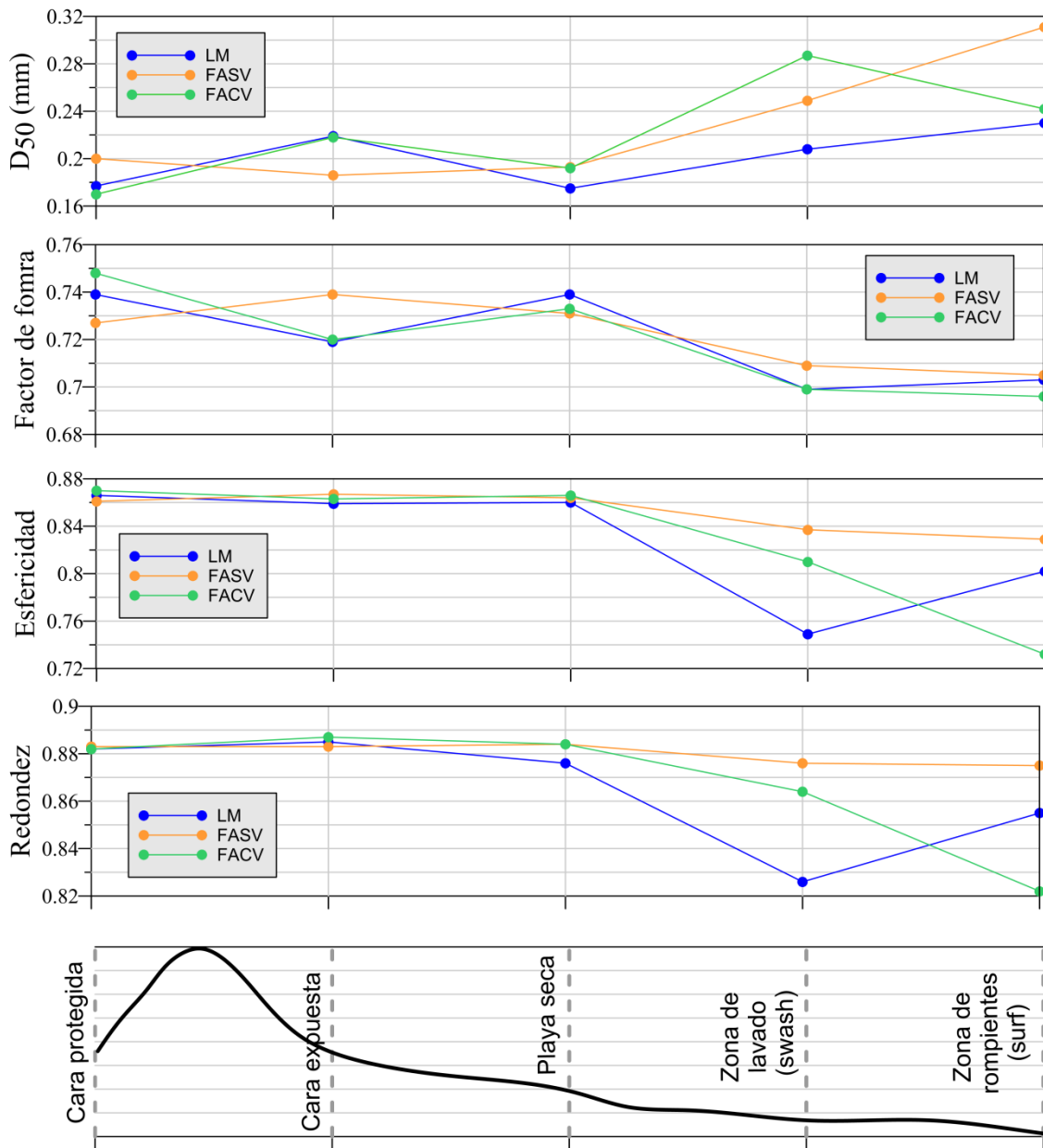


Fig. 4.21. a) Gráficas de asimetría de las muestras de arena de los 3 perfiles, y b) gráficas de desviación de las muestras de arena de los 3 perfiles.

En lo que respecta a la asimetría s_k , tabla 4.2, el perfil de duna embrionaria y de la duna primaria sin vegetación tienden a la misma asimetría de la muestra, salvo que la duna embrionaria trasladada en el espacio, es decir, a lo largo del perfil de duna embrionaria la energía del agente transportador tarda más en disminuir, esto puede ser debido a que el cambio de pendiente playa-duna de la duna embrionaria es menos abrupto y la elevación es menor que la duna sin vegetación. En lo que respecta al cordón de duna vegetada la

muestra tiende hacia los finos, con excepción de la cara de barlovento, donde presenta una tendencia hacia partículas gruesas, esto significa un aumento de energía cinética lo que difiere de lo que (Martins *et al.*, 1997) dice: en materiales transportados por el viento lo más frecuente es encontrar asimetría positiva debido a la adición de sedimentos finos.

En lo que se refiere a la desviación, tabla 4.2, de la muestra en las 3 dunas se observa una muy buena clasificación que mejora gradualmente conforme nos alejamos del mar.

Tabla 4.2

		duna protegida	expuesta	seca	lavado	rompiente
D50	FASV	0.17	0.218	0.192	0.287	0.242
	LM	0.177	0.219	0.175	0.208	0.23
	FACV	0.2	0.186	0.193	0.249	0.311
Redondez (Symm)	FASV	0.882	0.887	0.884	0.864	0.822
	LM	0.882	0.885	0.876	0.826	0.855
	FACV	0.883	0.883	0.884	0.876	0.875
Esfericidad	FASV	0.87	0.863	0.866	0.81	0.732
	LM	0.866	0.859	0.86	0.749	0.802
	FACV	0.861	0.867	0.864	0.837	0.829
Factor de forma	FASV	0.748	0.72	0.733	0.699	0.696
	LM	0.739	0.719	0.739	0.699	0.703
	FACV	0.727	0.739	0.731	0.709	0.705
sk	FASV	muy asimétrica positiva	asimetría negativa	asimetría positiva	asimetría positiva	asimetría negativa
	LM	muy asimétrica positiva	simétrica	simétrica	muy asimétrica negativa	asimetría negativa
	FACV	simétrica	muy asimétrica positiva	simétrica	simétrica	muy asimétrica positiva
desviación	FASV	Muy bien graduada	Muy bien graduada	Muy bien graduada	Moderadamente bien graduada	Moderadamente graduada
	LM	Muy bien graduada	Muy bien graduada	Muy bien graduada	Moderadamente graduada	Moderadamente graduada
	FACV	Muy bien graduada	Muy bien graduada	Muy bien graduada	Moderadamente bien graduada	Moderadamente graduada

Respecto a la tendencia, la clasificación si es mejor la de las dunas que las de las playas adyacentes. El coeficiente de uniformidad en todas las muestras tiene valores inferiores a 2, lo que es de esperar en suelos de playas y dunas.

Tabla 4.3. Modos de transporte para los 3 perfiles según (Visher, 1969).

Modo de transporte por Visher (1969)			
	Cordón de duna sin vegetación	Cordón de duna con vegetación	Duna embrionaria
Rompiente	suspensión +saltación (muchacha)	suspensión + saltación (poca)	suspensión + saltación (muchacha)
Lavado	suspensión +saltación (poco)	suspensión + saltación (muchacha)	suspensión + saltación (poca)
Playa seca	saltación	saltación	saltación
Duna cara barlovento	suspensión +saltación (muchacha)	saltación	saltación
Duna cara barlovento	saltación	saltación	saltación

Todas las muestras son unimodales, ver curvas granulométricas en el anexo 1, sólo hay un agente con capacidad de carga. Pero en la duna primaria vegetada, hay una tendencia a la bimodalidad de la muestra, no muy marcada, con la moda principal 0.16 y una moda secundaria en las partículas de 0.065, si nos fijamos en la ubicación de este perfil, figura 4.20, está al norte de la celda litoral y como ya se mencionó el origen de los sedimentos es fluvial y la dirección es de norte a sur, lo que puede ser que esta presencia de finos sea porque se encuentra más cerca de la laguna el Llano, aportadora de sedimentos.

4.4 Morfología dunar

Para estudiar la morfología se realizaron mediciones de la topografía en la campaña de noviembre de 2013. Ambas playas presentan un perfil disipativo con una zona de rompientes muy amplia.

El Farallón tiene una dinámica estable que ha permitido el desarrollo de vegetación en la playa seca y en las dunas. El sistema playa-duna está formado por playa seca, dunas embrionarias y primer cordón dunar. En zonas puntuales la duna no presenta cobertura vegetal siendo más baja en este caso. De la topografía se obtiene una zona intermareal de 13.43 m media para la playa del Farallón.

La playa de La Mancha tiene un equilibrio dinámico presentando variaciones extremas en la superficie de playa seca, como muestran las imágenes satelitales de Google Earth, Landsat y el trabajo de (Martínez, et al., 2012). En el trabajo de campo realizado en noviembre de 2013 se observaban dunas embrionarias en la zona centro y norte de la playa, como muestra la topografía, figura 4.23. La zona intermareal de 14.18 m media para la playa de La Mancha, debido a su perfil disipativo. De la teoría se puede deducir que en la zona de ascenso-descenso la energía tiene una componente muy alta debida a ondas infragravitorias, esto significa que el *run up* es mayor ampliando la zona de *swash*, en consecuencia ampliando la zona de interacción del oleaje que luego el viento transportará a la duna.

En la figura 4.23 se presentan las topografías de la playa de La Mancha y El Farallón y dos topografías con más resolución del primer cordón de dunas con vegetación y sin vegetación de la playa del Farallón en la figura 4.22.

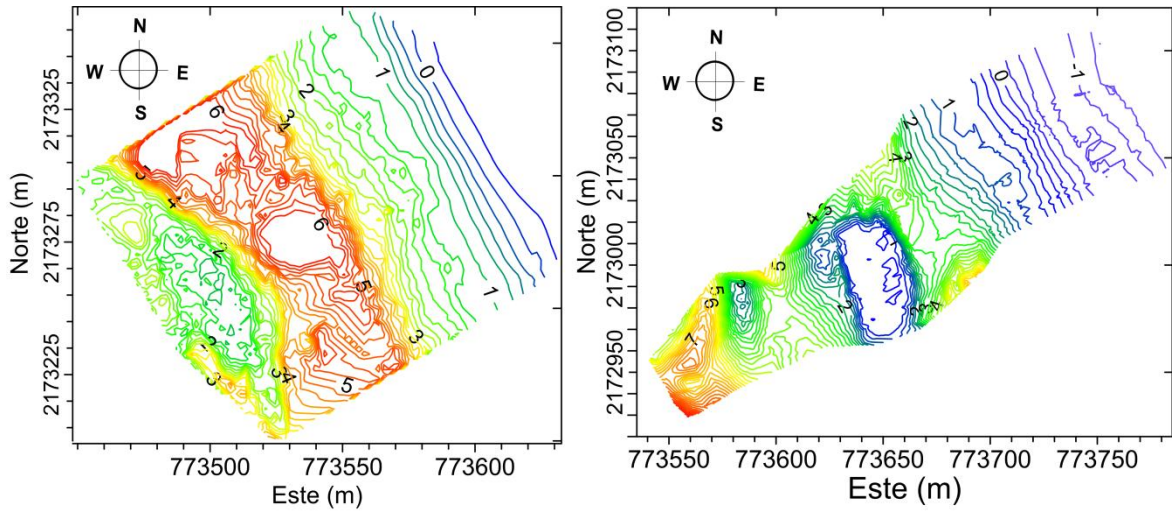


Fig. 4.22. a) Topografía detallada de duna vegetada, Farallón, b) topografía detallada de duna sin vegetación, Farallón.

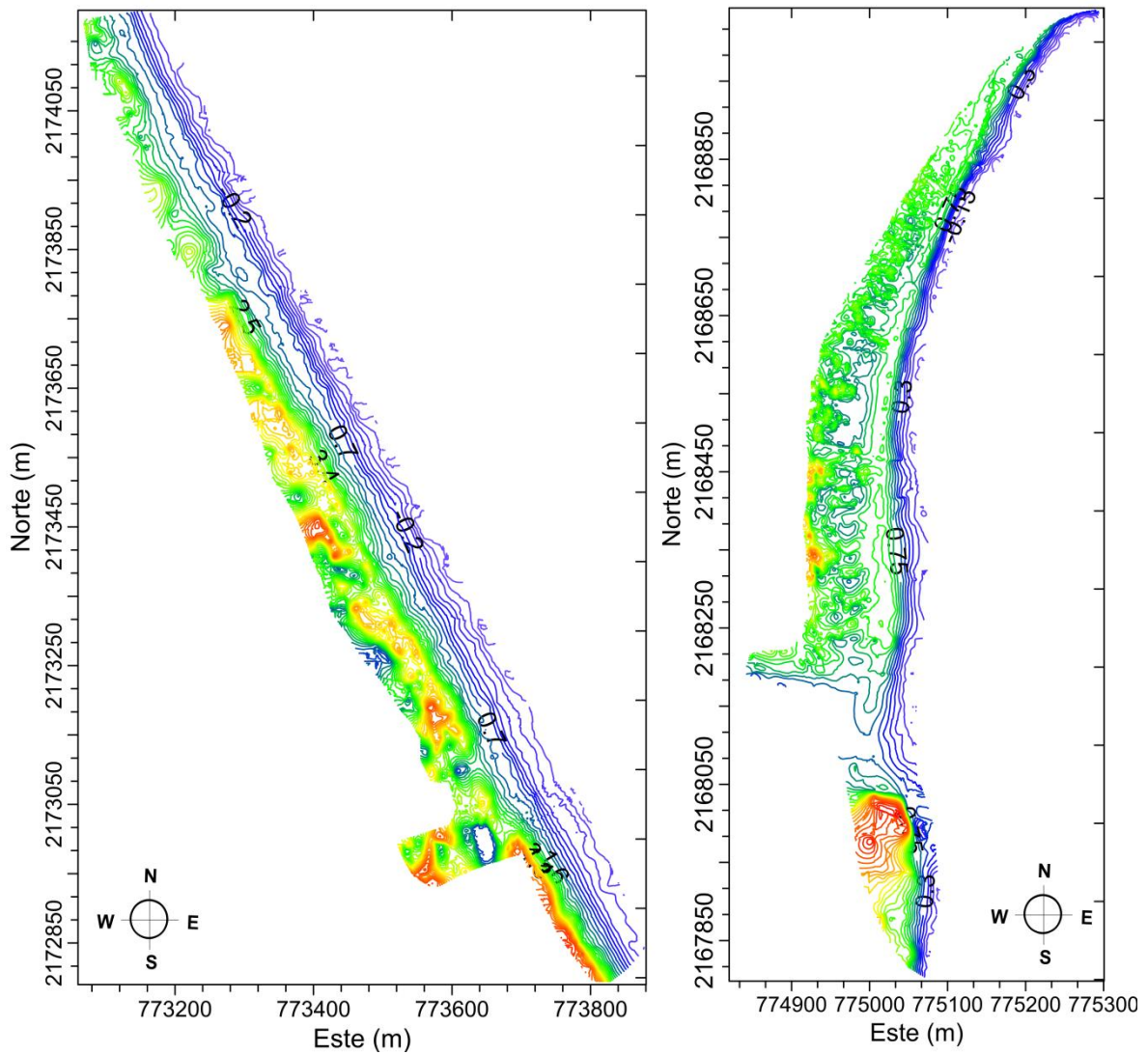


Fig. 4.23. a) Topografía parte de la playa del Farallón, b) topografía de la playa de La Mancha, Farallón.

4.5 Conclusiones

En este capítulo se presentaron el análisis de los agentes actuantes viento, oleaje y elevación del nivel del mar por marea astronómica y de tormenta, de las características físicas y mecánicas del factor sedimento y así como una caracterización de la morfología de las dunas con base en la topografía realizada.

Se marcan en el año dos épocas: una de precipitación y otra seca. La época seca abarca de noviembre a mayo, de noviembre a enero, se presentan los vientos ‘nortes’, es cuando la zona intermareal se seca y soplan los vientos con altas velocidades, se produce un transporte de sedimentos de la playa a la duna. La dirección NE es la gobernante en los vientos, así el eje de las dunas parabólicas del campo de dunas de posplaya de la zona está determinado por esa dirección. Al mismo tiempo es en esta época en la que se producen tormentas con un rango de altura de ola entre 2.0 y 3.0 m, ocasionalmente con alturas de ola mayores a 6.0 m, con periodos de retorno mayores a 5 años. En lo que respecta a la marea de tormentas se puede observar que en la zona las sobreelevaciones son muy bajas, en caso de velocidades de 43 m/s y dirección proveniente del este la marea de tormenta sería de un metro, dicha velocidad supera el periodo de retorno de 1000 años y esta dirección es poco probable como se ha visto en las rosas de viento presentadas. Por lo tanto, la reducida sobreelevación de marea de tormenta y la extensión de la playa seca hace que los temporales tengan poca influencia en la duna. Esto, sumado a una dirección de viento gobernante y a un excedente de arena, ha permitido cordones de dunas muy desarrollados de altura media mayor a 4.0 m. Así los temporales sólo afectan a la playa seca principalmente, como consecuencia desaparecen parcialmente las plantas de la playa seca debido al impacto del oleaje y se debilitan por ausencia de agua dulce y presencia de vientos muy intensos. En una visita en enero de 2014 a la zona de estudio, en la playa del Farallón se observó una erosión en una parte del cordón dunar ubicada al sur de la playa por régimen *swash* con *run-up* en la zona intermareal según la clasificación de (Sallenger, 2000), debido a que en esta parte la playa seca es considerablemente más reducida. Se puede confirmar lo que (Hesp, 1982) menciona: que la característica de la topografía de una playa tiene un efecto directo sobre el volumen de arena transportado y añadir que también en el volumen de duna erosionado.

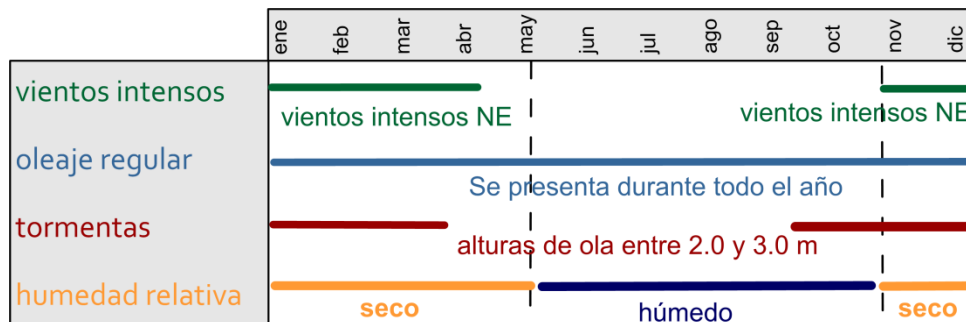


Fig. 4.24. Esquema climatológico anual en el sistema Farallón- La Mancha.

Capítulo 5. Modelo físico

5.1 Introducción

El modelo físico realizado es parte fundamental del presente trabajo de investigación. A través de los resultados es posible hacer una evaluación cualitativa y a pequeña escala de la respuesta morfológica de las dunas bajo distintas condiciones hidrodinámicas y variaciones de cobertura vegetal. En este trabajo se presentan resultados basados en experimentos en los que se analiza la influencia de la vegetación en la erosión de dunas y en el perfil de la playa. En los ensayos se analizaron 2 perfiles iniciales, y se estudió la respuesta hidrodinámica y morfológica de ambos con 4 coberturas distintas de vegetación, también se presenta una relación de los modos de erosión observados con las clasificaciones que hacen (Sallenger, 2000) y (Donnelly, 2007).

Los objetivos del modelo son los siguientes:

- Explicar la respuesta morfológica de dos sistemas playa-duna distintos.
- Analizar la relación existente entre perfil playa y duna en una tormenta.
- Analizar distintos modos de erosión (Sallenger, 2000) y de *overwash* (Donnelly, 2007) de duna.
- Analizar cualitativamente la influencia de la vegetación en la erosión dunar para determinar la respuesta morfológica del perfil de playa-duna.

5.2 Descripción del modelo físico y programa de pruebas

Los ensayos fueron realizados en el laboratorio del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM). El canal mide 0.80 m de ancho, 1.20 m de alto y tiene una longitud de 37.0 m, de la cual se utilizaron 29.10 m. El modelo, de escala 1:20, fue dividido en los últimos 8.0 m con acrílico y así se simularon dos perfiles simultáneamente. En una parte se construyó un modelo de playa con berma, identificado como A, y en la otra uno sin berma, referido como B. En la figura 5.3 se presentan imágenes del modelo donde se aprecia la división y las dunas del modelo con vegetación.

Las características del perfil A, figura 5.1, son las siguientes: la duna tiene una altura de 0.219 m con una anchura en la base de 0.77 m, la pendiente en la cara expuesta es de 26° y la cara protegida de 32° . La berma es horizontal, tiene una longitud de 0.35 m, desde ahí la pendiente media de la playa es de 8° hasta el metro 23.10 donde la pendiente media es de 1° hasta llegar al fondo del canal. El área de playa y duna a partir del nivel medio de agua es de 0.104 m^2 . La duna del perfil B, figura 5.2, tiene una altura de 0.2 m con una anchura en la base de 1.23 m, la pendiente de lado expuesto de la duna es de 9° y la de la cara protegida es de 20° . La pendiente de la playa es de 5° desde el pie de la duna hasta el metro 23.0, de ahí hasta tocar el fondo del canal la pendiente media es de 1° . El área de playa y duna a partir del nivel medio de agua es de 0.169 m^2 . Ambos perfiles se prolongan, desde el pie de la cara protegida de la duna, hacia “tierra” con una superficie plana de medio metro aproximadamente terminada en una pared impermeable, como se aprecia en las imágenes del modelo 5.1, 5.2 y 5.3.

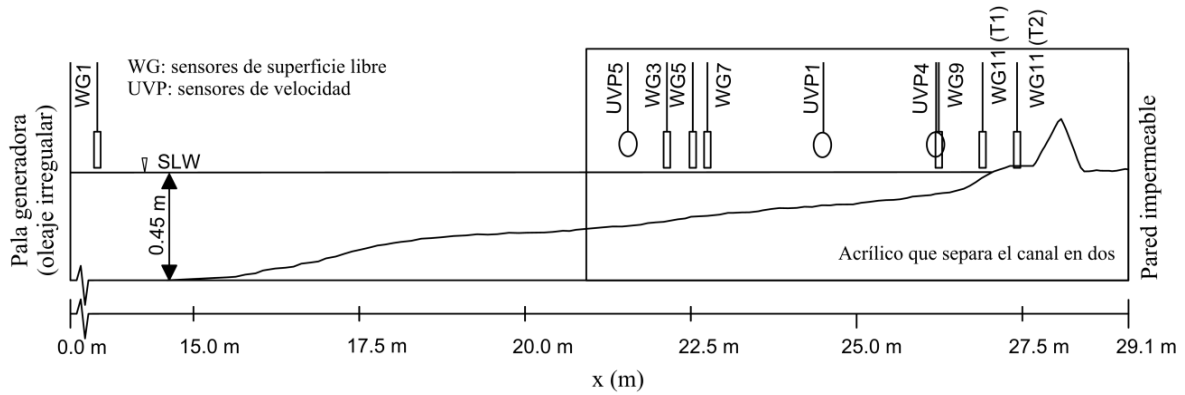


Fig. 5.1 Esquema del modelo para el perfil A

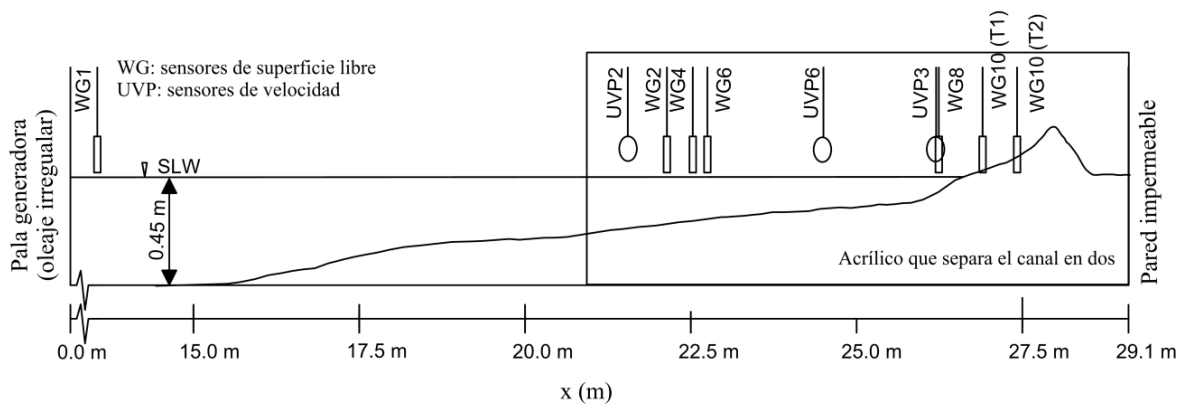


Fig. 5.2 Esquema del modelo para el perfil B



Fig. 5.3 Imágenes de los ensayos

Los ensayos se realizaron con oleaje irregular de espectro JONSWAP con $\gamma = 3.3$, se utilizó el sistema de absorción activa para absorber las ondas reflejadas por el modelo experimental en la pala generadora del oleaje. El nivel medio de agua fue de 0.45 m que se

aumentó hasta 0.5 m para simular sobre-elevación por marea de tormenta. En lo que respecta a la arena utilizada en los ensayos tiene un D_{50} de 0.142 mm, con porcentaje de finos de 6.035 y con un coeficiente de uniformidad de 1.422, en la figura 5.4 se presenta la granulometría.

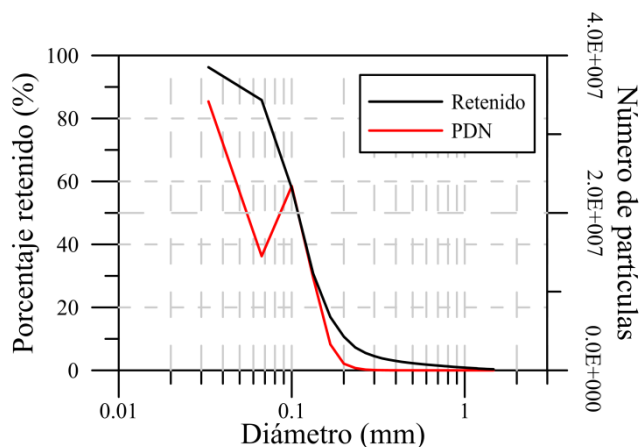


Fig. 5.4 Granulometría de la arena utilizada en el modelo físico.

Para la cobertura vegetal se utilizaron plantas de la especie *Ipomoea pres-caprae*. Cada cobertura vegetal se determinó a partir del número de plantas (cuantificando la parte subterránea) y el área foliar (parte aérea) de cada ensayo. En la tabla 5.1 se presentan las coberturas vegetales utilizadas en cada perfil y se diferencia entre las colocadas en la cara expuesta y en la protegida. Se eligieron 4 coberturas vegetales, una alta, otra media y otra baja. La última se corresponde con la densidad medida en campo para esta especie. A_f es un parámetro adimensional que representa el área foliar entre el área superficial de duna (m^2 área foliar/ m^2 duna).

Cobertura	PA						PB					
	Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta	
	A_f	n° plantas	A_f	n° plantas	A_f	n° plantas	A_f	n° plantas	A_f	n° plantas	A_f	n° plantas
Parte total	0.143	6	0.234	10	0.320	15	0.113	12	0.140	16	0.207	24
Parte trasera	0.106	2	0.251	4	0.337	6	0.089	6	0.080	8	0.156	12
Parte delantera	0.182	4	0.215	6	0.301	9	0.137	6	0.198	8	0.256	12

Tabla 5.1 Cobertura alta, media y baja para los perfiles A y B

Se realizaron 24 ensayos resultado de la combinación de 3 tormentas, 2 perfiles iniciales (con berma y sin berma) y 4 coberturas vegetales (nula, baja, media y alta). En la tabla 5.2 se presenta el programa de ensayos. De ahora en adelante se referirá a los ensayos con la siguiente nomenclatura, la primera letra se refiere al perfil (A, B) las siguientes hacen referencia a las condiciones hidrodinámicas de las 3 tormentas (T1, T2, T3) y la última letra se refiere a la cobertura vegetal: nula (N), baja (B), media (M), alta (A).

Tabla 5.2 Programa de ensayos

Caso	Perfil	h (m)	H _s (m)	T _p (s)	Duración (s)	N° de Iribarren	Cobertura vegetal		
AT1N	A (con berma)	0.5	0.1	1.118	900	0.3728	Nula		
AT2N				1.5652	900	0.4767	Nula		
AT3N				2.012	240	0.5158	Nula		
AT1B			0.1	1.118	900	0.3728	Baja		
AT2B				1.5652	900	0.4767	Baja		
AT3B				2.012	240	0.5158	Baja		
AT1M			0.1	1.118	900	0.3728	Media		
AT2M				1.5652	900	0.4767	Media		
AT3M				2.012	240	0.5158	Media		
AT1A			0.1	1.118	900	0.3728	Alta		
AT2A				1.5652	900	0.4767	Alta		
AT3A				2.012	240	0.5158	Alta		
BT1N			B (sin berma)	0.5	0.1	1.118	900	0.3136	Nula
BT2N						1.5652	900	0.4009	Nula
BT3N						2.012	240	0.5009	Nula
BT1B	0.1	1.118			900	0.3136	Baja		
BT2B		1.5652			900	0.4009	Baja		
BT3B		2.012			240	0.5009	Baja		
BT1M	0.1	1.118			900	0.3136	Media		
BT2M		1.5652			900	0.4009	Media		
BT3M		2.012			240	0.5009	Media		
BT1A	0.1	1.118			900	0.3136	Alta		
BT2A		1.5652			900	0.4009	Alta		
BT3A		2.012			240	0.5009	Alta		

La construcción del modelo se realizó con la siguiente metodología: los ensayos para cada cobertura siempre se efectuaron en el mismo orden, T1, T2 y T3. Primero se colocaron las plantas de manera que al plantarlas no se presentara variación en la compactación de la arena de la duna, ya con las plantas colocadas se construyó la duna con arena seca y se dejó un día de reposo para que las plantas se adaptaran al medio, el proceso constructivo de las dunas se muestra en la figura 5.5. Tal y como se colocaron las plantas, las raíces no afectan, pero los tallos de las plantas tienen un efecto de pilotaje sobre la duna. En T1 la duna se reconstruyó entera, pero en las T2 y T3 solo se reconstruyó la parte erosionada. Esto se planteó así pensando en mantener la misma cobertura vegetal para las 3 tormentas. Ya con la duna construida antes de cada ensayo se saturó la arena con 3 min de oleaje irregular (espectro JONSWAP) de T_p=1.0 s y H_s=0.05 m. La parte modificada del perfil se volvió a construir.

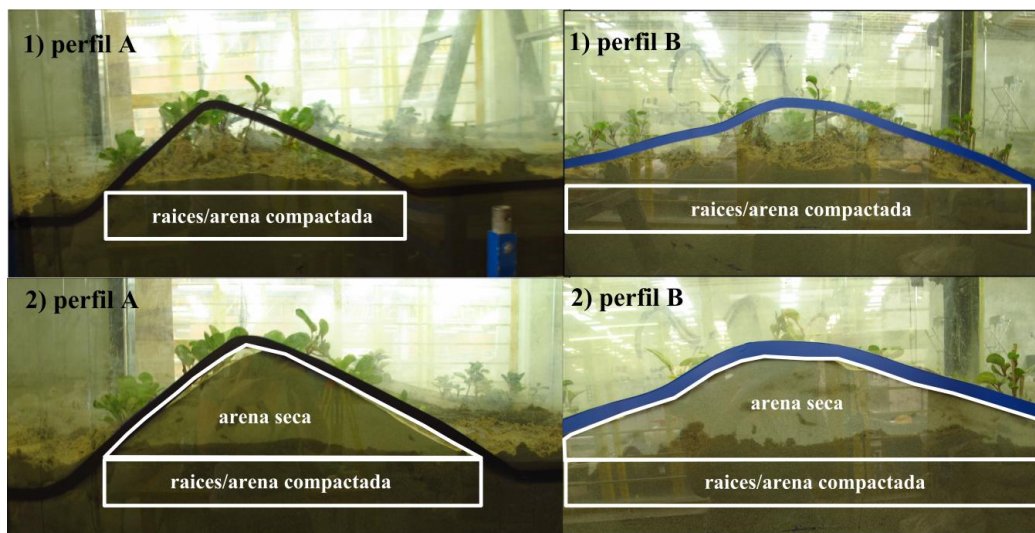


Fig. 5.5 Esquema de la construcción de la duna con plantas

En los ensayos se midió superficie libre con 11 sensores de nivel (WG), velocidades de perfiles con 6 sensores UVP-DUO (Ultrasound Velocity Profiler), perfiles finales con estación topográfica total (ETT) y filmaciones de video con cámara de alta velocidad y cámara de fotografía fija convencional. Los sensores, UVP 4, UVP 5, WG3, WG5, WG7, WG9, WG11, se utilizaron en el perfil A, figura 5.1, y los sensores UVP 2, UVP 3, UVP 6, WG2, WG4, WG6, WG8, WG10 en el perfil B, figura 5.2. El sensor WG1 se colocó de testigo de oleaje incidente, los sensores WG3, WG5 y WG7 se colocaron para medir la reflexión en el perfil A al igual que los sensores WG2, WG4 y WG6 en el perfil B. Los sensores WG9 y WG8 se colocaron para medir la superficie libre antes de la zona de rompientes y los WG10 y WG11 para medir la lámina de agua en la zona de swash, respecto a los sensores de velocidad se colocaron para medir perfiles de velocidades en aguas profundas, intermedias y antes de la zona de rompientes.

5.3 Resultados

En este apartado se presentan los resultados de los 24 experimentos. Antes de exponer el análisis en presencia de vegetación se muestran los resultados de los perfiles iniciales utilizados bajo las 3 condiciones hidrodinámicas. Posteriormente se expone la influencia de la vegetación, en primer lugar se analizan los datos de hidrodinámica, coeficientes de reflexión, evolución de la altura máxima a lo largo del perfil y datos que se obtuvieron del *swash* (lavado) y *overwash* (sobrelavado). Después se analiza la evolución morfológica de los perfiles, con estudio de la erosión del perfil playa-duna.

5.3.1 Perfiles iniciales

La primera parte del trabajo fue la elección de dos perfiles para evaluar la influencia de vegetación con dos morfologías distintas iniciales. Uno con berma (A) y otro sin berma (B), figura 5.1 y 5.2 respectivamente. En este apartado se explica el funcionamiento morfodinámico de cada uno.

Se probaron distintas formas de berma para el perfil A en las que se observó el comportamiento de la berma. Las olas rompen sobre ella y parte del sedimento erosionado

es arrastrado por el *swash* produciendo acreción a pie de duna, de manera que desaparece la berma y hay acreción a pie de duna y se forma una pendiente homogénea. La berma sirve de protección, siempre y cuando tenga las condiciones adecuadas. En este estudio, la berma se eligió para que no funcionase porque se quería ver la erosión de la duna. En lo que respecta al perfil B se eligió un perfil disipativo escalado de la playa Navarro de la costa de Veracruz.

Para explicar el comportamiento de cada perfil se presentan en la figura 5.6 los espectros de energía incidente y reflejada de las tres tormentas para el perfil A y B respectivamente y los perfiles finales en las 3 tormentas, figura 5.7 y 5.8.

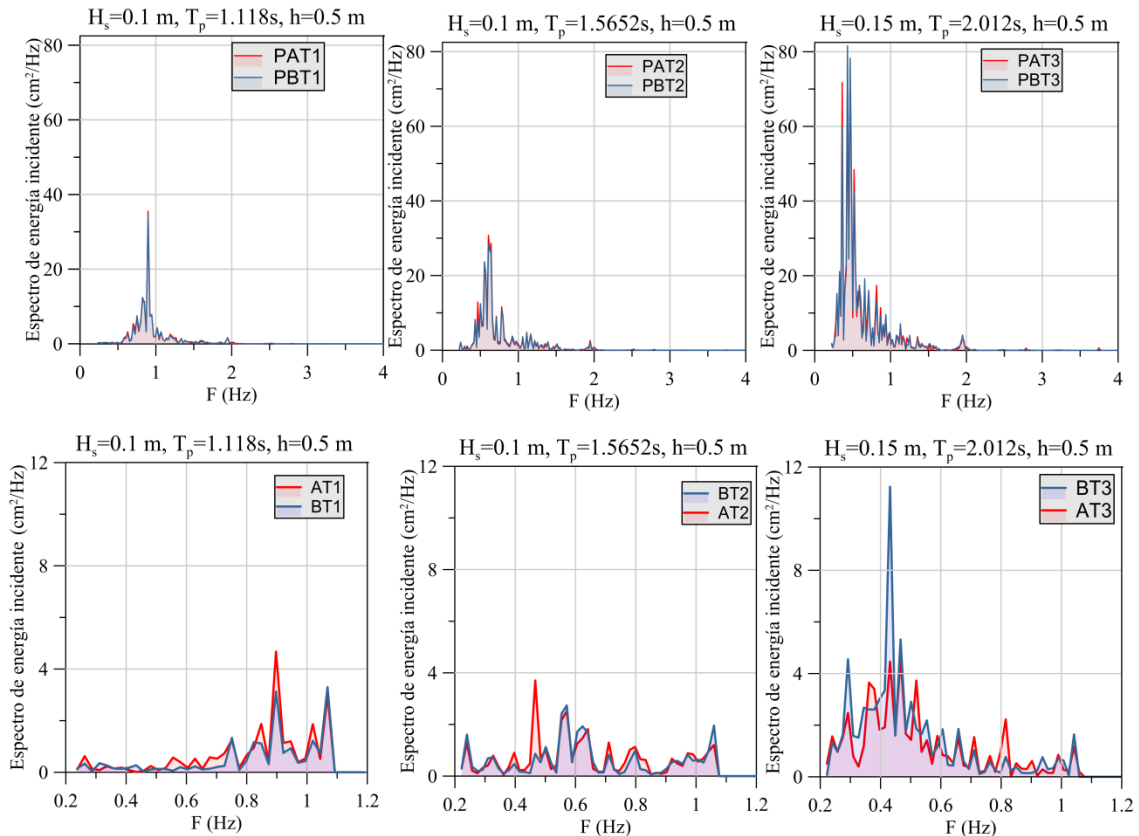


Fig. 5.6 Espectros de energía incidente y reflejada del perfil A obtenidos con las mediciones de los sensores WG3, WG5 y WG7

En la figura 5.6 se ven los espectros de energía incidente del perfil A obtenidos con las mediciones de los sensores (WG3, WG5 y WG7) que son muy parecidos a los obtenidos con los sensores WG2, WG4 y WG6 para el perfil B. En lo que respecta a la forma del espectro de energía reflejada, ambos perfiles para las T1 y T3 presentan un pico en la frecuencia correspondiente a la frecuencia pico del tren de ondas incidente, 0.9-1.1 Hz en el perfil A y 0.5 Hz en el perfil B. Esto quiere decir que la energía reflejada en los casos AT1, BT1, AT3 y BT3 se corresponden a la onda corta. En cambio en los caso AT2 y BT2 los espectros son anchos y no presenta pico.

En la Tabla 5.3 se presentan el momento de orden 0, ecuación 5.1, de cada espectro que representa la varianza de oscilación de la superficie libre, es una magnitud proporcional a la energía por unidad de área del estado de mar.

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f)df$$

Ecuación 5.1

Exactamente no coinciden con los coeficientes de reflexión, ya que estos se calculan con la frecuencia pico y m_0 es el área de todo el espectro (todas las frecuencias). En el caso AT2 el C_r es mayor que para el BT2, pero el total de de energía reflejada es mayor en AT2. Ese espectro es bastante ancho no siendo la energía correspondiente a la frecuencia pico el más representativo.

Las condiciones hidrodinámicas de incidencia de AT2 son mayores que en AT1, pero no la energía reflejada, en T2 se refleja menos energía porque hay más disipación debido al cambio morfológico producido.

Tabla 5.3 Momento de orden 0 de los espectros de energía reflejada.

Tormenta	Perfil A $m_0 [cm^2]$	Perfil B $m_0 [cm^2]$
T1	3.0813	2.2795
T2	3.0342	2.7093
T3	11.5841	14.4289

En el perfil final del caso AT1N se forma una barra en la coordenada $x= 2.5$ m, la berma desaparece formando una pendiente homogénea y se produce un escarpe en la duna, ese volumen de sedimento se acumula a pie de duna y aporta sedimento a la barra, lo mismo ocurre con parte del sedimento transportado de la berma; el modo de erosión aquí presentado es colapso.

las El modo de erosión en AT2N también es colapso, pero el escarpe producido es mayor al igual que la barra generada.

En la tormenta 3 el modo de erosión empieza en colapso repitiéndose el transporte de sedimento en AT1N y AT2N, pero luego se produce *overwash* trasladando el sedimento al pie de duna de la cara protegida de la duna.

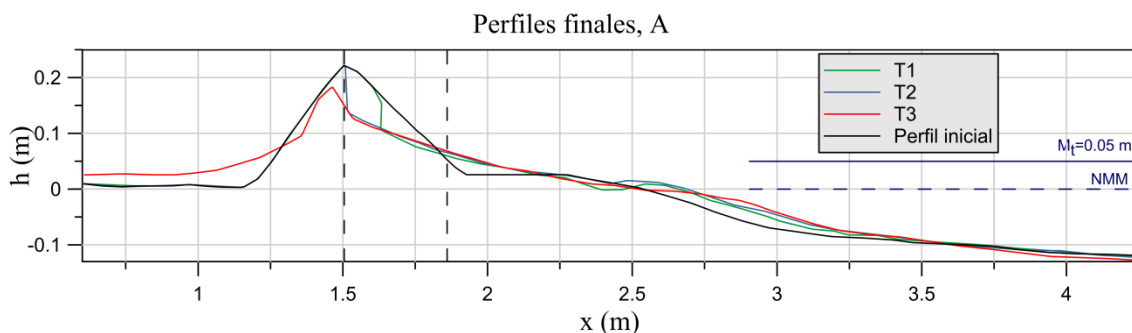


Fig. 5.7 Perfiles finales para las tormentas T1, T2 y T3. Perfil A

En BT1N el modo de erosión es *swash*, se produce erosión en toda la playa y duna y produce poca acreción en la playa sumergida, se intuye que hay pérdida de material fuera de la profundidad de cierre.

En BT2N la erosión producida en la cara de la duna es muy parecida a la de la tormenta uno.

En el caso BT3N, el modo de erosión presentado evoluciona de *swash* a *overwash*, la erosión producida en la cara expuesta de la duna y playa es menor que en los casos BT1N y BT2N, y por el *overwash* se deposita sedimento de la parte protegida de la duna al pie de ésta. En lo que respecta al espectro refleja mucha energía, lo que se intuye es que el cambio morfológico del perfil es mucho menor que en el AT3N que refleja menos energía.

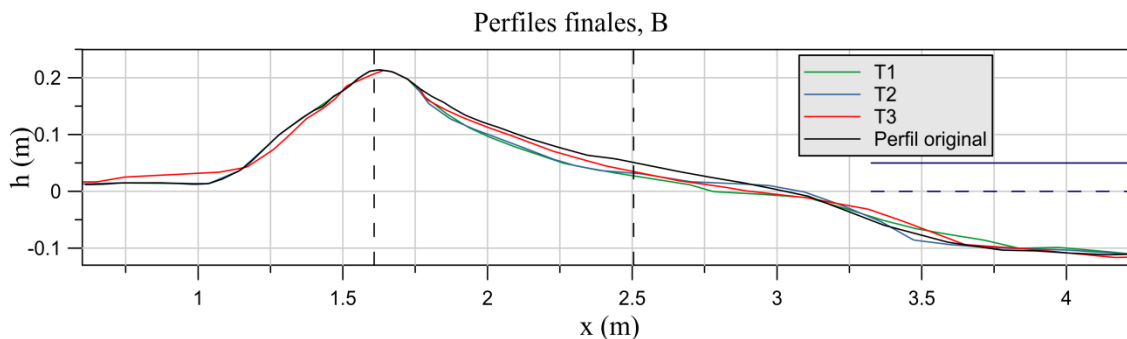


Fig. 5.8 Perfiles finales para las tormentas T1, T2 y T3. Perfil B

Como resumen de los comportamientos de los perfiles los modos de erosión que se dan en el perfil A son colapso llegando al *overwash* en T3 y para el perfil B se produce *swash* y *overwash*. Respecto al transporte de sedimentos, el material de la duna y playa se acumula parte en la playa sumergida y parte se va fuera de la profundidad de cierre. En el perfil A los modos de erosión son colapso y *swash*, el sedimento del escarpe producido y parte del sedimento de la berma se acumula a pie de duna y en la barra. En ambos perfiles el *overwash* acumula sedimento detrás de la duna, menor volumen en el perfil B que en el A. La duna aporta más sedimento al perfil de playa en el modo colapso que en el *swash*, pero cuando se produce *overwash* el volumen de arena perdido (detrás de la duna) es mayor en el perfil A que en el B. En lo que respecta a los espectros el perfil A refleja más en las tormentas 1 y 2 y el B en la tormenta 3.

5.3.2 Análisis hidrodinámico en presencia de vegetación

5.3.2.1 Reflexión

A continuación se presentan los coeficientes de reflexión que fueron calculados con el método (Mansard & Funke, 1980) modificado por (Baquerizo, 1995), para los cuales se utilizaron las mediciones de los sensores WG3, WG5, WG7 (figura 5.1) para el perfil A, y los sensores WG2, WG4, WG6 (figura 5.2) para el perfil B.

En la figura 5.9 a) se representa el coeficiente de reflexión en relación con los números de Iribarren para las distintas coberturas del perfil A y en figura 5.9b) los del perfil B. La pendiente considerada para el número de Iribarren, presentados para cada perfil en la tabla 5.2, es la que resulta de unir los puntos con cotas iguales a la altura de ola significativa por encima y por debajo del nivel del agua.

$$I_{rp} = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_s}{L_p}}}$$

Ecuación 5.2

Lo que se aprecia en ambos perfiles es que para números de Iribarren bajos no hay una diferencia significativa de los coeficientes de reflexión de las distintas coberturas, dicha diferencia aumenta cuanto mayor es el número de Iribarren. Al aumentar el número de Iribarren, los coeficientes de reflexión en el perfil B tienen una tendencia a aumentar de manera exponencial y no es clara la influencia de la cobertura vegetal. En el perfil A se observa que cuanto mayor es la cobertura vegetal mayor es la reflexión. En la gráfica correspondiente a este perfil se presenta un punto de inflexión a partir del cual la tendencia del coeficiente de reflexión es a disminuir con el número de Iribarren. Lo que puede estar relacionado con que, para la tormenta 3 en el perfil A, se produce *overwash* y un cambio muy significativo en la duna (desaparece casi la mitad de ésta) resultando un perfil más disipativo; en cambio en el perfil B aunque se produce también *overwash*, el cambio morfológico en la duna respecto al perfil inicial es mucho menor y el perfil mantiene su carácter reflejante.

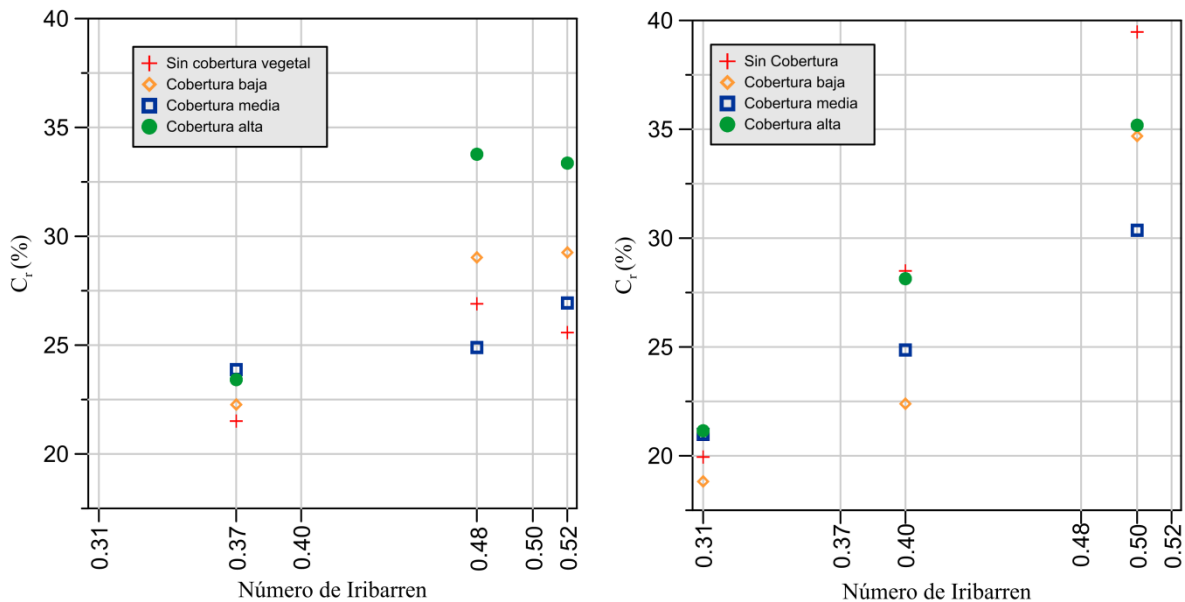


Fig. 5.9 a) Coeficientes de reflexión en función del n° de Iribarren para el perfil A. b) Coeficientes de reflexión en función del n° de Iribarren para el perfil B

A continuación se presentan, en un solo gráfico, los coeficientes de reflexión de ambos perfiles. Cabe señalar que no existe una convención universal respecto a la pendiente representativa de cada perfil para determinar el número de Iribarren. Aun así, de esta información se obtuvo una familia de curvas (ecs. 5.2 a 5.7) obtenidas que permiten estimar los coeficientes de reflexión como función del número de Iribarren y del parámetro adimensional A_f . La familia de curvas es una ecuación exponencial, que tiende a separarse

conforme aumenta el número de Iribarren y se presentan mayores coeficientes de reflexión conforme aumenta la cobertura vegetal.

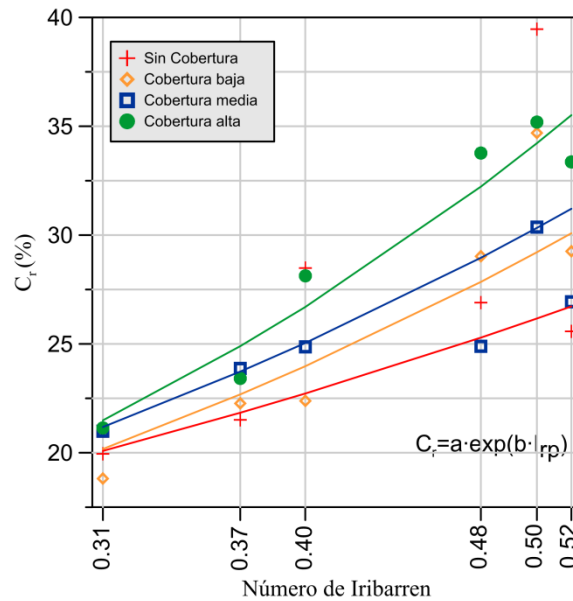


Fig. 5.10 Coeficientes de reflexión en función del n° de Iribarren para el perfil A

$$C_r = a(A_f) \cdot e^{b(A_f) \cdot I_{rp}}$$

Ecuación 5.3

$$a(A_f) = a_1 \cdot A_f^3 + a_2 \cdot A_f^2 + a_3 \cdot A_f + a_4$$

Ecuación 5.4

$$b(A_f) = b_1 \cdot A_f^3 + b_2 \cdot A_f^2 + b_3 \cdot A_f + b_4$$

Ecuación 5.5

$$C_r = a(A_f) \cdot e^{b(A_f) \cdot I_{rp}}$$

Ecuación 5.6

$$a(A_f) = -1781 \cdot A_f^3 + 799.7 \cdot A_f^2 + -95.13 \cdot A_f + 12.9$$

Ecuación 5.7

$$b(A_f) = 344.8 \cdot A_f^3 + -149.2 \cdot A_f^2 + 18.57 \cdot A_f + 1.412$$

Ecuación 5.8

En la figura 5.11 se presenta la evolución de las alturas de ola máximas totales a lo largo del perfil. En la derecha, de arriba abajo, se presentan las tormentas AT1, AT2 y AT3 y en la izquierda, en el mismo orden las alturas de ola para las tormentas BT1, BT2 y BT3. En la tormenta 3 no está la medición del sensor WG11 para el perfil A, ni tampoco la

respectiva al sensor WG10 para el perfil B porque se usaron para medir el rebase, aunque no sé pudo realizar dicha medición.

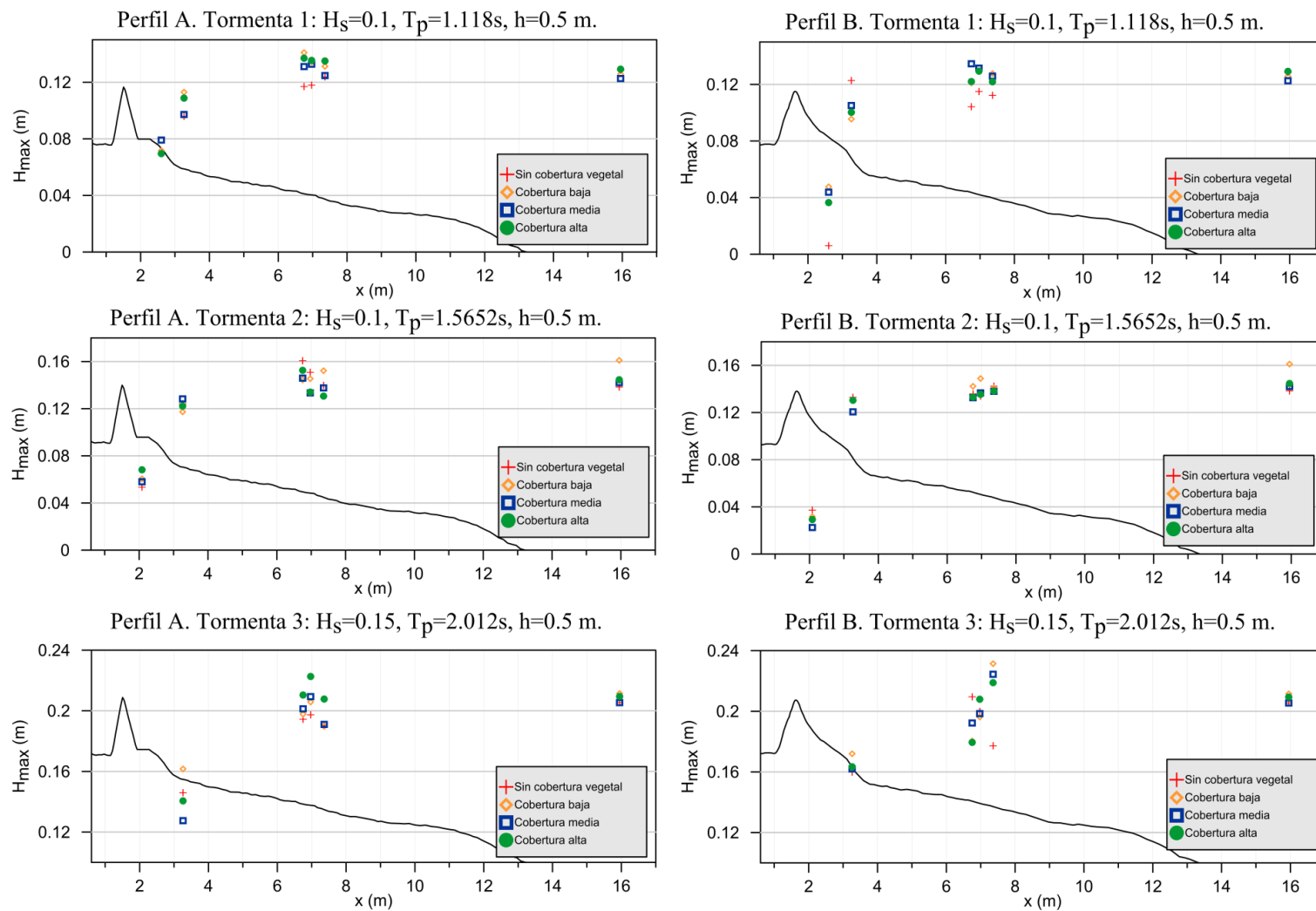


Fig. 5.11 Evolución de la altura de ola máxima total para los distintos casos

5.3.2.2 Swash, rebase y overwash

El análisis de la lámina de agua en el *swash* se realizó para las tormentas T1 y T2, para ello se consideran los sensores WG11 y WG10 para los perfiles A y B, respectivamente, con coordenada $x=26.90\text{m}$ para T1 y $x=27.42\text{ m}$ para T2. La medición de los sensores no fue continua porque no estaban sumergidos todo el tiempo, por ello se obtuvo el promedio de las elevaciones máximas.

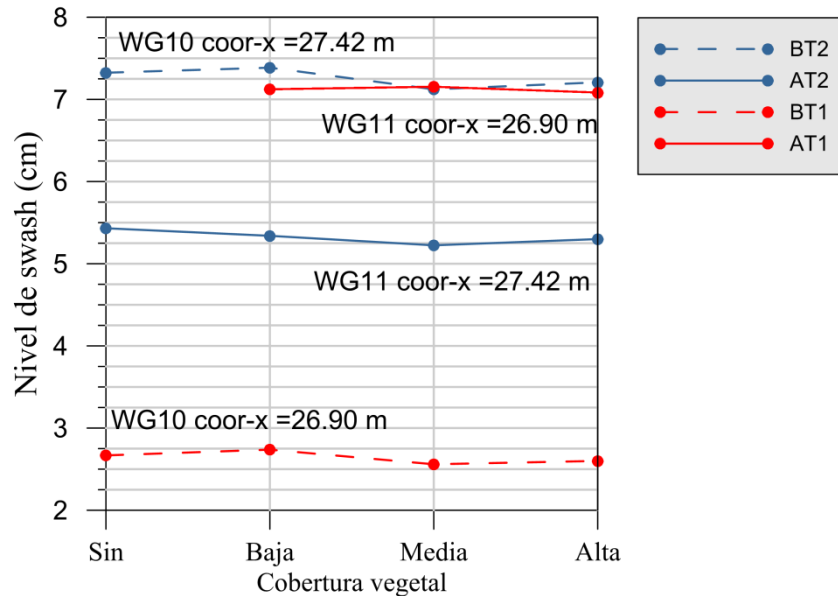


Fig. 5.12 Elevación de la superficie libre en el *swash* para T1 y T2

En la figura 5.12 se muestra una tendencia de *swash* a disminuir con la cobertura vegetal, esto puede deberse a que la superficie foliar de las plantas aumenta la fricción de las plantas reduciendo la velocidad de la lámina de agua y aumentando la filtración de ésta. (Kobayashi, et al., 2013) dicen que la vegetación disminuye la velocidad en la zona de *swash* y en la zona de surf, pero aumenta la movilización en la zona de rompientes. Es de mencionar que ellos utilizaron palos de madera rígidos para simular la vegetación.

Para la tormenta 3 no se pudieron completar las mediciones de *overwash*, pero se tienen imágenes inmediatamente después del ensayo, figura 5.13. De la información gráfica y de las mediciones de perfiles finales que más adelante se presentan, se puede ver que cuando no hay plantas se produce *overwash* y cuando hay plantas se produce rebase.

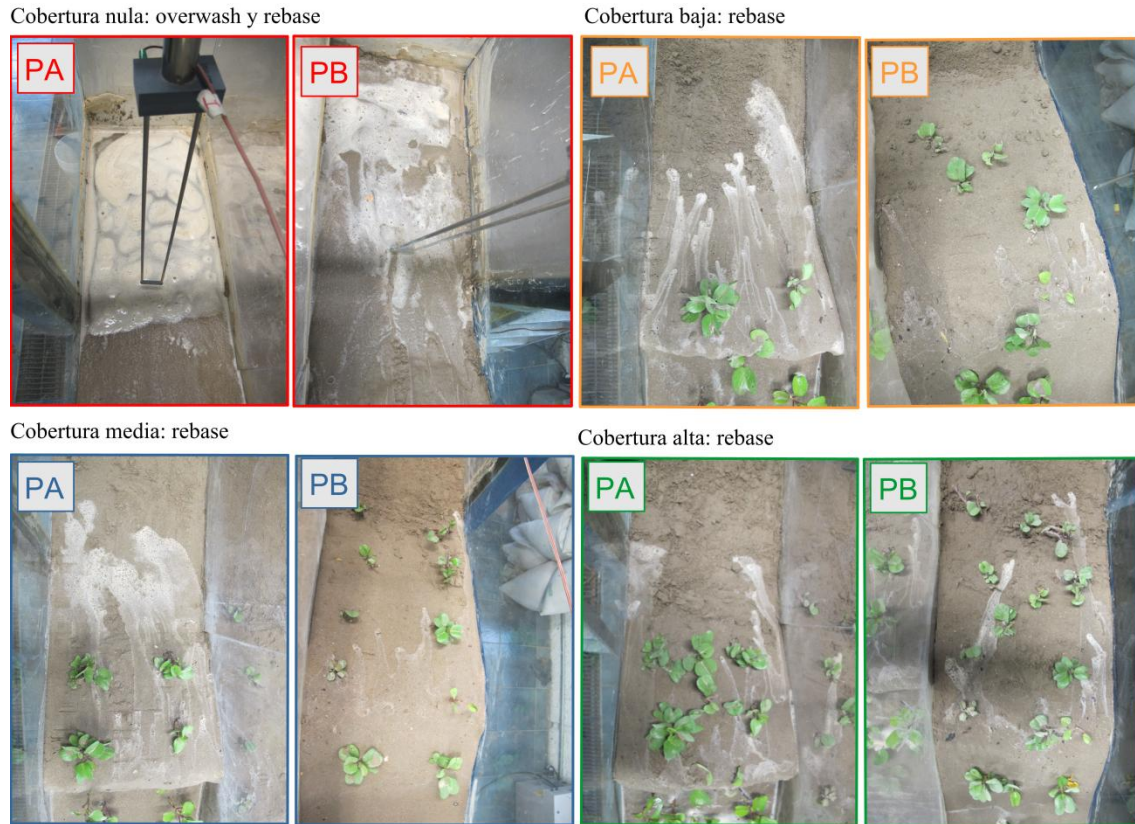


Fig. 5.13 Imágenes del rebase producido en las dunas para distintas coberturas vegetales.

5.3.3 Análisis morfológico en presencia de vegetación

En este apartado se describe la respuesta morfológica de los perfiles playa-duna de cada prueba.

En los ensayos se presentaron distintos modos de erosión de acuerdo con la clasificación de (Sallenger, 2000). Para el AT1 y AT2, AT3B, AT3M y AT3A el modo de erosión fue colapso, y en AT3N *overwash*. Para el BT1 y BT2, BT3B, BT3M y BT3A el modo de erosión de *swash* y en el caso AT3N se presentó *overwash*.

En las siguientes figuras se presentan los perfiles finales A y B para las 3 tormentas, debajo de cada perfil se presenta la variación de los perfiles finales respecto al perfil inicial. Seguindo de las gráficas se expone una tabla con las áreas (erosión o acreción) de tres zonas definidas de la siguiente manera. Zona III: de la altura de cierre al nivel del agua, zona II: del nivel de agua a la cresta de la duna, y zona I: de la cresta de la duna en adelante.

La profundidad de cierre se calculó mediante la ecuación de (Birkemeier, 1985).

$$h_* = 1.75H_{s12} - 57.9 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT^2} \right)$$

Ecuación 5.9

Para las 3 tormentas se obtuvieron las siguientes profundidades de cierre.

$$h_{*T1} = 0.1277 \text{ m}$$

$$h_{*T2} = 0.1496 \text{ m}$$

$$h_{*T3} = 0.2297 \text{ m}$$

En la figura 5.14 se presentan los perfiles finales de los casos AT1 para las distintas coberturas, se observa que no hay mucho cambio en los perfiles finales, lo que ya se había anticipado con los coeficientes de reflexión.

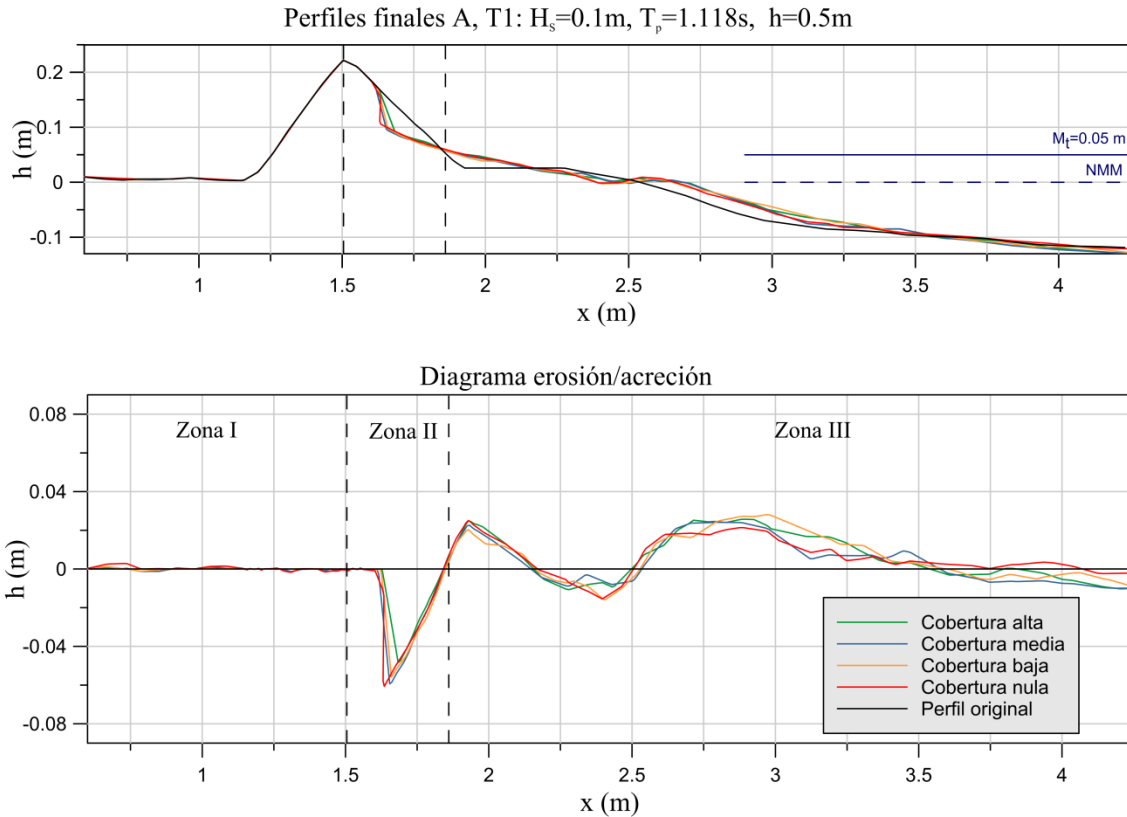


Fig. 5.14 Perfiles finales y diagrama erosión/ acreción AT1

Para todas las coberturas el perfil evoluciona de la misma manera, en la coordenada $x=2.6 \text{ m}$ de la figura 5.14 se forma una barra y la berma desaparece formándose una pendiente media de 8° . Respecto a las erosiones en la zona II, la menor erosión se produce para la cobertura alta y la menor para la cobertura media seguida de la que no tiene cobertura vegetal, aunque la diferencia no es muy significativa en lo que respecta a la cobertura. El modo de erosión presentado en todos los casos es colapso, se presenta un escarpe en la duna y a pie de duna se produce acreción por el transporte de sedimentos de la berma por el *swash* y de la duna por el colapso.

AT1			
Cobertura vegetal	zona I (m^3/m)	zona II (m^3/m)	zona III (m^3/m)
nula	0	-0.0069292441	0.0160238500
baja	0	-0.0067831565	0.0144658920
media	0	-0.0072191044	0.0109885550

Tabla 5.4 Volúmenes de acreción (+) y erosión (-), AT1

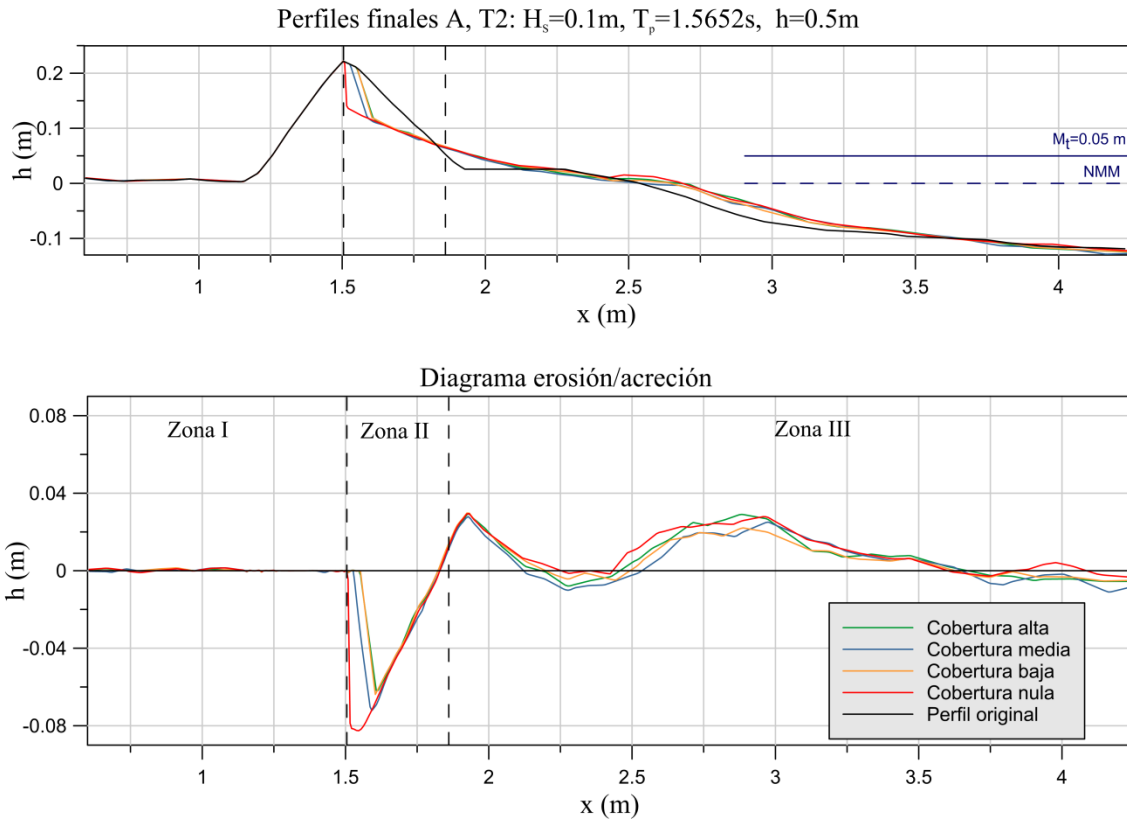


Fig. 5.15 Perfiles finales y diagrama erosión/ acreción AT2

También en los casos AT2 se presenta modo de erosión colapso, desaparece la berma y hay acreción a pie de duna y una pendiente media de 8° , la barra que se forma en la misma posición que en la tormenta 1 es más larga y menos pronunciada. Cabe mencionar que T2 sólo se diferencia de T1 por tener un periodo mayor. En este caso se produce la menor erosión para la cobertura vegetal alta, seguida de la baja y la mayor erosión se produce para la que no tiene cobertura.

AT2			
Cobertura vegetal	zona I (m^3/m)	zona II (m^3/m)	zona III (m^3/m)
nula	0.0	-0.0142802410	0.0275307960
baja	0.0	-0.0083333025	0.0137717820
media	0.0	-0.0108904210	0.0093342165
alta	0.0	-0.0082762694	0.0179866860

Tabla 5.5 Volúmenes de acreción (+) y erosión (-), AT2

En la tormenta AT3S la erosión empieza en colapso y termina en overwash, lo que en los casos con cobertura es colapso con presencia de rebase. En la tormenta 3 la erosión en

la zona II aumenta conforme disminuye la cobertura vegetal. La barra formada es menos pronunciada, pero igualmente desaparece la berma y se forma una pendiente media de 9° .

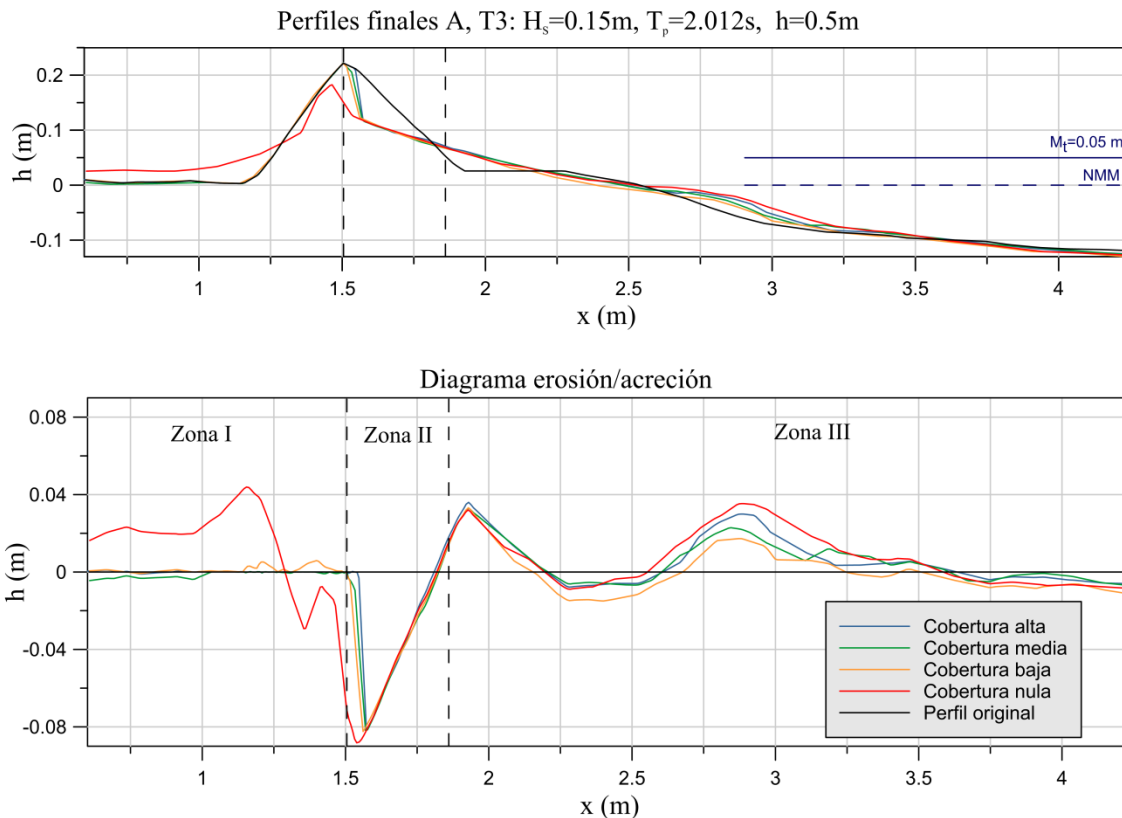


Fig. 5.16 Perfiles finales y diagrama erosión/ acreción AT3

El modo de *overwash* que se presenta, según la clasificación de (Donnelly, 2007) es reducción de la duna. Aunque no se midió, se pudo observar que en cuanto empezó el *overwash* el tiempo de destrucción de la duna fue muy corto.

De los datos obtenidos en este caso se podría decir que hay cambio en el modo de erosión en presencia de vegetación, pero lo que se intuye en la respuesta de los perfiles, que ha sido la misma para las distintas coberturas, es que las plantas no modifican el modo de erosión sino que lo mantienen en el tiempo, es decir, aumenta el tiempo de resistencia de la duna, pero no cambia su respuesta morfológica.

(Kobayashi, et al., 2013) dicen que en la pendiente expuesta la vegetación reduce el escarpe producido e impidió el rebase en un inicio y luego lo redujo. De los casos aquí analizados sí se han observado los efectos de la vegetación en el rebase y también se ha visto variación en el tamaño de escarpe, pero no con números de Iribarren bajos.

AT3			
Cobertura vegetal	zona I (m ³ /m)	zona II (m ³ /m)	zona III (m ³ /m)
nula	0.0139459860	-0.0168051790	0.0082839008
baja	0.0	-0.0126628370	-0.0253434570
media	0.0	-0.0120841830	-0.0046054642
alta	0.0	-0.0103223970	-0.0009850129

Tabla 5.6 Volúmenes de acreción (+) y erosión (-), AT3

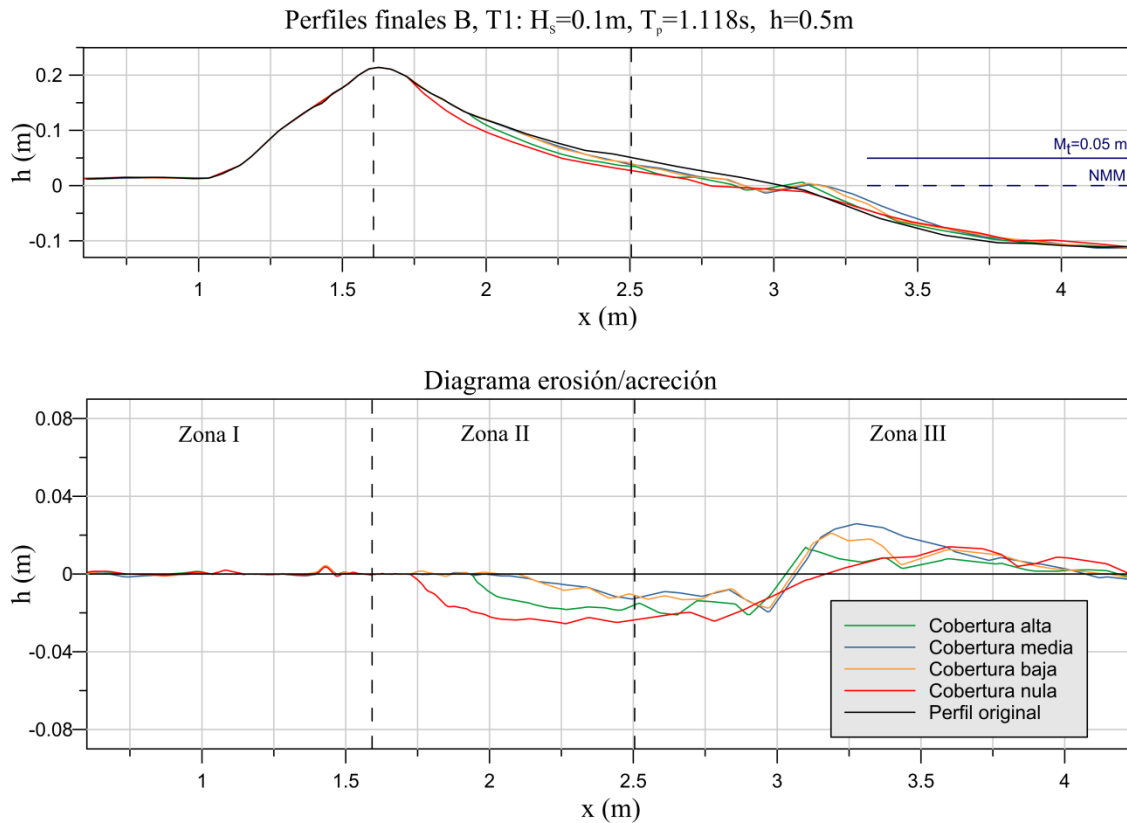


Fig. 5.17 Perfiles finales y diagrama erosión/ acreción BT1

En los casos BT1 el modo de erosión es *swash* que no produce cambios morfológicos significativos en la duna y la pendiente media se mantiene. En este caso se forma una barra en la coordenada $x=3.1$ m, más alejada de la línea de costa que en los casos AT1. A diferencia, con este último se produce erosión desde la barra hasta donde alcanza la lámina de agua. La erosión mayor se produce sin plantas, y las menores para las coberturas intermedias.

BT1			
Cobertura vegetal	zona I (m^3/m)	zona II (m^3/m)	zona III (m^3/m)
nula	0.0	-0.0157810790	-0.0015342684
baja	0.0	-0.0029450335	0.0035851217
media	0.0	-0.0029429118	0.0068505475
alta	0.0	-0.0084961040	-0.0023434614

Tabla 5.7 Volúmenes de acreción (+) y erosión (-), BT1

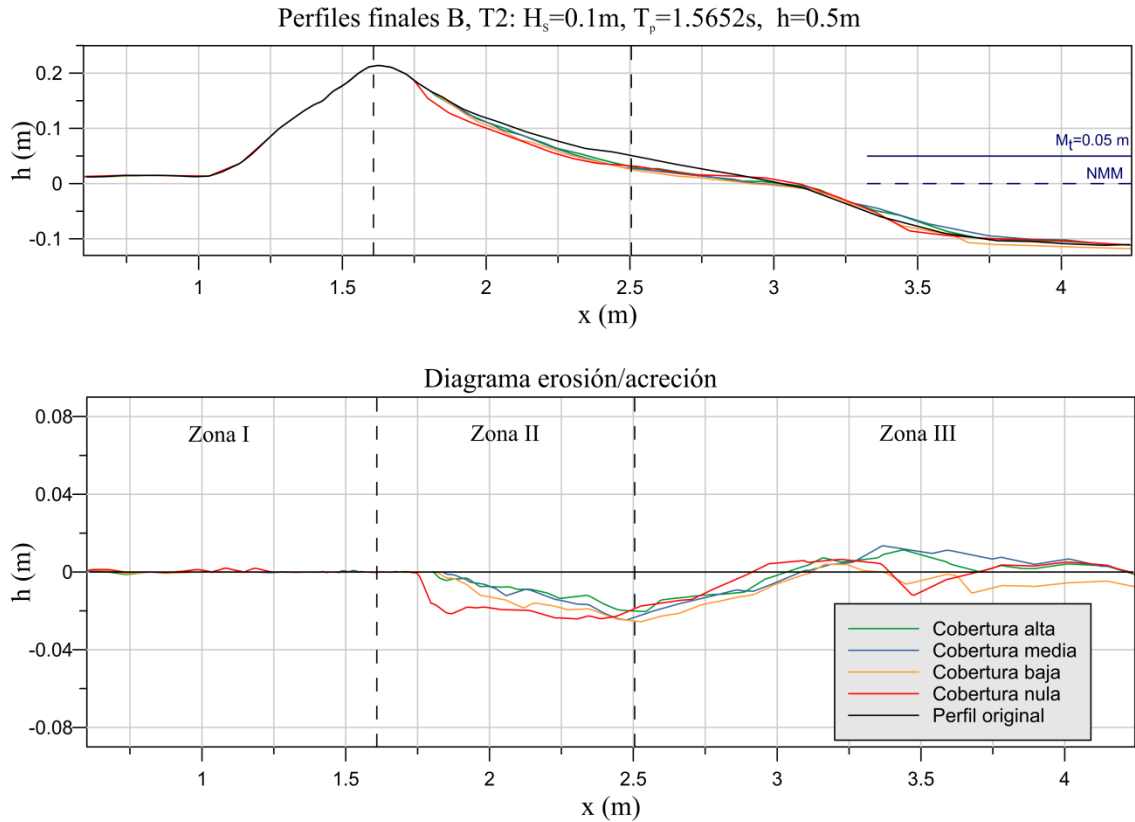


Fig. 5.18 Perfiles finales y diagrama erosión/ acreción

Para los casos BT2 el modo de erosión también es *swash* y se mantiene el comportamiento del perfil presentado en el caso BT1, en este caso la barra que se forma es menos pronunciada. Se produce más erosión cuanto menor es la cobertura vegetal.

BT2			
Cobertura vegetal	zona I (m^3/m)	zona II (m^3/m)	zona III (m^3/m)
nula	0.0	-0.0152007660	0.0055475359
baja	0.0	-0.0107355050	-0.0251404760
media	0.0	-0.0084272726	0.0001684925
alta	0.0	-0.0071816035	0.0012783368

Tabla 5.8 Volúmenes de acreción (+) y erosión (-), BT2

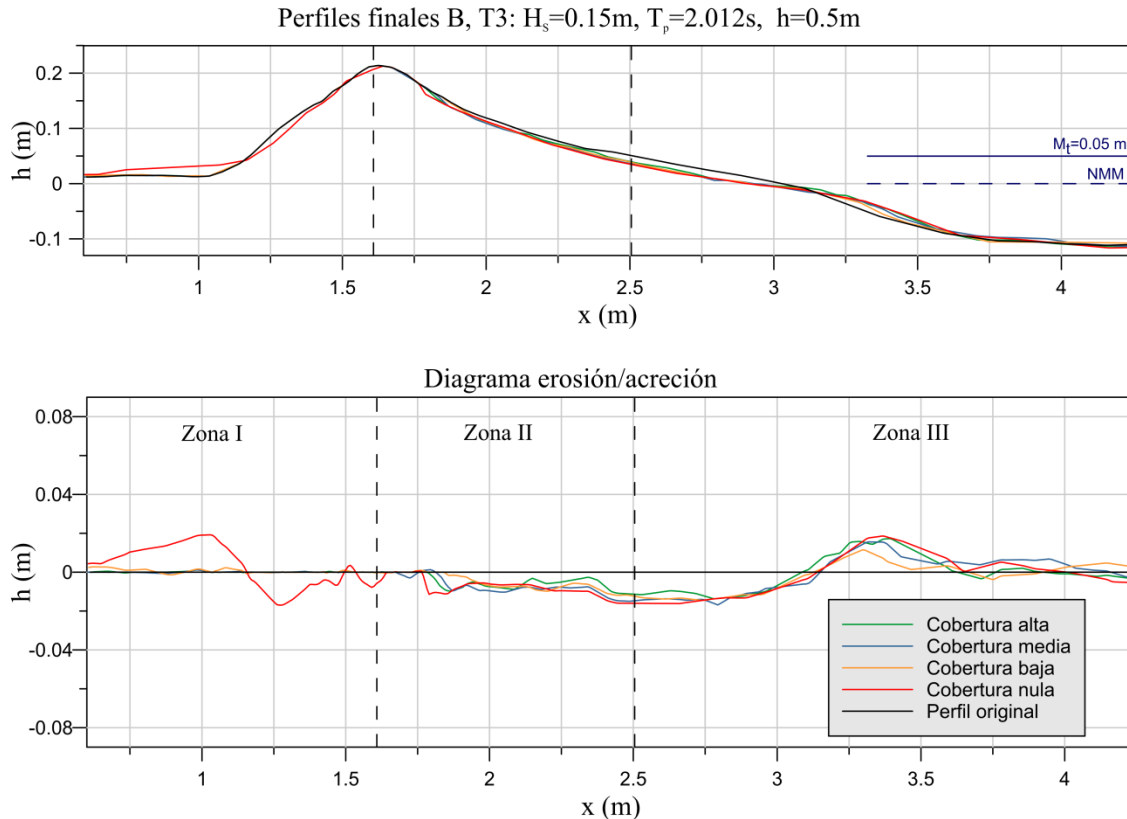


Fig. 5.19 BT2Perfiles finales y diagrama erosión/ acreción BT3

En el caso BT3N se presenta modo de erosión por *swash* que termina en *overwash* y para los casos BT3B, BT3M y BT3A el modo de erosión es *swash* con presencia de rebase. El modo de *overwash* también es reducción de la duna con transporte de sedimentos hacia el pie de la cara protegida, pero en este caso desde que comienza el *overwash* la reducción de la duna es más lenta que en el caso AT3N, esto puede ser por el volumen de arena que tiene la duna.

BT3			
Cobertura vegetal	zona I (m ³ /m)	zona II (m ³ /m)	zona III (m ³ /m)
nula	0.0029966685	-0.0068331449	-0.0047337311
baja	0.0	-0.0047985915	-0.0098319193
media	0.0	-0.0064663994	-0.0074334904
alta	0.0	-0.0046797059	-0.0131072870

Tabla 5.9 Volumen acreción (+) y erosión (-), BT3

En la zona I comparando los casos AT3N y BT3N la acumulación de sedimento es mayor en el perfil A que en el B, por lo que se puede suponer que también lo es el rebase producido. En los diagramas de erosión/acreción se aprecia que hay más ganancia de material en la playa seca y sumergida en el perfil A y más pérdida en el B, pero los volúmenes de pérdida en la duna son mayores en el A.

Respecto a los perfiles finales se observa que tanto el B como el A tienden al mismo obteniéndose pendientes muy parecidas en la zona de *swash*. (van Gent, et al., 2008) dicen

que el volumen erosionado aumenta cuando aumenta el periodo, lo que sí se observa en el perfil A. Pero no queda tan claro en el modo de *swash* (perfil B), porque no se tiene una convención para definir los límites entre los que se considera medir el volumen erosionado. Además, los ensayos que ellos reportaron solo presentan modo de erosión colapso. Respecto a la pendiente en el nivel de agua (van Gent, et al., 2008) dice que se suaviza cuando aumenta el periodo, pero esto no se ha apreciado en estos ensayos, prácticamente no ha habido variación en las pendientes para los distintos periodos.

A continuación se presenta un gráfico para cada perfil de la acreción-erosión de la zona II respecto al número Iribarren para el perfil A y B.

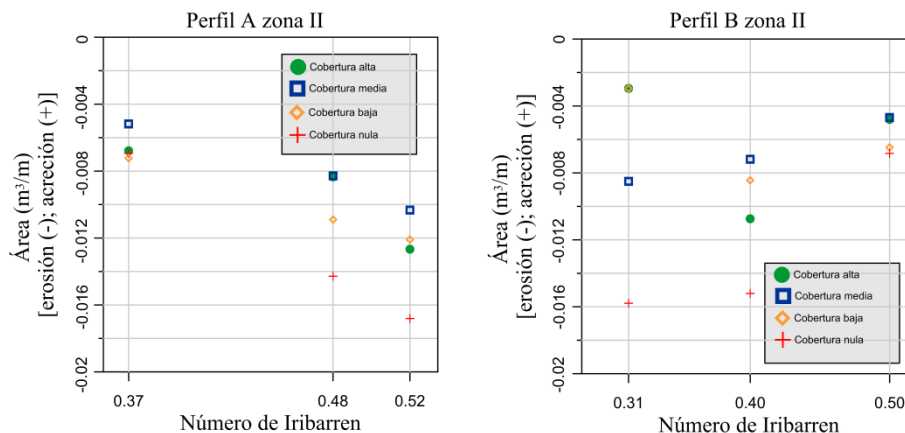


Fig. 5.20 a) Volumen erosionado en la zona II en función del número de Iribarren para el perfil A. b) Volumen erosionado en la zona II en función del número de Iribarren para el perfil B

En los casos del perfil A se observa que la erosión varía más en la cara expuesta de la duna para las distintas coberturas vegetales conforme aumenta el número de Iribarren, al contrario que en los casos del perfil B, donde las diferencias de área erosionada (m^3/m) son menores conforme aumenta el número de Iribarren. Concluyendo que en el modo de erosión por colapso la cobertura vegetal afecta más con números de Iribarren grandes y en el caso de modo de erosión por *swash* afecta más para números de Iribarren pequeños.

En el caso B disminuye la erosión en la zona II con el aumento del *swash*, esto no quiere decir que haya menos erosión a lo largo del perfil, sólo en esta zona. Como ya se ha mencionado, la erosión en este perfil se produce desde la barra hasta la máxima cota que alcanza la lámina de agua, queda pendiente determinar las zonas representativas para medir la erosión.

En las gráficas 5.21 y 5.22 se presentan los desplazamientos en la coordenada x de la línea de costa y del pie de duna para los distintos casos para evaluar el cambio en la playa. El análisis de estos puntos no determina la capacidad resiliente de un perfil de playa o duna, pero sí es importante en la reacción social que pueda generar un evento climatológico.

En el perfil A la línea de costa avanza para las tormentas T1 y T2 y retroceso en T3, el pie de duna siempre muestra avance hacia la línea de costa.

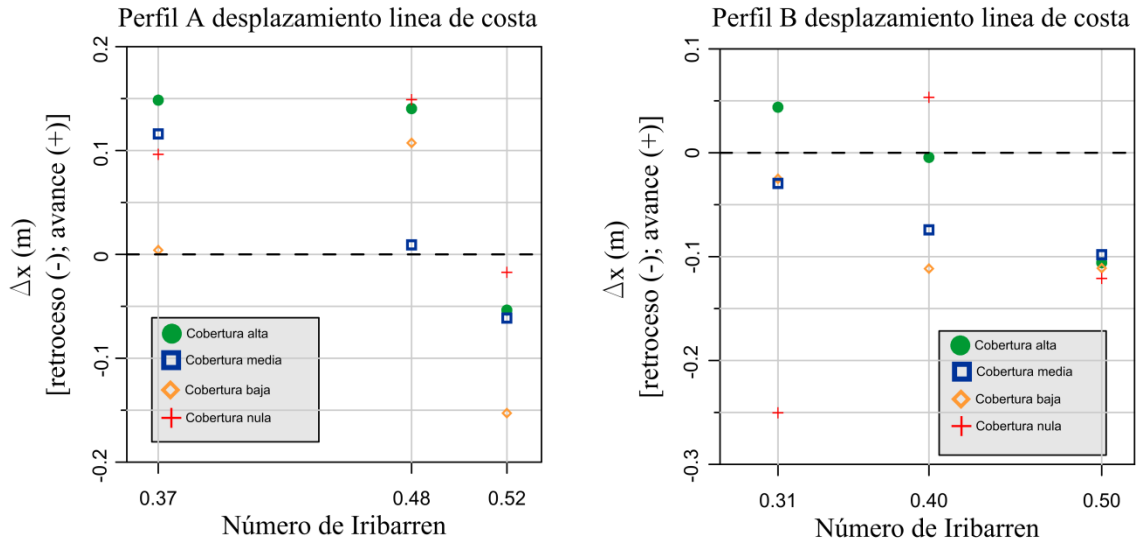


Fig. 5.21 a) Desplazamiento de la línea de costa en función del número de Iribarren para el perfil A. b) Desplazamiento de la línea de costa en función del número de Iribarren para el perfil B

En el perfil B la línea de costa muestra retroceso en todos los casos salvo BT1A y BT2N, es notorio que para el número de Iribarren de la tormenta 3 la cobertura vegetal no afecta en el desplazamiento de la línea de costa. En lo que respecta al pie de duna siempre se produce un retroceso que tiende a ser menor la diferencia entre las coberturas cuando aumenta el número de Iribarren.

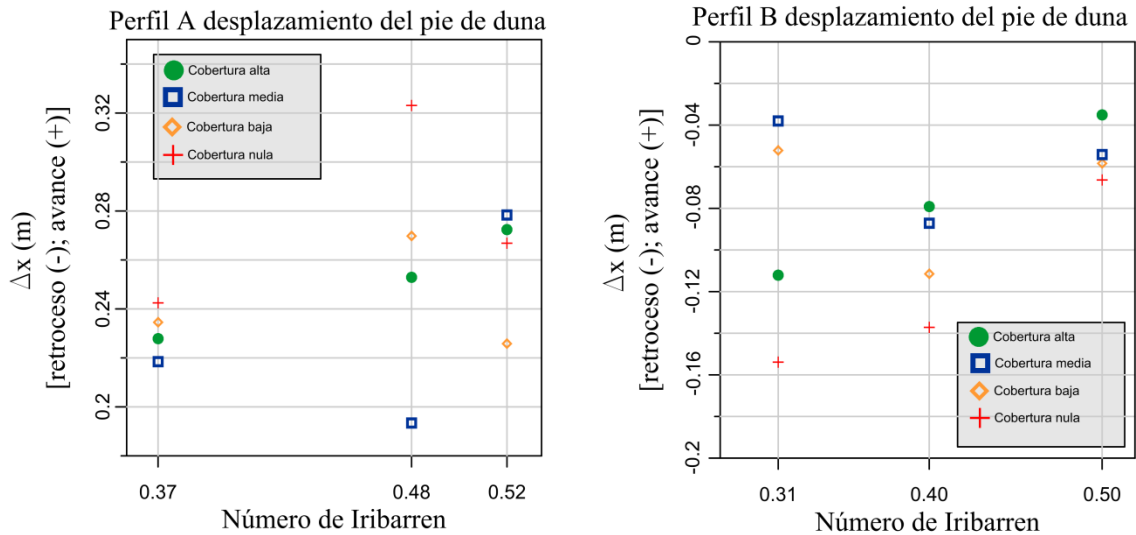


Fig. 5.22 a) Desplazamiento del pie de duna en función del número de Iribarren para el perfil A. b) Desplazamiento del pie de duna en función del número de Iribarren para el perfil B

5.4 Conclusiones, recomendaciones y futuras líneas de investigación

Como resumen del capítulo se exponen en este apartado las conclusiones obtenidas, recomendaciones y futuras investigaciones en las que se puede trabajar. Aun sabiendo que se necesitan más ensayos para cuantificar de manera más precisa lo observado los resultados presentados son datos muy valiosos para la comprensión del funcionamiento del

perfil playa-duna y para una primera definición del papel que las plantas ejercen en la morfología de la duna ante un evento extremo.

5.4.1 Conclusiones

Los modos de erosión presentados en los ensayos han sido tres: *swash* (perfil B), colapso (perfil A) y *overwash* (perfiles A y B). El transporte de sedimentos en *swash* es hacia la playa sumergida y fuera de la profundidad de cierre, en colapso se aporta sedimento a pie de duna y a la barra, hay aportación al perfil de playa. Cuando se produce *overwash* hay transporte de sedimentos detrás de la duna.

En relación al volumen erosionado con las condiciones hidrodinámicas, es mayor cuanto mayor es el periodo en los casos del perfil A, donde se produce erosión en colapso de acuerdo con (van Gent, et al., 2008). No siendo así en el perfil B donde el modo de erosión es *swash*.

En lo que respecta al perfil playa-duna, la respuesta en ambos perfiles es que desaparece el cambio de pendiente entre la playa y la duna quedando una pendiente homogénea. Los perfiles finales de A y B son muy similares presentando pendientes iguales en la zona de *swash*, esto coincide con lo que dicen (van Gent, et al., 2008) y (Vellinga, 1986), el perfil final es independiente del inicial, siempre y cuando la tormenta dure el tiempo suficiente.

El papel de la vegetación en el sistema ha quedado definido por varios aspectos en las respuestas morfodinámicas de los perfiles, a continuación se citan las principales.

De los datos observados de la hidrodinámica hay una tendencia de los coeficientes de reflexión a aumentar conforme aumenta la vegetación, no siendo relevante la vegetación para números de Iribarren pequeños y es más notoria cuanto más grandes son los números de Iribarren.

Se observó una disminución de la lámina de agua en la zona de *swash* porque la vegetación reduce la velocidad de ésta y favorece su filtración, confirmando lo establecido por (Kobayashi, et al., 2013).

En lo que respecta a la influencia de la vegetación en la erosión de la cara expuesta de la duna, ésta reduce la erosión en los modos de *swash* con números de Iribarren pequeños y en colapso para números de Iribarren grandes hay una reducción en el escarpe producido.

De la respuesta morfológica de los perfiles con las distintas coberturas se observó que son similares, concluyendo que la vegetación no cambia el modo de erosión, sino que lo mantienen en el tiempo, es decir, aumenta el tiempo de resistencia de la duna, pero no cambia su respuesta morfológica.

5.4.2 Recomendaciones para futuros ensayos

Sobre los resultados observados se destacan las siguientes recomendaciones.

Determinar qué parte del perfil playa-duna se quiere analizar y en función de esto determinar los casos (marea de tormenta y tren de ondas). Si se quiere analizar los casos más agresivos en los que se produzca inundación, habrá que elegir los que produzcan rebase, *overwash*. Pero si se quiere saber como va a responder un perfil de playa-duna de uso recreativo es conveniente estudiar *swash* y colapso.

Otro apartado recomendable es a la hora de realizar pruebas con perfiles distintos que el volumen inicial de arena de la playa más la duna sea el mismo. De esta manera se pueden

deducir conclusiones de qué morfología inicial puede resistir más en el tiempo ante el mismo evento y que sea éste un criterio a la hora de diseñar playas.

5.4.3 Futuras líneas de investigación

Plantear el tiempo como una variable y no como una condición inicial. Aunque algunos autores ya lo han esbozado de esa manera (Kobayashi, et al., 2013), analizar cuánto tarda el perfil en llegar a un nivel de destrucción con vegetación y sin vegetación, en vez de que el tiempo sea un parámetro fijo.

En este trabajo no se ha podido demostrar, pero se intuye, que en el modo de colapso las raíces son más importantes que la parte aérea y en el modo de *swash* la labor principal la hacen las hojas. Si se llegase a demostrar sería un criterio ecológico (en qué casos actúa más la parte aérea de las hojas y cuándo la parte subterránea) en la restauración de dunas y diseño de playas. Así se podría definir que especie es más conveniente, una que pueda desarrollar raíces profundas o una especie con mayor superficie aérea.

También se podría analizar el funcionamiento de las plantas según la posición de éstas, estén en la cara protegida, expuesta o en la cresta como también realiza (Kobayashi, et al., 2013).

Deducir para el diseño de playas con berma ecuaciones basadas en la física de manera similar a cómo han sido derivadas las ecuaciones para diques con berma y así poder establecer las dimensiones de la berma óptimas.

Capítulo 6. Modelación numérica de las pruebas físicas

6.1 Introducción

En este capítulo se presenta la calibración y validación del modelo numérico XBeach para las pruebas de laboratorio realizadas con cobertura vegetal nula. El objetivo es definir el rango de capacidad del modelo en la representación de regímenes de erosión y volumen de erosión producido por las condiciones hidrodinámicas, en base a ello dar una serie de recomendaciones.

En primer lugar se presenta una breve descripción del modelo, luego los parámetros de sensibilidad analizados, la calibración del modelo y una serie de observaciones y recomendaciones en el uso del XBeach.

6.2 Descripción numérica del modelo.

En el sistema de coordenadas de cálculo se orienta el eje x de cálculo hacia la costa, y el eje y se dirige a lo largo de la costa (véase la Figura 6.1). El sistema de coordenadas se define en relación a las coordenadas del mundo (x_w, y_w) a través del origen (y_{ori}, y_{ori}) y el α orientación definida hacia la izquierda con relación al eje x A (Este).

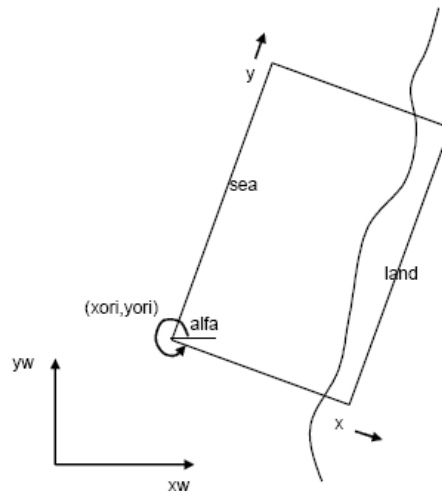


Fig. 6.1 Sistema de coordenadas del modelo, obtenido del manual del XBeach.

La malla es rectilínea de tamaño de celda variable, donde los niveles del fondo, niveles de agua, la profundidad del agua y las concentraciones se definen en los centros de celda, y las velocidades y el transporte de sedimentos se definen en u y v puntos situados en las caras de celdas. En el modelo de onda, la energía del *roller* y el tensor de radiación están definidos en los centros de la celdas, mientras que los gradientes del tensor de radiación se definen en los puntos u y v .

6.2.1 Ondas cortas

La transformación de onda de corto periodo se obtiene de la ecuación de balance de energía, dependiente del tiempo. Utiliza un enfoque similar al del modelo HISWA de la Universidad de Delft (Holthuijsen, et al., 1989), se toma la distribución direccional de la onda asumiendo que el espectro está representado por la frecuencia media. El balance de la acción de la ola viene dado por la ecuación 6.1.

$$\frac{\partial A_w}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} A_w}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} A_w}{\partial y} + \frac{\partial C_\theta A_w}{\partial \theta} = -\frac{D}{\omega}$$

Ecuación 6.1

Donde A_w es la acción de la ola.

$$A_w = \frac{S_w}{\omega}$$

Ecuación 6.2

Donde S_w es la energía de la onda en cada sector direccional y ω es la frecuencia media de la onda. La velocidad de propagación de la onda en las direcciones x e y viene dada por

$$C_{g,x} = C_g \cos(\theta)$$

Ecuación 6.3

$$C_{g,y} = C_g \sin(\theta)$$

Ecuación 6.4

Donde θ representa el ángulo de incidencia respecto al eje x y C_g es la celeridad de grupo. La celeridad de propagación en el espacio viene dada por la ecuación.

$$C_\theta = \frac{\omega}{\sinh 2k_w h} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin(\theta) - \frac{\partial h}{\partial y} \cos(\theta) \right)$$

Ecuación 6.5

El número de onda se obtiene de la ecuación de dispersión.

$$\omega = \sqrt{g k_w \tanh k_w h}$$

Ecuación 6.6

Y la velocidad de grupo de la ecuación 6.7.

$$C_g = n C_w = \left(\frac{1}{2} + \frac{k_w h}{\sinh 2k_w h} \right) \frac{\omega}{k_w}$$

Ecuación 6.7

La disipación de energía en la ola por rotura se modela con la ecuación 6.8 donde α es un factor de calibración, ρ_w es la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad, f_m es

la frecuencia media, h la profundidad del agua, H_{rms} (ecuación 6.10) es la altura de ola, y P_b (ecuación 6.9) la probabilidad de que rompan las olas.

$$\bar{D} = 0.25\alpha\rho_w g P_b f_m \frac{H_{rms}^3}{h}$$

Ecuación 6.8

$$P_b = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H_{rms}}{\gamma h}\right)^n\right)$$

Ecuación 6.9

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{8E_w}{\rho_w g}} \quad \text{donde} \quad E_w = \int_0^{2\pi} S_w d\theta$$

Ecuación 6.10

Ecuación 6.11

Con la ecuación 6.12 la disipación se distribuye proporcionalmente en todas las direcciones.

$$D = \frac{S_w}{E_w} \bar{D}$$

Ecuación 6.12

La distribución espacial del tensor de radiación se evalúa de la siguiente manera:

$$S_{xx} = \int \left(\frac{C_g}{C_w} (1 + \cos^2\theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta$$

Ecuación 6.13

$$S_{xy} = S_{yx} = \int \sin\theta \cos\theta \left(\frac{C_g}{C_w} S_w \right) d\theta$$

Ecuación 6.14

$$S_{yy} = \int \left(\frac{C_g}{C_w} (1 + \sin^2\theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta$$

Ecuación 6.15

6.2.2 Onda larga

Para las bajas frecuencias se aplican las ecuaciones de aguas poco profundas. Para tener en cuenta la masa de flujo inducida y el correspondiente flujo de retorno se utilizan las ecuaciones de aguas poco profundas promediadas en la vertical. Las velocidades de agua poco profundas Eulerianas u^E y v^E (en la dirección x e y dirección respectivamente) se sustituyen por las Lagrangianas equivalentes u^L y v^L .

$$u^L = u^E + u^S$$

Ecuación 6.16

$$v^L = v^E + u^S$$

Ecuación 6.17

Donde u^S y v^S representan las derivadas de Stokes en las direcciones x e y respectivamente.

$$u^S = \frac{(E_w + 2E_r) \cos \theta}{\rho_w h c_w}$$

Ecuación 6.18

$$v^S = \frac{(E_w + 2E_r) \sin \theta}{\rho_w h c_w}$$

Ecuación 6.19

Las ecuaciones resultantes de media lagrangiana generalizada para aguas poco profundas vienen dadas por las ecuaciones 6.20, 6.21 y 6.22.

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho_w h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho_w h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho_w h}$$

Ecuación 6.20

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} - f u^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho_w h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho_w h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho_w h}$$

Ecuación 6.21

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0$$

Ecuación 6.22

Donde τ_{sx} , τ_{sy} son las tensiones cortantes del viento, τ_{bx} , τ_{by} son los esfuerzos cortantes en el fondo, g es la aceleración de la gravedad, η es el nivel del agua, F_x , F_y son las fuerzas de las olas, v_h es la viscosidad horizontal y f es el coeficiente de Coriolis.

6.2.3 Transporte de sedimento

El transporte de sedimentos es modelado con la ecuación de advección-difusión:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hC(u^E + u_A \sin \theta_m)}{\partial x} + \frac{\partial hC(v^E + u_A \cos \theta_m)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s}$$

Ecuación 6.23

Donde C representa la concentración de sedimento en la profundidad promediada, que varía en la escala de tiempo del grupo de onda, u_A es una velocidad de flujo relacionada

con la no linealidad de onda y θ_m es la dirección media de ola de las olas entrantes. La concentración de sedimentos se adapta gradualmente a los cambios de las condiciones hidráulicas mediante una escala de tiempo de adaptación para el arrastre de sedimentos T_s que se da por una expresión simple basada en la profundidad de agua local, h , y la velocidad de caída del sedimento w_s :

$$T_s = \max\left(0.05 \frac{h}{w_s} + T_{s,min}\right)$$

Ecuación 6.24

En esta expresión $T_{s,min}$ es un tiempo mínimo determinado (por defecto fijado en 1,0 segundos). En aguas poco profundas T_s se hace pequeño ($T_s \approx T_{s,min}$) y la concentración de sedimentos responde casi instantáneamente a los cambios en la hidrodinámica. El arrastre o deposición de sedimentos se determina por la falta de correspondencia entre la concentración de sedimentos C y el C_{eq} concentración de equilibrio que representa por lo tanto el término fuente en la ecuación de transporte de sedimentos.

El equilibrio de la concentración de sedimentos se calcula con una fórmula extendida de transporte de (Van Rijn, 2007):

$$C_{eq} = \frac{A_{sb}}{h} \left(\sqrt{(u^E)^2 + 0.64u_{rms,2}^2} - u_{cr} \right)^{1.5} + \frac{A_{ss}}{h} \left(\sqrt{(u^E)^2 + 0.64u_{rms,2}^2} - u_{cr} \right)^{2.4}$$

Ecuación 6.25

Donde A_{sb} y A_{ss} son coeficientes de transporte por fondo y por suspensión respectivamente.

6.2.4 Cambio del fondo

Los cambios producidos en el fondo en la zona mojada se corresponden con los gradientes en el transporte de sedimentos de acuerdo con la ecuación 6.27.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{1-p} \left(\frac{\partial S_x}{\partial t} + \frac{\partial S_y}{\partial x} \right) \gamma_{morf}$$

Ecuación 6.26

Donde p es la porosidad, γ_{morf} es un factor de multiplicación para los cambios de suelo que por defecto es 1, S_x y S_y son calculados por las ecuaciones 6.28 y 6.29 respectivamente.

$$S_x = hC(u^E + u_A \sin \theta_m) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Ecuación 6.27

$$S_y = hC(v^E + u_A \cos \theta_m) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right)$$

Ecuación 6.28

En donde D_h es el coeficiente de difusión de sedimento.

$$D_h = \gamma_{visc} v_h$$

Ecuación 6.29

En esta expresión γ_{visc} es un factor de calibración y v_h es la velocidad horizontal. Para tener en cuenta el desprendimiento en la cara de la duna se aplica el algoritmo *avalanching*. El desprendimiento se produce cuando se excede la pendiente crítica.

$$\frac{\partial z_b}{\partial x} > m_{cr}$$

Ecuación 6.30

6.3 Sensibilidad del modelo

Con base en la revisión bibliográfica principalmente de (van Thiel, 2009) y (Vousdoukas, et al., 2012) se eligieron los parámetros para analizar la sensibilidad. Estos son parámetros morfológicos y de transporte de sedimentos. A continuación se da una breve explicación de cada uno de ellos y en la tabla 6.1 se exponen los valores analizados.

- *hmin*: La profundidad umbral de agua considerada para el cálculo de la resaca (la resaca se estima sobre una lámina de agua igual o mayor que *hmin*).
- *wetslp*: pendiente crítica para *avalanching* en los puntos mojados.
- *dryslp*: pendiente crítica para *avalanching* en los puntos secos.
- *hswitch*: profundidad en la que se cambia de pendiente crítica a húmeda.
- *dzmax*: es el máximo cambio en el fondo debido al *avalanching*.
- *lws*: agitación de onda larga.
- *facua*: asimetría en el transporte de sedimentos.
- *form*: fórmula de concentración de sedimentos, tiene dos opciones Soulsby o Vanthiel.
- *turb* : corresponde al equilibrio de la concentración de sedimento, 0 significa que está apagado, 1 corresponde a la media de la acción de la ola y 2 al bore generado por la ola.
- *tsfarc*: máximo valores de la velocidad de caída del sedimento.

Tabla 6.1. Parámetros analizados en la calibración del modelo

Parámetro	Valores dados para cada parámetro				
<i>hmin</i>	0.05	0.1			
<i>hswitch</i>	0.02	0.1	0.03	0.04	
<i>wetslp</i>	0.3	0.75	0.1	0.2	
<i>dryslp</i>	0.75	1	2		
<i>dzmax</i>	0.05	0.1	0.2	0.3	
<i>wci</i>	0	1			
<i>Facua</i>	0.1	0.3	0.5	0.7	1
<i>form</i>	1	2	3		
<i>turb</i>	0	1	2		
<i>tsfarc</i>	0.1	1			

Con la combinación de valores asignados (no todas las posibles) se realizaron simulaciones y para cada una de ellas se calculó el error cuadrático, ecuación 6.3, y se analizó la tendencia de éste en cada simulación.

En las gráficas, 6.3 y 6.4 se presentan el error obtenido para cada caso. La gráfica 6.3 corresponde a las simulaciones obtenidas para los parámetros morfológicos.

$$\Delta z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (z_{i,modelo} - z_{i,medido})^2}{n(n-1)}}$$

Ecuación 6.31

En la figura 6.2 se presenta el error cuadrático para los casos en los que se variaron los parámetros morfológicos.

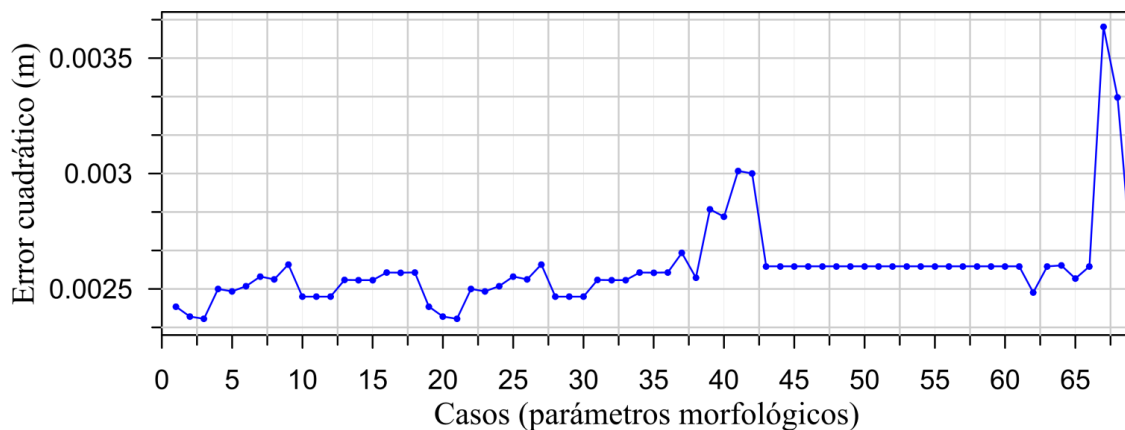


Fig. 6.2. Error cuadrático para los casos en los que se variaron parámetros morfológicos.

Hasta los casos 38 la tendencia es la misma, en los casos 39-43 aumenta el error, en estos casos la *wetslp* es de 0.1 y 0.2, demasiado pequeña. El error es el mismo en los casos 46-61, las simulaciones dieron el mismo resultado, se probaron *hswitch* mayores a 0.1 m en estos casos el *dzmax* tomó valores 0.5 y 1.0 dando los mismos resultados en las simulaciones. En los casos 67-68 los errores aumentan considerablemente, *dzmax* toma valores entre 0.5 y 0.4.

De las fluctuaciones obtenidas en el error cuadrático se puede decir que el modelo es muy sensible a las pendientes críticas. *dzmax* es un parámetro cuya sensibilidad aumenta cuando disminuye la pendiente crítica húmeda. No es relevante el parámetro *hmin* y sí muestra variación con los cambios en *hwistch*.

En la figura 6.3 se muestran los errores cuadráticos para los casos en los que se variaron los parámetros de transporte de sedimentos. La tendencia en todos es la misma en todos los casos.

Presenta mucha sensibilidad a la *turb* y *facua*, éste último cuanto mayor es más erosiona en la duna y más acumula en la playa seca. En cambio para valores distintos de los parámetros *form* y *lws* no hay variación en los resultados.

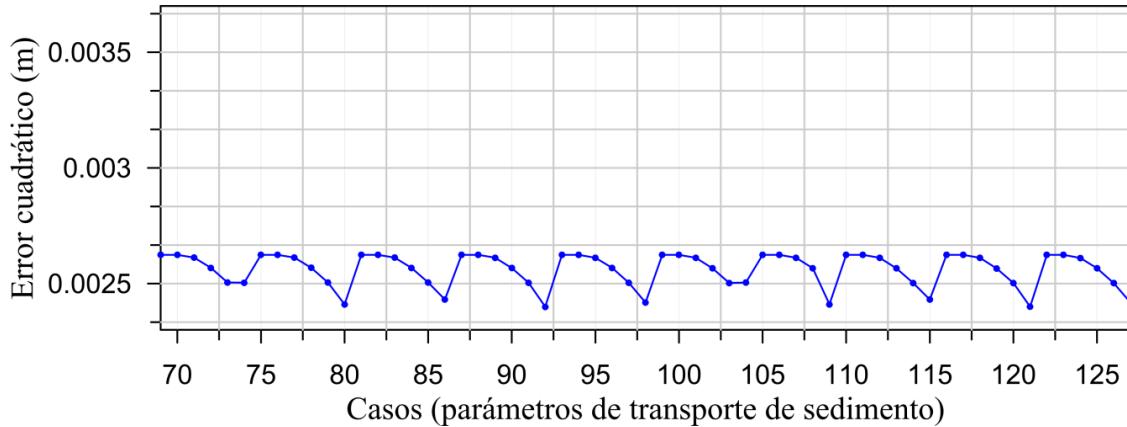


Fig. 6.3 Error cuadrático para los casos en los que se variaron parámetros de transporte de sedimentos.

De los parámetros analizados en este trabajo los más significativos son los morfológicos *wetslp*, *dryslp* y los de transporte de sedimentos, *facua* y *turb*.

6.4 Calibración

A continuación se presenta la calibración para los ensayos de laboratorio AT1N y BT1N, en el respectivo orden.

Todas las simulaciones se hicieron con malla variable por optimización de tiempo computacional y porque en otras experiencias con el modelo se ha observado que los resultados son más precisos, ya que la malla da más detalle en la zona de interés a estudiar. Se han simulado con oleaje irregular tipo JONSWAP de $\gamma=3.3$ como en los ensayos de laboratorio. Respecto a los tiempos simulados se consideró el tiempo de laboratorio a partir del segundo en el que la onda en el modelo interactúa con la playa.

Para analizar la calibración se estudió el error cuadrático (ecuación 6.31) y el parámetro BSS (*Brier Skill Score*), además del análisis visual. El parámetro BSS viene definido por la ecuación 6.33.

$$BSS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_{i,modelo} - z_{i,medido})^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_{i,0} - z_{i,medido})^2}$$

Ecuación 6.32

$z_{i,modelo}$ es el fondo modelado, $z_{i,medido}$ el fondo medido y $z_{i,0}$ es el fondo original donde i corresponde a cada coordenada del perfil. Para clasificar el parámetro BSS (Van Rijn, et al., 2003) propuso la clasificación mostrada en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Rango de valores para clasificar el parámetro BSS.

Clasificación para BSS	Rango de valores
Excelente	1-0.8
Buena	0.8-0.6
razonable	0.6-0.3
Pobre	0.3-0
mala	< 0

El BSS es muy adecuado para la predicción de la evolución del fondo. El fondo inicial es base para la predicción de la batimetría. Una limitación del parámetro es que no puede cuantificar de la dirección de migración de una barra; simplemente evalúa si el nivel del fondo modelado (en el tiempo t) está más cerca del nivel del fondo medido (en tiempo t) que el nivel del lecho inicial. Si la migración de la barra modelada está en la dirección equivocada, pero es relativamente pequeña; esto puede dar como resultado un BSS mayor en comparación un resultado modelado en la dirección correcta pero mucho mayor que la barra medida. El BSS incluso puede ser negativo, si el fondo modelado está más lejos del medido que el inicial. La limitación que se muestra aquí es que los errores de posición y los de tamaño están incluidos en el BSS. Distinguir los errores de posición de los errores de amplitud, requiere una inspección visual de la medida y el modelo o el cálculo de estadísticas adicionales (Murphy & Epstein, 1989).

6.4.1 Perfil AT1N

Para la calibración del modelo AT1N se simularon 127 casos, en la figura 6.4 se muestran los errores cuadráticos y en la figura 6.5 lo valores de BSS para los todos los casos.

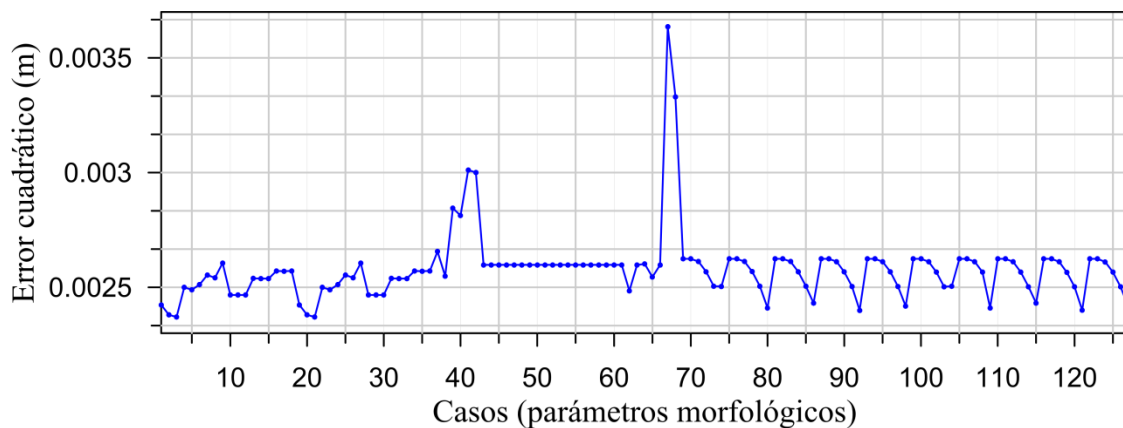


Fig. 6.4 Error cuadrático para los casos simulados AT1N.

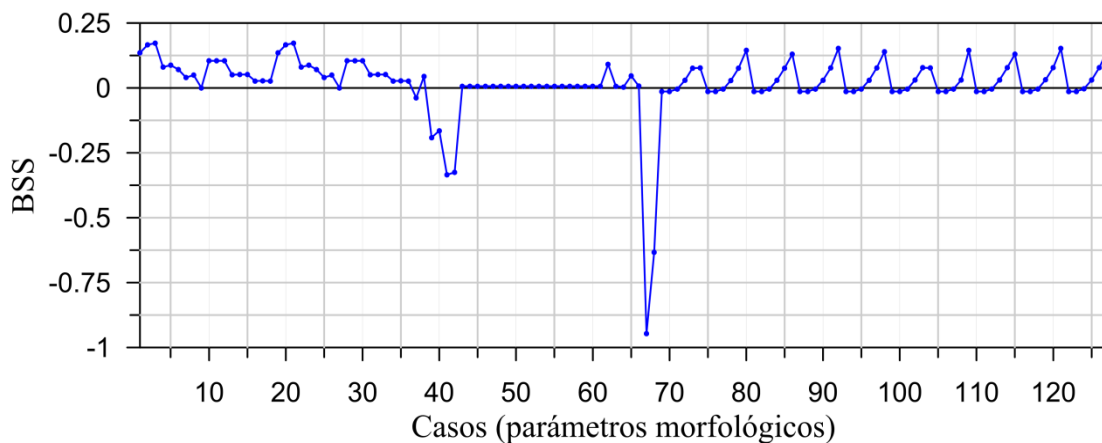


Fig. 6.5 BSS para los casos simulados AT1N.

En varias de las simulaciones se representó muy bien el colapso, pero en ninguna había acreción de material en el pie de la duna, siempre se presentaba erosión en la berma, a diferencia del caso medido que presenta acreción a pie de duna. Cabe mencionar que en muchos casos en la cara protegida de la duna hay una variación de la pendiente, esto no está producido por interacción de ondas con esta parte de la duna sino porque la pendiente inicial es mayor que la crítica lo que produce desprendimiento desde el instante 1.

Las simulaciones con menor error fueron los casos VA3 y VA21 con valores correspondientes de BSS 0.1727 y de error cuadrático 0.0024. Pero comparando visualmente se escogió el caso VA62 como el que más se aproxima, por representar bien la acumulación en la playa sumergida, la pendiente del colapso y ser el que más erosiona en la cara de la duna. Además los valores de los errores son muy parecidos en este caso con 0.0025 de error cuadrático y BSS de 0.0914.

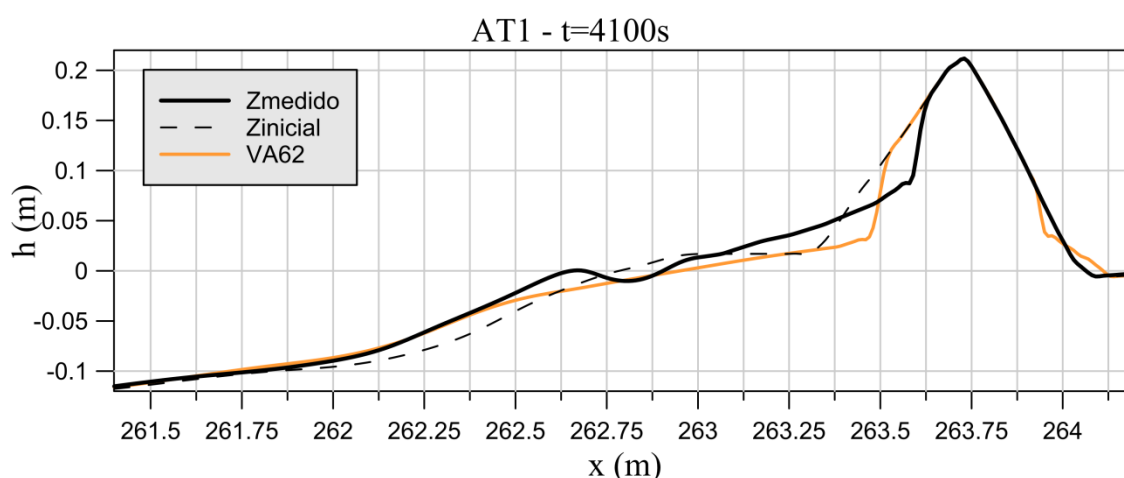


Fig. 6.6 Resultados de la calibración, caso VA62.

En la tabla 6.3 se presentan los valores correspondientes al caso VA62, en este caso la *dryslp* es la máxima.

Tabla 6.3 Parámetros del caso VA62.

Parámetros del caso AV62										
hmin	wetslp	dryslp	dzmax	hswithc	wci	lws	facua	form	turb	tsfarc
0.05	0.30	2.00	0.20	0.01	0.00	0.00	0.10	2.00	2.00	0.10

6.4.2 Perfil BT1N

En la figura 6.7 y 6.8 se presentan los valores obtenidos para cada caso de error cuadrático y BSS, los que no aparecen en la gráfica es porque daban errores muy altos, fuera del rango presentado en el eje de ordenadas.

En la prueba BT1N los casos que menores valores del error cuadrático y de BSS son VB10, VB11, VB12, VB13, VB14, VB15, VB16, VB17, VB18, todos ellos tienen un BSS de 0.2251 y un error cuadrático de 0.0035. Visualmente se analizó y el que mejor simulaba la erosión producida en la playa en régimen de erosión *swash* es el caso VB87 con un error cuadrático de 0.0036 y un BSS de 0.1589. Error cuadrático es muy parecido aunque el BSS si es menor.

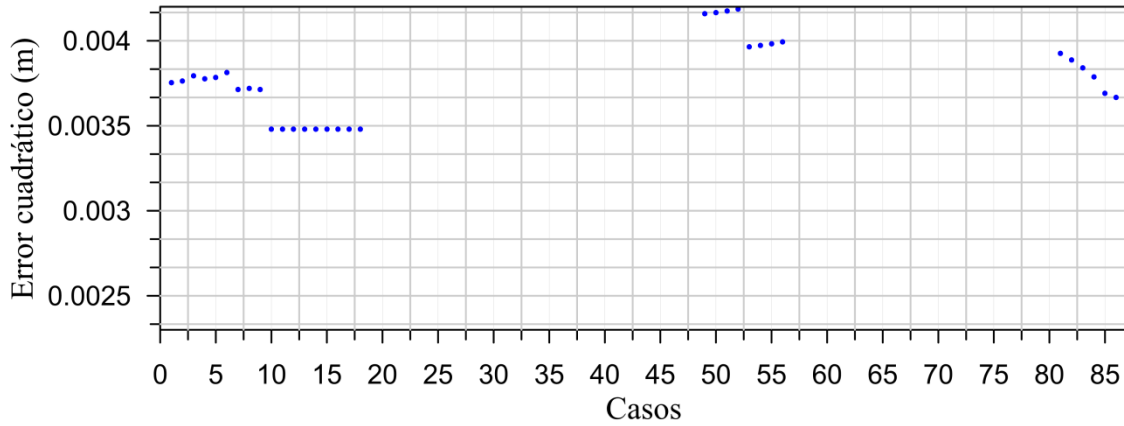


Fig. 6.7 Error cuadrático para los casos simulados BT1N.

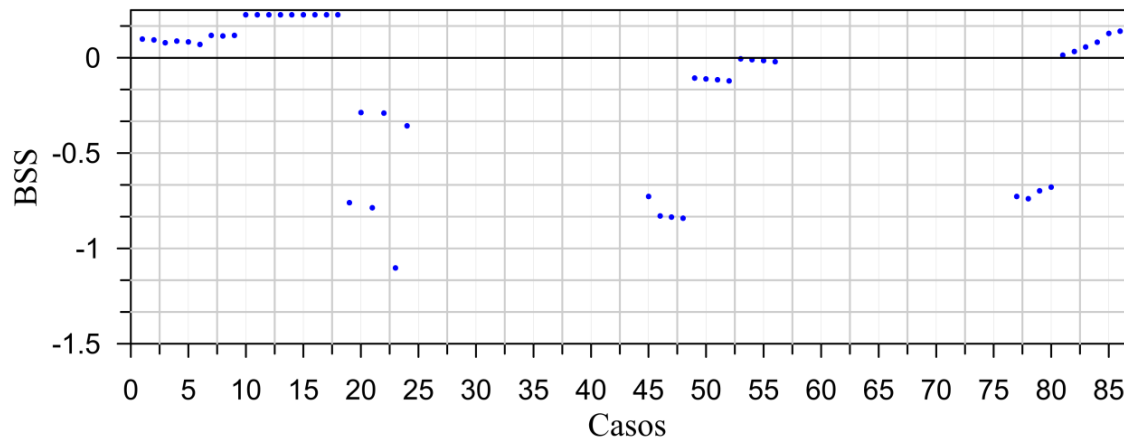


Fig. 6.8 BSS para los casos simulados BT1N.

En la tabla 6.4 se expresan los valores de los parámetros en el caso elegido BV84.

Tabla 6.4 Parámetros del caso VB87.

Parámetros del caso BV87										
hmin	wetslp	dryslp	dzmax	hswithc	wci	lws	facua	form	turb	tsfarc
0.05	0.30	0.40	0.2	0.01	0	0	0.60	2.00	2.00	0.05

En la figura 6.9 se representan los perfiles del caso BT1N, medido, inicial y modelado.

En los resultados se ve que sólo erosiona en la playa seca a diferencia que el perfil medido que tiene erosión en la parte sumergida de playa. También cabe recordar que en el perfil medido en laboratorio para este caso se observó pérdida de material (transportada fuera de la profundidad de cierre).

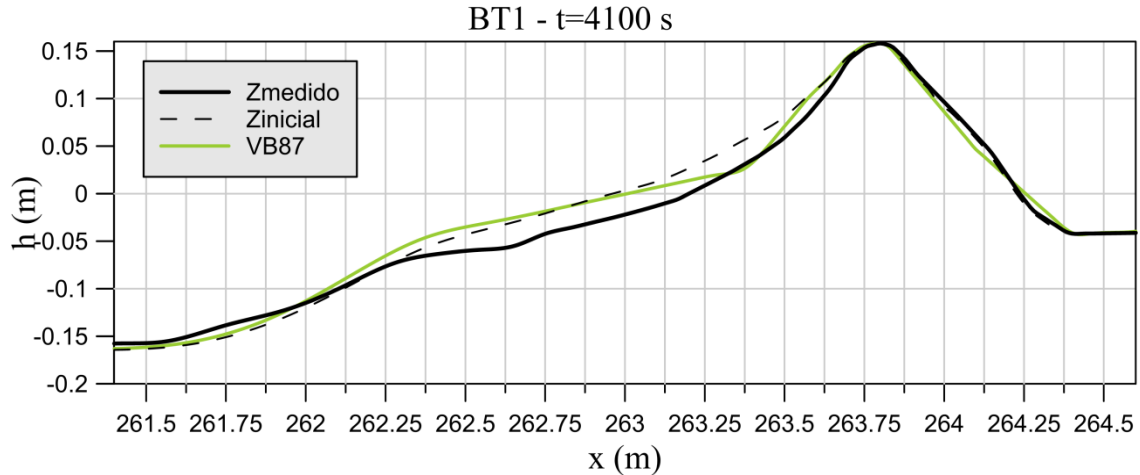


Fig. 6.9 Resultados de la calibración, caso VB87.

6.5 Validación

A continuación se presenta la validación de la calibración obtenida con los casos AT2N, AT3N, BT2N y BT3N.

6.5.1 Casos AT2N y AT3N

En la figura 6.10 se presenta en naranja el perfil modelado con las condiciones de la tormenta T2. El colapso lo representa bien, en este caso produce una acumulación mayor que la medida en la playa sumergida y la erosión en la barra es mayor puesto que no representa acumulación en la duna, pero si se observa un cambio de pendiente en la mitad de la cara expuesta de la duna.

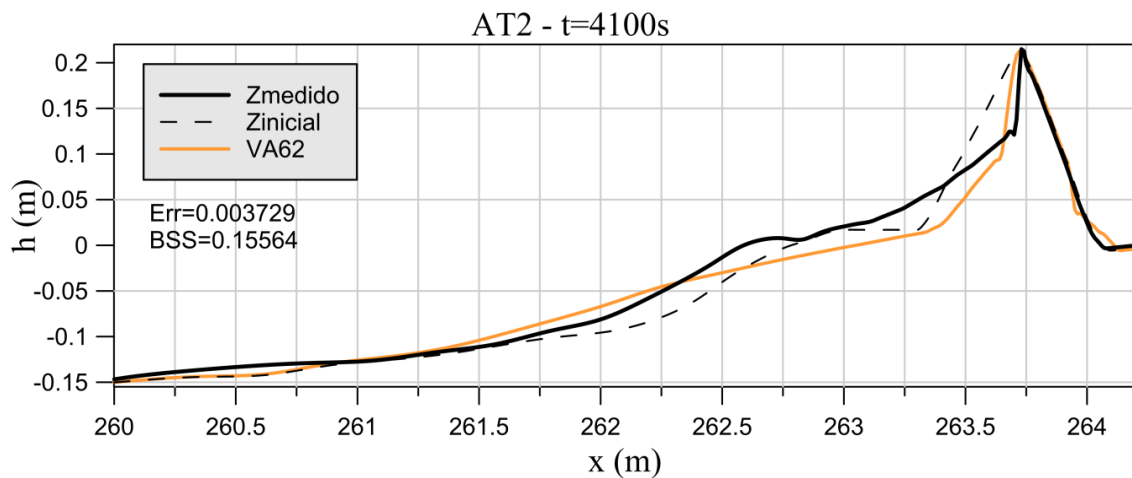


Fig. 6.10 Resultados de la validación del caso AT2N.

En la simulación para el caso AT3N la prueba de laboratorio duró 240 s, pero en la modelación se simularon 400 s a partir del instante en el que la onda interactúa con la duna. Se asume que hay una distorsión en la escala de tiempo del resultado obtenido. Igual que en el caso AT2N el régimen de colapso está bien representado y la reducción de altura de duna también, pero no presenta transporte de sedimentos por *overwash* y la erosión producida en

la playa es mucho mayor que la medida, por otra parte sobreestima el sedimento depositado en la playa sumergida.

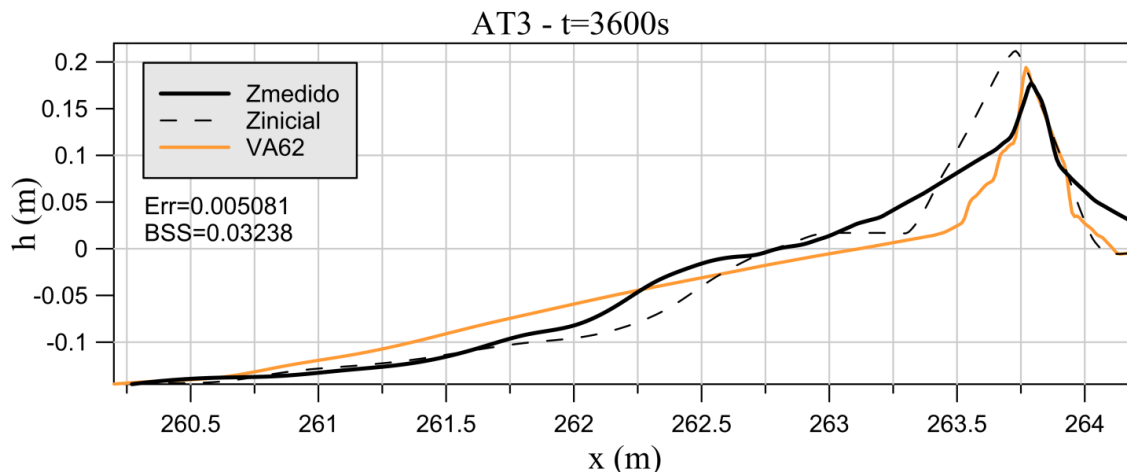


Fig. 6.11 Resultados de la validación del caso AT3N.

6.5.2 Casos BT2N y BT3N

En lo que respecta a al caso BT2N la erosión está muy bien representada en la parte superior de la cara expuesta pero de la misma manera que en el caso BT1N presentado en el apartado de calibración sobreestima el sedimento acumulado en la playa sumergida y subestima la erosión producida en la zona de lavado (*swash*).

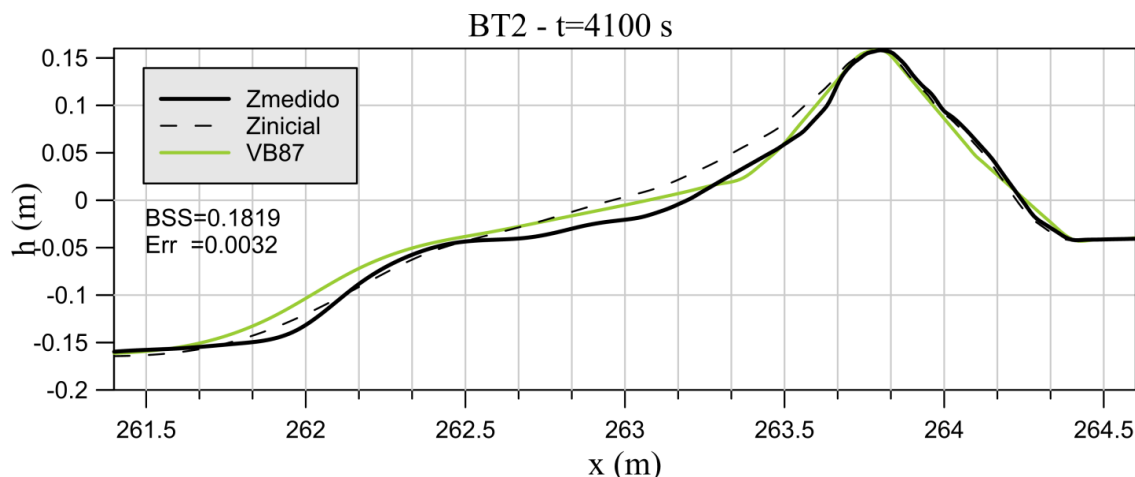


Fig. 6.12. Resultados de la validación del caso BT2N.

En el caso BT2N sucede al revés en el caso BT2, la erosión la representa muy bien en la parte baja de la playa y la sobreestima en la cara expuesta de la duna. También sobreestima la acumulación de sedimento en la playa sumergida.

Es conveniente mencionar que para este caso el BSS da negativo, esto es debido a que la pérdida de material en el perfil medido, parte del material viaja fuera de la profundidad de cierre, además el modelo no representa la acumulación producida por *overwash*. Estas

diferencias que no están bien representadas por el modelo empeoran el valor de BSS, pero la parte de la cara expuesta de la duna se considera que presenta una buena aproximación.

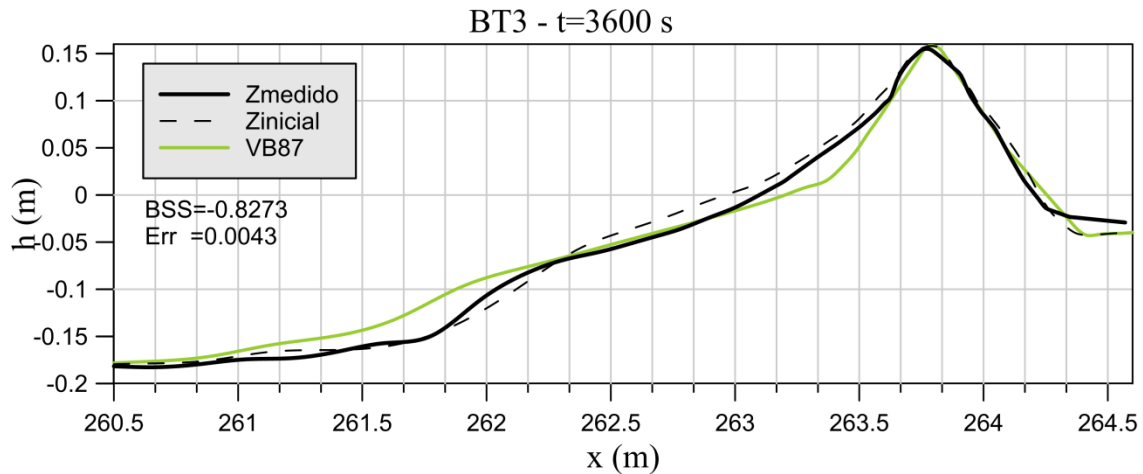


Fig. 6.13 Resultados de la validación del caso BT3N.

6.6 Observaciones y recomendaciones

En el capítulo se ha presentado la calibración y validación del modelo XBeach para las pruebas del laboratorio AT1N, AT2N, AT3N, BT1N, BT2N y BT3N. Con los que se pretende analizar la capacidad del modelo en la representación de las respuestas de perfiles de playa y duna ante eventos meteorológico. A continuación se exponen las observaciones y una serie de recomendaciones en el uso del modelo numérico.

De los parámetros analizados en la sensibilidad, los que más influyen son: *wetslp*, *dryslp*, y los de transporte de sedimentos, *facua* y *turb*. *dryslp* es el parámetro que determina el régimen de erosión, si utilizamos valores altos se simulará colapso y si se utiliza valores pequeños se simulará el modo de erosión *swash*. Respecto al valor del parámetro *facua*, cuanto mayor es, mayor es la asimetría en el transporte, esto hace que se produzca mayor erosión en la duna y más acreción en la playa sumergida. El parámetro *turb* si está activado (1 ó 2) genera más erosión en la playa y pie de duna que si no está activado (0).

Como conclusiones se puede decir que el modelo es capaz de representar los modos de erosión, colapso y *swash* representando muy bien la erosión producida en la cara expuesta, al fin y al cabo para analizar la exposición de riesgo de inundación es lo que interesa. También ha representado muy bien la erosión producida por *overwash*, pero no la acumulación de sedimentos en el pie de duna de la cara protegida.

Respecto a los tiempos de simulación se han presentado ciertas diferencias, el modelo tarda más en presentar la erosión producida en los ensayos. Como corrección se recomienda analizar la variación de parámetros que puedan influir en la velocidad del transporte de sedimentos, en particular el parámetro $T_{s,min}$ que está relacionado con la velocidad de caída.

Capítulo 7. Conclusiones

En este capítulo se sintetizan las principales conclusiones a las que se llegó durante el desarrollo del presente proyecto de investigación donde el objetivo último fue analizar experimentalmente la influencia que la cobertura vegetal tiene en la respuesta morfológica del perfil duna playa ante eventos extremos.

La investigación se dividió en tres bloques, el primero de ellos fue el estudio del campo dunar Farallón-La Mancha con el objetivo de explicar los agentes actuantes en la zona y el factor del sedimento relacionándolos con la morfología dunar que el sistema presenta. Como conclusiones se pone de manifiesto que hay una mejor clasificación del sedimento en las dunas que en las playas coincidiendo con diversos autores. La excedencia de sedimento con origen en las lagunas adyacentes en la zona, la amplia zona intermareal de las playas disipativas y los intensos vientos con direcciones gobernantes NE permiten una gran acumulación de sedimentos en los sistemas dunares. La presencia de tormentas es anual, pero la marea de tormenta que producen es muy reducida, esto hace que difícilmente el oleaje alcance la duna, por lo que no se produce erosión significativa a lo largo del año, esto ha permitido que el cordón de dunas esté muy desarrollado alcanzando a lo largo de toda la playa los 4.0 m de altura.

El segundo bloque es el estudio de la vegetación como factor en la respuesta morfológica del perfil playa-duna ante una tormenta. Esta parte es la más importante en el desarrollo de esta tesis, como indica el propio título de la misma. Para ello se han presentado los resultados de una campaña de ensayos en los que se ha analizado la influencia de la vegetación en la respuesta de los dos perfiles (con berma y sin berma) bajo 3 trenes de onda distintos con 4 coberturas distintas. De los resultados se obtuvo la comprensión del funcionamiento del perfil playa-duna y una primera definición del papel que las plantas ejercen en la morfología de la duna ante un evento extremo.

Los modos de erosión presentados en los ensayos fueron tres: *swash* (perfil B), colapso (perfil A) y *overwash* (perfiles A y B). El transporte de sedimentos en *swash* es hacia la playa sumergida y fuera de la profundidad de cierre, en colapso se aporta sedimento a pie de duna y a la barra, hay aportación al perfil de playa. Cuando se produce *overwash* hay transporte de sedimentos detrás de la duna.

En relación al volumen erosionado en la cara expuesta de la duna es mayor en condiciones hidrodinámicas de mayor periodo en los casos del perfil A, donde se produce erosión en colapso de acuerdo con (van Gent, et al., 2008). No siendo así en el perfil B donde el modo de erosión es *swash*.

En lo que respecta al perfil playa-duna bajo los efectos de una tormenta quedó evidenciada la relación morfológica de la playa y la duna en la desaparición del cambio de pendiente entre ambos obteniéndose una pendiente homogénea. Además los perfiles finales son muy similares, ambos generaron pendientes muy parecidas en la playa (sumergida y seca) lo que coincide con (van Gent, et al., 2008) y (Vellinga, 1986), el perfil final es independiente del inicial, siempre y cuando la tormenta dure el tiempo suficiente.

El papel de la vegetación en el sistema fue definido por varios aspectos en las respuestas morfodinámicas. De los datos observados de la hidrodinámica hay una tendencia de los coeficientes de reflexión a aumentar conforme aumenta la cobertura vegetal, no

siendo relevante la vegetación para números de Iribarren pequeños y es más notoria cuanto más grandes son los números de Iribarren.

Se observó una disminución de la lámina de agua en la zona de *swash*, confirmando lo establecido por (Kobayashi, et al., 2013), se piensa que es porque la vegetación reduce la velocidad del flujo y favorece su filtración de acuerdo con la hipótesis inicial de que las hojas aumentan la fricción flujo-suelo.

En lo que respecta a la influencia de la vegetación en la erosión de la cara expuesta de la duna, ésta reduce la erosión en los modos de *swash* con números de Iribarren pequeños y en colapso para números de Iribarren grandes hay una reducción en el escarpe producido.

De la respuesta morfológica de los perfiles con las distintas coberturas se observó que son similares produciéndose los mismos modos de erosión, concluyendo que la vegetación no cambia su respuesta morfológica, sino que aumenta el tiempo de resistencia de la duna.

El tercer bloque fue la calibración y posterior validación del modelo numérico XBeach como herramienta para la simulación de respuestas morfológicas del perfil playa duna ante tormentas. El modelo fue capaz de representar los modos de erosión, colapso y *swash*. También representó muy bien la erosión producida por *overwash*, pero no la acumulación de sedimentos en el pie de duna de la cara protegida. El modelo representa muy bien la erosión producida en la cara expuesta de la duna, en cambio la representación de la playa sumergida no es buena en todos los casos simulados porque sobreestima la erosión en la playa seca y en consecuencia acumula más en la playa sumergida. Es decir, se considera buena la representación que hace de la erosión que se produce en la duna, pero no tanto la erosión que se produce en la playa seca, sobreestima el transporte de sedimentos que hay en la playa. Respecto a los tiempos de simulación se presentaron ciertas diferencias, el modelo tarda más en representar la erosión producida en los ensayos, en esta investigación no se analizaron parámetros que influyen en la velocidad del transporte de sedimentos, en particular el parámetro $T_{s,min}$ que está relacionado con la velocidad de caída, lo que es conveniente tener presente para próximas calibraciones que se hagan del modelo. En general, y como era de esperar, se puede afirmar que las diferencias entre el laboratorio y el modelo aumentaron dada la mayor complejidad de los procesos, sin embargo, las diferencias respecto a laboratorio siguen siendo muy aceptables. El XBeach se considera un modelo que representa de manera muy aproximada la erosión producida en la duna que de cara a evaluar los riesgos producidos por tormentas puede ser muy bueno en uso ingenieril. Pero debido a la extensión del número de parámetros se recomienda hacer un estudio previo de estos para poderlos reducir el número de parámetros en la calibración y que este pueda llegar a ser un modelo más robusto, necesario en ingeniería.

7.1 Futuras líneas de investigación

Las futuras líneas de investigación se centran en la parte de modelación física y numérica.

En lo que respecta a la morfología dunar se plantea como posible investigación deducir para el diseño de playas con berma ecuaciones basadas en la física de manera similar a cómo han sido derivadas las ecuaciones para diques con berma y así poder establecer las dimensiones de la berma óptimas en el diseño de playas.

Una de las conclusiones más importantes de la parte experimental fue que las dunas aumentan la respuesta morfológica dunar en el tiempo. En este trabajo se presenta el interés de

analizar el tiempo como una variable y no como una condición inicial, es decir, analizar cuánto tarda el perfil en llegar a un nivel de destrucción con vegetación y sin vegetación, en vez de que el tiempo sea un parámetro fijo.

Además se recomienda ampliar las campañas de ensayos enfocado a cuantificar qué parte de las plantas (aérea o subterránea) trabaja más en los distintos modos, colapso, *swash* y *overwash*. Así se podría analizar el funcionamiento de las plantas según la posición de éstas, estén en la cara protegida, expuesta o en la cresta como también realiza (Kobayashi, et al., 2013). Con estos datos se podría obtener un criterio ecológico (en qué casos actúa más la parte aérea de las hojas y cuándo la parte subterránea) en la restauración de dunas y diseño de playas y definir que especie es más conveniente, una que pueda desarrollar raíces profundas o una especie con mayor superficie aérea y en qué partes de la duna es conveniente colocarlas.

En lo que respecta a la modelación numérica se considera conveniente mejorar la calibración y en dicho caso realizar simulaciones con mallas de coeficientes de fricción para dar un valor numérico a la fricción producida por la cobertura vegetal. Con este paso realizado se podría cuantificar el trabajo de la parte aérea y el de las raíces además de medir los tiempos de resistencia que la cobertura crea en la parte de la cobertura vegetal y de la planta. Estos resultados favorables permitirían ampliar la campaña de ensayos de laboratorio mediante la utilización de dicho modelo numérico y proporcionaría una herramienta rápida y eficiente para abordar con ciertas garantías el estudio numérico de la vegetación.

Bibliografía

Ahrens, J., 2003. Simple Equations to Calculate Fall Velocity and Sediment Scale Parameter.. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 129(2), pp. 146-150.

Alcerreca, J., Silva, R. & Mendoza, E., 2013. Simple settling velocity formula for calcareous sand. *Journal of Hydraulic Research*, pp. 1-5.

Baquerizo, A., 1995. *Reflexión del Oleaje en Playas. Métodos de Evaluación y de Predicción*. Universidad de Cantabria, Santander. 180pp : Tesis Doctoral.

Binda, P. & Hildred, P., 1973. Bimodal grain-size distribution of some Kalahari type sands from Zambia. *Sedimento. Geology*, Volume 10, pp. 233-237.

Birkemeier, W. A., 1985. Field data on seaward limit. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Volume 111, pp. 598-602.

Boughey, A., 1957. Ecological studies of tropical coast- lines. *Journal of Ecology*, Volume 45, pp. 665-687.

Bruun, P., 1954. *Coast erosion and the development of beach profiles*.. Beach erosion Board Technical Memorandum 44 ed. Washington DC: US Army Corps of Engineers.

Cailleux, A., 1943. Distinction des sables marins et fluviaux. *Bull. Soc. Geol. France*, Volume 33, pp. 125-138.

Camenen, B., 2007. Simple and General Formula for Settling Velocity of Particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), pp. 229-233.

Carter, R., 1990. *The geomorphology of coastal dunes in Ireland*. s.l.:s.n.

Chang, N. & Liou, J., 2001. Discussion of a free-velocity equation, by John P. Ahrens.. *Journal of Waterway, Port and Ocean Engineering*, 127(4), pp. 250-251.

Cheng, N., 1997. Simplified Settling Velocity Formula for Sediment Particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), pp. 149-152.

Chiu, T. & Dean, R., 1986. *Additional comparisons between computed and measured erosion by hurricanes*, Beaches and Shore Resource Center, Florida State University, Tallahassee, FL: s.n.

Danielsen, F. et al., 2005. *The asian tsunami: a protective role for coastal vegetation*., Washington: Science.

Dean, R., 1977. *Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts*, Department of Civil Engineering, University of Delaware: Ocean Engineering Report nº 12.

Delft Hydraulics, 1982a. *Dune erosion during an extreme storm surge, Noorderstrand Schouwen*, Delft NL: Research Report M1797.

Delft Hydraulics, 1982a. *Dune erosion during an extreme storm surge, Noorderstrand Schouwen*, Delft NL: Research Report M1797.

Delft Hydraulics, 1982b. *Dune erosion at the hotels 'La Specia' en 'De blanke top' in Zeeuwsch, Vlaanderen*, Delft Hydraulics, Delft NL: Research Report M1811.

Delft Hydraulics, 1984a. *Scale series on dune erosion, large scale tests in the Delta Flume*, Delft Hydraulics, Delft NL: Research Report M1263, part III.

Delft Hydraulics, 1984b. *Dune erosion due to design storm surge at Walcheren, Golflinks en Vijgeter, investigation of stability and effect of the dune revetments*, Delft Hydraulics, Delft NL: Research Report M1958.

Delft Hydraulics, 1987. *Systematic research on the effectiveness of dune toe revetments, large scale model investigations*, Delft Hydraulics, Delft NL: Research Report H298, part I.

Delft Hydraulics, 2004. *Model study of dune erosion: experimental results of small scale pilot tests*, Delft Hydraulics, Delft: Report H4265.

Delft Hydraulics, 2007. *Technical Report Dune Erosion*, Delft Hydraulics, Delft NL: Report H4357.

Diez, J., Esteban, M. & Paz, R., 2009. Cancun-Nizuc Coastal Barrier. *Journal of Coastal Research*, Issue 251, pp. 57-68.

Donnelly, C., 2007. Morphologic change by overwash: establishing and evaluating predictors. *Journal of Coastal Research*, Volume 50, pp. 520-526.

Doran, K. et al., 2009. *Hurricane Ike: Observations and analysis of coastal change*, s.l.: USGS.

Duane, D., 1964. Significance of skewness in recent sediments, Western Pamlico Sound, North Carolina. *J. Sed. Petrol*, Volume 34, pp. 864-874.

Durán, G., 2010. *Análisis del peligro por marea de tormenta en el golfo de México*, Universidad Nacional Autónoma de México: Thesis master.

Flor, G., 2004. *Geología Marina. Area de Estratigrafía y Sedimentología*, Universidad de Oviedo: Departamento de geología.

Flor, G. & Martínez, P., 1991. Características morfológicas y sedimentológicas de las dunas eólicas de Sonabia (Zona oriental de Cantabria, no de España). *Estudios geol.*, Volume 47, pp. 317-337.

Folk, R., 1954. The distinction between grain-size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. *J. Geo.*, Volume 62, pp. 344-359.

Folk, R., 1971. Longitudinal dunes of the northwestern edge of the Simpson Desert, Northern Territory, Australia. Geomorphology and grain size relationships. *Sedimentology*, Volume 16, pp. 5-54.

Folk, R., 1974. Petrology of Sedimentary Rocks. *Walter Geology Library*, p. 182.

Folk, R. & Ward, W., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size image. *J. Sed. Petrol*, Volume 27, pp. 3-27.

Friedman, G., 1961. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics. *J. Sed. Petrol*, Volume 31, pp. 514-529.

Gallagher, E. & Vreugdenhil, C., 1985. A depth integrated model for suspended. *Journal of Hydraulics Research*, 23(4), pp. 359-377.

García, M., Gallego, J. & García, F., 1999. Plant functional types in relation to foredune dynamics. *Journal of Vegetation Science*, Volume 10, pp. 27-34.

García, M., Gallego, J., Williams, A. & García, F., 2001. A coastal dune vulnerability classification: SW Iberian Peninsula case study. *Journal of Coastal Research*, Volume 17, pp. 802-811.

Geissert, D. & Didier, D., 1995. Influencia de la geomorfología en la evaluación de suelos de dunas costeras en Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas*, Boletín nº especial(3).

Geissert, K., 2006. *Procesos y Cambios. Estrategia para el manejo costero integral: el enfoque municipal* (eds P. Moreno-Casasola, E. Peresbarbosa y A. C. Travieso-Bello), Xalapa: Instituto de ecología A. C. y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

Goldsmith, V., 1985. *Coastal dunes*, New York: Springer.

Goldsmith, V., 1977. *Coastal processes and resulting forms of sediment accumulation: Currituck Spit, Virginia/North*, Virginia: Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering .

Hallermeier, R., 1981. Terminal Settling Velocity of Commonly Occurring Sand Grains. *Sedimentology*, 28(6), pp. 859-865.

Hand, B., 1967. Differentiation of beach and dune sand, using settling velocities of light and heavy minerals. *J. Sed. Petrol.*, Volume 37, pp. 514-520.

Hernández Santana, J., Méndez, L. & Figueroa, M., 2007. Caracterización del relieve plio-cuaternario del entorno costero del estado de Veracruz, México. *Rev. C & G*, Volume 21, pp. 113-131.

Hesp, H. et al., 2011. Transgressive dunefield landforms and vegetation associations, Doña Juana, Veracruz, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, pp. 285-295.

Hesp, P., 1982. *Morphology and Dynamics of Foredunes in S.E. Australia*, Dept. Geography, University of Sydney.: Unpubl. Ph.D Thesis.

Hesp, P., 1984. Foredune formation in Southeast Australia. *Coastal Geomorphology in Australia.*, pp. 69-97.

Hesp, P., 1991. Ecological processes and plant adaptations on coastal dunes. *Journal of Arid Environment*, 21(2), pp. 165-191.

Hesp, P., 2012. *Surfzone-beach-dune interactions*. Jubilee Conference Proceedings, NCK.

Hesp, P. & Martínez, M., 2007. Disturbance processes and dynamics in coastal dunes.

Hesp, P. et al., 2011. Transgressive dunefield landforms and vegetation associations, Doña Juana, Veracruz, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, pp. 285-295.

Hesp, P. & Short, A., 1980. *Dune forms of the Youngusband Peninsula, SE South Australia.* Proceeding of the Conference on Aeolian Landscapes in the semiarid region of SouthEastern Australia, Australian Society of Soil Science. , s.n.

Hjulström, F., 1939. Transportation of detritus by moving water. *Petrol. Geol.*, pp. 5-31.

Holthuijsen, L., Booij, N. & Herbers, T., 1989. A prediction model for stationary short-crested waves in shallow water with ambient currents.. *Coastal Engineering*, 13(1), pp. 23-54.

Hydraulics, D., 2006. *Dune erosion, large-scale model tests and dune erosion prediction method*, Delft Hydraulics, Delft NL.: Report H4357.

Jiménez, J. & Madsen, O., 2003. A Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments. *Journal of Waterway, Port and Ocean Engineering*, 192(2), pp. 70-78.

Jonsson, I., 1963. Measurements in the turbulent wave boundary layer. *Proceedings of 10th IAHR Conference, Londres*, pp. 85-92.

Keller, W., 1954. Size distribution of sand in some dunes beaches and sandstones. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, Volume 29, pp. 215-221.

Klijn, J., 1981. Nederlandse kustduinen. Geomorfologie en bodems.. *Ph.D.-thesis*, p. 188.

Kobayashi, N., Buck, M., Payo, A. & Johnson, B. D., 2009. Berm and dune erosion during a storm. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, pp. 1-10.

Kobayashi, N., Gralher, C. & Do, K., 2013. Effects of Woody Plants on Dune Erosion and Overwash. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*, pp. 466-472.

Kobayashi, N., Tega, Y. & Hancock, M. W., 1996. Wave reflection and overwash of dunes. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, pp. 150-153.

Kraus, N. C. & Smith, J. M., 1994. *Supertank laboratory data collection project*, s.l.: US Army Corps of Engineers.

Kriebel, D., 1982. *Beach and dune response to hurricanes.*, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, DE.: Thesis.

Kriebel, D., 1986. Verification study of a dune erosion model.. *Shore and Beach*, 54(3), pp. 13-20.

Kriebel, D. & Dean, R., 1985. Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion. *Coastal Engineering*, Volume 9, pp. 221-245.

Kuenen, P., 1960. Experimental abrasion; Eolian action. *J. Geol*, Volume 68, pp. 427-449.

Larson, M., Erikson, L. & Hanson, H., 2004. An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering* , p. 675– 696.

Larson, M. & Kraus, N., 1989. *SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 1: Theory and model foundation.*, Coastal Engineering Research Center US. Army Waterway Experiment Station, Vicksburg, M: Tech. Report CERC 89-9.

Larson, M., Kraus, N. & Byrnes, M., 1989. *SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 2: Numerical formulation and model tests*, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Waterway Experiment Station, Vicksburg, MS.: Report CERC 89-9.

Mabessone, J., 1963. Coastal sediments and coastal development near Cádiz (Spain). *Geol. en Mijnbouw*, Volume 2, pp. 29-43.

Mansard, E. & Funke, E., 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Coastal engineering*, pp. 154-172.

Margolis, S. & Krinsley, D., 1971. Submicroscopic frosting on eolian and subaqueous quartz sand grains. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, Volume 82, pp. 3395-3406.

Martínez, M., 2010. *Las playas y las dunas costeras: un hogar en movimiento*. México: Fondo de Cultura Económica.

Martínez, M. et al., 2006. Coastal dune vulnerability. *Environmental Conservation*, 33(2).

Martínez, M. & Moreno-Casasola, P., 1996. Effects of burial by sand on seedling growth and survival in six tropical. *Journal of Coastal Research*, 12(2), pp. 406-419.

Martínez, M. et al., 2012. Dinámica de un paisaje complejo en la costa de Veracruz. *Investigación ambiental*, 4(1), pp. 151-160.

Mason, C. & Folk, R., 1958. Differentiation of beach, dune and eolian flat environments by size analysis, Mustang Island, Texas. *J. Sed. Petrol*, Volume 28, pp. 211-226.

Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas, 2007. *Manual de restauración de dunas costeras*. s.l.:ISBN.

Murphy, A. & Epstein, E., 1989. *Monthly Weather Review*, Volume 117, pp. 572-581.

- Nielsen, P., 2006. Sheet flow sediment transport under waves with acceleration skewness and boundary layer streaming. *Coastal Engineering*, Volume 53, p. 749–758.
- Ortiz, P. & De La Lanza, P., 2006. *Diferenciación del espacio costero de México: Un inventario regional.*, México: Instituto de Geografía UNAM.
- Overton, M., Pratikto, W., Lu, J. & Fisher, J., 1994. Laboratory investigation of dune erosion as a. *Coastal Engineering*, Volume 23, pp. 151-165.
- Packham, J. & Willis, A., 1997. *Ecology of Dunes, Salt Marsh and Shingle.* Londres: Chapman & Hall.
- Patro, B. & Sahu, B., 1977. Discriminant analysis of sphericity and roundness data of clastic quartz grains in rivers, beaches and dunes. *Sediiment. Geol.*, Volume 19, pp. 301-311.
- Peregrine, P., 1983. Breaking waves on beaches. *Ann Rev Fluid Mech*, Volume 14, pp. 149-178.
- Posada, G., Silva, R. & Medina, R., 2008. Modelo numérico tridimensional para transporte de un contaminante conservativo. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXIII(1), pp. 5-19.
- Psuty, N., 1988. Dune/Beach Interaction.. *Journal of Coastal Research*, Issue 3, pp. 1-136.
- Pye, K. & Tsoar, H., 1990. *Aeolian sand and sand dunes.* London: Unwin Hyman.
- Reed, W., Le Fever, R. & Moir, G., 1975. Depositional environment interpretation from settling velocity (psi) distributions. *Bull. Geol. Soco Amer.*, Volume 86, pp. 1305-1315.
- Ridley, H., 1930. *The Dispersal of Plants Through- out the World.*
- Roelvink, D. et al., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, Volume 56, pp. 1133-1152.
- Rubey, W., 1933. *Settling Velocities of Gravel, Sand, and Silt Particles.* Washington: U.S. Geological Survey.
- Sahu, B., 1964. Depositional mechanism from the size analysis of clastic sediments. *J. Sed. Petrol*, Volume 34, pp. 73-83.
- Sallenger, A. H., 2000. Storm Impact Scale for Barrier Islands. *Journal of Coastal Research*, pp. 890-895.
- Schlichting, H., 1968. *Boundary layer theory.* Nueva York, Mc Graw Hill.
- Semarnat, 2013. *Manejo de ecosistemas de dunas costeras, criterios ecológicos y estrategias.* México: ISBN.
- Sherman, D. & Bauer, B., 1993. Dynamics of beach dune systems. *Progress in Physical Geography*, Volume 17, pp. 413-447.
- Short, A. & Hesp, P., 1982. Wave, Beach and Dune interactions in South Eastern Australia. *Marine Geology*, Volume 48, pp. 259-284.
- Silva, R. et al., 2002. *Oceanographic vulnerability to hurricanes on the Mexican coast.* Melbourne, Poceedings of 6th International Workshop on Wave Hink Casting and Forecasting.
- Silva, R., Mendoza, E. & Chávez, V., 2012. *Análisis de las condiciones de oleaje, viento e inundación frente a la central nucleoeleétrica Laguna Verde,* México: Insituto de Ingeniería UNAM.
- Soulsby, R., 1997. *Dynamics of Marine Sands. A manual for practical applications.* U.K. Stringham: Thomas Telford Publications.

- Spencer, D., 1963. The interpretation of grain-size. *Journal of Sedimentary Petrology*, Volume 33, pp. 180-190.
- Swamee, P. & Ohja, C., 1991. Drag Coefficient and Fall Velocity of Nonspherical Particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(5), pp. 660-667.
- Swart, D., 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. *Hydraul Lab Publ.*, Volume 131.
- Taira, A. & Scholle, P., 1979. Origin of bimodal sands in some modern environments. *J. Sed Petrol*, Volume 49, pp. 777-786.
- Thorne, R., 1594. Flowering plants of the waters and shores of the Gulf of Mexico. *Fishery Bulletin of the Fish and Wildlife Service*, Volume 55, pp. 193-202.
- Tomasicchio, G. R. et al., 2011. Large-scale experiments on dune erosion processes. *Journal of Hydraulic Research*, pp. 20-30.
- van Gent, M. et al., 2008. Large-scale dune erosion tests to study the influence of wave periods. *Coastal Engineering*, Volume 55, pp. 1041-1051.
- Van Rijn, L., 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves, part I, II, III and IV. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6,7), pp. 649-689 (part I and II), 761-793 (part III & IV).
- Van Rijn, L. et al., 2003. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based pro. *Coastal Engineering*, 47(3), pp. 295-327.
- van Thiel de Bries, J., van Gent, M., Walstra, D. & Reniers, A., 2008. Analysis of dune erosion processes in large-scale flume experiments. *Coastal Engineering*, pp. 1028-1040.
- van Thiel, J., 2009. Dune erosion during storm surges. *Tesis doctoral*.
- Vellinga, P., 1986. *Beach and dune erosion during storm surges*. s.l.:s.n.
- Visher, G., 1971. Depositional Processes and the Navajo Sandstone. *Geological Society of America Bulletin*, Volume 82, pp. 1421-1424.
- Visher, S., 1969. Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39(3), pp. 1074-1106.
- Vousdoukas, M., Ferreira, O., Almeida, L. & Pacheco, A., 2012. Toward reliable storm-hazard forecasts: XBeach calibration and its potential application in an operational early-warning sys. *Ocean Dynamics*, Volume 62, p. 1001-1015.
- WAMDI-Group, 1988. The WAM Model - a third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, Volume 18, pp. 1775-1810.
- Zheng, J. & Dean, R., 1997. Numerical models and intercomparisons of beach profile evolution. *Coastal Engineering*, Volume 30, pp. 169-201.

Anexo 1

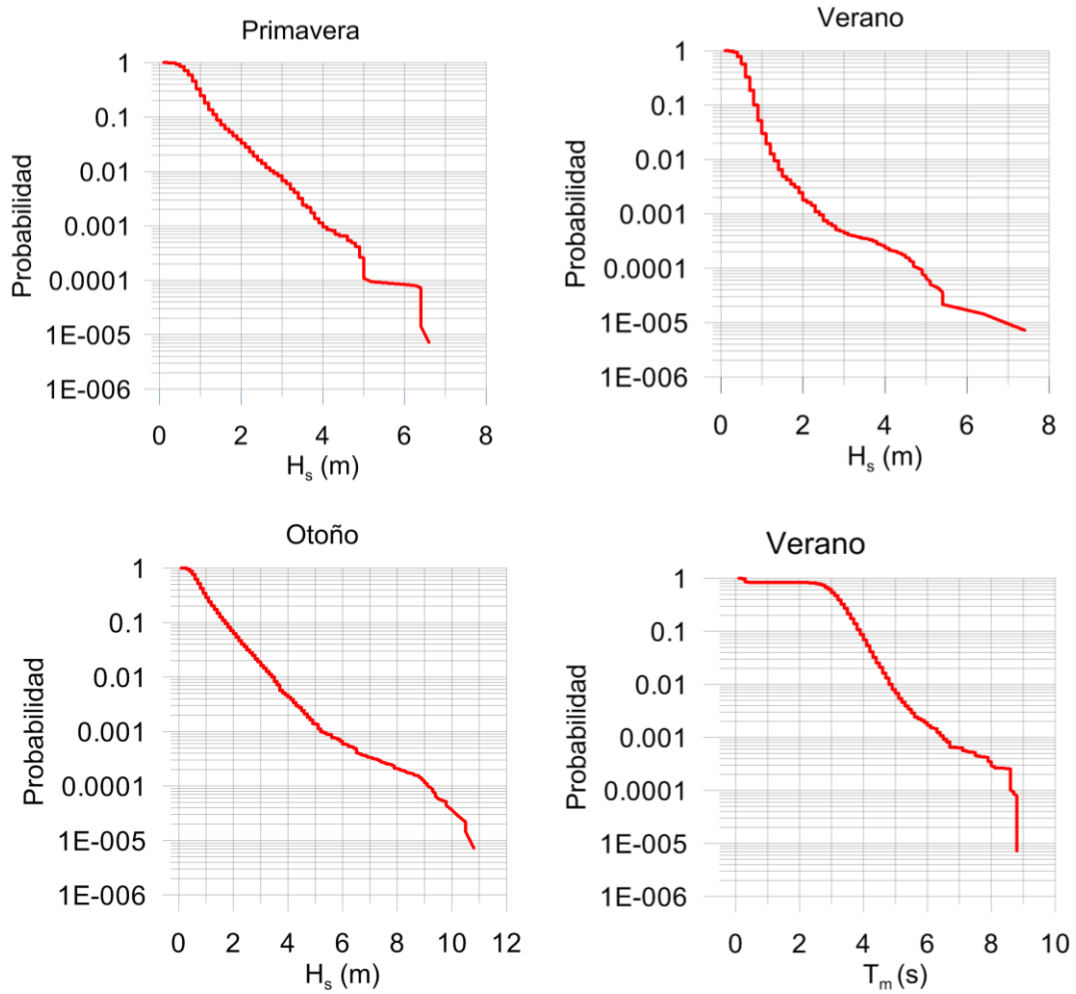


Figura anexo 1. 1. Probabilidad de excedencia de altura de ola significativa estacional.



Figura anexo 1. 2. Rosa de oleaje de periodo medio, anual y estacional.

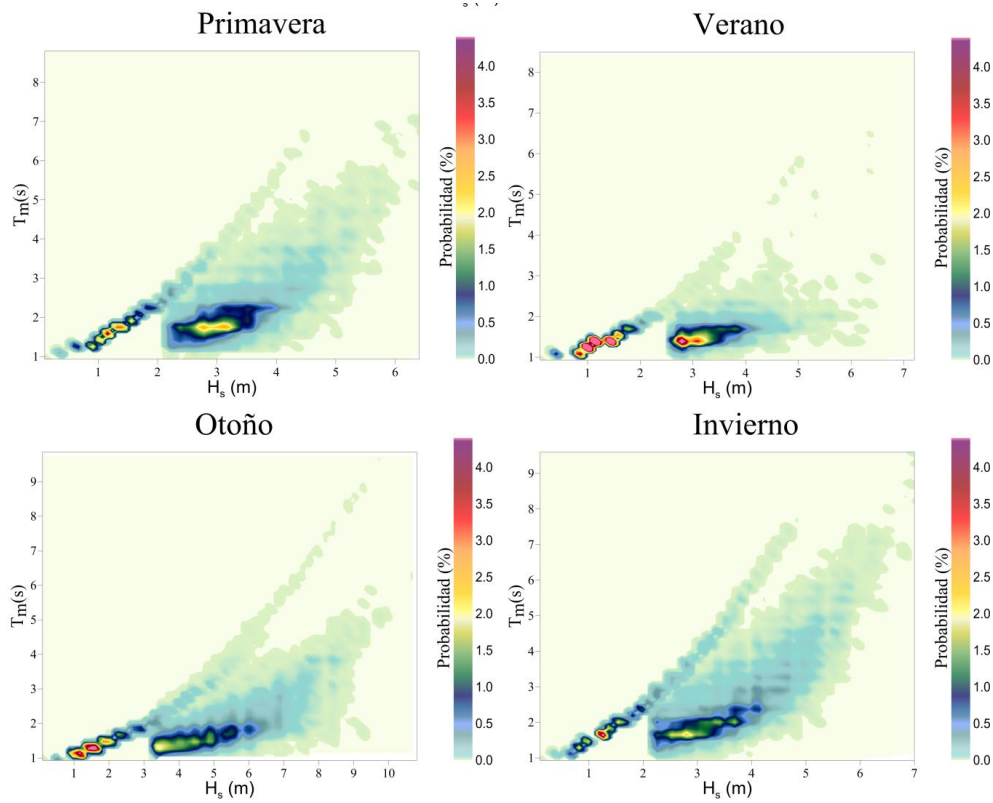


Figura anexo 1. 3. Probabilidad conjunta de periodo medio y altura de ola significativa.

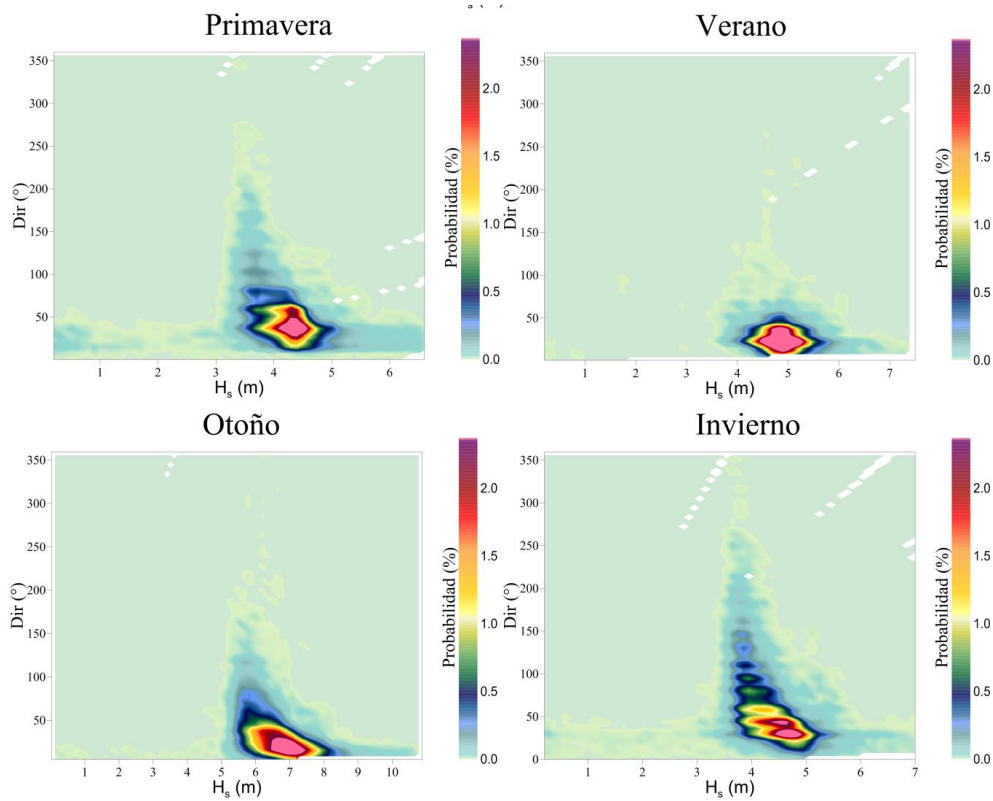


Figura anexo 1. 4. Probabilidad conjunta de dirección y altura de ola significativa.

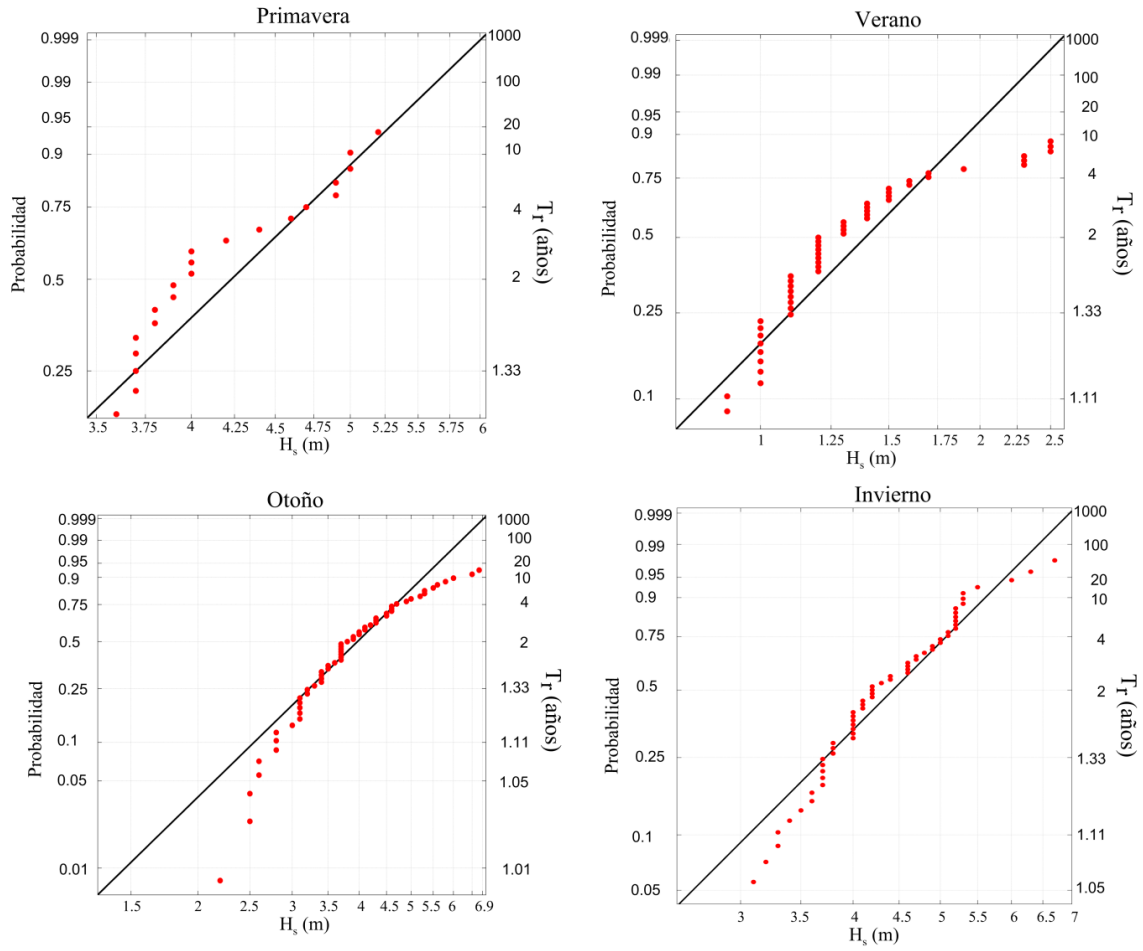


Figura anexo 1. 5 Análisis extremal estacional de altura de ola significativa.

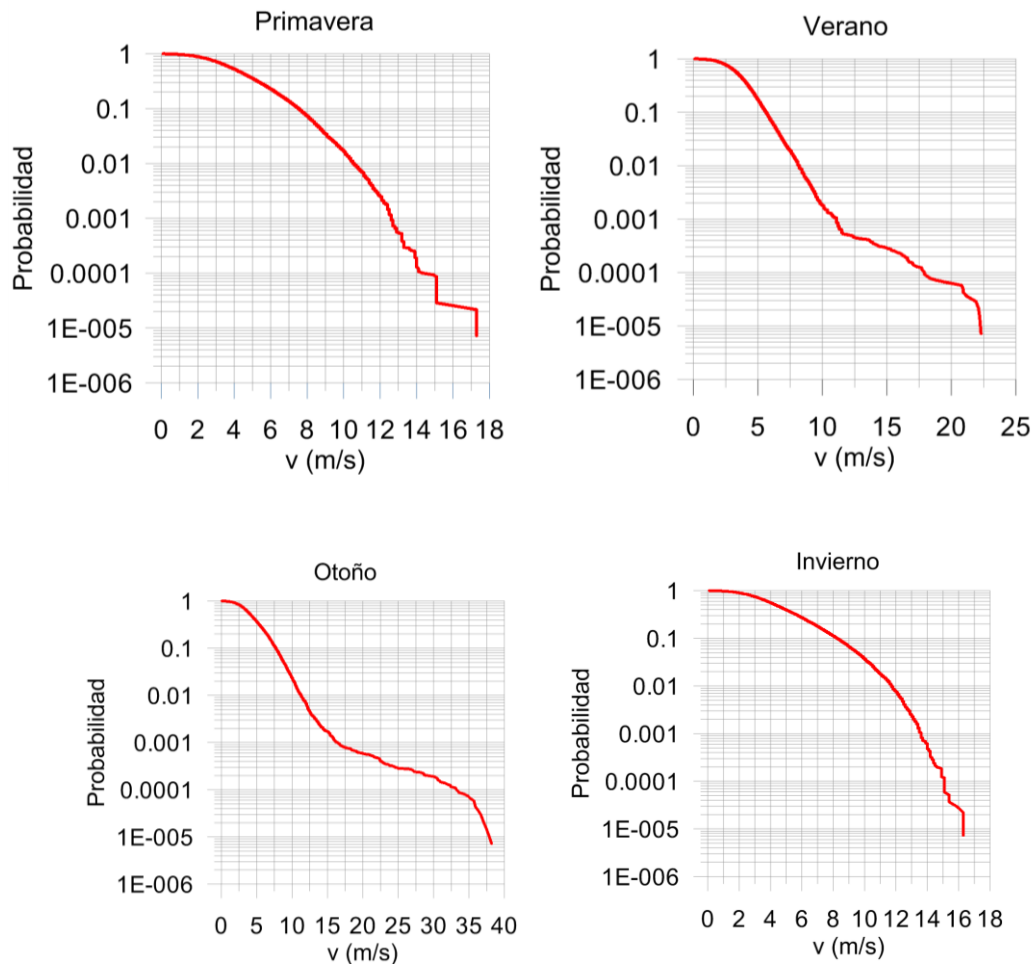


Figura anexo 1. 6. Probabilidad de excedencia de velocidades sostenidas de viento estacionales.

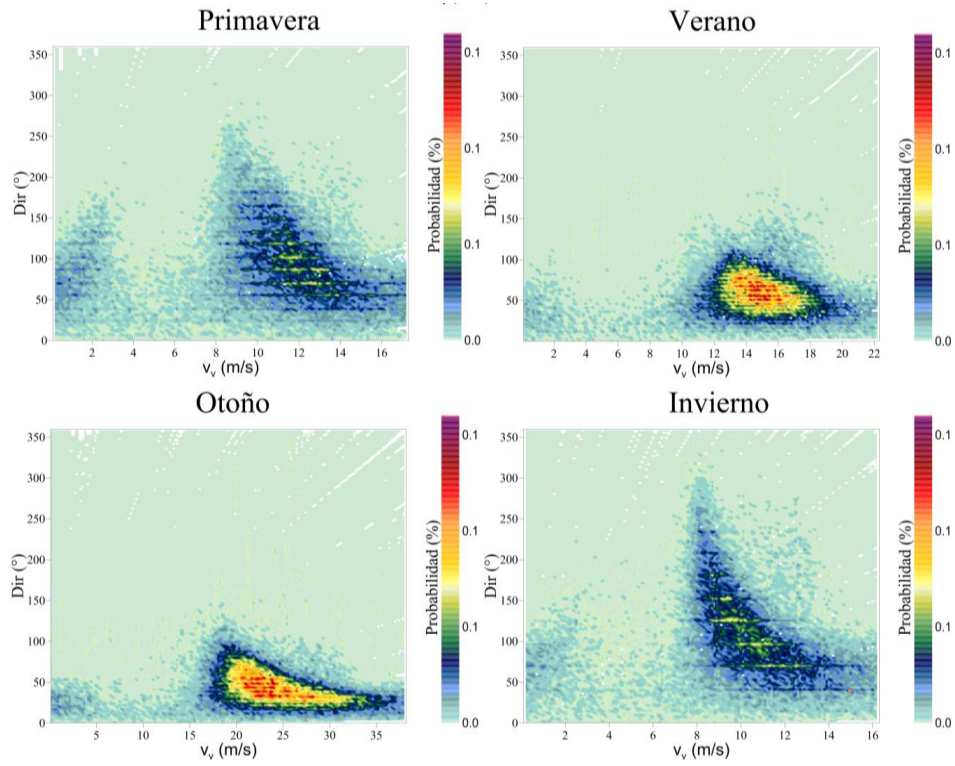


Figura anexo 1. 7. Probabilidad conjunta de dirección y velocidades sostenidas de viento.

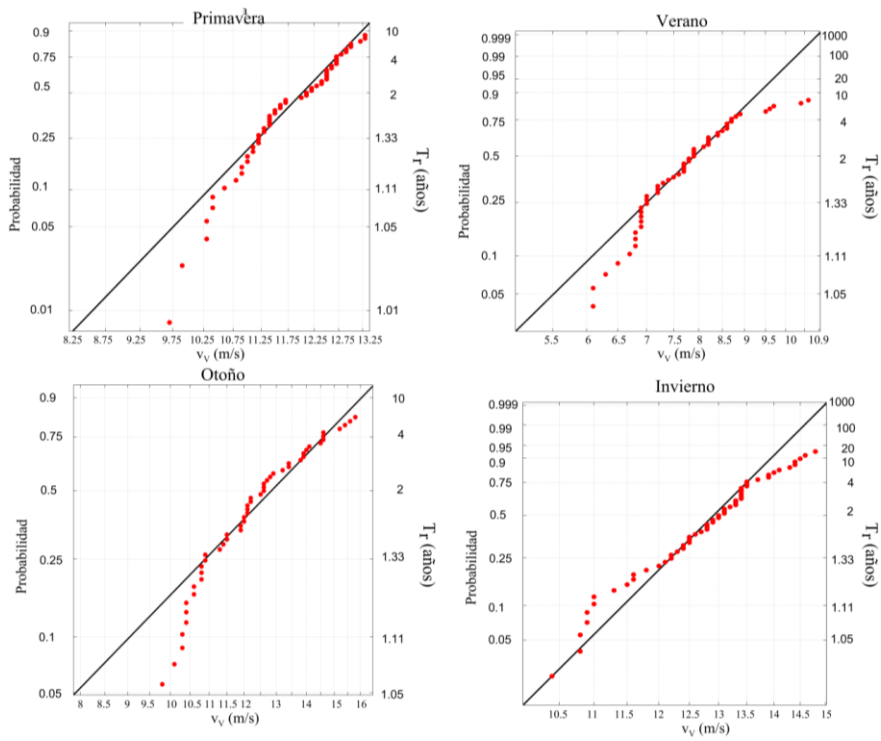


Figura anexo 1. 8. Análisis extremal de velocidades de sostenidas de viento.

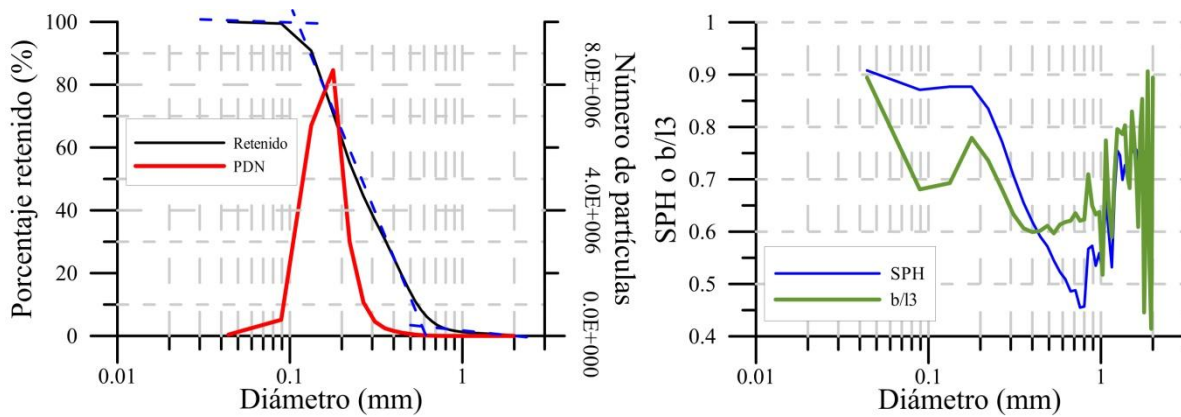


Figura anexo 1. 9 Análisis granulométrico de la zona de rotura para el perfil de duna primaria sin vegetación.

Tabla anexo1. 1 Valores de la muestra granulométrica de la zona de rotura para el perfil de duna primaria sin vegetación.

Parámetro	Valor	Esfericidad media	0.732
Span0	0.855	Simetría media	0.822
U0	1.542	media b/l	0.696
S_k	-0.171855	D_{10}	0.103
media	0.29	D_{50} =mediana	0.148
Desviación estándar	0.734	D_{90}	0.229

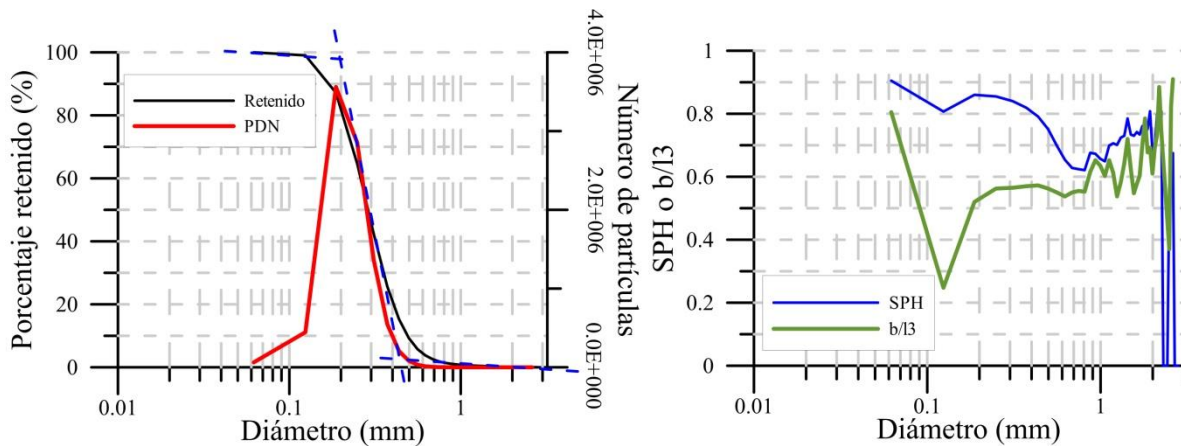


Figura anexo 1. 10 Análisis granulométrico de la zona de lavado para el perfil de duna primaria sin vegetación.

Tabla anexo1. 2. Valores de la muestra granulométrica de la zona de lavado para el perfil de duna primaria sin vegetación.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.911	Esfericidad media	0.810
U0	1.617	Simetría media	0.864
S_k	0.0986	media b/l	0.699
media	0.316	D_{10}	0.133
Desviación	0.5287	D_{50} =mediana	0.198
		D_{90}	0.313

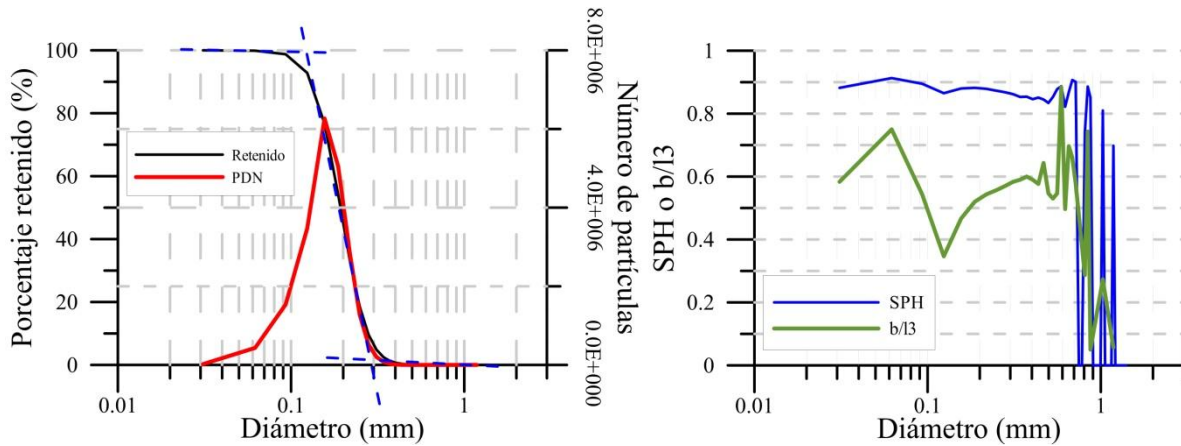


Figura anexo 1. 11. Análisis granulométrico de la playa seca para el perfil de duna primaria sin vegetación.

Tabla anexo1. 3. Valores de la muestra granulométrica de la playa seca para el perfil de duna primaria sin vegetación.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.832	Esfericidad media	0.866
U0	1.745	Simetría media	0.884
Sk	0.000449	media b/l	0.733
mediana	0.2	D_{10}	0.094
Desviación estándar	0.4323	D_{50} =mediana	0.152
		D_{90}	0.221

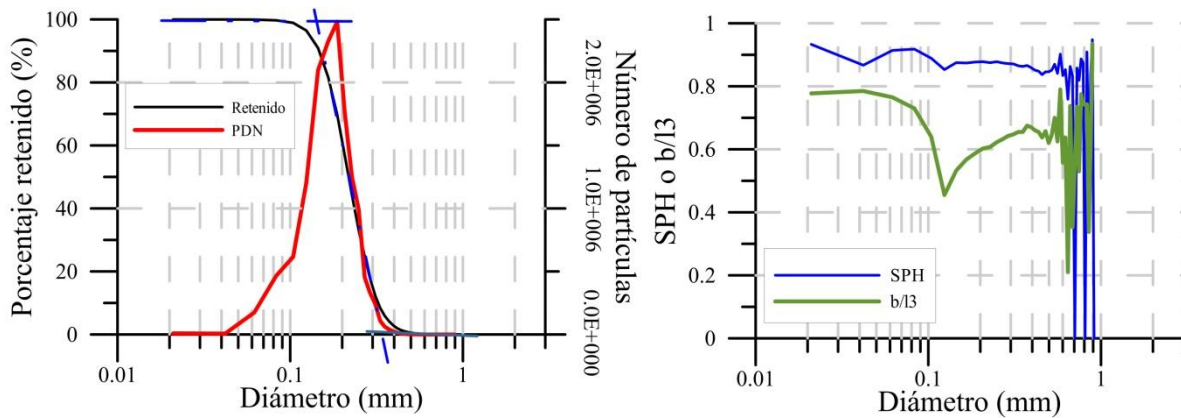


Figura anexo 1. 12. Análisis granulométrico de la cara de barlovento para el perfil de duna primaria sin vegetación.

Tabla anexo1. 4. Valores de la muestra granulométrica de la cara de barlovento para el perfil de duna primaria sin vegetación.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.845	Esfericidad media	0.863
U0	1.73	Simetría media	0.87
Sk	0.422033	media b/l	0.720
mediana	0.23	D_{10}	0.105
Desviación estándar	0.4284	D_{50} =mediana	0.169
		D_{90}	0.248

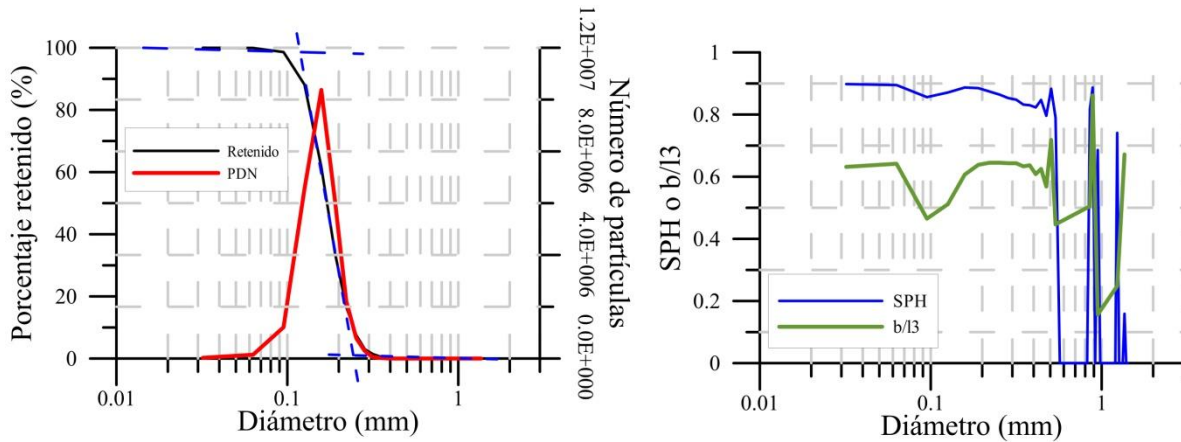


Figura anexo 1. 13. Análisis granulométrico de la cara de sotavento para el perfil de duna primaria sin vegetación.

Tabla anexo1. 5. Valores de la muestra granulométrica de la cara de sotavento para el perfil de duna primaria sin vegetación.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.642	Esfericidad media	0.870
U0	1.480	Simetría media	0.882
Sk	0.034203	media b/l	0.748
mediana	0.173	D_{10}	0.105
Desviación estándar	0.3754	D_{50} =mediana	0.147
		D_{90}	0.199

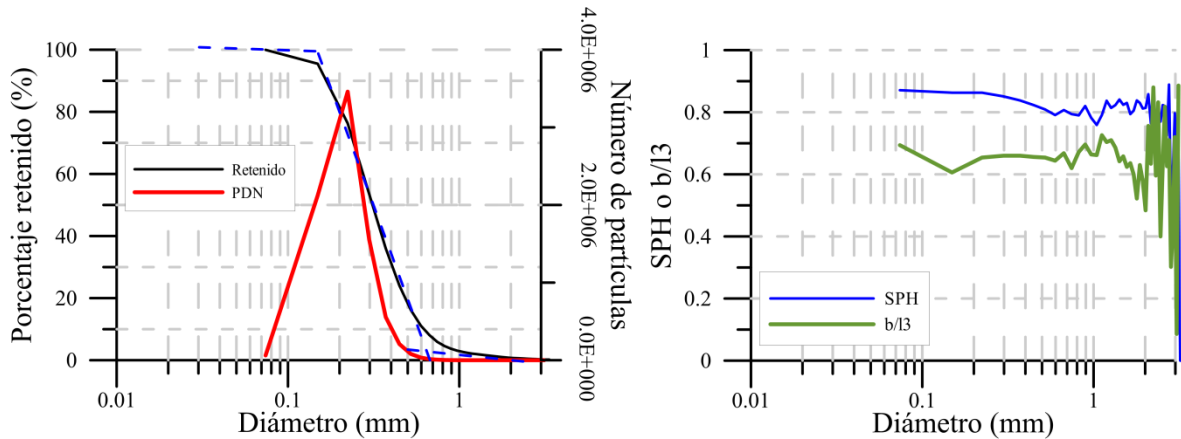


Figura anexo 1. 14. Análisis granulométrico de la zona de rotura para el perfil de duna primaria con vegetación.

Tabla anexo1. 6. Valores de la muestra granulométrica de la zona de rotura para el perfil de duna primaria con vegetación.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	1.027	Esfericidad media	0.829
U0	1.703	Simetría media	0.875
Sk	-0.18485	media b/l	0.705
Mediana (mm)	0.32	D_{10}	0.12
Desviación estándar	0.742	D_{50} =mediana	0.185
		D_{90}	0.310

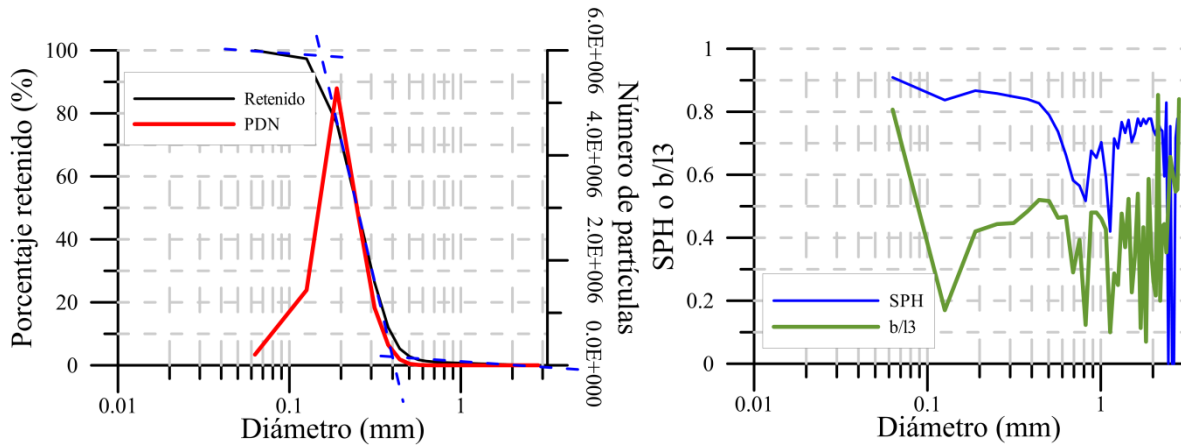


Figura anexo 1. 15. Análisis granulométrico de la zona de lavado para el perfil de duna primaria con vegetación.

Tabla anexo1. 7. Valores de la muestra granulométrica de la zona de lavado para el perfil de duna primaria con vegetación.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.905	Esfericidad media	0.837
U0	1.628	Simetría media	0.876
Sk	0.181784	media b/l	0.709
Mediana (mm)	0.26	D_{10}	0.117
Desviación estándar	0.616	D_{50} =mediana	0.175
		D_{90}	0.276

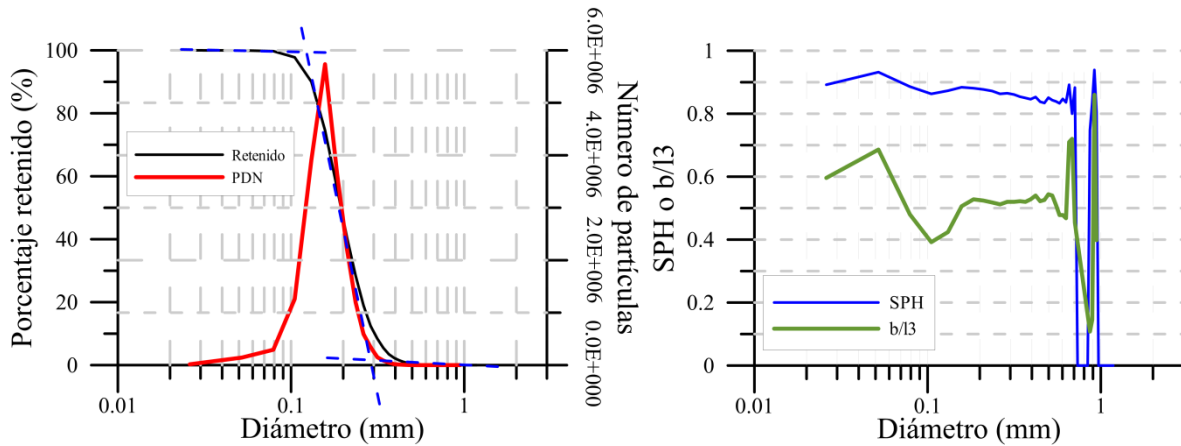


Figura anexo 1. 16. Análisis granulométrico de la playa seca para el perfil de duna primaria con vegetación.

Tabla anexo1. 8. Valores de la muestra granulométrica de la playa seca para el perfil de duna primaria con vegetación.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.776	Esfericidad media	0.864
U0	1.573	Simetría media	0.884
Sk	0.267336	media b/l	0.731
Mediana (mm)	0.203	D_{10}	0.104
Desviación estándar	0.4235	D_{50} =mediana	0.152
		D_{90}	0.222

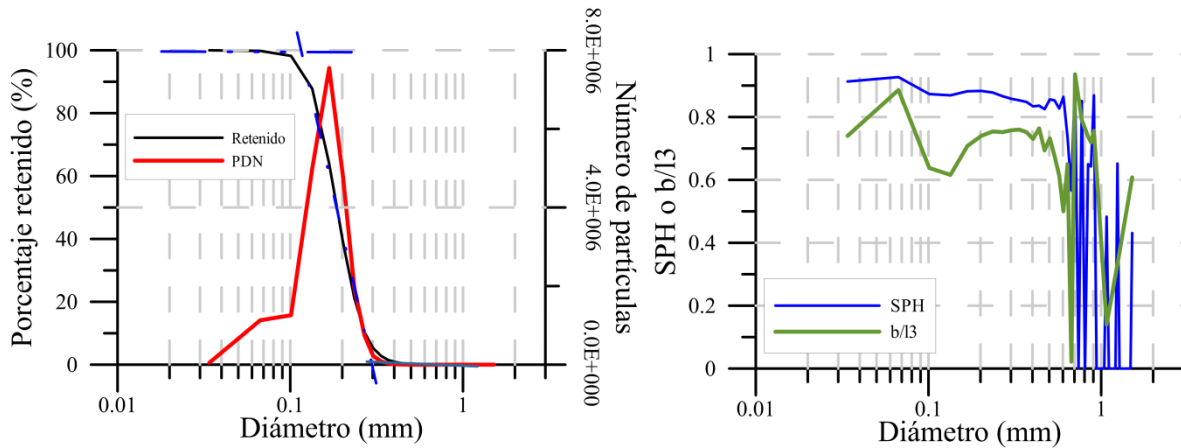


Figura anexo 1. 17. Análisis granulométrico de la cara de barlovento para el perfil de duna primaria con vegetación.

Tabla anexo1. 9. Valores de la muestra granulométrica de la cara de barlovento para el perfil de duna primaria con vegetación.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.793	Esfericidad media	0.867
U0	1.705	Simetría media	0.883
S_k	-0.1560	media b/l	0.793
Mediana (mm)	0.196	D_{10}	0.095
Desviación estándar	0.3837	D_{50} =mediana	0.151
		D_{90}	0.214

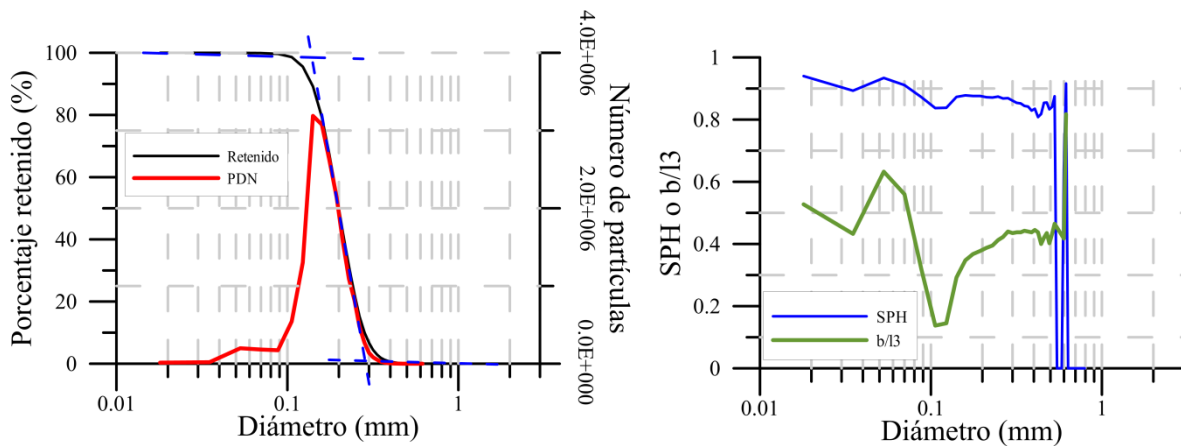


Figura anexo 1. 18. Análisis granulométrico de la cara de sotavento para el perfil de duna primaria con vegetación.

Tabla anexo1. 10. Valores de la muestra granulométrica de la cara de sotavento para el perfil de duna primaria con vegetación.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.741	Esfericidad media	0.861
U0	1.569	Simetría media	0.883
S_k	0.5375	media b/l	0.727
Media (mm)	0.2066	D_{10}	0.111
Desviación	0.398	D_{50} =mediana	0.163
		D_{90}	0.232

Tabla anexo1. 11. Modos de transporte para el perfil del perfil de duna con vegetación según Visher (1969).

	CT (mm)	FT (mm)	Tipo de transporte
Rompiente	0.65	0.15	Suspensión + saltación (poca)
Lavado	0.4	0.16	Suspensión + saltación (muchacha)
Playa seca	0.29	0.13	saltación
Duna embrionaria 1	0.29	0.15	saltación
Duna embrionaria 2	0.3	0.125	saltación

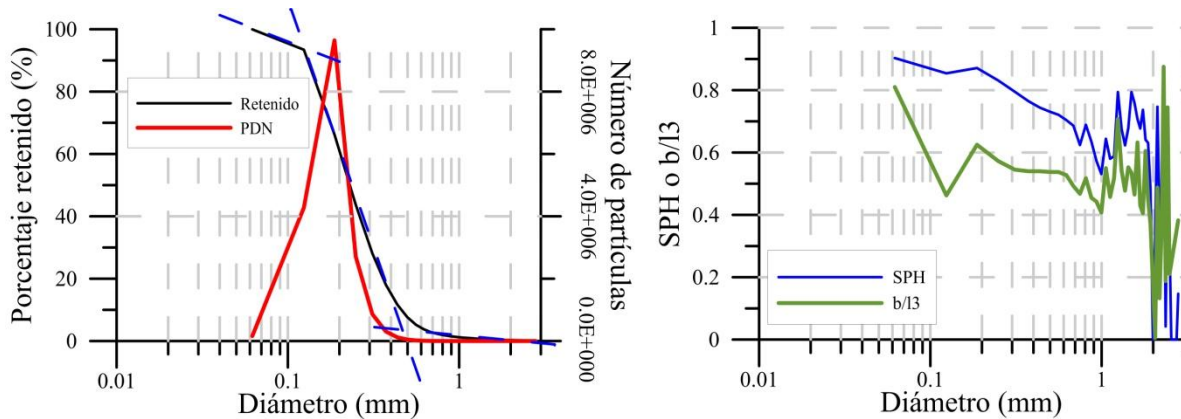


Figura anexo 1. 19. Análisis granulométrico de la zona de rotura del perfil de la playa de La Mancha.

Tabla anexo1. 12. Valores de la muestra granulométrica de la zona de rotura para el perfil de la playa de La Mancha.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.892	Esfericidad media	0.802
U0	1.540	Simetría media	0.855
S_k	-0.170	media b/1	0.703
mediana	0.248	D_{10}	0.104
Desviación estándar	0.734	D_{50} =mediana	0.148
		D_{90}	0.236

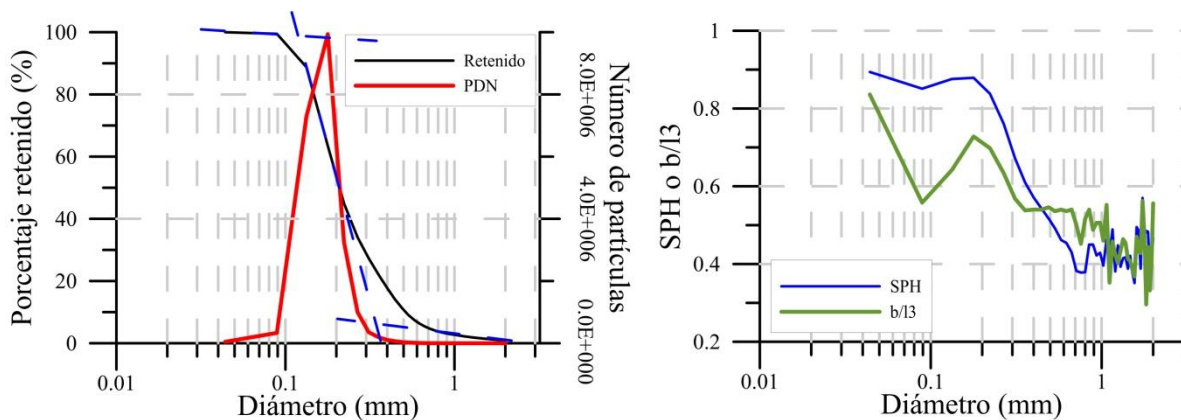


Figura anexo 1. 20. Análisis granulométrico de la zona de lavado del perfil de la playa de La Mancha

Tabla anexo1. 13. Valores de la muestra granulométrica de la zona de lavado para el perfil de la playa de La Mancha.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.742	Esfericidad media	0.749
U0	1.485	Simetría media	0.826
S _k	-0.6601	media b/l	0.699
mediana	0.25	D ₁₀	0.106
Desviación estándar	0.756	D ₅₀ =mediana	0.147
		D ₉₀	0.215

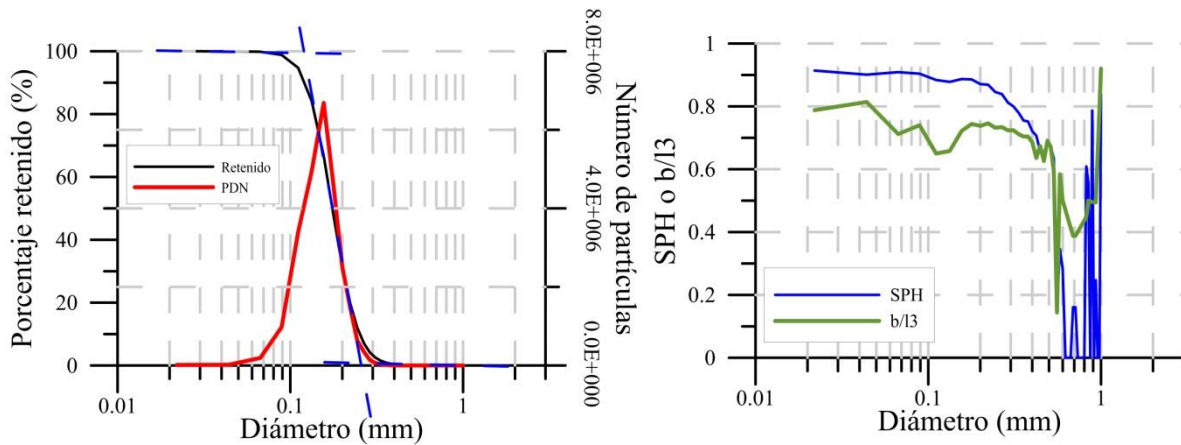


Figura anexo 1. 21. Análisis granulométrico de la playa seca del perfil de la playa de La Mancha

Tabla anexo1. 14. Valores de la muestra granulométrica de la playa seca para el perfil de la playa de La Mancha.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.726	Esfericidad media	0.860
U0	1.590	Simetría media	0.876
Sk	0.00746	media b/l	0.739
mediana	0.186	D ₁₀	0.097
Desviación estándar	0.394	D ₅₀ =mediana	0.145
		D ₉₀	0.203

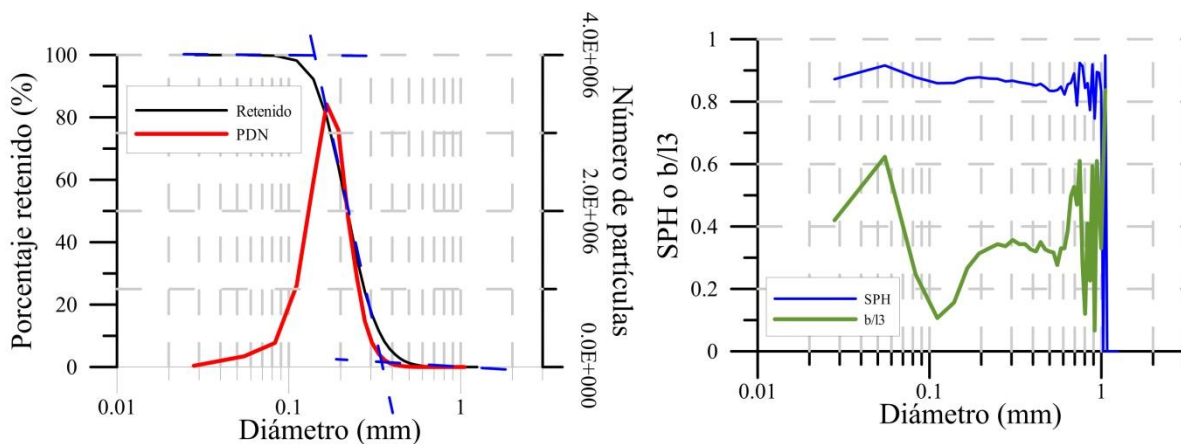


Figura anexo 1. 22. Análisis granulométrico de la primera duna embrionaria del perfil de la playa de La Mancha

Tabla anexo1. 15. Valores de la muestra granulométrica de la primera duna embrionaria para el perfil de la playa de La Mancha.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.833	Esfericidad media	0.859
U0	1.648	Simetría media	0.885
Sk	0.055007	media b/l	0.719
mediana	0.226	D_{10}	0.109
Desviación estándar	0.463	D_{50} =mediana	0.166
		D_{90}	0.247

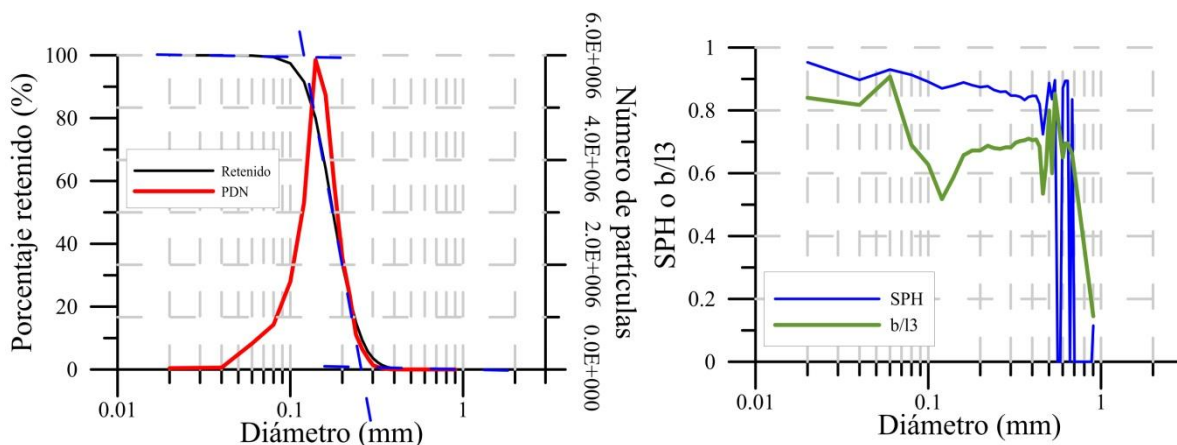


Figura anexo 1. 23. Análisis granulométrico de la segunda duna embrionaria del perfil de la playa de La Mancha

Tabla anexo1. 16. Valores de la muestra granulométrica de la segunda duna embrionaria para el perfil de la playa de La Mancha.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Span0	0.771	Esfericidad media	0.866
U0	1.659	Simetría media	0.882
S_k	1.016	media b/l	0.739
mediana	0.19	D_{10}	0.093
Desviación estándar	0.291	D_{50} =mediana	0.145
		D_{90}	0.205

Tabla anexo1. 17 Modos de transporte para el perfil del perfil de la playa de La Mancha según Visher (1969).

	CT (mm)	FT (mm)	Tipo de transporte
Rompiente	0.45	0.125	suspensión + saltación (mucha)
Lavado	0.35	0.125	suspensión + saltación (poca)
Playa seca	0.25	0.12	saltación
Duna embrionaria 1	0.23	0.15	saltación
Duna embrionaria 2	0.23	0.15	saltación

Anexo 2

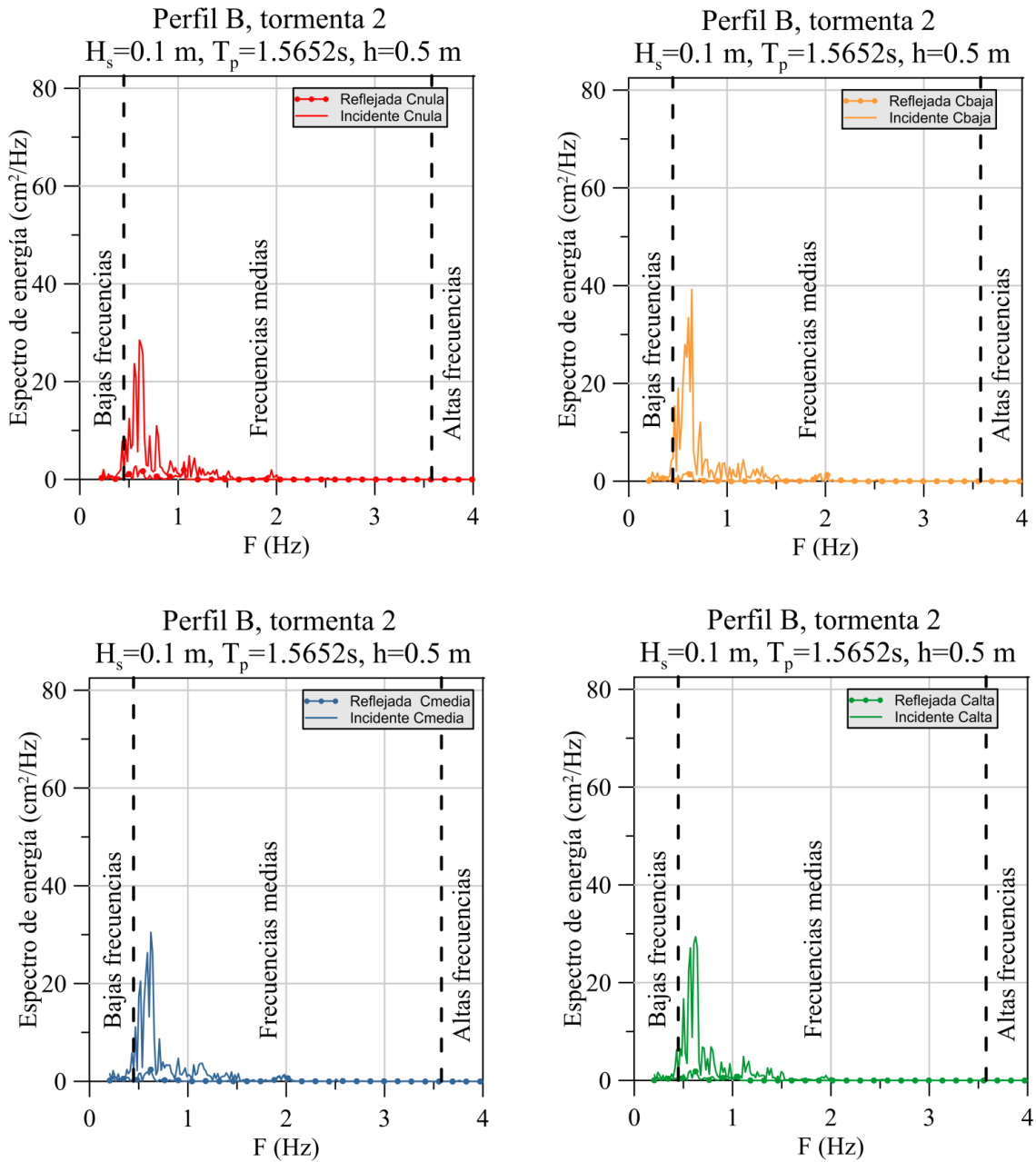


Figura anexo 2. 1. Espectros de energía incidente y reflejada para los casos AT1N, AT1B, AT1M y AT1A.

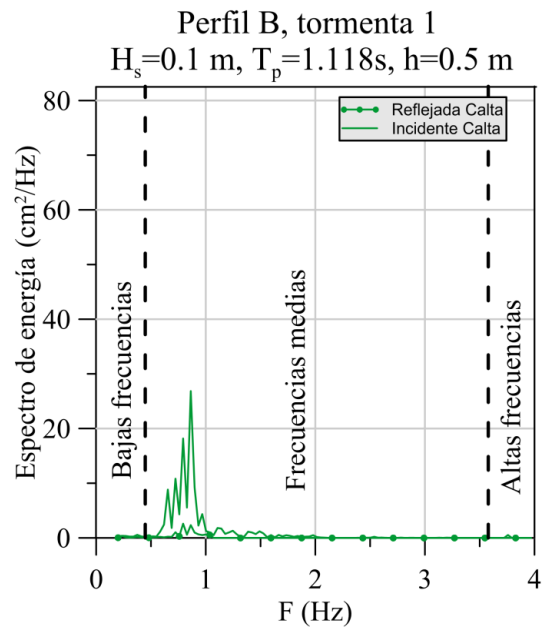
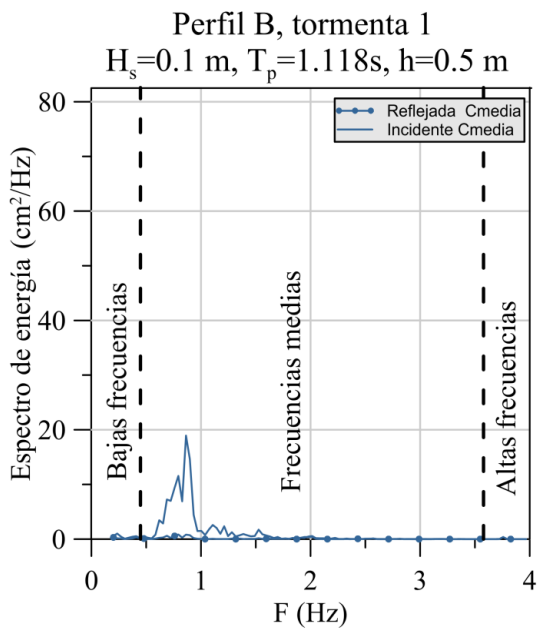
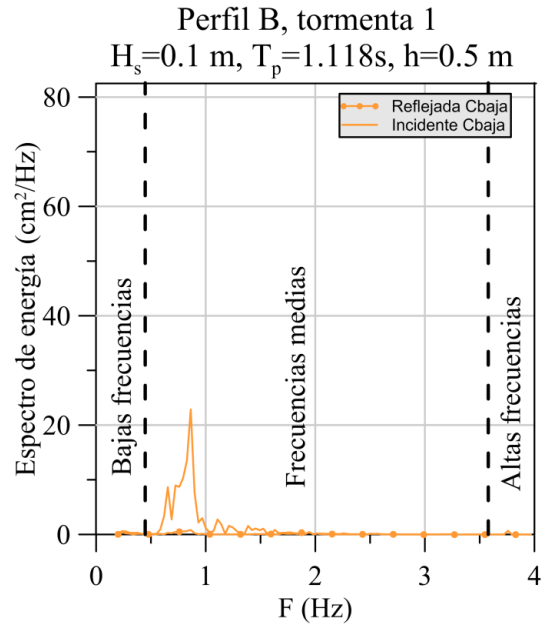
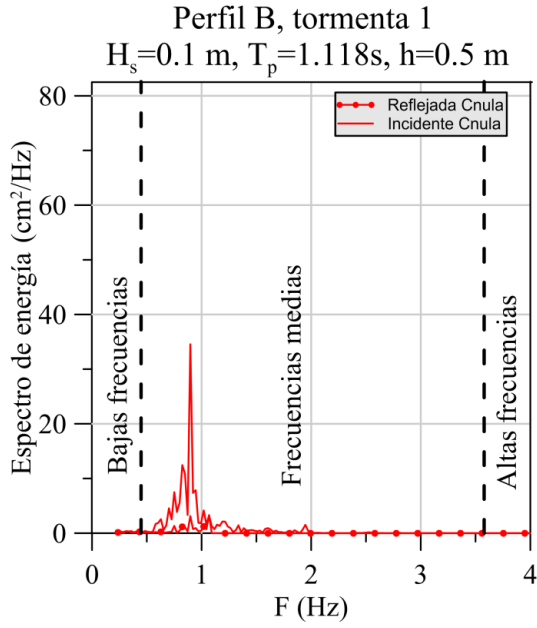


Figura anexo 2. 2. Espectros de energía incidente y reflejada para los casos AT2N, AT2B, AT2M y AT2A.

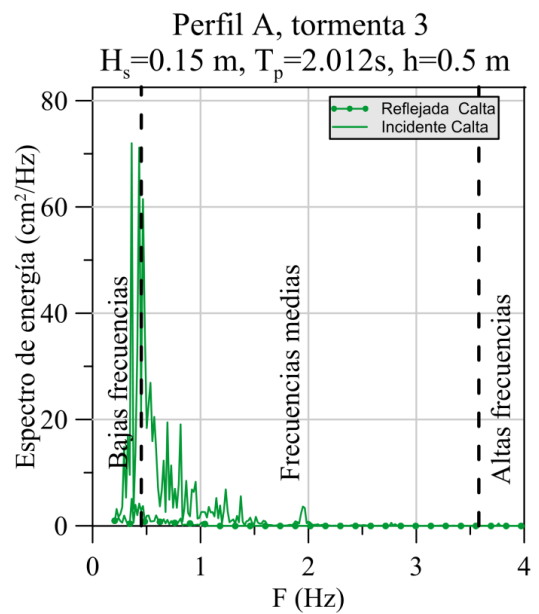
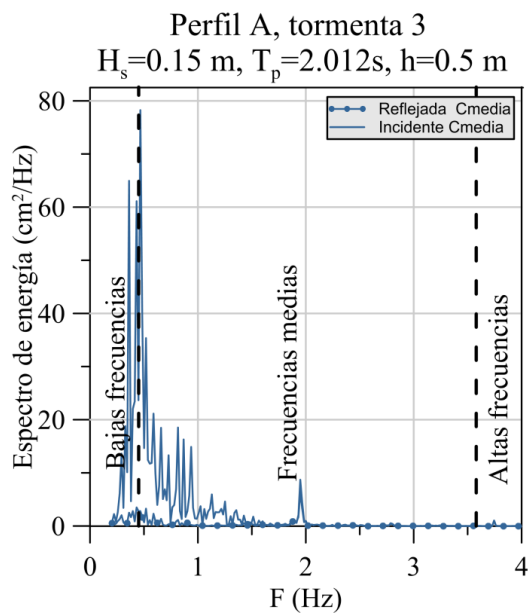
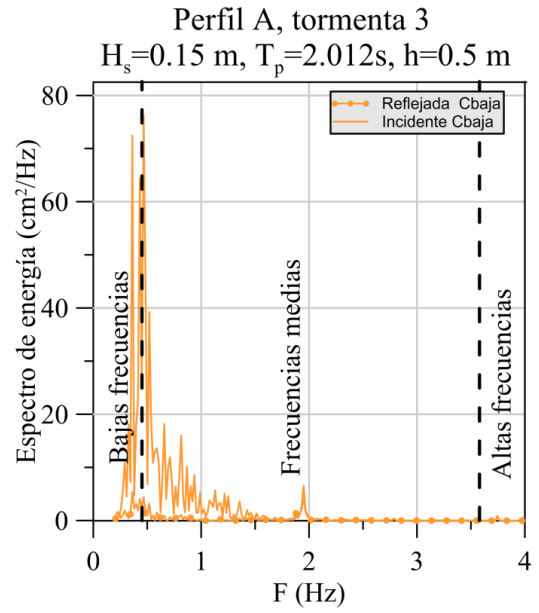
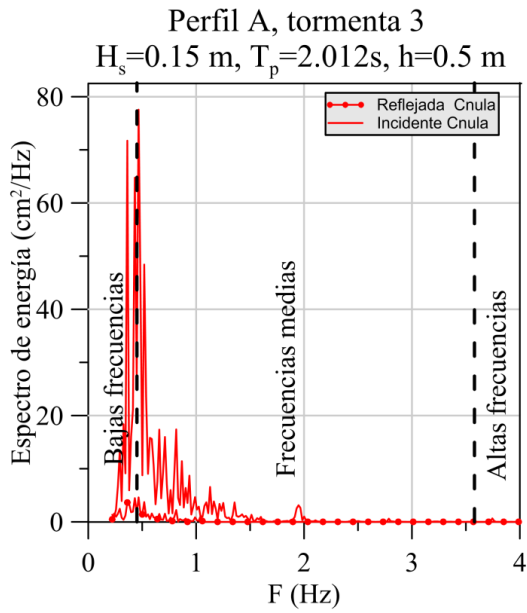


Figura anexo 2. 3. Espectros de energía incidente y reflejada para los casos AT3N, AT3B, AT3M y AT3A.

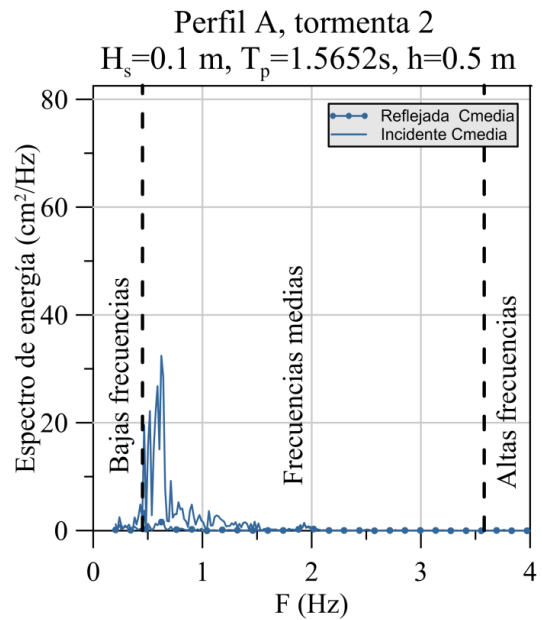
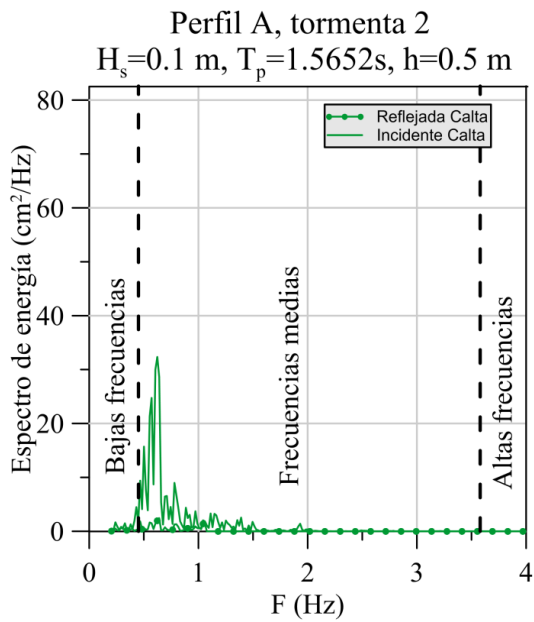
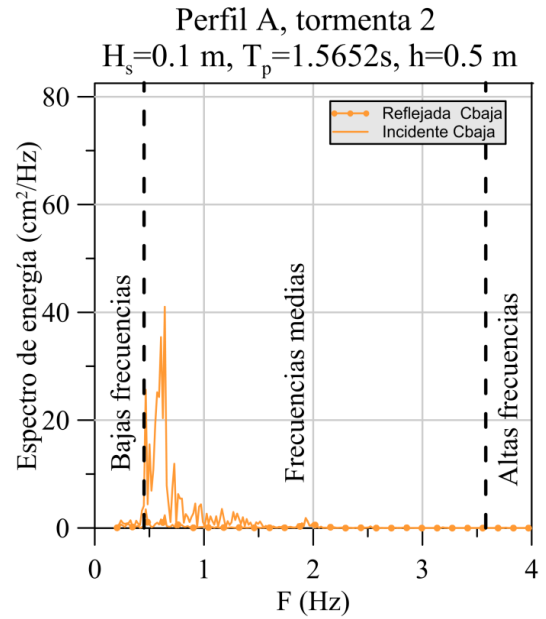
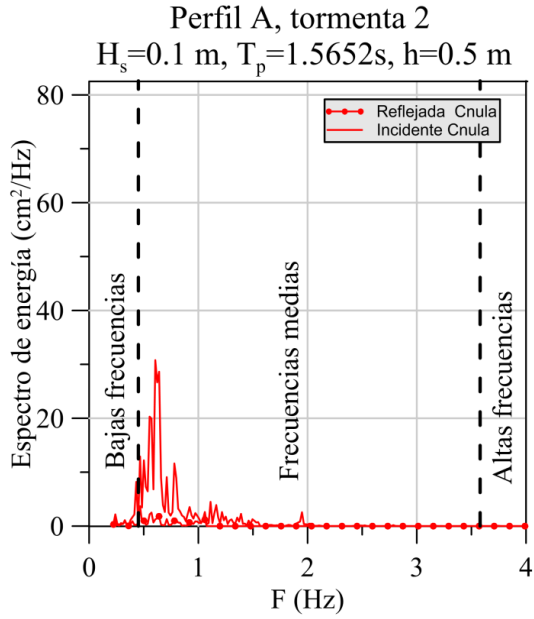


Figura anexo 2. 4. Espectros de energía incidente y reflejada para los casos BT1N, BT1B, BT1M y BT1A.

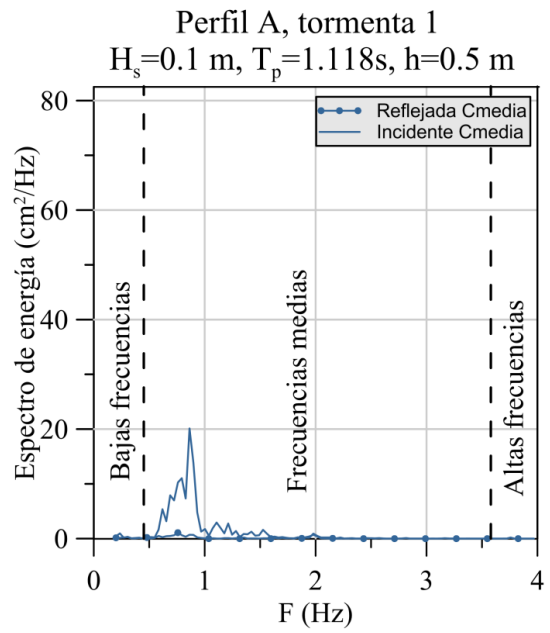
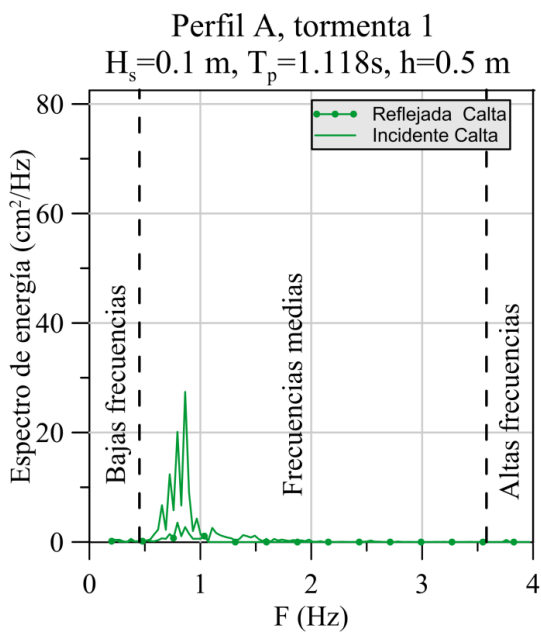
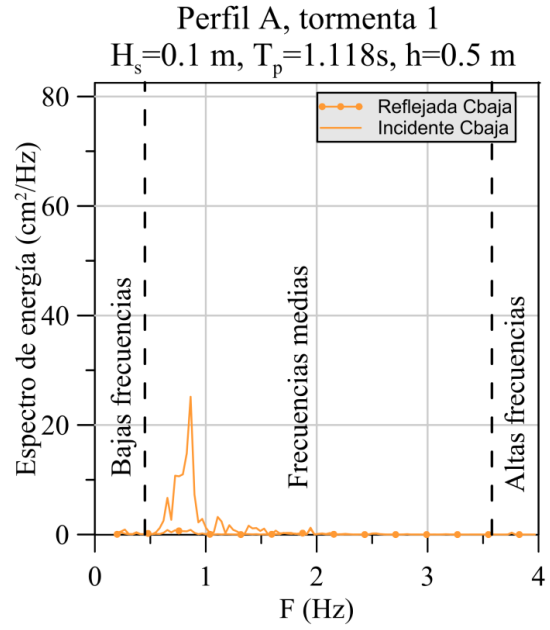
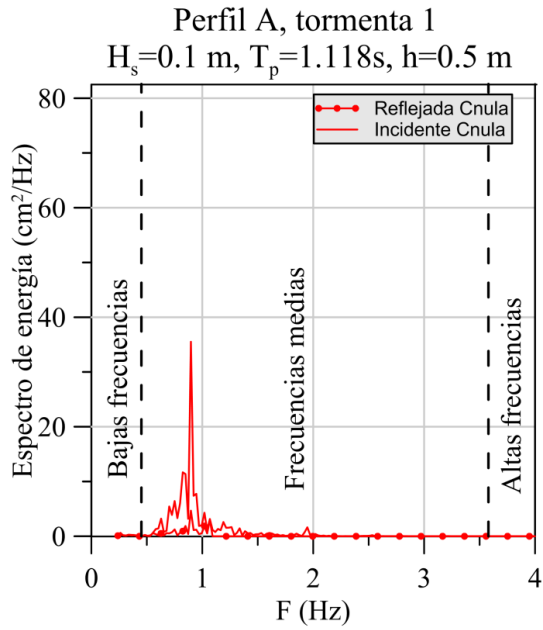


Figura anexo 2. 5. Espectros de energía incidente y reflejada para los casos BT2N, BT2B, BT2M y BT2A.

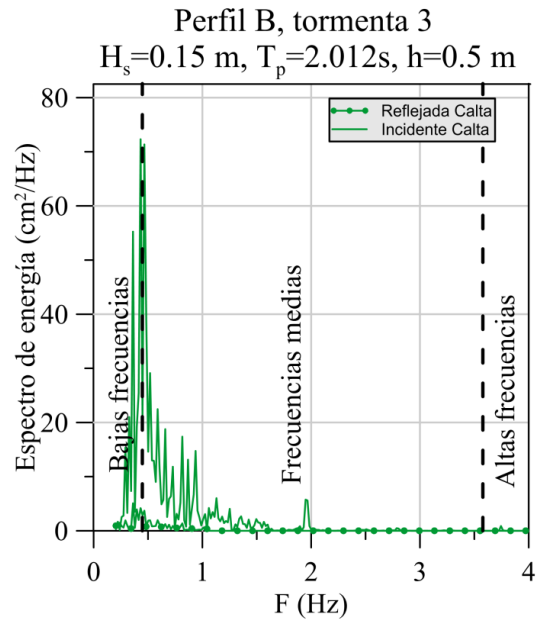
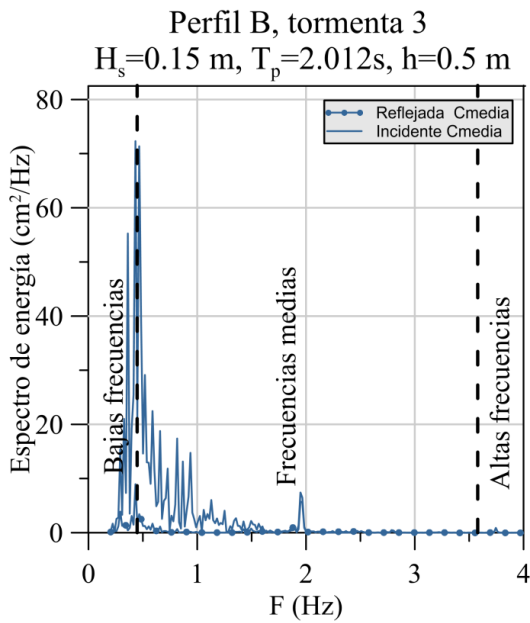
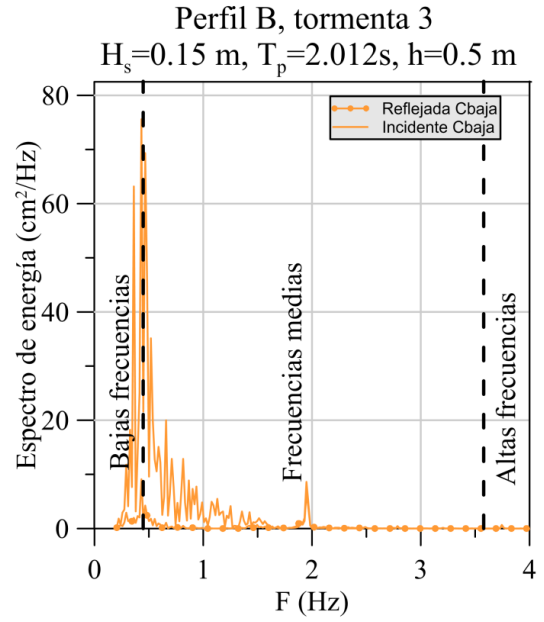
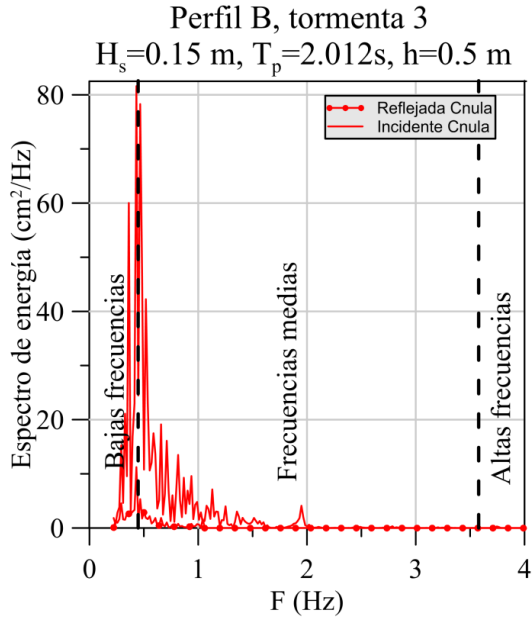


Figura anexo 2. 6. Espectros de energía incidente y reflejada para los casos BT3N, BT3B, BT3M y BT3A.

Perfil B disipativo (T2: $H_s=0.1$ m, $T_p=1.5652$ s, $h=0.5$ m)

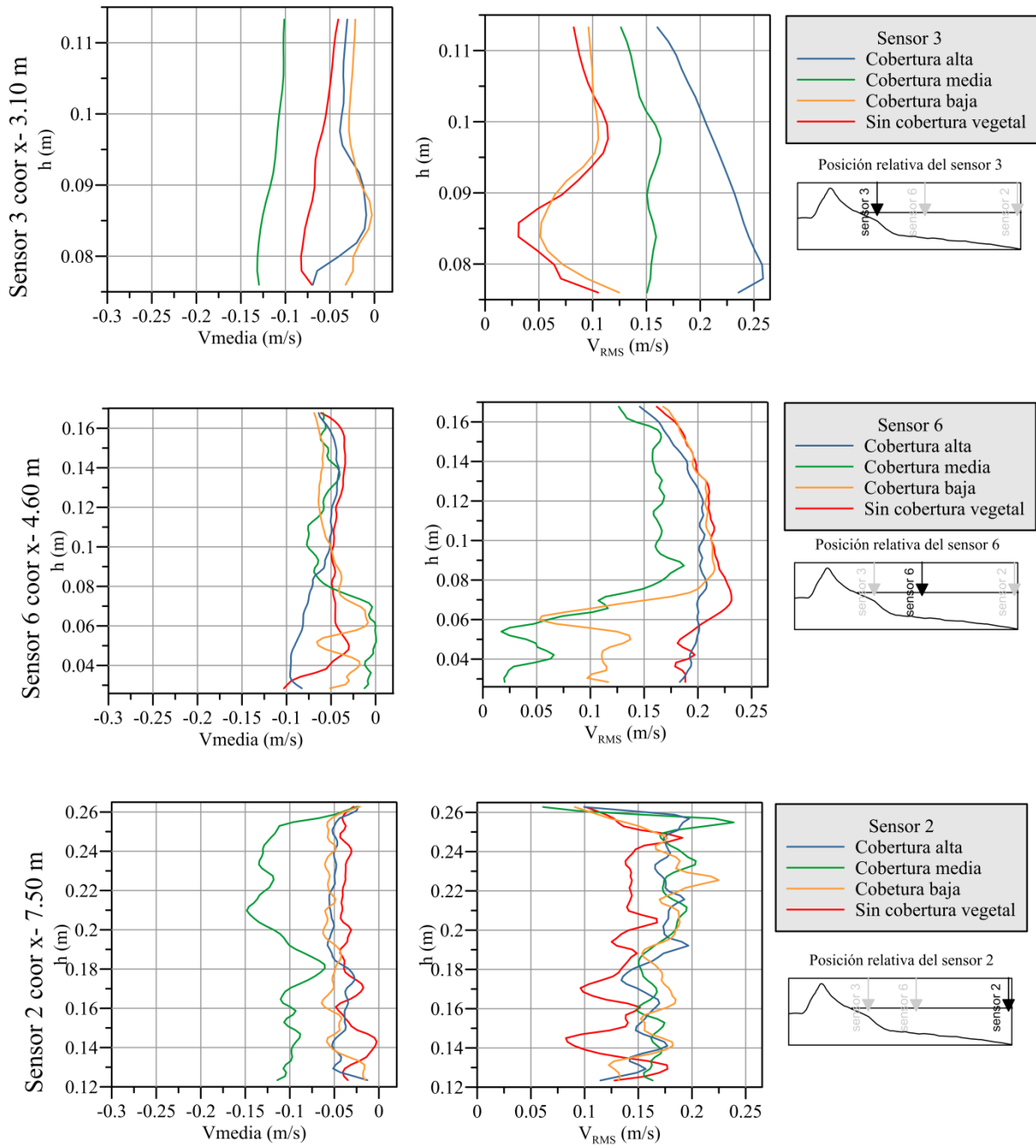


Figura anexo 2. 7. Perfiles de velocidad media y velocidad media cuadrática para los casos AT1N, AT1B, AT1M y AT1A.

Perfil B (T1: $H_s=0.1$ m, $T_p=1.118$ s, $h=0.5$ m)

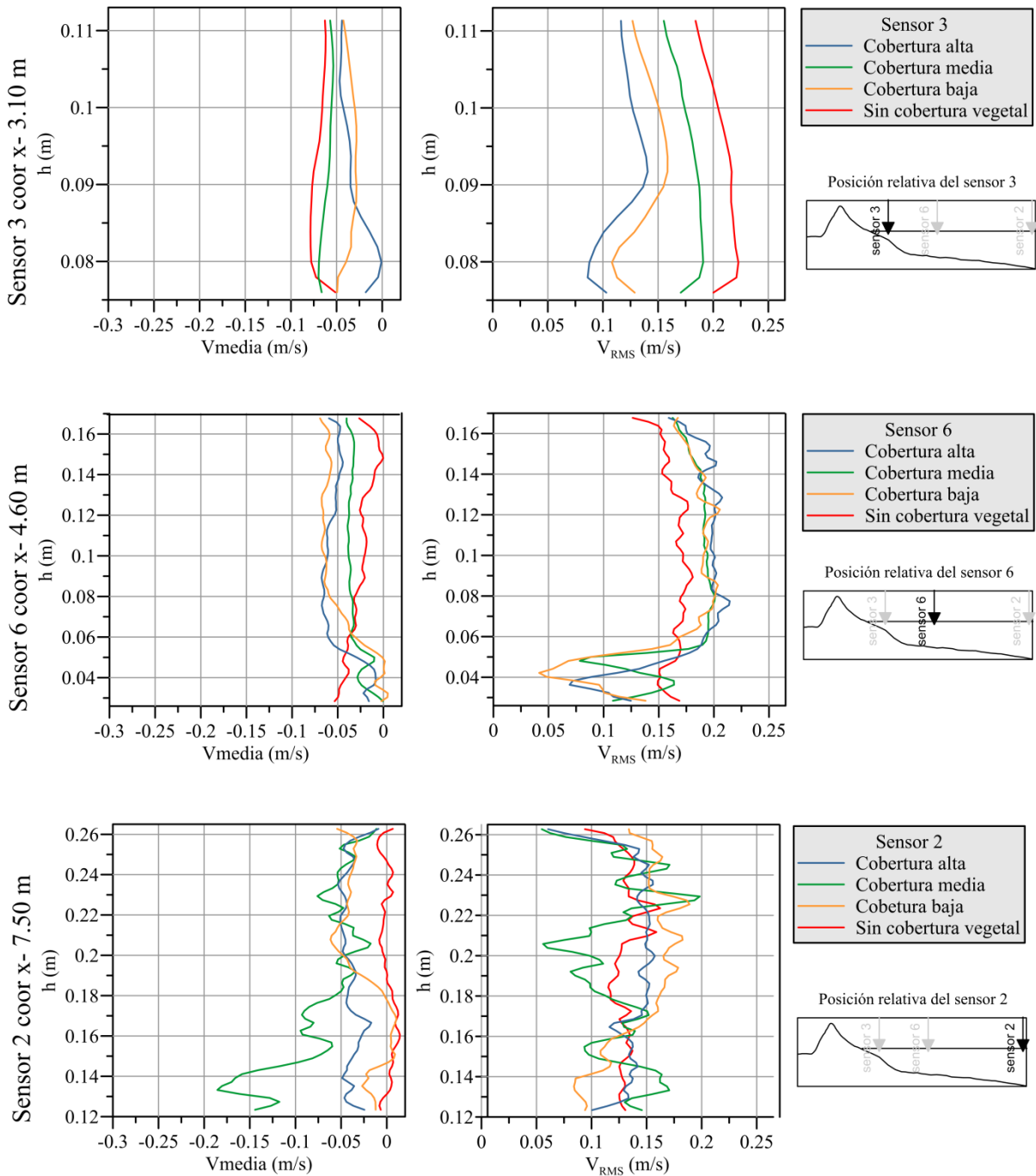


Figura anexo 2. 8. Perfiles de velocidad media y velocidad media cuadrática para los casos AT2N, AT2B, AT2M y AT2A.

Perfil A ($T_3: H_s=0.15 \text{ m}, T_p=2.012 \text{ s}, h=0.5 \text{ m}$)

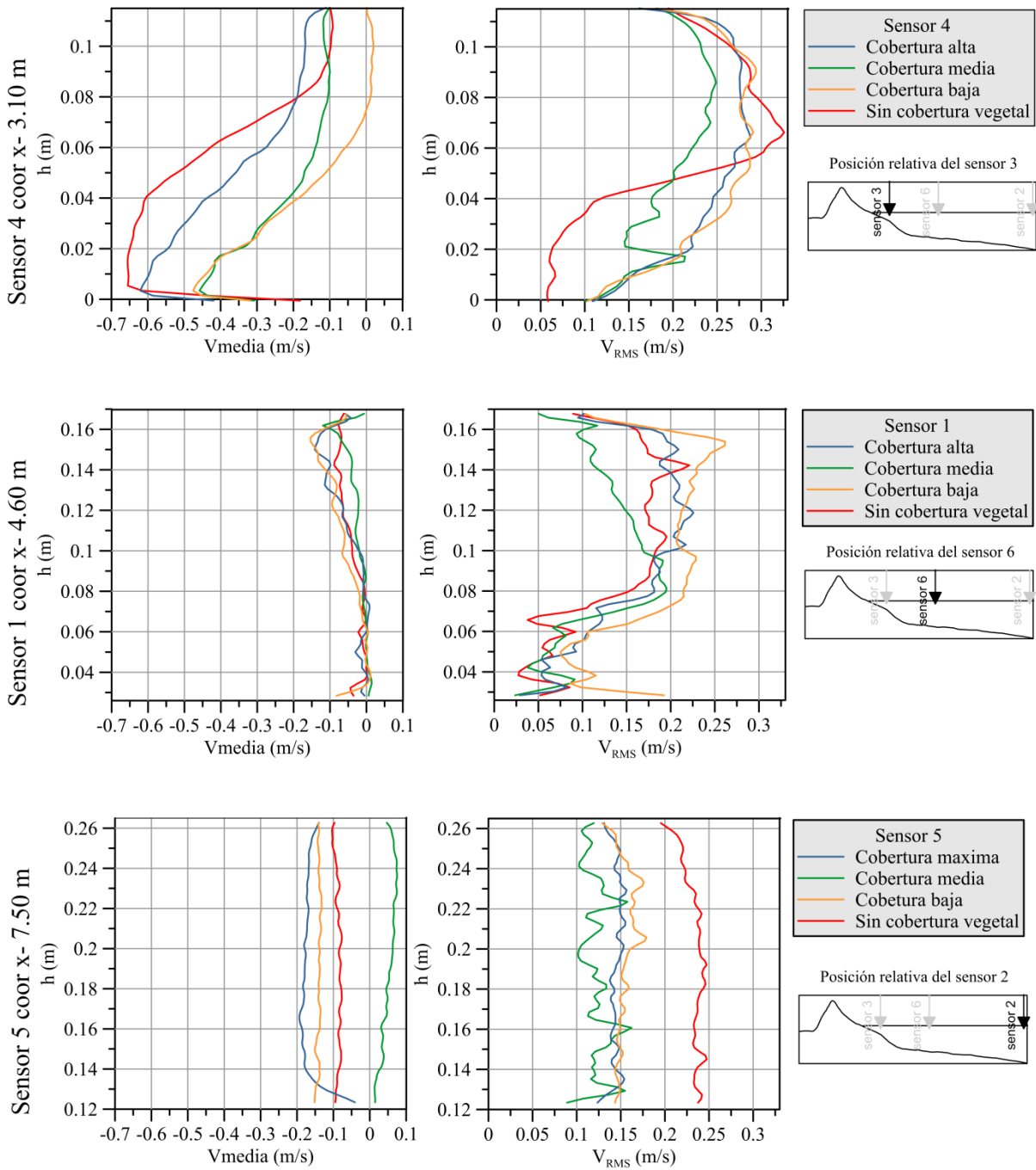


Figura anexo 2. 9. Perfiles de velocidad media y velocidad media cuadrática para los casos AT3N, AT3B, AT3M y AT3A.

Perfil A ($T_2: H_s=0.1 \text{ m}, T_p=1.5652 \text{ s}, h=0.5 \text{ m}$)

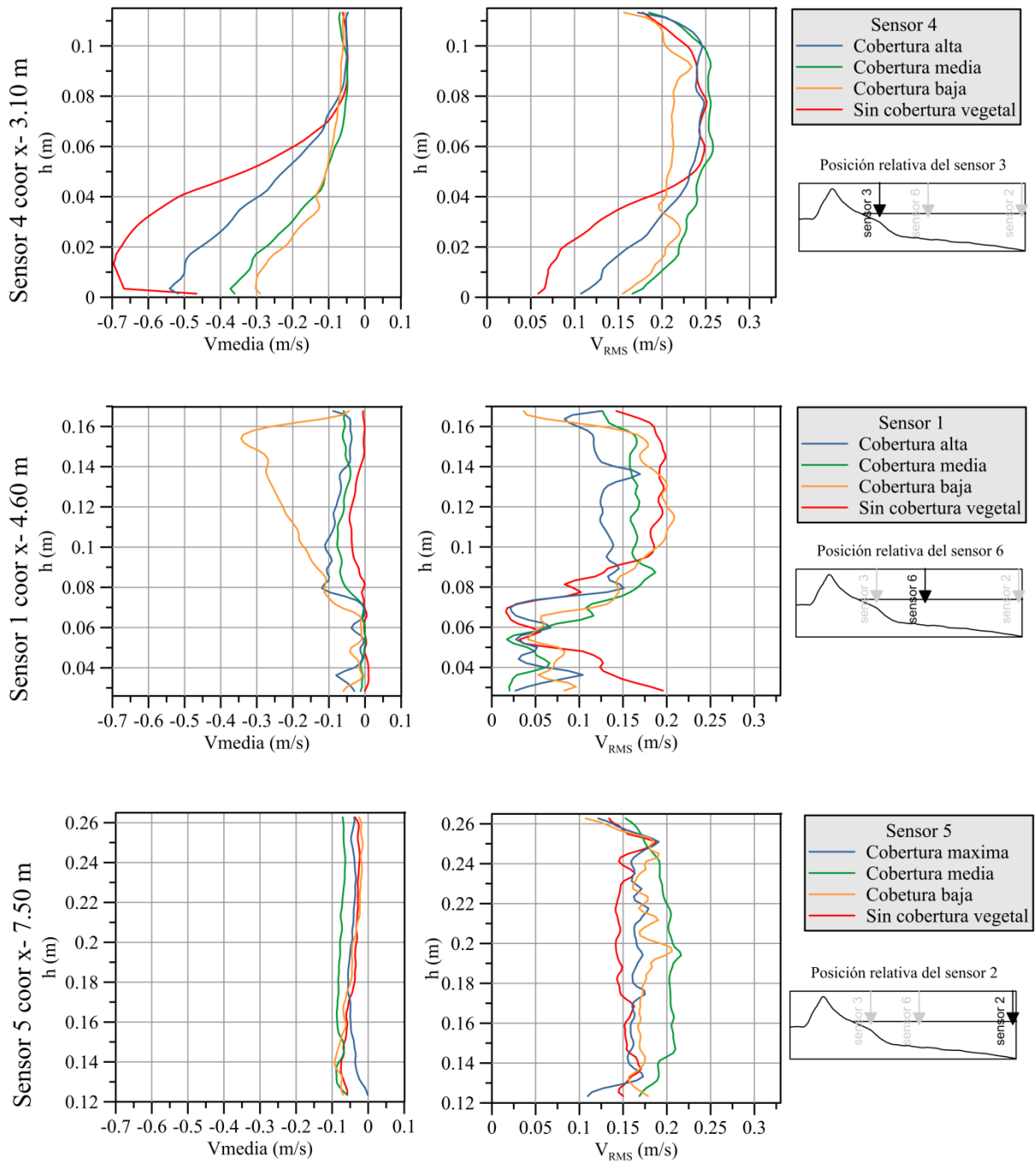


Figura anexo 2. 10. Perfiles de velocidad media y velocidad media cuadrática para los casos BT1N, BT1B, BT1M y BT1A.

Perfil A ($T1: H_s=0.1 \text{ m}, T_p=1.118 \text{ s}, h=0.5 \text{ m}$)

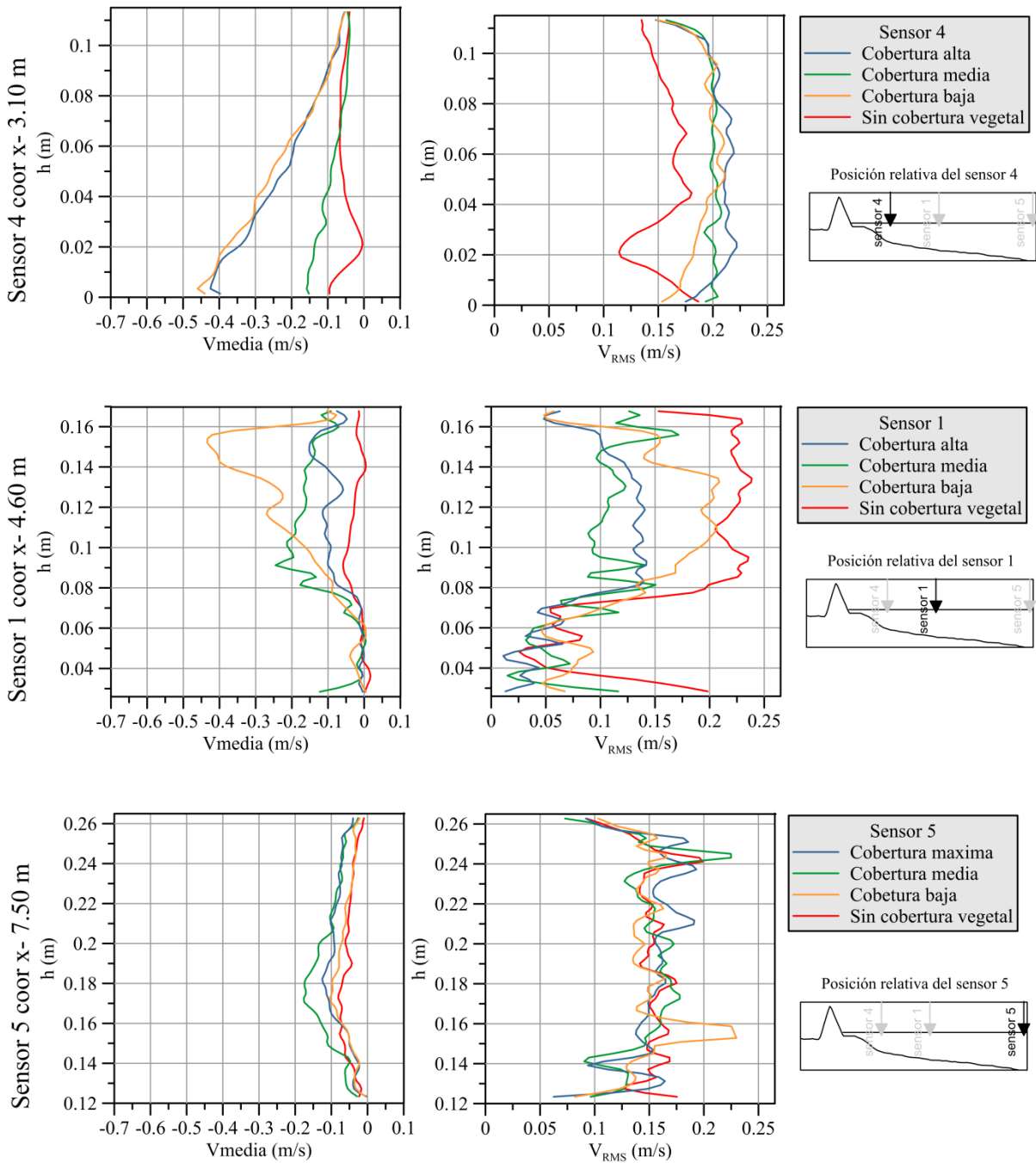


Figura anexo 2. 11. Perfiles de velocidad media y velocidad media cuadrática para los casos BT2N, BT2B, BT2M y BT2A.

Perfil B ($T_3: H_s=0.15 \text{ m}, T_p=2.012 \text{ s}, h=0.5 \text{ m}$)

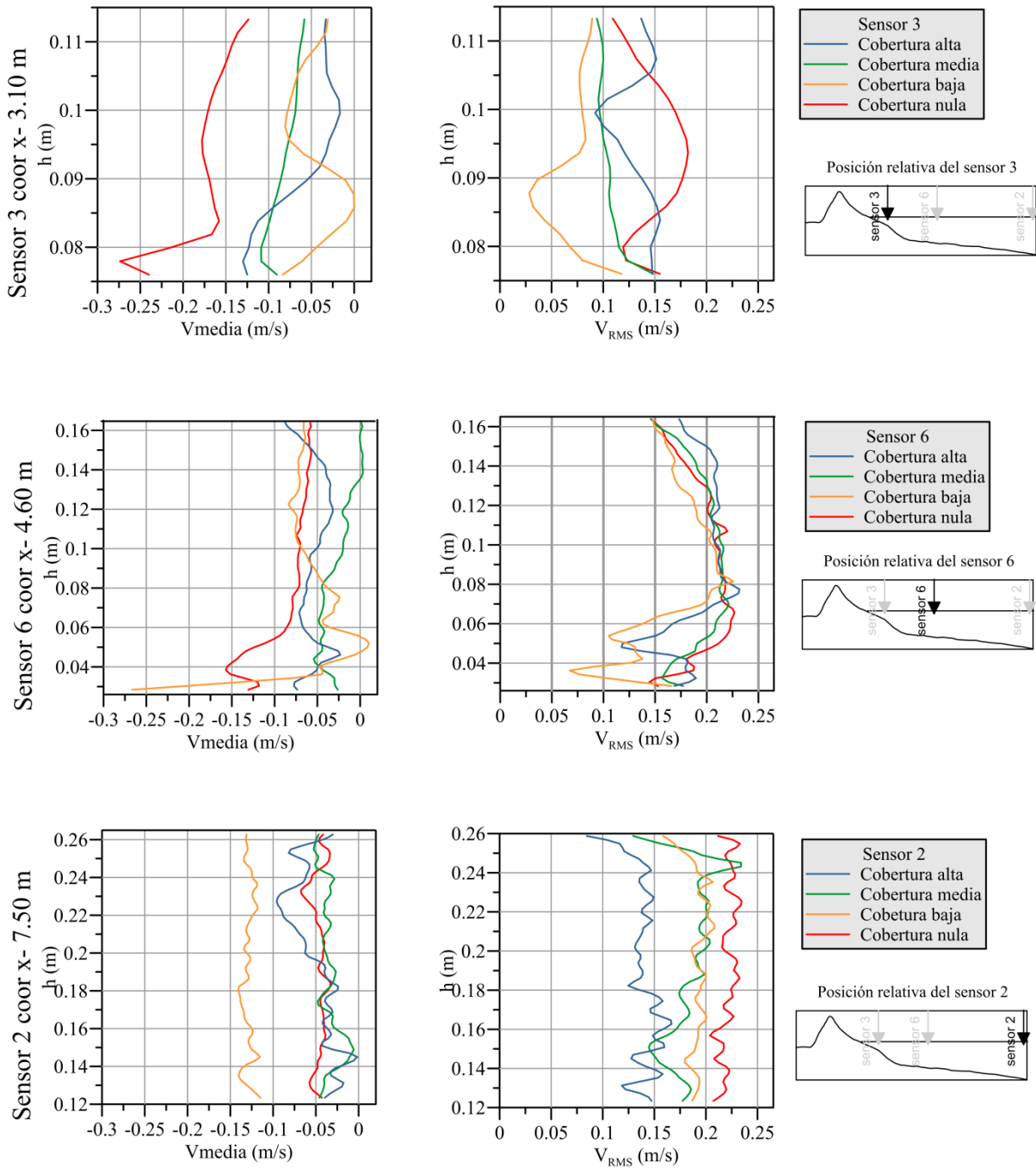


Figura anexo 2. 12. Perfiles de velocidad media y velocidad media cuadrática para los casos BT3N, BT3B, BT3M y BT1A.

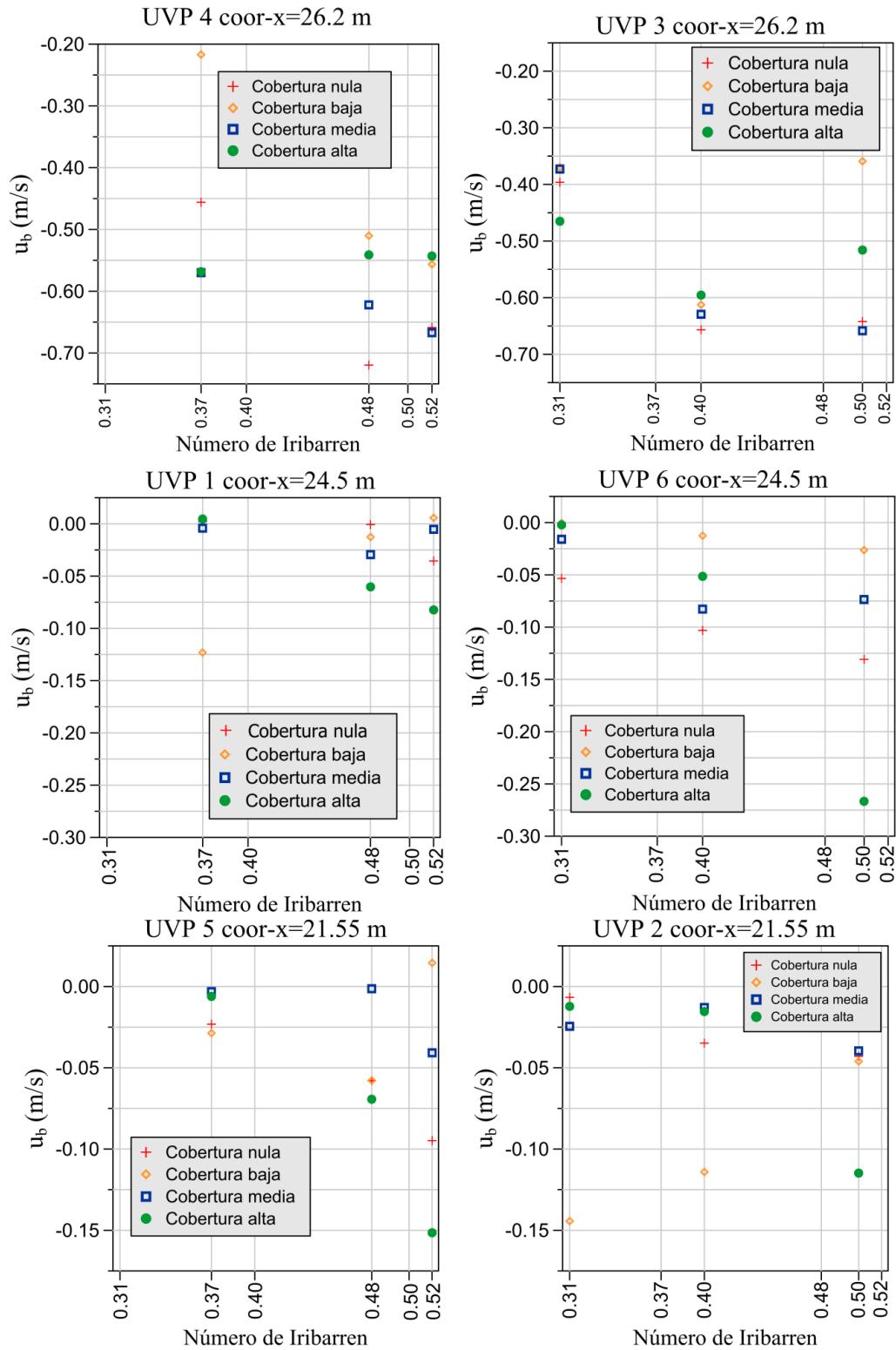


Figura anexo 2. Velocidades en el fondo para todos los casos en función de los números de Iribarren.