



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

DISEÑO DE PIEZA MODULAR IMITACIÓN DE ARRECIFE

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

PRESENTA:

ANA GABRIEL RÍOS PÉREZ

TUTOR (ES) PRINCIPAL(ES)

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN  
INSTITUTO DE INGENIERIA

COMITÉ TUTOR:

Dr. GRACIA SÁNCHEZ JESÚS  
Dr. CARMONA PAREDES RAFAEL BERNARDO  
Dr. SILVA CASARÍN RODOLFO  
Dra. MIREILLE DEL C. ESCUDERO CASTILLO

INSTITUTO DE INGENIERIA  
INSTITUTO DE INGENIERIA  
INSTITUTO DE INGENIERIA  
INSTITUTO DE INGENIERIA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

JULIO, 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. GRACIA SÁNCHEZ JESÚS  
Secretario: Dr. CARMONA PAREDES RAFAEL BERNARDO  
Vocal: Dr. MENDOZA BALDWIN EDGAR GERARDO  
1 er. Suplente: Dr. SILVA CASARÍN RODOLFO  
2 do. Suplente: Dra. MIREILLE DEL C. ESCUDERO CASTILLO

CIUDAD DE MÉXICO

**TUTOR DE TESIS:**

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

-----  
**FIRMA**

## *Agradecimientos*

A mi madre, por su implacable esfuerzo y lucha por la vida, sin tu apoyo no hubiese terminado este ciclo. Te amo mamá, juntas saldremos adelante.

A mi hermana, por su esfuerzo y dedicación a la familia, por tu apoyo y comprensión en esta etapa. Gracias por ser pilar fundamental, haces que de lo mejor de mí, te amo.

Al Dr. Edgar, por su interés en este proyecto, los jalones de orejas rindieron frutos!

Al Dr. Rodolfo, por el apoyo y confianza que puso en mí a lo largo de esta travesía.

A mis amigos y compañeros del II, hicieron mis comidas y tiempo de trabajo más ameno. A Alejandro, Débora, Manuel, Geovani, David, por ser parte fundamental para la culminación de esta tesis, su apoyo en los días difíciles fue imprescindible.

## Resumen

El equilibrio de un sistema de playa, en régimen micromareal, depende de los balances entre el oleaje y el sedimento. Las olas son el principal motor del sedimento a partir de las fuerzas propias del movimiento de la masa de agua con oscilaciones en la superficie y los fenómenos asociados con la rotura (turbulencia, distribución de la energía, corriente de resaca). De la interacción entre el sedimento y el oleaje dependen la forma y otras características físicas de la playa, lo cual lo hace susceptible a procesos antrópicos que pueden provocar erosión en la costa. Este fenómeno afecta tanto a los ecosistemas por la pérdida de recursos y servicios, como a las comunidades por la afectación a su calidad de vida. Es por ello que las protecciones costeras contra la erosión han sido históricamente uno de los desafíos más importantes de la Ingeniería de Costas.

En este sentido, se han implementado diferentes soluciones estructurales controlar la pérdida de playa. Existen hoy día alternativas naturales y artificiales, siendo uno de los principales mecanismos para la defensa de la costa la colocación de barreras. Éstas se construyen paralelas a la costa y no ligadas a ella y su geometría es tal que atenúan la energía del oleaje. Estas barreras han sido empleadas en muchos sitios a nivel mundial con grados de éxito muy variados.

Dentro los mecanismos naturales para la defensa de la costa se encuentran los arrecifes de coral, los cuales tienen un efecto en la hidrodinámica cerca de la costa debido a su estructura física, la biodiversidad asociada y el funcionamiento del ecosistema. Por otro lado, debido a su gran rugosidad, las crestas de los arrecifes disipan cantidades importantes de energía de las olas a través de la fricción.

En este trabajo se presenta una propuesta de dique de piezas modulares, que combina formas geométricas y orgánicas que imitan la forma y funcionamiento de un arrecife de coral *Acropora palmata*. Se pretendió que la estructura fuera de fácil colocación y que, por efectos de atenuación de energía potencial y cinética, turbulencia y rugosidad, fuese capaz de ofrecer los servicios ecosistémicos de protección y hábitat. Su característica modular permitió contar con diques rompeolas modulares, cuya forma pudiera ser modificada, aumentando o reduciendo dimensiones, o simplemente cambiando su forma.

En esta Tesis, se realizó la evaluación, en laboratorio, de un dique sumergido de piezas modulares bajo diferentes condiciones de oleaje. Detrás del dique se dispuso una playa de arena con la cual se observó la respuesta de un perfil de playa a la presencia de la estructura. Los resultados obtenidos permitieron concluir sobre el comportamiento del oleaje ante estructuras “tipo arrecife” mostrando mejor disipación cuando se posee una geometría más robusta. Aunque en primera instancia fue difícil determinar qué porcentaje de la energía fue disipada por la fricción o rotura, se pudo determinar que la estructura tuvo una fuerte influencia sobre el oleaje incidente esto, incluso cuando la estructura se encontraba con una mayor sumergencia. Es así que, aún en condiciones de tormenta severa, la estructura mostró resultados satisfactorios.

# Índice

RESUMEN .....	I
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>1. ESTABILIDAD DE PLAYAS .....</b>	<b>3</b>
1.1 Tipos de playa con arrecife .....	3
1.2 Arrecifes y su clasificación .....	4
1.2.1 Arrecifes de coral .....	4
1.2.1.a Localización de los arrecifes de coral .....	6
1.2.1.b Clasificación de los arrecifes de coral .....	7
1.2.2 Arrecifes artificiales .....	9
1.2.2.a Tipología y clasificación de arrecifes artificiales según su uso .....	10
1.2.2.b Tipos de módulos de arrecifes artificiales .....	12
1.2.2.c Clasificación de los arrecifes artificiales según su uso o finalidad .....	14
<b>2. HIDRODINÁMICA COSTERA INDUCIDA POR ARRECIFES .....</b>	<b>18</b>
2.1 Rotura del oleaje .....	19
2.1.1 Tipo de rompientes .....	20
2.2 Interacción del oleaje con estructuras permeables .....	23
2.3 Ecuación de la conservación de la energía del movimiento oscilatorio .....	24
2.4 Morfología de playas .....	25
2.4.1 Perfil dinámico de las playas .....	25
2.4.2 Sistema playa-duna y su interacción con el oleaje .....	26
2.4.3. Perfil de equilibrio .....	28
2.4.3. i Forma en planta de las playas .....	28
2.4.3. ii Forma en perfil de las playas .....	30
<b>3. TRABAJOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>32</b>
3.1 Puerto Morelos, Quintana Roo, México .....	33
Resultados .....	35
3.2 Costa norte de Moorea, Polinesia Francesa .....	35
Resultados .....	37
3.3 Ullal, Mangalore en Karnataka India .....	38
Resultados .....	42
3.4 Puerto Morelos, México .....	42
Resultados .....	44
3.5 Bahía de Greenville, Granada España .....	45
Resultados .....	47
<b>4. DESARROLLO DEL ARRECIFE ARTIFICIAL .....</b>	<b>49</b>
4.1 Características geométricas del elemento base .....	49
4.1.a Armado del dique .....	51
4.2 Instrumentación y software .....	52
4.2.a Canal de oleaje .....	52
4.2.b Generación del oleaje .....	53
4.2.c Sensores de nivel .....	53
4.2.c.i Calibración de los sensores de nivel .....	55

4.2.d Cámara .....	55
4.2.e UVP-DUO (Ultrasound Velocity Profiler).....	55
4.2.f Nivel automático .....	56
4.2.g Software Cura .....	57
4.3 Descripción del modelo físico y programa de pruebas .....	57
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
5.1 <i>Energía</i> .....	61
5.2 <i>Morfología del perfil de playa</i> .....	63
Observaciones generales de los bloques.....	72
5.3 <i>Desplazamiento a pie de duna vs Iribarren pico a pie de estructura</i> .....	73
Observaciones: Iribarren a pie de dique y desplazamiento de línea de costa .....	76
5.4 <i>Hidrodinámica: Velocidad cuadrática media</i> .....	78
Observaciones: velocidad cuadrática media incidente y transmitida.....	83
5.5 <i>Velocidad media en el fondo y superficie</i> .....	85
Observaciones: Diagrama de velocidades .....	103
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>105</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>108</b>

# Lista de figuras

FIGURA 1.1. SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO .....	5
FIGURA 1.2.-LOCALIZACIÓN DE LOS ARRECIFES DE CORAL EN EL MUNDO. TOMADO DE NOS & NOAA, (2007).....	7
FIGURA 1.3.- CLASIFICACIÓN SEGÚN SU FORMA Y LOCALIZACIÓN.....	8
FIGURA 1.4. TIPOS DE AGREGACIÓN DE UNIDADES .....	11
FIGURA 2.1.- FACTORES INVOLUCRADOS EN LOS PROCESOS COSTEROS.....	19
FIGURA 2.2. TIPO DE ROMPIENTES, DEPENDIENDO DE LA PENDIENTE DE LA PLAYA Y EL PERALTE DEL OLEAJE (KOMAR, 1998). ....	21
FIGURA 2.3. TIPOS DE ROTURA. MODIFICADO DE DAVIDSON-AMOTT, (2010). DE (GALV IN, 1968).....	22
FIGURA 2.5. MODOS DE EROSIÓN DESCRITOS POR SALLENGER (2000) .....	27
FIGURA 2.6. FORMACIONES TÍPICAS DE UNA PLAYA, VISTA EN PLANTA (TRADUCIDA DE MONRROY, 2013).....	30
FIGURA 2.7. PERFIL DE TORMENTA Y PERFIL DE ACRECIÓN (VAN RIJN, 1998).....	30
FIGURA 3.1. PERFIL DE ARRECIFES CRUZADOS UTILIZADO EN EXPERIMENTOS DE LABORATORIO POR DEMIRBILEK ET AL.....	34
FIGURA 3.2. SECCIÓN DE LA SERIE DE TIEMPO DE ELEVACIÓN DE SUPERFICIE LIBRE PARA LA PRUEBA 32 .....	34
FIGURA 3.3. DISEÑO DE ESTACIONES DE MEDICIÓN EN BAHÍA DE PAOPAO, MOOREA.....	36
FIGURA 3.4. UBICACIÓN DE LA PROTECCIÓN COSTERA PROPUESTA PARA EL SITIO DE EROSIÓN EN ULLAL .....	38
FIGURA 3.5. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN ARRECIFE MARINO CON TETRÁPODOS EN LA CORAZA CRESTA ALTERNATIVA – I .....	39
FIGURA 3.6. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN ARRECIFE MARINO CON TETRÁPODOS EN LA ARMADURA ALTERNATIVA – II.....	40
FIGURA 3.7. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL ARRECIFE MARINO CON PIEDRAS EN LA ARMADURA Y LA CRESTA - ALTERNATIVA – III....	40
FIGURA 3.8. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL ARRECIFE MARINO CON PIEDRAS EN LA ARMADURA Y LA CRESTA PARA EL MORRO .....	41
FIGURA 3.9. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	43
FIGURA 3.10. ASPECTO DE LA PLAYA EN A) AGOSTO DE 2007, DESPUÉS DE QUE DEAN LLEGÓ A LA COSTA .....	44
FIGURA 3.11. UBICACIÓN Y ENTORNO REGIONAL DE LA BAHÍA DE GRENVILLE .....	46
FIGURA 3.12. FOTOGRAFÍAS DE UNIDADES PILOTO. (A) DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SITIOS PILOTO NO 1 Y NO 2 .....	48
FIGURA 4.1. DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS, DE IZQUIERDA A DERECHA, VISTA LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL .....	49
FIGURA 4.2. IMAGEN DE LOS ELEMENTOS IMPRESOS .....	51
FIGURA 4.3. CONFIGURACIÓN DEL DIQUE.....	52
FIGURA 4.4. CANAL DE OLEAJE DEL II DE LA UNAM.....	53
FIGURA 4.5. SENSORES DE NIVEL.....	54
FIGURA 4.6. CONFIGURACIÓN DE LOS SENSORES DE NIVEL.....	54
FIGURA 4.7. FUNCIONAMIENTO DEL UVP (CTU FACULTY OF CIVIL ENGINEERING).....	56
FIGURA 4.8. NIVEL AUTOMÁTICO, MODELO DS2810.....	57
FIGURA 4.9. ESQUEMA DEL MODELO PARA EL PERFIL A Y B (ORDÉRIZ, 2014).....	58
FIGURA 5.1. RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 1A_15 ARRIBA Y 1B_15 ABAJO.....	63
FIGURA 5.2.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 6A_15 ARRIBA Y 6B_15 ABAJO .....	64
FIGURA 5.3.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 11A_30 ARRIBA Y 11B_30 ABAJO .....	64
FIGURA 5.4.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 2A_15 ARRIBA Y 2B_15 ABAJO .....	65
FIGURA 5.5.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 7A_15 ARRIBA Y 7B_15 ABAJO .....	66
FIGURA 5.6.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 3A_15 ARRIBA Y 3B_15 ABAJO .....	67
FIGURA 5.7.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 8A_15 ARRIBA Y 8B_15 ABAJO .....	67
FIGURA 5.8.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 4A_15 ARRIBA Y 4B_15 ABAJO .....	68
FIGURA 5.9.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 9A_15 ARRIBA Y 9B_15 ABAJO .....	69
FIGURA 5.10.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 12A_30 ARRIBA Y 12B_30 ABAJO .....	69
FIGURA 5.11.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 5A_15 ARRIBA Y 5B_15 ABAJO .....	70
FIGURA 5.12.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 10A_15 ARRIBA Y 10B_15 ABAJO .....	71
FIGURA 5.13.-RESPUESTA MORFOLÓGICA PARA LA PRUEBA 13A_30 ARRIBA Y 13B_30 ABAJO .....	71
FIGURA 5.14. DISTRIBUCIÓN BIDIMENSIONAL DE VELOCIDADES EN UN CAUCE DE ANCHO INFINITO .....	85





FIGURA 5.39. DIAGRAMA DE VELOCIDADES 13A_15 INCIDENTE (IZQ.) Y TRANSMITIDA (DER.); A) AL INICIO DE LA PRUEBA, B) FINAL DE LA PRUEBA .....	101
FIGURA 5.40. DIAGRAMA DE VELOCIDADES 13B_15 INCIDENTE (IZQ.) Y TRANSMITIDA (DER.); A) AL INICIO DE LA PRUEBA, B) FINAL DE LA PRUEBA .....	101

## Lista de tablas

TABLA 3.1. ESTUDIO Y/O DISEÑADO UN ARRECIFE ARTIFICIAL .....	32
TABLA 4.1. DISTANCIA ENTRE SENSORES .....	55
TABLA 4.2. CONFIGURACIÓN DE LOS ENSAYOS .....	59
TABLA 5.1. COEFICIENTES DE REFLEXIÓN, TRANSMISIÓN Y DISIPACIÓN PARA PERFIL A Y B DE CADA ENSAYO, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE BAQUERIZO, 1995 .....	61
TABLA 5.2. PERDIDA Y GANANCIA DE VOLUMEN, PARA AMBOS PERFILES.....	63
TABLA 5.3. PERDIDA Y GANANCIA DE VOLUMEN, PARA AMBOS PERFILES.....	65
TABLA 5.4. PERDIDA Y GANANCIA DE VOLUMEN, PARA AMBOS PERFILES.....	67
TABLA 5.5. PERDIDA Y GANANCIA DE VOLUMEN, PARA AMBOS PERFILES.....	68
TABLA 5.6. PERDIDA Y GANANCIA DE VOLUMEN, PARA AMBOS PERFILES.....	70
TABLA 5.7.- RESULTADOS MORFOLÓGICOS: RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE IRIBARREN A PIE DE DIQUE Y EL DESPLAZAMIENTO DE LÍNEA DE COSTA $\Delta y/h$ , $\Delta z/h$ , EN LOS PERFILES A Y B .....	74
TABLA 5.8.- VELOCIDAD MEDIA INCIDENTE Y TRANSMITIDA EN FONDO Y SUPERFICIE: PRUEBAS 1AB_15, 6AB_15 Y 11AB_30 PARA LOS PERFILES A Y B .....	86
TABLA 5.9.- VELOCIDAD MEDIA INCIDENTE Y TRANSMITIDA EN FONDO Y SUPERFICIE: PRUEBAS 2AB_15 Y 7AB_15 PARA LOS PERFILES A Y B .....	89
TABLA 5.10.- VELOCIDAD MEDIA INCIDENTE Y TRANSMITIDA EN FONDO Y SUPERFICIE: PRUEBAS 2AB_15 Y 7AB_15 PARA LOS PERFILES A Y B .....	92
TABLA 5.11- VELOCIDAD MEDIA INCIDENTE Y TRANSMITIDA EN FONDO Y SUPERFICIE: PRUEBAS 4AB_15, 9AB_15 Y 12AB_30 PARA LOS PERFILES A Y B .....	95
TABLA 5.12.- VELOCIDAD MEDIA INCIDENTE Y TRANSMITIDA EN FONDO Y SUPERFICIE: PRUEBAS 4AB_15, 9AB_15 Y 12AB_30 PARA LOS PERFILES A Y B .....	99

## Lista de graficas

GRAFICA 5.1. RESULTADOS MORFOLÓGICOS: IRIBARREN A PIE DE DIQUE Y DESPLAZAMIENTO DE LÍNEA DE COSTA $\Delta y/h$ , $\Delta z/h$ , EN EL PERFIL A .....	75
GRAFICA 5.2. RESULTADOS MORFOLÓGICOS: IRIBARREN A PIE DE DIQUE Y DESPLAZAMIENTO DE LÍNEA DE COSTA $\Delta y/h$ , $\Delta z/h$ , EN EL PERFIL B .....	75
GRAFICA 5.3. RESULTADOS HIDRODINÁMICOS: VELOCIDAD CUADRÁTICA MEDIA INCIDENTE Y TRANSMITIDA A TRAVÉS DEL DIQUE EN LAS PRUEBAS 1AB_15, 6AB_15 Y 11AB_30 .....	78
GRAFICA 5.4. RESULTADOS HIDRODINÁMICOS: VELOCIDAD CUADRÁTICA MEDIA INCIDENTE Y TRANSMITIDA A TRAVÉS DEL DIQUE EN LAS PRUEBAS 2AB_15 Y 7AB_15 .....	79
GRAFICA 5.5. RESULTADOS HIDRODINÁMICOS: VELOCIDAD CUADRÁTICA MEDIA INCIDENTE Y TRANSMITIDA A TRAVÉS DEL DIQUE EN LAS PRUEBAS 3AB_15 Y 8AB_15 .....	80

GRAFICA 5.6. RESULTADOS HIDRODINÁMICOS: VELOCIDAD CUADRÁTICA MEDIA INCIDENTE Y TRANSMITIDA A TRAVÉS DEL DIQUE EN LAS PRUEBAS 4AB_15, 9AB_15 Y 12AB_30.....	81
GRAFICA 5.7. RESULTADOS HIDRODINÁMICOS: VELOCIDAD CUADRÁTICA MEDIA INCIDENTE Y TRANSMITIDA A TRAVÉS DEL DIQUE EN LAS PRUEBAS 5AB_15, 10AB_15 Y 13AB_30.....	82

# Introducción

Uno de los problemas más comunes que se presentan en la zona litoral es la pérdida de volumen de material en la playa (erosión). Este impacto ha modelizado el paisaje desde el principio de los tiempos, habiendo mantenido un equilibrio natural de forma permanente. No obstante, con la introducción de cambios en los ecosistemas y la construcción de estructuras marítimas en zonas aledañas, este equilibrio no siempre está presente, acentuándose la magnitud de los fenómenos naturales que actúan frente a la costa, con un ecosistema incapaz de absorberlos en toda su intensidad. Cualquiera que sea el caso, la estabilidad o equilibrio de la playa ha de garantizarse durante la planeación de cualquier actividad y resulta urgente cuando en la zona ya existe infraestructura y corre peligro.

Por tanto, las alternativas basadas en estructuras artificiales que tradicionalmente se han venido proponiendo como solución para la protección de la costa, requieren adaptarse a la evolución de las nuevas condiciones climáticas. Estos sistemas artificiales suponen en el mejor de los casos, la respuesta ideal para las condiciones en las que fueron diseñadas tanto desde el punto de vista funcional como de su integridad estructural.

Una de las estrategias más innovadoras que han empezado a explorarse en años recientes para hacer frente a la degradación del litoral, es la construcción de diques arrecife (Ferrante et al., 1992; Dean et al.,1997). Los diques arrecife son estructuras paralelas a la línea de costa, cuya principal finalidad es disipar la energía del oleaje incidente, provocando su rotura. Pueden estar permanentemente sumergidos o trabajar en la zona intermareal, y han sido empleados cuando se desea proteger o aumentar el ancho de la playa seca en virtud de su capacidad de interrumpir o disminuir el transporte de sedimentos.

Los diques arrecife permiten la protección de la zona costera y respeto al entorno ambiental y, además de resultar de menor costo que las estructuras emergidas (rompeolas y espigones, por ejemplo), son ambientalmente favorables, puesto que proveen una zona habitable para especies marinas y el impacto visual generado es prácticamente nulo. Estas características hacen de los diques arrecife una alternativa ecológica y socialmente viable (Mendoza y Silva, 2004).

Esta propuesta se incluye dentro de la eco-ingeniería, dado que su estrategia base es utilizar la naturaleza como defensa natural de sus propios ataques, y emplear técnicas avanzadas ingenieriles que distorsionen lo mínimo posible al a medio ambiente, en el caso de que la protección proporcionada por la naturaleza no fuese suficiente (González - Lamuño, 2014).

El objetivo central de este trabajo es evaluar una alternativa de arrecife artificial capaz de disminuir la huella ecológica mimetizando lo mejor posible las estructuras naturales sin perder certeza y efectividad, buscando evaluar la respuesta morfodinámica y el desempeño hidrodinámico del arrecife artificial a fin de mejorar su diseño. Este objetivo será desarrollado como:

- Determinar la capacidad de disipación de la energía del oleaje transmitido por las piezas propuestas para la construcción de arrecifes artificiales.
- Evaluar los coeficientes de reflexión y transmisión del oleaje y su relación con la estabilidad de la playa.
- Comparar el efecto, en la evolución del perfil de playa, de la ubicación de la estructura.
- Establecer una relación entre el estado de mar, el perfil playa y la estructura coralina como función del volumen de arena desplazado durante los ensayos.
- Caracterizar el tipo de rotura del oleaje a pie de dique y su posible relación con el desplazamiento de sedimento a pie de duna.
- A partir de mediciones de velocidad en fondo y superficie, relacionar su comportamiento como función del tren de olas correspondiente.
- Analizar la magnitud del flujo de velocidades incidente y reflejado del arrecife artificial tipo coral, producto de la interacción flujo-estructura.

La organización de esta Tesis es como sigue:

Capítulo 1. En este capítulo se aborda la morfología de playas con arrecife y su clasificación.

Capítulo 2. En este capítulo se describe la hidrodinámica costera en presencia de arrecifes.

Capítulo 3. Se presentan algunos casos, disponibles en la literatura, —de experimentos de laboratorio con diques arrecife, así como estudios sobre el funcionamiento de los arrecifes.

Capítulo 4. El análisis de los datos obtenidos en los ensayos es presentado en este capítulo, con esto, se realiza una comparación entre el comportamiento de las diferentes estructuras, estados de mar y los efectos generados en el perfil de playa.

Capítulo 5. Este capítulo incluye las conclusiones después del desarrollo de este estudio y las partes de la investigación que quedan pendientes.

# 1. ESTABILIDAD DE PLAYAS

La costa es la zona donde existe colindancia entre la tierra y el mar, siendo la línea de costa una línea imaginaria que divide al medio marino del medio terrestre. En muchas costas existen zonas cubiertas de material suelto no consolidado como gravas, arenas o limos y, sujetas a la acumulación de sedimentos, a estas zonas se les conoce como playas. El sedimento, que proviene de distintas fuentes como pueden ser formaciones rocosas o sistemas arrecifales, es arrastrado por ríos, corrientes marinas o el viento y depositado en la costa; son estos mismos agentes los encargados de transportar el sedimento y acomodarlo a lo largo de la costa.

## 1.1 Tipos de playa con arrecife

Una playa nunca esta estática, es la estructura geomorfológica más dinámica y cambiante que existe sobre la tierra. La formación de una playa está ligada al arrastre de sedimentos, donde se mueven partículas de gran tamaño que producen los depósitos de arena. Ya sea por medio de ríos o escurrimientos hacia la costa, oleaje, las mareas, el viento y por supuesto la acción del hombre. Una vez que los sedimentos tienen contacto con el oleaje y con las mareas, transportan y transforman al sedimento, según el tamaño y sus propiedades físicas principalmente. El transporte de sedimentos en las playas tiene ocurrencia en todas las latitudes del planeta, independientemente del clima; su movimiento al reacomodar el sedimento repercute en las mareas y el viento. Existen varios estudios de playas y la clasificación que se le da a cada una dependerá de cada autor. De acuerdo a lo anterior, en función de la composición sedimentológica se tienen:

- Playas de lodos
- Playas de arena
- Playas de grava
- Playas de roca o riscos
- Playas mixtas

Entre el 5 y 10% de las playas del mundo son de lodo, 10 a 15% son de arena y el resto de grava y roca (Van Rijn, 1998).

Las playas de grava tienen material que va desde 2 a 256 mm. Este tipo de playas comúnmente se encuentran en latitudes altas, como en el noroeste de Europa, este del Norte de América y norte del Pacífico. En México existen playas de este tipo en zonas como Quintana Roo, Sonora y Baja California, Generalmente este tipo de costas son muy irregulares y se caracterizan por tener acantilados. Generalmente estas son de poco interés

para actividades recreativas, sin embargo, son extremadamente eficientes para disipar energía, debido a su alta permeabilidad, y para la protección de costas.

Dentro de la clasificación de gravas, Jennings y Shulmeister (2002) proponen una clasificación simple a partir de las observaciones de la playa pudiéndose aplicar así a nivel mundial y se basa en las diferencias morfodinámicas entre los tipos de playa. Los tres tipos identificados son: 1) playa de grava pura, los cuales tienen pendientes pronunciadas ( $\tan \beta=0.08-0.24$ ) y gravas que se extienden desde la berma de tormenta por debajo del nivel significativo de la marea; 2) playa de mezcla de arena y grava, con pendientes moderadas ( $\tan \beta=0.004-0.13$ ) con arena y grava totalmente mezclada tanto a lo largo de la costa como en profundidad; y 3) playa de grava compuesta, tienen un borde de grava empinada liderada por una terraza intermareal bajo un ángulo, con pendientes de  $\tan \beta=0.05-0.14$ . en esas playas la clasificación hidrodinámica varía a lo largo de la costa según sea arena o grava.

Las playas de arena son dominadas por el oleaje con tamaño de grano entre los 0.063 y 0.2 mm. Acumulaciones de arena depositadas por la acción del oleaje y las corrientes inducidas por el mismo. El oleaje que domina es el generado por viento. Se generan en costas abiertas asociadas a bahías, estuarios, golfos, islas y desembocaduras de ríos. Están sometidas a la acción de variables marinas (marea, oleaje, ondas infra gravitatorias) y atmosféricas (vientos y presión) en diferentes escalas, por lo que son ambientes altamente dinámicos y poseen una gran capacidad para mantenerse y regenerarse con el tiempo (Carranza-Edwards y Nolasco-Montero, 1988). Los servicios que ofrecen las playas son control de la erosión costera, captura y purificación de agua, mantenimiento de la vida silvestre, fuente de materiales para la construcción, turismo, recreación, educación, investigación, entre otros (Carter, 1990); servicios que han sido afectados por los fuertes cambios en los regímenes de transporte litoral, resultado de la construcción desmedida de estructuras de protección costera (Correa y Alcántara, 2005).

El tipo de playas en las que se encuentra arena y grava son denominadas playas mixtas (Kirk, 1980), y su comportamiento es sustancialmente diferente a las playas de grava pura Jennings y Shulmeister (2002), sin embargo, no existe aún una definición clara de cuál es la proporción de arena o grava que se requiere para considerar que una playa es mixta, ya que las fracciones encontradas van del 15 al 68 % de arena (Mason y Coates, 2001).

## **1.2 Arrecifes y su clasificación**

### ***1.2.1 Arrecifes de coral***

Los arrecifes de coral son ecosistemas marinos que albergan una gran diversidad de vida. Pueden llegar a ser tan grandes que se pueden ver desde el espacio. Al estar formados

por corales, estos ecosistemas se encuentran vivos y crecen, aunque este crecimiento se da muy lentamente, siendo las tasas de crecimiento más rápidas de 9 a 15 m en 1000 años (Spalding, Ravilious, & Green, 2001).

Los arrecifes de coral constituyen una barrera protectora para las áreas costeras contra el oleaje, corrientes y tormentas, además de ser fuente de sedimento para las playas al degradarse los corales que constituyen los arrecifes. Esta barrera provoca cambios en la profundidad del fondo, ocasionado por cambios en la altura y dirección del oleaje (mediante los procesos de disipación, como la difracción o reflexión). La disipación de energía por parte de los arrecifes de coral está determinada por la profundidad del agua y la cobertura de coral (van Zanten, van Beukering, & Wagtendonk, 2014).

Dependiendo del grado de salud y características físicas y ecológicas de los arrecifes, pueden llegar a absorber el 70-90 % de la energía de las olas generadas por el viento en



condiciones normales de oleaje (González -Lamuño, 2014).

Figura 1.1. Sistema Arrecifal Veracruzano

Los arrecifes de coral son estructuras biogénicas presentes en los mares cálidos de aguas claras tropicales, que se generan a partir del crecimiento de corales escleractíneos y otros organismos marinos. Constituyen uno de los ecosistemas más diversos del planeta y generan considerables ganancias económicas para la industria turística y el desarrollo en zonas costeras; además protegen la línea de costa y otros ecosistemas contra la erosión (Birkeland, 1997; Hubbard, 1997). La forma y tamaño de estas estructuras es variable,



encontrándose desde pequeños parches coralinos hasta amplias barreras arrecifales de miles de kilómetros e isla enteras formadas a partir del crecimiento de corales (Díaz et al, 2000).

### *1.2.1.a Localización de los arrecifes de coral*

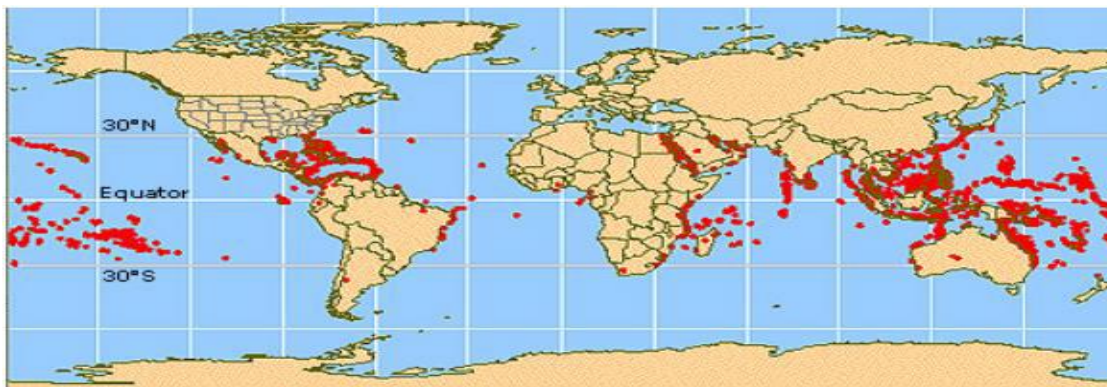
Se encuentran alrededor del mundo, principalmente en zonas tropicales y subtropicales debido a que, en su gran mayoría, necesitan aguas cálidas para poder sobrevivir, además de aguas claras que dejen pasar la luz del sol (Ortiz Sotomayor, 2005).

En el mundo existen tres grandes regiones en donde se presentan los arrecifes de coral (Figura 1.2). La región Indo-Pacífica comprende una gran parte del océano Índico. No incluye el Mar Rojo ni el Pacífico occidental. Estos arrecifes abarcan una gran área, y además presentan la mayor variedad de biodiversidad del planeta. Se presentan atolones, barreras y arrecifes costeros, siendo los estos últimos los que menos prevalecen. Están compuestos principalmente por coral duro. Pueden formarse arrecifes de tabla compuestos por arenas coralinas consolidadas (William Alevizon (a), 2010-2013).

El Caribe, el cual incluye La Florida, Bahamas, el mar Caribe, y las aguas continentales del noreste de Suramérica. Adicionalmente se presenta crecimiento de arrecifes en la isla Bermuda como un punto aislado, debido a las aguas cálidas presentes. La gran mayoría de arrecifes de coral en el mar caribe son arrecifes costeros. En el Caribe existen dos grandes arrecifes barrera, el primero entre Belice y Guatemala, con 220 km de longitud, en sentido norte-sur, y uno más pequeño al este de Nicaragua, al norte de Providencia. En el Caribe, el 29 % de la costa está protegida por arrecifes (William Alevizon (b), 2010-2013).

México es parte del segundo sistema arrecifal más grande, el Sistema Arrecifal Mesoamericano, que corre desde México hasta Honduras. El número de corales formadores de arrecifes es de aproximadamente 60 especies, entre el 8 y el 10 % de todas las especies conocidas en el mundo. La zona con mayor riqueza de especies de corales duros es la región de arrecife entre el Caribe y Golfo de México, donde viven entre 45 y 60 especies. En el Pacífico se han registrado 17 especies. Los corales blandos en México, suman aproximadamente 50 especies. Se estima que en los mares y costas mexicanas se encuentra una décima parte de las especies marinas del planeta. (Costas y mares de México, 2016, p.43).

En el Mar Rojo, en donde se presentan de manera predominante los arrecifes costeros, con plataformas de más de 5000 años, y con crecimiento de arrecifes en la línea



de costa. Existen atolones, más no barreras de coral (William Alevizon (c), 2010-2013).

Figura 1.2.-Localización de los arrecifes de coral en el mundo. Tomado de Nos & NOAA, (2007).

### ***1.2.1.b Clasificación de los arrecifes de coral***

Los arrecifes de coral clasifican de la siguiente manera:

#### **a) Según su forma y localización.**

De acuerdo a Ortiz Sotomayor (2005) y Spalding et al, (2001), se presentan: arrecifes costeros o bordeantes, de barrera, de parchos, de atolón, y de tabla (Figura 1.3).

- *Arrecifes Costeros o bordeantes.* Este tipo de arrecifes son los más comunes. Se forman por crecimiento de plataformas de carbonato de calcio. Se producen plataformas superficiales pues los corales crecen hasta la superficie llegando a estar al nivel de la marea baja. Se componen de una plataforma superficial con un borde definido a lo largo de la línea de costa o rodeando islas, la cresta del arrecife, después de la cual existe una caída del arrecife hacia el fondo del mar.
- *Arrecifes de barrera.* Este tipo de arrecifes son más antiguos. Poseen una base profunda y bordean la costa a una mayor distancia, con una laguna profunda que los separa de esta.
- *Arrecifes de parchos.* Forman islotes frente a la costa, separados entre ellos por canales relativamente profundos.
- *Arrecifes de atolón.* Se encuentran por lo general alejados de plataformas continentales. En sus orígenes son arrecifes costeros alrededor de islas volcánicas, posteriormente estas islas se hundieron, pero los arrecifes siguen creciendo, y forman una barrera alrededor de la isla y posteriormente un anillo de coral alrededor de la

isla que se hunde. Debido a esto, por lo general los atolones son circulares u ovalados, con una laguna en el centro.

- *Arrecife de tabla.* No tienen conexión con la línea de costa ni la estructura de un arrecife barrera o del atolón. No poseen una laguna (Díaz, 2018, p.41).

		
Isla con arrecife bordeante a lo largo de Yap, Micronesia.	Arrecife de parchos, Islas Fiji	Arrecife de barrera, Gran barrera Australia.
		
Atolón, Océano Indico islas Maldivas	Arrecife tabla, Pacífico sur, Nueva Caledonia	

Figura 1.3.- Clasificación Según su forma y localización.

**b) Según su cobertura.**

- *Arrecifes superficiales de alta densidad (SHD)*, profundos de alta densidad (DHD), y de baja densidad (van Zanten et al., 2014).
- *Arrecifes superficiales de alta densidad (SHD).* Son aquellos que tienen una alta cobertura de corales, con una profundidad inferior a 8 m. Este tipo de arrecifes son los más protectores. Las olas rompen en los arrecifes y la energía se disipa más por la fricción de los corales.
- *Arrecifes profundos de alta densidad (DHD).* Son aquellos que tienen una alta cobertura de corales, con una profundidad superior a 8 m. Este tipo de arrecifes son los que tienen menor función protectora.
- *Arrecifes de baja densidad.* Tienen cubierta de coral relativamente baja, de aproximadamente el 10 % (Díaz, 2018, p.41).

“Las crestas arrecifales son la parte menos profunda de algunos arrecifes coralinos. Éstas se extienden como barras que denotan su presencia con el romper de las olas cuando el mar está dinámico y son el resultado del crecimiento acumulado de corales duros durante miles de años” (Hernández y Alcolado, 2012, p.28). Las crestas son muy importantes desde el punto de vista económico, social y conservacionista por las siguientes razones:

- i. Son una barrera natural protectora de las costas y sus recursos naturales (playas y vegetación costera, incluyendo pastos marinos, manglares, manigua costera, etc.) y las inversiones (asentamientos humanos, carreteras, infraestructura turística e industrial, cultivos, etc.), contra el efecto destructivos y erosivo tanto del oleaje habitual y como de eventos meteorológicos intensos o extremos como ciclones, frentes fríos y sures. Igualmente amortiguan las penetraciones del mar. Por esas razones han de ser tenidos muy en cuenta en el enfrentamiento de los efectos del cambio climático. De acuerdo con Burke & Maidens (2004), en los próximos 50 años la degradación de arrecifes podría causar pérdidas anuales, de 140 millones a 420 millones de dólares EEUU a la región del Caribe por concepto de reducción de la protección al litoral.
- ii. Sirven de refugio y de lugar de residencia temporal o permanente de importantes recursos pesqueros como diversas especies de peces (pargos, meros, tiburones) y langostas, entre otros, así como de especies de importancia ecológica para el arrecife y ecosistemas asociados.
- iii. Son un recurso de gran valor turístico por su atractivo para el turismo de buceo contemplativo.
- iv. Así también, funcionan como barrera, detrás de la cual las embarcaciones de pesca, entre otras, pueden guarecerse durante mal tiempo o para pernoctar (Hernández y Alcolado, 2012, p.28)

### *1.2.2 Arrecifes artificiales*

El origen del concepto arrecife artificial se atribuye a Japón y data del siglo XVIII, aunque desde mucho antes el hombre ha modificado las condiciones naturales del medio marino en su provecho. En escritos de Plinio el Viejo se cita el transporte e instalación de rocas desde otra localidad con semillas de ostra para su cultivo, aunque posiblemente la práctica de acumular diversos materiales con el fin de incrementar la recolección de organismos procede del neolítico (Seaman et al, 1991). En la práctica comenzó a utilizarse en EEUU en 1830. Su utilización se ha extendido a múltiples zonas del mundo, existe un sinnúmero de definiciones, en general haciendo referencia a la utilización que se les da a tales estructuras en el país en cuestión (Ministerio del medioambiente, 2008, p2).

Según la definición elaborada por la Guía Metodológica para la instalación de arrecifes artificiales de España (2008). “Un arrecife artificial es una estructura sumergida colocada de manera deliberada sobre el suelo marino para imitar alguna de

las características de un arrecife natural. Pueden estar expuestos parcialmente en algunos estados de marea” (p.2).

El uso resultante de playas artificiales como enfoque ingenieril resulto un medio económicamente viable y medioambientalmente más amigable para disipar energía de las olas y proteger los desarrollos costeros. De esta manera empezaron a surgir ideas acerca de las posibles defensas de playas frente a la acción del oleaje (Moreno, 2015, p.5).

Las actuaciones ingenieriles sobre la costa se categorizan usualmente, como actuaciones duras o actuaciones blandas según el grado de rigidización de la costa que ellas supongan. Así, son actuaciones duras las que implican construcción de muros, espigones, diques exentos, o combinaciones de estos. Por el contrario, son actuaciones blandas las que implican la gestión del material sedimentario sin ejecución de obras. Dada la diversidad de posibilidades de actuación sobre el medio costero que la tecnología permite en la actualidad, una tercera categoría intermedia entre las anteriores, que se podrían denominar actuaciones semi rígidas, semi blandas o semi duras que consistiría en el uso combinado de actuaciones duras y blandas (Moreno, 2015).

Dentro de las medidas de protección, restauración y rehabilitación de ecosistemas costeros, aparecen los arrecifes artificiales como herramientas de ordenación y protección desde una perspectiva social y ecológica. Hay numerosos ejemplos a nivel mundial donde estas estructuras se han usado para realizar varias funciones, por ejemplo: la protección física de ecosistemas sensibles y frágiles, la adición o reposición de la complejidad de hábitats, creación de nuevos sustratos (Ramos, 2002, p.1), o la sustitución de un recurso socioeconómico. Una de las funciones más importantes de los arrecifes artificiales es la protección y/o restauración de los hábitats naturales marinos.

La forma y tamaño de los arrecifes de protección de la costa ha de ser la adecuada para que, cumpliendo con los objetivos para los que se diseñan, interfiera lo menos posible con el transporte sedimentario litoral, salvo en aquellos casos en que su objetivo sea precisamente crear un obstáculo para el transporte de arena hacia otra zona. De ello dependerán los efectos que se puedan provocar en las playas (disipación de la energía del oleaje, modificación de la planta y perfil de playas). Además, ha de tenerse en cuenta, a los efectos de las interferencias que pueda originar sobre la navegación (en función de la profundidad) u otras infraestructuras marinas durante su colocación, y que pueda fomentar actividades acuáticas deportivas y turísticas (Ministerio del medio ambiente, 2008, p.15).

#### *1.2.2.a Tipología y clasificación de arrecifes artificiales según su uso*

Grove y Sonu 1983, proponen una denominación de los elementos de forma jerarquizada por su tamaño en orden ascendente: 1) unidad arrecifal 2) set arrecifal 3) grupo arrecifal 4) complejo arrecifal (Seaman et al, 1991) (Citado en Ministerio del medio ambiente, 2008).

- 1) *Unidad arrecifal*. El elemento más pequeño, bloque individual que se suele denominar módulo arrecifal.
- 2) *Set arrecifal*. Reúne a varios módulos arrecifales o unidades. Cuando se han construido arrecifes artificiales con elementos amontonados en contacto unos con otros también se han denominado cúmulo arrecifal.
- 3) *Grupo arrecifal*. Se refiere a la reunión más o menos ordenada de varias unidades o módulos arrecifales y/o varios cúmulos arrecifales. También llamados polígonos de instalación o polígono arrecifal. Cuando se ha tratado de arrecifes de protección se han denominado también barreras o polígonos de protección y cuando se trata de un arrecife artificial de producción/concentración se ha llamado núcleo arrecifal alveolar al agrupamiento de módulos alveolares.
- 4) *Complejo arrecifal*. Se refiere al conjunto de varios grupos arrecifales y tiene una escala local o regional. Esto se correspondería con la reunión de varios polígonos arrecifales de protección y/o varios núcleos alveolares y formaría lo que por lo general se ha denominado zona arrecifal (Ministerio del medio ambiente, 2008).

De esta forma un arrecife artificial puede estar formado desde un único grupo arrecifal de protección o de producción hasta varios complejos arrecifales como ocurre en la mayoría de los casos (Figura 1.4).

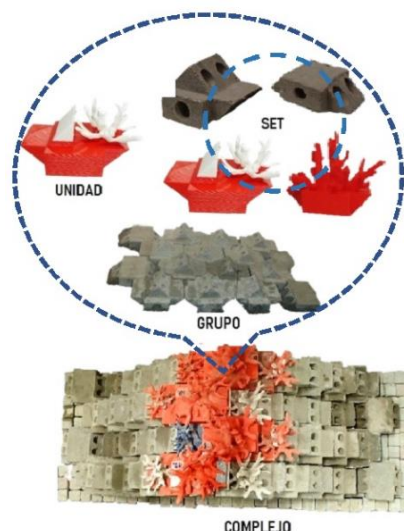


Figura 1.4. Tipos de agregación de unidades

“Considerando en sentido amplio el concepto tipología, solo existen dos tipos de módulos para arrecifes artificiales que se distinguen tanto por diseño, como por disposición y funcionalidad” (Ministerio del medio ambiente, 2008, p.22):

- Módulos arrecifales de protección.
- Módulos o elementos arrecifales alveolares o de producción.

El Ministerio del medio ambiente (2008) refiere que la unidad o módulo de protección se distinguiría por estar contruidos con módulos pesados y relativamente simples; puede ser un bloque de escollera de concreto o roca natural que se disponen dispersos u ordenados, donde la ocupación del fondo marino por los módulos es prácticamente imperceptible desde el punto de vista de la alteración física del sistema, permitiendo alterar de esta forma la energía del oleaje, profundidad de rotura de la ola, morfología litoral y transporte etc., cuyo principal objetivo es conseguir protección de determinadas especies.

En el caso del segundo tipo, un módulo arrecifal de tipo alveolar desde el punto de vista de diseño tiene una relación elevada del volumen aparente con respecto a su peso, alejándose del valor de la densidad del material del que está constituido (puede ser concreto en un elemento arrecifal artificial de nueva construcción o el casco de un barco fuera de uso que se emplea para servir de arrecife artificial cuya relación volumen aparente/peso era tan alta que en su función original flotaba). Por esta característica de diseño, los módulos arrecifales alveolares generalmente se distribuyen próximos entre sí (incluso amontonados), tratando de asegurar su funcionalidad individual.

Con base en lo anterior, a continuación, se establece una clasificación de los arrecifes, considerando, en primer lugar, los diferentes tipos de módulos que pueden ser utilizados y, en segundo lugar, las diferentes funciones o aplicaciones para las que pueden concebirse, sobre la base de su funcionalidad (Ministerio del medio ambiente, 2008, p.24).

### ***1.2.2.b Tipos de módulos de arrecifes artificiales***

En el mundo existen multitud de estructuras que se han instalado como arrecifes artificiales, con diferentes objetivos. A continuación, se presentan las estructuras más comunes utilizadas como arrecifes artificiales:

- a) **Estructuras específicamente diseñadas y contruidas para servir como arrecife artificial.** Se presenta una clasificación basada en los materiales y diseños habitualmente utilizados:
- *Bloques de concreto.* Están compuestos por materiales de concreto armado y macizo en varias morfologías normalmente cúbicas, aunque también existen diseños cilíndricos y piramidales. Estas estructuras, debido a su masa y diseño, suelen ser muy estables.
  - *Estructuras de concreto con elementos disuasorios o antiarrestre.* Son bloques similares a los anteriores. Normalmente estos elementos son vigas de acero o de

concreto que atraviesan los bloques en sentido vertical y horizontal, de modo que dan más estabilidad a los bloques de concreto en el fondo marino y consiguen la finalidad defensiva para la que son diseñados.

- *Módulos de protección mixta.* Se trata de un módulo arrecifal de protección tanto por su relación peso/volumen aparente, como por su distribución en el polígono arrecifal. Permiten la fijación de organismos, el encofrado exterior liso se sustituye por materiales o formas que permiten el crecimiento de una mayor biomasa sobre el módulo y mayor densidad de organismos filtradores. Estos se han empleado en la protección de zonas previamente degradadas o con una carga orgánica mayor de la habitual, generalmente ocupando fondos arenoso-fangosos donde funcionan como elementos de protección frente a la pesca ilegal de arrastre, pero además inducen poblamientos no existentes con anterioridad en esas áreas fangosas al proporcionar sustratos limpios para la fijación de organismos que antes no se encontraban asociados a la zona.
- *Estructuras de cerámica ramificadas.* Son estructuras similares a las de concreto con elementos disuasorios, en cuanto a su finalidad, es de protección de ecosistemas frente al arrastre. Su diseño y composición de materiales este caso de cerámicas, los diferencian de las estructuras de concreto.
- *Estructuras de matriz de PVC y concreto con cavidades.* Son estructuras compuestas por PVC o concreto de diseño complejo y alta superficie. Originalmente estos módulos nacieron como simples elementos experimentales para recolección de organismos en áreas de arrecifes naturales. Su finalidad, no obstante, es principalmente científica, de manera que todas sus caras queden completamente colonizadas y alberguen comunidades de una alta y rica biodiversidad.
- *Diques exentos.* Son estructuras a base de bloques macizos de concreto de numerosos diseños colocados a una cierta distancia de la costa (aunque los bloques pueden ser de otros muchos compuestos como los formados con contenedores de geotextil). Su principal función es la de proteger la línea de costa de la erosión litoral, pudiendo servir también para crear un oleaje propicio para deportes acuáticos como el surf (Ministerio del medio ambiente, 2008).

**b) Estructuras no diseñadas o construidas originalmente para servir como arrecife artificial**

- *Pecios.* Son cualquier tipo de buques colocados en el fondo marino, teniendo la capacidad de actuar como arrecifes. La utilización de buques para la creación de arrecifes artificiales ha sido una práctica muy generalizada en algunos países; principalmente, Estados Unidos, Canadá, Japón, Australia o Nueva Zelanda. Por su complejidad en sus estructuras, actúan en el medio marino como refugio de numerosas especies, con lo que aumenta la producción de especies de flora y fauna.



- *Rocas naturales.* Son comúnmente utilizadas en los diseños destinados a la protección de la línea de costa de la erosión litoral, pudiendo servir también para crear un oleaje propicio para deportes acuáticos como el surf. Se instalan siempre amontonadas y alineadas, creando escolleras o diques exentos.
- *Estructuras en desuso.* Se trata de plataformas de exploración o explotación submarina, vagones de tren, aviones, pantalanes abandonados u otras estructuras antrópicas que han sido utilizadas como arrecifes artificiales de protección litoral y producción biológica. Otros elementos como los neumáticos se han utilizado en algunos países, habiéndose mostrado con el paso de los años como absolutamente ineficaces para el fin propuesto.
- *Módulos elaborados a partir de cenizas de carbón, cenizas de incineradoras o lodos de dragado fijados con cemento.* Son estructuras poco utilizadas basadas en una mezcla de cenizas fijadas con cemento que forman arrecifes artificiales simulando a los arrecifes naturales. La garantía de su estabilidad y su carácter inerte debe ser primordial sobre cualquier otro aspecto en el uso de estas materias.

Cualquier objeto o estructura hundido en el fondo del mar es susceptible de ser colonizado y actuar como un arrecife artificial. Resulta necesario, por lo tanto, establecer una serie de criterios para definir qué tipo de materiales y estructuras resultan adecuadas para su empleo como arrecife artificial (Ministerio del medio ambiente, 2008).

### ***1.2.2.c Clasificación de los arrecifes artificiales según su uso o finalidad***

La forma, tamaño, material utilizado, profundidad de instalación y otros factores, serán determinantes para que un arrecife artificial cumpla adecuadamente con los propósitos para los que ha sido diseñado, por ello resulta necesario establecer una clasificación de los arrecifes artificiales en función de su objetivo o finalidad. Los arrecifes artificiales, atendiendo a este criterio, pueden ser clasificados de la siguiente manera:

#### **a) Arrecifes artificiales destinados a actuar sobre el medio físico.**

Dentro de este grupo se incluyen cinco tipos de aplicaciones:

- *Arrecifes artificiales de protección costera.* Se trata de diques exentos o diques-arrecife, cuya función principal es la de disipar la energía del oleaje con el fin de proteger la costa frente a la erosión. Son diques de tipo bloques de concreto con efectos en la hidrodinámica y la geomorfología (sobre las playas y el transporte litoral de arena). No obstante, pueden originar alteraciones físico-químicas de la columna de agua y del sedimento. Es de interés reseñar la aparición de nuevos diseños de diques prefabricados de contención que podrían presentar una función

mixta, ya que además de proteger de la costa, su cara posterior podría incluir otras funcionalidades biológicas.

- *Arrecifes artificiales destinados al turismo y ocio.* Se trata de diques exentos o diques-arrecife, diseñados especialmente con el fin de producir un oleaje adecuado para la práctica del surf, colocándose a una cierta distancia de la línea de costa. A diferencia de los arrecifes artificiales de protección costera, pueden contener bloques de otra composición: por ejemplo, el geotextil, es un material flexible que evita accidentes a los submarinistas y forman bloques que se conocen como geocontenedores. Tienen efectos en la hidrodinámica y la geomorfología litoral, y fomentan las prácticas de actividades acuáticas deportivas y el turismo.
- *Arrecifes artificiales polivalentes (protección costera y turismo y ocio).* Son los destinados a facilitar las condiciones adecuadas para el uso recreativo o deportivo a la vez que protegen la costa. Este es el caso de las barreras arrecifales sumergidas que pueden instalarse en algunas playas con el objetivo de crear olas adecuadas para la práctica del surf. Asimismo, en este grupo se incluyen las escolleras sumergidas exentas que tienen por objeto la creación de playas artificiales allí donde el transporte litoral no lo permite de forma natural y zonas de baño seguras en costas muy expuestas al oleaje.
- *Arrecifes artificiales destinados a la creación de zonas de fondeo.* Se trata de diques exentos o diques-arrecife que disipan la energía del oleaje con el fin de proporcionar áreas abrigadas para el fondeo de barcos pequeños. Estas zonas abrigadas fomentan además la práctica de ciertas actividades como los deportes acuáticos o la acuicultura.
- *Arrecifes artificiales para la protección de infraestructuras marinas.* De la misma manera que en el caso anterior, este tipo de arrecifes artificiales tienen como objetivo disipar la energía del oleaje, pero con el fin de proteger infraestructuras marinas como pueden ser jaulas de acuicultura, emisarios submarinos o pequeños puertos (Ministerio del medio ambiente, 2008).

**b) Arrecifes artificiales destinados a actuar sobre la biota.** Este grupo engloba la mayor parte de los arrecifes artificiales, con cuatro tipos de arrecifes según su finalidad.

- *Arrecifes artificiales destinados a gestión pesquera*
  - i. *Arrecifes artificiales de protección.* Son estructuras generalmente de concreto y con elementos disuasorios, destinadas a proteger los ecosistemas marinos frente a la pesca ilegal de arrastre y otras agresiones físicas. La finalidad de los brazos disuasorios impide la función de las redes de arrastre ilegales a esa profundidad.

Las unidades o módulos que los forman se distribuyen sobre el fondo marino separados entre sí de forma que se consiga proteger el máximo de superficie con el mínimo número de unidades. Generalmente se ordenan en barreras o polígonos arrecifales de protección en los que los módulos se distribuyen contrapeados en filas para cubrir las posibles trayectorias de los lances de arrastre.

- ii. *Arrecifes artificiales de producción.* Su principal función es aumentar la biomasa de los recursos pesqueros, incrementando la supervivencia, el crecimiento y la reproducción de los mismos. Pueden ser estructuras muy variadas, cuyo diseño y material dependerá de la/s especie/s cuya producción se pretenda maximizar. Los diseños pueden llegar a ser de concreto con estructura alveolar, pecios, de tipo mixtos, tipo matrix o estructuras formadas mediante electrodeposición.
  - iii. *Arrecifes artificiales de concentración o atracción.* Si bien técnicamente no son diferentes a los de producción, su objetivo es atraer a ciertas especies y concentrarlas en una zona determinada, de manera que se hallen bien localizados para su pesca o para su observación, si la finalidad es crear una zona de buceo deportivo donde esté prohibida la pesca. Un problema de estas estructuras es que pueden actuar como trampas de pesca cuyo uso indiscriminado podría contribuir a la sobreexplotación de los recursos (Ministerio del medio ambiente, 2008).
- *Arrecifes artificiales mixtos (de protección y producción o atracción).* Se trata de arrecifes destinados a la protección del fondo frente a la pesca de arrastre ilegal, a la vez que pretenden aumentar la biomasa de los recursos pesqueros en la zona, ya sea por producción o por atracción.
    - i. *Arrecifes artificiales como biofiltros.* Se usan para facilitar la descomposición aeróbica de la materia orgánica que se produce en las proximidades de las instalaciones de acuicultura.
    - ii. *Arrecifes artificiales para el desarrollo de la maricultura.* La finalidad de estos arrecifes es la de suministrar sustrato para el cultivo de algas o moluscos. El diseño de la estructura dependerá de la especie que se pretenda cultivar. El inconveniente que presentan estas estructuras es la posible desaparición de otras especies presentes en el medio (Ministerio del medio ambiente, 2008).
  - *Arrecifes artificiales con fines puramente ecológicos:* se trata de arrecifes artificiales destinados a mejorar la calidad ecológica del medio, con la motivación ambiental o conservacionista. Podrían agruparse en tres tipos, en función del estado ecológico del lugar de ubicación del arrecife, previo a su instalación.

- i. *Arrecifes artificiales con el objetivo de incrementar la productividad de un ecosistema.*
- ii. *Arrecifes artificiales con el objetivo de recuperar ecosistemas degradados.*
- iii. *Arrecifes artificiales con el objetivo de inducir cambios en los ecosistemas.*

El diseño de estos arrecifes depende del tipo de ecosistema sobre el que se pretenda actuar. Sin embargo, pueden incluirse los arrecifes artificiales con la finalidad de mejora del medio en términos de productividad y diversidad, como medidas de acompañamiento ante proyectos de infraestructuras en el medio marino.

Es importante indicar que cualquier otra estructura instalada con un fin específico vinculado a la actividad principal que justifica la instalación (defensa estructural, protección ante el socavamiento, compensación de cargas etc.), no deben ser consideradas arrecife artificial, aunque complementariamente pudiera cumplir funciones análogas. Para que tengan la consideración de arrecife artificial deben contar con un diseño y objetivos específicos para tal fin, incorporando criterios de diseño e instalación que vayan más allá de los estructurales (Ministerio del medio ambiente, 2008).

▪ ***Arrecifes artificiales destinados a otros usos***

- i. *Arrecifes artificiales con la finalidad de fomentar el buceo recreativo.* El objetivo principal es el fomento de actividades deportivas y con ello el aumento del turismo. Además, contribuye a descargar la presión turística que sufren algunos arrecifes naturales.
- ii. *“Arrecifes artificiales con la finalidad de fomentar la pesca recreativa.* El objetivo principal es el fomento o gestión de la actividad pesquera recreativa y con ello el aumento del turismo. Aquí se incluye cualquier tipo de estructura de tipo alveolar diseñada al efecto. Este tipo de arrecifes, igual que los anteriores, puede contribuir además a descargar la presión pesquera recreativa que sufren los arrecifes naturales de las inmediaciones”.
- iii. *Arrecifes artificiales para la potencialidad educativa y científica.* Se trata de arrecifes de producción o concentración cuyos objetivos están destinados al estudio del comportamiento de los ecosistemas, con fines científicos y/o educativos. Se realiza un seguimiento de los organismos que colonizan el arrecife mediante diversas técnicas como marcaje, telemetría, observación, técnicas bioacústicas, etc.

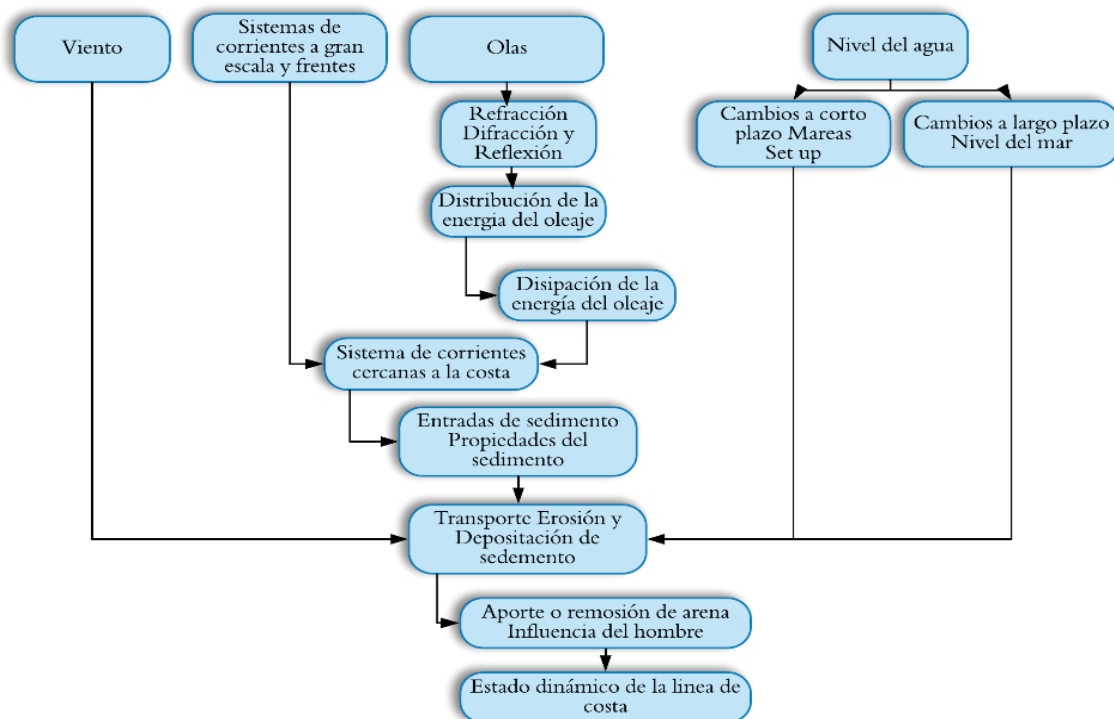
Esta clasificación no implica que un arrecife artificial tenga que estar destinado a un único fin; al contrario, la mayoría de arrecifes artificiales suele permitir por lo general, más de una aplicación de entre las aquí descritas, gracias a su multifuncionalidad intrínseca (Ministerio del medio ambiente, 2008, p.36).

## **2. HIDRODINÁMICA COSTERA INDUCIDA POR ARRECIFES**

En este capítulo se hace una revisión y descripción de algunos de los procesos físicos hidrodinámicos más relevantes inducidos por la rotura del oleaje, en la dinámica de la zona cercana a la costa. Incrementos en el nivel medio del mar, cambios en la altura y periodo de ola; así como alteraciones en el transporte de sedimentos.

De acuerdo a Möso (2004) la causa del estado dinámico de la costa es la concentración de la energía del oleaje en una zona relativamente estrecha. Aquí la energía del oleaje, que es función de su altura, se transforma en energía turbulenta, que luego se disipa. Cuando el oleaje se propaga hacia la costa, la cantidad de energía que se disipa en la zona cercana a la costa puede ser notable (p.2.1).

Los procesos físicos que afectan y reforman la geometría de la zona costera se ilustran esquemáticamente en la Figura 2.1. La conservación y protección de una playa pasa por el entendimiento de los procesos físicos en la zona costera. Estos procesos incluyen un grupo de los más complejos problemas hidrodinámicos, tales como la predicción del oleaje, corrientes y velocidades orbitales, la distribución espacial de la energía del oleaje, etc.



(Möso, 2004, p.2.2).

Figura 2.1.- Factores involucrados en los procesos costeros

Möso (2004) refiere la importancia del transporte de sedimentos y los procesos costeros ya que no pueden tratarse separadamente de las condiciones hidrodinámicas locales, debido a que están firmemente ligados a las mismas. Dada la gran dificultad de la hidrodinámica, hay una tendencia a “olvidarla” y hablar únicamente del movimiento del sedimento. La interfase agua-tierra es además una zona muy importante desde el punto de vista recreativo, estético y ambiental. La complejidad del sistema hace necesario el entendimiento de la física de los procesos que moldean la línea de la costa y que causan que el sedimento se acumule o se erosione. El tema es muy amplio y sobre el mismo existe una vasta literatura.

## 2.1 Rotura del oleaje

El oleaje adquiere su energía del viento que sopla sobre la superficie del mar. En especial, los vientos asociados a las tormentas pueden generar trenes de olas muy grandes que viajen por cientos de kilómetros hasta alcanzar la orilla. Esta energía (adquirida a través de grandes extensiones de mar) se disipa en un área relativamente estrecha de la zona costera: la zona de rompientes o zona de surf. La mayor parte de la energía del oleaje se disipa cuando rompe. Esta es, por mucho, la más importante de las aportaciones de energía en la zona costera y la responsable de la generación de varios fenómenos físicos en la zona de rompientes: generación de turbulencia, aumento del nivel medio del mar (set-up), de oscilaciones infragravatorias (por ejemplo, en forma de ondas de borde atrapadas en la cara de la playa) y corrientes en la zona cercana a la costa, así como del transporte de sedimentos y de los cambios en la morfología de las playas. Es importante mencionar que las ondas de borde pueden afectar directamente los patrones de corrientes y run-up en la cara de la playa, lo que tiene efectos importantes y visibles en la formación de topografía rítmica (Möso, 2004, p.2.3).

### ***2.1.1 Tipo de rompientes***

Se acepta que existen tres tipos comunes de rompientes: spilling, plunging y surging (aunque algunos autores aceptan un tipo de rotura adicional denominada rotura collapsing). La rotura tipo spilling (descrestamiento), ocurre en situaciones de oleaje peraltado propagándose sobre playas con poca pendiente. La cresta de las olas se va haciendo cada vez más aguda, hasta que se hace inestable y se derrama hacia abajo por la pendiente frontal de la ola. Esta rotura es gradual sobre la zona de rompientes (por lo que no se puede hablar exclusivamente de un punto de rotura) y el decaimiento de la altura es aproximadamente uniforme. Muy poco de su momentum es reflejado hacia el mar.

La rotura tipo plunging (voluta) ocurre con olas con poco peralte propagándose sobre playas relativamente inclinadas. La cara frontal de la ola se hace casi vertical, la cresta de la ola se hace más aguda, curvándose hacia el frente hasta que finalmente se precipita. El proceso de este tipo de rotura produce una gran turbulencia y una gran entrada de aire. La reducción de la altura de la ola durante la rotura se produce rápida y drásticamente. Las olas reformadas son usualmente de menos de una tercera parte de la altura de la ola en rotura y suelen romper de nuevo muy cerca de la línea de orilla. Poco del momentum de dicha ola es reflejado hacia el mar.

Rompiente tipo surging (oscilación), ocurre en playas con pendientes altas. Este tipo de rotura comienza a desarrollarse de una forma similar a la rotura tipo plunging, donde su cara frontal se hace muy vertical, pero con la particularidad de que la base de la ola llega a la playa antes de que se lleve a cabo la rotura, por lo que la cresta se colapsa y desaparece. Con este tipo de rompiente, generalmente la zona de surf es muy estrecha y aproximadamente la mitad del momentum de las olas es reflejado hacia el mar (ver figura 2.2). Galvin (1968) identificó la rompiente collapsing (colapso), un cuarto tipo que es intermedia entre el rompiente tipo plunging y surging. (figura 2.3). De hecho, los tipos de rompiente tienen una gradación continua, por lo que en ocasiones es difícil aplicar las clasificaciones.

En general, el rompiente tipo spilling tienden a ocurrir en playas con una pendiente muy suave y con olas muy peraltadas; el rompiente tipo plunging tiende a ocurrir en playas con una pendiente mayor y olas con peralte medio y el rompiente tipo surging ocurre en playas con una pendiente muy pronunciada y olas con poco peralte (Möso, 2004, p.2.8).

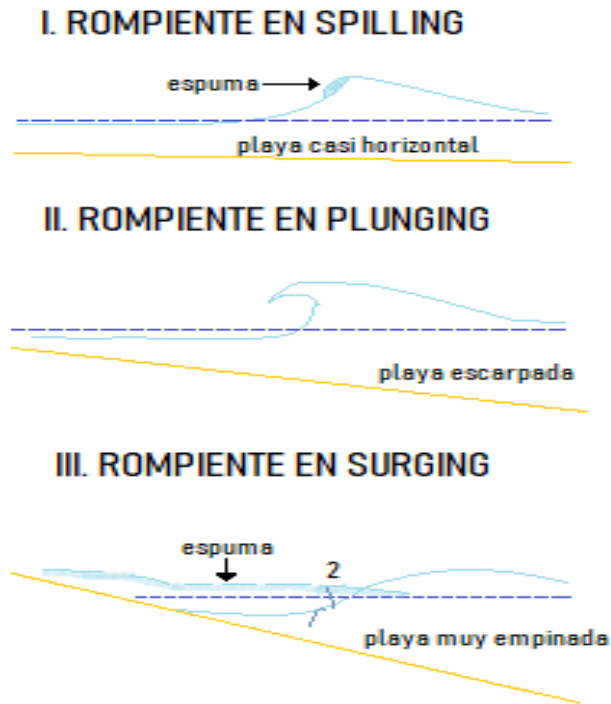


Figura 2.2. Tipo de rompientes, dependiendo de la pendiente de la playa y el peralte del oleaje (Komar, 1998).



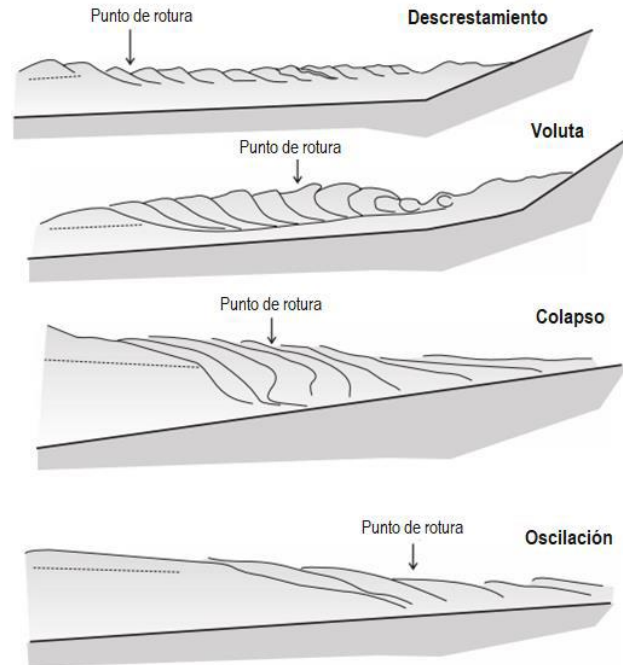


Figura 2.3. Tipos de rotura. Modificado de Davidson-Amott, (2010). De (Galvin, 1968).

A partir de observaciones de laboratorio, Galvin (1968) encontró una expresión empírica de predicción para el tipo de rompiente, usando dos parámetros adimensionales:  $H_0/L_0 m^2$  o  $H_b/gT^2 m$ , donde  $H_0$  es la altura de ola en aguas profundas,  $L_0$  la longitud de onda en aguas profundas,  $H_b$  la altura de ola en la rompiente,  $T$  es el periodo y  $m$  la pendiente de la playa. Conforme a estos parámetros adimensionales crecen, la rompiente se va transformando de surging a plunging a spilling. Estos parámetros propuestos por Galvin, combinan la pendiente de la playa  $m$  con el peralte del oleaje, expresado alternativamente como  $H_0/L_0$  o  $H_b/gT^2$  (ya que  $L_0 \propto gT^2$ ). Posteriormente, Battjes (1974) redefine estos parámetros en términos del parámetro de Iribarren (ecuación 2.1) en aguas profundas y en aguas someras (Citado en Möso, 2004, p.2.9):

$$\xi_0 = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad 2.1$$

$$\xi_b = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}} \quad 2.2$$

Por lo que, de acuerdo a la clasificación de Galvin (1968) y a la redefinición de Battjes (1974), los límites de los tipos de rompiente son:

Spilling:  $\xi_0 < 0.5$        $\xi_b < 0.4$

Plunging:	$0.5 < \xi_0 < 3.3$	$0.4 < \xi_b < 2.0$
Surging o collapsing	$\xi_0 > 3.3$	$\xi_b > 2.0$
No hay rotura	$\xi_0 > 4$	$\xi_b > 4$

donde  $\xi_b$ ,  $\xi_0$  se refieren a la altura de la ola en rotura  $H_b$  o altura de la ola en aguas profundas  $H_0$  en la expresión de  $\xi$ . Es importante recalcar que estos valores fueron deducidos a partir de un único valor de la pendiente y con oleaje generado en laboratorio. Estudios posteriores de Smith & Kraus (1991) en playas naturales sobre fondos no uniformes con barras, demostraron que estos rangos variaban y que olas que en un fondo plano podrían tener una rompiente tipo spilling, en presencia de una barra podrían tener rompiente tipo plunging, o que en un fondo plano tendrían un rompiente tipo plunging, en presencia de una barra podrían tener una rompiente tipo surging (Citado en Möso, 2004, p.2.10).

Otros estudios sobre los tipos de rompientes, llevados a cabo mediante imágenes de vídeo (Weishar & Byrne, 1978) determinaron que, en playas naturales, los valores propuestos por Battjes no podían discriminar el tipo de rompiente que habría, pues hay un espectro bastante amplio de periodos y alturas, por lo que generalmente se observan mezclas y sucesiones poco correlacionadas de los tipos de rompientes. Sin embargo, los valores propuestos por Battjes (1974) dan, sin duda, una tendencia perfectamente marcada de la transición de los tipos de rompiente conforme los valores de  $\xi_b$  y  $\xi_0$  aumentan, pero las condiciones en la naturaleza son más complejas que las condiciones controladas del laboratorio (Citado en Möso, 2004, p.2.10).

## 2.2 Interacción del oleaje con estructuras permeables

Las estructuras permeables se suelen construir con una serie de capas compuestas de materiales de diferentes granulometrías y/o piezas naturales o prefabricadas (p. ej. los diques rompeolas). En particular, el diseño de estos últimos se basa principalmente en: 1) la determinación del tamaño de las piezas que se colocan en el manto exterior para que resistan la ola de diseño para un determinado modo de fallo definido a priori y 2) la determinación del tamaño de las piezas y/o material granular que compone los mantos secundarios para que exista una transición adecuada entre capas que permita la máxima disipación de energía (Goda, 1988; Losada, 1990). (Citado en Pérez, 2008, p.5).

“En el ámbito de la ingeniería civil el reparto de la energía incidente se suele hacer aplicando Teoría Lineal” (ROM 1.0-09, 2009, p.93), es decir, considerando solamente la energía reflejada, transmitida y disipada, lo que suele proporcionar resultados deficientes.

## 2.3 Ecuación de la conservación de la energía del movimiento oscilatorio

De acuerdo a la ROM 1.0-09 (2009) la energía incidente se distribuye al interactuar con la sección del dique en:

- energía reflejada y devuelta hacia el mar,
- energía transmitida, a través o por encima de la sección propagándose a sotamar (área protegida) del dique,
- energía disipada y por tanto extinguida y
- energía transferida a otros modos oscilatorios o generadora de otros movimientos circulatorios.

Esta transformación de energía se puede analizar definiendo un volumen de control con anchura transversal, unidad en el que se evalúan los flujos de energía entrante y saliente de él y los procesos de disipación en su interior. La ecuación de conservación de la energía del movimiento oscilatorio en el volumen de control, se puede escribir:

$$FI - FR - FT - D' * = 0 \quad 2.2$$

Donde  $FI$ ,  $R$ ,  $T$  representan la cantidad de energía que pasa por una superficie del volumen de control en la unidad de tiempo como la energía incidente, reflejada y transmitida por las secciones de incidencia del oleaje frente a la costa respectivamente, y  $D'*$  evalúa la disipación por unidad de tiempo en el interior del volumen de control provocada por la presencia de la obra y el terreno. El signo negativo del término representa extracción o salida de energía del volumen de control (p.91).

La ROM 1.0-09 (2009) afirma. “Uno de los objetivos del prediseño es elegir la tipología de dique de abrigo que cumple con las necesidades de control del flujo de la energía incidente requeridas por el proyecto. Para ello, es necesario determinar su eficiencia a través de los coeficientes de transmisión ( $K_T$ ), reflexión ( $K_R$ ) y disipación ( $D^*$ )” (p.93). Definidos como:

$$K_T = \frac{H_T}{H_I} \quad 2.3$$

$$K_R = \frac{H_R}{H_I} \quad 2.4$$

$$D^* = 1 - K_R^2 - K_T^2 \quad 2.5$$

donde  $H_I$ ,  $H_R$  y  $H_T$  son las alturas de ola incidente, reflejada y transmitida, respectivamente. Estos coeficientes varían en función de las características del oleaje incidente, la geometría de la estructura de abrigo y el régimen del flujo dentro del medio poroso. Su determinación se puede hacer por métodos analíticos, numéricos o experimentales (Madsen, 1974; Allsop et al., 1988; Troch et al., 1999; Silva et al., 2000;

Burcharth et al., 2006) siendo éstos últimos los más empleados dada la complejidad de los fenómenos involucrados (Citado en Pérez, 2008, p.6).

## **2.4 Morfología de playas**

La palabra morfología (del griego *μορφή*, forma y *λογία*, estudio) define la disciplina que se encarga del estudio de la forma y estructura de un sistema. 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; en ese sentido, 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 (Monroy, 2013).

### ***2.4.1 Perfil dinámico de las playas***

La interacción entre el medio marino y el medio terrestre tiene una influencia directa sobre la forma en perfil de la playa, la cual será producto de las diferentes fuerzas que actúan sobre el sedimento que compone la playa. De no existir el oleaje, la playa tendría un perfil lineal cuya pendiente correspondería al ángulo de reposo de la arena. Sin embargo, en la realidad y bajo la acción del oleaje, la playa presenta concavidades hacia arriba y pendientes más suavizadas respecto al ángulo de reposo de la arena (Monroy, 2013, p.25).

De acuerdo a Monroy (2013) asevera que: durante una tormenta se presenta un estado de mar inestable dentro de la zona de rompientes y el oleaje llega a la playa desde diferentes direcciones. Cuando el oleaje alcanza la superficie de la playa, una gran cantidad de sedimento es removido y arrastrado mar adentro, favoreciendo la generación de barras en aguas relativamente profundas. Conforme estas barras van creciendo, la zona de rompientes se traslada mar adentro; de este modo, las olas rompen cada vez más lejos de la costa disipando así una cantidad considerable de energía antes de llegar a la playa. Esta pérdida de material continúa hasta que, eventualmente, se alcanza un pseudo-equilibrio. Una vez que la tormenta ha pasado, los depósitos de arena que han sido arrastrados mar adentro para la formación de barras regresan, por la acción de un oleaje con niveles de energía más moderados, a su ubicación inicial (p.25).

Cuando la zona de playa seca queda temporalmente lejos del oleaje, la arena se seca por la acción del sol y es removida tierra adentro formando dunas o regresa a la playa, en ambos casos, por acción del viento.

Durante los procesos anteriores intervienen diferentes fuerzas que se mantienen en balance y a su vez, mantienen un perfil de playa correspondiente al estado de equilibrio. Sin embargo, dicho estado puede verse afectado si se alteran las condiciones hidrodinámicas tales como incrementos en el nivel medio del mar, o cambios en la altura y periodo de ola; así como alteraciones en el transporte de sedimentos. Bajo estas circunstancias, la playa sufrirá cambios continuos hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio (Monroy, 2013).

#### *2.4.2 Sistema playa-duna y su interacción con el oleaje*

El sistema duna-playa al interactuar con el oleaje, modifica su morfología de manera que se adapta a las condiciones climatológicas, adquiriendo la forma más eficiente para disipar energía. Este sistema sigue un modelo de proceso-respuesta y evolucionan mutuamente ajustados mediante el intercambio de sedimentos, (Sherman & Bauer, 1993; citado en (Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas, 2007). A continuación, se presentan las partes morfológicas del perfil de playa y duna (Figura 2.4), la formación de las dunas y se describe la interacción que tanto la playa como la duna tienen con el oleaje, (Citado en Ordéiz 2014, p.17).

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

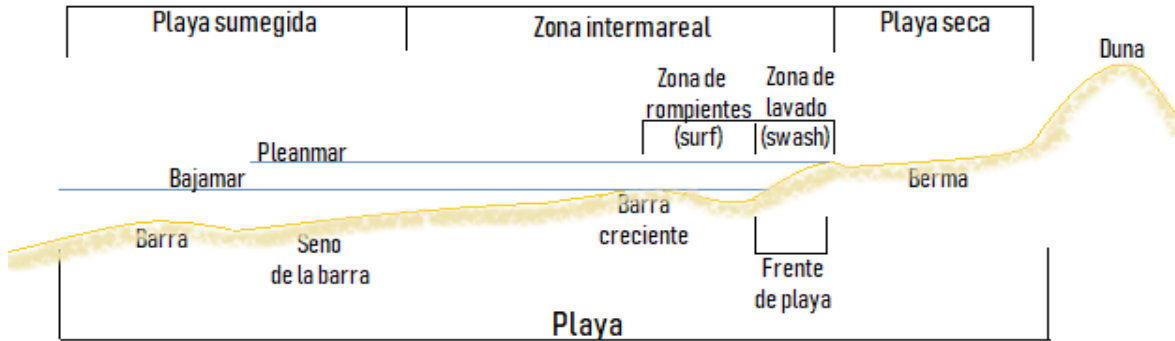


Figura 2.4. Perfil playa duna (Ordérez, 2014)

La interacción oleaje-playa-duna se produce en condiciones de temporal, (Sallenger, 2000) describe cuatro regímenes de erosión en una tormenta en el sistema playa-duna, Figura 2.5, en función del máximo y mínimo run-up y de la altura de la duna, a continuación, se enumeran (Citado en Ordérez 2014).

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

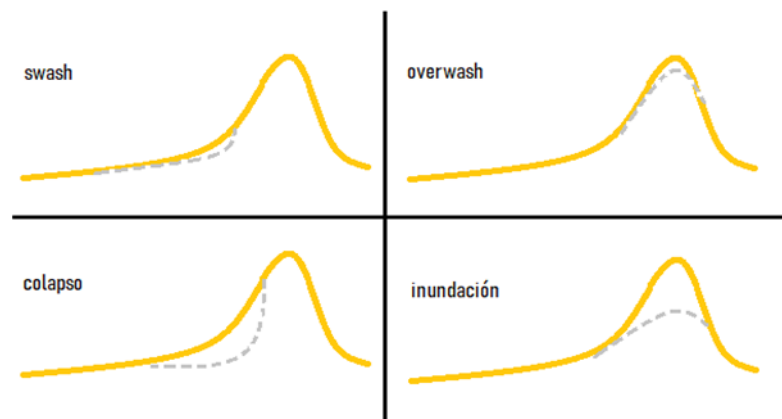


Figura 2.5. Modos de erosión descritos por Sallenger (2000)

### ***2.4.3. Perfil de equilibrio***

Una playa consigue su estado de equilibrio a partir del momento en que no presenta cambios significativos en su forma de perfil ni planta. Es entonces, que el concepto de perfil de equilibrio es irreal, sin embargo, en la naturaleza, el perfil de equilibrio es un concepto dinámico, pues las condiciones del oleaje y marea se encuentran en constante cambio.

Para encontrar este perfil de equilibrio (o en su defecto el perfil medio) partimos de la idea que el perfil de playa puede llegar a ser complejo debido a series de barras y senos, pero susceptible a ser simplificado. En general los perfiles son más peraltados en la orilla, y progresivamente van disminuyendo su pendiente a medida que la profundidad de agua aumenta costa afuera (García, 2003, p.8).

Monrroy (2013) afirma: En este estado de equilibrio existen algunas relaciones conocidas entre la forma del perfil y las condiciones hidrodinámicas:

- Tamaño del sedimento. El sedimento más fino tendrá una mayor movilidad, ya sea en dirección a la playa o mar adentro; mientras que el sedimento más grueso pondrá mayor resistencia a los forzamientos hidrodinámicos, especialmente al oleaje.
- Altura de ola. En zonas donde la altura de las olas es elevada, la playa tenderá a una pendiente más suave, pues una altura elevada ejercerá mayor fuerza y ésta sólo podrá ser disipada con una pendiente suave para llegar a un estado de equilibrio. La zona de “surf” también tenderá a ser mayor, propagando la energía del oleaje sobre una región más amplia.
- Periodo de ola. Cuando el periodo de ola es elevado, el sedimento tiende a ser transportado hacia la playa, por lo que la línea de costa avanza hacia el mar, generando una pendiente más pronunciada en el perfil de playa. En cambio, con un periodo de ola menor, la pendiente de la playa es más suavizada y la línea de costa tiende a avanzar tierra adentro.
- Nivel de marea. Cuando el nivel de marea es elevado, el sedimento puede ser transportado mar adentro con mayor facilidad. Un incremento en el nivel medio del mar necesitará un nuevo perfil de equilibrio para la nueva condición. (p.27)

#### ***2.4.3. i Forma en planta de las playas***

Una playa puede ser descrita por su forma en planta cuando lo que se pretende es observar los cambios que ha tenido la línea de costa en un periodo considerablemente largo.

Los cambios en planta de una playa, son aquellos que se producen generalmente, a la presencia de un gradiente en el transporte longitudinal de sedimento a lo largo de la orilla. En el caso de que este sea positivo (lo que indica que las tasas de transporte se incrementan), se producirá una erosión de la costa, con la consiguiente pérdida de superficie de playa. En el caso de que los gradientes sean negativos, situación que ocurre en zonas donde decrecen las tasas de transporte, se producirá una acumulación de sedimentos y, por lo tanto, un aumento en la superficie de playa. Este tipo de cambios suele considerarse como permanente en el tiempo, salvo que las condiciones generadoras desaparezcan (Sánchez y Jiménez, 1994, p.103).

Los cambios en planta que sufren las costas sedimentarias son función tanto de las características naturales del esquema de transporte, como de cualquier elemento existente en la costa que pueda alterar el mismo, como pueden ser condiciones de contorno y existencia de fuentes y sumideros.

Así mismo Monrroy (2013) asevera que las diferentes formaciones de una playa en planta pueden tener lugar principalmente en pequeña, media, o gran escala de tiempo y espacio, como se describe a continuación:

- i. Formas de pequeña escala: Estas formas serán resultado de la dinámica en escalas de tiempo de segundos a minutos, y escalas de longitud del orden de decímetros a metros.
- ii. Formas de mediana escala: Su longitud característica va del orden de las decenas a las centenas de metros y tiempos de evolución entre horas y años.
- iii. Formas de gran escala: Son formaciones en planta con escalas que van de los cientos a los miles de metros, y escalas de tiempo con variaciones desde estaciones hasta años (p.26).

En la descripción en planta de una playa, destacan procesos que tienden a alinear la línea de costa y procesos que tienden a mantenerla irregular. Dentro de los primeros se encuentran: formación de barreras en los cambios bruscos de orientación, formación de barreras en la entrada de bahías que eventualmente la cerrarán, erosión de salientes y relleno de curvaturas, relleno de sinuosidades formando planicies, y formación de cadenas de islas y relleno de la laguna asociada. Por otro lado, los procesos que tienden a mantener una línea de costa irregular son: formación de salientes, tómbolos y sinuosidades en zona de abrigo de estructuras, bajos o islas (principalmente cuando existen dos direcciones distintas de oleaje); y acumulación de material como respuesta a la variación en la dirección de incidencia del oleaje. Estas formaciones se pueden observar en la figura 2.6 (Monrroy, 2013, p.26).





Figura 2.6. Formaciones típicas de una playa, vista en planta (traducida de Monrroy, 2013)

### 2.4.3. ii Forma en perfil de las playas

Los cambios en el perfil de playa, son aquellas modificaciones que se producen en la dirección normal a la costa, producto generalmente del transporte transversal de sedimento. En principio, suelen considerarse como estacionales y/o cíclicos, ya que dependen, fundamentalmente, del contenido energético del oleaje, el cual suele tener un marcado carácter estacional. Básicamente pueden describirse dos tipos de cambios, o dos tipos de perfil: perfil de erosión o de tormentas y perfil de acreción (Figura 2.7) (Sánchez y Jiménez, 1994, p.103). Éstos fueron documentados por primera vez por Shepard (1950) y Bascom (1953) para la costa oeste de los Estados Unidos (Ramos, 2003, p.7).

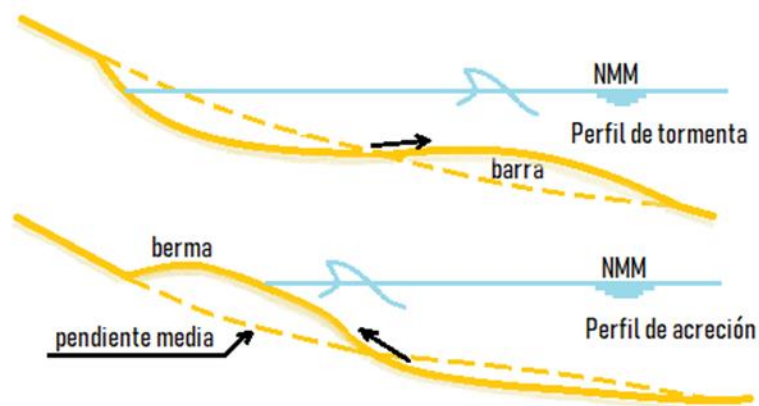


Figura 2.7. Perfil de tormenta y perfil de acreción (van Rijn, 1998)

- 1) *Perfil de erosión o de tormentas.* Se produce durante la acción de tormentas, en las que el oleaje que actúa sobre la playa es de gran contenido energético y, genera

durante el proceso de rotura corrientes de retorno -undertow- de gran intensidad. Bajo estas condiciones, se produce una erosión de la parte interna del perfil retrocediendo la línea de orilla y, transportándose el material hacia mar adentro, siendo depositado la mayor parte de las veces en forma de barras sumergidas, lo que genera un suavizamiento 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 y actuando, por lo tanto, como un mecanismo autoprotector de la playa ante la acción de tormentas (Carter y Balsillie, 1983). A la vez, las barras actúan a modo de reservorio sedimentario, donde el sedimento es almacenado hasta que las condiciones de oleaje permitan su vuelta a la playa emergida (Sánchez y Jiménez, 1994, p.103).

- 2) *Perfil de acreción.* Se produce durante la acción de un oleaje de baja energía o reconstructor. Bajo estas condiciones, el sedimento erosionado y depositado como barra, comienza a ser transportado hacia la costa, hasta llegar a la línea de orilla, produciendo un avance de la misma, el resultado ideal sería un perfil sin barras, de elevada pendiente y con una amplia berma (Sánchez y Jiménez, 1994, p.103). Una de las características principales del perfil de acreción es la presencia de una berma, que es la porción casi horizontal de la playa expuesta. Está formada por material que ha sido aportado durante los periodos de oleaje de baja energía, pero su presencia no siempre es evidente en playas de arena fina, la cual ya es casi horizontal.

Para Sánchez y Jiménez (1994) es importante 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 (p.103).

El perfil de playa es importante, ya que se puede considerar como un mecanismo natural causante de la rotura y disipación de la energía de oleaje. Las olas pueden alcanzar la costa con una tremenda cantidad de energía, teniendo potencial para causar grandes daños. A menudo playas con pendiente alterada protegen mejor las propiedades de la costa frente a ataques intensos del oleaje y, por tanto, previenen la aparición de erosión auténtica. Esta habilidad de la playa de ajustarse a las fuerzas a las que se ve sometida, hace que sea un método efectivo para la defensa de la costa.

En un caso ideal, el proceso erosivo o acumulativo se produciría hasta alcanzarse el perfil de equilibrio, el cual es capaz de disipar la energía del oleaje incidente, de tal manera que el transporte neto sea cero. En el momento en el que cambiara el oleaje, el perfil volvería a cambiar para tender al perfil de equilibrio asociado a la nueva situación (Ramos, 2003).

### 3. TRABAJOS EXPERIMENTALES

Existen playas con problemas de erosión, los cuales se han atenuado gracias a arrecifes de coral. Sin embargo, el conocimiento directo sobre cómo los arrecifes de coral previenen los impactos costeros, como la erosión y las inundaciones, es más escaso, debido a los múltiples factores en juego, la complejidad de los procesos costeros involucrados y la falta de observaciones y datos históricos. La tabla 3.1, lista algunos casos en los cuales se ha estudiado y/o diseñado un arrecife artificial para brindar beneficios como la reducción de riesgos, resistencia del ecosistema y la biodiversidad marina.

Tabla 3.1. Estudio y/o diseñado un arrecife artificial

Año	Autores	Playa	Ubicación
<b>2013</b> <b>Estudio</b>	Franklin, Mariño-Tapia, y Torres-Freyermuth	Puerto Morelos Península de Yucatan,	México
<b>2013</b> <b>Estudio</b>	Monismith y Herdman	Costa norte de Moorea	Polinesia Francesa
<b>2015</b> <b>Diseño</b>	Mahalingaiaha Tayade, Gokhale y Kudale.	Ullal, Mangalore	Karnataka, India
<b>2016</b> <b>Diseño y construcción</b>	Silva, Mendoza, Mariño-Tapia, Martínez y Escalante.	Puerto Morelos Riviera Maya	México
<b>2018</b> <b>Diseño y construcción</b>	Reguero, Beck, Agostini, Kramer y Hancock	Bahía de Grenville	Granada

### 3.1 Puerto Morelos, Quintana Roo, México

Se presenta un estudio en cual se pretende conocer a detalle los procesos hidrodinámicos impulsados por el oleaje que ocurren en la zona rompiente de una laguna arrecifal y el efecto de la rugosidad del arrecife sobre estos procesos, a través de observaciones en el campo y simulaciones de un modelo numérico de dos dimensiones (2DV).

Se utilizó el modelo de Cornell Breaking Wave and Structures (COBRAS), los resultados del modelo fueron comparados con datos obtenidos en el campo a partir de un arreglo de instrumentos instalados en la zona rompiente de la laguna arrecifal de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Dado que los estudios de campo aún son insuficientes para entender a detalle la hidrodinámica en estas zonas que son morfológicamente complejas.

El efecto de la rugosidad de los arrecifes se investigó alterando el valor del parámetro de Nikuradse, de acuerdo con los valores en la literatura para ambientes de arrecifes. Se analizaron varios casos para diferentes perfiles y niveles del agua.

El modelo numérico se validó utilizando los resultados de un estudio de laboratorio realizado por Demirbilek et al. (2007). Estos experimentos de laboratorio se realizaron en un canal de viento-oleaje de la Universidad de Michigan. El perfil consistía en una playa de 1:12 seguida de un arrecife plano (4.8 m de ancho) y una pendiente compuesta de arrecifes (línea continua en la Figura 3.1). Se compararon las series de tiempo de superficie libre y parámetros como la altura media de la ola, la configuración de la ola también fue estimada y comparada. Los resultados presentaron valores de error bajos y, en general, buena concordancia entre los valores observados (de laboratorio) y los valores predichos (modelo). La figura 3.2 muestra que el modelo es capaz de representar con precisión las características de la onda de rotura instantánea y promediada.

Se observó que, las olas de períodos más largos de la misma altura crecen más que las olas más cortas antes de romperse, y se rompen aproximadamente en la misma posición a través de la orilla. La rugosidad tiene muy poco efecto en la propagación de la onda antes de romperse en ambos casos, y las mayores diferencias en  $H_m$  ocurrieron después de la rotura de la onda.

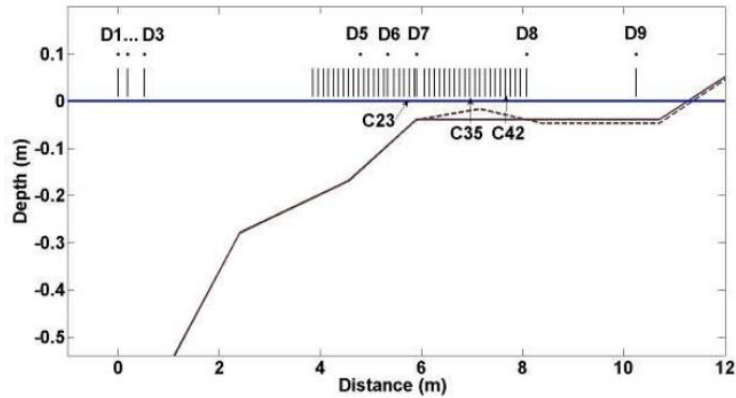


Figura 3.1. Perfil de arrecifes cruzados utilizado en experimentos de laboratorio por Demirbilek et al., (2007) y para representar el arrecife plano en el modelo (línea continua); la línea discontinua representa el perfil con una cresta de arrecife incorporada. Posiciones del medidor de laboratorio indicadas por puntos (D) y posiciones del medidor modelo por líneas verticales (C).

La configuración inducida por la onda también se calculó para diferentes condiciones de onda y valores de rugosidad. Para los períodos y todas las alturas de las olas estudiadas ( $H_s$ ), la configuración de las olas aumentó al aumentar la rugosidad de los arrecifes. Aunque esta tendencia fue similar en los períodos presentados, existían diferencias en términos de la magnitud y distribución de la configuración de onda. La reducción de la ola parece ser de una magnitud similar en ambos casos, no obstante, se ubicó un poco más lejos en la costa en el caso del perfil suave con  $T_p = 2.5$  s (asociado con una rotura de la ola ligeramente anterior). La configuración fue mayor durante el período más largo para todos los valores de rugosidad debido al aumento de la altura de las olas y el gradiente también fue más pronunciado que para las ondas más cortas.

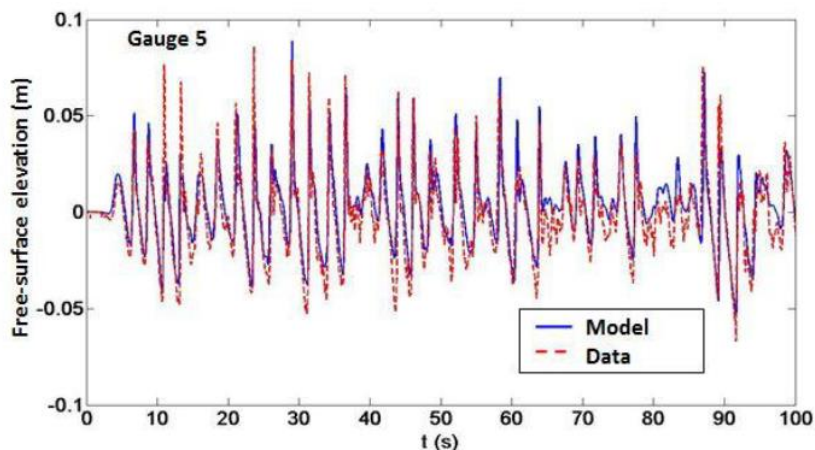


Figura 3.2. Sección de la serie de tiempo de elevación de superficie libre para la Prueba 32 en el Calibre 5 (línea continua: predicción del modelo, línea discontinua: observaciones de laboratorio).

La rugosidad variable del lecho también tuvo efectos importantes en la evolución de las ondas espectrales en todo el perfil del arrecife. Para que no haya aspereza, la energía de onda en la frecuencia pico ( $f = 0.4$  Hz), creció inicialmente como resultado de la deposición y la disipación de la rotura. Para todas las condiciones de onda ( $H_s$  y  $T_p$ ) estudiadas, hubo una reducción de la energía en todas las frecuencias al aumentar la rugosidad.

Las velocidades se promediaron en el tiempo y los resultados se presentaron por debajo del nivel de agua quieta, por sus siglas en inglés SWL (still water level). Por encima del SWL, todas las velocidades se encontraban en tierra, sin embargo, en todos los casos se identificó la presencia de corrientes marinas de tipo submarino por debajo del SWL. Estos fueron mayores para alturas de olas más grandes y disminuyeron en intensidad al aumentar la rugosidad. Los mayores cambios en las velocidades ocurrieron cerca del lecho del arrecife en ambos períodos.

### ***Resultados***

Los datos de campo muestran un flujo cercano al fondo (perpendicular al arrecife) dentro de la zona de rompientes cuando las alturas de ola son de  $\sim 1$  m, pero para olas más pequeñas se observan flujos hacia el mar asociados con pequeños aumentos en la altura de ola. Un gradiente localizado en la sobre-elevación del nivel del mar por oleaje podría generar una corriente parecida a la resaca, lo cual no ha sido reportado previamente. Los resultados del modelo también muestran la presencia de este flujo y su intensidad varía con forme cambia la rugosidad del arrecife.

Parece que, al aumentar la rugosidad, se aumenta la sobre-elevación, y la intensidad de la corriente de la resaca disminuye. Se consideró que era muy importante tomar en cuenta la rugosidad en el estudio de la hidrodinámica en arrecifes, ya que sus efectos podrían tener importantes implicaciones ecológicas en el funcionamiento del sistema (e.g. transporte de larvas).

## **3.2 Costa norte de Moorea, Polinesia Francesa**

Se trata de un estudio en el cual se observaron las olas, la configuración y los flujos medios impulsados por las mismas, frente a un arrecife de coral escarpado y su sistema lagunar asociado en la costa norte de Moorea, Polinesia Francesa. Se realizaron mediciones de flujo a través del arrecife que pusieron de manifiesto la importancia de incluir tanto el transporte de olas (transporte de deriva de Stokes) como el flujo medio de Euler al calcular el flujo sobre el arrecife.

A partir de 2003, se midieron olas y corrientes cerca de la Bahía Paopao en la costa norte de Moorea. Se observó que las mareas y los flujos impulsados por el viento son generalmente débiles, de modo, que las olas proporcionan la mayor fuerza impulsora para las corrientes que atraviesan la cresta del arrecife, a través de la laguna poco profunda y salen del arrecife profundo. A finales de 2006 y continuando de forma intermitente hasta principios de 2009, se desplegó una serie de perfiladores de corriente y sensores de presión en diferentes arrecifes. La Figura 3.3, muestra el conjunto de mediciones a lo largo de la línea desde la estación FR20 y P7.

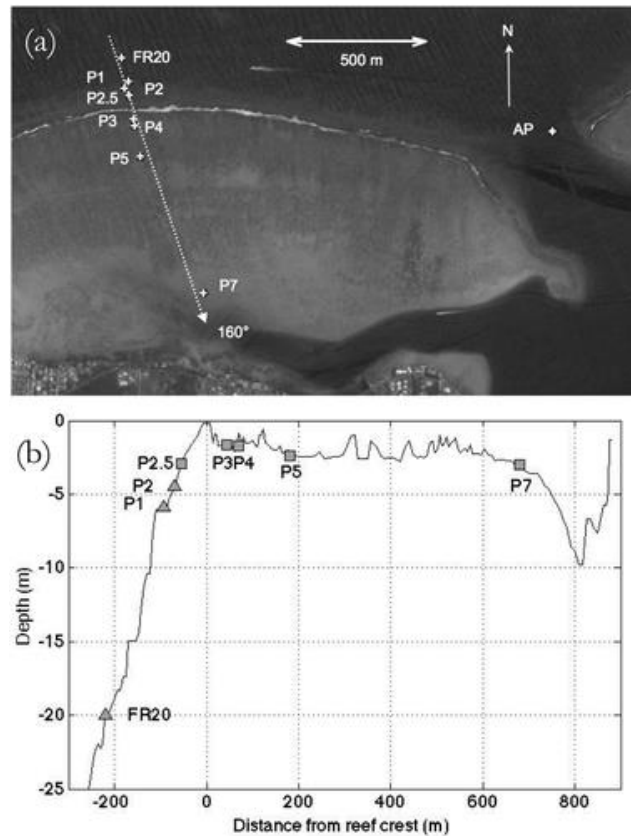


Figura 3.3. Diseño de estaciones de medición en Bahía de Paopao, Moorea durante los experimentos 2006-2009: (a) Elementos de instrumentos que abarcan el antepié, la cresta del arrecife, la zona posterior, la laguna y el paso del arrecife (imagen de Google Earth); (b) la sección de arrecife transversal a lo largo del transecto de FR20 a P7 que muestra la ubicación de los instrumentos y la batimetría de arrecife.

La cresta de los arrecifes parece aislar parcialmente los campos de olas en alta mar y en tierra mostrando variaciones de superficie libre entre las estaciones de arrecifes anteriores, por ejemplo, P2 y P2.5 y entre las estaciones de arrecifes posteriores, por ejemplo, P3 y P4 las cuales tienden a ser entre 0.8 y 1 para la mayoría de las frecuencias, mientras que entre estaciones en diferentes lados de la cresta (p. e., P2.5 y P3) es mucho menor (ca. 0.4–0.6).

En general, las olas incidentes en estaciones internas se propagan casi normales a la cresta del arrecife, con variaciones direccionales del oleaje incidente generalmente a menos de  $10^\circ$ .

Con respecto a las velocidades de las ondas, se observó que mientras más cerca de la cresta del arrecife (P2.5) eran bastante altos, de hasta 3 m/s y para el cual  $H \approx h$ . No obstante, a pesar de la inclinación de la cara del arrecife y las ondas altamente no lineales, las velocidades observadas se ajustan bastante a la teoría de la onda lineal. Con respecto a la disipación de energía se observa reducción del 25 % en el flujo de energía de las olas en el borde de la zona de surf (P2.5), en relación con la costa (P1). En los cálculos de configuración que se analizaron, se consideró que el flujo de energía de onda que llega a la zona de surf siempre fue el 75 % del flujo calculado en P1.

La rotura y la interacción de las olas rotas con la cresta de arrecifes poco profundas atenúa dramáticamente el campo de olas en la parte trasera. En la primera estación costera de la zona de surf y la cresta de arrecife (P3), las velocidades se dirigieron principalmente hacia la costa y todavía estaban fuertemente correlacionadas con las variaciones de superficie libre.

### ***Resultados***

A pesar de las fuertes pendientes y las grandes amplitudes y, por lo tanto, la no linealidad de las ondas, la teoría de la onda lineal proporciona descripciones notablemente buenas de las velocidades, el tensor de radiación y el transporte de ondas, que son fundamentales para la teoría de flujos promediados por olas sobre el arrecife; la rotura puede no estar bien descrita por los modelos normales de rompimiento de playas que postulan un cuasi-equilibrio, aunque la estructura es altamente disipativa.

En las mediciones, en la estación más cercana a la zona de surf, el transporte a través del arrecife estuvo completamente asociado con las olas. Después de que las olas se rompen, el transporte de olas es esencialmente insignificante.

La configuración en este sistema de arrecifes escarpados se puede predecir en un amplio rango de condiciones de onda a partir de la teoría del tensor de radiación, incluido el modelo más simple de rotura de onda, es decir, que el límite de altura de onda local es proporcional a la profundidad local. La rotura en las caras de los arrecifes empinados parece implicar una única rotura hundida seguida por un orificio turbulento que interactúa con la cresta del arrecife poco profundo, se propaga hacia la costa y se disipa. Desafortunadamente, por razones muy prácticas, no se tienen mediciones en la región entre la cresta del arrecife y donde se rompen las olas por primera vez, por lo que aún queda por determinar por qué el modelo de rotura simple funciona tan bien.

Un desafío más serio para la teoría simple es el hecho de que la geometría de los diferentes arrecifes es más complicada que lo que se muestra en el modelo conceptual para arrecifes. La estructura de los ángulos de referencia comúnmente no es plana, sino que



consiste en una serie de aristas, conocidas como espolones, separadas por canales, conocidas como surcos. Dado que estas estructuras son generalmente mucho menores que la longitud de onda de las ondas incidentes, su efecto no es susceptible a los enfoques de perturbación basados en una geometría que varía lentamente y sus influencias en la formación de olas y la rotura de las olas es en gran parte desconocida.

### 3.3 Ullal, Mangalore en Karnataka India

Se propuso el diseño de arrecifes submarinos sumergidos como medida de protección costera sostenible. Un plan de desarrollo integrado preparado por consultores de ADB (Banco Asiático de Desarrollo) el cual incluye la construcción de dos arrecifes marinos y cuatro bermas costeras para atrapar los sedimentos que permitan la nutrición de la playa de Ullal y la rehabilitación de los rompeolas existentes para permitir mayor movimiento de arena hacia el sur. El sitio de erosión en Ullal está ubicado en el lado sur de Mangalore, donde los ríos Gurpur y Netravati tienen su confluencia cerca de la desembocadura, donde se encuentran con el Mar Árabe (Figura 3.4).

Los dos arrecifes propuestos tienen forma de delta, se desarrolló el diseño de tres secciones transversales de arrecifes submarinos sumergidos confirmados a través de estudios en el canal de olas. Las características de transmisión de la onda del arrecife submarino sumergido también se desarrollaron a través de las pruebas en el canal de olas, con diferentes condiciones de altura de la onda y nivel de marea.

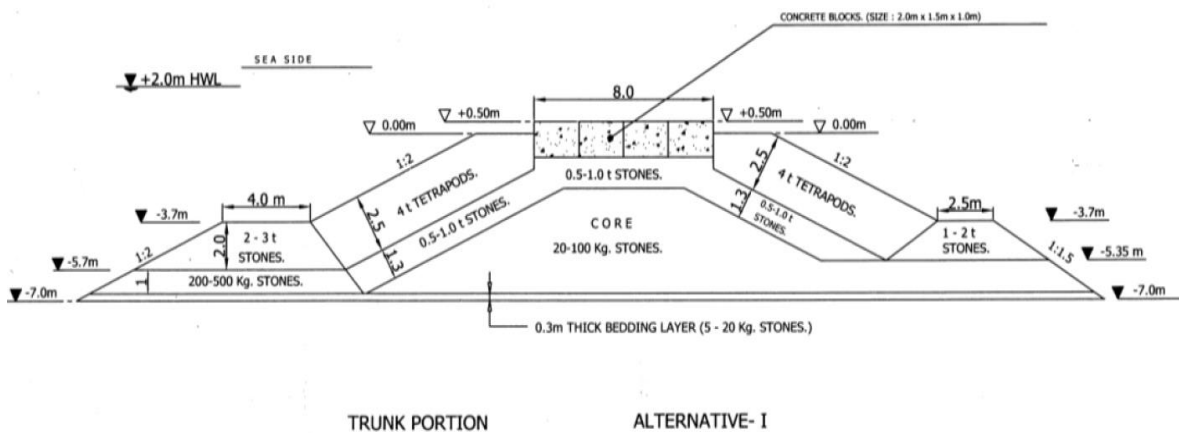


Figura 3.4. Ubicación de la protección costera propuesta para el sitio de erosión en Ullal, Mangalore en Karnataka

Los dos rompeolas existentes flanquean la boca, en el norte se encuentra Bengare, mientras que en el sur Ullal, se tuvo una tendencia a desplazar la boca hacia el norte. Después de la construcción de los rompeolas la entrada de la boca se estabilizó. A lo largo de la zona norte hasta el rompeolas sur del puerto de New Mangalore experimentó deposición de arena. La deposición de arena llegó hasta la punta del rompeolas norte del Puerto Viejo Mangalore en un par de años. No obstante, la costa sur a lo largo del sur de Ullal muestra cambios estacionales y erosión.

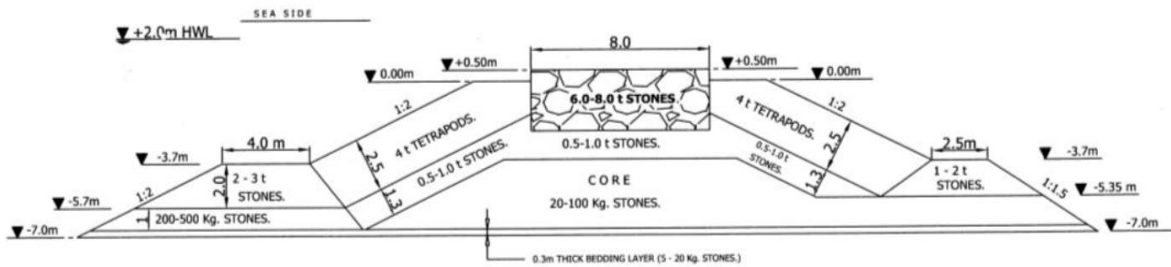
Como se muestra en la Figura 3.4, la base del arrecife se encuentra a -7 m. El arrecife artificial de piezas sueltas tiene una base, un núcleo, una capa secundaria protegida por una capa de coraza y un pie para evitar el deslizamiento de las unidades. La capa de coraza consiste en unidades seleccionadas de piedras de cantera o bloques de concreto artificiales, que reciben el impacto de la ola. La estabilidad de las estructuras depende principalmente de la estabilidad de las unidades de coraza individuales en su pendiente hacia el mar.

Se desarrollaron tres secciones transversales alternativas, teniendo en cuenta la estabilidad hidráulica, las condiciones del sitio y disponibilidad de materiales. En la Alternativa I (Figura 3.5), se consideran tetrápodos en la coraza y bloques de concreto en la cresta. En la Alternativa II (Figura 3.6), se consideran tetrápodos en la coraza y piedras en la cresta. Mientras en la alternativa III (Figura 3.7), se consideran piedras en la coraza y en



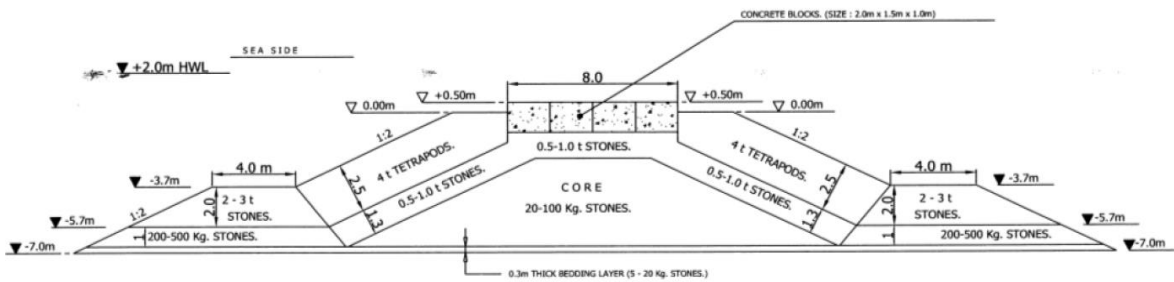
la cresta.

Figura 3.5. Sección transversal de un arrecife marino con tetrápodos en la coraza y bloques de concreto en la cresta- Alternativa - I



TRUNK PORTION ALTERNATIVE- II

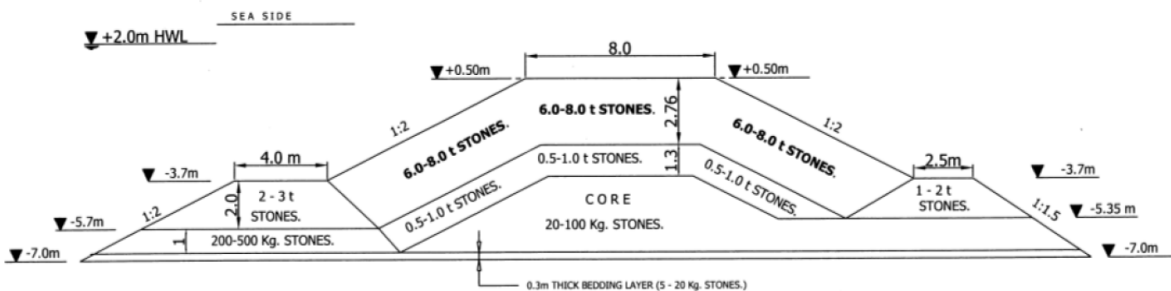
Figura 3.6. Sección transversal de un arrecife marino con tetrápodos en la armadura y piedras en la cresta - Alternativa – II



ROUNDHEAD ALTERNATIVE- I

Figura 3.7. Sección transversal del arrecife marino con piedras en la armadura y la cresta - Alternativa – III

Para el diseño del morro (Figura 3.8), se consideran tetrápodos en la coraza, una capa secundaria de piedras debajo de la coraza en ambos lados, el núcleo consta de piedras



TRUNK PORTION ALTERNATIVE- III

y bloques de concreto en la cresta

Figura 3.8. Sección transversal del arrecife marino con piedras en la armadura y la cresta para el morro

Las pruebas modelo para el diseño de los arrecifes sumergidos se llevaron a cabo en un canal de olas reproduciendo la sección a una escala 1:30 con geometría similar. El nivel del lecho de la sección representativa era de -7 m y la pendiente de 1:100. Las secciones transversales se probaron bajo ondas regulares para una altura de ola de 5 m con nivel de agua alto de 2.0 m (HWL) y nivel de agua bajo (LWL) de 0.0 m para daños de orden cero (0-1 %). La sección también se probó para detectar daños de primer orden (entre 1 % y 5 %) con las olas de rotura del orden de 6.0 m en el nivel de agua alto (HWL) de 2.0 m y nivel de agua bajo (LWL) de 0.0 m.

Inicialmente, se realizó una prueba con una altura de ola de 5.0 m a un nivel de agua de 2 m (HWL). Se observó que una capa de agua de aproximadamente 4.5 m de espesor pasaba sobre la cresta del arrecife. También se observó que el rundown fue de 0.0 m. No hubo daños a los tetrápodos en la coraza, así como a los bloques de concreto en la cresta. También se mantuvo estable a pie de dique ante esta condición de onda. Las olas incidentes de 5 m de altura se redujeron a aproximadamente 2.5 m después de pasar el arrecife. El coeficiente de transmisión fue del orden de 0.5 en estas condiciones.

Se realizó otra prueba con una altura de ola de 5.0 m a un nivel de agua de 0.0 m (LWL). Se observó que una capa de agua de aproximadamente 1.8 m de espesor pasaba por encima del nivel de la cresta. También se observó que el rundown fue de hasta -1.5 m. Las olas rompían en la coraza sin causar daños. La altura de la ola incidente de 5 m se redujo a aproximadamente 1.0 m después de la transmisión de las olas desde el lado del mar hasta la orilla. El coeficiente de transmisión es del orden de aproximadamente 0.2 para esta condición.

Las pruebas anteriores se llevaron a cabo con el período de onda de 10 s, 8 s, y 12 s. Para observar la estabilidad de los arrecifes en alta mar en condiciones severas de 6.0 m, las ondas se reprodujeron en LWL y HWL. La prueba en LWL con ondas de 6.0 m mostró aproximadamente un 5 % de daño a los tetrápodos, así como a los bloques de la cresta. Se repitió todo el conjunto de pruebas para la sección de arrecife Alternativa-II y Alternativa-III, los resultados son casi similares en comparación con la Alternativa-I.

Sobre la base de los estudios, de las tres secciones transversales alternativas. Los tetrápodos en la cresta no se consideran porque los tetrápodos en la pendiente horizontal no son estables. La altura máxima de onda transmitida de aproximadamente 2.8 m se observó en el lado de sotavento y se observó un coeficiente de transmisión del orden de aproximadamente 0.47 para las ondas incidentes de 6 m de altura.

## ***Resultados***

Las alternativas de arrecifes muestran que las secciones son hidráulicamente estables bajo la altura de onda de diseño de 5 m.

Al diseñar los arrecifes sumergidos en alta mar para la protección costera, el comportamiento de transmisión de ondas es un aspecto importante y debe estudiarse en el canal de ondas para garantizar la transmisión de ondas de deseo.

Se encontró que el coeficiente de transmisión de onda para todas las alternativas estaba en el rango de 0.22 a 0.47 con la altura de cresta relativa de 0.0 a 0.5.

El coeficiente de transmisión de onda de los arrecifes submarinos sumergidos depende principalmente de la geometría de la estructura y sobre el tipo de coraza en las estructuras.

### **3.4 Puerto Morelos, México**

Se presenta un caso de éxito en el cual, dada la alta probabilidad de tormentas futuras y los problemas de erosión temporal, se construyó un arrecife artificial a 120 m de la costa, hecho de elementos prefabricados de concreto, que permitiera preservar la estética y el refuerzo del ecosistema marino. Este sistema ha sido eficaz como barrera de defensa costera y también ha proporcionado un hábitat para varias especies de arrecifes. Lo anterior se presenta a causa del huracán Dean en 2007 en Puerto Morelos, ubicado en la zona turística de la Riviera Maya, a 30 km al sur de Cancún (Figura 3.9). Debido al caótico estado del mar y los escombros transportados por la tormenta, la arena se encontraba contaminada, incluidos materiales terrígenos y materia biogénica, por tanto, se decidió para proteger la playa del transporte de sedimentos. Como solución de emergencia se construyó una duna artificial para contener el material contaminado evitando afectado al manglar.

El diseño del arrecife tomó en cuenta las condiciones climáticas y ambientales de la zona, así como la estética, ya que la belleza de la playa es lo que atrae a los turistas. Para seleccionar una solución al problema del manejo de sedimentos, se consideraron los siguientes aspectos: (a) Clima marino; (b) Los arrecifes de coral más cercanos; (c) La dinámica natural del transporte de sedimentos y; (d) Las dunas costeras y su vegetación asociada. La conservación fue necesaria ya que se trataba de un área de anidación de tortugas y un sitio de manglares protegido, entre otras razones.

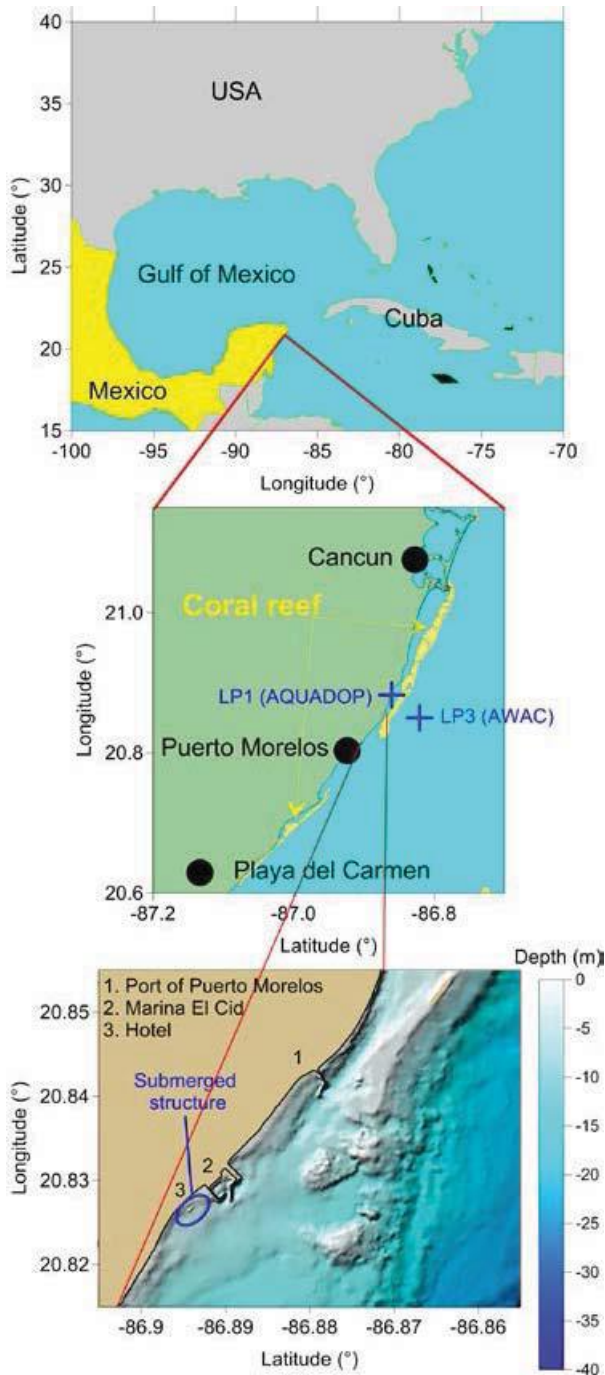


Figura 3.9. Localización geográfica del área de estudio

De las soluciones consideradas, se eligió la construcción de un arrecife artificial sumergido para el sitio, ya que se ha demostrado que los arrecifes de coral naturales disipan energía. Se realizó una revisión del estado de la técnica y se evaluaron diferentes tecnologías para la creación de un arrecife artificial. A partir de las opciones disponibles, se decidió utilizar un elemento conocido como Dispositivo de atenuación de ondas (WAD ©), que está hecho de concreto reforzado (grado marino, 5000 psi, de pH neutro). Pero los WADs © no fueron aceptados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), por lo que se realizaron pruebas de laboratorio a pequeña escala. Estas pruebas se realizaron en el laboratorio de Ingeniería Costera de la UNAM y los resultados fueron publicados en Burcharth et al. (2014). Como resultado de los estudios de laboratorio de la eficiencia hidrodinámica del arrecife artificial, en un modelo a escala 1:33.3 los coeficientes de reflexión oscilaron entre 20 y 35%, los coeficientes de transmisión 50 - 75% y el factor de disipación fue de alrededor del 40%.

En 2010, se construyó una estructura de 60 m de largo, colocada a una profundidad de 2.5 m y una inmersión de 0.5 m por debajo del nivel medio bajo del agua (Figura 3.9 y la Figura 3.10 c).



Figura 3.10. Aspecto de la playa en a) agosto de 2007, después de que Dean llegó a la costa, b) septiembre de 2008, que ilustra el retiro invernal original de la playa, c) la ubicación del arrecife artificial, d) la playa en septiembre 2011 y e) la playa en diciembre 2014

La playa ha sido monitoreada regularmente desde el huracán Dean. Desde la colocación del arrecife artificial, en 2010, el sistema de playas volvió a ser estable (Figuras 2c-e), mostrando un patrón normal de acreción y erosión (durante los meses de mayo a octubre, la playa tiende a crecer, mientras que en los meses restantes disminuye el ancho de la playa seca, pero siempre con arena suficiente para actividades turísticas y por razones estéticas.

### ***Resultados***

La estructura sumergida muestra efectividad en la protección de la playa y también proporcionó un hábitat para diferentes especies de animales y vegetación, incluidos los corales, que establecieron colonias en la estructura artificial.

Aunque el crecimiento del ecosistema de arrecifes fue impresionante desde su construcción hasta diciembre de 2014, con la llegada de las algas marinas, las condiciones locales de nutrientes, transparencia y pH del agua cambiaron. Esto causó una notable disminución en la abundancia y diversidad de especies. Sin embargo, las condiciones en los

arrecifes artificiales han regresado a las anteriores al exceso de Sargassum, lo que sugiere que el ecosistema probablemente sea capaz de recuperarse en los próximos años.

La principal lección aprendida en este estudio es que, es posible contar con esquemas efectivos de protección costera que puedan proporcionar los medios físicos para que se desarrolle un ecosistema vivo. Sin embargo, dada la gran cantidad de variables que no se pueden controlar, la resistencia de estos sistemas es incierta cuando hay alteraciones radicales en las condiciones ambientales.

### **3.5 Bahía de Greenville, Granada España**

Se trata de un caso de éxito en el diseño y construcción de rompeolas, para mejorar la erosión y las inundaciones costeras. El cual, después de la instalación tuvo un buen reclutamiento de algas coralinas crustosas y corales. Construido a partir de cestos de gaviones de varillas de acero de refuerzo doblado y soldado con más de 270 cestas de acero, bloques de cemento y piedras grandes. Este trabajo presenta uno de los pocos ejemplos existentes disponibles hasta la fecha de un proyecto de restauración de arrecifes diseñado y diseñado para brindar beneficios de reducción de riesgo

Este estudio se sitúa en la bahía de Grenville, en Granada, está se enfrenta al clima de la ola del Atlántico norte y puede considerarse un entorno de alta energía. Sin embargo, la costa está protegida por un sistema de arrecifes de coral (Figura 3.11). Los cambios en la línea de costa en la bahía durante las últimas seis décadas mostraron que la degradación de los arrecifes en la bahía norte está vinculada con una severa erosión e inundaciones costeras.

El sedimento erosionado de esta área se acumulaba en el puerto obstaculizando las operaciones en el muelle del mercado, tan es así que el canal de navegación requería de dragado regular para dar cabida a barcos más grandes, mientras que la tierra se erosionaba y el hábitat se destruía. Los impactos costeros fueron severos llevando a una situación grave. Tan fue así que, los aldeanos construyeron un rompeolas improvisado de neumáticos y madera para tratar de frenar la erosión, que en gran parte no ha tenido éxito.



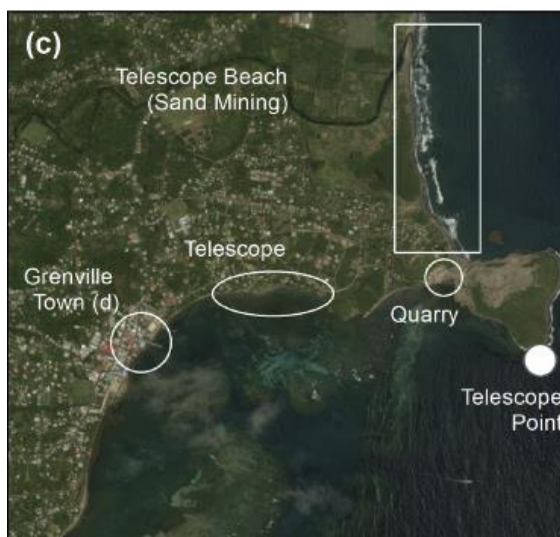


Figura 3.11. Ubicación y entorno regional de la bahía de Grenville

Los principios rectores para el diseño del arrecife artificial en Grenville fueron:

- Reducir la erosión costera y las inundaciones costeras por tormentas en la costa de Grenville y en el área de Telescope, restaurando las características de atenuación y desplazamiento de las olas del arrecife, perdidas por la degradación de los arrecifes naturales.
- Proporcionar un sustrato estable para la colonización de coral y la restauración del hábitat para facilitar el restablecimiento del crecimiento del coral y las funciones ecológicas de los arrecifes naturales, en áreas donde las algas bentónicas aún no son dominantes y para evitar el crecimiento excesivo de los corales vivos.
- Diseñar una solución modular, adaptable a diferentes profundidades y configuraciones de fondos marinos, fácil de armar en el lugar, estable, con suficiente porosidad para mejorar el hábitat, replicable en otros lugares y adecuada para la implementación local en pequeñas comunidades isleñas.
- Demostrar la viabilidad de un nuevo diseño de arrecifes de diseño ecológico que se pueda instalar utilizando la mano de obra de la comunidad local, a un costo menor y con mayores beneficios para el ecosistema que la infraestructura gris tradicional, como los diques de mar y rompeolas convencionales.

Desde una perspectiva estructural, el arrecife está diseñado como un rompeolas sumergido capaz de soportar un ambiente de alta energía y su sección transversal se asemeja estructuralmente a un “rompeolas de arrecife”, es decir, un rompeolas de escombros de cresta baja sin la multicapa tradicional.

El diseño se compone de una serie de arrecifes individuales (entre 20 y 30 m, cada uno) que suman 350 m de longitud. Cada unidad de arrecife está formada por cestas de acero de gaviones modulares e interconectadas (1.2 m de largo, 0.6 de ancho y 0.45 m de alto). Este diseño modular permite que las unidades de arrecife individuales se agrupen con altura, ancho y alineamiento variables, lo que ayuda a adaptarse al fondo marino, pero también proporciona un rendimiento hidrodinámico adecuado y facilita los canales entre arrecifes y el flujo ecológico de agua y nutrientes. La ubicación final y la alineación resultaron de una compensación entre un rendimiento hidrodinámico adecuado y la idoneidad de la topografía del fondo marino.

En septiembre de 2015, se instalaron y monitorearon cuatro unidades piloto para probar la efectividad del diseño, la implementación y los métodos de construcción, antes de que se construyera el conjunto de arrecifes. La cresta de cada arrecife se mantuvo a unos 0.25 m por debajo del nivel medio del mar para garantizar el rendimiento hidrodinámico. Las unidades piloto se construyeron en dos pares, con un canal de 1 m entre cada par de unidades piloto. La Figura 3.12-a, muestra la ubicación de dos de ellos a partir de marzo de 2017 y el proceso de implementación y construcción en 2015 (paneles b y c), incluida la cobertura de arrecifes de coral en 2016 (paneles e y f), un año después de la construcción.

Los materiales para las unidades piloto se ensamblaron en tierra antes de la construcción, se formaron a partir de cestos de gaviones de un bastidor de varillas de acero de refuerzo doblado y soldado (15 mm) e incluyeron más de 270 cestas de acero fabricadas por un equipo de soldadores locales, bloques de cemento y piedras grandes. La longitud de cada unidad piloto fue de aproximadamente 8 m de largo por 5 m de ancho (un total de 30 m de arrecife), se instaló en pares en dos sitios diferentes.

### ***Resultados***

En los primeros 12 meses después de la instalación, hubo un buen reclutamiento de algas coralinas crustosas y corales para las estructuras y el relleno. La supervivencia del coral trasplantado varió según la especie y la orientación en el arrecife (hacia el mar o hacia el lado de sotavento), lo que sugiere que la selección de las especies de coral adecuadas desempeñará un papel importante en el éxito a largo plazo. La estabilidad de la estructura no ha sido comprometida, pero se ha hecho algunas modificaciones.

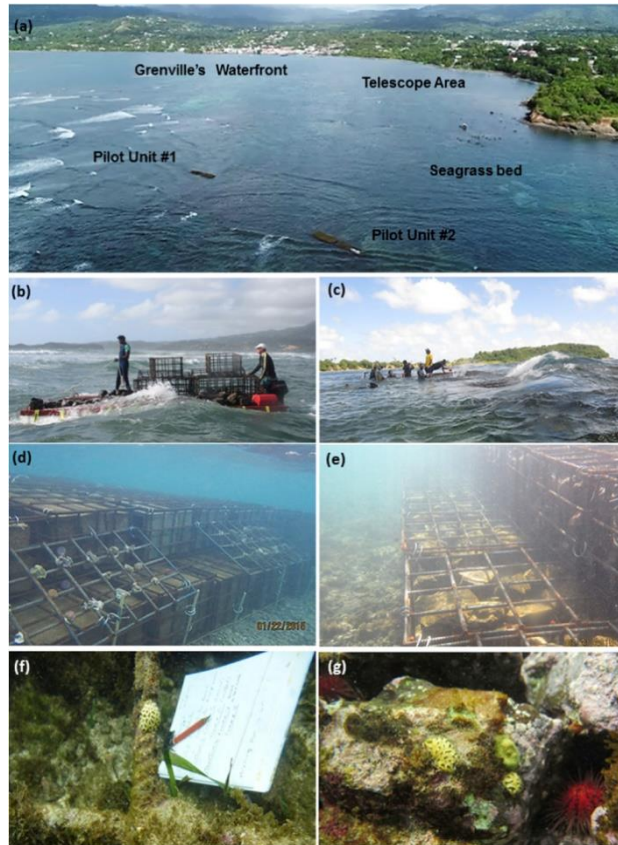


Figura 3.12. fotografías de unidades piloto. (a) Descripción general de los sitios piloto No 1 y No 2 con respecto a la costa. (b) barcaza cargada de cestos y rocas para la construcción del rompeolas ; (c) construyendo el rompeolas de arrecife , una piedra a la vez y empacando la segunda capa de canastas durante la marea baja, con olas que rompen directamente en el rompeolas; (d) y (e) vista sumergida de las unidades piloto en los escombros del arrecife de coral justo después de la instalación con trasplantes de coral, evidentes en (d); (f) y (g) muestran detalles del reclutamiento de coral en barras y materiales de relleno 12 meses después de la instalación.

Si bien no existe una solución única para todos, los hallazgos en este artículo son particularmente importantes para las naciones tropicales y los pequeños Estados insulares, que están en la primera línea del cambio climático y tienen más que ganar al proteger y administrar los arrecifes de coral. Como infraestructura costera.

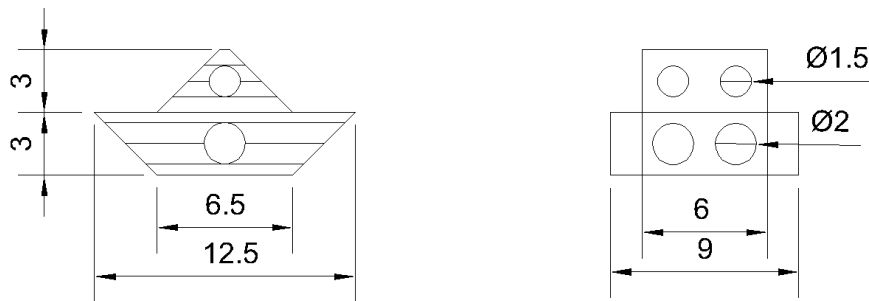
## 4. DESARROLLO DEL ARRECIFE ARTIFICIAL

El sistema de arrecife aquí desarrollado partió de diseño de Monroy (2013) y fue modificado por Cárdenas et al, 2016. Está diseñado para ser llevado y puesto en el fondo marino e imitar los arrecifes naturales, y por consiguiente proveer hábitat. Los elementos de coral se diseñaron con un software para modificar libremente la forma y obtener un patrón realista. Para asegurar la estabilidad de éstos y facilitar la construcción de la barrera, se colocaron sobre elementos modulares.

La formación del dique cuenta con tres piezas tipo, de esta manera se tiene un tamaño de pieza que es fácilmente manejable para la construcción y armado del dique dentro del laboratorio y el canal de oleaje; las caras presentan una inclinación de  $45^\circ$  respecto a la horizontal y dos salientes en los costados, las cuales permiten que exista trabazón entre los elementos aledaños (Monroy, 2013), sobre éstas se encuentra la réplica de arrecife de coral. Con ello, se conforma un dique de altura variable con distribución similar a la que se conoce en estructuras arrecifales naturales.

### 4.1 Características geométricas del elemento base

Los elementos que conforman el dique serán detallados más adelante, no obstante, primero se describirán las dimensiones que presentan, dado que todos estos presentan el mismo tamaño; cuentan con 12.5 cm de largo considerando las salientes a los costados (3 cm de cada lado), del cual 6.5 cm es conformado por base menor, 9 cm de ancho considerando las salientes a los costados (1.5 cm de cada lado) y 6 cm de alto, los orificios



interiores y superiores tienen un diámetro de  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{1}{2}$ , respectivamente. Figura 4.1

Figura 4.1. Dimensiones de los elementos, de izquierda a derecha, vista longitudinal y transversal, respectivamente

### *Elementos de concreto*

**Primer elemento:** presenta una cresta en forma de triángulo equilátero, la superficie es irregular, lo que genera fricción con la intención de contribuir a la disipación del oleaje (figura 4.2 a), debido a su geometría formaba parte del cuerpo del dique.

**Segundo elemento:** este elemento es similar al anterior, (figura 4.2 b) no obstante, no cuenta con la cresta con forma de triángulo equilátero, manteniendo así, la superficie plana, se ubicaba a pie de dique.

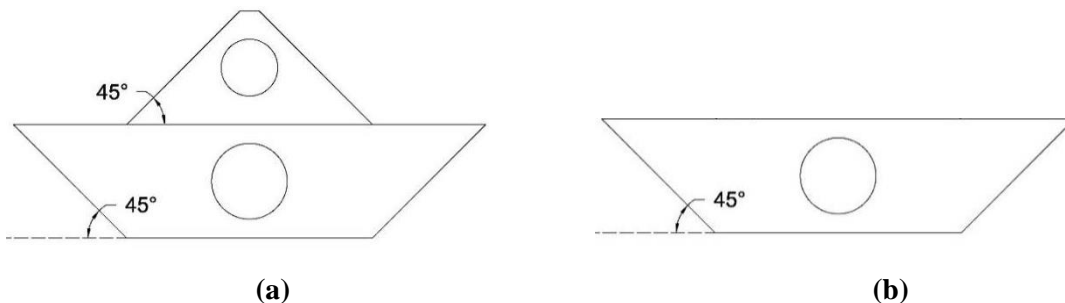
Estos elementos fueron fabricados de cemento, arena, fibra de vidrio y limadura de hierro.

### *Elementos impresos*

**Tercer elemento:** Se imprimieron tres diferentes elementos y se ordenaron en la estructura por su exposición a las olas, es decir, las más pequeñas enfrentan las olas, las más grandes en la parte superior y pendiente protegida de la estructura.

Este elemento tiene tres variables en la parte superior; la primera (figura 4.2 c) presenta parte de la cresta de un triángulo equilátero, adjunto a este se ubica el coral de 4 cm, la segunda, presenta las mismas características que el anterior, pero cuenta con un coral de 6 cm de alto, mientras que el tercero muestra un coral completo de 6 cm en la cresta.

A diferencia de los elementos anteriores, la fabricación de la estructura coralina colocada en la cresta del dique se creó a partir de un filamento a base de polímero denominado PLA la cual fue rellena con cemento, lo que permitió darle el peso necesario para que esté evitara el efecto de flotación durante los ensayos.



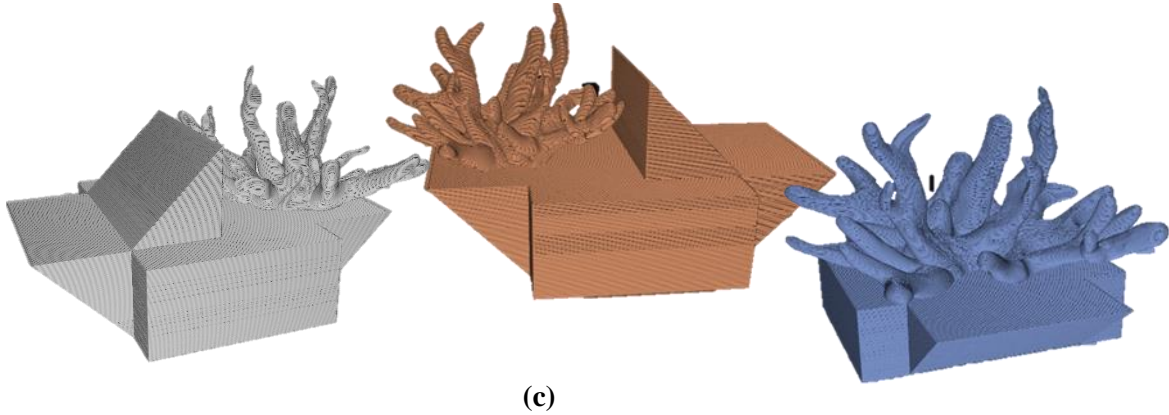


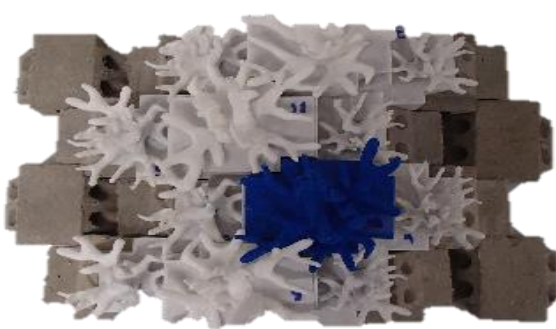
Figura 4.2. Imagen de los elementos impresos

#### 4.1.a Armado del dique

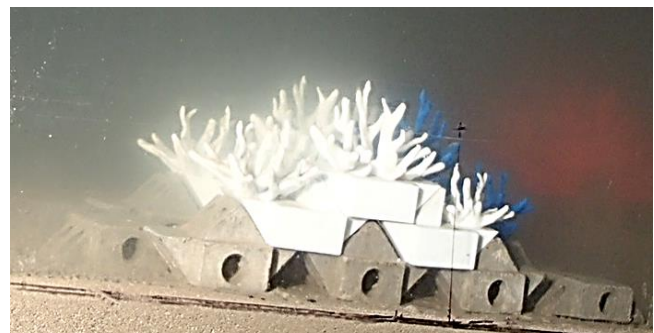
La geometría propuesta para los diques fue la siguiente:

**Tipo 1.** Se colocó un dique sumergido de tres capas: una fila de elementos de concreto y dos filas de elementos coralinos, (figura 4.3 a), el cual posee una longitud de 48 cm, con una cresta de 25 cm y altura de 15 cm.

**Tipo 2.** Se presenta un dique de cinco capas: una cama de cubos de 2 cm (se utilizaron 30 cubos), cuatro filas de elementos de concreto y dos filas de elementos coralinos (figura 4.3 b), por lo que posee una longitud de 60 cm, con una cresta de 25 cm y altura de 30 cm.



Vista en planta



Vista en perfil

(a)





Vista en planta



Vista en perfil  
(b)

Figura 4.3. Configuración del dique

## 4.2 Instrumentación y software

### 4.2.a Canal de oleaje

Se realizaron ensayos de laboratorio en el canal de olas del Instituto de ingeniería de la UNAM este canal se irgue 80 cm sobre el nivel del suelo sobre un soporte estructural de acero. Las dimensiones del canal son: 37 m de largo, 80 cm de ancho y 1.20 m de profundidad. Está construida en su totalidad de vidrio de alta resistencia, de 20 mm de espesor, y resistente a la tracción mecánica y térmica. La otra lateral y el fondo están contruidos con acero inoxidable. (Figura 4.4)



Figura 4.4. Canal de oleaje del II de la UNAM

#### ***4.2.b Generación del oleaje***

El sistema de generación de oleaje fue adquirido a HR Wallingford, y consiste en una placa montada sobre un pistón que tiene un recorrido máximo de 80 cm; a este sistema se le conoce como pala generadora. Esta pala se encuentra sujeta a una viga especial que cuenta con 4 soportes que reposan sobre el suelo sin tocar el canal y está conectada directamente con el motor eléctrico del sistema.

La pala generadora es operada mediante un software; la aplicación permite reproducir oleaje regular introduciendo parámetros tales como frecuencia (Hz) y altura de la ola (m), o bien, permite reproducir oleaje irregular a través de un archivo de datos con el espectro deseado.

#### ***4.2.c Sensores de nivel***

Para medir el oleaje generado a lo largo del canal, se colocaron probetas de nivel para registrar la variación de la superficie libre del agua en cada perfil. Estos sensores trabajan con un voltaje de 20 V, registrando las variaciones en el voltaje durante el ascenso y descenso de la superficie libre. Esta diferencia de voltajes, relacionada con la sumergencia del sensor, se interpreta como la posición instantánea de la superficie libre del agua, ofrecen una precisión de 0.01 mm, Figura 4.5





Figura 4.5. Sensores de nivel

Los sensores se montan en soportes metálicos diseñados para este propósito, de acuerdo a las necesidades del ensayo. Cuando se utilizan grupos de sensores, estos deben guardar una separación mínima de  $\pi/10k$  y una máxima de  $9\pi/10k$  donde  $k$  es el número de onda, dado por  $k = 2\pi/L$ , siendo  $L$  la longitud de onda.

Para estos experimentos, se colocaron 11 sensores de nivel. Tomando como origen la posición del dique, acorde con la metodología de Mansard y Funke, 1980. Para que el método funcione correctamente es necesario que la distancia entre sensores cumpla condiciones determinadas, la configuración de los sensores se muestra en la Figura 4.6. Con esta configuración, se midió el oleaje incidente con los sensores del 1 al 7, el sensor 1 sirvió como testigo de la altura de ola incidente, el oleaje reflejado con los sensores 2, 3 y 4 para el perfil A, mientras que los sensores 5, 6 y 7 fueron para el perfil B y el oleaje transmitido con los sensores 8 y 9 para el perfil A, mientras que los sensores 10 y 11 para el perfil B.

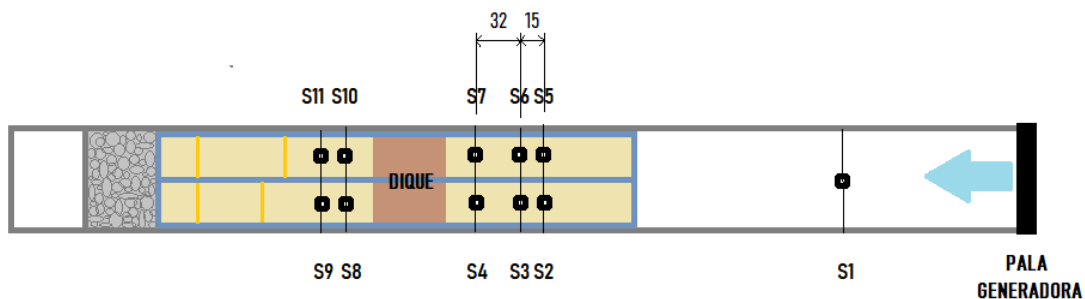


Figura 4.6. Configuración de los sensores de nivel

Tabla 4.1. Distancia entre sensores

<b>Distancia entre sensores para ambos perfiles</b>	
2do y 3er (5to y 6to) sensor	3er y 4to (6to y 7mo) sensor
15 cm	32 cm

#### ***4.2.c.i Calibración de los sensores de nivel***

Al iniciar los ensayos, o cuando el nivel del agua dentro del canal ha cambiado, es necesario realizar una calibración a los sensores de nivel. La calibración consiste en establecer un nivel de referencia,  $n=0$ , que normalmente se situará en un punto medio entre el fondo del canal y la superficie libre del agua.

Posteriormente, se varía la sumergencia de los sensores a una distancia conocida, y dicha distancia se registra en el programa de calibración; este proceso se realiza dos veces, para tener un total de tres niveles de referencia y tres voltajes. Con este conjunto de datos, el programa ajusta una recta por mínimos cuadrados, obteniéndose así para cada sensor, la relación entre el voltaje registrado y la elevación de agua que le corresponde.

#### ***4.2.d Cámara***

Se utilizó una cámara fotográfica réflex (Nikon D5100) para registrar el proceso de construcción y evolución de los perfiles de playa, obtener fotografías de las piezas y el modelo construido, así como de diferentes patrones observados en la interacción oleaje-estructura. También se tomaron videos al inicio y término de cada ensayo, lo que permitió observar el comportamiento del oleaje, sedimento y la estructura.

#### ***4.2.e UVP-DUO (Ultrasound Velocity Profiler)***

Mide la velocidad del flujo de líquido en función de la distancia, utilizando un método basado en Doppler pulsado (Figura 4.7). Funciona con un transductor ultrasónico el cual transmite una corta emisión de ultrasonido, que viaja a lo largo del eje de medición, y luego cambia a recepción ("escucha"). Cuando el pulso del ultrasonido golpea una pequeña partícula del líquido, parte de la energía del ultrasonido se dispersa en la partícula y se hace eco. Se compone de tres partes principales, la transformación de señales eléctricas en señales acústicas de ultrasonido, el procesamiento de señales y digitalización, así como el análisis y almacenamiento de datos.

Para los ensayos, se obtuvieron velocidades de flujo transversales. Se utilizaron cuatro sensores de velocidad uno antes y otro después del dique en ambos perfiles. Estos fueron ubicados a una distancia cercana a la estructura antes y después de este, colocados en un ángulo de  $45^\circ$  viendo al dique.

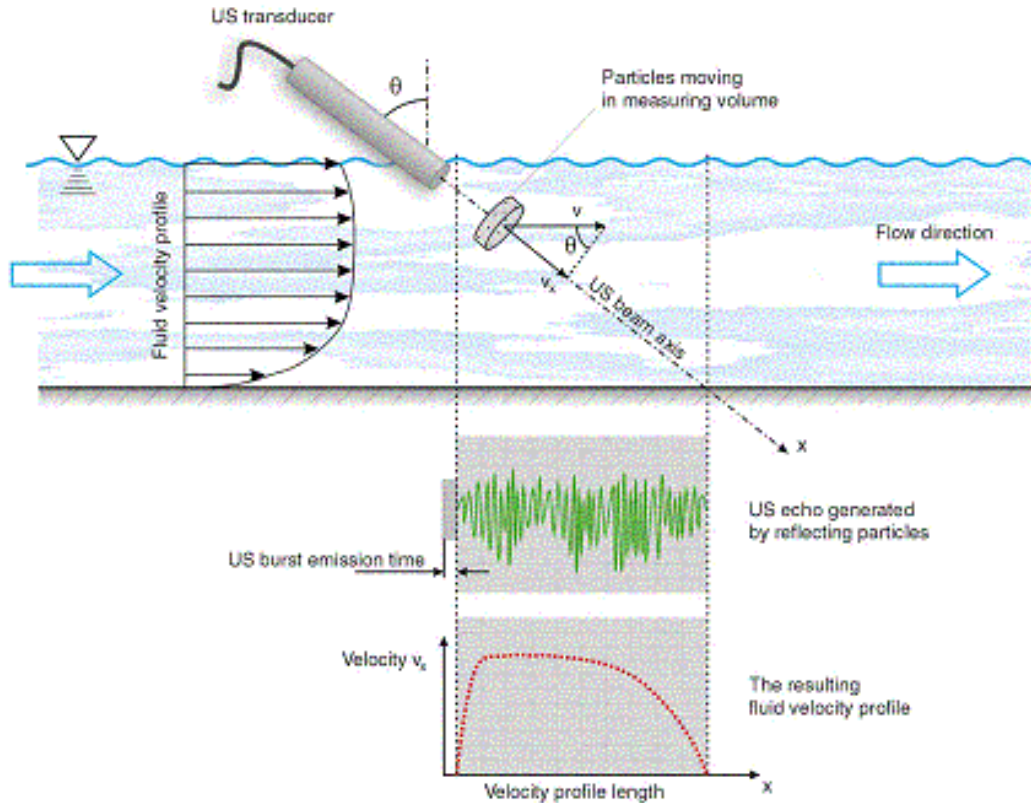


Figura 4.7. funcionamiento del UVP (CTU Faculty of Civil Engineering)

#### 4.2.f Nivel automático

Para determinar los cambios en la variación del perfil de playa de arena, se utilizó nivel LAICA DS2810. Este instrumento junto con el estadal, permite obtener puntos a cierta distancia representativos del perfil, su ubicación, nivel y número de datos capturados, son la base para poder realizar la comparación entre un perfil inicial y uno modificado después de un evento determinado, Figura 4.8.



Figura 4.8. Nivel automático, modelo DS2810

#### *4.2.g Software Cura*

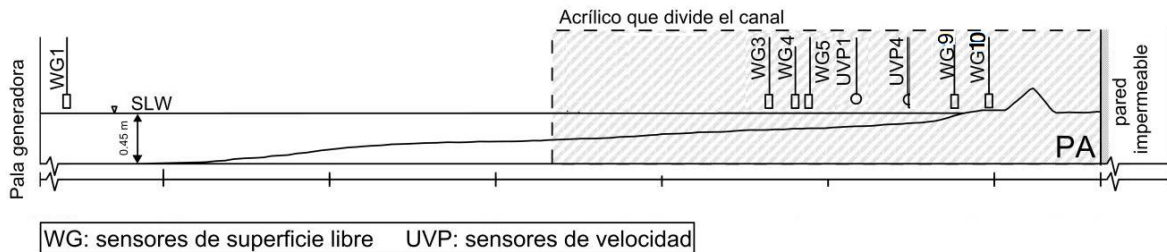
Después de diseñar la pieza modular tipo coral en los softwares Sculptris y Blender; se utilizó el software Cura, este permitió la lectura y modificación del diseño para la impresión 3D. El software es necesario para utilizar la Impresora **3d ultimaker 2+ extended** ya que permite manipular el modelo modificando dimensiones, el tipo de impresión, material, etc., el material utilizado por esta impresora se denomina PLA, es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno (PET) que se utiliza para hacer envases, pero que además es biodegradable. Se degrada fácilmente en agua y óxido de carbono.

### **4.3 Descripción del modelo físico y programa de pruebas**

El modelo, de escala 1:20, fue dividido con acrílico en los últimos 8.0 m del canal, representando dos perfiles simultáneos. En una parte se construyó un modelo de playa con berma, identificado como A, y en la otra uno sin berma, referido como B. En la Figura 3.3 se presentan imágenes del modelo donde se aprecia la división y la estructura colocada. Ambos perfiles se prolongan, desde el pie de la cara protegida de la duna, hacia “tierra” con una superficie plana de 0.9 m aproximadamente terminada en una pared impermeable.

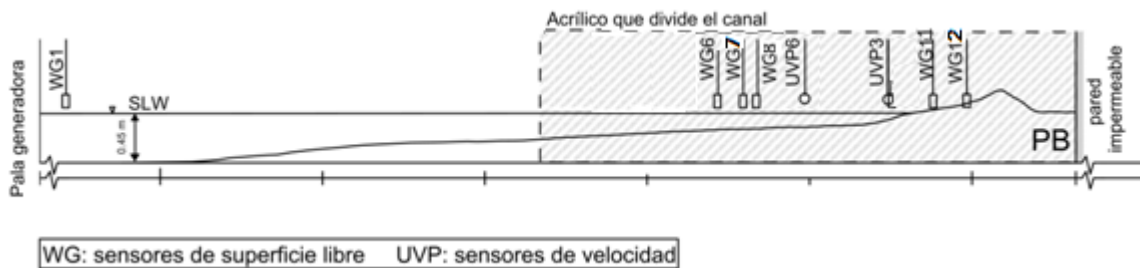
En el perfil A, la duna tiene una altura de 0.219 m con un ancho en la base de 0.77 m, la pendiente en la cara expuesta es de  $26^\circ$  y la cara protegida de  $32^\circ$ . Tiene una berma horizontal con longitud de 0.35 m, desde ahí la pendiente media de la playa es de  $8^\circ$  con una continuación de  $3^\circ$  hasta llegar al fondo del canal, Figura 4.9(a).

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  $16^\circ$  y la de la cara protegida es de  $20^\circ$ . La pendiente de la playa es de  $5^\circ$  desde el pie de la duna hasta tocar el fondo del canal, Figura



4.9(b).

(a)



(b)

Figura 4.9. Esquema del modelo para el perfil A y B (Ordéiz, 2014)

Se realizaron trece ensayos resultado de la combinación de cinco estados de mar, dos perfiles y dos alturas de dique. Se efectuaron con oleaje irregular de espectro Jonswap con  $\gamma = 3.3$ , se utilizó el sistema de absorción activa para eliminar las ondas reflejadas por el modelo experimental en la pala generadora del oleaje. El nivel medio del agua fue de 0.45 m que se aumento hasta 0.5 m para simular sobre-elevación por marea de tormenta. En lo que respecta a la arena utilizada en los ensayos, posee un D50 de 0.142 mm, con un porcentaje de finos de 6.035 y con un coeficiente de uniformidad de 1.42 (Ordéiz, 2014, p.48).

Se consideraron dos diques tipo arrecife con dimensiones de 15 y 30 cm altura y longitudes de 48 y 60 cm respectivamente, colocados de tal forma que, cuando se encuentre aguas abajo permaneciera totalmente sumergida, y otra en donde la cresta del mismo se encontrará a nivel de la superficie del agua.

En la tabla 4.1 se presenta detalladamente el programa de ensayos, donde  $h$  es la profundidad del agua,  $H$  es altura de ola y  $T$  es el periodo. De ahora en adelante se referirá a los ensayos con la siguiente nomenclatura, el primer número hace referencia al número de ensayo (1-13), la siguiente letra se refiere al perfil con y sin berma respectivamente (A, B), y el último número se refiere a la altura de la estructura (15 o 30 cm). Cuando se refiera a en ambos perfiles se tomarán ambas letras, por ejemplo, 1AB\_15.

Tabla 4.2. Configuración de los ensayos

Caso	Número de ensayo	Perfil	h(m)	T(s)	H(m)	Estados de mar	Altura de la estructura (cm)
1A_15	1	A	45	0.894	0.05	TBI*	15
2A_15	2	A	45	1.118	0.05	TBI	15
3A_15	3	A	45	0.894	0.10	TMI*	15
4A_15	4	A	45	1.118	0.10	TMI	15
5A_15	5	A	48	1.118	0.10	TSI*	15
6A_15	6	A	45	0.894	0.05	TBI	15
7A_15	7	A	45	1.118	0.05	TBI	15
8A_15	8	A	45	0.894	0.10	TMI	15
9A_15	9	A	45	1.118	0.10	TMI	15
10A_15	10	A	48	1.118	0.10	TSI	15
11A_30	11	A	45	0.894	0.05	TBI	30
12A_30	12	A	45	1.118	0.10	TMI	30
13A_30	13	A	48	1.118	0.10	TSI	30
1B_15	1	B	45	0.894	0.05	TBI	15
2B_15	2	B	45	1.118	0.05	TBI	15
3B_15	3	B	45	0.894	0.10	TMI	15
4B_15	4	B	45	1.118	0.10	TMI	15
5B_15	5	B	48	1.118	0.10	TSI	15
6B_15	6	B	45	0.894	0.05	TBI	15
7B_15	7	B	45	1.118	0.05	TBI	15
8B_15	8	B	45	0.894	0.10	TMI	15
9B_15	9	B	45	1.118	0.10	TMI	15
10B_15	10	B	48	1.118	0.10	TSI	15
11B_30	11	B	45	0.894	0.05	TBI	30
12B_30	12	B	45	1.118	0.10	TMI	30
13B_30	13	B	48	1.118	0.10	TSI	30

\*TBI=Tormenta de baja intensidad, TMI=tormenta de media intensidad, TSI = tormenta de severa intensidad

La metodología que se siguió para la construcción del modelo fue la siguiente:

1. Los perfiles se realizaron con arena, procurando de no compactar el material y con las especificaciones antes descritas;
2. Posteriormente se procedió a colocar el dique en la posición indicada de acuerdo a cada ensayo,
3. A continuación, la colocación de los sensores de nivel y los de velocidad antes y después del dique en ambos perfiles, se tomaban fotografías de los perfiles de playa,
4. Se procedió al llenado del canal, calibración de los sensores de nivel, la generación del oleaje con espectro Jonswap y duración de 46 minutos,
5. Posteriormente se captó video al inicio y poco antes del término del ensayo (de aproximadamente 2 min cada uno),
6. Al finalizar el ensayo se vació el canal, tomaron niveles de ambos perfiles.
7. Se retiraron los elementos de cada dique,
8. Se removió la arena para evitar la compactación para el siguiente ensayo, dejándola secar por 24 o 36 horas según requiriera
9. Se repite el ciclo desde el paso 1.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Energía

Después de realizarse las pruebas y procesar los datos obtenidos de los sensores de nivel, se procedió a utilizar la metodología de Baquerizo, 1995, para estimar la energía transmitida, disipada y reflejada por los diques modulares ensayados en canal, partiendo de la sección tipo que se hace referencia en la Figura 4.3. En la Tabla 5.1 se muestran los coeficientes de energía obtenidos para cada ensayo y perfil.

Tabla 5.1. Coeficientes de reflexión, transmisión y disipación para perfil A y B de cada ensayo, utilizando la metodología de Baquerizo, 1995

PERFIL A				PERFIL B			
CASO	KR	KT	D	CASO	KR	KT	D
1A_15	0.5807	0.5102	0.6344	1B_15	0.6112	0.5771	0.5417
2A_15	0.3928	0.8474	0.3572	2B_15	0.4756	0.7660	0.4324
3A_15	0.3512	0.7425	0.5704	3B_15	0.3389	0.6889	0.6408
4A_15	0.3894	0.8209	0.4178	4B_15	0.3701	0.6091	0.7015
5A_15	0.3586	0.8590	0.3654	5B_15	0.4337	0.8477	0.3055
6A_15	0.4211	0.3127	0.8514	6B_15	0.5478	0.3992	0.7353
7A_15	0.3550	0.7468	0.5624	7B_15	0.3829	0.7980	0.4654
8A_15	0.4098	0.2718	0.8707	8B_15	0.5783	0.3891	0.7171
9A_15	0.3124	0.5261	0.7910	9B_15	0.4162	0.6397	0.6462
10A_15	0.4006	0.2787	0.8728	10B_15	0.4515	0.5407	0.7098
11A_30	0.3251	0.1623	0.9316	11B_30	0.5862	0.3457	0.7327
12A_30	0.1896	0.1600	0.9687	12B_30	0.3438	0.3613	0.8668
13A_30	0.3714	0.1312	0.9191	13B_30	0.4591	0.2566	0.8506

- Los valores en verde, representan los coeficientes de disipación altos
- Los valores en rojo, representan los coeficientes de disipación más bajos

En el desarrollo de estas pruebas se observó una tendencia al aumento de la disipación del oleaje conforme la profundidad disminuye. Este fenómeno se presenta en los ensayos 6A y B\_15 al 13A y B\_30 cuando la corona de la estructura alcanza la superficie libre del agua, donde, como ya se mencionó, la disipación del oleaje tiende a aumentar. Por



el contrario, los casos en los que la estructura tiene mayor nivel de sumergencia, los coeficientes de disipación presentan disminución. Aunado a lo anterior se presenta la disipación más alta, mostrando mejores resultados con los diques de mayor dimensión. Por lo que se puede inferir que la estructura tiene baja capacidad de disipación para profundidades mayores con estructuras de bajas dimensiones.

Así mismo, el coeficiente de transmisión presenta disminución cuando los ensayos presentan niveles de disipación elevados 1A\_15, 6A\_15, 8A\_15, 9A\_15, 10A\_15, 11A\_30, 12A\_30, 13A\_30 perfil A, igualmente para el perfil B en el cual se presentan los mismos ensayos, excepto el 1B\_15, que es sustituido por el 4B\_15; a su vez, el perfil muestra excepciones en 4B\_15, 9B\_15 y 10B\_15 ya que el KT presenta valores elevados. Por otra parte, la profundidad relativa de la estructura afecta la transmisión del oleaje, es decir: mientras más profundo se encuentre la estructura, mayor será este coeficiente.

Se observa que los trenes de mayor periodo presentan menor reflexión, no obstante, esta aseveración no aplica en los ensayos en los que el tirante de agua se incrementa (10A\_15, 10B\_15, 13A\_30 y 13B\_30). También se observa en el 3A\_15 y 3B\_15 cuando el periodo es bajo ( $T=0.894$ ) y la altura de ola de 10 cm. y en donde la estructura presenta mayor altura (11A\_30). Aunado a esto se observa que cuando el oleaje se propaga sobre un fondo con pendiente suave como es el caso del perfil B, la reflexión tiende a ser mayor y en consecuencia para el perfil A se obtiene la menor reflexión.

## 5.2 Morfología del perfil de playa

Como parte de la metodología empleada para estudiar el comportamiento de la playa, se midieron los perfiles finales con influencia de la estructura sumergida, los cuales permitieron cuantificar el estado y cambios en la playa, por medio del volumen y desplazamiento transversal, de tal forma que para la pérdida o ganancia de playa se tomó como referencia el perfil inicial. Los registros finales se presentan desde la Figura 5.1 a la Figura 5.13. El análisis del comportamiento del perfil de playa ante la estructura y los diferentes trenes de oleaje permitirá, tener una visión más amplia del funcionamiento del dique y como afecta su entorno.

En cada una de las figuras se muestran las pruebas por bloque, según el tren de oleaje mostrado en la tabla 4.1, en los cuales se observan dos perfiles, el perfil inicial y el perfil posterior a la prueba, así como, el tirante de agua con sus dimensiones y la ubicación del dique.

A continuación, se presenta el análisis del primer bloque, el cual comprende las pruebas 1AB\_15, 6AB\_15 y 11AB\_30

Tabla 5.2. Perdida y ganancia de volumen, para ambos perfiles

Prueba Perfil A	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen ganado (cm <sup>3</sup> )	Prueba Perfil B	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen ganado (cm <sup>3</sup> )
1A_15	8865.776	1843.304	1B_15	42904.380	0.000
6A_15	2690.912	793.996	6B_15	3044.504	444.728
11A_30	2842.928	2293.184	11B_30	37969.656	0.000

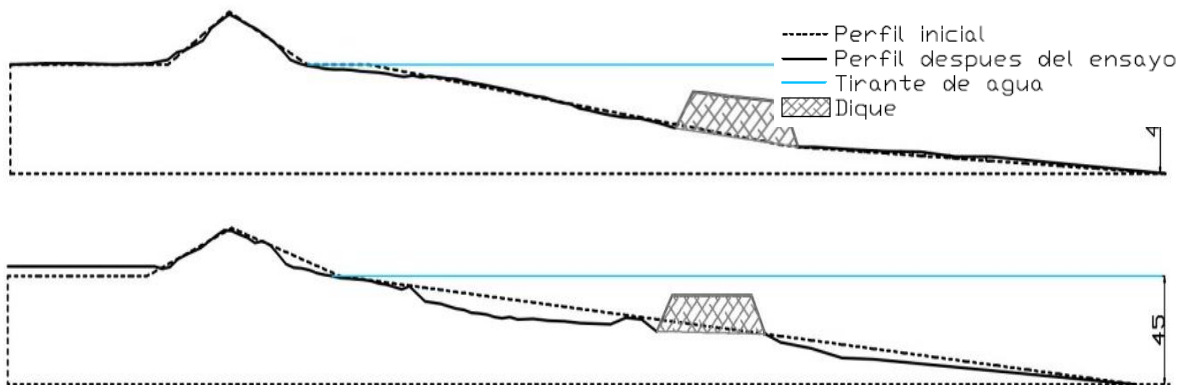


Figura 5.1. Respuesta morfológica para la prueba 1A\_15 arriba y 1B\_15 abajo

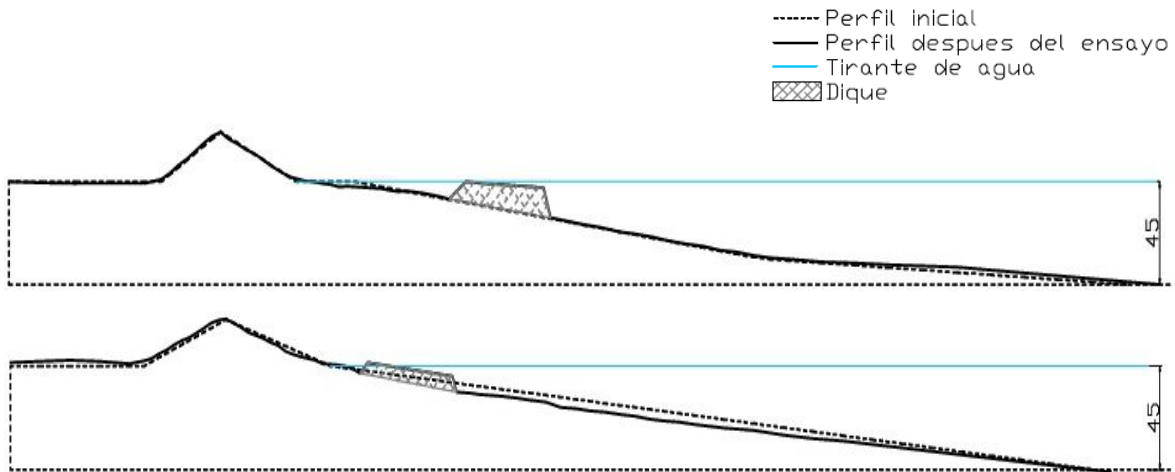


Figura 5.2.-Respuesta morfológica para la prueba 6A\_15 arriba y 6B\_15 abajo

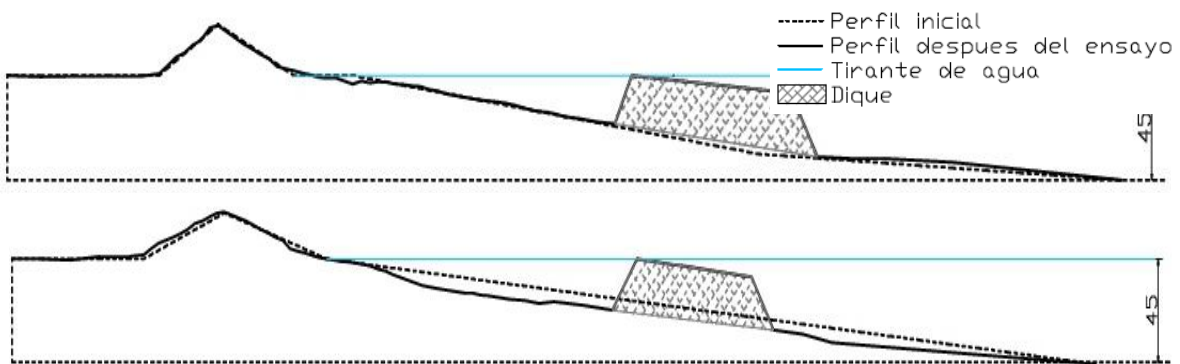


Figura 5.3.-Respuesta morfológica para la prueba 11A\_30 arriba y 11B\_30 abajo

### ***Comparación de las pruebas***

Para el perfil A se presenta acreción en la parte baja de la duna, erosión en gran parte de la berma, seguida de formación de barras con acreción en la parte central de la pendiente, y un seno en la parte baja del perfil hasta pie de dique (1A\_15); por el contrario, la formación de barras no se presenta en prueba 6A\_15 debido a que el dique se encuentra más cercano a la playa, por tanto, este fenómeno no se termina de desarrollar; mientras que 11A\_15 muestra erosión en parte de la duna y la berma así como formación de barras con acreción en la parte central y un seno en la parte baja del perfil hasta pie de dique.

Con respecto al Perfil B, se percibe retroceso en la línea de costa desde la parte baja de la duna, la formación de un seno al finalizar esta, a partir de aquí se observa erosión, hasta formarse una barra frente al dique (1B\_15), posteriormente, se presenta erosión en la

base de la estructura; con relación al 11B\_30 se presenta mismo fenómeno, pero menos marcados. A comparación de las pruebas anteriores, para el 6B\_15 se observa descenso en un punto más alto de la duna, a partir de ahí se forma depósito de material a pie de dique. Aunado a esto es posible observar erosión a pie de dique.

Con respecto al volumen, se observa que en ambos perfiles se tiene mayor pérdida, principalmente para la prueba 1AB\_15.

**Para el segundo bloque se presentan las pruebas 2AB\_15 y 7AB\_15**

Tabla 5.3. Perdida y ganancia de volumen, para ambos perfiles

Prueba Perfil A	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen ganado (cm <sup>3</sup> )	Prueba Perfil B	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen ganado (cm <sup>3</sup> )
2A_15	31.8283	327.6956	2B_15	31.8283	327.6956
7A_15	67.5737	38.445	7B_15	67.5737	38.445

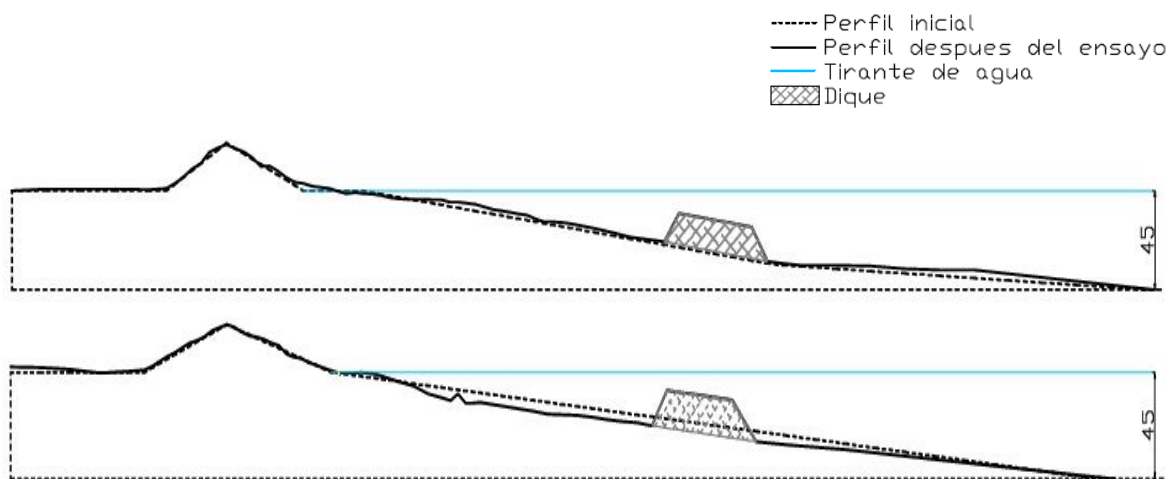


Figura 5.4.-Respuesta morfológica para la prueba 2A\_15 arriba y 2B\_15 abajo

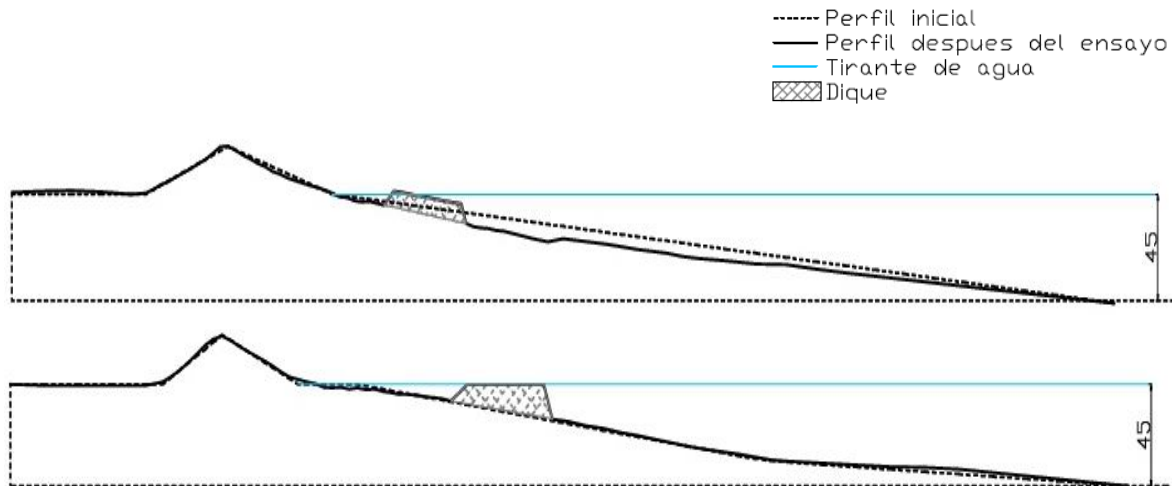


Figura 5.5.-Respuesta morfológica para la prueba 7A\_15 arriba y 7B\_15 abajo

### *Comparación de las pruebas*

Para el perfil A se observa acreción que abarca la mitad de la duna y parte de la berma, a partir de la cual se genera una leve erosión al inicio de la pendiente. Posteriormente existe depósito de sedimento hasta pie de dique, sin embargo, la prueba 7A\_15 presenta erosión en la mayor parte de la berma y un leve depósito a pie de dique.

Con relación al perfil B, el comportamiento entre las pruebas, es muy diferente, ya que en la prueba 2B\_15 se observa acreción a pie de duna, seguida de un depósito y una barra al inicio del cambio de pendiente en la playa. Posteriormente existe erosión desde la parte media del perfil (pendiente), hasta pie de dique, mientras que para 7B\_15 tiende a mostrar erosión desde la cresta de la duna hasta poco antes de la misma, donde hay acumulación de sedimento, a partir de ahí hasta pie de dique comienza la erosión. Aunado a esto es posible observar erosión a pie de dique.

Con respecto al volumen, se observa que para la prueba 2AB\_15 se tiene ganancia de sedimento, mientras que para la 7AB\_15 el máximo volumen desplazado es negativo. No obstante, este bloque presenta el menor volumen desplazado de todas las pruebas.

**En el Tercer bloque se analizaron las pruebas 3AB\_15 y 8AB\_15**

Tabla 5.4. Perdida y ganancia de volumen, para ambos perfiles

Prueba Perfil A	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen ganado (cm <sup>3</sup> )	Prueba Perfil B	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen ganado (cm <sup>3</sup> )
3A_15	9095.840	4822.180	3B_15	18374.652	5318.148
8A_15	5815.712	205.048	8B_15	2362.212	76.220

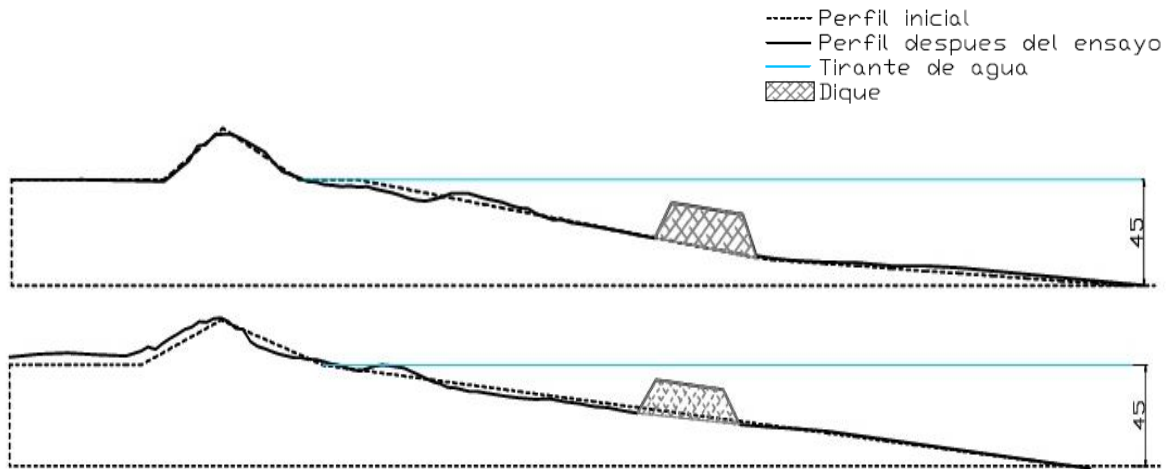


Figura 5.6.-Respuesta morfológica para la prueba 3A\_15 arriba y 3B\_15 abajo

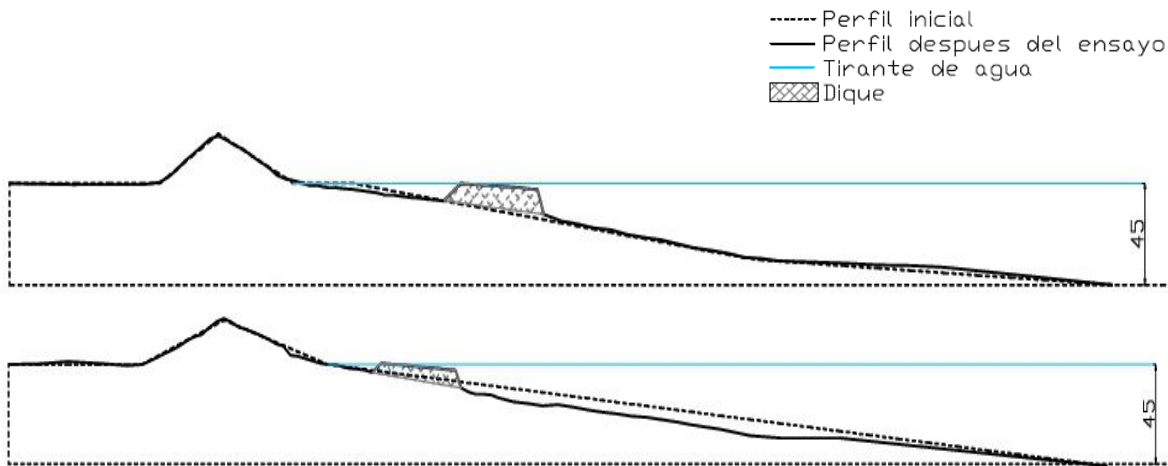


Figura 5.7.-Respuesta morfológica para la prueba 8A\_15 arriba y 8B\_15 abajo

### Comparación de las pruebas

Perfil A, ambas pruebas tienen comportamiento muy similar, presentan poca erosión en la duna y acreción en la parte baja de la misma, mientras que la berma y parte de la pendiente sufre erosión. No obstante, debido a que en 3A\_15 la colocación del dique se encuentra a mayor profundidad se tiene mayor longitud de playa por lo cual se observa otro cambio en el perfil, creando un depósito a pie de dique.

Con respecto al Perfil B, el comportamiento de ambas pruebas es similar, se observa erosión desde la parte superior hasta poco antes de pie de duna, donde el sedimento se acumula formando una gran barra en la pendiente, seguida de erosión hasta pie de dique. A pesar de que el comportamiento entre éstos es similar, el 8A\_15 tiende a mostrar una zona menos erosionada de la duna hasta pie de dique. Aunado a esto es posible observar erosión a pie de dique.

De acuerdo al volumen, se observa que para ambas pruebas se presenta pérdida de sedimento en ambos perfiles.

### En el cuarto bloque se tienen las pruebas 4AB\_15, 9AB\_15 y 12AB\_30

Tabla 5.5. Perdida y ganancia de volumen, para ambos perfiles

Pruebas Perfil A	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen ganado (cm <sup>3</sup> )	Pruebas Perfil B	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen ganado (cm <sup>3</sup> )
4A_15	11377.068	8859.236	4B_15	24443.536	2312.064
9A_15	2331.496	1225.156	9B_15	7324.952	0.000
12A_30	1217.140	12339.708	12B_30	34127.392	72.396

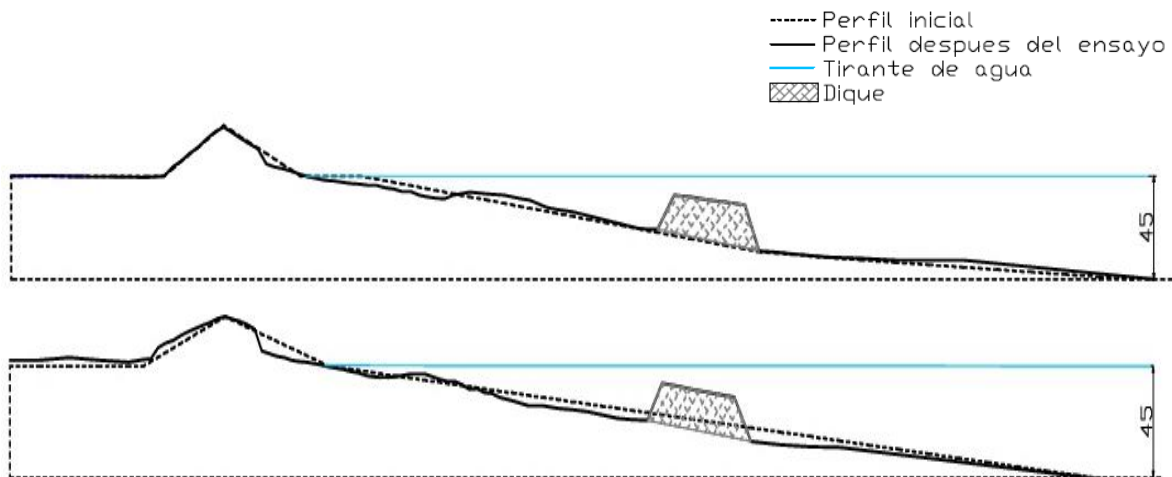


Figura 5.8.-Respuesta morfológica para la prueba 4A\_15 arriba y 4B\_15 abajo

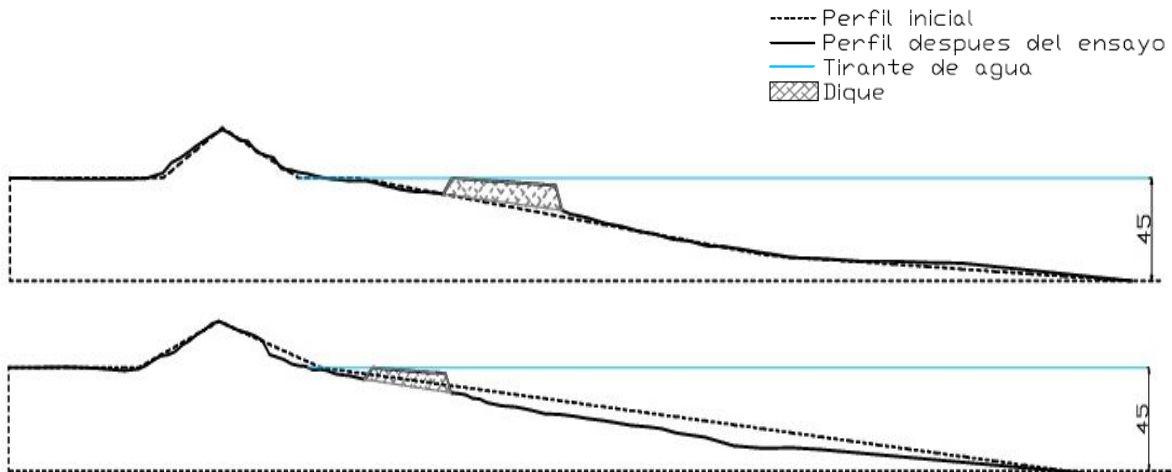


Figura 5.9.-Respuesta morfológica para la prueba 9A\_15 arriba y 9B\_15 abajo

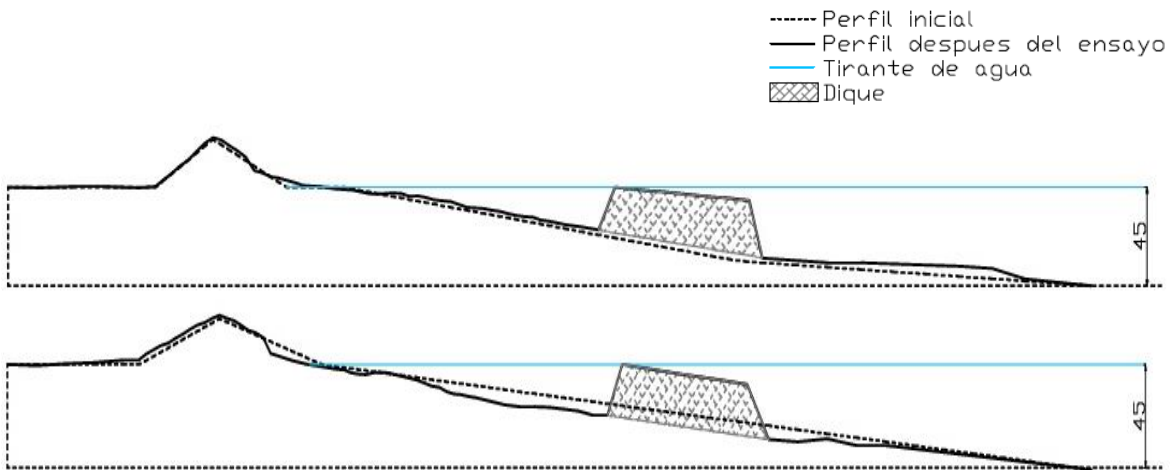


Figura 5.10.-Respuesta morfológica para la prueba 12A\_30 arriba y 12B\_30 abajo

### *Comparación de las pruebas*

Con respecto al perfil A, las pruebas 4A\_15 y 12A\_30 tienen comportamiento muy similar, presentan erosión en la parte baja de la duna mientras que la berma y el inicio de la pendiente muestran leve depósito seguido de erosión, y acumulación de arena intermitente en forma de barras a pie de dique. Sin embargo, 9A\_15 presenta acreción en a pie de duna e inicio de la berma, a partir de ahí, se presenta erosión hasta llegar a la estructura.

Para el perfil B, las pruebas presentan comportamiento similar, mientras, el 9B\_15 y 12B\_30 tienden a manifestar erosión en la parte superior de la duna hasta pie de dique, la prueba 4B\_15 presenta leve ganancia de sedimento en la pendiente media; sin embargo, la erosión en duna comienza poco antes que en las otras pruebas. Aunado a esto es posible



observar erosión a pie de dique. Con respecto al volumen, se observa que para ambas pruebas se presenta pérdida de sedimento en ambos perfiles.

**En el quinto bloque se presentan las pruebas 4AB\_15, 9AB\_15 y 12AB\_30**

Tabla 5.6. Perdida y ganancia de volumen, para ambos perfiles

Pruebas Perfil A	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen ganado (cm <sup>3</sup> )	Pruebas Perfil B	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen ganado (cm <sup>3</sup> )
5A_15	6562.572	9475.008	5B_15	28024.396	5970.488
10A_15	6655.932	532.956	10B_15	6952.264	814.996
13A_30	6737.056	5604.172	13B_30	35482.176	2474.924

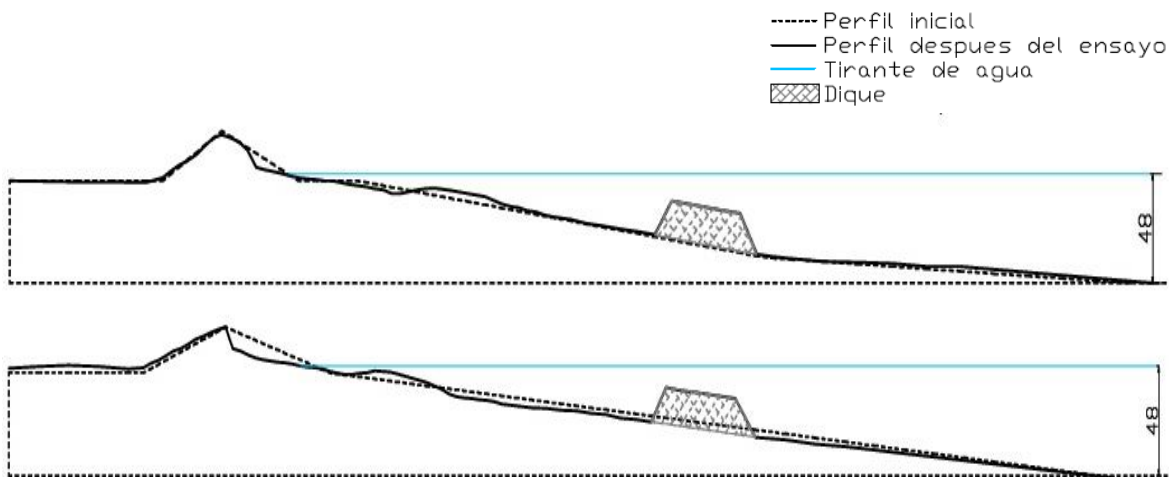


Figura 5.11.-Respuesta morfológica para la prueba 5A\_15 arriba y 5B\_15 abajo

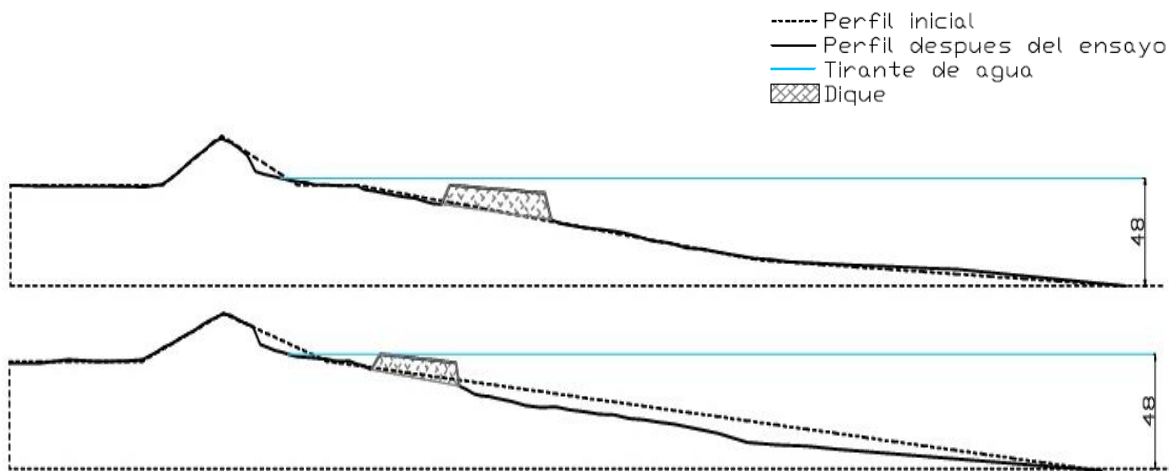


Figura 5.12.-Respuesta morfológica para la prueba 10A\_15 arriba y 10B\_15 abajo

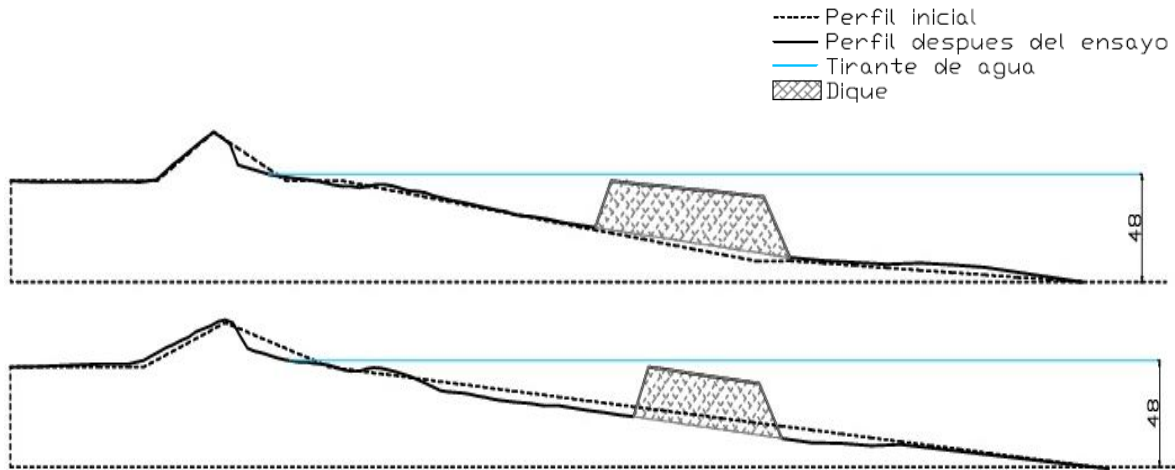


Figura 5.13.-Respuesta morfológica para la prueba 13A\_30 arriba y 13B\_30 abajo

### *Comparación de las pruebas*

Perfil A, las pruebas presentan erosión en parte de la duna incluso a pie de la misma, mientras que parte de la berma y pendiente muestran leve depósito seguido de erosión, a mitad de la pendiente se presenta una duna. Por el contrario, 10A\_15 presenta erosión al término de la berma hasta llegar al dique.

En cuanto al perfil B, las pruebas tienden a mostrar erosión que comprende la parte superior de la duna al pie de la misma, posteriormente se forma una duna y se erosiona hasta pie de dique. en contraste con lo anterior, la erosión en duna para 5B\_15 comienza en la cresta, un poco antes que, en las otras pruebas, mientras que para 10B\_15 solo existe erosión en duna y leve acreción de sedimento a pie de dique.

En estas pruebas se presenta erosión cercana a la cresta de la duna, debido a la altura del tirante de agua ya que es mayor en este bloque. Estos desplazamientos de la zona de rotura, así como los cambios del nivel de disipación en la playa y el transporte de sedimentos son debidos a la reflexión que ocasiona el set-up.

Con respecto al volumen, se observa que la prueba 5A\_15 presenta ganancia de sedimento y pérdida en 5B\_15, mientras que para las otras pruebas se presenta pérdida de sedimento en ambos perfiles.

### *Observaciones generales de los bloques*

Los cambios del perfil de playa inducido por cada una de las tipologías que se realizaron tomando como base el perfil inicial, mostraron lo siguiente:

El movimiento del sedimento en el perfil de playa en cada bloque suele ser similar, inclusive en las pruebas en el que el dique se hallaba más cercano a la playa; sin embargo, debido a la cercanía que tiene la estructura con la costa no se observan los cambios vistos cuando la estructura se encuentra a mayor profundidad, ya que está interrumpe la formación de otros fenómenos.

Se presentaron casos de erosión en aguas profundas posterior al dique, generalmente en el perfil B. Este fenómeno es debido a la acción del oleaje sobre la estructura, el cual genera reflexión en lugar de disipación, aumentando la capacidad del transporte de sedimentos hacia aguas más profundas. Aunado a lo anterior la socavación en el pie del dique es mayor cuando la reflexión aumenta, presentándose esencialmente en este perfil.

Además, se presentan casos con mayor erosión y/o pérdida de sedimento cuando el KT es alto, esto se observa en las pruebas donde la estructura se encuentra a mayor profundidad, es decir, los pruebas 2A y B\_15, 3A y B\_15, 4A y B\_15, 5A y B\_15 así también en 7A y B\_15.

El origen la erosión en campo cercano a pie de estructura presentado en cada uno de las pruebas del perfil B es debido al efecto de turbulencia generada por la reflexión de las olas, y/o corrientes inducidas al pie de la estructura.

### 5.3 Desplazamiento a pie de duna vs Iribarren pico a pie de estructura

Los resultados de la respuesta morfológica de la playa se complementan con los siguientes datos, los cuales toman en cuenta los desplazamientos del material granular, en longitud ( $\Delta y$ ) y profundidad ( $\Delta z$ ) a pie de duna, así como el Número de Iribarren pico a pie de dique.

Se relacionó el desplazamiento del material granular respecto al tirante de agua de cada prueba con el número de Iribarren a pie de dique  $I_{r_p}$  (tabla 5.7). Lo cual permite conocer el comportamiento a pie de duna, la interacción del oleaje y el talud y determina el tipo de rompiente ante la estructura. Estos resultados ayudaran a establecer si la energía inducida por el oleaje a través del dique sumergido permite la acreción o erosión de la duna.

Para la obtención de los valores del  $I_{r_p}$  se utilizó la siguiente ecuación

$$I_{r_p} = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{Hs/Lp}}$$

donde:  $I_{r_p}$  es el número de Iribarren, adimensional;  $\tan\alpha$  representa la pendiente de la playa más la pendiente del dique ( $45^\circ$ ), en grados;  $Hs$  simboliza la altura de ola significativa, en metros, mientras que  $Lp$  refiere a la longitud de ola pico, en metros.

Con respecto  $\tan\alpha$ , se presenta variación de acuerdo al perfil de playa, en el perfil A se presenta pendiente de  $53^\circ$ , mientras que el perfil B tiene  $50^\circ$ . Además, el ángulo cambió para las pruebas donde la estructura era más amplia, debido a que la colocación requería del desplazamiento de la estructura para mantenerla dentro del tirante de agua máximo (30 cm) teniendo así una pendiente de  $48^\circ$ .

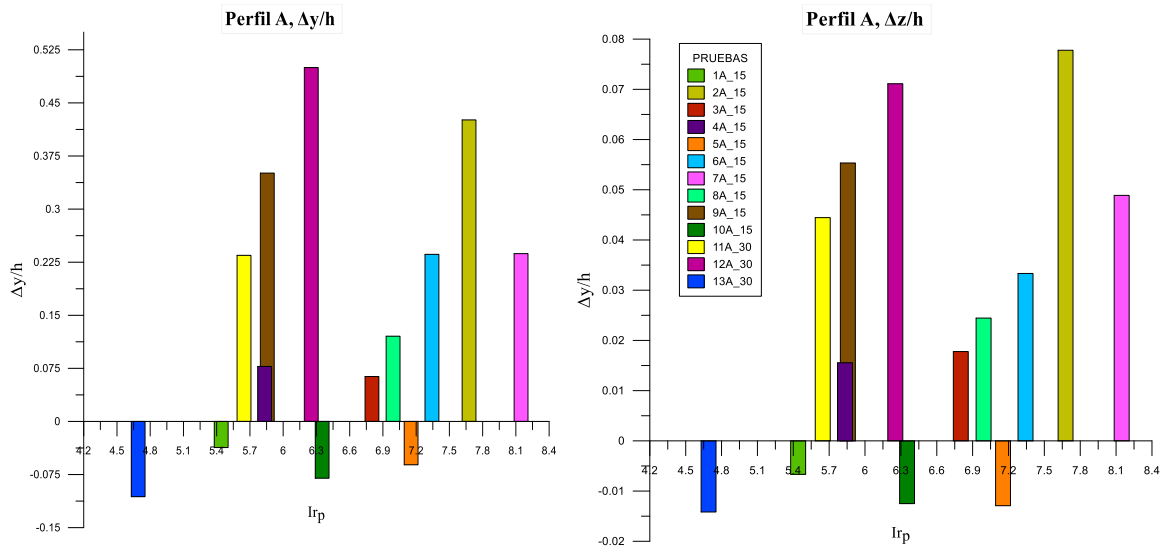
Tabla 5.7.- Resultados morfológicos: Relación entre el Número de Iribarren a pie de dique y el desplazamiento de línea de costa  $\Delta y/h$ ,  $\Delta z/h$ , en los perfiles A y B

Perfil A	$\Delta y$ (cm)	$\Delta z$ (cm)	$\Delta y/h$	$\Delta z/h$	Irp	Perfil B	$\Delta y$ (cm)	$\Delta z$ (cm)	$\Delta y/h$	$\Delta z/h$	Irp
1A_15	-1.66	-0.3	-0.037	-0.007	5.441	1B_15	-5.00	-0.7	-0.111	-0.016	4.174
2A_15	19.17	3.5	0.426	0.078	7.676	2B_15	2.29	0.72	0.051	0.016	5.756
3A_15	2.86	0.8	0.064	0.018	6.801	3B_15	10.00	1.57	0.222	0.035	6.726
4A_15	3.5	0.7	0.078	0.016	5.833	4B_15	-1.51	-0.18	-0.034	-0.004	4.170
5A_15	-2.94	-0.62	-0.061	-0.013	7.155	5B_15	-9.54	-0.66	-0.199	-0.014	7.058
6A_15	10.62	1.5	0.236	0.033	7.342	6B_15	8.38	0.74	0.186	0.016	5.898
7A_15	10.67	2.2	0.237	0.049	8.146	7B_15	1.62	0.52	0.036	0.012	8.182
8A_15	5.42	1.1	0.120	0.024	6.992	8B_15	2.50	0.1	0.056	0.002	4.624
9A_15	15.79	2.49	0.351	0.055	5.857	9B_15	-9.19	-0.94	-0.204	-0.021	5.511
10A_15	-3.85	-0.6	-0.080	-0.013	6.352	10B_15	-15.82	-1.56	-0.330	-0.033	5.671
11A_30	10.56	2	0.235	0.044	5.646	11B_30	0.51	0.05	0.011	0.001	5.628
12A_30	22.5	3.2	0.500	0.071	6.253	12B_30	-10.00	-0.9	-0.222	-0.020	6.132
13A_30	-5.1	-0.68	-0.106	-0.014	4.691	13B_30	-16.17	-1.25	-0.337	-0.026	4.666

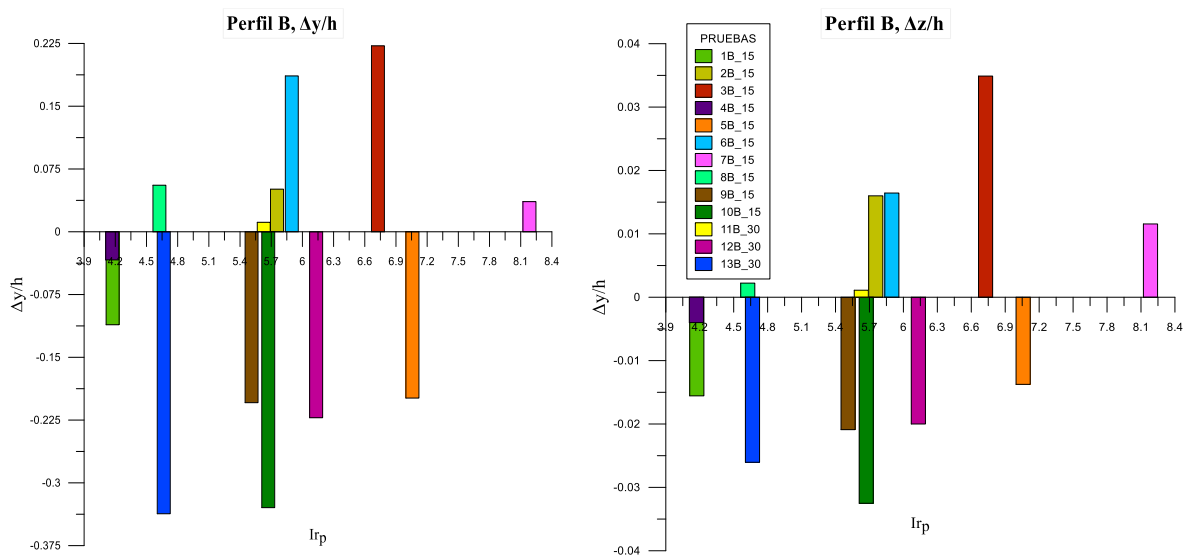
El proceso de disipación se debe a dos mecanismos: la rotura de la ola y la fricción de los contornos y el medio por el cual se propaga la ola. La eficiencia de la disipación de energía debida a la rotura depende del tipo de rotura que se produzca. Para identificar el tipo de rotura se recurre al número de Iribarren. Gilabert, (2007) refiere que las mayores tasas de disipación se encuentran para roturas en descrestamiento y voluta ( $Ir < 2.5$ ) mientras que son algo menores para roturas en colapso y oscilación ( $Ir > 2.5$ ) (p.18).

De acuerdo a lo anterior, es posible observar que, los valores de Iribarren pico obtenidos de cada prueba muestran que a pie de dique no se produce rotura, dado que  $Ir > 4$ .

A continuación, se presentan las gráficas que refieren el valor de Iribarren en el eje de las abscisas, como el desplazamiento del perfil en longitud y profundidad en el eje de las ordenadas, para ambos perfiles de playa.



Gráfica 5.1. Resultados morfológicos: Iribarren a pie de dique y desplazamiento de línea de costa  $\Delta y/h$ ,  $\Delta z/h$ , en el perfil A



Gráfica 5.2. Resultados morfológicos: Iribarren a pie de dique y desplazamiento de línea de costa  $\Delta y/h$ ,  $\Delta z/h$ , en el perfil B

De acuerdo con la gráfica 5.1, se presentan los valores del perfil A, en los cuales se muestra acreción en las pruebas 12A\_30, 11A\_30, 9A\_15, 8A\_15, 7A\_15, 6A\_15, 4A\_15, 3A\_15 y 2A\_15, aquellos pruebas que tienden a acrecentar longitudinal y transversalmente son 12A\_30 y 2A\_15, mientras que las pruebas que presentan erosión son 1A\_15, 5A\_15, 10A\_15 y 13A\_30, este último muestra notable desplazamiento.

Los desplazamientos del perfil B se muestran en la gráfica 5.2, en la cual, las pruebas que presentan acreción son 11B\_30, 8B\_15, 7B\_15, 6B\_15, 3B\_15 y 2B\_15; de los

cuales 6B\_15 y 3B\_15 tienden incrementar longitudinal y transversalmente. Por el contrario, aquellos que presentan erosión son 1B\_15, 4B\_15, 5B\_15, 9B\_15, 10B\_15, 12B\_30 y 13B\_30 de los cuales se puede observar que 10B\_15 y 13B\_30 presentan mayores desplazamientos.

### ***Observaciones: Iribarren a pie de dique y desplazamiento de línea de costa***

Se observa que los desplazamientos en ambos perfiles correspondientes a la profundidad ( $\Delta z$ ) son mínimas a comparación de los longitudinales. Asimismo, el perfil A tiende a acrecentar la playa; a diferencia del perfil B, es decir, presenta aumento en los valores de erosión. En general, se observa que cuando existe mayor desplazamiento ya sea longitudinal o transversal, la cresta del dique se encuentra a nivel de la superficie del agua.

Las pruebas que presentan erosión en ambos perfiles, están asociados al mismo tren de oleaje, es decir, las pruebas 4AB\_15, 9AB\_15 y 12AB\_30, en cuanto al perfil B se presenta en las pruebas 5B\_15, 10B\_15 y 13B\_30 (a 0.48 cm de profundidad), debido a que la intensidad del tren de oleaje era mayor ocasionando un importante desplazamiento del sedimento.

A pesar de que la prueba 1 y 6 presentan el mismo tren de oleaje, en la primera se observa mayor erosión en ambos perfiles, es posible que estos resultados se deban a la posición de la estructura ya que al encontrarse a mayor profundidad la retención de sedimento es menor que cuando el dique se encontraba en una posición mas cercana a la playa.

Al analizar la erosión con el número de Iribarren se observa que se reduce cuando el desplazamiento es máximo, pero solo aplica con tren de oleaje de tormenta severa ( $T=1.118$  s,  $H=0.10$  y  $h=48$ cm) para ambos desplazamientos del perfil A y para el perfil B en  $\Delta y$ . Por otro lado, para el perfil B el  $\Delta z$  presenta mayor desplazamiento con un Iribarren alto. Continuando con el perfil B para las pruebas con profundidad de 0.45 cm, el Iribarren es pequeño y comprende al desplazamiento mínimo, mientras que el máximo desplazamiento presenta Iribarren de valor medio.

Con respecto a las pruebas que presentan acreción, se observa que tienen en común la  $h=0.45$  cm en ambos perfiles; así también, cuando estos desplazamientos son máximos se tienen  $T=1.118$  s para el perfil A, en tanto para el perfil B revela  $T=0.894$  s.

Al presentarse una tormenta de media intensidad, como es el caso de la prueba 12AB\_30, el periodo y altura de ola afectan al perfil B debido a que presenta valores elevados que conllevan a la erosión, por el contrario, el perfil A presenta concentración de sedimento a pie de duna, a causa del perfil de playa (reflejante) y el tirante de agua bajo, los cuales permiten reducir los efectos del oleaje.

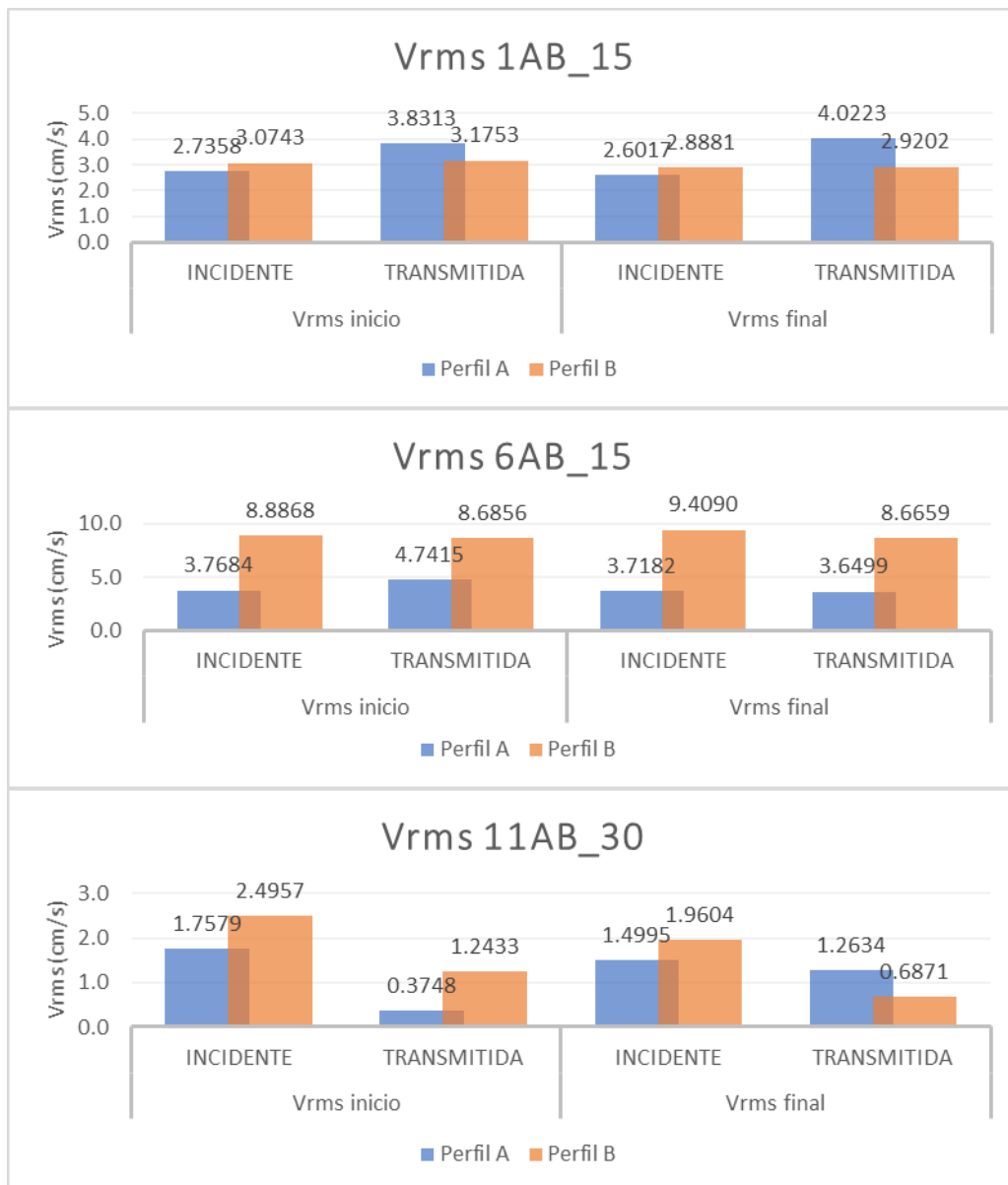
Al comparar la acreción a pie de duna con el número de Iribarren, se observa que al incrementar este número el desplazamiento también es mayor, esto se presenta en ambos perfiles. En contraste con lo anterior, cuando el  $I_{rp} > 8$  el desplazamiento del sedimento disminuye.

Se observa que el tirante de agua afecta el desplazamiento del sedimento ya que en profundidades de 0.45 cm la acreción a pie de duna es evidente, mientras que a 0.48 cm presenta erosión, a pesar de esto, existen excepciones en los cuales es probable que el periodo y altura de ola son los principales causantes de este fenómeno como se presenta en las pruebas 4B\_15, 9B\_15, y 12B\_30.



## 5.4 Hidrodinámica: Velocidad cuadrática media

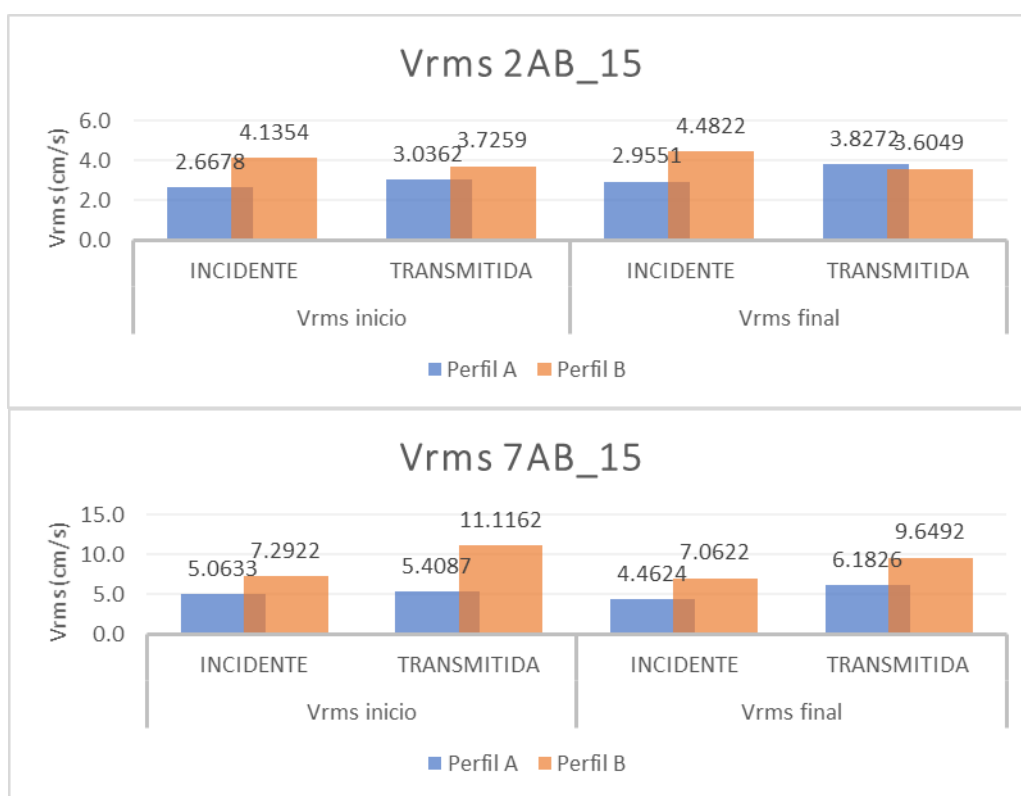
Con relación al comportamiento hidrodinámico se obtuvieron diagramas de velocidad del oleaje antes y después del dique, realizando la comparación de la velocidad cuadrática media incidente y la transmitida a través de la estructura, lo cual permitió obtener el valor absoluto de todas las velocidades. El objetivo de esta sección es observar el comportamiento de las velocidades, percibir cómo se comportan antes y después del dique, así como su influencia en el perfil de playa.



Grafica 5.3. Resultados hidrodinámicos: Velocidad cuadrática media incidente y transmitida a través del dique en las pruebas 1AB\_15, 6AB\_15 y 11AB\_30

En la gráfica 5.3 se ejemplifica la prueba 1AB\_15, 6AB\_15 y 11AB\_30 en el cual se consideran los mismos parámetros de oleaje. Al analizar los primeros dos minutos en cada perfil, y al comparar la velocidad incidente con la transmitida, se presenta incremento de la velocidad transmitida en el perfil A para 1A\_15 y 6A\_15; sin embargo, para los últimos minutos está solo disminuye para 6A\_15, mientras en los otros aumentan. Con respecto al perfil B, se presenta incremento de la velocidad al pasar por el dique en 1B\_15, mientras que, para el 6B\_15 y 11B\_30 existe disminución de la velocidad; este fenómeno también se presenta al finalizar la prueba.

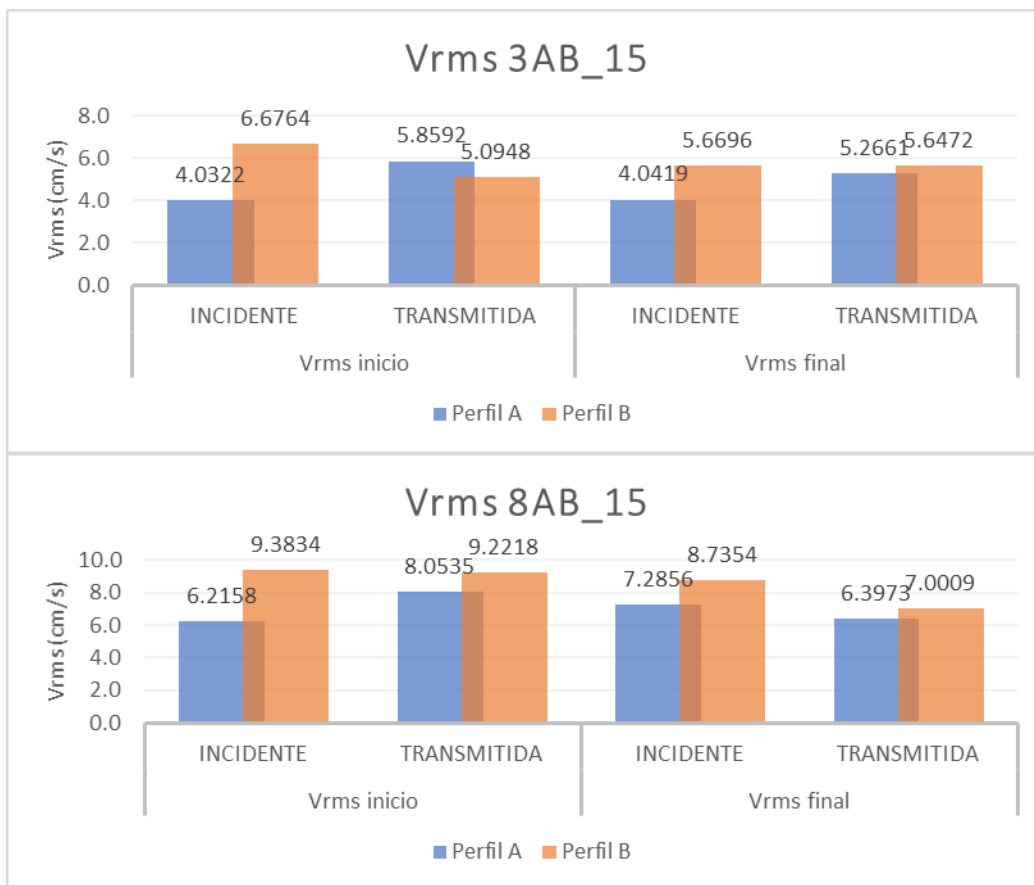
También se observa que, al comparar la velocidad transmitida obtenidos al inicio y fin de la prueba, el 1A\_15 y 11A\_30 del perfil A tienden a ganar velocidad después del dique, sin embargo, 6A\_15 presenta pérdida de velocidad, de igual manera el perfil B.



Grafica 5.4. Resultados hidrodinámicos: Velocidad cuadrática media incidente y transmitida a través del dique en las pruebas 2AB\_15 y 7AB\_15

En la gráfica 5.4 se ejemplifican las pruebas 2AB\_15 y 7AB\_15, en el cual se consideran los mismos parámetros de oleaje. Al analizar los primeros dos minutos y al comparar la velocidad incidente con la transmitida, se presenta incremento de la velocidad transmitida para el perfil A en ambas pruebas, mientras que en el perfil B disminuye para el 2B\_15. Para los últimos minutos la velocidad transmitida presenta comportamiento similar al inicio de las pruebas.

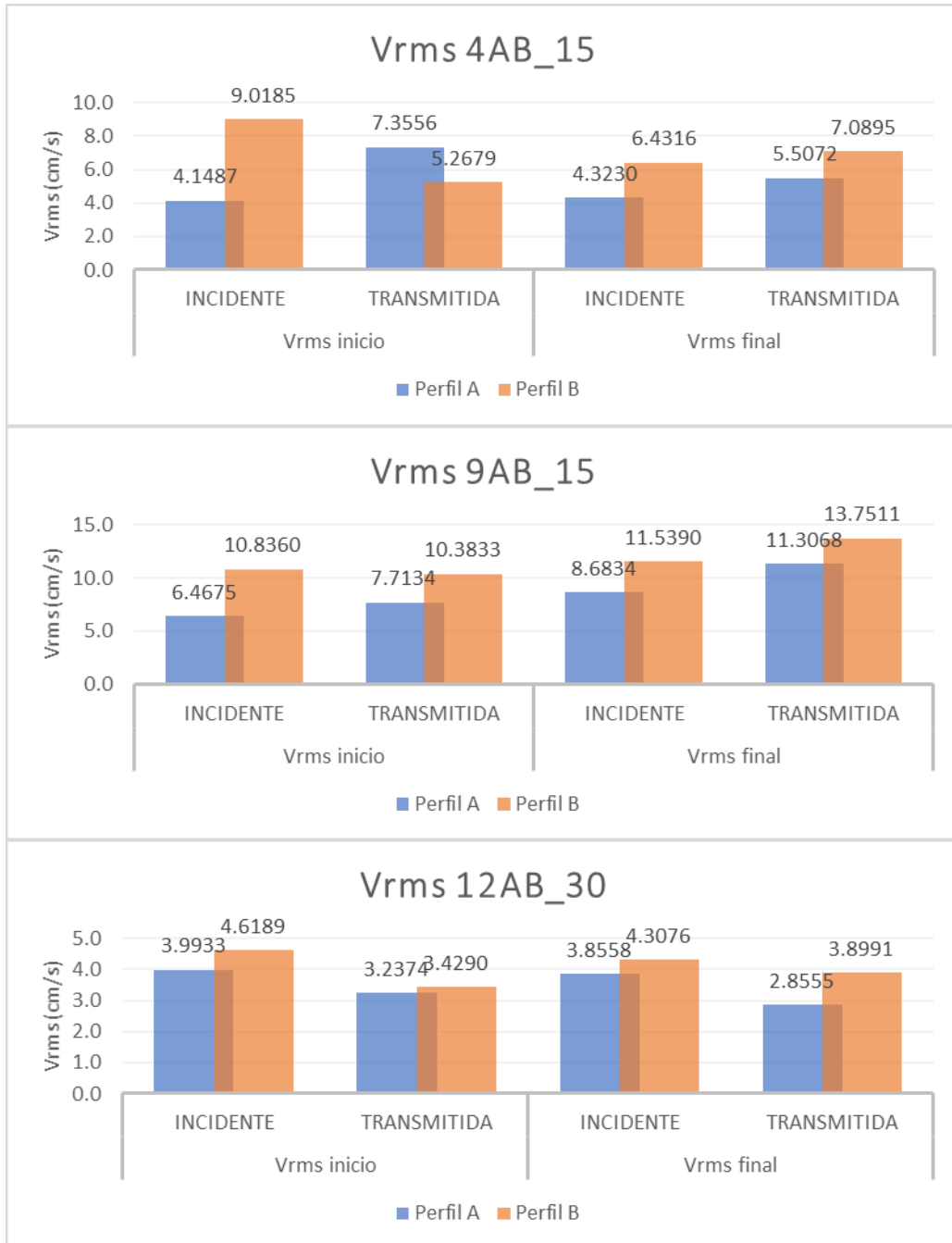
Al comparar los valores obtenidos al inicio y fin de la prueba se observa que, para ambas pruebas, el perfil A tiende a ganar velocidad después del dique, mientras que para el perfil B exhibe pérdida de velocidad



Grafica 5.5. Resultados hidrodinámicos: Velocidad cuadrática media incidente y transmitida a través del dique en las pruebas 3AB\_15 y 8AB\_15

En la gráfica 5.5 se ejemplifica las pruebas 3AB\_15 y 8AB\_15, en el cual se consideran los mismos parámetros de oleaje. Al analizar los primeros dos minutos y comparar la velocidad incidente con la transmitida, se observa que las velocidades transmitidas en el perfil A se incrementan; entre tanto, el perfil B presenta decremento en ambas pruebas. Para los últimos minutos la velocidad transmitida presenta comportamiento similar al inicio de las pruebas, sin embargo, presenta decaimiento en 8AB\_15.

Haciendo la comparativa de los valores obtenidos al inicio y fin de la prueba se observa que, para ambas pruebas el perfil A tiende a disminuir la velocidad después del dique, mientras que el perfil B presenta aumento de velocidad en el 3B\_15, en contraste, para 8B\_15 que presenta descenso.

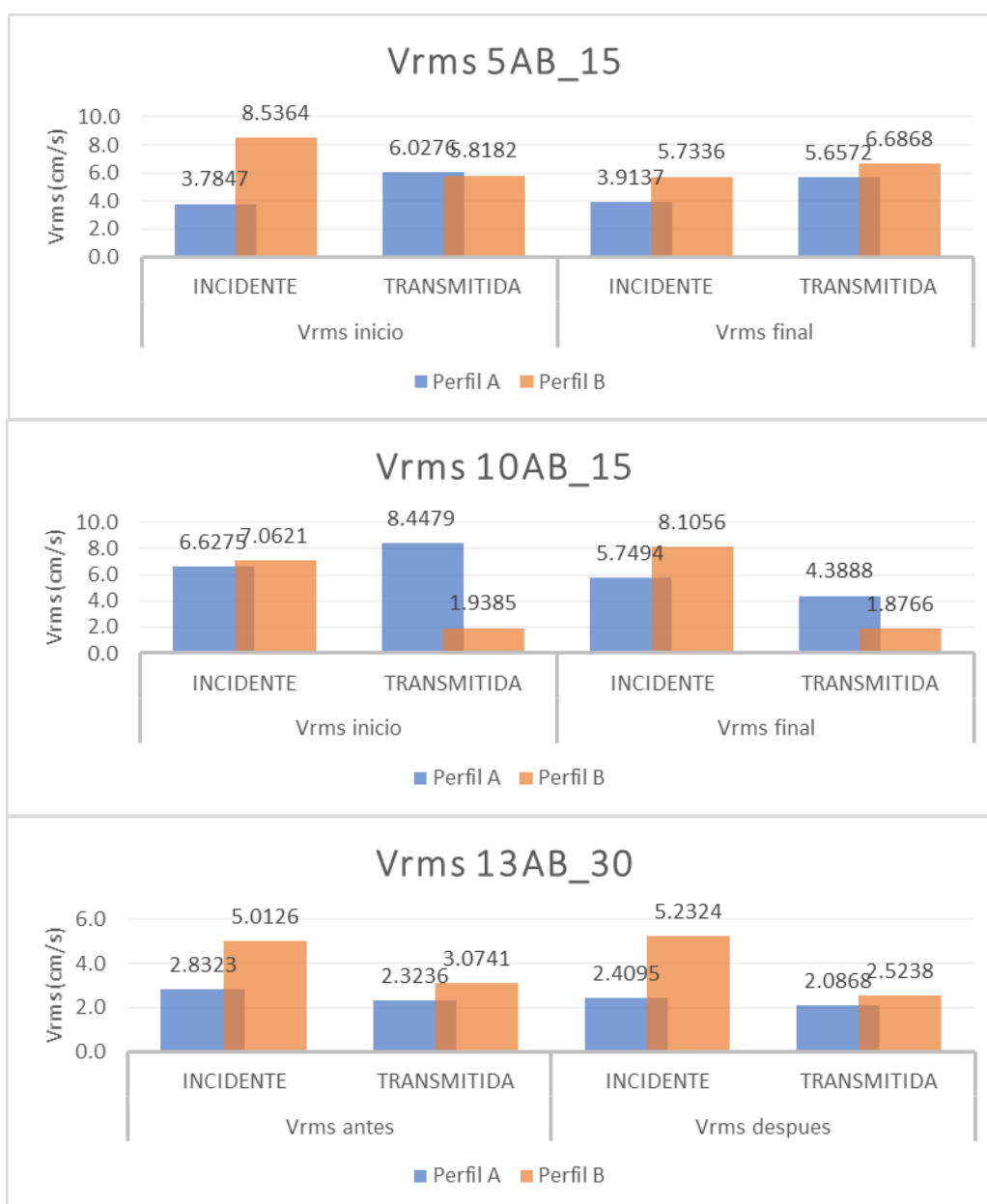


Grafica 5.6. Resultados hidrodinámicos: Velocidad cuadrática media incidente y transmitida a través del dique en las pruebas 4AB\_15, 9AB\_15 y 12AB\_30

En la gráfica 5.6 se ejemplifica las pruebas 4AB\_15, 9AB\_15 y 12AB\_30, en los cuales se consideran los mismos parámetros de oleaje. Al analizar los primeros dos minutos, y comparar la velocidad incidente con la transmitida, se observa que las velocidades transmitidas en 4A\_15 y 9A\_15 se incrementan, no así en 12A\_30. Con respecto al perfil B todas las pruebas presentan decremento en la velocidad. En cuanto a los

últimos minutos, el perfil A presenta el mismo comportamiento de cuando se inició la prueba; en cuanto al perfil B, para 4B\_15 se observa aumento en la velocidad

En cuanto a la comparación de la velocidad transmitida obtenidos al inicio y fin de la prueba, 4A\_15 y 12A\_30 tienden a disminuir velocidad después del dique, sin embargo, 9A\_15 presenta aumento de la misma. En lo que respecta al perfil B, existe ganancia de velocidad posterior al dique.



Grafica 5.7. Resultados hidrodinámicos: Velocidad cuadrática media incidente y transmitida a través del dique en las pruebas 5AB\_15, 10AB\_15 y 13AB\_30

En la gráfica 5.7 se ejemplifica las pruebas 5AB\_15, 10AB\_15 y 13AB\_30, en los cuales se consideran los mismos parámetros de oleaje. Al analizar los primeros dos minutos se percibe que las velocidades transmitidas en el perfil A se incrementan en 5A\_15 y 10A\_15, mientras que en el 13A\_30 disminuye. En cuanto al perfil B todas las pruebas presentan decremento en la velocidad. Con respecto a los últimos minutos, en ambos perfiles se presenta aumento en la velocidad para el 5AB\_15 mientras que E10 y E13 está disminuye.

Con respecto a la comparación de la velocidad transmitida obtenidas al inicio y fin de la prueba, para el perfil A las pruebas tienden a disminuir velocidad después del dique. No obstante, en el perfil B, el 13B\_30 aumenta la velocidad, por el contrario, 10B\_15 y 13B\_30 presentan disminución de está, posterior al dique.

### ***Observaciones: velocidad cuadrática media incidente y transmitida***

Al comparar los valores obtenidos de la energía del oleaje y la morfología de playa con las velocidades, se observa lo siguiente:

Cuando existe disipación de energía debido a un dique de grandes dimensiones (11AB\_30, 12AB\_30 y 13A\_30), la velocidad transmitida suele disminuir al inicio y final de la prueba en ambos perfiles. La prueba que presenta mayor disminución de las velocidades es 11AB\_30, la cual también presenta acreción a pie de duna; en cuanto a 12AB\_30 se presenta acreción para el perfil A y erosión en el B, así como la menor reflexión, además de la disipación más elevada; por otro lado, la prueba 13AB\_30 presenta la erosión. Debido a lo anterior la prueba que se considera con mejor respuesta en ambos perfiles es la 11AB\_30 que representa un tren de oleaje de tormenta de mediana intensidad, y permite la disminución de las velocidades desde el inicio de las pruebas, además, posee acreción a pie de duna.

Analizando los resultados obtenidos para los pruebas en los que no se tienen estructuras de amplias dimensiones (desde 1AB\_15 hasta 10AB\_15), se parte de la siguiente hipótesis, la cual considera que al aumentar la velocidad la alteración del sedimento se hace evidente, se tienen dos suposiciones, la primera, que debido a las altas velocidades exista erosión a pie de duna e inclusive en el perfil de playa, mientras que la segunda, el oleaje rompa antes de llegar a la playa provocando pérdida de velocidad, lo que permita la transferencia de sedimentos y por tanto acreción a pie de duna.

Dado lo anterior se observa que el comportamiento de las velocidades presenta variaciones, lo cual no necesariamente se adapta a lo antes descrito. A continuación, se presentan las pruebas en los que se asocia el comportamiento de la velocidad y el movimiento del sedimento.

Las pruebas que presentan incremento en la velocidad al inicio y término de las mismas son:

1A_15 y 5A_15	perfil A.	Erosión
1B_15	perfil B	Erosión
2A_15, 3A_15, 4A_15, 7A_15 y 9A_15	perfil A	Acreción
7B_15	perfil B	Acreción

Las pruebas que presentan incremento en la velocidad al inicio y disminución al término son:

10A_15	perfil A	Erosión
6A_15 y 8A_15	perfil A	Acreción

Las pruebas que presentan disminución de la velocidad al inicio y termino son:

10B_15	perfil B.	Erosión
2B_15, 3B_15, 6B_15 y 8B_15	perfil B	Acreción

Las pruebas que presentan disminución de la velocidad al inicio y aumento al término son:

4B_15, 5B_15 y 9B_15	perfil B	Erosión
----------------------	----------	---------

Así también, se observa que las velocidades tienden a aumentar para el perfil A, por el contrario, el perfil B muestra disminución de las mismas.

De acuerdo con lo anterior, se observa que la mayor ganancia de sedimentos en un perfil disipativo (perfil B), se tiene cuando la velocidad sufre decremento en toda la prueba, presentando periodos de ola bajos; se tiene que 2B\_15 y 3B\_15 son diques que permiten la transmisión del oleaje, mientras que 6B\_15 y 8B\_15 disipan la mayor parte del oleaje. Mientras tanto, en un perfil reflejante (perfil A), cuando la velocidad incrementa y se mantiene durante la prueba, presenta valores de acreción elevados; estas pruebas son 2A\_15, 3A\_15, 4A\_15 y 7A\_15, las cuales presentan un dique con valores de transmisión altos mientras que 9A\_15 disipa la mayor parte de la energía.

La disminución de la velocidad, presenta características de erosión, mayormente en el 10AB\_15 en ambos perfiles, a pesar de que este dique presenta valores de disipación altos. Referente al aumento de la velocidad en un perfil disipativo al término de la prueba, induce la mayor pérdida de sedimentos.

## 5.5 Velocidad media en el fondo y superficie

En canales y en cauces naturales, el flujo del agua es evidentemente tridimensional para cada punto de la corriente, es decir, el vector velocidad tiene componentes en las tres direcciones (X, Y, Z). Para hacer un análisis de la variación de velocidades en una sección cualquiera, deberemos tomar muy en cuenta la forma de la sección transversal, pues la naturaleza y características geométricas del contorno definen básicamente la curva de distribución de velocidades. (Rocha, 2007).

En términos de análisis, se considera el caso más simple en el que se supone un ancho infinito y que solo se tiene influencia por el fondo del cauce, por lo que el flujo es analizado de la siguiente manera. En cada punto de la sección transversal hay una velocidad particular ( $V_h$ ). La velocidad es máxima en la superficie, en el fondo la velocidad es mínima y tiene una distribución como se muestra en la Figura 5.14.

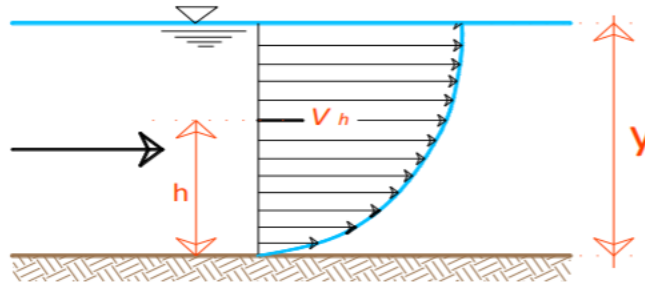


Figura 5.14. Distribución bidimensional de velocidades en un cauce de ancho infinito

Si se toma en cuenta que en una sección del mar es interpuesta una estructura como lo es un dique sumergido, este perfil de velocidades se modificará localmente adoptando una nueva forma casi impredecible.

Tomando en cuenta la velocidad media incidente y transmitida obtenida al inicio y término de la prueba, se realizó un diagrama de velocidades en cada perfil de playa, en el cual se considera que a cero centímetros se encuentra la superficie libre del agua y a veinte centímetros está el fondo. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.



### Bloque uno: pruebas 1AB\_15, 6AB\_15 y 11AB\_30

Tabla 5.8.- Velocidad media incidente y transmitida en fondo y superficie: pruebas 1AB\_15, 6AB\_15 y 11AB\_30 para los perfiles A y B

		1AB_15				6AB_15			
		Vmed inicio		Vmed final		Vmed inicio		Vmed inicio	
Distancia		INC	TRAN	INC	TRAN	INC	TRAN	INC	TRAN
Perfil A	0-10 cm	0.938	-2.0648	-1.3946	3.29	-2.0449	-4.5276	-1.3407	-1.309
	10-20cm	0.5255	2.7524	2.2774	3.6931	2.2195	-0.843	0.2188	2.9811
Perfil B	0-10 cm	3.8982	-2.4924	-4.6614	-5.8377	0.6202	7.61	-1.8257	3.7659
	10-20cm	-2.2493	2.8579	-4.3389	-2.6656	-45.8878	64.0274	-54.1324	60.4691

		11AB_30			
		Vmed inicio		Vmed final	
Distancia		INC	TRAN	INC	TRAN
Perfil A	0-10 cm	-0.1466	0.2903	0.5666	-0.5194
	10-20cm	-0.4541	-0.1949	-0.3021	-0.2016
Perfil B	0-10 cm	7.3103	-3.6343	4.9617	-1.9589
	10-20cm	0.2613	0.2011	0.7222	0.2409

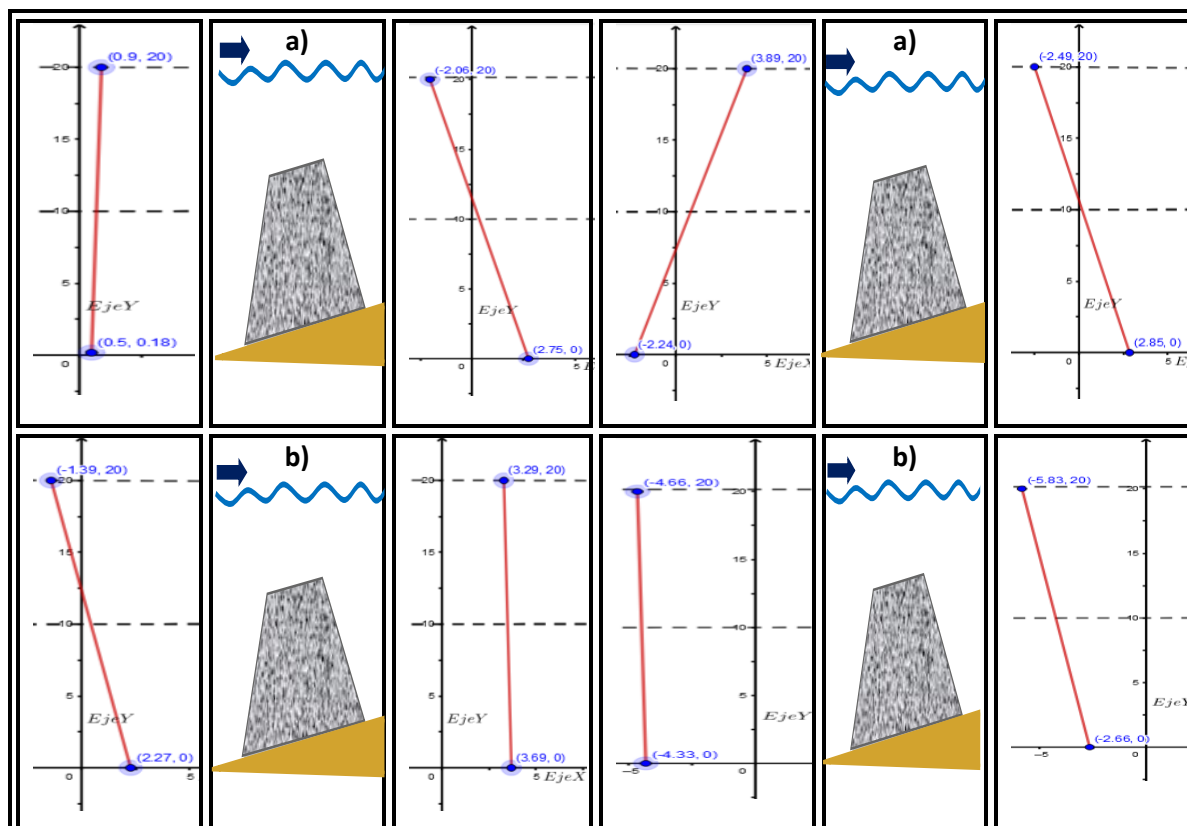


Figura 5.15. Diagrama de velocidades 1A\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

Figura 5.16. Diagrama de velocidades 1B\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

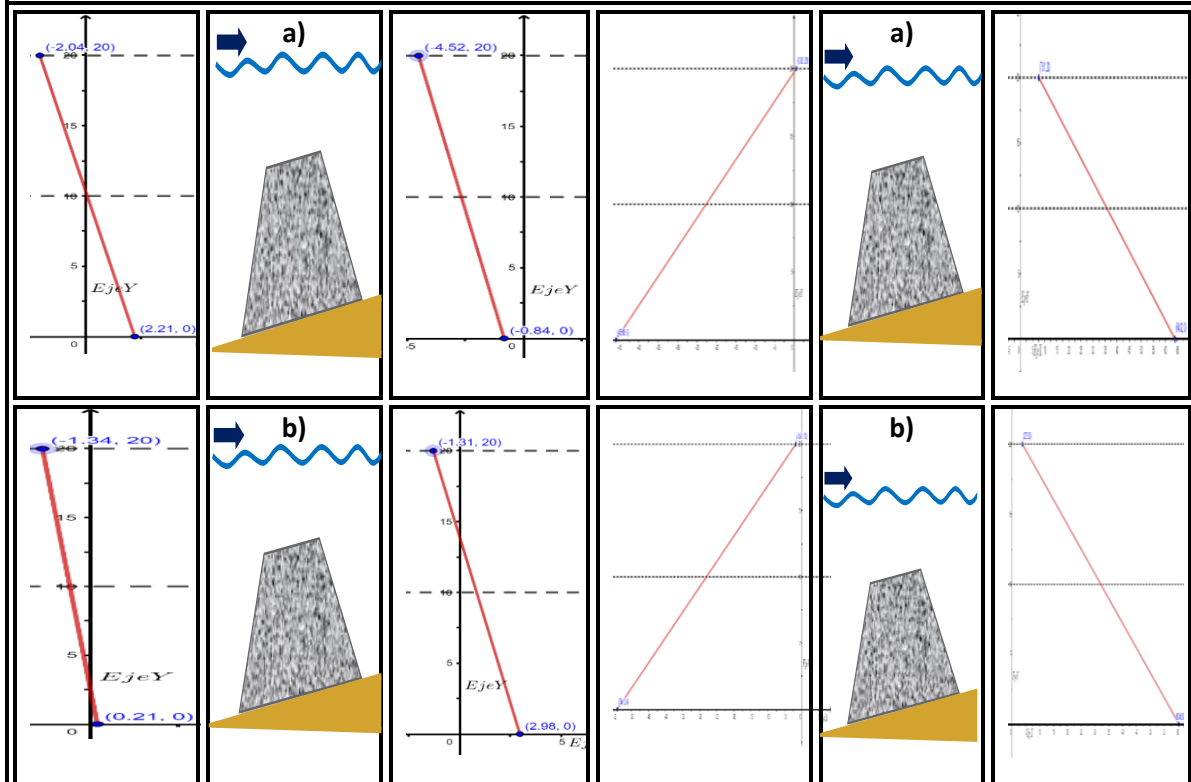
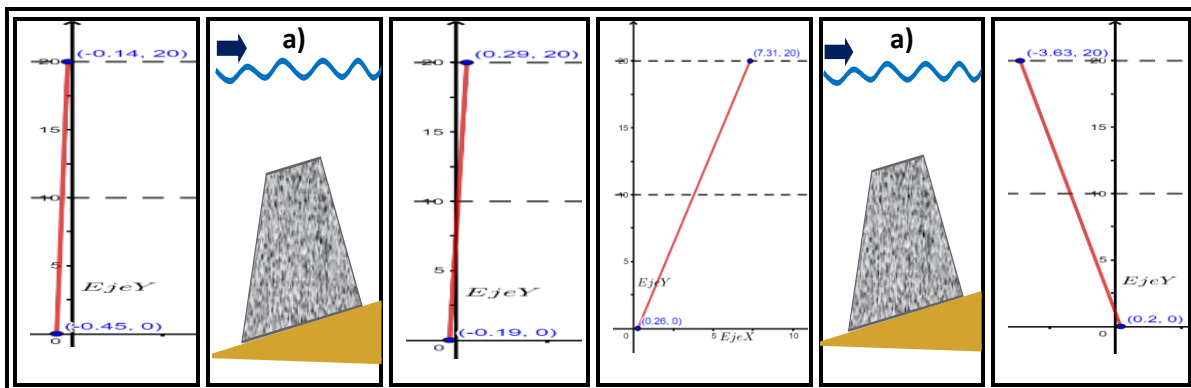


Figura 5.17. Diagrama de velocidades 6A\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

Figura 5.18. Diagrama de velocidades 6B\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba



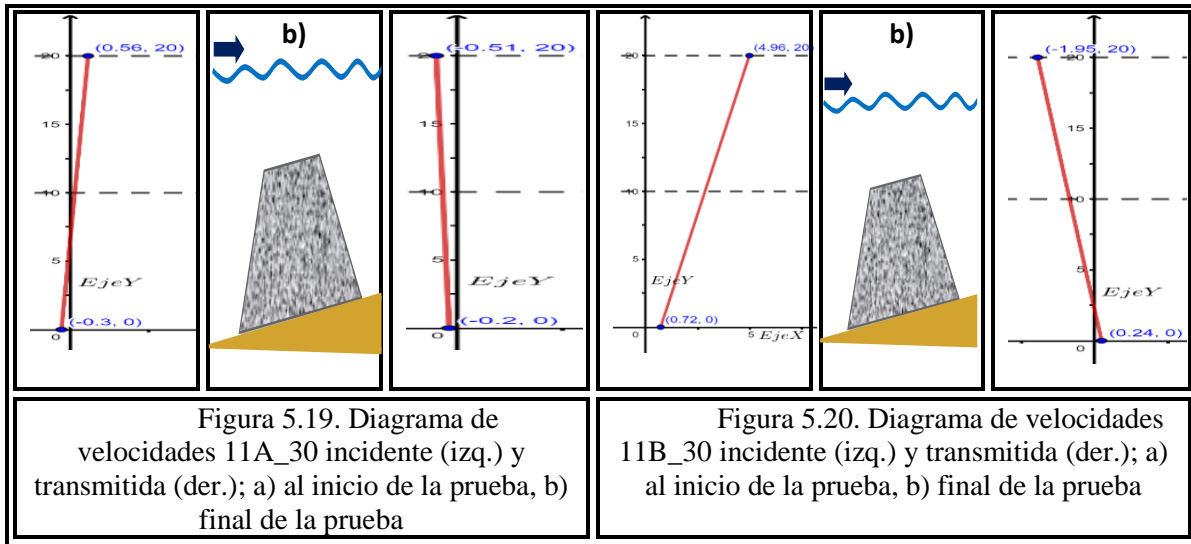


Figura 5.19. Diagrama de velocidades 11A\_30 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

Figura 5.20. Diagrama de velocidades 11B\_30 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

### Observaciones bloque uno: perfil A, primeros minutos

En cuanto a la velocidad incidente, se observa que al comenzar la prueba 1A\_15 (figura 5.15a) la velocidad máxima se presenta en superficie con dirección a la estructura, al igual que la velocidad de fondo, mientras tanto, la prueba 6A\_15 y 11A\_30 (figura 5.17a y 5.19a) presentan velocidad máxima en el fondo, la primera con dirección a la estructura y la segunda a aguas profundas, a su vez, en superficie ambas velocidades se dirigen costa fuera. Se presentan velocidades cercanas al cero para la prueba 11A\_30.

En lo que respecta a la velocidad transmitida, para 1A\_15 la velocidad máxima sufre cambio en la dirección, presentándose en el fondo con dirección a la playa, a su vez la velocidad en la superficie viaja hacia el dique; mientras que la velocidad máxima en 6A\_15 y 11A\_30 se presenta en superficie con dirección al dique y playa respectivamente, en el fondo presentan dirección a dique. Además, al comparar las velocidades incidentes y transmitidas para 11A\_30 se presenta decremento en el fondo y aumento en la superficie.

### Observaciones bloque uno: perfil A, últimos minutos

En relación con la velocidad incidente al termino de las pruebas se observa que, la velocidad máxima para 1A\_15 (figura 5.15b) se encuentra en el fondo con dirección a la estructura, mientras que la velocidad en la superficie se orienta en sentido a la generación del oleaje; para 6A\_15 y 11A\_30 (figura 5.17b y 5.19b) la velocidad máxima se encuentra en superficie con dirección a la generación del oleaje y dique respectivamente, al mismo tiempo la velocidad en fondo para la primera es casi nula y se orienta hacia la estructura, mientras que la segunda se dirige a aguas profundas

Con respecto a la velocidad transmitida, las pruebas 1A\_15 y 6A\_15 presentan la velocidad máxima en el fondo con dirección a la playa, además, al hacer la comparación con la velocidad incidente se presenta incremento, en superficie se dirige hacia la playa y el dique respectivamente. Mientras que 11A\_30 la velocidad máxima se presenta en superficie, con dirección al dique, de igual modo se presenta en el fondo, aunado a esto, la velocidad presenta decremento.

### **Observaciones bloque uno: perfil B, primeros minutos**

En cuanto a la velocidad incidente, se observa que al comenzar las pruebas 1B\_15 y 11B\_30 (figura 5.16a y 5.20a) presentan la velocidad máxima en la superficie con dirección a la estructura, a su vez, la velocidad del fondo se dirige costa afuera y al dique respectivamente. Mientras que para 6B\_15 (figura 5.18a) la velocidad máxima se presenta en el fondo, con dirección a aguas profundas, la velocidad en superficie se orienta hacia la estructura, presentando valores cercanos al cero.

Por otro lado, la velocidad transmitida en 1B\_15 y 6B\_15 se presenta en el fondo con dirección a la playa, mientras que la velocidad en la superficie viaja hacia el dique y playa respectivamente. En cuanto a 11B\_30 velocidad máxima se conserva en la superficie con dirección a la estructura, la dirección en el fondo es hacia la playa, comparando la velocidad antes y después del dique se observa decremento en fondo y superficie.

### **Observaciones bloque uno: perfil B, últimos minutos**

En relación con la velocidad incidente al termino de las pruebas se observa que, la velocidad máxima antes del dique para 1B\_15 y 11B\_30 (figura 5.16b y 5.20b se encuentran en la superficie, con dirección costa afuera y al dique respectivamente, mientras que 6B\_15 (figura 5.18b) presenta la velocidad máxima en el fondo hacia aguas profundas, al igual que la velocidad en superficie.

Con respecto a la velocidad transmitida, la velocidad máxima en 1B\_15 y 11B\_30 se presenta en superficie y hacia la estructura, en el fondo la primera tiene dirección a la estructura en cuanto a la segunda, es hacia la playa; las velocidades para 11B\_30 en ambos diagramas tienden al cero para el fondo. No obstante, 6B\_15 presenta la velocidad máxima en el fondo con dirección a la playa, la velocidad es similar antes y después del dique.

### **Bloque dos: pruebas 2AB\_15 y 7AB\_15**

Tabla 5.9.- Velocidad media incidente y transmitida en fondo y superficie: pruebas 2AB\_15 y 7AB\_15 para los perfiles A y B

		2AB_15				7AB_15			
		Vmed inicio		Vmed final		Vmed inicio		Vmed inicio	
Distancia		INC	TRAN	INC	TRAN	INC	TRAN	INC	TRAN
Perfil	0-10 cm	0.5927	1.5954	0.0194	1.1822	-2.641	-0.4422	-7.0443	3.1702

A	10-20cm	-3.4264	1.1249	-2.9384	3.071	5.1021	-0.5285	2.6861	2.6934
Perfil	0-10 cm	1.0562	-1.8545	2.6394	4.4397	5.1128	-0.0744	9.8341	-1.5441
B	10-20cm	0.5927	1.5954	0.0194	1.1822	-43.2106	56.3298	-43.1004	53.009

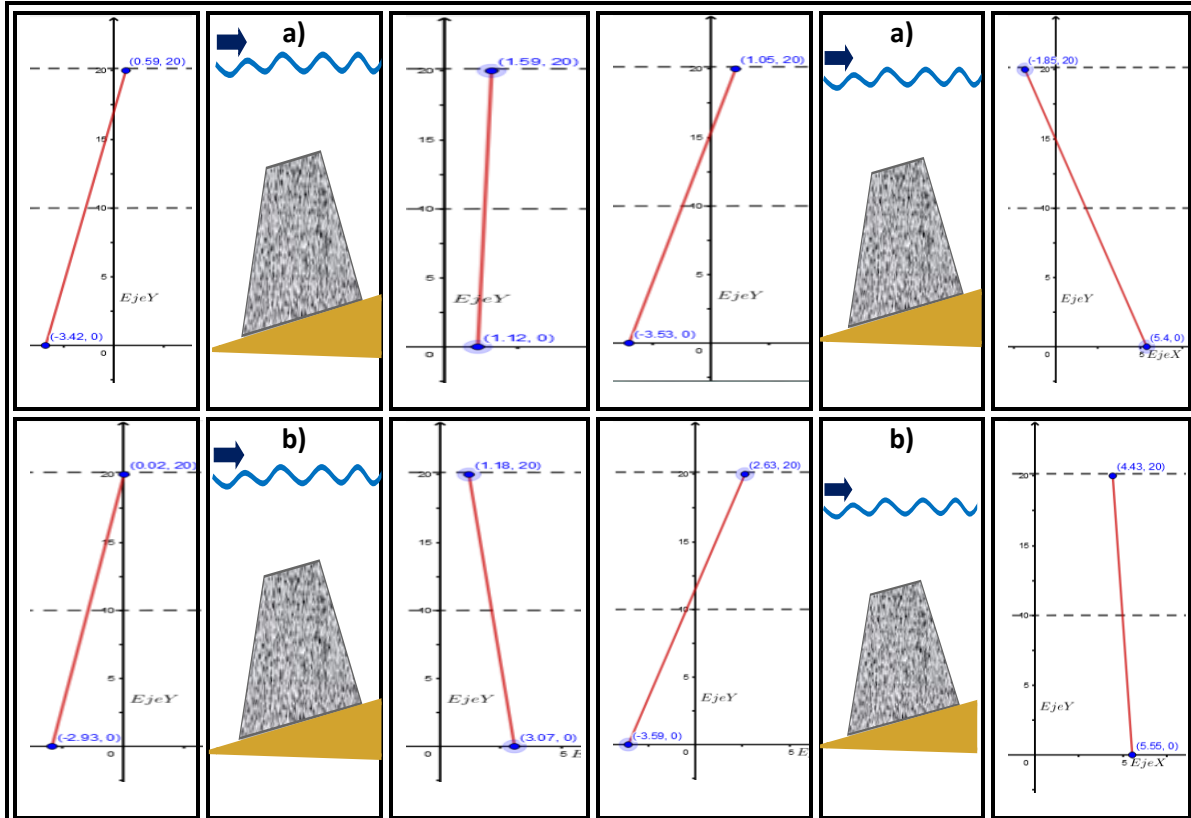
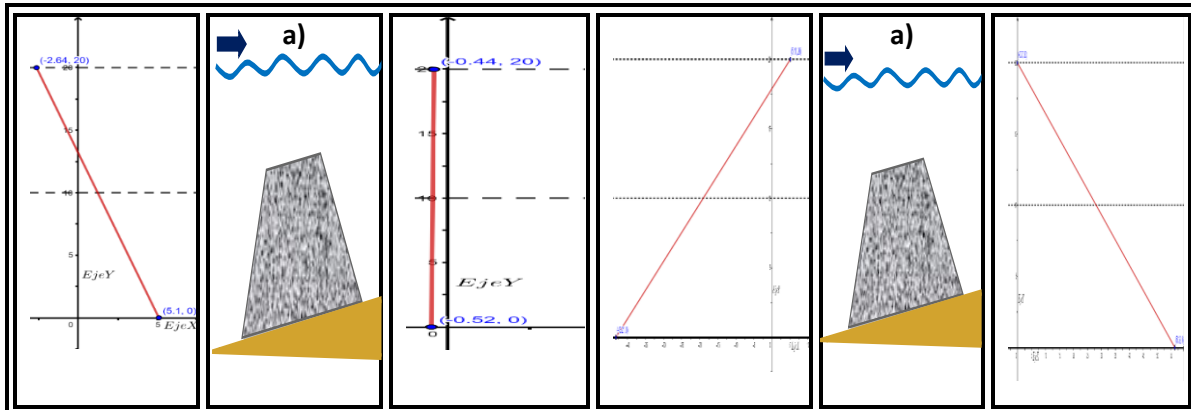
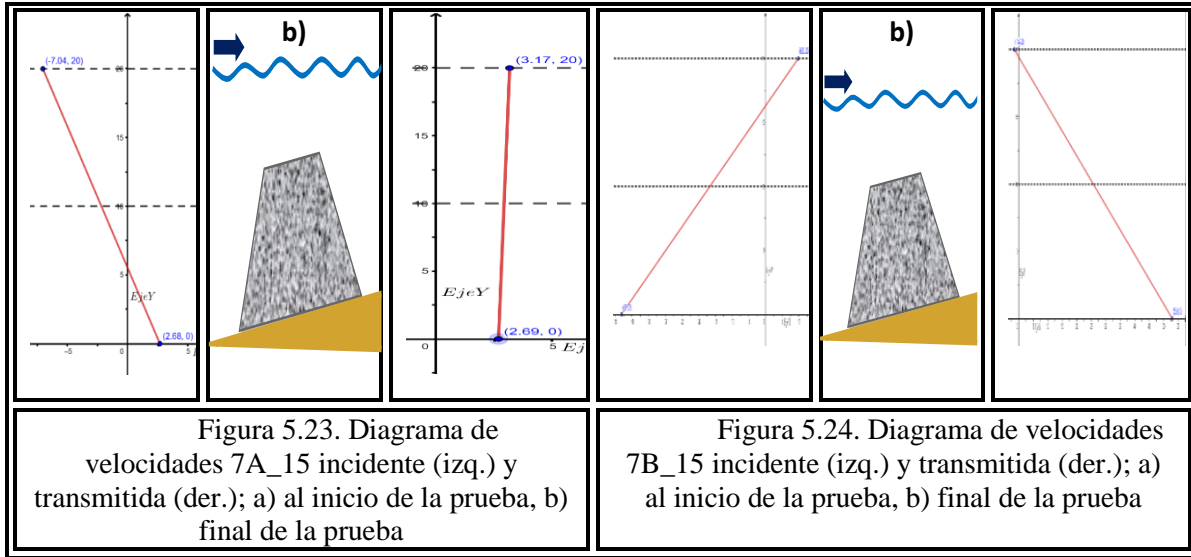


Figura 5.21. Diagrama de velocidades 2A\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

Figura 5.22. Diagrama de velocidades 2B\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba





### Observaciones bloque dos: perfil A, primeros minutos

En cuanto a la velocidad incidente, se observa que al comenzar las pruebas 2A\_15 y 7A\_15 (figura 5.21a y 5.23a) presenta la velocidad máxima en el fondo, la primera con dirección hacia aguas profundas mientras que la segunda se dirige a la estructura, a su vez velocidad en la superficie se dirige al dique y hacia aguas profundas respectivamente.

En lo que respecta a la velocidad transmitida, para 2A\_15 la velocidad máxima se presenta en la superficie con dirección a la playa, a su vez, la velocidad en el fondo presenta la misma dirección; mientras que la velocidad máxima en 7A\_15 se presenta en fondo, además la velocidad en la superficie y fondo son similares y se acercan al cero, ambas presentan trayectoria hacia el dique.

### Observaciones bloque dos: perfil A, últimos minutos

En relación con la velocidad incidente al termino de las pruebas se observa que, la velocidad máxima para 2A\_15 (figura 5.21b) se encuentra en el fondo con dirección hacia aguas profundas, mientras que la velocidad en la superficie se orienta hacia la estructura con velocidad casi nula; para 7A\_15 (figura 5.23b) la velocidad máxima se encuentra en superficie con dirección a la generación del oleaje, al mismo tiempo la velocidad en fondo se orienta hacia la estructura.

Con respecto a la velocidad transmitida, la prueba 2A\_15 presentan la velocidad máxima en el fondo, mientras que 7A\_15 lo presenta en la superficie, la velocidad para ambas es hacia la playa. Además, al hacer la comparación con la velocidad incidente se presenta incremento para 2A\_15.

### Observaciones bloque dos: perfil B, primeros minutos

En cuanto a la velocidad incidente, se observa que al comenzar ambas pruebas 2B\_15 y 7B\_15 (figura 5.22a y 5.24a) presentan la velocidad máxima en el fondo con dirección a aguas profundas, a su vez, la velocidad en superficie se propaga hacia el dique.

Por otro lado, la velocidad máxima transmitida en 2B\_15 y 7B\_15 se presenta en el fondo con dirección a la playa, mientras que la velocidad en la superficie viaja hacia el dique y playa respectivamente. Se observan valores de velocidad muy altos antes y después del dique en 7B\_15.

### Observaciones bloque dos: perfil B, últimos minutos

En relación con la velocidad incidente al termino de las pruebas 2B\_15 y 7B\_15 (figura 5.22b y 5.24b) se observa que, la velocidad máxima antes del dique presenta el mismo comportamiento a lo descrito al inicio de la prueba. Existe aumento de la velocidad en ambas pruebas.

Con respecto a la velocidad transmitida, la velocidad máxima en 2B\_15 se presenta en el fondo con direcciona la playa, al igual que la velocidad en la superficie; mientras que 7B\_15 se muestra en el fondo, con dirección a playa, la velocidad en superficie se dirige al dique, se mantiene las velocidades altas en esta prueba.

### Bloque tres: pruebas 3AB\_15 y 8AB\_15

Tabla 5.10.- Velocidad media incidente y transmitida en fondo y superficie: pruebas 2AB\_15 y 7AB\_15 para los perfiles A y B

		3AB_15				8AB_15			
		Vmed inicio		Vmed final		Vmed inicio		Vmed inicio	
Distancia		INC	TRAN	INC	TRAN	INC	TRAN	INC	TRAN
Perfil A	0-10 cm	-5.5168	1.255	-0.5626	2.7072	-9.269	10.5299	-10.3259	13.1119
	10-20cm	-6.4241	8.5707	-5.2921	9.2779	-1.1339	10.3083	-3.1619	11.9289
Perfil B	0-10 cm	-6.9029	6.4206	-9.8946	3.1666	19.4632	-3.9717	15.3257	-4.6509
	10-20cm	-13.7327	8.6104	-10.83	8.4035	-10.6893	27.9275	-12.1937	12.908

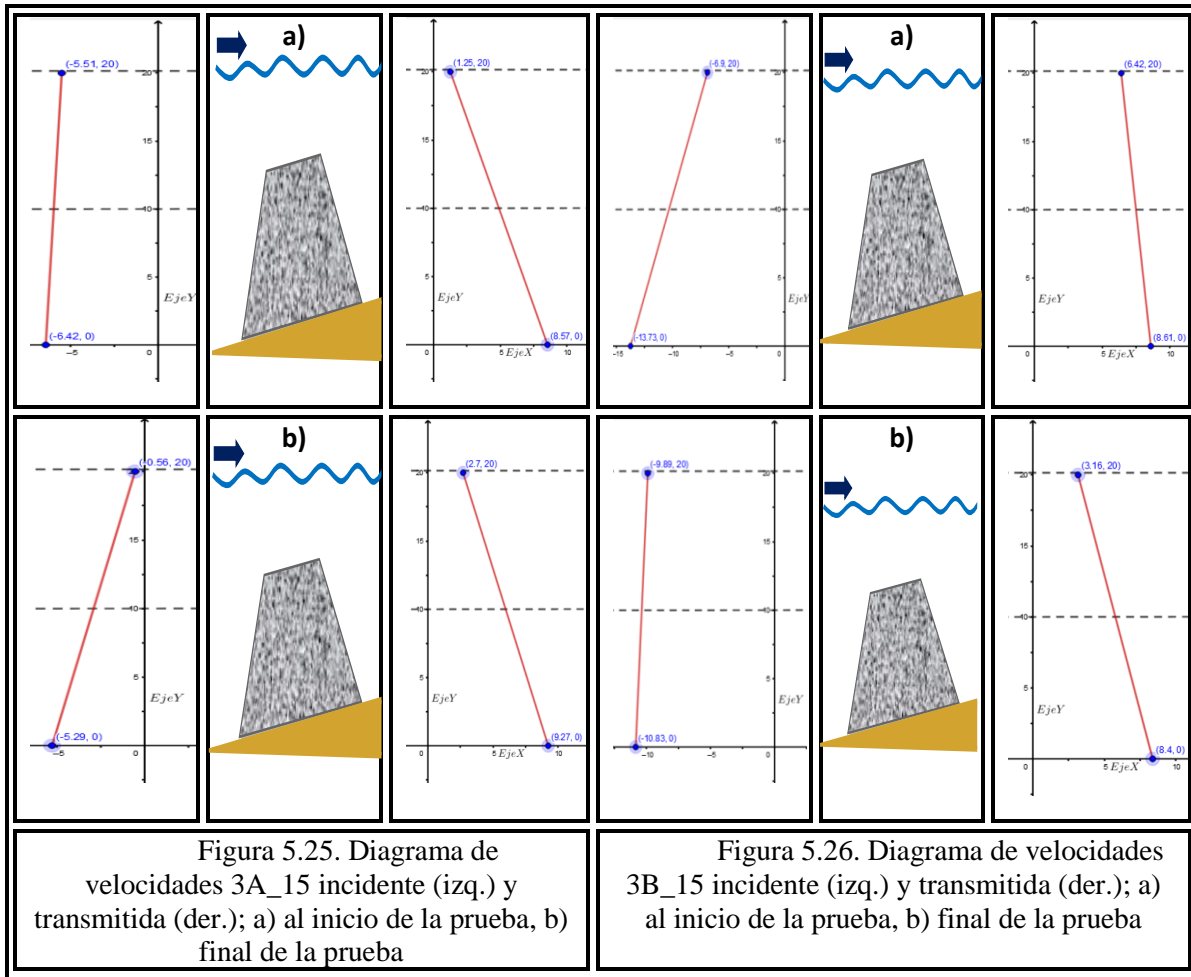
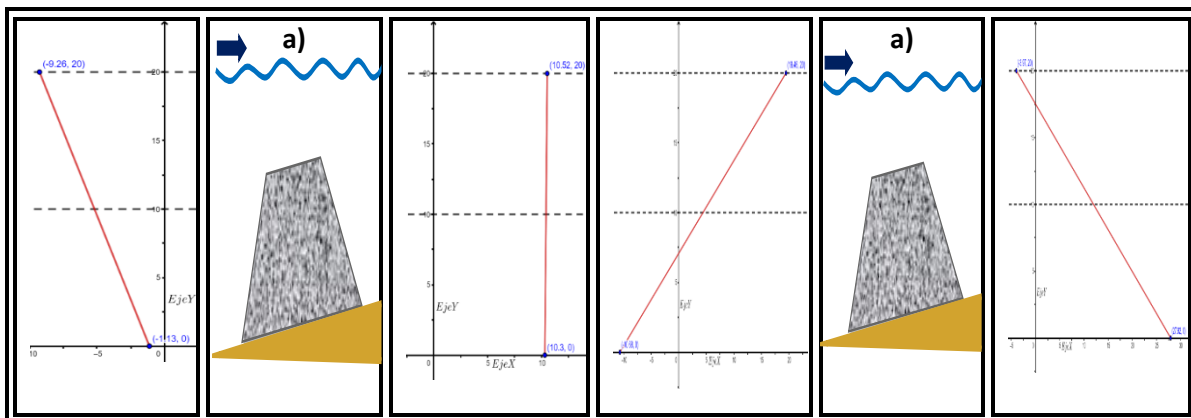
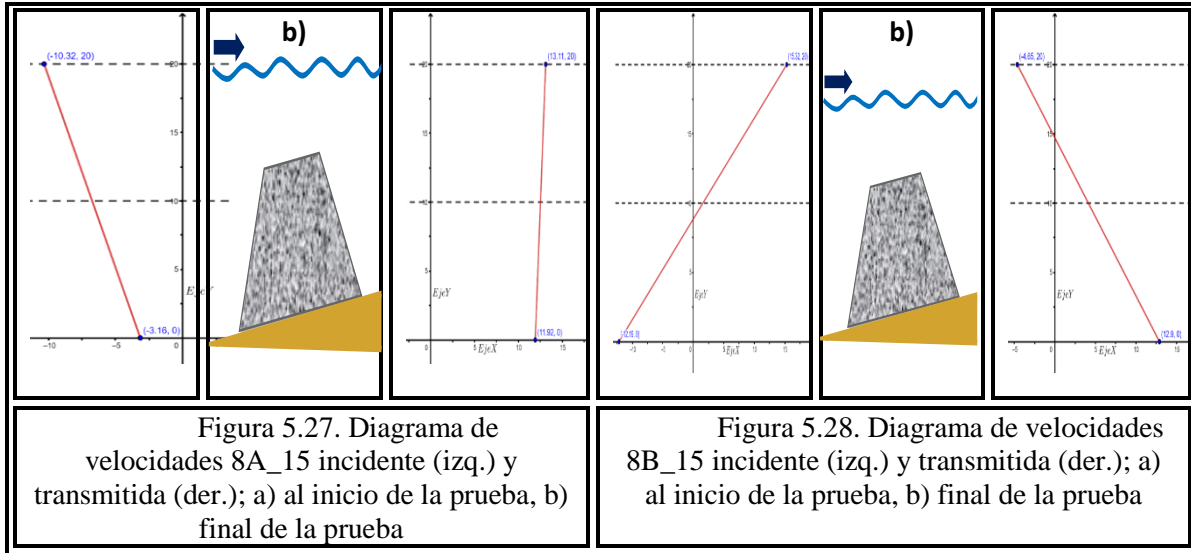


Figura 5.25. Diagrama de velocidades 3A\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

Figura 5.26. Diagrama de velocidades 3B\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba







### Observaciones bloque tres: perfil A, primeros minutos

En cuanto a la velocidad incidente, se observa que al comenzar la prueba 3A\_15 (figura 5.25a) la velocidad máxima se presenta en el fondo con dirección a aguas profundas, al igual que la velocidad en superficie, mientras tanto, la prueba 8A\_15 (figura 5.27a) presentan velocidad máxima en la superficie, con dirección a aguas profundas, al igual que la velocidad en el fondo

En lo que respecta a la velocidad transmitida, para 3A\_15 la velocidad máxima se incrementó en el fondo con dirección a la playa, a su vez, la velocidad en superficie presenta la misma dirección que en el fondo, decrece la velocidad en superficie, pero aumenta en el fondo. En relación con 8A\_15 la velocidad máxima se presenta en superficie, con dirección a la playa, al igual que la velocidad en fondo, se presenta aumento en la velocidad en ambas zonas.

### Observaciones bloque tres: perfil A, últimos minutos

En relación con la velocidad incidente y transmitida al termino de las pruebas, para 3A\_15 (figura 5.25b) se presentan condiciones similares a los primeros minutos, no obstante, la velocidad incidente en superficie tiende a acercarse a cero; en cuanto a 8A\_15 (figura 5.27b) los diagramas de velocidad son similares a los observados al inicio de la prueba, sin embargo, son levemente más altas al finalizar.

### Observaciones bloque tres: perfil B, primeros minutos

En cuanto a la velocidad incidente, se observa que al comenzar la prueba 3B\_15 (figura 5.26a) presenta la velocidad máxima en el fondo, está y la velocidad en superficie presentan dirección a aguas profundas. Por lo que se refiere a 8B\_15 (figura 5.28a) la

velocidad máxima se presenta en la superficie, con dirección al dique, la velocidad en fondo se orienta hacia aguas profundas.

Por otro lado, la velocidad transmitida en 3B\_15 y 6B\_15 se conserva en el fondo, pero cambia su dirección, presentándose hacia la playa, la velocidad en superficie se modifica y decrece con trayectoria a la playa. En cuanto a 8B\_15 la velocidad máxima se altera, presentándose en el fondo con dirección a la playa, mientras la dirección en la superficie es hacia el dique, decrece la velocidad en superficie, pero aumenta en el fondo.

### Observaciones bloque tres: perfil B, últimos minutos

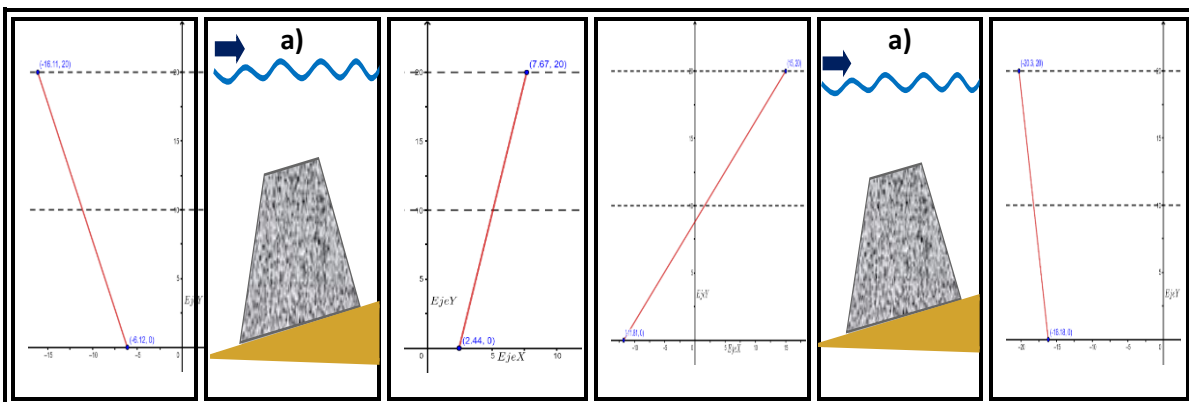
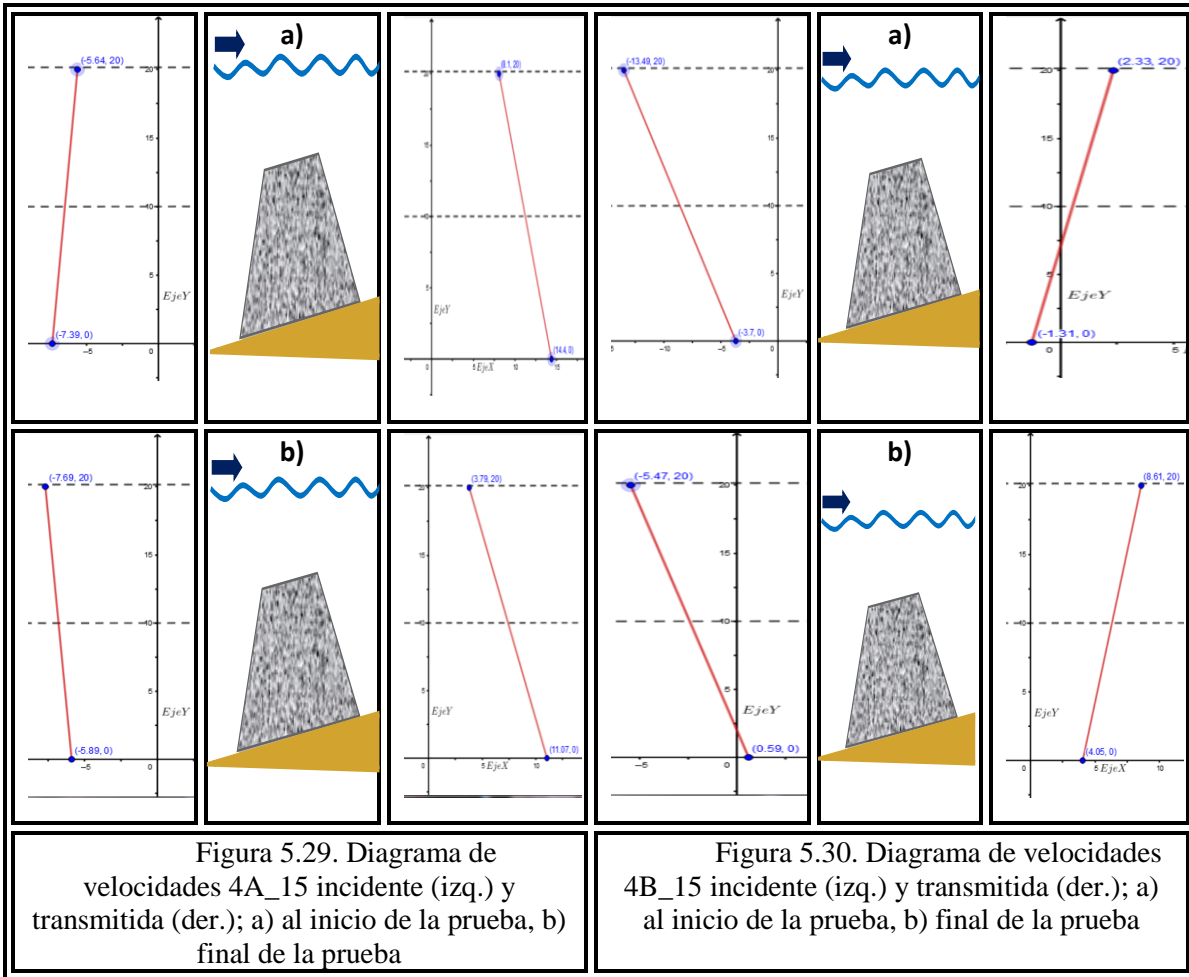
En relación con la velocidad incidente al término de las pruebas se observa que, para 3B\_15 (figura 5.26b) la velocidad máxima se encuentra en el fondo con dirección hacia aguas profundas, al igual que la velocidad en superficie estas velocidades son similares; para 8B\_15 (figura 5.28b) se presentan características similares a las observadas los primeros minutos de la prueba, sin embargo, la velocidad transmitida aumenta en el fondo y disminuyen en la superficie.

Con respecto a la velocidad transmitida, la prueba 3B\_15 representa la velocidad máxima el fondo, al compararla con los valores incidentes esta disminuye, la velocidad en superficie y fondo se dirigen hacia la playa. La velocidad máxima para 8B\_15 se incrementa en el fondo con dirección a la playa, al mismo tiempo en superficie se dirige a la estructura con disminución de la velocidad.

### Análisis del bloque cuatro: pruebas 4AB\_15, 9AB\_15 y 12AB\_30

Tabla 5.11- Velocidad media incidente y transmitida en fondo y superficie: pruebas 4AB\_15, 9AB\_15 y 12AB\_30 para los perfiles A y B

		4AB_15				9AB_15			
		Vmed inicio		Vmed final		Vmed inicio		Vmed inicio	
Distancia		INC	TRAN	INC	TRAN	INC	TRAN	INC	TRAN
Perfil A	0-10 cm	-5.6427	8.1086	-7.6541	3.7968	-16.1134	7.6746	-15.8718	6.9083
	10-20cm	-7.3913	14.4015	-5.8296	11.073	-6.1236	2.4408	-9.7322	3.5613
Perfil B	0-10 cm	-13.4999	2.3398	-5.4795	8.6145	15.0075	-20.3085	23.2776	-16.2581
	10-20cm	-3.7093	-1.3075	0.5998	4.0546	-11.8191	-16.1811	-10.0788	-4.8317
		12AB_30							
		Vmed inicio		Vmed final					
Distancia		INC	TRAN	INC	TRAN				
Perfil A	0-10 cm	8.8829	-2.5408	9.2747	-3.929				
	10-20cm	-0.0128	-0.1985	0.7483	-1.7693				
Perfil B	0-10 cm	22.4602	-7.671	6.4281	-15.1412				
	10-20cm	9.9349	-3.894	-1.8052	-4.5712				



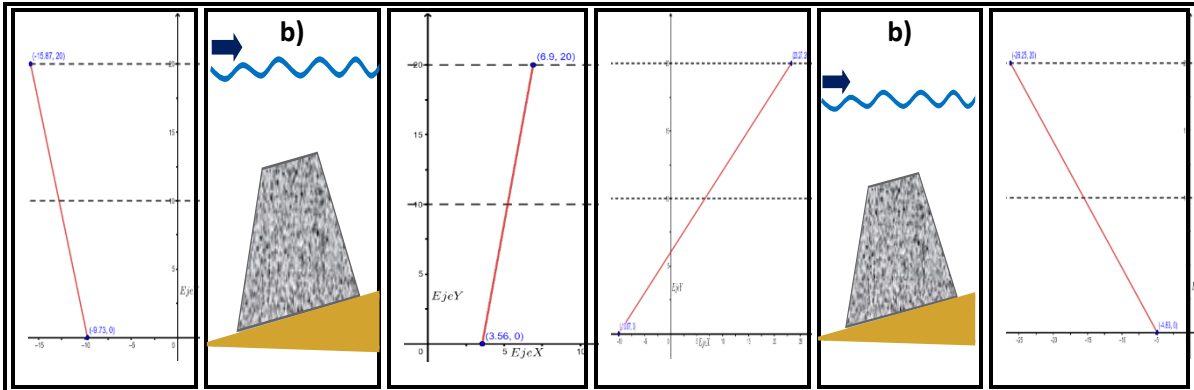


Figura 5.31. Diagrama de velocidades 9A\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

Figura 5.32. Diagrama de velocidades 9B\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

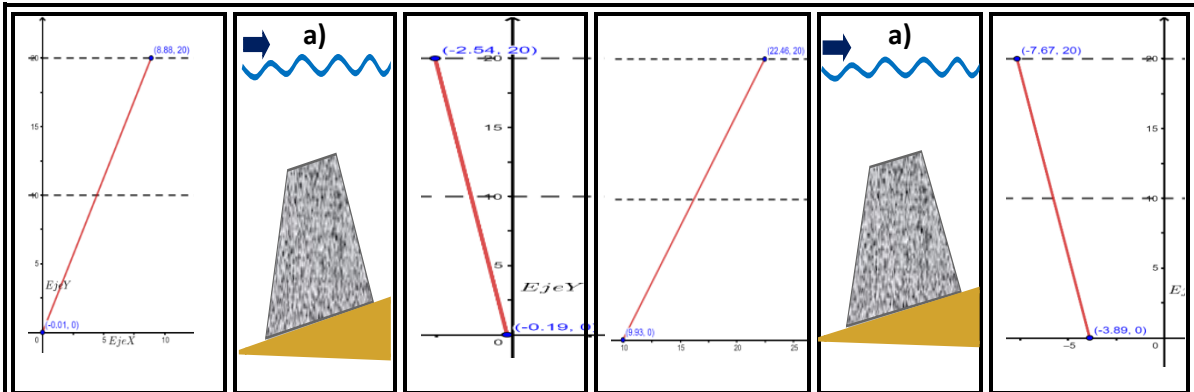


Figura 5.33. Diagrama de velocidades 12A\_30 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

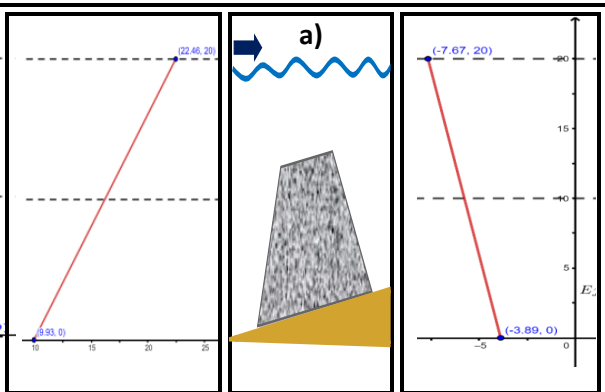


Figura 5.34. Diagrama de velocidades 12B\_30 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

### **Observaciones bloque cuatro: perfil A, primeros minutos**

Por lo que se refiere a la velocidad incidente, se observa que al comenzar la prueba 4A\_15 (figura 5.29a) la velocidad máxima se presenta en el fondo con dirección a la generación del oleaje, al igual que la velocidad en superficie, mientras tanto, la prueba 9A\_15 y 12A\_30 (figura 5.31a y 5.33a) presentan velocidad máxima en la superficie, la primera con dirección a aguas profundas y la segunda a la estructura, a su vez, en el fondo ambas velocidades se dirigen costa fuera, en el fondo se presentan velocidades cercanas al cero para la prueba 11A\_30.

En lo que respecta a la velocidad transmitida, para la prueba 4A\_15 la velocidad máxima se incrementa y presenta en el fondo, con dirección a la playa, al igual que la velocidad en superficie; mientras que la velocidad máxima en 9A\_15 y 12A\_30 se presenta en superficie con dirección a la playa y dique respectivamente, en el fondo presentan la misma dirección que en superficie. Al comparar las velocidades incidentes y transmitidas para 4A\_15 y 9A\_15 se presenta decremento en ambas profundidades, en cuanto a 12A\_30 la velocidad disminuye en la superficie y aumenta en el fondo.

### **Observaciones bloque cuatro: perfil A, últimos minutos**

En relación con la velocidad incidente al término de las pruebas se observa que, la velocidad máxima para 4A\_15 (figura 5.29b) se encuentra en la superficie con dirección a la generación del oleaje, al igual que la velocidad en fondo; para 9A\_15 y 12A\_30 (figura 5.31b y 5.33b) se presentan características similares a las observadas al inicio cada prueba.

Con respecto a la velocidad transmitida, la prueba 4A\_15 muestra incremento de la velocidad máxima en el fondo, la velocidad en superficie y fondo viajan hacia la playa, en cuanto a 9A\_15 presenta disminución en fondo y superficie, 12A\_30 dique presenta aumento de velocidad en fondo y disminución en la superficie.

### **Observaciones bloque cuatro: perfil B, primeros minutos**

En cuanto a la velocidad incidente, se observa que al comenzar las pruebas 4B\_15, 9A\_15 y 12B\_30 (figura 5.30a, 5.32a y 5.34a) presentan la velocidad máxima en la superficie, la primera prueba muestra dirección a la generación del oleaje, la segunda y tercera se orientan a la estructura, a su vez, la velocidad del fondo se dirige costa afuera para las dos primeras pruebas mientras que la última se traslada al dique.

Por otro lado, la velocidad máxima transmitida en 4B\_15, 9A\_15 y 12B\_30 se mantienen en la superficie, la primera con decremento y dirección a la playa, mientras las otras dos se dirigen al dique, la velocidad en fondo se orienta a la estructura, además 9A\_15 muestra aumento en superficie y fondo, no obstante, 12B\_30 presenta decremento en ambas zonas.

### Observaciones bloque cuatro: perfil B, últimos minutos

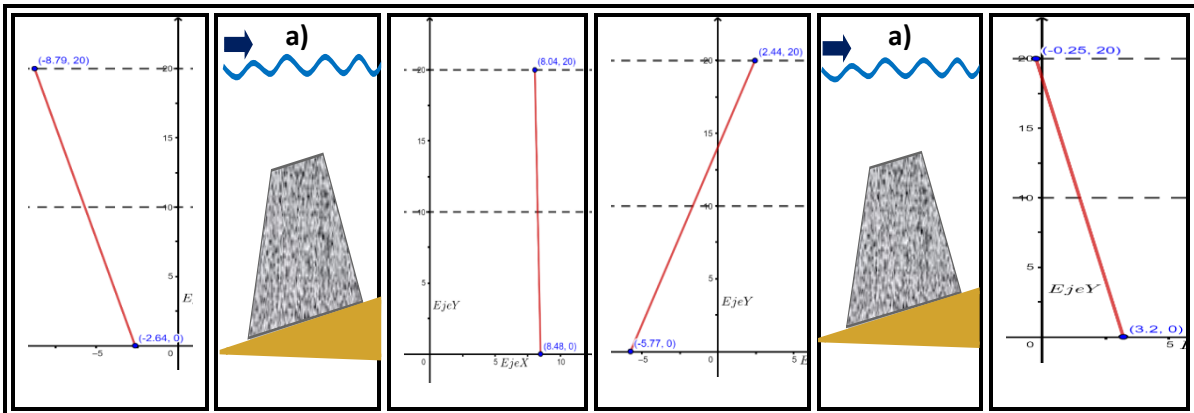
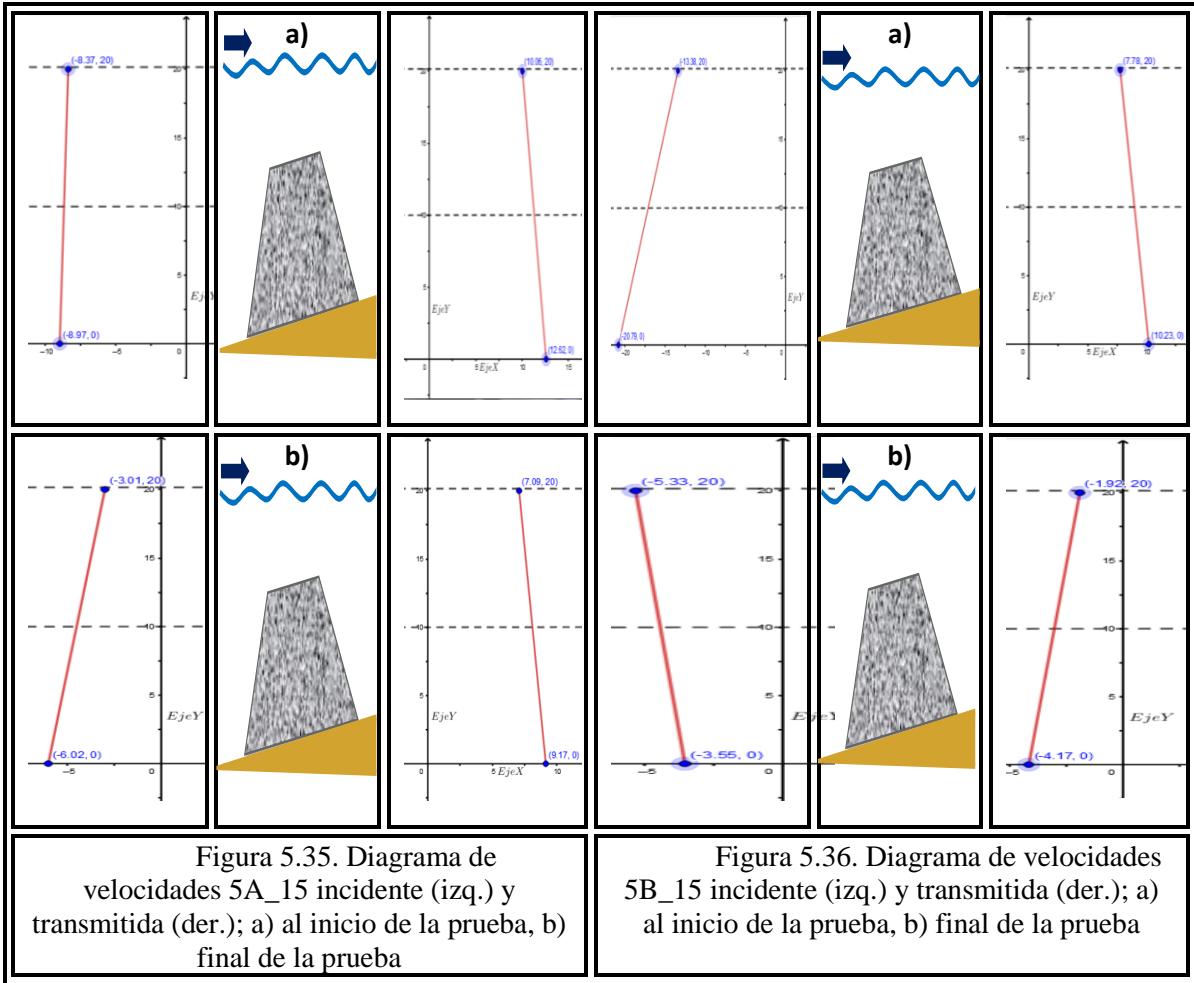
En relación con la velocidad incidente al termino de las pruebas se observa que, la velocidad máxima para 4A\_15 (figura 5.30b) se encuentra en la superficie con dirección a la generación del oleaje, la velocidad en fondo se orienta a la estructura y es casi nula; para 9A\_15 y 12A\_30 (figura 5.32b y 5.34b) se muestran características similares a las observadas al inicio cada prueba, sin embargo presentan reducción en la velocidades.

Con respecto a la velocidad transmitida, la prueba 4A\_15 presenta incremento en la velocidad máxima en la superficie con trayectoria a aguas profundas, la velocidad en el fondo tiene la misma dirección; en cuanto a 9A\_15 y 12A\_30 se muestran características similares a las observadas al inicio de cada prueba, sin embargo, al finalizar 9A\_15 la velocidad presenta disminución en el fondo y superficie, por el contrario, 12A\_30 presenta aumento en ambas zonas.

### Análisis del bloque cinco: pruebas 5AB\_15, 10AB\_15 y 13AB\_30

Tabla 5.12.- Velocidad media incidente y transmitida en fondo y superficie: pruebas 4AB\_15, 9AB\_15 y 12AB\_30 para los perfiles A y B

		5AB_15				10AB_15			
		Vmed inicio		Vmed final		Vmed inicio		Vmed inicio	
Distancia		INC	TRAN	INC	TRAN	INC	TRAN	INC	TRAN
Perfil A	0-10 cm	-8.3767	10.6294	-3.0138	7.095	-8.7971	8.0499	-5.6135	0.2548
	10-20cm	-8.978	12.6205	-6.0287	9.1771	-2.6431	8.4836	-0.616	0.12
Perfil B	0-10 cm	-13.3881	7.7837	-5.3311	-1.9204	2.4446	-0.2597	9.3836	-0.7654
	10-20cm	-20.7975	10.2336	-3.5569	-4.1737	-5.7743	3.2098	0.6984	3.3467
		13AB_30							
		Vmed inicio		Vmed final					
Distancia		INC	TRAN	INC	TRAN				
Perfil A	0-10 cm	7.5619	0.826	4.6193	-2.8947				
	10-20cm	-1.2864	1.6859	-1.5485	1.6249				
Perfil B	0-10 cm	8.9612	-9.4159	8.2241	-3.897				
	10-20cm	-4.603	-2.6396	1.0212	-0.1435				



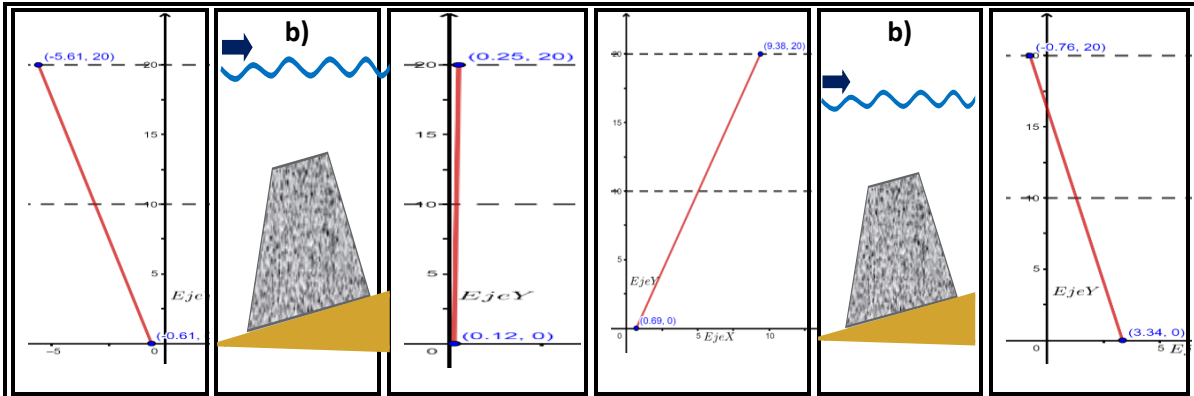


Figura 5.37. Diagrama de velocidades 10A\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

Figura 5.38. Diagrama de velocidades 10B\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

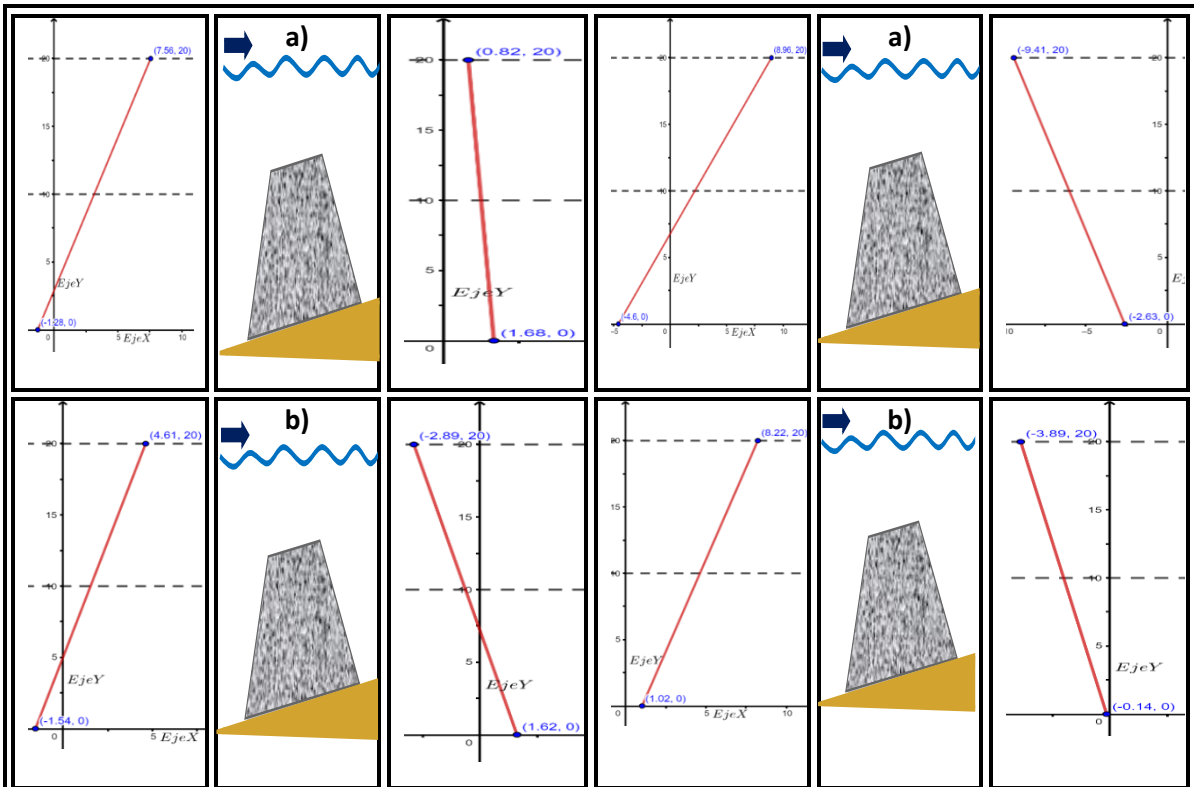


Figura 5.39. Diagrama de velocidades 13A\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba

Figura 5.40. Diagrama de velocidades 13B\_15 incidente (izq.) y transmitida (der.); a) al inicio de la prueba, b) final de la prueba



### **Observaciones bloque cinco: perfil A, primeros minutos**

Por lo que se refiere a la velocidad incidente, se observa que al comenzar la prueba 5A\_15 (figura 5.35a) la velocidad máxima se presenta en el fondo con dirección costa afuera, al igual que la velocidad en superficie, mientras tanto, la prueba 10A\_15 y 13A\_30 (figura 5.37a y 5.39a) presentan velocidad máxima en la superficie, la primera con dirección a aguas profundas y la segunda a la estructura, a su vez, en el fondo ambas velocidades se dirigen costa fuera.

En lo que respecta a la velocidad transmitida, para las pruebas 5A\_15, 10A\_15 y 13A\_30 la velocidad máxima se mantiene en el fondo, con dirección a la playa, al igual que la velocidad en superficie; sin embargo, en la primera prueba las velocidades tienden a aumentar, para la segunda y tercera existe decremento en superficie y aumento en el fondo.

### **Observaciones bloque cinco: perfil A, últimos minutos**

En relación con la velocidad incidente al termino de las pruebas se observa que, para 5A\_15, 10A\_15 y 13A\_30 (figura 5.35b, 5.37b y 5.39b) se presentan condiciones de dirección y velocidad similares con el inicio de la prueba, sin embargo, las velocidades tienden a disminuir para las primeras dos pruebas, en cambio, la última disminuye en superficie y aumenta levemente en el fondo.

Con respecto a la velocidad transmitida, la prueba 5A\_15 muestra incremento de la velocidad máxima en el fondo, la velocidad en superficie y fondo viajan hacia la playa, en cuanto a 10A\_15 y 12A\_30 la velocidad máxima se presenta en superficie, la primera con direcciona a la playa y la segunda al dique, en el fondo se orienta a playa y estructura respectivamente, ambas presentan decremento de las velocidades en ambas zonas.

### **Observaciones bloque cinco: perfil B, primeros minutos**

En cuanto a la velocidad incidente, se observa que al comenzar las pruebas 5B\_15, y 10A\_15 (figura 5.36a, y 5.38a) presentan la velocidad máxima en el fondo, ambas con dirección a la generación del oleaje, a su vez, la velocidad en la superficie se dirige costa afuera y hacia la estructura respectivamente. En cuanto a 13B\_30 (figura 5.40a) la velocidad máxima se presenta en la superficie, con dirección a la estructura, mientras que la velocidad de fondo se dirige hacia aguas profundas.

Por otro lado, la velocidad máxima transmitida en 5B\_15 y 10A\_15 se presenta en el fondo con dirección a la playa, en la superficie, la primera se dirige a la playa, mientras la segunda hacia el dique, ambas presentan decremento, sobre 13B\_30 la velocidad máxima se presenta en la superficie con dirección a la estructura, al igual que la velocidad de fondo, comparando la velocidad incidente con la transmitida, esta aumenta en la superficie y disminuye en el fondo.

### **Observaciones bloque cinco: perfil B, últimos minutos**

En relación con la velocidad incidente al término de las pruebas se observa que, la velocidad máxima para 5B\_15, 10B\_15 y 13B\_30 (figura 5.36b, 5.38b y 5.40b) se encuentra en la superficie, la primera prueba presenta dirección a la generación del oleaje, mientras que las otras dos se orientan a la estructura, la velocidad de fondo se presenta costa afuera para las dos primeras y hacia el dique en la última.

Con respecto a la velocidad transmitida, la prueba 5B\_15 y 10B\_15 presenta la velocidad máxima en el fondo con trayectoria al dique y playa respectivamente, la velocidad en superficie para ambas es hacia el dique; en cuanto a 13B\_30, la velocidad máxima se presenta en la superficie con dirección al dique al igual que la velocidad de fondo, al finalizar la prueba, la velocidad decrece.

### ***Observaciones: Diagrama de velocidades***

Al analizar la dirección de las velocidades máximas se observa que tienden a presentar la misma orientación, principalmente en las pruebas en las que el dique se encuentra alejado de la playa (1AB\_15 al 5AB\_15), es decir, cuando el oleaje pega con el frente del dique, la velocidad tiende a ser reflejada; mientras que el oleaje que logra pasar se dirige a la playa. Este comportamiento se mantiene en ambos perfiles de playa, al inicio y término de cada prueba.

Así también, es posible observar que las pruebas 6AB\_15 a la 10AB\_15 presentan el mismo comportamiento, excepto en el perfil A, al iniciar 6A\_15 y 7A\_15, la velocidad incidente viaja hacia el dique y pasando éste es reflejada, reenviándola a la estructura; en el perfil B al terminar 8B\_15 y 10B\_15, se muestra que la velocidad incidente se dirige al dique y la transmitida tiene dirección a la playa, mientras que al iniciar el 9B\_15 las velocidades incidentes y transmitidas se dirigen al dique, en cuanto al término de la prueba ambas se orientan a la playa.

En cuanto a las pruebas 11AB\_30, 12AB\_30 y 13AB\_30, presentan diques de mayor dimensión, la velocidad incidente tiende a viajar hacia el dique, mientras que la transmitida es reflejada y devuelta a la estructura en ambos perfiles.

Respecto al comportamiento de las velocidades en fondo y superficie, se observa que la colocación del dique influye en este parámetro ya que al ubicarlo más alejado de la costa tiende a presentar velocidades altas a pie de estructura, ya sea antes o después del dique. Ahora bien, cuando la cresta del dique toca la superficie libre del agua, la velocidad más alta tiende a presentarse en superficie, no obstante, el perfil B presenta velocidades altas en el fondo (6B\_15 y 7B\_15) que manifiestan las más altas de todas las pruebas. Cuando se presenta un dique de mayor dimensión se presentan velocidades máximas en la superficie.

El presente trabajo es una primera aproximación al análisis de los perfiles de velocidad registrados y es necesario profundizar en ello en el futuro.

## 6. CONCLUSIONES

De la información obtenida de los análisis de los datos morfológicos e hidrodinámicos medidos, se ha observado que cada prueba tiene su propia “firma dinámica”, expresada en las diferentes magnitudes de las distintas frecuencias del movimiento y tirantes del agua sobre la playa, debido a la intervención de estructuras sumergidas.

La superficie del dique presenta cierta irregularidad, lo cual contribuye a la disipación de la energía por medio de la fricción, y del oleaje cuando pasa entre los huecos de la estructura. El nivel de protección que provee la estructura está determinado por la profundidad, tamaño y posición relativa a la costa de la estructura. Encontrando que, cuando la corona de la estructura alcanza el nivel medio del agua, la disipación del oleaje tiende a aumentar: dado que el oleaje llega al borde de la cresta lo asomera ligeramente, produciendo disminución de la altura de la ola que provoca disipación como suma del efecto de rotura y de la fricción con el coral, permitiendo el depósito de sedimento.

Como efecto adicional, al aumentar la altura del dique, disminuye el efecto que ocasiona la transmisión. Esto quiere decir que la profundidad tiene un efecto en la variación del coeficiente de transmisión, de manera que a profundidades mayores la estructura no será tan eficiente a la hora de reducir la energía del oleaje incidente. Aunado a lo anterior, el comportamiento del coeficiente de reflexión depende del periodo de ola, ya que mientras mayor sea éste, existe menor reflexión del oleaje. Esta aseveración no aplica en las pruebas en donde la estructura presenta mayor altura, por tanto, el aumento de la reflexión favorece el rebase, ya que incrementa el valor de la altura de ola total frente al dique.

Dado lo anterior, la rotura a pie de dique es nula; no obstante, es posible observar que la rotura se presenta sobre la cresta como se mencionó anteriormente. Al asociar este parámetro con el desplazamiento a pie de duna, se tiene una estrecha relación con el tren de oleaje, además de la colocación de la estructura; ya que mientras más elevada sea la altura y periodo de ola, y la corona del dique se encuentre a nivel de superficie del agua, se presenta erosión. En contraste, el  $I_{rp}$  presenta acreción con un tirante de agua de 0.45 cm, sin importar la altura o periodo del oleaje; en cambio, cuando el  $I_{rp} > 8$  el desplazamiento del sedimento disminuye.

Se observa que el perfil reflejante tiende a presentar acreción a pie de duna, a comparación de un perfil disipativo el cual se muestra propenso a la erosión, principalmente cuando existe tormenta de media y severa intensidad.

En cuanto al comportamiento hidrodinámico, al considerar un dique de grandes dimensiones por la cual pasa un fluido, la velocidad tiende a disminuir en ambos perfiles. Es posible observar que un perfil disipativo asociada a periodos de ola altos es más propenso a que la velocidad aumente y erosione el perfil, esto es debido a que la pendiente de la playa permite incrementar la velocidad, creando peraltamiento en el oleaje.

Al analizar la dirección de las velocidades máximas junto con el comportamiento en fondo y superficie, se presentan cuatro diferentes patrones, de los cuales predominan los primeros dos, debido a que se presentaron mayor número de pruebas con este fenómeno:

1. El oleaje incidente golpea la cara del dique incrementando la velocidad del oleaje a pie del mismo, lo que proyecta a aguas profundas, mientras que el oleaje transmitido pasa por el fondo de la estructura y se dirige a la playa, este evento se presenta con diques ubicados alejados de la playa, es decir, en aguas más profundas.
2. El oleaje incidente golpea la cara del dique incrementando la velocidad en superficie, el oleaje transmitido se encuentra con la playa y ésta refleja el oleaje conservando la velocidad en la superficie. Este evento se manifiesta principalmente con diques de grandes dimensiones. Sin embargo, tres de las trece pruebas realizadas presentan características similares, y dado que lo único en común es el tirante de agua, pueden identificarse como casos aislados.
3. El oleaje incidente golpea la cara del dique incrementando la velocidad en la superficie del mismo, lo que proyecta a aguas profundas, mientras que el oleaje transmitido se encuentra con la playa y ésta refleja el oleaje, direccionándolo hacia el dique conservando la velocidad en el fondo.
4. El oleaje incidente golpea la cara del dique incrementando la velocidad en superficie, mientras que el oleaje transmitido pasa por el fondo de la estructura y se dirige a la playa.

Por otra parte, al tomar las lecturas al finalizar las pruebas las condiciones de velocidad varían, debido a la incidencia del oleaje y la modificación en el perfil de playa. De manera que, la mayor ganancia de sedimentos en un perfil disipativo, se tiene cuando la velocidad sufre decremento en toda la prueba, presentado en 2B\_15, 3B\_15, 6B\_15 y 8B\_15, los cuales presentan periodos de ola bajos; así también, ante un perfil reflejante se presentan valores de acreción elevados mostrados en 2A\_15, 3A\_15, 4A\_15, 7A\_15 y 9A\_15, en los cuales el incremento en la velocidad se mantiene durante la prueba.

Dado lo anterior, se sabe que la condición más desfavorable de este análisis es cuando se presenta un tren de oleaje de severa intensidad, mostrado para las pruebas 5AB\_15, 10AB\_15 y 13AB\_30 ya que presentan valores de erosión elevados en ambos perfiles, inclusive, las velocidades tienden a disminuir debido al dique, no obstante, la energía con la que se propaga no permite el perfil de playa se regenere.

Por otro lado, la prueba que se considera con mejor respuesta morfológica e hidrodinámica para ambos perfiles es 11AB\_30, que representa un tren de oleaje de tormenta de baja intensidad y dique de amplias dimensiones, el cual permite la disminución de la velocidad incidente y transmitida desde el comienzo de la prueba y la acreción a pie de duna.

Es importante señalar que la información recabada en esta tesis es motivo de análisis más profundos y detallados, que han quedado fuera de alcance. Por ello, se plantean las siguientes recomendaciones:

Dado la poca información que se tiene con respecto a las mediciones de velocidad en un dique con formas arrecifales, se propone realizar pruebas que permitan comprender mejor este tema, una opción sería la colocación de más sensores de velocidad a lo largo de la estructura que permitan observar detalladamente el comportamiento de la misma ante el oleaje.

Considerando lo descrito en los resultados y conclusiones, se propone extender el análisis de la presente tesis mediante el cambio y uso de diferentes formas coralinas, que permitan observar el comportamiento del perfil de playa ante el cambio de la forma del coral.

Teniendo en cuenta que la posición en la que se colocaba el dique influía directamente en el cambio del perfil de playa, la variación en mayor medida de la posición del dique, permitiría identificar una profundidad óptima a la cual posicionar el dique, para obtener mejores resultados que permitan la deposición de arena en las playas y evitar la erosión.

Finalmente, al considerar que la rugosidad del material con el que se fabrican las piezas del dique, podría ser un factor importante para que el oleaje disminuya su velocidad, se propone variar el tipo de material con el cual se fabrican las piezas, de tal manera que permitan observar en qué grado la rugosidad y la porosidad del material afectan en la eficiencia del dique.

## Referencias

Bascom, W. H. (1953). Characteristics of natural beaches, Proc. Fourth Inter. Coastal Eng. Conf., (Am. Soc. Civ. Eng), pp. 163.

Battjes, J.A. (1974). Surf similarity, Civil Engineering Department. Delft University of Technology. Netherlands

Bradbury, A. P., Allsop, N. W. H. & Stephens R. V. (1988). Hydraulic performance of breakwater crown walls, Hydraulics research, Wallingford

Burcharth, H. F., & Lykke, Andersen T. (2006). Landward distribution of Wave overtopping for rubble Mound Breakwaters, Proceedings of the First International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and coastal Protection. Porto, Portugal (in Press).

Burke, L. y Maidens, J. (2004). Reefs at Risk in the Caribbean, World Resources Institute (WRI), Washington DC. Documento en línea: <http://www.wri.org/publication/reefs-risk-caribbean>.

Cárdenas-Rojas, Mendoza, Verduzco-Zapata, Silva (2016). Análisis hidráulico de un dique sumergido homogéneo optimizado para funcionar como arrecife artificial, XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú, pp. 508- 516.

Carranza-Edwards, A., y Nolazco-Montero E. (1988). Estudio Sedimentológico regional de las playas de Yucatán y Quintana Roo, México, An. Inst. del Mar. y Limnol, 12(2), pp.49-66.

Carter, R.W.G. (1990). Coastal environments: an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines, Gran Bretaña.

Carter, R.W.G., & Balsillie, J.H. (1983). A note on the amount of wave energy transmitted over nearshore sand bars, Earth Surface Processes and Landforms, 8, 213-222.

Cifuentes, Lemus J.L., Torres-García, P., & Frías, M.M. VII. LOS ARRECIFES DE CORAL, recuperado de [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/46/htm/sec\\_11.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/46/htm/sec_11.html)

Clavero, Gilabert M. (2007). Comportamiento de los diques en talud frente a la acción del oleaje y criterios para el reparto de la probabilidad conjunta de fallo en la vida útil, Tesis doctoral, Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, Universidad de Granada, pp. 228.

Correa, I. D., y Alcántara-Carrió J. (2005). Historical and recent shore erosion along the Colombian Caribbean Coast, Journal of Coastal Research, pp.52-57.

Costas y mares de México, Manejo integrado con amor, (2016). SEMARNAT México, pp. 124.

Díaz, Umaña S. (2018) Estimación del coeficiente de transmisión y análisis hidrodinámico para arrecifes tipo reef-cells para condiciones marinas del caribe colombiano mediante modelación CFD, Tesis Maestría. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte Barranquilla, pp. 165.

Díaz, J. M., Barrios, L.M., Cendales, M. H, Garzón-Ferreira, J., Geister, J., López-Victoria, M. y Zea, S. (2000). Áreas coralinas de Colombia, INVEMAR, Serie publicaciones especiales, 5: 175.

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

Fontirroig Hernández H. (2004). Calibración del canal de oleaje CIEM para un ensayo de estabilidad de dique en talud, Tesina, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Franklin, G.L., Mariño-Tapia, I. y Torres-Freyermuth, A., (2013). Effects of reef roughness on wave setup and surf zone currents, *Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England)*, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 2005-2010, ISSN 0749-0208

Galvin, Cyril J.J. (1968). Breaker type classification on three laboratory beaches, *Journal of Geophysical Research*. Volume 73, Issue 12.

García, Ramos S. (2003). Predicción de los cambios en el perfil de playa mediante parámetros simples, Tesina, Universidad Politécnica de Catalunya <http://hdl.handle.net/2099.1/6000>

González, Lamuño P. (2014). Los sistemas naturales como alternativa para la protección de la costa, Universidad de Cantabria, trabajo de fin de grado, pp. 84.

Grove, R. S., & Sonu, C. J. (1983). Review of Japanese fisheries reef technology, Report 83-RD-137. Southern California Edison Company, Rosemead, California.

Hernández-Zanuy, A., y Alcolado, P. M. (Eds). (2012). La biodiversidad en ecosistemas marinos y costeros del litoral de Iberoamérica y el cambio climático: II. Memorias del Simposio Iberoamericano de biodiversidad marina y cambio climático, de la RED CYTED BIODIVMAR, Balneario Camboriú, Santa Catarina, Brasil, noviembre 2011.

Jennings, R. y Shulmeister, J. (2002). A field based clasification scheme for gravel beaches, *Marine Geology*. 186, pp. 211-228.

Kirk, R.M. (1980). Mixed sand and gravel beaches: morphology, processes and sediments. *Progress in Physical Geography*, 4, pp.189-210.

Komar, P.D. (1998). *Beach Processes and Sedimentation*, 2nd Edición, Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, pp.544

Kruer, Curtis R., & Causey, Laura O. (2005). The use of large artificial reefs to enhance fish populations at different depths in the Florida Keys, MARFIN Program NOAA National Marine Fisheries Service. pp 59.

Losada, M. A. (1990). Recent developments in the design of mound breakwaters, Houston, U.S.A., Gulf Publishing Company.

Madsen, O.S. (1974). Wave Transmission through Porous Structures, *Journal, Waterway, port, coastal and ocean engineering (ASCE)*. Vol 100 No WW3, pp. 169-188

Mahalingaiaha, A.V., Tayade, B.R., Gokhale, N.V., Kudale, M.D. (2015). Design of Submerged Offshore Reefs for the Coastal Protection Measures, *International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE 2015) India*, pp. 198 – 205

Mansard, E.P.D. & Funke, E.R. (1980). The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a least Squares Method, *COASTAL ENGINEERING-1980*, pp.154-172.

Mariño, T. I. & Acevedo M. C. Guide to restore coastal protecion services provided by coral reefs, *Coastal Processes and Physical Oceanography Laboratory, CINVESTAV-Mérida, G-MX-010416 CINVESTAV*.

Maslink, G. & Hughes, M.G. (2003), *Introduction to coastal Processes and Geomorphology*, Hodder Education, Londres, UK, pp 354.



Mason, T., & Coates, T. T. (2001). Sediment transport processes on mixed beaches: A review of shoreline management, *Journal of Coastal Research*, 17, pp. 645-657.

Medina, R. J., J. Muñoz J, Begoña Tejedor, Gregorio Gomez Piña (2006). Actuación experimental con diques modulares en Santa Ma. Del mar (Cadiz), Redes neuronales, socavación y licuefacción de arenas. II Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas, pp. 301-323.

Mendoza, Baldwin E. G., & Silva, Casarin R. (2004). Modelo de perfil de playa en presencia de estructuras sumergidas de protección, *Ingeniería hidráulica en México*, vol. XIX, núm. 1, pp. 5-161.

Ministerio de medio ambiente, Gobierno de España (2008). Guía metodológica para la instalación de arrecifes artificiales, Catálogo general de publicaciones oficiales <http://www.060.es>

Monismith, Stephen G. & Herdman, Liv MM, (2013). Wave Transformation and Wave-Driven Flow across a Steep Coral Reef, *JOURNAL OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY*. Stanford California. Vol. 43, pp 1356-1379.

Monroy, B. J. E. (2013). Desarrollo de una nueva tipología de dique sumergido a partir de piezas homogéneas, UNAM Tesis, pp148.

Moreno, B. J. L. (2015). Perfil de playas sustentadas: estudio hidrodinámico y experimental, Directrices de diseño, Universidad Politécnica de Madrid Tesis, pp. 296.

Möso, Aranda Cesar (2004). Estudio numérico- experimental de la dinámica de la zona cercana a la costa, tesis universidad politécnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental (fins octubre de 2015) [64] texto en línea <http://hdl.handle.net/10803/6389>

Odériz, M. I. (2014). Análisis morfodinámico de duna y perfil de playa en presencia de vegetación, Tesis, pp. 119.

Ortiz, Sotomayor, Á. (2005). Los Arrecifes de Coral, (A. Rodríguez, E. Ortiz & H. Ruiz Torres, Eds.).

Pérez, Romero D. M. (2008). Procesos hidrodinámicos en diques mixtos y efectos de escala, Tesis, Universidad de Granada, programa de Doctorado Dinámica de los flujos Biogeoquímicos y sus aplicaciones, pp.180.

Ramos, Esplá A. A. (2002). Arrecifes artificiales como medidas de restauración de hábitats marinos costeros, *Ecosistemas revista científica de ecología y medio ambiente*, vol. 11, No 1, pp 8.

Reguero, Borja G., Beck, Michael W., Agostini, Vera N., Kramer, Philip, & Hancock Boze, (2018). Coral reefs for coastal protection: A new methodological approach and engineering case study in Grenada, Research article, *Journal of Environmental Management*, volumen 210, pp. 146-161.

Rocha, F. Arturo (2007). Hidráulica de tuberías y canales- PDF, pp. 530.

ROOM,1.0-09. (2009). Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. Agentes climáticos), 1ª Edición.

Sallenger, A. H. (2000). Storm Impact Scale for Barrier Islands, *Journal of Coastal Research*, pp. 890-895.

Sánchez, A. A., & Jiménez, J. A. (1994). Ingeniería de playas (i): Conceptos de morfología Costera, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. *Ingeniería del Agua*. Vol. 1 Num. 2. Universitat Politècnica de Catalunya. pp 96-114.

- Seaman, W., Jr. and L. N. Sprague. (1991). Artificial habitat practices in aquatic systems, Eds. *Artificial Habitats for Marine and Freshwater Fisheries*. Academic Press, Inc., San Diego, CA. pp. 1 -27 In: W. Seaman, Jr. and L. N. Sprague,
- Shepard, F. (1950) Beach cycles in southern California, U.S, Army Corps of Engineers. Beach Erosion Board, Technical Memorandum No. 20
- Silva, R.; Mendoza, E., Mariño-Tapia, I.; Martínez, ML y Escalante, E. (2016). An artificial reef improves coastal protection and provides a base for coral recovery, *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia)*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, No. 75, pp. 467-471.
- Silva, R. Losada I.J & Losada, M.A. (2000). Reflection and transmission of tsunami waves by coastal structures, *Applied Ocean Research*, Vol.22. pp 215-223.
- Spalding, M. D., Ravilious, C., & Green, E. P. (2001). *World Atlas of Coral Reefs*, (UNEP/WCMC, Ed.), *Marine Pollution Bulletin*. Berkley and Los Angeles: University of California Press. [http://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00310-1](http://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00310-1)
- Troch, P. Burcharth H. F., & Liu, Z. (1999). Scalling of core material in rubble mound breakwater model tests, *Proceedings of the 5th Internacional conference on Coastal and Port Engineering in Develeoping Countries (COPEDEC V)*, Cape Town.South Africa.
- Van Rijn, L. (1998). *Principles of coastal morphology*, Aqua Publications, Amsterdam, Holanda, pp.730.
- Van, Zanten, B. T., Van, Beukering, P. J. H., & Wagtendonk, A. J. (2014). Coastal protection by coral reefs: A framework for spatial assessment and economic valuation, *Ocean and Coastal Management*, 96, 94–103. <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.05.001>
- Vidal, C., Losada M. A., Medina, R., & Losada, I. (1994). Análisis de la estabilidad de diques rompeolas, *Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria*, Vol. 1 Núm. 1, pp. 18.
- Weishar, Lee L., y Robert, J., Byrne (1978). *Field Study of Breaking Wave Characteristics*, 16th International Conference on Coastal Engineering. pp 487-506.
- Wells, S., Ravilious, C., & Corcoran, E. (2016). In the front line: Shoreline protection and other Ecosystem services from Mangroves and Coral Reefs, *UNEP World Conservation Monitoring Centre*.
- William, A. (a) (2010-2013). *Coral Reef Facts*. Your. Online Guide to the World of the Coral Reef., Recuperado de <http://www.coral-reef-info.com/Indo-Pacific-coral-reefs.html>
- William, A. (b) (2010-2013). *Coral Reef Facts*. Your. Online Guide to the World of the Coral Reef, Recuperado de <http://www.coral-reef-info.com/caribbean-coral-reefs.html>
- William, A. (c) (2010-2013). *Coral Reef Facts*. Your. Online Guide to the World of the Coral Reef. Recuperado de <http://www.coral-reef-info.com/red-sea-coral-reefs.html>