



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
(INGENIERIA CIVIL) – (HIDRAULICA)

ESTUDIO DE LA RESPUESTA DEL PERFIL DE PLAYA A LA HIDRODINÁMICA
INDUCIDA POR UN DIQUE SUMERGIDO

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

PRESENTA:
CASTILLO RODRIGUEZ MANUEL ARTURO

TUTOR (ES) PRINCIPAL(ES)
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

JURADO ASIGNADO:

Presidente: (Dr. Carmona Paredes Rafael Bernardo)

Secretario: (Dra. Reyes Chávez Lilia)

Vocal: (Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo)

1^{er.} Suplente: (Dr. Silva Casarín Rodolfo)

2^{do.} Suplente: (Dra. Escudero Castillo Mireille Del C.)

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

TUTOR DE TESIS:

Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo

FIRMA

(Segunda hoja)

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT, al instituto de ingeniería de la UNAM, al posgrado de Ingeniería civil de la UNAM así como a mis los profesores.

A los doctores Edgar y Rodolfo por permitirme ser parte del grupo del Laboratorio de Costas y Puertos de la UNAM, y enseñarme las bases de un área de la Hidráulica muy interesante y poco estudiada.

A mi mamá y mi papá, por darme la oportunidad de seguir superándome, gracias por animarme a seguir haciendo lo que me gusta y quiero.

A Adriana por estar conmigo en todo momento, y apoyarme en todas mis locuras.

A mis compañeros y amigos del laboratorio por ser parte de este trabajo de investigación.

Y por su puesto a la UNAM.



Resumen

Este trabajo presenta un análisis de la protección de playas con estructuras costeras desligadas de la línea de costa, conocidas como diques de baja cota de coronación. Con dicho análisis se aporta conocimiento respecto de los procesos asociados a la interacción oleaje-estructura-perfil de playa, los cuales se evalúan, principalmente, a partir de la transmisión, reflexión y disipación de la energía del oleaje y de la respuesta de un perfil de playa arenoso. Las condiciones de oleaje estudiadas en esta tesis corresponden a eventos extremos.

El trabajo experimental se desarrolló en el canal de oleaje del Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en el que se construyeron diques de baja cota de coronación con diferentes geometrías y distancia de colocación desde la línea de playa a fin de contar con un abanico de datos que permitieran evaluar la eficiencia en el desempeño de cada una de las barreras estudiadas. Las estructuras se colocaron frente a dos diferentes perfiles de playa.

El trabajo desarrollado permitió proponer un parámetro adimensional para caracterizar el comportamiento hidrodinámico del dique.



Contenido

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
Índice de figuras y tablas.....	V
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Organización del trabajo	3
II. MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS	4
2.1 Morfodinámica.....	4
2.2 Playas.....	5
2.3 Morfología de las playas.....	5
2.4 La evolución natural de las playas.....	7
2.4.1 Cambios a largo plazo.....	7
2.4.2 Cambios a medio plazo.....	8
2.4.3 Cambios a corto plazo	8
2.4.4 Cambios episódicos	8
2.5 Cambios en perfil.....	9
2.5.1 Playas en equilibrio	10
2.5.2 Perfil de equilibrio	10
2.5.3 Perfiles disipativos y reflejantes.....	11
2.6 Transporte de sedimentos en la costa	13
2.6.1 Transporte longitudinal de sedimentos	13
2.6.2 Transporte transversal de sedimentos.....	13
2.7 Erosión de playas.....	14
2.7.1 Causas de la erosión	14
2.8 Protección de playas	17
III. DIQUES DE BAJA COTA DE CORONACIÓN	19
3.1 Procesos de transformación del oleaje al interactuar con un dique	20
3.1.1 Reflexión.....	21
3.1.2 Transmisión	21
3.1.3 Disipación	22
3.1.4 Rebase	23



3.2 Factores que alteran la transmisión del oleaje en una estructura de protección	23
3.2.1 Factores marítimos.....	23
3.2.2 Factores geométricos	24
3.3 Diseño mecánico de diques de baja cota de coronación	24
3.3.1 Parámetro de daño para el cuerpo	25
3.3.2 Caracterización del daño del morro	26
3.3.3 Definición de inicio de daño	26
3.3.4 Oleaje de profundidad limitada	27
3.3.5 Estabilidad hidráulica	28
3.3.5.1 <i>Tamaño de roca requerido en ondas de aguas poco profundas</i>	28
3.4 Tamaño de roca requerido para ondas con profundidad limitadas.....	30
IV. METODOLOGÍA DE PRUEBAS EN EL LABORATORIO	32
4.1 Descripción de los experimentos	32
4.1.1 Descripción del arreglo experimental	32
4.2 Análisis de datos.....	38
4.2.1 Energía potencial del oleaje	39
4.2.2 Cálculo de la reflexión por una estructura	39
4.2.3 Cálculo del coeficiente de transmisión.....	39
4.2.4 Cálculo del coeficiente de disipación	40
4.2.5 Perfil de velocidades	40
4.2.6 Perfiles de playa iniciales y finales	41
V. RESULTADOS.....	42
5.1 Energía Potencial.....	42
5.2 Propuesta de parámetro adimensional.....	43
5.3 Morfología	48
5.3.1 Comparación de diques.....	49
5.4 Velocidades	50
VI. CONCLUSIONES	55
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	57

Índice de figuras y tablas

Figura II-1 Secciones componentes de un perfil de playa (Shore Protection Manual, 1984).	6
Figura II-2 Ejemplificación de perfil erosivo y perfil acumulativo, siendo NMM nivel medio del mar.	10
Figura II-3 Perfil disipativo.....	12
Figura II-4 Perfil reflejante.....	12
Figura III-1 Ejemplo ilustrativo del transporte de la arena en la playa protegida por un dique sumergido. Fuente. www.forte.es	20
Figura III-2 Imagen ilustrativa de ejemplo de rebase.....	23
Figura III-3 Ejemplo de gráficos de diseño correspondientes al inicio del daño en caso de ondas de profundidad limitada en la pendiente de la orilla suave, $\gamma = 0.6$ y $\rho s = 2.65 \text{ t / m}$ (Kramer- Burcharth 2003).....	28
Figura IV-1 Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería UNAM.....	32
Figura IV-2 Representación idealizada de los perfiles ensayados.....	33
Figura IV-3 Perfil de playa A mostrando los tres diques usados (NAR=Nivel de agua en reposo).	35
Figura IV-4 Colocación de los sensores de nivel.....	36
Figura IV-5 Descripción del método de medición UVP.	37
Figura IV-6 Arreglo de los sensores de nivel en el canal de oleaje.....	37
Figura IV-7 Ejemplo de perfiles iniciales y finales.	41
Figura V-1 Resultados de la Tormenta 1 bajo el parámetro D.	44
Figura V-2 Resultados de la Tormenta 2 bajo el parámetro D.	45
Figura V-3 Resultados de la Tormenta 3 bajo el parámetro D.....	47
Figura V-4 Resultados solamente teniendo en cuenta la respuesta del parámetro D.	48
Figura V-5 Resultados del parámetro D con la distribución de la morfología final de playa.	49
Figura V-6 comparación de los volúmenes con los tres diques y sin dique (SD); T1 con T=0.894s y H=0.05m; T1.1 con T=1.118s y H=0.05m; T2 con T=0.894s y H=0.10m; T2.2 con Y=1.118s y H=0.10; T3 con T=1.118 y H=0.10 m.....	50
Figura V-7 Perfiles Vs Tormentas analizando las velocidades; T1 con T=0.894s y H=0.05m; T1.1 con T=1.118s y H=0.05m; T2 con T=0.894s y H=0.10m; T2.2 con Y=1.118s y H=0.10; T3 con T=1.118 y H=0.10 m, D1 dique 1; D2 dique 2 y D3 dique 3.....	51
Figura V-8 Graficas de los resultados de velocidades obtenidos en los dos perfiles, estando en el eje Y las velocidades obtenidas y en el eje X las tormentas ensayadas.....	53
Tabla II-1 Definiciones sobre la morfología de la playa. Fuente: (Ley Vega de Seoane et al., 2007)	7
Tabla III-1 Condiciones de diseño.....	31
Tabla IV-1 Condiciones de oleaje ensayadas.....	35
Tabla IV-2 Metodología análisis espectral.....	38
Tabla V-1 Resultados de energías potenciales.....	42



I. INTRODUCCIÓN

Desde cualquier punto de vista la importancia de la costa y los ambientes costeros es indudable, ya sea social, ambiental, económico o político. De acuerdo con *Hinrichsen (1998)*, más de la mitad de la población mundial vive en una franja costera de 200 km de ancho y cerca de dos tercios, 4 mil millones, se encuentran a menos de 400 km de la costa. Es decir, una gran parte de la población depende de las actividades económicas que se desarrollan en la costa, con especial énfasis en el turismo de playa en países en vías de desarrollo como uno de los sectores económicos más importantes.

Por ello esta franja debe ser protegida de fenómenos como la erosión producida por la acción del oleaje. Las causas de la erosión de las playas pueden ser naturales o inducidas por las actividades humanas y la velocidad con que ocurre puede variar considerablemente en el espacio y en el tiempo (*Carranza, 2010*). La erosión natural de la costa es causada por dos factores: (1) la acción de las olas que pone en suspensión el material de las playas y (2) las corrientes litorales asociadas que alejan el sedimento a zonas desde donde ya no puede regresar. En el presente trabajo se analizarán solamente las causas naturales que producen las tormentas en corto plazo en playas de arena, ya que en dichos eventos el oleaje tiene un gran contenido energético.

Las olas tienen energía potencial, que es función de su altura y energía cinética la cual es función de su celeridad. En general y con una visión hamiltoniana, cuando las olas se acercan a la playa y llegan a zonas de baja profundidad, la parte inferior de la ola interactúa con el fondo del mar, lo cual hace que la ola pierda velocidad y se peralte, por consecuencia se da una transferencia de energía cinética a potencial. El resultado de esta transformación es que las olas rompen cuando por efectos gravitatorios la superficie del agua se desestabiliza, liberando gran cantidad de energía en forma de turbulencia. Este fenómeno produce abrasión y levantamiento de las partículas sedimentarias del fondo, en un proceso de acción de fuerza tractiva de la ola sobre el fondo de la playa (*Ferguson, 1999*). Parcialmente, el material erosionado se mueve en la dirección de la pendiente, acumulándose en las partes más bajas de la playa por debajo del nivel de agua para ser nuevamente suspendido por la ola siguiente. Es por ello que la principal estrategia a la que se recurre para proteger playas es la atenuación de la energía del oleaje.

Uno de los elementos que se ha usado en ingeniería de costas para reducir la energía del oleaje y por consiguiente proteger a la playa de una posible erosión, son los diques sumergidos o diques de baja cota de coronación. Normalmente estos diques se disponen a una cierta profundidad y paralelos a la costa con el objetivo de oponer al oleaje una barrera que reduzca la energía del oleaje por reflexión, fricción y/o rotura, de manera análoga a la de las barreras de coral. Estos diques se diseñan para que una cierta cantidad de

energía penetre entre las defensas a través de los espacios entre ellos o por rebase, en el caso de diques de francobordo reducido. Desde un punto de vista funcional, la transmisión de energía sobre y a través del dique son condicionantes fundamentales del diseño. Cuando la altura de la coronación es suficiente como para evitar el rebase, se definirá el dique sumergido como no rebasable. Cuando el rebase condiciona la agitación interior o el uso de la coronación, el dique será rebasable. Si la coronación queda en algún momento bajo el nivel del mar, el dique se denomina únicamente sumergido (*Vidal, 1994*).

Los procesos físicos que causan la erosión deben identificarse adecuadamente, de lo contrario se pueden tomar decisiones erróneas. Por ello en este trabajo se pretende aportar conocimiento respecto de los procesos asociados a la interacción oleaje-estructura que derivan en la disipación de energía para así evaluar la respuesta de un perfil de playa arenoso en presencia de un dique sumergido para condiciones de tormenta.

En el proceso de diseño de estructuras sumergidas una de las preguntas más importantes a resolver es qué profundidad es la óptima para desplantar los diques rompeolas. La respuesta normalmente impactará en todos los aspectos, desde los económicos, ambientales y hasta los geométricos para conseguir una protección de playa adecuada. Esta pregunta normalmente no se puede resolver de forma inmediata, generalmente implica un proceso iterativo, ya que para la misma sumergencia entre más alejada esté la estructura de protección de la costa, mayor será el frente de costa abrigado, sin embargo, esta ubicación tendrá un mayor costo en material y la posibilidad que el oleaje se regenere.

1.1 Objetivos

Los objetivos de este trabajo son:

- 1) Caracterizar los procesos asociados a la interacción oleaje-estructura como función de la distribución de la energía del oleaje.
- 2) Analizar la respuesta de dos tipos de perfil de playa a la protección ofrecida por diques de baja cota de coronación.
- 3) Determinar cuál de las geometrías propuestas del dique sumergido es la más eficiente para la protección de playa como vía para facilitar el diseño.
- 4) Encontrar un parámetro adimensional que explique, en conjunto, el funcionamiento del sistema estructura-oleaje-perfil de playa.

1.2 Organización del trabajo

El trabajo se compone de seis capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo 1 Introducción

Este capítulo hace mención a la función que realiza un dique sumergido además de mencionar la importancia de proteger las zonas costeras., en especial las playas. También se detallan los objetivos del trabajo.

Capítulo 2 Morfodinámica de las playas

En el segundo capítulo se hace referencia a los aspectos generales de la morfología de playas, conceptos y clasificaciones, así como a los cambios que se presentan en las playas y los problemas que llegan a tener por consecuencia de la erosión originada por el oleaje de tormenta.

Capítulo 3 Diques de baja cota de coronación

Este capítulo presenta las bases de la hidrodinámica inducida por un dique sumergido, explicando algunos procesos y cálculos de las fuerzas que afectan el oleaje, así como la metodología usada para el diseño de diques sumergidos.

Capítulo 4 Metodología de pruebas en el laboratorio

En este capítulo se presenta el trabajo realizado en el Laboratorio de Costas y Puertos y la instrumentación empleada en las pruebas. Se describe el modelo de pequeña escala que se empleó y el programa experimental.

Capítulo 5 Resultados

Se presentan los resultados obtenidos de las pruebas en laboratorio se explica el funcionamiento de cada estructura.

Capítulo 6 Conclusiones

Se presentan las conclusiones obtenidas de acuerdo con el análisis de las pruebas realizadas sobre la interacción del comportamiento del perfil de playa bajo la protección de diques con ajustes de parámetros geométricos y las condiciones hidrodinámicas.

II. MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS

2.1 Morfodinámica

El concepto de morfodinámica puede incluir varios procesos como lo son: la morfología de la playa, que se refiere a la interacción entre la forma de la playa y la hidrodinámica marina cercana a la costa; la morfología del fondo marino y la dinámica del transporte de sedimentos y los procesos hidrodinámicos propios de las zonas costeras como son las olas, las mareas y las corrientes inducidas por el viento.

En una definición propuesta por la Universidad de Cantabria, una playa comúnmente se concibe como la acumulación de sedimento no consolidado (arena o grava) que se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar viva y una profundidad que corresponde a la zona donde deja de producirse un movimiento activo de sedimentos debido a la acción del oleaje (profundidad de cierre). Por ello las playas son sistemas físicos dinámicos, que por sus características están en continuo movimiento y por consiguiente en continuo cambio, pero siempre serán dependientes del oleaje, las mareas, el viento y, posiblemente más sensiblemente, a la acción del hombre.

Los procesos hidrodinámicos responden instantáneamente a los cambios morfológicos y éstos requieren de la redistribución del sedimento. Como el sedimento tiene un movimiento determinado por diferentes factores y fuerzas, existe un retraso en la respuesta morfológica debido a los forzamientos hidrodinámicos. Dado que las condiciones de contorno de los forzamientos hidrodinámicos cambian regularmente, significa que la playa nunca alcanza un equilibrio estático. Por otro lado, las playas se enmarcan dentro de la Zona Costera, que comprende el área de la plataforma continental y de la costa en la que los procesos morfodinámicos vienen determinados por la dinámica marina. Su desarrollo hacia tierra y hacia el mar depende, por lo tanto, de la tipología de la costa, de la plataforma continental, y del clima marítimo de la zona. Las playas sufren cambios topobatimétricos bajo la acción del oleaje, corrientes y viento.

Considerando los efectos que la energía del oleaje produce en una playa, es posible realizar una clasificación morfodinámica de las mismas. Para incluir una playa en alguna de las categorías morfodinámicas es necesario utilizar parámetros de la playa como el relieve, el sedimento y las características del oleaje.

2.2 Playas

Las playas abarcan aproximadamente 40 % de las costas del mundo, estando el resto ocupadas principalmente por manglares o marismas, acantilados, estuarios y lagunas. Como se dijo antes, una playa es un sistema que nunca será estático, es la estructura geomorfológica más dinámica y cambiante que existe sobre la tierra. En un momento dado, su perfil representa el equilibrio dinámico entre el transporte de sedimentos hacia el mar (erosión), hacia la tierra (sedimentación o acumulación) y a lo largo de las costas (corrientes de deriva). La escala de estos movimientos varía de unas cuantas horas (eventos de tormenta), a semanas, meses o estaciones del año y aún en espacios de tiempo interanuales. La playa no tiene la misma forma y extensión durante todo el año, ejemplo de esto, en la época de verano se vuelve más ancha y con menor pendiente que durante el invierno, es decir, la erosión y acumulación se van alternando en el tiempo, pero generalmente su efecto es cíclico con predominancia de erosión durante tormentas y sedimentación o acumulación de arena en épocas de calma (*Casasola y Bello 2006*).

Las playas son, en general, extensiones muy estrechas; en un extremo existen playas muy largas que no tienen propiamente ninguna interrupción. Ejemplo de ello en México, algunas playas del estado de Veracruz que miden varias decenas de kilómetros. Otro extremo son playas interrumpidas por desembocaduras de ríos, la barra de una laguna o un promontorio rocoso, los cuales cortan su continuidad y hacen variar su forma.

En general, las playas de arena se forman en las costas dominadas por el oleaje como principal agente, con ambientes de alta energía que moviliza el sedimento y donde se mueven partículas que producen los depósitos de arena. Con frecuencia, en estas costas dominadas por el oleaje y que acumulan gran cantidad de sedimentos, también se dan procesos asociados al viento (ligados a la formación y mantenimiento de las dunas), sin embargo, la estructura geomorfológica de las playas, poco responde a la acción del viento.

2.3 Morfología de las playas

La mayoría de las playas alrededor del mundo poseen una composición y forma similares. En el estudio de los sistemas costeros, la morfología de playas tiene como propósito entender el comportamiento de una playa a lo largo del tiempo permitiendo así, describirla a partir de su forma.

Entonces, una playa puede definirse por su forma en perfil y su forma en planta, y esta descripción dependerá, en gran medida, del comportamiento que tenga la playa en cierto periodo de tiempo. De este modo, habrá playas en las cuales fenómenos de corta duración tendrán gran influencia sobre la forma de la

misma generando alteraciones importantes a su perfil; en este caso, la playa será descrita por su forma en perfil, como se muestra en la Figura II-1.

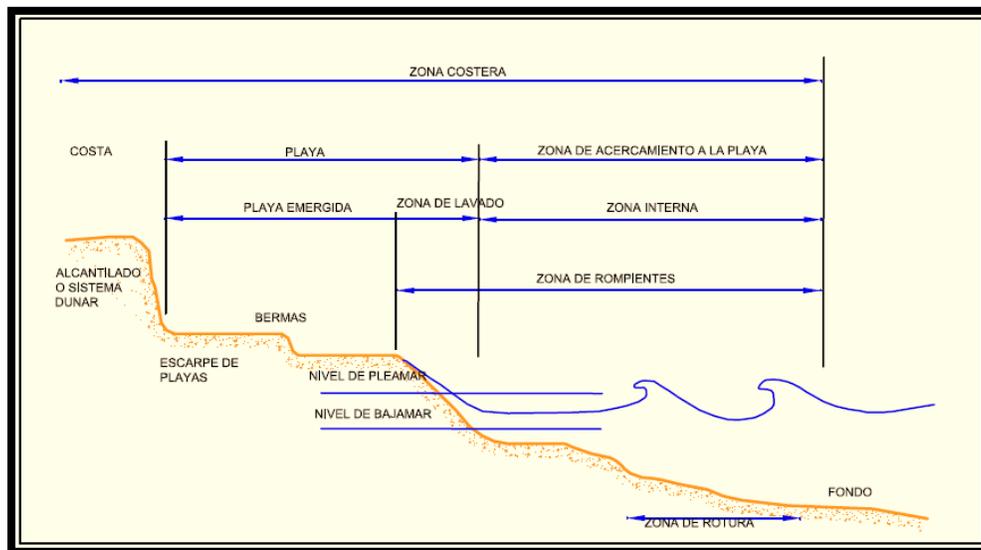


Figura II-1 Secciones componentes de un perfil de playa (Shore Protection Manual, 1984).

En la tabla II-1 se definen algunos conceptos que también pueden encontrarse, dependiendo del autor, en un perfil de playa, lo anterior está basado en el Manual de Restauración de dunas costeras del Ministerio de Medio Ambiente de las costas de Cantabria, 2007.

Tabla II-1 Definiciones sobre la morfología de la playa. Fuente:
(Ley Vega de Seoane et al., 2007)

Definiciones sobre la morfología del perfil	
Término	Definición
Perfil de Playa	Variación de la profundidad con la distancia a la línea de costa, en dirección normal a la misma
Línea de Costa	Línea determinada por el nivel de la pleamar
Playa seca	Zona del perfil de playa comprendida entre el límite de tierra de la playa y el nivel alcanzado por el oleaje en pleamar. Este segundo límite suele coincidir con el borde de la berma o el inicio del frente de playa.
Berma	Zona semi-horizontal de la playa seca formada por la acumulación 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, denominado borde de la berma. Cuando, tras una temporada de gran actividad del oleaje, se sucede un período de calma, una nueva berma, berma de verano se puede añadir a la anterior, berma de invierno, con un nivel horizontal inferior (debido a que el ascenso del oleaje es inferior). Marcando la separación entre las dos bermas puede haber una zona de mayor pendiente, correspondiente al frente de playa de invierno.
Escarpe	Escalón vertical en la playa seca formado por la erosión de la berma producida por un temporal
Zona intermareal	Zona de la playa comprendida entre el borde de la berma y en la línea de máxima bajamar
Frente de playa	Sección de la playa que queda expuesta a la acción del flujo ascendente y descendente del oleaje en pleamar
Escalón	Zona de mayor pendiente que aparece en ocasiones en el límite inferior del frente de playa en playas reflejantes durante la pleamar
Terraza de bajamar	Parte de la zona intermareal situada entre el límite inferior del frente de playa y la línea de máxima bajamar
Barra longitudinal	Acumulación de arena semi-paralela a la línea de costa. Puede haber varias barras en el perfil de la playa.
Playa sumergida	Zona de la playa comprendida entre la línea de máxima bajamar y el límite exterior del perfil

2.4 La evolución natural de las playas

Estudiar la evolución de la zona costera, específicamente las playas tanto en condiciones naturales, como bajo la influencia de obras costeras, supone analizar los procesos que ocurren en la zona de influencia de tres medios: aire, mar y tierra. Esto origina que esta zona se vea sometida a grandes solicitaciones energéticas, de origen y contenido energético diverso, por lo que el espectro teórico del movimiento de la costa abarcaría diferentes frecuencias, asociadas a diferentes agentes impulsores. (Sánchez, 1994).

2.4.1 Cambios a largo plazo

Estos cambios se presentan en la costa de forma global, tanto en planta como en perfil, y determinan el balance total de sedimentos. Los agentes que producen estos cambios son variados, por ejemplo: el aporte de sedimento por parte de ríos, que juega un papel positivo en el balance en cuanto a su actuación como fuente; las variaciones en el nivel del mar, que inducen una pérdida de sedimento en la zona costera más interna que es transportado mar adentro (Bruun, 1962); los intercambios de sedimento entre el perfil activo

de la playa y la parte más interna de la plataforma, debidos principalmente al movimiento oscilatorio inducido por el oleaje, a corrientes inducidas por éste y, a corrientes inducidas por el viento y/o por gradientes de densidad; intercambios de sedimento en la playa emergida inducidos por rebase y viento (*Illenber y Rust, 1988*). La escala temporal asociada a esta componente es del orden de décadas o superior.

2.4.2 Cambios a medio plazo

Los cambios que se observan en la playa a mediano plazo son cambios que experimenta la costa de forma sistemática, que pueden considerarse como la tendencia evolutiva de un tramo de la costa con una escala espacial del orden de kilómetros a una escala temporal de varios años.

El principal agente que provoca estos cambios es el oleaje, dada su capacidad para generar un transporte longitudinal de sedimentos, y más específicamente, variaciones de éstos a lo largo de la costa. En esta escala de tiempo se pueden considerar como componentes relevantes, el aporte de sedimentos de ríos y procesos de pérdida o ganancia de sedimentos en tramos de costa específicos, debido a procesos de más larga escala.

2.4.3 Cambios a corto plazo

Estos cambios son los experimentados en la zona más activa del perfil de la playa (zona de rompientes) y que se manifiestan en avances o retrocesos de la línea de orilla, así como en las modificaciones del sistema de barra. Los principales agentes impulsores son el oleaje y el viento, aunque este último se considera de acción estacional y/o cíclica (alternancia de períodos de oleaje de baja energía y de tormentas). La escala temporal de estos cambios es inferior a un año, pudiendo llegar a producirse variaciones en el orden de horas (*Lippmann y Holman, 1990*).

2.4.4 Cambios episódicos

Estos cambios son originados por la acción de agentes dinámicos altamente energéticos con un período de retorno largo, y que se manifiestan en una transformación (como es la erosión) de la costa de mucho mayor magnitud que la inducida durante los cambios a corto plazo. El principal agente inductor es el cambio del nivel del mar (marea meteorológica) que ocurre en grandes tormentas. Este tipo de cambios, a diferencia de los anteriores, no tiene una escala temporal definida ya que, por la naturaleza de los agentes que los inducen, deben considerarse como aleatorios, sin una periodicidad o estacionariedad predefinida. Aparecen muy localizados tanto en el tiempo como en el espacio ya que, aunque los agentes dinámicos que los inducen

actúan sobre toda la costa, sólo algunos tramos de la costa especialmente sensibles, debido a su morfología sufrirán sus efectos de forma importante.

2.5 Cambios en perfil

Las playas sufren cambios a lo largo del tiempo, producto generalmente del transporte transversal de sedimento. Estos cambios suelen considerarse como estacionales y/o cíclicos, ya que dependen, fundamentalmente, del contenido energético del oleaje, el cual suele tener un marcado carácter estacional. Una clasificación de perfiles de playa se puede describir en dos tipos de cambios, o dos tipos de perfil que dependen de su transporte sedimentario, estos perfiles se muestran en la Figura II-2.

El perfil de erosión o de tormentas, se produce durante eventos en los que el oleaje que actúa sobre la playa tiene gran contenido energético y genera, durante el proceso de rotura, corrientes de retorno de gran intensidad. Bajo estas condiciones, se produce una erosión de la parte interna del perfil que hace retroceder la línea de orilla y transporta el material hacia mar adentro, el cual es depositado, la mayor parte de las veces, en forma de barras sumergidas. El resultado de este proceso es un suavizado de la pendiente del perfil. Las barras suelen cumplir dos funciones, por un lado, actúan como filtro energético, haciendo que las olas rompan antes de llegar a la playa seca y actuando, por tanto, como un mecanismo auto-protector de la playa. Por otro lado, las barras actúan a modo de reserva de material sedimentario, donde el sedimento es almacenado hasta que las condiciones de oleaje permitan su vuelta a la playa emergida.

El perfil de acreción o acumulativo, se produce durante la acción de un oleaje de baja energía o reconstructor. En este perfil, el sedimento en la barra, es transportado hacia la costa, hasta llegar a la línea de orilla, produciendo un avance de la misma.

El resultado sería un perfil sin barras, de elevada pendiente y con una amplia berma. Hay que destacar que las escalas de tiempo a las que se producen ambos perfiles son bastante diferentes. Así, mientras que el perfil de erosión puede tardar del orden de horas en formarse (dependiendo de la intensidad de la tormenta), el perfil de acreción puede durar incluso meses en llegar a su desarrollo completo, el cual puede interrumpirse en el caso de la acción de un nuevo temporal.

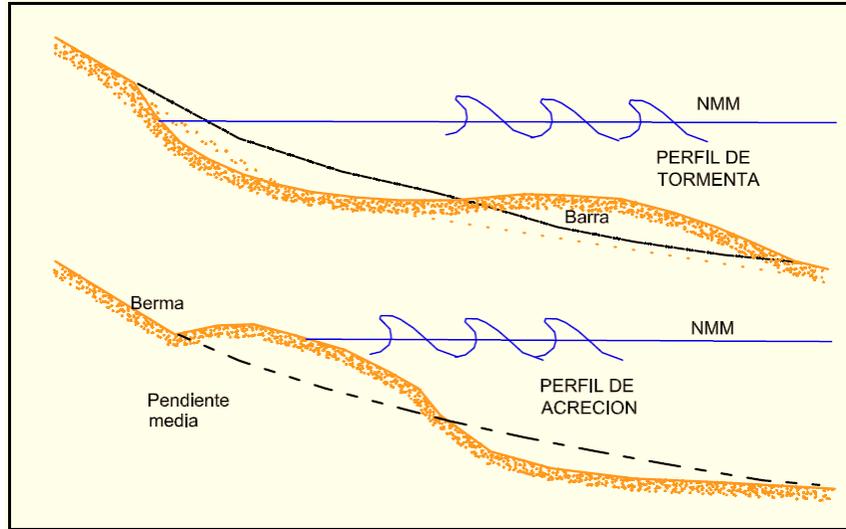


Figura II-2 Ejemplificación de perfil erosivo y perfil acumulativo, siendo NMM nivel medio del mar.

2.5.1 Playas en equilibrio

El término playa en equilibrio corresponde al estado morfodinámico idealizado que alcanza una playa en planta y perfil bajo la acción de un oleaje, constante en el tiempo, que actúa sobre una geometría de playa inicial. Una playa consigue su estado de equilibrio a partir del momento en que no presenta cambios significativos en su forma de perfil ni planta o que es capaz de repetir su forma estacional un año tras otro. El oleaje y la marea son agentes dinámicos que afectan directamente a la playa, cuyo perfil también será dinámico y presentará variaciones en su forma; es por ello que se puede admitir la existencia de una playa en equilibrio aun cuando su forma presente variaciones en función del clima marítimo existente.

2.5.2 Perfil de equilibrio

El perfil de equilibrio representa, junto con la planta de equilibrio, uno de los pilares básicos en los que se sustenta el concepto de playa de equilibrio, entendiendo como tal la configuración a la que tiende la forma de la playa bajo una situación estacionaria de la dinámica actuante. Si bien, en sentido estricto esta configuración de equilibrio no existe en la naturaleza, puesto que no existe dicha condición estacionaria, este concepto «abstracto» de una playa permite tener una representación aproximada, pero fiel, de la morfología de una playa.

En el caso del perfil de playa las aplicaciones de este perfil de equilibrio son múltiples, destacándose su utilización en las obras de regeneración y restauración de playas y en múltiples modelos numéricos y conceptuales que han de suponer una configuración previa de la morfología del perfil de playa.

En lo que se refiere al primer aspecto, el perfil de equilibrio es utilizado, junto con la planta de equilibrio, en la cubicación del volumen de arena necesario en una regeneración de playa o en el dimensionamiento de las longitudes y cotas de obras de protección del litoral tales como espigones de contención de arenas o diques exentos. Este particular, de evidentes repercusiones económicas, estéticas y sociales confiere, por sí solo, una gran importancia a las formulaciones de equilibrio pues de su precisión y capacidad de representar la realidad depende el éxito de gran número de actuaciones en la costa.

2.5.3 Perfiles disipativos y reflejantes

Otra clasificación de los perfiles es la que de acuerdo a la interacción con el oleaje, el perfil transversal de playas puede ser disipativo o reflejante (*Silva y Mendoza, 2012*).

El perfil de las playas cambia constantemente; los cambios más notorios son los asociados a los desplazamientos de las barras y al avance o retroceso de la berma. De entre las múltiples formas posibles de perfil, existen dos extremas que presentan una geometría en planta aproximadamente bidimensional: el perfil disipativo y el reflejante.

Las playas disipativas (Figura II-3) pueden identificarse como sistemas litorales donde gran parte de la energía del oleaje se disipa por los procesos relacionados con la rompiente del oleaje. La principal característica de este tipo de playas es que el perfil transversal toma la forma clásica de un perfil erosivo o acumulativo; otra característica que se observa en dichas playas, es la relacionada con el bajo gradiente del relieve litoral, es decir pendientes muy suaves. Las playas disipativas suelen tener un volumen grande de sedimentos y generalmente, se identifica en ellas una barra longitudinal lineal. La energía de la ola incidente alcanza un valor máximo en el punto de rotura del oleaje y ésta disminuye conforme el oleaje se aproxima a la costa. Es común observar, en playas disipativas, conjuntos de olas que rompen en descrestamiento y en voluta; por otro lado, se identifica que la energía de la ola, después de la rompiente es mínima cuando se acerca a la zona de lavado de la playa. También se presentan movimientos infragravitorios en la parte interior de la playa, lo que ocasiona la formación de escarpes lineales en la zona de lavado. En este tipo de playas también puede apreciarse la formación de cadenas de dunas transgresivas a largo plazo; esta observación fue relevante para el desarrollo de los modelos que explican la interacción duna-playa.

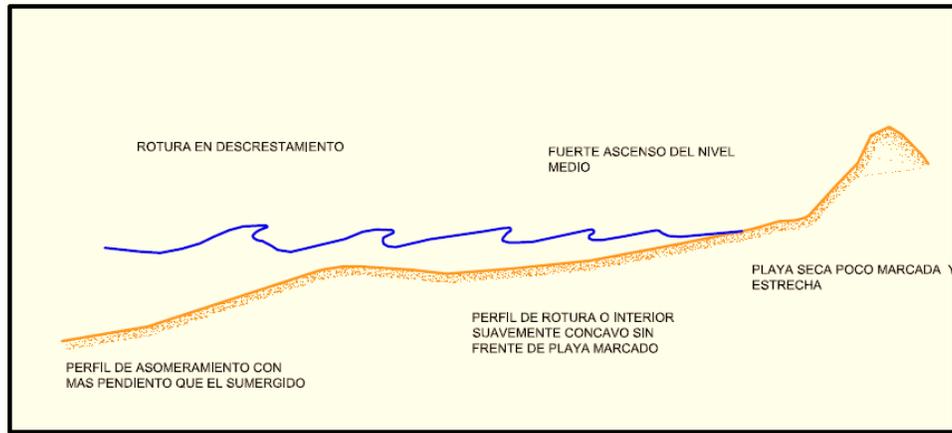


Figura II-3 Perfil disipativo.

Con respecto a las playas reflejantes (Figura II-4), su perfil transversal es similar a un perfil acumulativo; la pendiente de la playa suele ser más pronunciada (entre 0.10 y 0.20) y el material de la playa es grueso, razón por la cual, la playa tiende a reflejar la energía de la ola. El ancho de la playa sub-aérea suele ser estrecha con un escalón pronunciado al pie de la zona de lavado. Dentro de las playas reflejantes pueden considerarse dos tipos: una que refleja poca o parcialmente la energía y otra que refleja toda la energía, es en ésta última donde se generan las formas rítmicas en la zona de lavado; se presume que dichas formas se desarrollan por las ondas de borde sub-armónicas. En las playas reflejantes, la máxima energía del oleaje se presenta en la proximidad de la zona de lavado y a su vez, en este tipo de playas, sólo se identifica una zona de rompientes. Después de que la ola rompe, la energía de ésta se conserva en la parte superior de la zona de lavado. La formación de pequeñas dunas después de la zona de lavado de la playa frecuentemente se relacionan con las playas reflejantes.

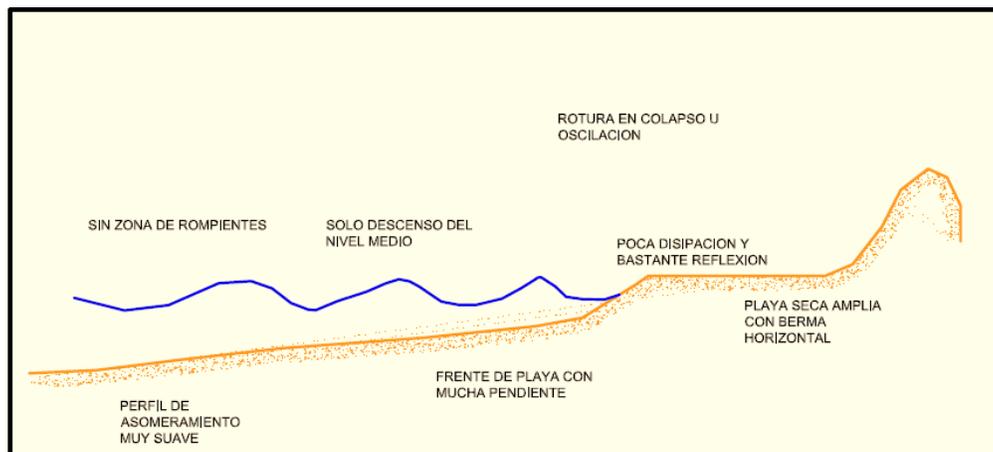


Figura II-4 Perfil reflejante.

2.6 Transporte de sedimentos en la costa

La playa es una zona cuya dinámica está íntimamente ligada a la acumulación de sedimento. El material que compone una playa de arena proviene de diferentes fuentes como pueden ser: descargas fluviales, desintegración de formaciones rocosas, erosión eólica, erosión en los arrecifes de coral o material transportado desde mar adentro por efectos del oleaje, corrientes o mareas. Una vez que el sedimento ha sido transportado y depositado, éste no permanece estático, sino que se moverá sobre la playa como respuesta a las condiciones hidrodinámicas bajo los cuales esté sometida.

Aunque el movimiento real del sedimento sigue un intrincado camino debido a distintas acciones simultáneas, éste se puede desglosar atendiendo a la aproximación o alejamiento de la costa, a las zonas en que se produce y a su carácter más o menos acentuado en las direcciones transversal o longitudinal a la playa. El sedimento se mueve en el espacio y el tiempo de forma continua a causa de unos agentes impulsores: las corrientes marítimas. Dichas corrientes pueden ser inducidas por oleaje, mareas, vientos o gradientes de temperatura, entre otros.

El movimiento del sedimento se puede estudiar en dos zonas. La más próxima a la costa es la zona “onshore” y a la más alejada, zona “offshore”. En la primera existen movimientos tanto transversales como longitudinales, mientras que, en la segunda, el movimiento es de carácter transversal.

2.6.1 Transporte longitudinal de sedimentos

En este tipo de transporte, el sedimento se mueve en una dirección que tiende a ser paralela a la línea de costa, bajo la acción del oleaje y corrientes litorales. El transporte longitudinal puede darse en dos direcciones, dependiendo de la dirección del oleaje y la dirección que adquieran las corrientes. Por convención, un observador mirando hacia el mar considerará como transporte positivo si el sedimento se mueve hacia la derecha, y como negativo si el sedimento se mueve hacia la izquierda.

2.6.2 Transporte transversal de sedimentos

En este tipo de transporte, el sedimento se mueve en una dirección que tiende a ser perpendicular a la línea de costa. La arena se mueve hacia el mar a causa de olas de gran altura típicas de tormenta. La arena que es transportada en grandes volúmenes se deposita mar adentro, formando barras de arena fuera de la zona litoral, generando así cambios en la línea de costa durante la tormenta.

2.7 Erosión de playas

Gracias a los constantes embates del mar, aunados a otros factores como el viento y la acción del Sol, la playa puede presentar problemas de erosión. Y a pesar de que es capaz de regenerarse por sí misma, existen factores externos que pueden alterar el equilibrio y maximizar el daño. Las consecuencias de la erosión de playas pueden ir desde pérdidas de vidas humanas hasta impactos económicos, sociales y políticos. La velocidad de erosión en las playas puede variar considerablemente en el espacio y en el tiempo. (Carranza, 2010). Para saber qué medidas se pueden tomar para mitigar este fenómeno, o en su defecto regenerar la erosión de una playa, debe entenderse el origen del problema, y saber si tal causa es ocasionada de forma natural o por el hombre.

A todo lo anterior hay que conocer cómo es el efecto de erosión y de qué manera se produce, por lo que la explicación dada por *Ferguson, 2001*, es que cuando las olas se acercan a la playa y llegan a zonas de aguas bajas, la parte inferior de la ola tropieza con la superficie del fondo del mar, lo cual hace que la ola pierda velocidad y se frene, rompiéndose en forma rápida generando una gran turbulencia. Este fenómeno produce abrasión y levantamiento de las partículas, en un proceso de acción de fuerza tractiva de la ola sobre el fondo de la playa.

En este proceso diferentes partes de la ola interactúan con el fondo a diferentes tiempos, frenando el movimiento y cambiando la dirección. La ola se deforma o refracta en forma aproximadamente paralela a la playa. El material erosionado parcialmente se mueve en la dirección de la pendiente, acumulándose en las partes más bajas de la playa por debajo del nivel de agua para ser nuevamente erosionada por la ola siguiente.

2.7.1 Causas de la erosión

Las playas pueden ser erosionadas como parte del proceso por el cual se pierde material terrestre, pudiendo ser removido hacia otras partes de las franjas litorales. Las causas de la erosión de las playas pueden ser naturales o inducidas por las actividades humanas.

2.7.1.1 Causas de origen natural

- El transporte de sedimento a lo largo de la costa, debido a la acción del mar o viento, es uno de los procesos más importantes en el control de la morfología de las playas y determina en gran parte si la costa se está erosionando, si está creciendo o si es estable.

- El movimiento de sedimentos a lo largo de la costa se conoce como transporte litoral, mientras que los volúmenes de arena involucrados en el transporte se conocen como deriva litoral. Este transporte puede ser detenido por rompeolas o capturado por cañones submarinos. En el caso de los rompeolas, el resultado es la acreción de la playa del lado corriente arriba y erosión corriente abajo.
- La erosión eólica es un fenómeno que consiste en el transporte del material de la zona de playa activa hasta la parte posterior de la misma, donde se acumula formando dunas, que posteriormente pueden servir como almacén de material que se ocupa en tormentas.
- El calentamiento global es otra causa de la pérdida de playas ya que produce el deshielo de los glaciares y aumento en el nivel de agua y, por lo tanto, de la marea, produciendo una recesión paulatina de la línea de costa.
- Inundaciones. Durante grandes periodos de lluvias, los escurrimientos que llegan al mar estarán constituidos principalmente por materiales finos (arcillas y limos) que no pueden ser retenidos en las franjas litorales dado que la energía del oleaje impide su depósito. Estos productos finos son resultado de la erosión de las zonas costeras elevadas y su consecuente depositación tendrá lugar más allá de la acción del oleaje en profundidades donde el nivel base de la ola no remueve el material.
- Los eventos de tormenta generan una depositación de sedimentos fuera de la zona activa de la playa, trasladando el material a zonas marinas como acantilados marinos o arrecifes y a zonas terrestres donde en condiciones regulares el oleaje o viento no es capaz de regresar la arena a la zona activa.
- Oleaje de tormenta. Las olas con gran energía producen transporte del perfil de playa hacia el mar, erosionando la berma. En función de la orientación relativa de la costa con la incidencia del oleaje local, se puede producir un transporte de sedimentos en sentido longitudinal a la playa que disminuya el volumen disponible para la playa.

2.7.1.2 Causas de origen antrópico

- Construcción de infraestructura en zonas como dunas y playas: la infraestructura en esta zona inhibe la formación y el crecimiento de dunas, mismas que durante las tormentas pueden fungir como reservas de arena y zonas de disipación de la energía del oleaje. La acción del oleaje sobre la infraestructura genera reflexión en lugar de disipación, aumentando la capacidad del transporte de sedimentos hacia aguas más profundas.
- Destrucción de la vegetación terrestre y marina (ej. manglares, pastos marinos), arrecifes coralinos y de otros amortiguadores naturales. Estos sistemas costeros tienen funciones como producir y/o retener sedimentos en sus raíces. En general, disminuyen la acción del transporte de sedimentos

eólico y marino ya que reducen la energía por efectos de fricción y turbulencia sobre sus superficies. La remoción de estos elementos es, entonces, causa directa de la erosión.

- Subsistencia del suelo por extracción de líquidos. Cuando en una zona costera se extraen líquidos del subsuelo mediante pozos de bombeo se produce subsidencia del terreno superficial, toda vez que durante la extracción de líquidos los acuíferos disminuirán su volumen debido a la compactación de los mismos.
- Reducción de aportes de sedimentos a la zona litoral. En algunas ocasiones, las obras que se construyen aguas arriba de los ríos, como es el caso de las presas, retienen material que antes llegaba hasta la desembocadura y era distribuido por la zona costera.
- Concentración de energía sobre la playa. Cuando se construyen obras marítimas perpendiculares y paralelas a la playa se producen los fenómenos de reflexión y difracción del oleaje que concentran energía en algunos segmentos de la playa. A su vez, se origina mayor transporte de sedimentos al pie de las estructuras y en las zonas de concentración (*Santana, 2016*).

Lo ideal sería evitar los problemas de erosión causados por la intervención del hombre llevando a cabo una buena planeación y regulación de las construcciones y actuaciones realizadas en la zona costera.

Históricamente, la protección de las playas es un aspecto que ha interesado al hombre. Anteriormente, los aspectos que tenían una mayor importancia dentro de las zonas costeras eran: comercio, exploración y guerras. Actualmente, el uso de la playa con fines turísticos, recreativos y deportivos ha adquirido una mayor fuerza convirtiéndose en una de las principales actividades económicas de varios países. Es por ello que la sociedad cada vez se ha preocupado más en la protección, estabilidad y desarrollo sustentable de las zonas costeras, especialmente en las playas, que son las que están más expuestas a los problemas de erosión.

2.7.1.3 Erosión episódica

Este tipo de erosión es la remoción repetitiva de material de la playa por el oleaje en una tormenta, un tsunami o un deslizamiento de terreno que puede aceptarse como un evento natural. Esta excesiva entrada de energía, generalmente en un corto período de tiempo (un día o dos en el caso de tormentas y de minutos en el caso de deslizamientos de tierra o tsunamis) modifica la distribución espacial de las arenas ya que los sedimentos más finos son llevados a zonas menos expuestas a la energía del oleaje/corrientes (sitios más profundos o al resguardo de estructuras naturales o artificiales).

El proceso de erosión asociado a tormentas inicia tomando arena de la parte alta de la playa para construir, naturalmente, barras para controlar la energía del oleaje extremo. Posterior a dicha construcción y al paso

de la tormenta, inicia la destrucción, también natural, de la barra y la arena regresa poco a poco a la berma de la playa. El principal mecanismo que debilita a la barra es la rompiente de las olas. La dinámica descrita es el medio por el que una playa se protege a sí misma ante eventos extremos (*Silva et al., 2017*).

2.8 Protección de playas

Por lo dicho antes, la erosión costera se ha convertido en un problema crítico para los estados que enfrentan una grave escasez de tierras debido a la alta densidad de población y ancho angosto disponible para el estado. Para la protección de las playas se han usado diferentes métodos de protección a lo largo del tiempo, la mayoría sobre la base de la alimentación artificial de las playas y la construcción de estructuras costeras. Existen países que dependen de la protección costera para controlar o por lo menos minimizar la pérdida de playas y por ende de territorio el ejemplo claro de esto es Japón, y existen otros como los Países Bajos que dependen de ella para su misma supervivencia. En otros países, como es el caso de México, la protección costera obedece generalmente a necesidades e intereses más localizados, por ejemplo, para la estabilidad de playas con fines turísticos o intereses de particulares por conservar su frente playero, o para la estabilidad de bocas lagunares o estuarinas para fines de navegación y/o circulación adecuada en lagunas y cuerpos de agua semi-cerrados. (*Salles y Silva, 2002*)

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

- Acomodo o retirada. Se basa en el reacomodo de los bienes que se encuentren en la zona de afectación a zonas seguras y compatibles con la estabilidad dinámica de la playa.
- Prevención y corrección. Si se identifican las causas de la erosión de la playa y existe forma de actuar, se opta por soluciones que eliminen, disminuyan y corrijan el problema.
- Protección y defensa. Consiste en la construcción de estructuras que eviten el retroceso de la línea de costa.
- Regeneración. Se trata de recuperar las condiciones en las cuales la playa no presentaba problemas de erosión.
- Nula. Se trata de que la playa se recupere naturalmente, sin embargo, es una medida muy cuestionable ya que se puede agravar el problema en un tiempo que se pudo proteger la playa.

El presente trabajo se centra en las obras de protección costera como principal alternativa para la protección de las costas.

Las estructuras de protección costera tales como muros, espigones y rompeolas, solo deben establecerse cuando exista una justificación. Por ejemplo, la existencia de población en riesgo. Además, se deben prevenir impactos ambientales en la dinámica costera y evitar la transferencia de los problemas de erosión a playas vecinas. La autoridad ambiental siempre debe considerar la información sobre la dinámica costera, las características hidrodinámicas y batimétricas del sitio para la evaluación de impacto ambiental. Siempre debe existir un estudio que demuestre el funcionamiento de la obra, incluyendo el mantenimiento del intercambio de agua y sedimentos entre las lagunas y el mar en el caso de cualquier obra civil costera.

III. DIQUES DE BAJA COTA DE CORONACIÓN

Los diques de piezas sueltas o diques rompeolas son las obras más comúnmente usadas para la protección de áreas costeras o puertos contra la acción del oleaje. Estas estructuras disipan la energía del oleaje por los procesos de: 1) rotura, 2) fricción sobre y en el interior del macizo granular y 3) transmisión de oleaje hacia la parte abrigada.

Desde un punto de vista funcional, la transmisión de energía sobre y a través del dique son condicionantes fundamentales del diseño. Cuando la altura de la coronación es suficiente como para evitar el rebase, se definirá el dique como no rebasable. Cuando el rebase condiciona la agitación interior o el uso de la coronación, el dique será rebasable. Si la coronación queda en algún momento bajo el nivel del mar, el dique se denomina sumergido. Estos dos últimos en este trabajo se agrupan en diques de baja cota de coronación.

Los diques de baja cota de coronación (Low Crested Structure, LCS por sus siglas en inglés), son aquellos diques en talud cuya coronación se encuentra cercana al nivel medio del mar. Por tanto, estas estructuras pueden estar relativamente emergidas, sumergidas o ambas según el estado de marea. Son diseñados para ser superados significativamente por las olas. Los LCS se usan en puertos para la protección de cuencas exteriores donde la transmisión de onda por rebasamiento es aceptable. Sin embargo, la mayoría de estos diques se usan en aguas poco profundas como rompeolas para fines de protección costera. Las estructuras generalmente se construyen paralelas a la costa y, en consecuencia, se exponen al ataque de olas casi perpendicular debido a la refracción de las olas.

Este tipo de estructuras costeras tiene un especial interés por motivos estéticos, económicos y medioambientales.

Las misiones de los diques rebasables y sumergidos son:

1. Defensa de costa y playas contra la erosión.
2. Protección costera por razones ecológicas.
3. Protección de puertos, canales, entradas de estuarios.
4. Modificación de la línea de costa.
5. Prevenir la pérdida de material arenoso de la playa. (Figura III-1)

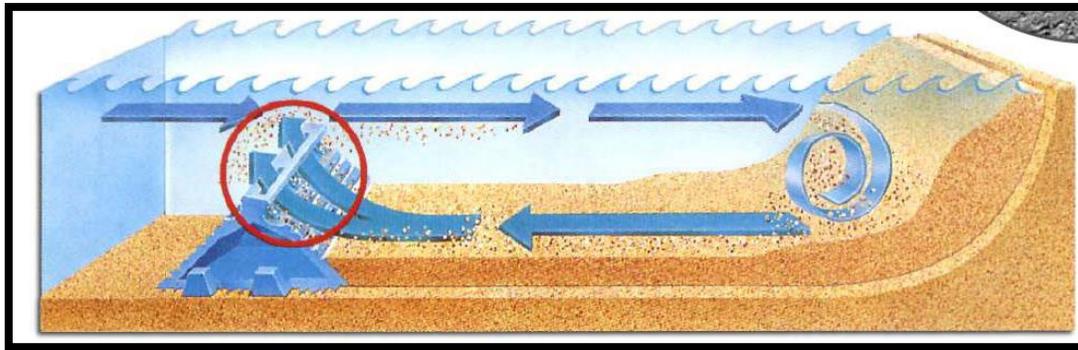


Figura III-1 Ejemplo ilustrativo del transporte de la arena en la playa protegida por un dique sumergido. Fuente. www.forte.es

Los diques muy sumergidos o estructuras cercanas al fondo son aquellas cuya altura es pequeña en comparación con la profundidad de agua. La profundidad a la que se sumergen estas estructuras es suficiente para considerar que la rotura de oleaje no afecta el flujo alrededor de esta estructura. Esta definición las separa de los diques con coronación cercana al nivel medio.

Los diques de escollera rebasables y sumergidos son diferentes a los grandes rompeolas convencionales, estos diques son comparativamente más pequeños y menos complejos y se pueden construir, en su mayoría, utilizando únicamente medios flotantes.

Dado el menor costo de estas estructuras en comparación con los rompeolas tradicionales, el mayor esfuerzo en la investigación ha estado dirigido hacia éstos. Así, las estructuras con coronación cercana al nivel medio se han calculado utilizando criterios derivados de las estructuras emergidas, aplicando amplios coeficientes de seguridad.

3.1 Procesos de transformación del oleaje al interaccionar con un dique

El oleaje se genera por la acción del viento sobre la superficie del agua, lo cual incrementa su rugosidad, pasando de ondas capilares a ondas de gravedad, mismas que serán propagadas hacia la costa en forma de energía cinética y potencial. En su viaje a la costa, el oleaje interactúa con estructuras naturales o construidas por el hombre, provocando la transformación de la energía hasta llegar a la costa. Las estructuras costeras representan una defensa contra el oleaje, lo cual genera una interacción entre estos dos elementos que condiciona la estabilidad de la estructura.

La interacción oleaje-estructura involucra la transformación de la energía del oleaje y la respuesta de la estructura a las fuerzas de empuje asociados con la rotura del oleaje.

Entre los procesos de transformación del oleaje relacionados con las estructuras de baja cota de coronación se encuentran la reflexión, transmisión y disipación de la energía del oleaje.

3.1.1 Reflexión

Las estructuras costeras reflejan una porción de la energía de la ola incidente. Si esa reflexión es significativa, la interacción entre la onda incidente y reflejada pueden crear un oleaje caótico con ondas muy peraltadas que rompen fácilmente. La suma de las ondas incidente y reflejada es un fenómeno común en los canales de acceso de puertos donde el oleaje caótico puede causar problemas considerables en la maniobrabilidad de pequeñas embarcaciones. La reflexión también puede incrementar el potencial de erosión del lecho marino al pie de estructuras de contención, además, las ondas reflejadas desde una estructura costera pueden contribuir a la erosión de las playas adyacentes.

Los muros verticales lisos, impermeables y no rebasables reflejan casi por completo la energía de la onda incidente, mientras que las estructuras permeables, con pendiente suave y de piezas sueltas disipan una porción importante de la energía. Éstas últimas son las que mejor funcionan en la construcción portuaria.

En general, la energía del oleaje incidente se disipa por rotura, por la fricción con la superficie rugosa de los diques y por turbulencia dentro de la estructura; parte de la energía se transmite a la zona protegida por rebase y penetración y el resto se refleja de nuevo hacia el mar ec. 3.1.

$$E_i = E_d + E_t + E_r \quad [N] \quad (3.1)$$

Donde E_i , E_d , E_t y E_r son la energía incidente, disipada, transmitida y reflejada, respectivamente.

La reflexión puede ser cuantificada por un coeficiente de reflexión general mostrado en la ec. 3.2.

$$Cr = \frac{H_{sr}}{H_s} = \left(\frac{E_r}{E_i}\right)^{1/2} \quad (3.2)$$

Donde H_s y H_{sr} son la altura de ola significativa de la onda reflejada e incidente, respectivamente.

3.1.2 Transmisión

La agitación detrás de una estructura puede ser debida, además del rebase, a la penetración de las ondas si la estructura es permeable. Generalmente el periodo de las ondas transmitidas es aproximadamente la mitad del correspondiente a las ondas incidentes. La transmisión suele representarse a través de un coeficiente de transmisión, C_t , que se define como la relación entre la altura de ola transmitida y la altura de la onda

incidente (H_{st} y H_s) o como la raíz cuadrada de la relación de energías transmitidas e incidente (E_t y E_i) promediada en el tiempo, esto se expresa en la ec. 3.3:

$$Ct = \frac{H_{st}}{H_s} = \left(\frac{E_t}{E_i} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

En la realidad, el oleaje dentro de la zona protegida es una suma de las ondas transmitidas y las que se generan por rebase. Aunque se sabe que las debidas al rebase son de mucho menor periodo, la separación y caracterización de ambas ondas es difícil, por lo que suelen considerarse como un solo tipo de ondas y el coeficiente de transmisión incluye a ambas.

Por lo general, los valores del coeficiente de transmisión que se reportan en la literatura son obtenidos en laboratorio y la mayoría en pequeña escala, por lo que al utilizarlos se debe considerar que dichos valores pueden estar distorsionados por efectos de escala.

3.1.3 Disipación

El oleaje en su propagación hacia la costa, antes de la zona de rompientes, la disipación debida a la fricción en el fondo es el proceso principal de atenuación energética. La disipación de energía ocurre principalmente en aguas poco profundas e induce una reducción de la altura de ola. Los efectos de fricción varían con el tipo de material en el fondo, así como de las características del oleaje, profundidad relativa y distancia de recorrido del oleaje, entre otros. Cuando las olas se propagan a través de una zona relativamente amplia y poco profunda, su energía se disipa de forma importante. La disipación puede ser causada por el incremento de fricción en el fondo, la infiltración en los intersticios de estructuras porosas o fondos arenosos, el movimiento de fondos marinos cohesivos y por la resistencia inducida por la vegetación. Los mecanismos de disipación pueden provocar una disminución en la altura de las olas mayor que la estimada con métodos convencionales para fondos impermeables o arenosos. Los métodos disponibles se basan en el análisis de los parámetros que tienen una amplia gama de valores y puede ser de difícil estimación de manera fiable. El enfoque general para cuantificar la disipación puede implicar el uso de datos empíricos, en ocasiones recogidos en el lugar de estudio o disponibles en un sitio similar. En la mayoría de situaciones, la cantidad de disipación será pequeña y el esfuerzo necesario para analizar los procesos de disipación puede ser grande. A partir de la zona de rompientes, los efectos turbulentos dominan el proceso de disipación de energía y los efectos de fricción y percolación son menos importantes. La caracterización del proceso de rotura se aborda en la próxima sección.

3.1.4 Rebase

Es un proceso intermitente que ocurre cuando el ascenso máximo es superior a la cota de coronación de la estructura (Figura III-2). El rebase se puede presentar con olas menores a las de diseño. Es importante señalar que para considerarlo rebase, el flujo debe ser parcialmente continuo, es decir, si las olas salpican la parte alta de la estructura, pero no se forma una lámina continua, no se considera rebase.

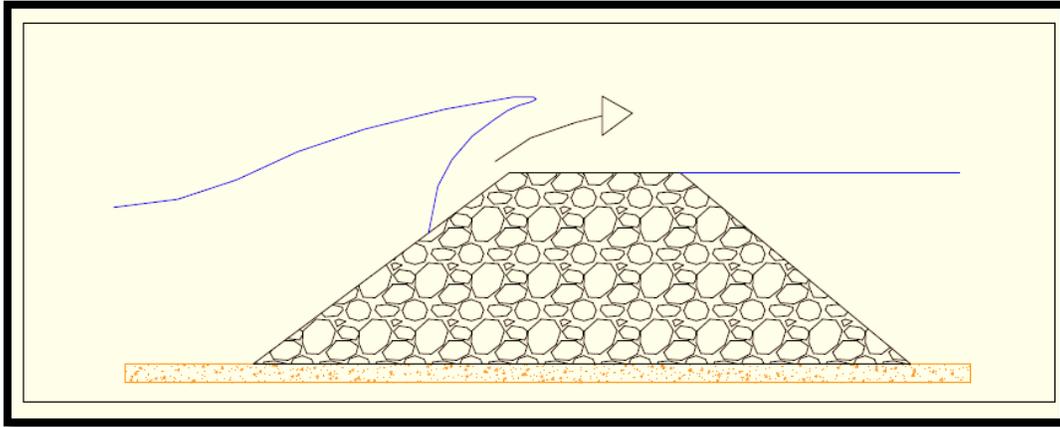


Figura III-2 Imagen ilustrativa de ejemplo de rebase.

3.2 Factores que alteran la transmisión del oleaje en una estructura de protección

La transmisión que puede presentarse en una estructura, depende de diferentes factores inherentes a la forma y material de la estructura rompeolas, o factores propios del oleaje (Monroy, 2013).

3.2.1 Factores marítimos

Altura de ola incidente (H) El factor más importante que influye en la transmisión del oleaje es la altura de ola incidente. Para oleaje regular, siendo éste el caso de este estudio, comúnmente se utiliza la altura de ola cuadrática media incidente.

Periodo de onda incidente (T) Para periodos de onda más largos, se presentará un mayor nivel de ascenso máximo (run up) y con ello habrá una mayor transmisión.

3.2.2 Factores geométricos

Francobordo (F_b) El francobordo es la distancia vertical entre la cresta de la estructura y el nivel medio del agua. En el caso de las estructuras emergidas, mientras mayor sea el francobordo, la transmisión del oleaje será menor; y viceversa, a menor francobordo, habrá mayor rebase y, por tanto, mayor será la transmisión. Lo mismo sucede con las estructuras sumergidas, cuyo francobordo puede considerarse como negativo. Así, mientras más sumergida se encuentre una estructura, existirá una mayor transmisión.

Ancho de la cresta (B) Mientras mayor sea el ancho de la cresta, la transmisión decrecerá, pues existirá una mayor superficie en la cual la energía del oleaje incidente será disipada.

Pendiente de la estructura Una de las razones por la cual se construyen estructuras rompeolas con una pendiente, además de darle cierta estabilidad, se pretende que parte de la energía sea disipada por una disminución gradual en la profundidad del agua, generando así rotura y con ello disipando una gran cantidad de energía del oleaje incidente.

Lo ideal sería construir rompeolas con pendientes muy suaves, con el fin de que las olas siempre rompan; sin embargo, frecuentemente resulta complicado por la cantidad de material que esto representaría. Con esto, se puede inferir que, cuando la pendiente es más tendida, la estructura tendrá una mayor capacidad disipativa, y, por tanto, presentará una menor transmisión. La influencia de la pendiente de la estructura será más evidente en el caso de estructuras emergidas, que es donde se presenta el ascenso máximo (run up) y donde se disipa gran parte de la energía.

Rugosidad de la estructura Dentro de las propuestas que se han hecho de elementos prefabricados para la construcción de estructuras rompeolas, se han presentado formas que presentan cierta rugosidad en la superficie expuesta. Esto tiene como finalidad disipar la energía del oleaje por medio de la fricción que se presenta, pues, cuanto más rugosa sea la estructura, se generará mayor fricción y, con ello, se disipará una cantidad significativa de la energía.

3.3 Diseño mecánico de diques de baja cota de coronación

Los diques sumergidos y rebasables son aquellos que se diseñan de tal forma que parte importante de la energía del oleaje se transmite a través de él. El mecanismo de transmisión más importante es el rebase sobre la coronación, aunque la transmisión a través del dique también puede ser significativa. La razón de este tipo de diques obedece a aspectos visuales, ya que son estructuras que permanecen por debajo del nivel medio del mar y, por tanto, su nivel de impacto visual es propiamente nulo. Existen numerosos trabajos encaminados a comprender la estabilidad de este tipo de diques, de igual manera varios autores han estudiado la estabilidad de este tipo de diques mediante análisis dimensional (López, 2007).

- *Powell y Allsop (1985)*, relacionan el parámetro de estabilidad con el número de piezas desplazadas.
- *Van der Meer (1988, 1990, 1991)* sugirió utilizar la formulación de diques no rebasables multiplicando el D_{n50} por un factor de reducción f_i .
- *Vidal., (1994, 1995)* consiguió relaciones entre N_s y F_d (francobordo adimensional con el tamaño de las piezas) para distintos niveles de daño (Inicio de Avería, Avería de Iribarren, Inicio de Destrucción, Destrucción) de cada una de las partes de la estructura (coronación, talud interior, talud exterior, morro interior, morro exterior).
- *Kramer y Burtcharth (2003)* presentan una fórmula de inicio de avería en aguas someras.

Para el diseño de diques sumergidos existen diferentes metodologías que sirven para determinar la geometría y la estabilidad de estas estructuras. Una metodología propuesta por el manual de obras civiles de la CFE es la metodología de *Vidal., 1992*, la cual fue desarrollada considerando los resultados experimentales de autores como Grace, Jensen, van der Meer y Kobayashi y Wurjanto. Sin embargo, en este trabajo se presentarán los estudios realizados por *Kramer y Burtcharth, 2003*.

Kramer y Burcharth, 2003 realizaron, dentro del proyecto DELOS, pruebas tridimensionales en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica y Costera de la Universidad de Aalborg, Dinamarca. En dichas pruebas se estudió la estabilidad del tronco del dique y la cabeza redonda o morro.

3.3.1 Parámetro de daño para el cuerpo

Para comparar el daño observado dado como número de rocas de armadura desplazadas “ N ”, con el parámetro “ S ” de Broderick (Referencia?) para daño de tronco o cuerpo del dique, donde $S=A_e / D_{n50}^2$, se debe establecer un vínculo entre estos dos parámetros N y S .

Se supone que el número de unidades desplazadas N en la sección de prueba es igual al volumen erosionado en la misma sección, lo cual se denota con la siguiente ecuación:

$$V_e = N \cdot D_{n50}^3 / (1 - n) \quad (3.4)$$

Donde n es la porosidad de la capa de la armadura.

El área erosionada promedio en la sección de prueba se puede calcular como

$$A_e = V_e / X \quad (3.5)$$

Donde X es el ancho de la sección del tronco, por lo tanto, la ecuación de Broderick se convierte en la ec. 3.6:

$$S = \frac{N * D_{n50}}{(1 - n) * X} \quad (3.6)$$

3.3.2 Caracterización del daño del morro

Si el método de *Vidal, (1995)* es adoptado, *Kramer y Burcharth* observaron, que de acuerdo con sus resultados, la región más propensa al daño estaba entre los niveles $(SWL + H_s / 2)$ y $(SWL - H_s)$. En su trabajo Vidal sugirió que el ancho de referencia para cuantificar el daño se calcula como la longitud del arco $(R \cdot \theta)$, donde R es la media del radio de la cabeza correspondiente a los dos niveles y θ es el ángulo en el sector de la cabeza redondeada, por lo tanto el radio R se calcula como:

$$R = \frac{B}{2} + \begin{cases} \frac{H_s + R_c}{2} * \cot \alpha, & \dots R_c \leq \frac{H_s}{2} \\ \left(\frac{H_{sc}}{4} + R_c \right) * \cot \alpha & \dots R_c \geq \frac{H_s}{2} \end{cases} \quad (3.7)$$

Donde α es el ángulo de la pendiente R_c es el francobordo y B el ancho de la cresta, entonces es posible calcular el parámetro de daño S en el morro como lo muestra la ec. 3.8:

$$S_{head} = \frac{N * D_{n50}}{(1 - n) * R * \theta} \quad (3.8)$$

3.3.3 Definición de inicio de daño

Para el cuerpo de la estructura, el inicio del daño se tomó como $S = 0.5$ para cada sección, con pendiente hacia el mar, la cresta y pendiente de sotavento diferente a lo realizado por otros investigadores. Este valor de S corresponde a aproximadamente cuatro rocas desplazadas en el área observada de 50 cm de ancho.

Para la cabeza redondeada o morro, el inicio del daño se eligió como $S = 1$ para cada uno de los tres sectores de 60° , ya que no había ninguna razón para que existiera una diferencia.

Los diques de baja cota de coronación que sean estrechos y construidos en aguas poco profundas tienen solo algunas piezas de tamaños de roca más grandes en la cresta. Una roca removida del borde de la cresta causa

un agujero significativo en la estructura. Para estructuras más pequeñas, por lo tanto, se elige definir el inicio del daño para toda la estructura cuando solo una sección alcanza esta etapa.

En estos experimentos, S se calcula a partir del N observado de las unidades desplazadas. Por lo tanto, el daño evaluado no tiene en cuenta los asentamientos que, de lo contrario, aumentarían los valores de S .

En los experimentos realizados por dichos autores encontraron que:

- *Influencia de la dirección de la ola.* Las ondas frontales parecen producir más daño al tronco que las ondas oblicuas. La diferencia en la estabilidad para la dirección de onda positiva y negativa, probablemente se deba a la difracción y al efecto del modelo relacionado con la posición y el espacio para la matriz de grabación de onda 3-D. Para la cabeza redondeada, parece haber poca influencia de la dirección de la onda en el valor umbral del daño.
- *Influencia de la pendiente de la ola.* Tanto en el tronco como en la cabeza redondeada, la estabilidad de la armadura disminuye ligeramente al aumentar la pendiente de la ola.
- *Influencia del ancho de la cresta.* No se observa una diferencia clara en la estabilidad entre los dos anchos de cresta probados.

La influencia del francobordo es importante ya que una estructura sumergida es significativamente más estable que una estructura emergente de cresta baja. Para una condición más energética que la ensayada, se reducirá el exceso y, por consiguiente, la pendiente y cresta de sotavento del tronco se volverán más estables.

Se recomienda elegir un ancho de cresta al menos de igual dimensión a la altura de ola significativa más grande. El ancho de la cresta debe corresponder a una distancia de al menos tres unidades de armado. En el caso de diques de materiales sueltos, las rocas en el tronco y la cabeza redonda deberían ser del mismo tamaño. Si se elige usar un solo tamaño de escollera (sin núcleo, es decir, sección transversal homogénea), el diseño debe ser conservador con la estabilidad hidráulica.

3.3.4 Oleaje de profundidad limitada

Si las olas más altas están limitadas por el fondo, la altura significativa de la ola puede ser reemplazada por la aproximación $H_s = 0.6 * h$ (h es la profundidad del agua). En la Figura III-3 se da una línea que representa el límite inferior de los resultados de la prueba. Esta línea representa la parte menos estable de la estructura.

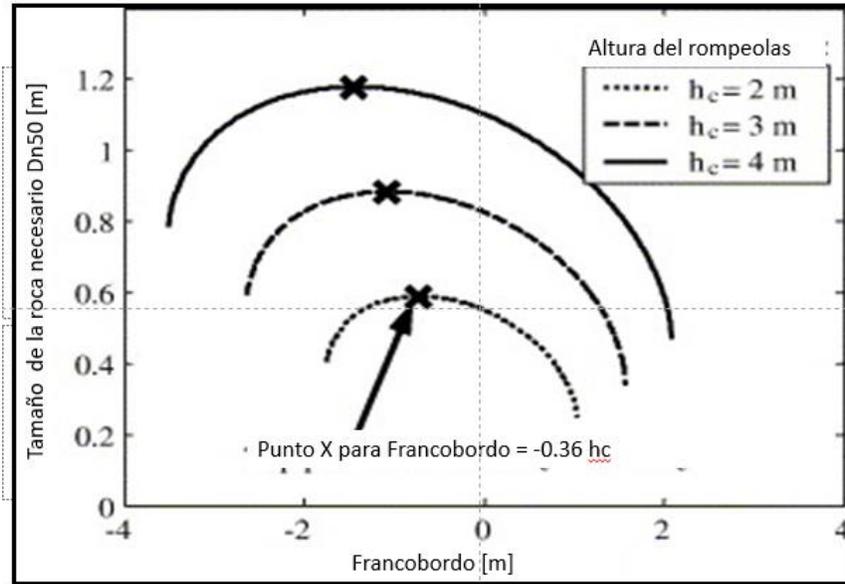


Figura III-3 Ejemplo de gráficos de diseño correspondientes al inicio del daño en caso de ondas de profundidad limitada en la pendiente de la orilla suave, $\gamma = 0.6$ y $\rho s = 2.65 \text{ t/m}$ (Kramer- Burcharth 2003).

3.3.5 Estabilidad hidráulica

3.3.5.1 Tamaño de roca requerido en ondas de aguas poco profundas.

Si se usa el mismo tamaño de pieza de coraza para el cuerpo y el morro y el diseño se basa en inicio de avería, es posible derivar de estos resultados experimentales una nueva fórmula de estabilidad de coraza.

Al diseñar un rompeolas con cresta baja, las alturas de ola más altas deben calcularse para diferentes niveles del agua causadas por la marea astronómica y la marea de tormenta. La siguiente fórmula es válida para francobordos relativamente bajos.

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 0.06 \left(\frac{R_c}{D_{n50}} \right)^2 - 0.23 \frac{R_c}{D_{n50}} + 1.36 \quad (3.9)$$

Donde:

H_s es la altura de ola significante [m]

R_c es el francobordo (en caso de ser sumergido este será negativo) [m]

$\Delta = (\rho_r - \rho_w) / \rho_w$; donde ρ_r y ρ_w son las densidades de la roca y del agua respectivamente.

Para la ec. 3.7 si se considera el mismo tamaño de las piezas de coraza para toda la estructura, entonces la fórmula es válida cuando $-3 \leq R_c / D_{n50} < 2$, usando pendientes 1:1.5 expuestas a un oleaje de profundidad limitada, también a pendientes de 1:2 expuestas a profundidad limitadas con olas de periodo corto. Se puede esperar que el inicio del daño para pendientes de 1:1.5 expuestas a oleaje de poca altura con profundidad limitada corresponda a números de estabilidad S menores a los dados por la ecuación anterior.

Para las estructuras en aguas más profundas, una separación en los tamaños de rocas para las diversas partes de la estructura puede ser factible. La validez de la fórmula 3.9 se examina a través de todos los parámetros involucrados.

3.3.5.2 Francobordo

La ec. 3.7 sólo es válida para francobordos relativamente bajos dados por los rangos obtenidos de la relación R_c/D_{n50} . Para el diseño de estructuras emergidas, de acuerdo con el límite superior de la relación anterior, es probablemente suficiente. El límite superior de la relación es $R/D_{n50}=2$ correspondiente a un número de estabilidad de $H_s/\Delta D_{n50} = 1.14$, que en términos de tamaño de escollera sería $D_{n50} = H_s / 1.14\Delta$.

3.3.5.3 Oblicuidad de la onda.

La ec. 3.7 es segura de aplicar también en caso de ataque de oleaje incidiendo oblicuamente. Los ensayos realizados por *Kramer y Burcharth (2003)* mostraron que las direcciones de onda en el rango de -20° a $+20^\circ$ conducen a una estabilidad ligeramente mayor. Sin embargo, este aumento en el ángulo no justificó una reducción del tamaño de roca dentro del rango probado de oblicuidades.

Pendiente de la ola. La fórmula se usó para olas bastante largas ($S_{op} = 0.02$) y olas bastante cortas ($S_{op} = 0.035$). Si se esperan ondas extremadamente largas, se debe diseñar mediante la ec. 3.9 y se puede subestimar el tamaño de roca necesario.

Además de lo anterior los autores llegaron a otras conclusiones para la parte de la construcción del dique:

- Tipo de roca: la fórmula solo es válida para material de armadura que consiste en roca de cantera.
- Capas: se probó una estructura construida con escombros bastante permeable de dos capas. Sin embargo, lo más seguro es usar la fórmula para el diseño de estructuras homogéneas. Para estructuras de escombros con multicapas o impermeable deben tenerse precaución si se usa la ec. 3.9 para diseñar la armadura.

- Pendientes: el rompeolas se debe construir con pendientes no más empinadas que 1:2. Esto es con rompeolas con pendientes menos pronunciadas, ya que son más estables y se diseñan según la ec. 3.9 será aún más seguro.
- Ancho de Cresta: la ec. 3.7 está desarrollada para rompeolas de cresta estrecha (anchos de cresta menos de aproximadamente $10D_{n50}$).

3.4 Tamaño de roca requerido para ondas con profundidad limitadas.

Si las olas más altas tienen profundidad limitada y se usan rocas regulares, entonces *Kramer y Burcharth (2003)* mostraron que las condiciones de inmersión son las más críticas. En este caso la ec. 3.9 es reducida y el D_{n50} requerido puede estimarse mediante la siguiente regla:

$$D_{n50} \geq 0.29 * h_c \quad (3.10)$$

Donde:

h_c es la altura de la estructura

La ecuación anterior es válida para las condiciones de oleaje: $H_s/h = 0.6$. De acuerdo con la ec. 3.10 la altura de la estructura no será más de 3 a 4 D_{n50} , lo cual es muy típico en los diques de baja cota de coronación existentes.

Si la estructura es emergida en condiciones de diseño, el límite superior de la ecuación $-3 \leq R_c / D_{n50} < 2$, correspondiente a $D_{n50} = H / 1.14$, y probablemente sea suficiente para el diseño. Al insertar $\rho = 2.65 \text{ t/m}^3$ correspondiente a $\Delta = 1.6$ y la aproximación de la altura de ola es $H = 0.6h$, entonces el tamaño de roca requerido es $D_{n50} = 0.33 h$.

Tabla III-1 Condiciones de diseño

Altura de la estructura	Francobordo	Diseño de francobordo y profundidad del agua	Diseño de olas	Herramienta de diseño
$H_c \leq 4$ m	Ligeramente emergido ligeramente sumergido	La peor condición es para $R_c/H_c \approx -0.3$ si puede obtenerse. Por lo general, el diseño más alto la profundidad del agua es la peor condición.	Profundidad limitada	3.10
	Muy sumergido ($R_c/H_c < -0.4$)	La peor condición es para $R_c/H_c \approx -0.3$ si puede obtenerse. Típicamente una frecuencia que ocurre bajo nivel de agua o incluso el agua de diseño más bajo la profundidad es la peor condición.	Profundidad limitada	3.9
$H_c \geq 4$ m	Estructura muy emergida	No es una estructura de baja cota de coronación		
	Ligeramente emergido, ligeramente sumergido	La peor condición suele ser para el agua de diseño más alto nivel.	Las olas de diseño puede no ser completamente profundidad limitada ($H_c/h < 0.6$)	3.9
	Estructura muy sumergida ($R_c/H_c < -0.4$)	La estructura no existe. Sin embargo Ec. 3.9 aún puede ser utilizado para el diseño, por ejemplo arrecifes artificiales.		

IV. METODOLOGÍA DE PRUEBAS EN EL LABORATORIO

4.1 Descripción de los experimentos

4.1.1 Descripción del arreglo experimental

4.1.1.1 Canal de oleaje

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería UNAM, el cual cuenta con un canal de oleaje, Figura IV-1, que tiene las siguientes características: longitud de 37 m, ancho de 80 cm y profundidad de 120 cm. Está construido, en uno de sus costados y en el fondo, con lámina de acero inoxidable, mientras que el otro costado está compuesto por vidrio con espesor de 20 mm y acero en los extremos del canal. El canal se encuentra a una altura de 80 cm sobre el nivel de piso y está soportado por una estructura tubular de acero.

El sistema de generación de oleaje cuenta con un sistema de absorción dinámica que permite minimizar el oleaje re-reflejado que es generado cuando se coloca una estructura reflejante dentro del canal.



Figura IV-1 Canal de oleaje del Instituto de Ingeniería UNAM.

Lleno a su máxima capacidad, el canal requiere cerca de 24 000 litros de agua y en condiciones normales de operación 15 000 litros. Esta gran cantidad de agua es recirculada y almacenada en una cisterna con lo cual se evita su desperdicio. Para llevar el agua de la cisterna al canal se utilizan tres bombas de 10 caballos de fuerza, cada una llena el canal a razón de un centímetro de profundidad por minuto. Para vaciarlo se utilizan las mismas bombas y un sistema por gravedad situado en la parte final del canal, en donde se ha

dispuesto material que además de cumplir funciones hidráulicas específicas, sirve de filtro para las partículas más gruesas. Una vez en la cisterna, la mayoría de las partículas finas se depositan en el fondo.

4.1.1.2 Descripción del modelo físico

El canal fue dividido en sus últimos 8.0 m con hoja de acrílico y así se simularon dos perfiles simultáneamente. En una parte se construyó un modelo de playa con berma, identificado como perfil A, y en la otra uno sin berma, referido como perfil B, Figura IV-2.

Las características del perfil A son: tiene una duna con una altura de 0.2 m con una anchura en la base de 0.7 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 23.1 donde la pendiente media es de 1° hasta llegar al fondo del canal. Con estas características se trató de representar un perfil tipo reflejante.

La duna del perfil B tiene una altura de 0.2 m con una anchura en la base de 1.25 m, la pendiente de lado expuesto de la duna es de 16° 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° . Este perfil se asemeja a uno disipativo.

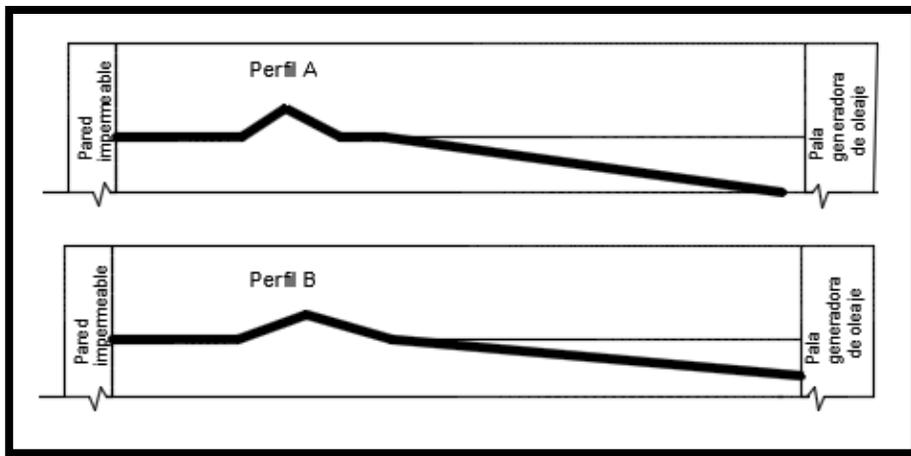


Figura IV-2 Representación idealizada de los perfiles ensayados.

Los ensayos se realizaron con oleaje irregular utilizando un espectro tipo JONSWAP. Se efectuaron 13 pruebas variando la distancia del dique a la línea de costa, el periodo pico y altura significativa del oleaje.

4.1.1.3 Descripción de las estructuras ensayadas

Un buen diseño geométrico de un dique sumergido implica la optimización del volumen de material, sin que esto origine una disminución de su eficiencia hidrodinámica y mecánica. Por tal motivo, el material con el cual se construyó el dique sumergido que se ensayó en este trabajo fueron cubos de concreto de 1 cm de lado. El dique se construyó de tipo homogéneo (no cuenta con un núcleo). Estos elementos de concreto son muy comunes en la fabricación de protecciones costeras, ya que presentan un comportamiento mecánico conocido y de alta estabilidad aunque, en ocasiones, el cabeceo de las piezas provoca que las esquinas del cubo sufran un redondeo que le resta “trabazón” y un poco peso a las piezas, sin embargo, dado que su funcionamiento es por peso, continúan ofreciendo servicio, lo que corresponde a una falla dúctil. Las pendientes del talud del dique, tanto en el lado expuesto como en el lado protegido fueron 1:2. El movimiento de sedimento en el fondo puede funcionar como cementante y provocar que, después de un determinado tiempo, parte del dique funcione como una estructura impermeable.

La primera estructura ensayada se colocó de forma que tuviera un francobordo nulo, es decir, con altura de la estructura de 0.15 m. Éste es el dique más cercano a la playa seca y tiene un ancho de corona de 0.10 m. Estas características se cumplen cuando se ensayaron tormentas de baja y media intensidad; cuando se probó una tormenta de alta intensidad, el nivel medio del agua aumenta por lo que la estructura queda sumergida. La segunda barrera es similar a la primera pero colocada alejada de la línea de costa hasta donde el francobordo fuera 0.15 m.

La tercera estructura se colocó en el mismo lugar que la segunda, pero con altura de 0.30 m (francobordo nulo en condiciones de tormenta de baja y media intensidad). En tormenta de alta intensidad queda sumergida por el aumento representativo de marea de tormenta (Figura IV-3).



Figura IV-3 Perfil de playa A mostrando los tres diques usados (NAR=Nivel de agua en reposo).

4.1.1.4 Descripción de los ensayos

Los ensayos se realizaron con oleaje irregular generado a partir de un espectro JONSWAP. Se utilizó el sistema de absorción activa para eliminar las ondas re-reflejadas en la pala generadora de oleaje. El nivel medio de agua fue de 0.45 m en tormentas baja y media y de 0.48 m en tormenta de alta intensidad. La duración de cada prueba fue de 45 minutos. Las condiciones específicas de oleaje utilizadas en cada prueba se presentan en la Tabla IV-1:

Tabla IV-1 Condiciones de oleaje ensayadas.

Estructura	Tipo de Evento	Hs (m)	Tp (s)	h (m)
1	Tormenta de baja intensidad	0.05	0.894	0.45
			1.118	
	Tormenta de media intensidad	0.1	0.894	0.45
	Tormenta de alta intensidad	0.1	1.118	0.48
2	Tormenta de baja intensidad	0.05	0.894	0.45
			1.118	
	Tormenta de media intensidad	0.1	0.894	0.45
	Tormenta de alta intensidad	0.1	1.118	0.48
3	Tormenta de baja intensidad	0.05	0.894	0.45
	Tormenta de media intensidad	0.1	1.118	0.45
	Tormenta de alta intensidad	0.1	1.118	0.48

Se probaron solo condiciones de tormenta ya que son las condiciones en que las obras de protección son solicitadas y es cuando su eficiencia se puede valorar. Bajo estas condiciones se espera obtener erosión de la parte interna del perfil retrocediendo la línea de costa y transportando el material hacia mar adentro de acuerdo con *Sánchez (1994)*.

En los ensayos se midió la evolución temporal de la superficie libre con 11 sensores de nivel (SN). Estos sensores son de tipo resistivo y registran una variación de voltaje proporcional al ascenso y descenso del nivel agua durante la prueba (Figura IV-4). Posteriormente, las series de tiempo de elevación de superficie libre se analizaron en el dominio del tiempo y de la frecuencia para obtener todas las características de oleaje necesarias para establecer el balance energético debido a la presencia de las barreras de protección.



Figura IV-4 Colocación de los sensores de nivel.

También se midieron perfiles de velocidades con 4 sensores UVP-DUO (Ultrasound Velocity Profiler). Estos sensores miden la velocidad por efecto Doppler a partir de señales ultrasónicas en celdas verticales de hasta unos pocos milímetros (Figura IV.5).

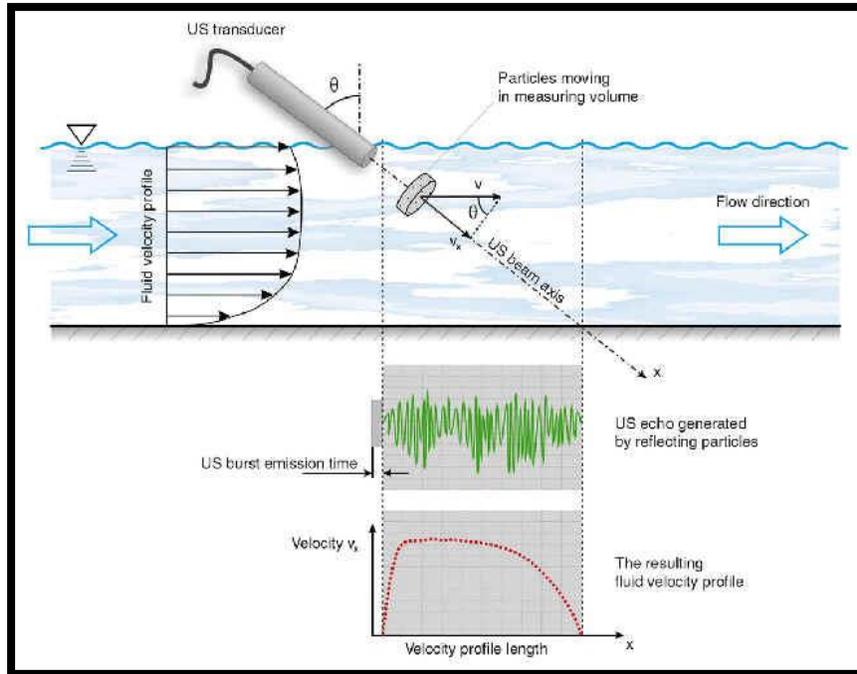


Figura IV-5 Descripción del método de medición UVP.

Además, se midieron los perfiles iniciales y finales con nivel topográfico y filmaciones de video y fotografía fija convencional.

Los sensores, SN2, SN3, SN4, SN8, SN9, junto con UVP1 y UVP3 se colocaron para medir en el perfil A y los sensores SN5, SN6, SN7, SN10 y SN11, UVP2 y UVP4; en el perfil B, como se puede ver en la Figura IV-6. El sensor SN1 registró las condiciones de oleaje generado cerca de la pala y antes de la división del canal.

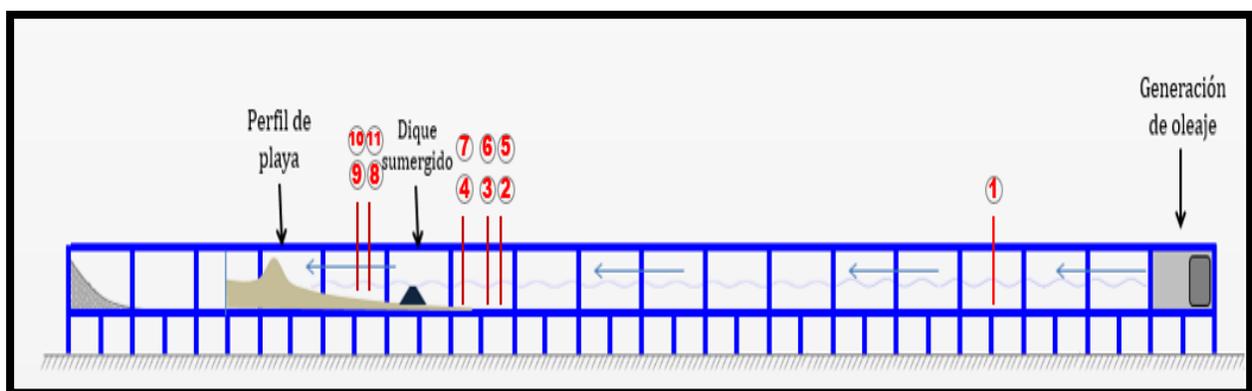


Figura IV-6 Arreglo de los sensores de nivel en el canal de oleaje.

De los registros de oleaje, la separación de onda incidente y reflejada se llevó a cabo siguiendo el método de Baquerizo, 1995, por lo que los sensores se colocaron respetando la separación mínima y máxima que exige dicha técnica, esto es, $\frac{\pi}{10} \leq k\Delta x \leq \frac{9\pi}{10}$, donde k es el número de onda estimado con teoría lineal.

4.2 Análisis de datos

Para el caso de los sensores de nivel, el registro de la variación del nivel medio es capturado mediante el sistema de medición de alta precisión de nombre *SPARTAN* de la firma imc, el cual se utilizó para llevar a cabo los registros de los sensores de nivel solamente. La adquisición de los datos recabados por el *SPARTAN* se realizó a través del software de operación y configuración *imc STUDIO*, el cual permite capturar, procesar y visualizar las señales analógicas y digitales.

El procesamiento de los datos obtenidos fue realizado con la ayuda del software *imc FAMOS (Fast Analysis and Monitoring of Signals)*, el cual es un programa de la misma firma para el análisis y evaluación de los resultados de las mediciones. Con dicho software fue posible generar a partir del sistema de ondas, los datos en hojas de cálculo para su mejor manejo.

Las series de tiempo de elevación de superficie libre del agua se analizaron en el dominio de la frecuencia, de donde se obtuvieron la altura significativa (H_s) y periodo pico (T_p) del oleaje de cada ensayo siguiendo la metodología presentada en *Silva (2005)* para el análisis espectro digital de series temporales, resumida en la Tabla IV-2.

Tabla IV-2 Metodología análisis espectral

I. Corrección del nivel medio	<ul style="list-style-type: none"> • Media • Ec. Lineal • Ec. Parabólica • Filtro espectral
II. Aplicación de una función ventana	<ul style="list-style-type: none"> • Ventana tipo trapezoide • Ventana tipo coseno
III. Estimaciones de la componentes de Fourier	
IV. Cálculo del espectro de energía	
V. Suavizado del espectro de energía	
VI. Parámetros espectrales	
VII. Estimación de la dirección del oleaje	<ul style="list-style-type: none"> • Espectro direccional

4.2.1 Energía potencial del oleaje

La energía del oleaje se puede estimar como función de la altura cuadrática media. Dicho valor se obtuvo con los datos de los primeros 10 minutos de iniciada la tormenta y 10 minutos antes de finalizar cada ensayo, a fin de observar el decaimiento o incremento de la energía potencial del oleaje en presencia del obstáculo sumergido, además de evaluar el desempeño hidrodinámico del dique. Se determinaron la energía potencial de oleaje incidente y la del oleaje transmitido como:

$$E_p = \frac{1}{16} \rho g H^2 \text{ [N]} \quad (4.1)$$

Donde

ρ densidad del agua

H altura de ola, en este trabajo se tomó esta como la altura cuadrática media.

4.2.2 Cálculo de la reflexión por una estructura

Para el cálculo del coeficiente de reflexión se utilizó el programa llamado REFLAB del Instituto de Ingeniería. Este programa utiliza la variación de la superficie del agua en el tiempo y separa las ondas incidente y reflejada siguiendo el método de *Baquerizo (1995)*. Los datos de entrada al programa son: el nombre de archivo con la serie de tiempo, los datos de los tres sensores de nivel a ocupar en el cálculo, las distancias entre sensores, la profundidad de agua en reposo del ensayo, las frecuencias mínima y máxima de análisis y el nombre del archivo de salida.

4.2.3 Cálculo del coeficiente de transmisión

Para el cálculo del coeficiente de transmisión, se utilizó la ec. 4.2. La altura de ola transmitida se obtuvo de los registros de los sensores colocados después del dique, mientras que la altura de ola incidente se evaluó utilizando el programa REFLAB.

$$T = \frac{H_T}{H_i} = \sqrt{\frac{E_T}{E_i}} \quad (4.2)$$

Donde:

H_T altura de ola transmitida

H_i altura de ola incidente

4.2.4 Cálculo del coeficiente de disipación

Conocidos los coeficientes de reflexión y transmisión, es posible conocer el coeficiente de disipación que se calcula, siguiendo la ley de conservación de la energía, a partir de la ec. 4.3, como:

$$D = \sqrt{1 - T^2 - R^2} \quad (4.3)$$

4.2.5 Perfil de velocidades

Como se mencionó, los sensores UVP miden la velocidad por efecto Doppler. Esta técnica está basada en los principios de:

- Emisión pulsada de señales de Ultrasonidos.
- Recepción del eco generado por el Ultrasonido sobre las partículas suspendidas en el fluido como función del tiempo (ecografía).
- Detección de la frecuencia Doppler.

El archivo de salida que genera el programa de MET-FLOW es un archivo con extensión .TXT que contiene toda la información registrada por los sensores: número de canales, total de perfiles medidos, tiempo de inicio de la medición, velocidad del sonido en el medio, máxima profundidad medible, el rango de velocidad medible, la ventana de medición, una tabla con la información de los sensores utilizados, un vector con el número de perfiles medidos, un vector con el tiempo de cada perfil medido y al final una matriz con la información registrada por los todos sensores UVP utilizados en la prueba. La matriz con la información de las velocidades registradas está acomodada de manera que las filas representan la variación en el tiempo de la velocidad para cada canal y las columnas son los perfiles de velocidad medidos en cada instante de tiempo.

Los datos de los archivos de salida se manipularon en un lenguaje de programación para realizar la estadística de los registros. Lo cual consistió en la obtención de un perfil con los promedios cuadráticos medios registrados por cada sensor, y a la postre se obtuvieron velocidades cuadráticas medias dividiendo el perfil en superior e inferior.

4.2.6 Perfiles de playa iniciales y finales

Antes de cada prueba se construyeron los dos perfiles con las características ya descritas y con ayuda de un nivel topográfico se realizaron las mediciones de los perfiles en puntos ya establecidos en el canal. Al finalizar la prueba se realizó nuevamente una medición para determinar la respuesta a la presencia de las estructuras. Se calcularon los volúmenes de arena en los perfiles tanto en la zona emergida como en la sumergida. La medición de los perfiles permitió visualizar los puntos en que el material arenoso se perdió y cómo se distribuyó (Figura IV-7).

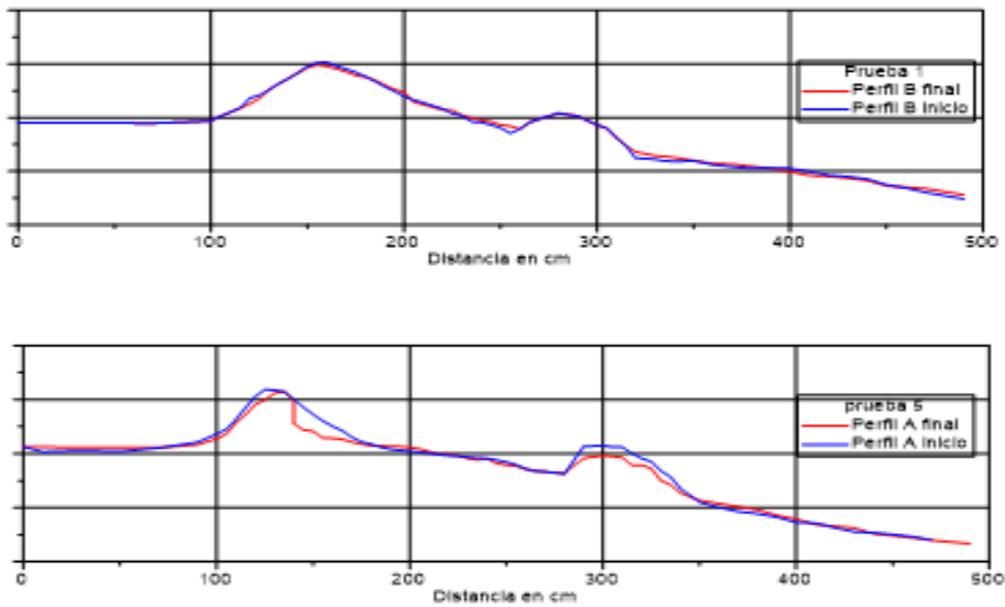


Figura IV-7 Ejemplo de perfiles iniciales y finales.

V. RESULTADOS

En las siguientes secciones se muestran los resultados obtenidos de los ensayos y su análisis. Se estudió el desempeño de los diques ensayados con base en la energía potencial del oleaje, la reflexión, disipación y transmisión de energía y la respuesta de los perfiles de playa.

5.1 Energía Potencial

Se realizó una revisión de la respuesta de los diques en condiciones de tormenta a partir de los valores de la energía potencial. Esto se obtiene comparando la energía potencial transmitida con la energía potencial incidente. Los resultados se separaron dependiendo de la intensidad de tormenta para así evaluar una medida de la eficiencia de las estructuras propuestas (Tabla V-1).

La relación de la energía potencial permite observar si el dique trabaja adecuadamente, es decir, produciendo una reducción en la energía del oleaje. En el caso de que la relación de energía potencial sea muy grande, significa que el dique no cumple con la función de control de energía de las olas. La Tabla V-1 muestra el resumen de los valores de relación de energía potencial.

Tabla V-1 Resultados de energías potenciales.

Dique	Altura de ola H	Periodo T	Inicio tormenta		final tormenta	
			A	B	A	B
1	0.05	0.894	0.21	0.53	0.22	0.53
		1.118	0.34	0.58	0.33	0.57
2		0.894	0.59	0.86	0.59	0.85
		1.118	0.99	0.54	1.02	0.54
3		0.894	0.16	0.17	0.17	0.16
1		0.1	0.894	0.33	0.21	0.33
	1.118		0.24	0.29	0.31	0.36
2	0.894		0.66	0.82	0.66	0.80
	1.118		0.68	0.88	0.67	0.87
3	1.118		0.20	0.25	0.20	0.24
Sobreelevación						
1	0.1	1.118	0.35	0.76	0.33	0.61
2			0.92	0.68	0.93	0.72
3			0.34	0.41	0.34	0.39

Como se puede observar en la Tabla V-1, en el primer bloque de ensayos, de tormenta de baja intensidad con altura 0.05 m, el dique más eficiente para el control de la energía del oleaje, en ambos perfiles, es el dique 3 que, como se mencionó antes, es la estructura más robusta, con francobordo nulo y distancia mayor de la línea de costa. Este dique resultó con una relación de energías de 0.16.

El dique identificado con el número 1, el más cercano a la línea de playa, permitió baja transmisión de la energía del oleaje incidente en el perfil A y, aunque el valor de la relación de energía sea mayor que el dique 3, no se considera que afecte directamente a la playa, sobre todo en la parte de la duna debido a la presencia de la berma.

Por otro lado, el dique 2, que tiene un francobordo mayor, es el que menor eficiencia mostró en ambos perfiles; incluso se observó que al final de la tormenta, la relación de energías es mucho mayor, lo cual indica que el dique, en lugar de provocar disminución en la altura de ola, ocasionó peraltamiento.

En conjunto, se puede decir que, para los dos perfiles, el dique 3 es el que mejor funcionamiento tiene. Analizando los resultados del siguiente bloque de ensayos, para la tormenta con altura de 0.10 m (intensidad media), el dique que mejor trabaja también es el 3, aunque el dique 1 tiene un buen funcionamiento atenuando la energía de manera eficiente. El dique 2 presentó menor eficiencia de nuevo.

En el caso de la tormenta con una sobreelevación del nivel medio (alta intensidad), tanto el dique 1 como el dique 3 resultaron con valores similares de relación de energías en el perfil A; mientras que en el perfil B el dique 3 mostró mejor desempeño. El dique 2 volvió a ser el menos eficiente.

5.2 Propuesta de parámetro adimensional

En esta sección se presentan los resultados de los coeficientes de transmisión (T), disipación (d) y reflexión (R). En la literatura especializada en modelos de pequeña escala, el uso de parámetros adimensionales para comparar y caracterizar dichos los procesos es básico. En el caso de diques sumergidos es común utilizar los parámetros F_b/H (francobordo entre altura de ola) o B/L (ancho de corona de la estructura entre longitud de onda). El primer parámetro, según se recomienda en la literatura (*Van der Meer, 1990*), debe tomar valores menores a 1.5 para que la estructura tenga resultados satisfactorios respecto de la transmisión de energía.

En este trabajo se pretende verificar la eficiencia de la estructura y comprobar si físicamente la estructura está evitando una posible erosión de la playa. Para ello se realizó la medición de los perfiles de playa antes y después de cada prueba, y mediante el cálculo y comparación del volumen de cada uno, se observaron las partes del perfil de playa seca y sumergida donde se perdió o depositó el sedimento

Para analizarla relación de volúmenes finales contra iniciales es conveniente compararlos a partir de un parámetro adimensional. Se buscó un único parámetro que permitiera identificar el comportamiento tanto para diques sumergidos como rebasables, y así englobar todas las tipologías de diques de baja cota de coronación. Este viene definido mediante la ec. 5.2, en función de parámetros del dique del oleaje y que incluye de manera implícita la morfología de la playa.

$$D = \frac{w * B}{h * L} \quad (5.2)$$

Donde B es el ancho de corona del dique, L es la longitud de onda, w la distancia de la costa al punto medio del ancho de corona del dique, y h es la altura de la estructura. Además, implícitamente se puede encontrar la pendiente de la playa con el parámetro adimensional (w/h) expresado dentro de la fórmula. Como se puede notar en este parámetro no se incluyó el francobordo, aunque es uno de los parámetros más característicos en el diseño de diques sumergidos.

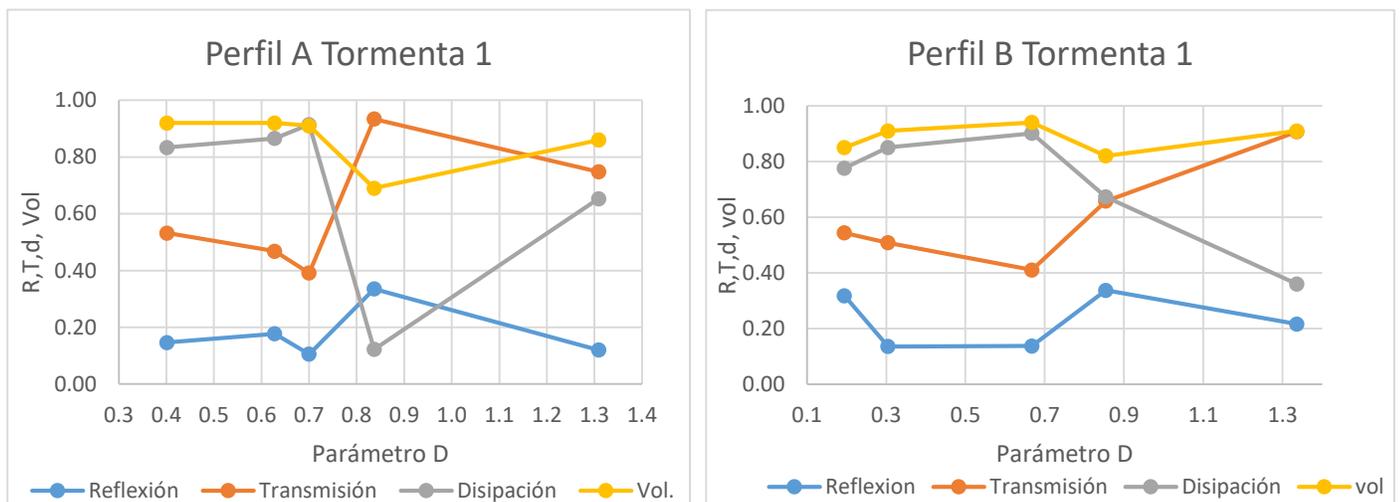


Figura V-1 Resultados de la Tormenta 1 bajo el parámetro D.

Con características explicadas en el capítulo anterior, en la Figura V-1 los resultados están divididos por los tres tipos de estructura ensayados bajo la influencia de la tormenta de baja intensidad. Ahora se explica a qué parámetro corresponde cada dique y su relación con la protección de playas. Los primeros “D” correspondientes al primer dique, en el perfil A tiene valores de $D=0.60$ y 0.40 , en el dique 2 los valores son $D=1.3$ y 0.8 mientras que el valor de 0.7 es el relacionado con el dique 3, todo esto en el perfil A. Con estos valores se observa que la estructura 1, en lo que se relaciona con la hidrodinámica tiene un funcionamiento adecuado ya sea en la tormenta con un periodo corto o como el de periodo largo. Con esta tormenta de baja intensidad y la acción del dique-playa la reflexión no supera el 20 %, la transmisión de energía oscila en el 50 % y, aunque parece ser demasiada energía, este porcentaje no provoca una gran pérdida en el volumen de la playa seca. En porcentaje no llega a 10 % del total de arena y, además, la disipación de energía provocada por la estructura es relativamente alta, con poco más del 80 %.

Si se observa el comportamiento en el mismo perfil, pero ahora con el segundo dique (el dique sumergido), bajo el comportamiento de la tormenta de baja intensidad y periodos de 0.894 s y 1.118 s se obtiene un

$D=1.3$ y 0.8 , respectivamente. Los resultados son insatisfactorios ya que el dique permite que se transmita demasiado oleaje, consecuencia de que la disipación del oleaje es mucho menor. En la playa seca o emergida se identifica un porcentaje alto de pérdida de material, mayor cuando la tormenta tiene un periodo más largo.

En el último dique ensayado, se obtiene un valor $D=0.7$. Este trabaja muy similar al primer dique ya que se pierde la misma cantidad de arena y, aunque disipa más energía y evita una mayor transmisión, protege de buena manera a la playa emergida.

Para las mismas condiciones en el perfil tipo B se tienen $D=0.3$ y 0.2 para el primer dique, $D=1.3$ y 0.9 para el segundo y para el dique más robusto $D=0.7$. En el caso del primer dique, con un periodo corto se tiene el mismo comportamiento que en el perfil A; sin embargo, los ensayos con una tormenta que tiene un periodo mayor muestran que en el perfil B se pierde un porcentaje mayor de material, observándose también un aumento en la transmisión que llega a la playa emergida.

Para el caso de la segunda estructura, se observa que cuando el periodo es corto los resultados son muy desfavorables; en cambio, con una tormenta de periodo más largo se tiene una cierta mejoría en la protección de la playa, aunque con valores de transmisión muy altos. Es conveniente mencionar que en el perfil B los diques presentaron una mayor reflexión del oleaje incidente, en comparación con los resultados obtenidos en el perfil A. El dique 3 trabaja de forma similar tanto en el perfil reflejante como en el disipativo, y la pérdida de arena es muy poca.

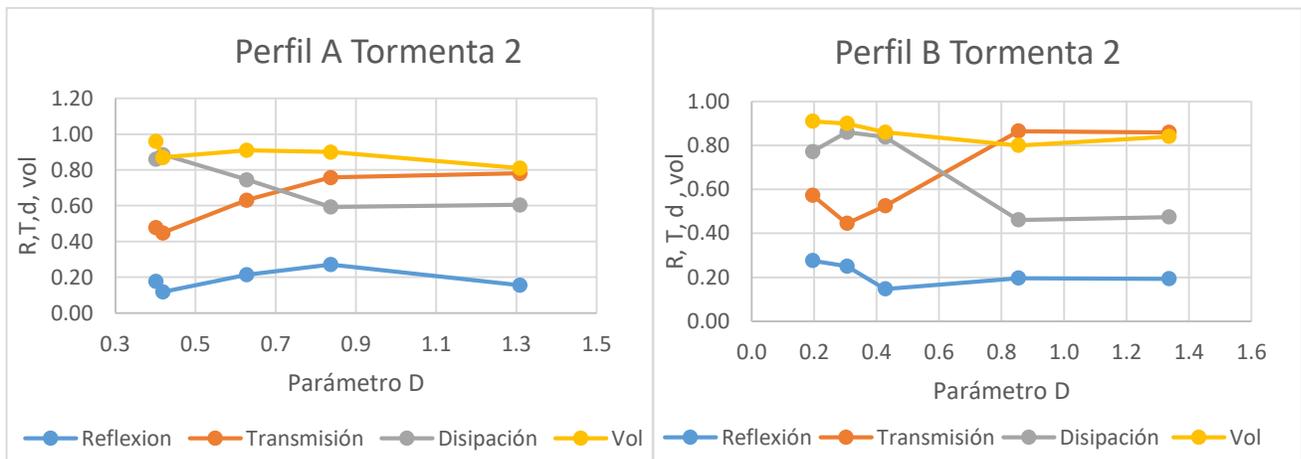


Figura V-2 Resultados de la Tormenta 2 bajo el parámetro D.

En las Figuras V-2 se muestran los resultados para la tormenta de media intensidad, donde la altura de ola se aumentó a 0.10 m. Para esta tormenta en el perfil A y en el dique 1, el parámetro “D” es de 0.6 y 0.4

dependiendo del periodo de la tormenta. La reflexión oscila al 20 % y la transmisión aumenta con una tormenta de menor periodo (un poco mayor del 60 %). En cambio, en condiciones donde el periodo es más largo esta transmisión disminuye, cerca del 50 %. Por consiguiente, en el primer caso la disipación es menor, con un valor del 70 %; mientras que en el segundo caso la disipación es muy buena, siendo más del 80 %. Por lo tanto, la pérdida de material es relativamente baja ya que no pasa del 10 %. Para el perfil B se observa una tendencia semejante al perfil A, donde el dique 1 funciona adecuadamente. La primera estructura trabaja mejor en condiciones de periodo corto ($D=0.3$), con una transmisión cercana del 45 % y una disipación del 90 %; mientras que con un periodo largo ($D=0.2$) la transmisión aumenta al 60 % y la disipación se reduce al 75 %. Sin embargo, en cuanto a la pérdida de material, en ambos casos se mantiene en el 10 %.

En el dique 2, analizando los dos casos con diferente periodo de oleaje, se identificó que se transmite la misma energía que en el dique 1, la cual oscila en el 80 %, y que se disipa la misma cantidad del 60 %. Sin embargo, en periodo corto, la pérdida de material aumenta, pues se pierde cerca del 20 % de arena seca, mientras que con un periodo largo este porcentaje se reduce al 10 %. Los resultados muestran que ninguna de las estructuras analizadas hasta ahora tiene resultados favorables, con un parámetro $D=1.3$ y 0.8 . Para la estructura 2 se observa una transmisión muy grande en los dos casos de diferente periodo, oscilando al 90 %, de tal forma que la disipación del oleaje disminuye por debajo del 50 %, y la pérdida de material es del 20 %. Esto se debe a la distancia en la que se encuentra el dique, ya que permite que el oleaje siga rompiendo antes de que llegue a la playa emergida. Lo mencionado anteriormente se puede observar en los dos perfiles, lo que haría suponer un posible mal uso de las estructuras con base en el parámetro D . El dique 2 presenta valores del parámetro D más grandes, lo que muestra una mayor transmisión y, a su vez, una menor disipación de energía. Aunque con esta estructura se pierda más volumen que con las demás, este se encuentra en un 20 %.

Para el caso de la estructura 3, esta trabaja adecuadamente, con una disipación del oleaje del 90 %, protegiendo así la playa. La transmisión del oleaje es muy baja, en torno a 45 %, con un $D=0.4$. En el dique 3 y perfil B se tiene el mismo comportamiento que en el dique 1; sin embargo, se pierde un poco más de volumen del material, con un parámetro D similar, $D=0.4$.

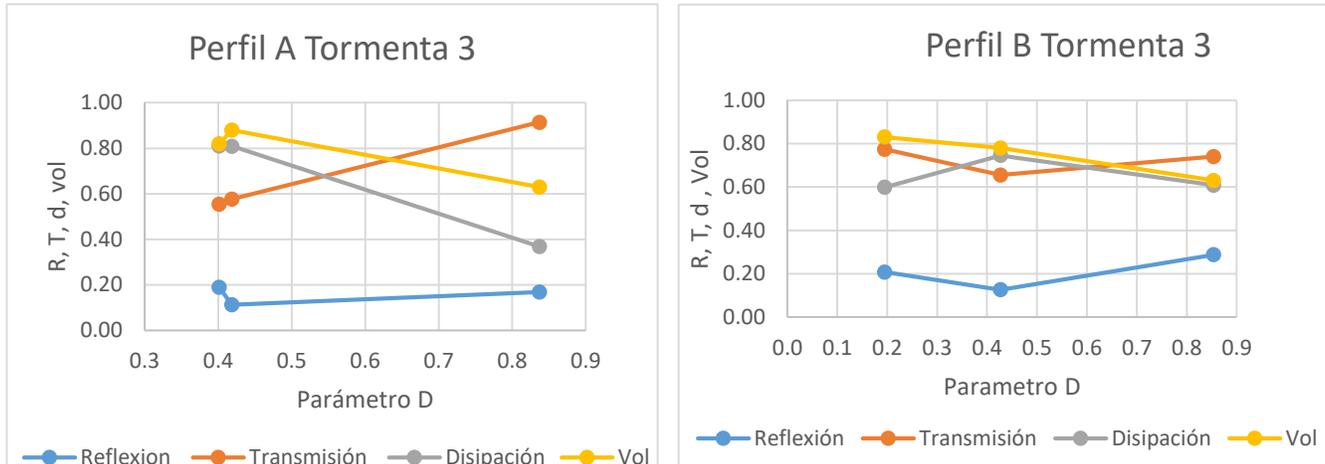


Figura V-3 Resultados de la Tormenta 3 bajo el parámetro D

Para el caso de la tormenta de alta intensidad (Figura V-3), con un aumento en el nivel medio del mar por el efecto de marea de tormenta, se obtiene un parámetro D para el perfil A con valor de 0.4. En los resultados con el dique 1 se obtuvo que la transmisión fue un poco menos del 60 %, mientras que la disipación osciló al 80 %. En comparación, se puede observar que en el dique 2, la transmisión es muy grande, llegando a más del 90 %, con una disipación muy baja, menor del 40 %. Para el dique 3, se encuentran valores semejantes a los del dique 1. Analizando el material perdido en los tres diques, el más deficiente es el dique 2, ya que pierde cerca del 40 % del material de la playa seca, mientras que los otros dos diques oscilan en una pérdida del 20 % y comparten el valor de $D=0.4$.

En lo que respecta al perfil B, se observa que el dique 1 ($D=0.2$) y el dique 2 ($D=0.8$) disipan muy poca energía, y su transmisión es muy cercana al 80 %. Sin embargo, la estructura 1 evita que se pierda mayor cantidad de material, quizás por su colocación más cerca de la línea de costa. El dique 3, aunque tiene una mejor disipación de energía, al estar colocada más lejos un aumento del nivel del agua provoca que el oleaje en cierto punto llegue a recobrar una mayor altura, teniendo como resultado que al llegar a la playa erosione y no funcione como un dique colocado más cerca a la playa emergida y semejante al dique 1 se encuentra un $D=0.4$.

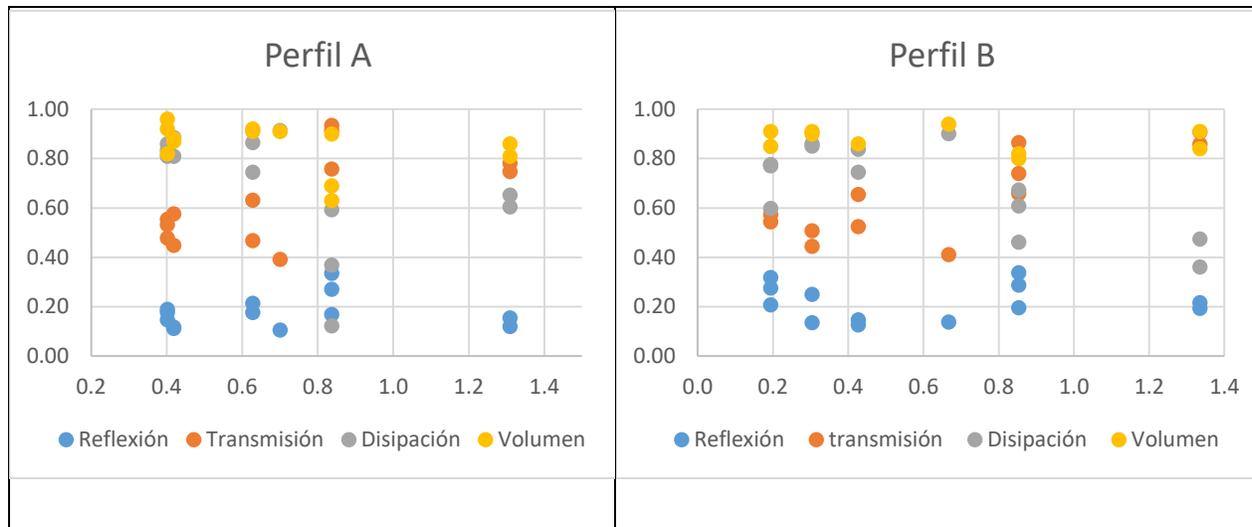


Figura V-4 Resultados solamente teniendo en cuenta la respuesta del parámetro D.

En resumen, la figura V-4 muestra el parámetro D sin división de tipo de dique ni tipo de tormenta. Se ve claramente que cuando el parámetro es menor de un valor 0.8 existe una excelente disipación de la energía del oleaje. Éste valor se encuentra en los dos perfiles cercano al 80 %, por su parte, la transmisión disminuye a un valor por debajo del 60 %, considerados valores aceptables. Por otro lado, si se observan parámetros de D mayores a 0.8, la transmisión es superior a la disipación.

En lo que respecta a la reflexión de energía, esta se mantiene casi en el mismo porcentaje del 20 % para cualquier valor del parámetro.

Para la revisión del volumen de material perdido con este parámetro se observa cierta diferencia dependiendo del perfil.

En cierta medida, para valores de D menores a 0.8 el porcentaje de arena es similar en los dos perfiles; sin embargo, con un valor de “D” mayor, el perfil B se mantendría más estable, con un porcentaje mayor de material.

5.3 Morfología

Continuando con la morfología, y retomando el parámetro propuesto “D”, en el siguiente análisis se pretende observar hacia dónde se recorre la línea de playa, y, con ello, observar si en la duna está presentando una erosión o una acumulación en el área que divide la parte emergida de la sumergida.

El parámetro $\Delta y/w$ que se observa en los siguientes gráficos es la distancia que la línea de costa recorre hacia el mar o hacia tierra bajo el efecto de oleaje de tormenta, y para poder hacerlo adimensional se dividió entre la distancia de la costa hasta el punto medio del dique.

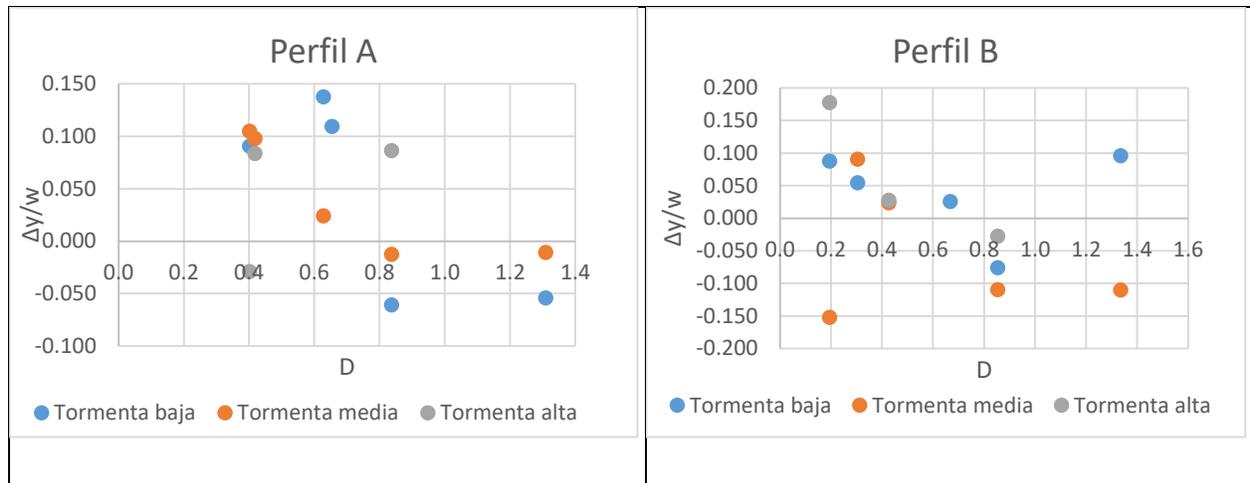


Figura V-5 Resultados del parámetro D con la distribución de la morfología final de playa.

La Figura V-5 contempla todos los ensayos realizados, los datos que se encuentran en la parte superior del eje x o en este caso los datos positivos son datos donde la distancia en horizontal se desplazó hacia el mar, ocasionando que la duna aportara material acumulado en la línea de costa, mientras que en los datos negativos se observa que la duna no aporta sedimento y éste se está perdiendo a tal grado que la línea se recorre hacia tierra provocando una erosión que se detecta a simple vista.

Se puede constatar nuevamente que si el parámetro D es mayor a 0.8 muestra que existe una erosión mayor, en otros casos como en el perfil A con tormenta de alta intensidad aunque el parámetro sea menor existe un retroceso de la línea de costa sin embargo también se puede notar que el desplazamiento en sí no es muy grande, ocurre lo mismo en el perfil B pero este caso es con la tormenta de media intensidad y el desplazamiento es mucho mayor, lo que supone que existió erosión debido a que la pendiente de este perfil aumentó.

5.3.1 Comparación de diques

Además de los resultados mostrados anteriormente, se realizaron pruebas sin estructuras para poder evaluar cómo afecta el oleaje a las playas sin protección. Esto se realizó con las mediciones de perfiles antes y después de cada prueba. Posteriormente fueron dibujadas en 2D, de donde se calcularon los volúmenes antes y después para así realizar la misma comparación que se realizó en el punto anterior, Figura V-6.

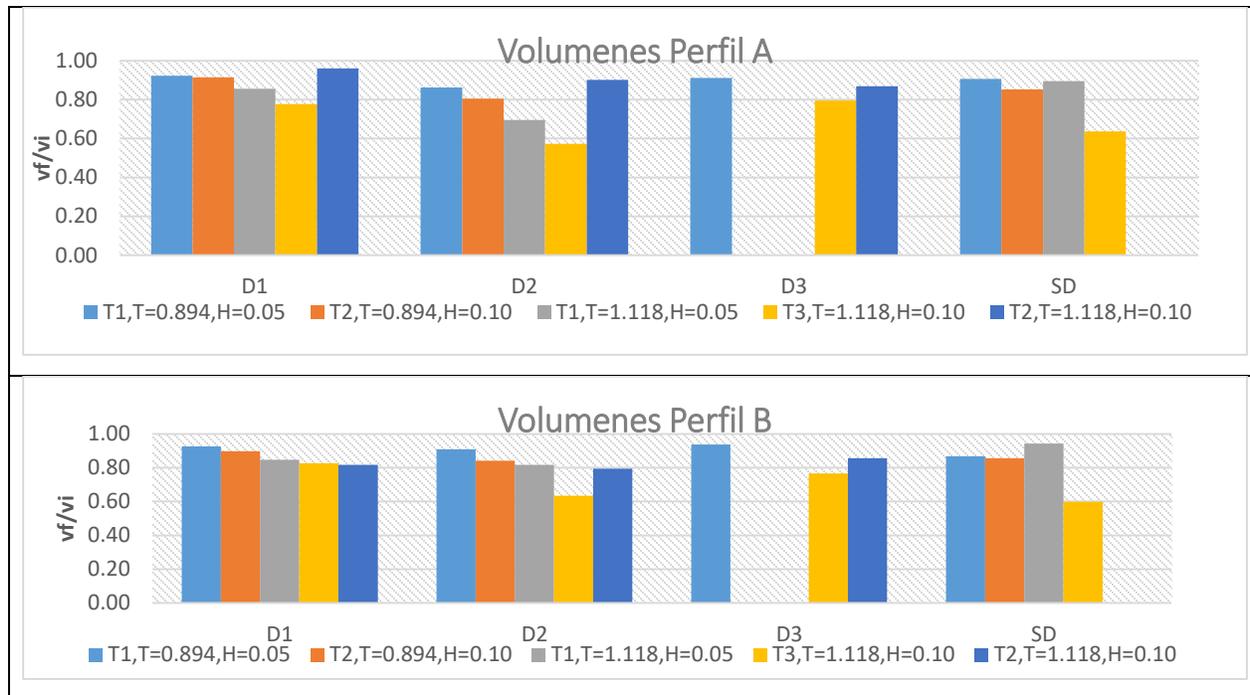


Figura V-6 comparación de los volúmenes con los tres diques y sin dique (SD); T1 con $T=0.894s$ y $H=0.05m$; T1.1 con $T=1.118s$ y $H=0.05m$; T2 con $T=0.894s$ y $H=0.10m$; T2.2 con $T=1.118s$ y $H=0.10m$; T3 con $T=1.118s$ y $H=0.10m$.

En la primer gráfica referente a las pruebas en el perfil A, se observa que el efecto de los diques sí tiene un impacto importante en la playa si se consideran los volúmenes que se tienen cuando la playa no se encuentra protegida; como se observa en las tormentas del dique 1 y dique 3 están protegiendo adecuadamente, sin embargo, la estructura 2 está provocando un cierto aumento en la pérdida de material, lo que significa que en este caso el dique no funciona, la playa está mejor sin la presencia de la estructura.

Por otro lado, en el perfil B el fenómeno descrito anteriormente solo ocurre en la tormenta de baja intensidad con periodo largo, los diques tienen un mal funcionamiento por lo que la playa está mejor sin protección. En cuanto a las demás tormentas, los diques si ayudan a que el material no se pierda.

5.4 Velocidades

Con los sensores UVP es posible conocer el perfil de velocidades, tanto del oleaje incidente que embate al dique como del oleaje que logra ser transmitido y medido cerca de la estructura.

Para realizar el análisis, como se mencionó en el capítulo anterior, se procesaron los datos arrojados de los sensores y, realizando una estadística simple, se obtuvieron velocidades representativas del perfil, con lo que calculando velocidades cuadráticas medias en los dos puntos del dique se podrá observar en que parte de la estructura las velocidades son de mayor magnitud.

Teniendo las velocidades tanto en los primeros instantes de cada ensayo como al final, se obtuvo la relación entre velocidades transmitidas y velocidades incidentes. Los resultados se muestran en las gráficas de la Figura V-7.

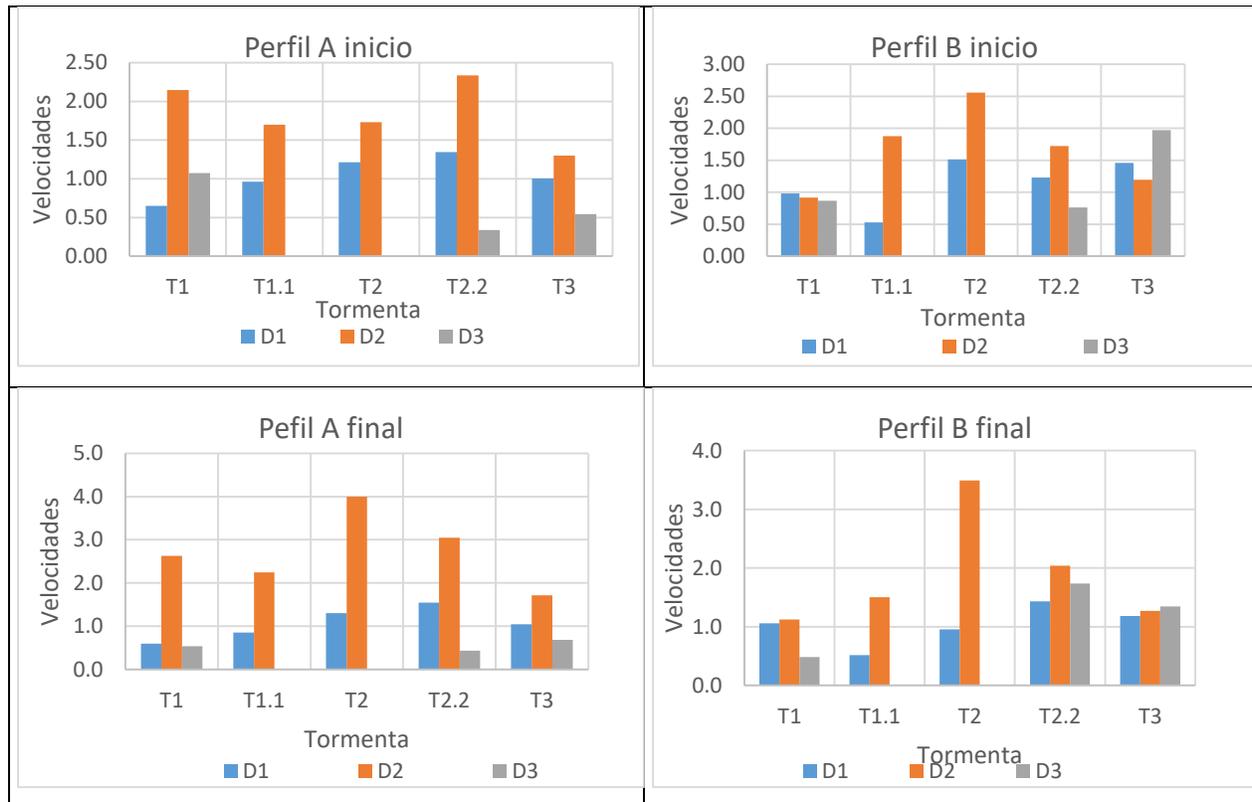


Figura V-7 Perfiles Vs Tormentas analizando las velocidades; T1 con $T=0.894s$ y $H=0.05m$; T1.1 con $T=1.118s$ y $H=0.05m$; T2 con $T=0.894s$ y $H=0.10m$; T2.2 con $T=1.118s$ y $H=0.10$; T3 con $T=1.118$ y $H=0.10$ m, D1 dique 1; D2 dique 2 y D3 dique 3.

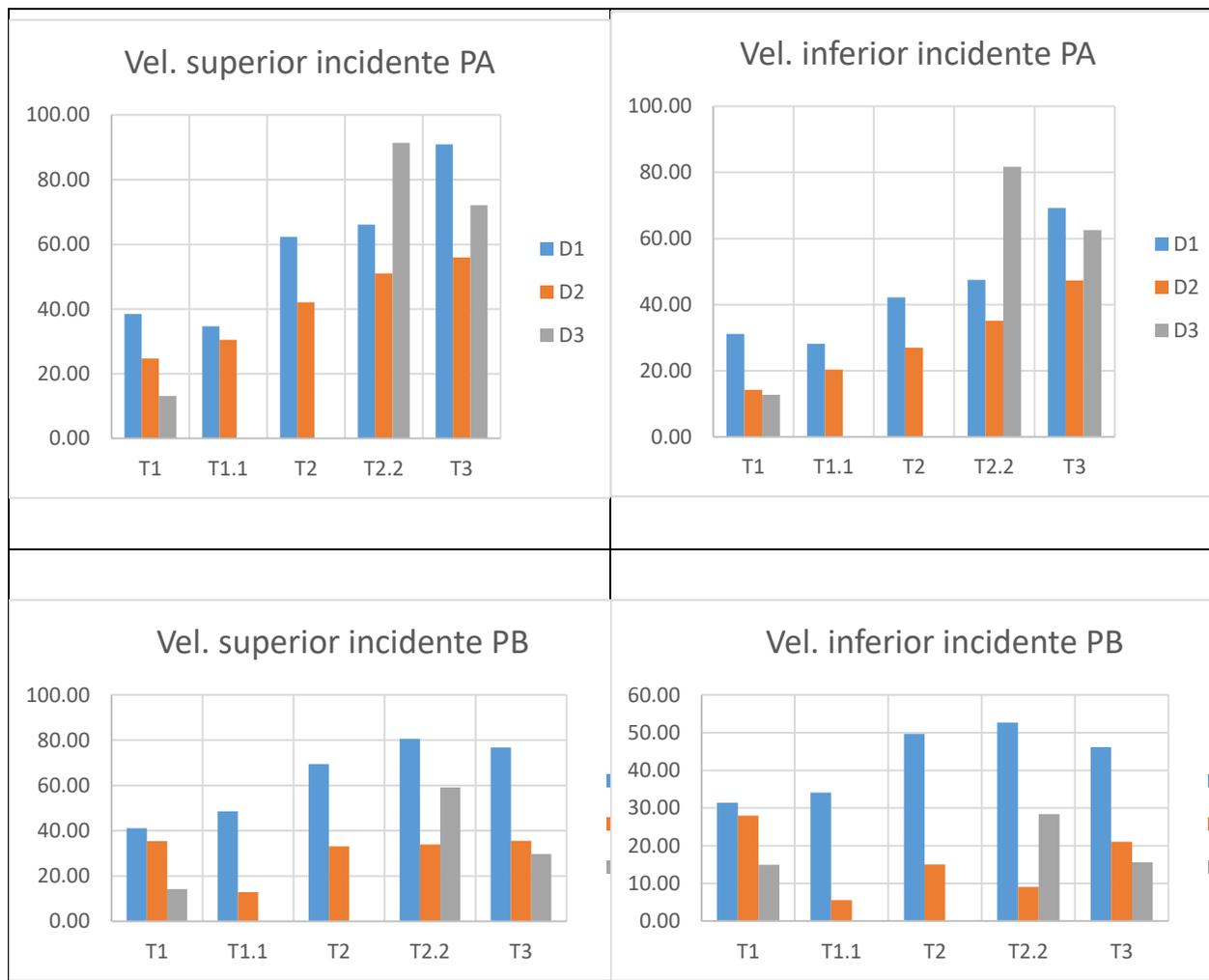
Como se puede ver en las gráficas, dependiendo de la tormenta se presentan distintas velocidades, además no son constantes en el transcurso de la prueba. Como primer análisis se observa que el dique 2 se encuentra muy sumergido y es el que mantiene relaciones de velocidades más grandes. Si se recuerda que la relación de energía está dada por la velocidad incidente y transmitida entonces se puede decir que con este dique las velocidades transmitidas son de mayor magnitud que la velocidad asociada al oleaje incidente. Esto se ve reflejado en los dos perfiles y en todas las tormentas ensayadas.

Para el caso de la primera estructura con tormentas de periodo corto la velocidad es muy baja; la velocidad transmitida en su caso es menor que la velocidad incidente, esto ocurre en los dos perfiles, además de que este fenómeno se mantiene en toda la prueba, con periodos largos pasa lo contrario al ser la velocidad transmitida mayor que la velocidad incidente.

El dique 3, es más robusto, se probó con tres de las cinco tormentas. Se puede observar que, por lo general, en los dos perfiles al inicio de la prueba las velocidades transmitidas son mayores; sin embargo, en el transcurso de la prueba estas velocidades van disminuyendo, lo que ocasiona que la relación de energías sea menor al final de la prueba.

Cuando el dique está más sumergido, se genera mayor velocidad en la zona protegida cercana a la estructura, mientras que un dique rebasable en ciertas condiciones de oleaje tendrá una velocidad incidente mayor que la transmitida, aunque esto no tiene un parámetro específico de cuál sería la opción más viable para tener menor velocidad transmitida.

Aunque en estas pruebas la velocidad puede, por lo general, ser mayor en la parte transmitida del dique, también es bueno conocer en qué parte del perfil es mayor el efecto de la velocidad por lo que también realizando un análisis similar de los datos, se dividió el perfil de velocidades en superior e inferior mostrada en las siguientes gráficas de la Figura V-8.



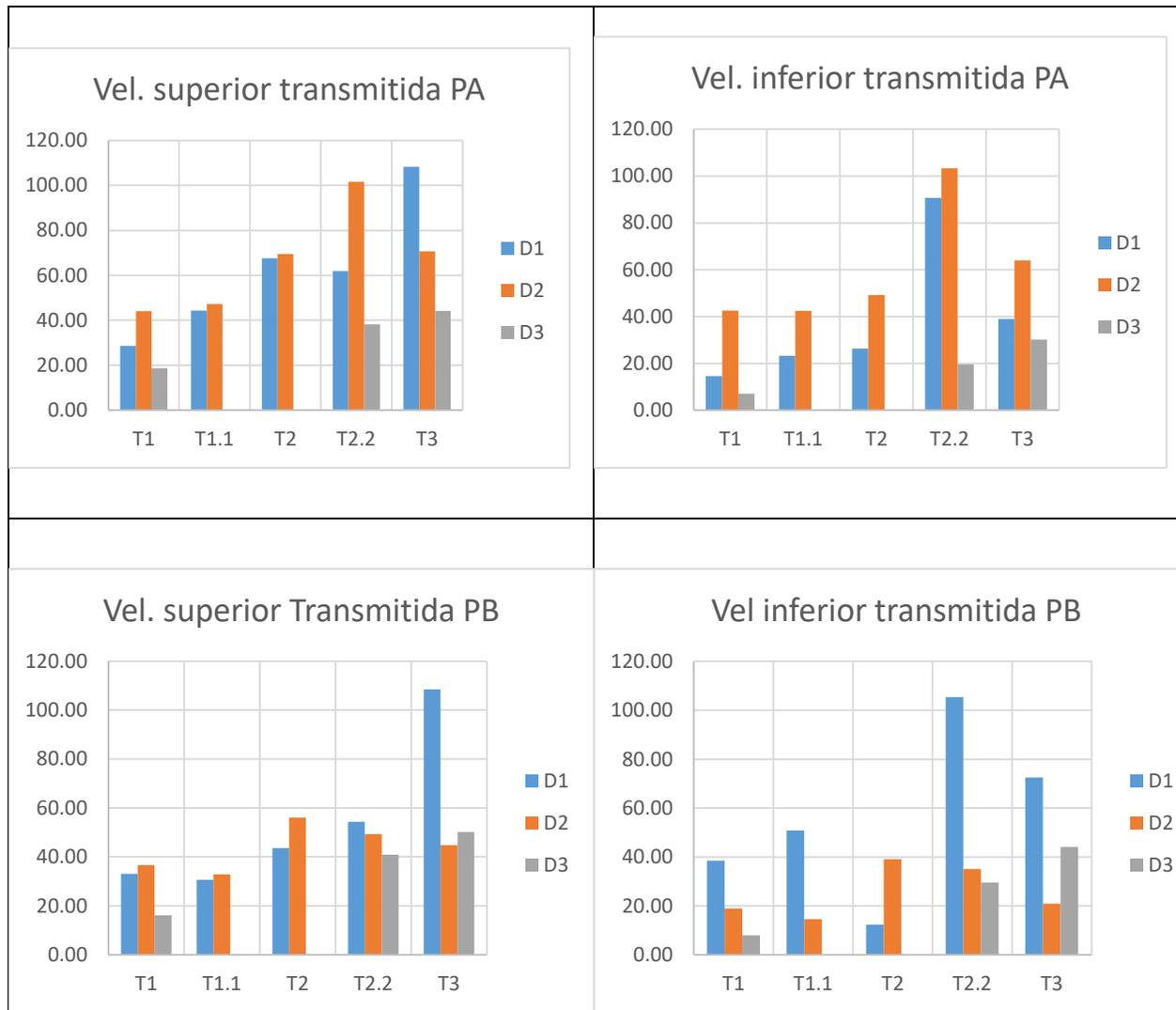


Figura V-8 Graficas de los resultados de velocidades obtenidos en los dos perfiles, estando en el eje Y las velocidades obtenidas y en el eje X las tormentas ensayadas.

Se observa que la velocidad mayor está en la parte superior del perfil, sin embargo, en el perfil B se puede ver que hay casos puntuales en la parte transmitida, donde la parte inferior tiene velocidades más grandes y estas son en tormentas de mediana intensidad con periodos largos. Quitando estos casos lo demás mantiene la forma del perfil de velocidades.

También se puede observar lo analizado en la parte anterior donde hay ensayos en los cuales, la velocidad transmitida es mayor que la velocidad incidente, y en otros casos sucede lo contrario.

Las velocidades en el perfil B suelen ser menores a las que se encuentran en el perfil A, puntalmente en las velocidades incidentes.

Estas gráficas muestran la velocidad en la parte superior e inferior del perfil cobran sentido al visualizar la forma básica del perfil de velocidades. Si esto se observa en la zona transmitida podemos decir que la estructura está propagando el oleaje por la rotura que se está presentando encima de la misma. Ya que la velocidad en la zona inferior de la parte transmitida es menor por lo que quizás no esté siendo transmitida a través del dique.

VI. CONCLUSIONES

El objetivo principal de una estructura de baja cota de coronación es la reducción de la energía del oleaje incidente para proporcionar una protección la playa. Por tal motivo este trabajo se centró en conocer los procesos de interacción oleaje-estructura-playa en diferentes condiciones. De acuerdo con las pruebas realizadas y el análisis realizado se puede concluir lo siguiente:

- La distancia a la que se construye una estructura es un valor que se debe tomar en cuenta, por ello el parámetro propuesto en este trabajo “D” se considera adecuado para caracterizar los fenómenos producidos por las estructuras.
- Si bien el parámetro $D = \frac{w*B}{h*L}$ debe ser menor a 0.8 para que se dé un buen desempeño de la barrera de protección, se recomienda realizar más pruebas variando los parámetros, para obtener un rango más específico de aplicación y corroborar estas hipótesis.
- La protección de playa con un dique de baja cota de coronación, colocado muy alejado de la playa como lo fue el dique 2, con un francobordo muy grande no protege en gran medida ya que el oleaje no siempre se ve afectado por la existencia del obstáculo o en su caso este obstáculo puede peraltar la altura de ola incidente.
- Un dique de baja cota de coronación que se localice muy cerca de la línea de playa es una buena opción para proteger el perfil de playa del embate del oleaje en condiciones de tormenta, por tal motivo en condiciones normales funcionaría adecuadamente. Sin embargo, faltaría considerar los efectos ambientales y sociales de colocar una estructura tan cerca de la playa.
- Para un dique muy alejado de la playa se necesitaría de un francobordo nulo o casi nulo para garantizar un adecuado funcionamiento. El inconveniente de esta estructura es la distancia de instalación de la línea de costa ya que su construcción traería un mayor costo.
- Para un dique rebasable, para tormentas muy intensas se observó que la pendiente de la playa sí es un parámetro importante a considerar en futuros trabajos. Por ello, es importante conocer las condiciones de la zona costera que se desee proteger ya que por sus características pueden dar cierto apoyo a las estructuras de protección. Como se apreció en los resultados, en el perfil A tipo reflejante

los diques trabajaron mejor que el perfil B; sin embargo, en este perfil siendo un perfil disipativo ayuda en las zonas de rompiente.

- Bajo efectos de las tormentas, en cualquier caso, los diques no van a eliminar el problema de la erosión; sin embargo, ayudan en gran manera a mitigar parcialmente la pérdida de material.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- **Allsop, William & Powell, Keith.** (1985). “Low-crest breakwaters, hydraulic performance and stability”.
- **Baquerlizo, A.,** 1995. Reflexión del Oleaje en Playas. Métodos de Evaluación y de Predicción. Ph .D. Dissertation, Universidad de Cantabria, Santander, Spain, 180 p.
- **Bruun, P.** 1962, “Sea-level rise as a cause of shore erosion”, Journal Waterways and Harbours Division.
- **Carranza-Edwards** (2010,2018). “*Causas y consecuencias de la erosión de playas*”. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- **Ferguson B.** (2001) “*Shoreline erosion and its potential control on thurmond lake*”. IECA. Shoreline stabilization. Soil stabilization series.
- **Hinrichsen, Don & Olsen, Stephen.** (1998). “Coastal Waters of the World: Trends, Threats, and Strategies”. Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press.
- **Illenber, W.K. y Rust, I.C.** (1988). “A sand budget for the Alexandria coastal dunefield, South Africa Sedimentology”.
- **Kramer M. and H.F. Burcharth** (2003). “Stability of Low-Crested Breakwaters in Shallow Water Short Crested Waves”. *Proc. Coastal Structures 2003*, ASCE, 137-149.
- **Kramer, M. and Burcharth, H.,** (2003). “Wave basin experiment final form, 3-D stability tests at AAU”. Report of DELOS EVK-CT-2000-0004
- **Leatherman, S.P.** (1979). “Migration of Assateague Island, Maryland, by inlet and overwash processes”.
- **Ley Vega de Seoane Carlos, Gallego Fernández, Vidal Pascual César** (2007), “Manual de restauración de dunas costeras”. Universidad de Cantabria.
- **Lippmann, T.C. y Holmann, R.A.** (1990). “The spatial and temporal variability of sand bar morphology”. J. of Geophysical Research.
- **López, Mera Fernando** (2007) “Nuevas metodologías para el cálculo de la estabilidad de diques rebasables y sumergidos”.
- **Mansard, E.P.D. y Funke, E.R.** (1980). “The measurement of incident and reflected spectra using a least square method”. *Proceedings 17th Coastal Engineering Conference*, Sydney, Australia, Vol. 1.
- **Manual de restauración de dunas costeras.** (2007). Instituto de Hidráulica Ambiental. Universidad de Cantabria.
- **Monroy, J. Barrales** (2013) “Desarrollo de una nueva tipología de dique sumergido a partir de piezas homogéneas”, serie tesis posgrado UNAM.
- **Moreno-Casasola y Travieso-Bello,** (2006) P. Moreno-Casasola, A.C. Travieso-Bello. “Las playas y las dunas” Instituto de Ecología A. C., Xalapa.
- **Powell, Keith y Allsop, William.** (1985). Low-crest breakwaters, hydraulic performance and stability.
- **Salles Afonso de Almeida Paulo y Silva Casarín Rodolfo** (2002) “INFRAESTRUCTURA DE PROTECCIÓN COSTERA”, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- **Sánchez-Arcilla Agustín** (1994) “*Ingeniería de playas (i): conceptos de morfología costera*”. Universidad Politécnica de Cataluña.
- **Santana** (2016). *Estudio experimental de socavación por oleaje en muros verticales, Santana Gonzales. Repertorio Tesis UNAM.*
- **Silva R., Martínez M.L., Moreno-Casasola P., Mendoza, E., López-Portillo, J., Lithgow, D., Vázquez, G., Martínez-Martínez, R.E., Monroy-Ibarra, R., Cáceres-Puig, J.I., Ramírez-**

- Hernández, A., Boy-Tamborell,** (2017). “*Recomendaciones generales para el manejo de la zona costera*”. UNAM; INECOL.
- **Silva, R. odolfo.** (2001). “*Hidráulica marítima*”. Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México.
 - **Silva, Rodolfo.** (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, serie de docencia. SD/49.
 - **Silva, Rodolfo y Mendoza, Edgar,** (2012), “Manual de Diseño de obras civiles”, obras marítimas, CFE- instituto de ingeniería UNAM.
 - **Van der Meer, J.W.** (1988). “Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers”. Proc. ASCE, Journal of WPC and OE, Vol. 114, No. 1.
 - **Van der Meer, J.W.** (1990). “Stability of lo-crested and reef breakwaters”. Proc. 22th. ICCE, Delft.
 - **Van der Meer, J.W. and Heydra, G.** (1991). “Rocking armor units: Number, location and impact velocity”. Elsevier, J. of Coastal Engineering, Vol. 15. No's 1, 2. 21-40.
 - **Van der Meer, J.W., Tutuarima, W.H. and Burger. G.,** (1996). “Influence of rock shape and grading on stability of low-crested structures”. ASCE, Proc. 25th ICCE, Orlando, USA, 1957-1970.
 - **Vidal, C., Losada, M. Á., Medina, R., & Losada, I.** (1994). “Análisis de la estabilidad de diques rompeolas”. Ingeniería Del Agua, 1(1). <https://doi.org/10.4995/IA.1994.2629>.
 - **Vidal, C., Losada, M. Á., Medina, R., & Losada, I. J.** (1995). “Modelos de morfodinámica de playas”. Ingeniería Del Agua, 2(1). <https://doi.org/10.4995/IA.1995.2665>.