



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio experimental de la estabilidad hidráulica de diques
homogéneos de baja cota de cubípodos. Aplicación a la
protección costera de la playa San Luis en San Andrés
(Colombia)

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Mashadyan , Gohar

Tutor/a: Molines Llodrá, Jorge

Cotutor/a: Gómez Martín, María Esther

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Estudio experimental de la estabilidad hidráulica de
diques homogéneos de baja cota de Cubípodos.
Aplicación a la protección costera de la playa San Luis
en San Andrés (Colombia)

Presentado por

Mashadyan, Gohar

Para la obtención del

Grado en Ingeniería Civil

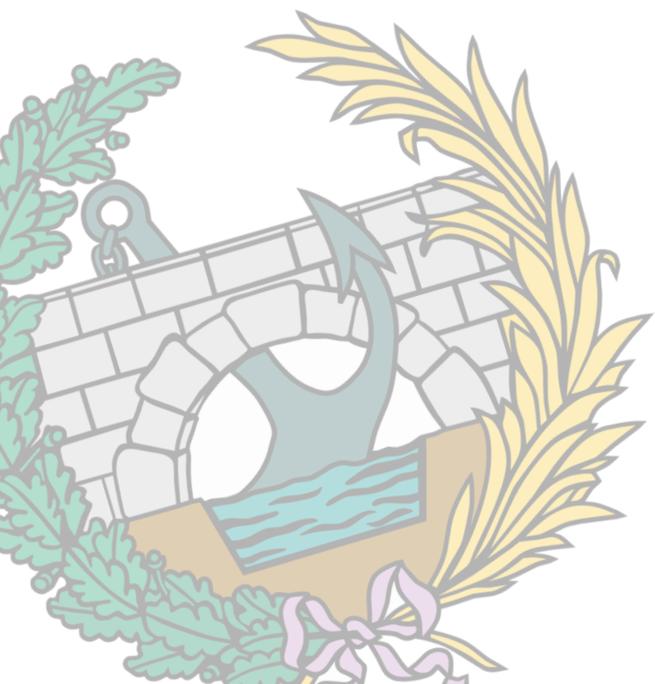
Curso: 2021/2022

Fecha: Septiembre 2022

Tutor: Jorge Molines Llodrá

Cotutor: M. Esther Gómez Martín





CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	6
1 Introducción.....	7
2 Resumen.....	7
3 Objetivos.....	8
CAPÍTULO 2. MOTIVACIÓN	9
1 Introducción.....	10
2 Arrecifes de coral en el Mar Caribe	10
2.1 La amenaza de los arrecifes de coral.....	11
3 Arrecifes de coral en la Isla de San Andrés (Colombia).....	13
CAPÍTULO 3 ESTADO DEL ARTE	16
1 Introducción.....	17
2 Oleaje en condiciones de rotura	17
2.1 Tipos de rotura	17
2.2 Criterio de rotura del oleaje por fondo	19
3 El Cubípodo	19
3.1 Ventajas.....	20
3.2 Estabilidad hidráulica del Cubípodo	21
4 Diques exentos de baja cota de coronación	22
4.1 Modos de fallo.....	25
4.2 Estabilidad hidráulica	27
4.2.1 Tipos de estructuras.....	28
4.2.1.1 Diques arrecifes dinámicamente estable	28
4.2.1.2 Estructuras emergentes estáticamente estables	30
4.2.1.3 Estructuras sumergidas estáticamente estables.....	32
5 Diques homogéneos de baja cota de coronación (HLCS)	34
5.1 Introducción.....	34
5.2 Revisión histórica	35
5.3 Funcionalidad.....	36
5.4 Ventajas e inconvenientes.....	37

5.5	Mallas de colocación	38
5.6	Estabilidad.....	39
6	Criterios de avería	40
7	Método de malla virtual	44
8	Porcentaje de daño	46
9	Daño adimensional para rotura por fondo.....	47
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL		48
1	Introducción.....	49
2	Descripción de instalaciones y equipos	50
2.1	Descripción del canal de oleaje del LPC-UPV	50
2.1.1	Sistema generador de oleaje.....	50
2.1.2	Sistema disipador de energía.....	52
2.2	Instrumentación.....	53
2.2.1	Sensores de nivel.....	53
2.2.2	Material audiovisual.....	55
2.3	Modelo físico	56
2.3.1	Material	57
2.3.2	Malla de colocación.....	58
2.4	Coeficiente de capa.....	60
2.5	Método experimental y proceso de construcción.....	60
2.6	Test Matrix	62
2.7	Análisis de datos experimentales	64
2.7.1	Análisis del oleaje	64
2.7.1.1	LASA.....	64
2.7.1.2	LPCLab	65
2.7.1.3	SwanOne	66
2.7.2	Criterios de avería y análisis de la estabilidad	69
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE ENSAYOS Y RESULTADOS		71
1	Introducción.....	72

2	Método de medir el daño.....	72
2.1	Conteo visual y método de la Malla Virtual para HLCS	72
3	Resultados de los ensayos.....	75
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		82
1	Resumen y conclusiones.....	83
2	Elección del tipo de estructura.....	83
CAPÍTULO 7. APLICACIÓN PRÁCTICA		85
1	Introducción.....	86
2	Localización	86
2.1	Playa San Luis	86
2.2	Accesos	87
3	Subsistema físico y natural.....	88
3.1	Climatología	88
3.2	Batimetría.....	89
3.3	Geomorfología	90
3.3.1	Clasificación de la costa.....	90
3.4	Hidrología.....	93
3.5	Cambio climático.....	94
3.6	Clima marítimo	95
3.6.1	Oleaje	95
3.7	Mareas.....	99
4	Subsistema socioeconómico	100
4.1	Demografía	100
4.2	Actividades económicas	100
5	Diseño de la estructura.....	101
5.1	Criterios básicos de diseño	102
5.2	Altura de ola de cálculo	102
5.3	Tamaño de Cubípodos.....	105
5.4	Definición de la sección.....	105

5.5	Diseño en planta	107
6	Procedimiento constructivo	109
6.1	Fase de construcción	109
6.2	Maquinaria y equipos	111
7	Programa de trabajos	112
7.1	Trabajos previos.....	112
7.2	Fabricación y acopio de Cubípodos	112
7.3	Construcción de los diques	114
7.4	Gestión de residuos, Seguridad y salud y Control Ambiental	114
7.5	Diagrama de Gantt.....	114
7.6	Valoración económica	115
7.6.1	Trabajos previos.....	115
7.6.2	Fabricación y acopio de Cubípodos	115
7.6.3	Transporte y construcción de diques.....	117
7.6.4	Gestión de residuos	117
7.6.5	Seguridad y salud	117
7.6.6	Control ambiental.....	118
7.6.7	Presupuesto de ejecución material.....	118
REFERENCIAS		119
PLANOS.....		123

CAPÍTULO N° 1

INTRODUCCIÓN

1 Introducción

El presente proyecto titulado “Estudio experimental de la estabilidad hidráulica de diques homogéneos de baja cota de Cubípodos. Aplicación a la protección costera de la playa de San Luis en la Isla San Andrés (Colombia)” tiene como objeto servir como Trabajo Final de Grado para la titulación en Grado en Ingeniería Civil por Escuela Técnica Superior en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de València al autor, Gohar Mashadyan.

2 Resumen

El cambio climático y muchas actividades son una amenaza para los arrecifes de coral en todo el mundo. La degradación de estas estructuras marinas puede afectar negativamente la calidad medioambiental y la propia actividad turística, ya que muchos en muchos países la economía se basa en el turismo.

En el *Capítulo nº 2. Motivación* donde se realiza un análisis a las diferentes amenazas que causan la recesión de los arrecifes de coral en todo el mundo y se basa en fuentes fiables como la UNESCO y la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos. Además, trata de dar una visión general de la situación de los corales del país donde se pretende realizar la actuación, es decir Colombia.

En el *Capítulo nº 3. Estado del arte*, donde se trata de mostrar la literatura existente de diques exentos, focalizando en las estructuras de baja cota de coronación, planteando el daño y cálculo de todos los coeficientes necesarios.

En el *Capítulo nº 4. Metodología experimental* se describe la metodología experimental de los ensayos que se han realizado en la Universidad Politécnica de Valencia sobre varios tipos de estructuras homogéneas de Cubípodos a partir de los criterios de la Universidad Nacional Autónoma de México, mostrando así el diseño experimental empleado, definiendo el canal de oleaje, y factores fundamentales como las mallas de colocación de las piezas.

En el *Capítulo nº 5. Análisis de ensayos y resultados* y *Capítulo nº 6. Conclusiones* se trata de presentar los resultados obtenidos de los ensayos realizados, comentando la estabilidad hidráulica que han presentado cada una de las estructuras ensayadas.

Finalmente, en el *Capítulo nº 7. Aplicación práctica* se recoge toda la información de los capítulos anteriores para presentar una opción viable de construir un sistema de diques exentos que permitan una regeneración de los arrecifes de coral de playa San Luis, además de proteger una costa en clara recesión.

3 Objetivos

El principal objetivo de este Trabajo Final de Grado es estudiar la estabilidad hidráulica de los diques homogéneos de baja cota de coronación de Cubípodos.

El problema que se pretende resolver es la erosión de playa inducida y degradación progresiva de los arrecifes de coral (Posada, P.O.B. y Henao, P., W.,2007) ya que es una amenaza para la estabilidad de las playas de alrededor. Se propone la construcción de arrecife artificiales para favorecer la colonización de los corales. Y por ello, se estudiará los HLCS que son una nueva tipología de dique-arrecife clasificada como infraestructura verde (Odriz et al., 2018). Existen estudios de las estructuras de baja cota (LCS) que se utilizan habitualmente como diques exentos para la protección y estabilización de las playas de la erosión, esto se permitió desarrollar gracias al proyecto DELOS (2003-2005), pero no es válido para las estructuras homogéneas, pero si útil. Las diferentes soluciones a estudiar se realizarán en LPC-UPV a través del canal de ensayo y las herramientas necesarias, las estructuras estarán formados por Cubípodos que son estables en condiciones de olas rompientes. Respecto a la metodología a emplear, será prueba y error, variando capas, pendientes y olas regulares e irregulares.

Con ello se tiene por objetivo realizar un diseño óptimo de HLCS de Cubípodos cumpliendo la estabilidad hidráulica, es decir, la relación entre la estructura (D_n , Δ , n_{capas} , malla, etc.), el oleaje de cálculo (H_s , T_m , d_s , etc.) y el daño observado.

CAPÍTULO Nº 2

MOTIVACIÓN

1 Introducción

Los arrecifes de coral han sido una de las víctimas más destacadas del cambio climático y el aumento de las temperaturas en los últimos años (ver Lowe et al., 2011). El retroceso y degradación progresiva observada en el Caribe, Australia y el Sureste asiático es un indicador evidente de la mala salud de estos ecosistemas marinos, una amenaza para la biodiversidad marina (ver Mumby 2007), en algunos lugares, este fenómeno es una amenaza directa a la estabilidad de las playas resguardadas por estas barreras naturales, las cuales son esenciales para el desarrollo económico y social de una gran cantidad de lugares que dependen del turismo de sol y playa.

La motivación principal de este proyecto es encontrar una solución mediante diques exentos homogéneos de Cubípodos que ayude a disminuir la problemática recesión de los arrecifes de coral y las consecuencias que tiene sobre las playas que protegen actuando como barreras naturales (ver Ferrario et al., 2014). Muchos científicos estiman que la supervivencia de los arrecifes corre peligro si no se aumentan los recursos y esfuerzos para protegerlos y conservarlos (ver Frieler et al., 2013).



Figura 1: Arrecifes de barrera de San Andrés (Colombia).

Fuente: Invemar (2000)

2 Arrecifes de coral en el Mar Caribe

El mar Caribe es un mar abierto tropical del océano Atlántico situado al este de América Central y al norte de América del Sur, cubriendo la superficie de la placa del Caribe. Es uno de los mares salados más grandes del mundo y tiene un área de unos 2 763 800 km² (1 063 000 millas cuadradas).

Los Arrecife de coral son estructuras o grupos de diversas especies subacuáticas formados por carbonato cálcico con un bajo contenido en nutrientes, que interactúan entre sí y con el entorno

físico. Además, son el hábitat de una gran variedad de especies de la vida marina, que incluyen diversas clases de esponjas, ostras, almejas, cangrejos, estrellas de mar, erizos de mar y muchas especies de peces. Son uno de los ecosistemas más valiosos y biológicamente diversos y por ello son una razón importante de turismo alrededor de todo el mundo.



Figura 2: Arrecifes coralinos.

Fuente: Burke, L. y Maidens, J., (2005)

Los tipos de arrecifes de coral existentes son:

- Los arrecifes costeros
- Los arrecifes de barrera
- Los atolones

2.1 La amenaza de los arrecifes de coral

La región del Caribe está dotada con una gran riqueza de recursos costeros y marinos, incluyendo una maravillosa multitud de plantas y animales únicos. La mayoría de los países e islas Caribeñas dependen del mar por los bienes y servicios que provee, por lo tanto, es la principal fuente de la economía del país.

Sin embargo, existe una creciente preocupación de que la degradación acelerada y pérdida de estos recursos resulte en una considerable penuria para las poblaciones, naciones y economías costeras. El estudio "Arrecifes en Peligro en el Caribe" (Burke, L. y Maidens, J., 2005) reveló que casi dos tercios de los arrecifes de la región están directamente amenazados por actividades humanas.

Gran parte de los arrecifes se encuentran próximos a la costa, por lo que están expuestos a la acción humana, tanto por medio de la explotación directa como a través de impactos indirectos propios de zonas costeras.

Algunas de las amenazas más destacadas podrían ser los siguientes (Burke, L. et al., 2005):

- **Desarrollo costero**, los arrecifes coralinos están sometidos a estrés por daño directo del dragado, los rellenos de tierra, y la minería de rena y cal para la construcción, así como por presiones menor directas como son el escurrimiento desde sitios de construcción y la eliminación de hábitats costeros.

- Diferentes tipos de contaminación que alcanzan la costa, como la **Sedimentación y contaminación desde fuentes terrestres**, por ejemplo:
 - La agricultura, es una fuente de incremento de escurrimiento de sedimentos, nutrientes y plaguicidas.
 - La descarga de nutrientes en las aguas costeras es una causa muy importante de eutrofización.
 - Productos químicos orgánicos o metales pueden ser muy tóxicos para la reproducción y crecimiento de las estructuras coralinas.
 - Todo residuo y micro plásticos puede obstaculizar la entrada de luz necesaria.
- La **sobrepesca** amenaza a más del 60% de los arrecifes coralinos caribeños.

Otras amenazas más relevantes para los ecosistemas de arrecifes de coral son el aumento de las temperaturas de los océanos, la acidificación de estos generado por el aumento de la concentración de CO₂, el aumento del nivel del mar, la alteración de los patrones de circulación de los océanos y el aumento de las tormentas tropicales.

El cambio climático está alterando a muchos ecosistemas costeros. En las últimas décadas, se estima que los arrecifes de coral han ido retrocediendo a un ritmo anual del 1% al 2% en las últimas décadas (véase Rinkevich, 2014). Esta degradación refleja el impacto de las perturbaciones humanas en la biodiversidad y el funcionamiento de los arrecifes de coral, lo que se traduce en una mala salud de los ecosistemas marinos del mundo. Además, en algunas zonas, la estabilidad de las playas cercanas depende del estado de salud de los arrecifes de coral (véase Ferrario et al., 2014).

3 Arrecifes de coral en la Isla de San Andrés (Colombia)

La isla de San Andrés (Colombia) se encuentra en el Mar Caribe occidental, al noroeste del territorio continental nacional de Colombia y forma parte del Archipiélago de San Andrés y Providencia.



Figura 3: Ubicación de la Isla de San Andrés (Colombia).

Fuente: Elaboración propia

La isla cuenta en sus costas con arrecifes coralinos de tipo barrera, praderas de pastos marinos, litorales arenosos (playas) y acantilados rocosos, bosques secos tropicales y playas arenas coralinas. La barrera arrecifal rodea la isla de San Andrés (Colombia) en sentido Norte-Noroeste tiene una longitud aproximada de 18 km y una anchura máxima de 10 km y suma con los de Providencia y Santa Catalina, aproximadamente un 5% del Mar Caribe y el 76% de los arrecifes de Colombia (INVEMAR-CORALINA, 2016). Sus formaciones coralinas son las más extensas de Colombia y las segundas del Mar Caribe (Banco de la República, 2016).

En los arrecifes se pueden reconocer tres importantes sistemas que determinan la topografía submarina, los cuales enumerados desde la orilla hacia el mar son:

- **Laguna interna con parches coralinos:** construcciones coralinas fragmentadas y separadas de forma discontinua formando tapetes a lo largo de la costa marina poco profunda.
- **Arrecife la barrera:** se desarrollan como líneas costeras de acumulaciones de carbonato de calcio (CaCO_3) por parte de corales hermatípicos a consideración de largo plazo en las eras geológicas. Las barreras protegen las costas de oleaje que provoca inundaciones, erosiones y fragmentaciones costeras.
- Terraza prearrecifal y talud externo

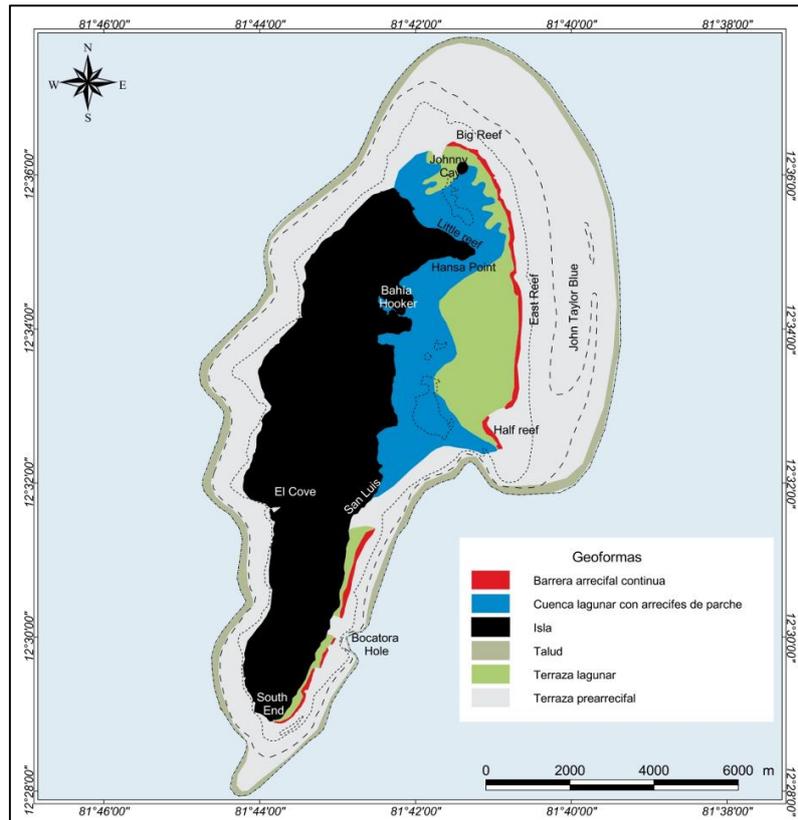


Figura 4: Mapa geomorfológico del complejo arrecifal de San Andrés (Colombia)

Fuente: Invemar 2000

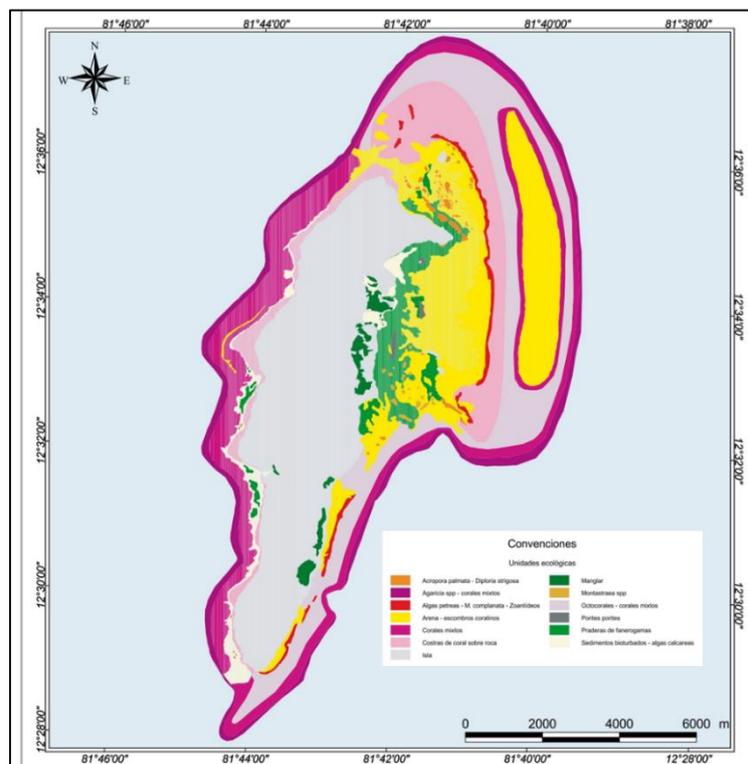


Figura 5: Mapa de unidades ecológicas del complejo arrecifal de San Andrés (Colombia)

Fuente: Invemar 2000

Pues la isla de San Andrés (Colombia) ha experimentado un considerable deterioro ambiental. La calidad de sus playas ha disminuido como resultado de la contaminación y la erosión, y una proporción significativa de los arrecifes coralinos ha muerto. (Banco de la República, 2016).

Específicamente, se han identificado 57 especies de coral, de las cuales el 90% se encuentra en la lista roja de especies amenazadas, según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (Banco de la República, 2016).

La Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Coralina, 2006a) ha identificado, entre otras, las siguientes amenazas: (Banco de la República, 2016).

- Las quemas para fines agrícolas, y la deforestación y erosión causadas por el pastoreo de ganado.
- El relleno de tierras para ocupar ese espacio.
- La falta de tratamiento y disposición final de residuos sólidos y líquidos, cuyo manejo inadecuado reduce la calidad del agua.
- El abuso en la explotación de los recursos naturales, a pesar de la existencia de leyes que los protegen, tales como la sobreexplotación del recurso pesquero, incluyendo especies del arrecife y herbívoros marinos (la mayor amenaza se presenta en los atolones del norte y del sur).
- Problemas de tipo social, como la pobreza y la sobrepoblación (con la subsecuente proliferación de la urbanización y de tugurios).
- Daños físicos ocasionados a los corales y pastos marinos por embarcaciones varadas, ancladas y por contacto.

La basura, polución, sedimentación, sobrepesca, turismo degradan y causan un colapso ecológico. Como resultado de las actividades citadas muchos arrecifes de coral han sufrido un “estrés” crónico. (Contraloría general del departamento archipiélago de San Andrés, providencia y santa catalina. 2005)

CAPÍTULO N° 3

ESTADO DEL ARTE

1 Introducción

En este capítulo se va a exponer toda una recopilación de información referente a la estabilidad de las estructuras de baja cota de coronación de Cubípodo para su posterior práctica en la playa San Luís de la Isla de San Andrés (Colombia).

En primer lugar, se definirán algunos conceptos previos necesarios para el diseño de estas estructuras. Seguidamente, se revisará la literatura existente relativa al diseño de estructuras de baja cota de coronación, presentando así las diversas tipologías y analizando su comportamiento frente a estabilidad.

2 Oleaje en condiciones de rotura

El oleaje es el causante de las modificaciones producidas en la línea costera, representa movimientos ondulatorios, oscilaciones periódicas de la superficie del mar, formadas por crestas y depresiones que se desplazan horizontalmente.

El oleaje antes de alcanzar la estructura marítima, sufre un proceso de transformación desde aguas profundas hasta la costa debido a una serie de fenómenos, asomeramiento, refracción, difracción y rotura. En ellos destaca la rotura por ser un fenómeno que aparece cercana a la costa y es la causa que afecta a la mayoría de las estructuras costeras.

El proceso de rotura se inicia cuando la ola se vuelve muy energética y se hace inestable. Al producirse esta inestabilidad hay partículas de fluido que se escapan de la forma de la onda, perdiéndose el movimiento orbital que ha caracterizado a la onda hasta ese momento y transformándose en un movimiento caótico impredecible.

2.1 Tipos de rotura

En la literatura marítima se distinguen dos tipos de rotura, por decrestamiento, es cuando se excede el peralte de la ola, y otro tipo de rotura es por fondo que es cuando se supera el límite de profundidad relativa.

En este estudio se centra en el análisis de la rotura por fondo del oleaje.

Iribarren (1950) define un parámetro para poder clasificar la rotura del oleaje, llamada el número de Iribarren, este número es en función de la pendiente media del talud donde se produce la rotura, la altura de ola, y la longitud de la onda en profundidades indefinidas, es decir:

$$I_r^* = \frac{m}{\sqrt{\frac{H}{L_o}}} \quad (1)$$

Siendo m la pendiente del fondo, H es la altura de ola, $L_o = gT^2/2\pi$ la longitud de onda en aguas profundas, g la aceleración de la gravedad, T el periodo del oleaje y I_r^* es el número de Iribarren y se ha aplicado ampliamente para la clasificación de la rotura de las olas, se suelen considerar cuatro categorías de rotura de las olas en las playas y estructuras inclinadas: descrestamiento, voluta, colapso y oscilación.

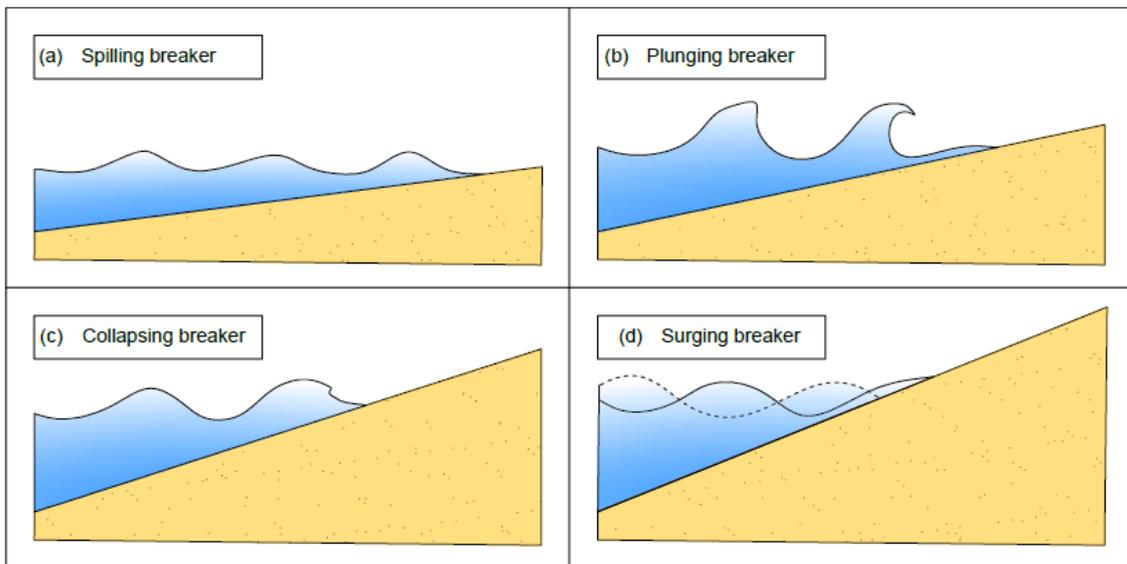


Figura 6: Tipos de rotura del oleaje.

Fuente: Mares Nasarre (2021)

La rotura tipo *spilling* es producida en pendientes de playa muy suaves y olas con peralte relativamente alto, creando inestabilidad en la cresta de la ola.

La rotura tipo *plunging* es producida con pendientes de mayor inclinación y peraltes suaves o intermedios. Se caracterizan por una gran disipación de energía, turbulencias y atrapamiento de aire. Su cresta se vuelve primero vertical, luego se enrosca sobre la cara de la ola hacia la costa y finalmente cae sobre la depresión de la ola con un impacto violento.

El tipo de rotura *collapsing* se encuentra entre las olas *plunging* y *surging*. Son similares a las olas *plunging*, pero la cresta no rompe.

La rotura tipo *surging* se produce en playas con pendientes muy pronunciadas, donde las olas no rompen, sino que asciende y desciende por la pendiente de la playa disipándose.

Tipo de rotura	$I_r^* = \frac{m}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}}$
<i>Spilling</i>	$I_r^* < 0.5$
<i>Plunging</i>	$0.5 < I_r^* < 2.5$
<i>Collapsing</i>	$2.5 < I_r^* < 3.0$
<i>Surging</i>	$I_r^* > 3.0$

Tabla 1: Clasificación de los tipos de rotura del oleaje en función del número de Iribarren, I_r^* .

2.2 Criterio de rotura del oleaje por fondo

Para el diseño de estas estructuras de baja cota de coronación es importante el análisis de rotura por fondo. Por lo tanto, para establecer este criterio de rotura en función de la profundidad se usa el índice de rotura adimensional, γ_{br} , definido como el cociente máximo entre la altura de ola y la profundidad (H/h), en el punto de rotura:

$$\frac{H}{L} \geq \gamma_{br} = \left(\frac{H}{h}\right)_{max} = \frac{H_b}{h_{br}} \quad (2)$$

Siendo H_b la altura de ola en rotura a profundidad h_{br} .

Otro parámetro con el que se puede definir la rotura es el índice de altura en rotura, Ω_b , definido mediante la siguiente expresión:

$$\Omega_b = \frac{H_b}{H_0} \quad (3)$$

3 El Cubípodo

El Cubípodo es una pieza prefabricada de hormigón para la construcción de diques basado en los elementos cúbicos o paralelepípedicos tradicionales. Este elemento apareció en 2005 gracias a Josep R. Medina y M. Esther Gómez-Martín, en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València.

Se caracteriza por ser simple y robusta pudiendo ser utilizada como elemento constitutivo del manto principal de diques rompeolas.

Se trata de un elemento de forma básica cúbica o paralelepípedica con una protuberancia en cada cara para evitar el acoplamiento entre elementos que resiste la acción del oleaje principalmente por gravedad y fricción lateral, colocándose en el talud de forma aleatoria en una o dos capas.



Figura 7: Vista 3D del Cubípodo.

Fuente: Medina y Gómez-Martín (2016)

Este elemento presenta ventajas similares que el elemento original cúbico convencional, con una robustez, fabricación, manejo con piezas y acopio, resolviendo los problemas típicos de adoquinamiento del bloque tradicional gracias a las protuberancias en sus caras. Los Cubípodos reducen significativamente el modo de fallo de compactación heterogénea del manto principal de cubos.

Se trata de una pieza que permite diferentes formas de colocación (aleatoria, trabada, etc.), permite o no la construcción en una sola capa, exigiendo una determinada porosidad y teniendo una estabilidad hidráulica diferente.



Figura 8: Contradique del Puerto Exterior de A Coruña (España)

Fuente: Manual del Cubípodo (2016)

3.1 Ventajas

El Cubípodo tiene por objeto aprovechar las ventajas de los bloques cúbicos y superar sus principales inconvenientes, como son, la baja estabilidad hidráulica ($K_D = 6$), el adoquinamiento o compactación heterogénea y la baja fricción con el manto secundario del bloque tradicional. M. Esther Gómez-Martín y Josep R. Medina estudiaron que ventajas principales del Cubípodo son:

1. **Evitar el adoquinamiento y deslizamiento del bloque tradicional:** Impide el acoplamiento cara a cara de los bloques cúbicos tradicionales y aumenta la fricción del manto con la capa inferior ya que las protuberancias penetran en dicha capa. Se dificulta así la extracción de los elementos del manto y el deslizamiento de los mismos.
2. **Gran robustez:** Elevada resistencia estructural individual de los elementos a la rotura debido a la poca esbeltez de las partes del Cubípodo.
3. **Elevada estabilidad hidráulica y menor rebase:** Aumenta la resistencia de los diques frente al oleaje.
4. **Fácil de construir:** Ejecución sencilla del dique, es una ventaja frente a los bloques cúbicos tradicionales y frente a los elementos de colocación no aleatoria. La colocación de los Cubípodos es aleatoria en dos capas con pinzas de presión que permiten una colocación eficiente, no requiriendo la colocación cuidada que exigen otras tipologías existentes. El encofrado para su fabricación es sencillo sin ningún requisito de las unidades individuales.
5. **Ahorro económico de materiales:** Se utilizarían piezas más pequeñas para resistir los mismos temporales que con elementos cúbicos tradicionales, con un volumen reducido de hormigón requerido para la construcción del dique y con ello se consigue un ahorro económico y reducción de la huella ecológica.

3.2 Estabilidad hidráulica del Cubípodo

En este apartado se describen las fórmulas de estabilidad hidráulica más utilizadas para el diseño de diques de Cubípodos en condiciones de ola rompiente.

En 2006 con el fin de evaluar la estabilidad hidráulica del Cubípodo se realizaron los primeros ensayos de estabilidad de mantos de Cubípodos con oleaje regular e irregular en el canal de ensayos del Laboratorio de Puertos y costas de la Universitat Politècnica de València.

Los ensayos estaban constituidos por dos capas de Cubípodos de hormigón, de diferentes colores, para así poder detectar rápidamente las piezas que se hayan movido a causa de la acción del oleaje. Los Cubípodos se colocaron al azar, en líneas sucesivas.

Gracias a estos ensayos obtuvieron unos resultados que permitió comparar la evolución del daño observado con los Cubípodos y con los cubos. De esta comparación, se concluyó que la estabilidad hidráulica, en tronco y en morro, de los Cubípodos es muy superior a la de los cubos tanto en disposición monocapa como bicapa y menores rebases. (ver A. Corredor)

La estabilidad hidráulica se suele definir con el coeficiente de estabilidad (K_D) utilizado en la ecuación de Hudson (1959), basada en la de Iribarren (1938) y popularizada internacionalmente por el SPM (1975), que relaciona el temporal de cálculo ($H = H_b$ o $H = H_{1/10} \approx 1.27 H_{m0}$) con el peso

de los elementos del manto (W) a iniciación de averías, considerando el talud ($\cot \alpha$), siendo α el ángulo que forma el talud del manto con la horizontal, el peso específico del agua (γ_w) y el del material de la escollera natural o artificial (γ_r). Considerando el peso específico relativo sumergido y el lado del cubo equivalente de la pieza, $\Delta = (\gamma_r / \gamma_w - 1)$ y $D_n = (W / \gamma_r)^{1/3}$.

$$W = \frac{1}{K_D} \frac{H^3}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1\right)^3 \cot \alpha} \gamma_r = \frac{1}{K_D} \frac{(1.27 H_{m0})^3}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1\right)^3 \cot \alpha} \gamma_r \approx \frac{2}{K_D \cot \alpha} \frac{\gamma_r (H_{m0})^3}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1\right)^3} \quad (4)$$

Las ecuaciones (4) pueden definir en las ecuaciones (5) conocidas como la fórmula de Hudson generalizada que muestran el número de estabilidad, N_s , como la relación entre la altura de ola H (oleaje regular) o altura de ola significativa H_{m0} (oleaje irregular) por un lado y por otro lado el lado del cubo equivalente, D_n , y la densidad relativa sumergida del material de los elementos del manto, Δ .

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad N_s = \frac{H_{m0}}{\Delta D_n} = \frac{H_{m0}}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_w} - 1\right) \left(\frac{W}{\gamma_r}\right)^{1/3}} \approx \left(\frac{K_D \cot \alpha}{2}\right)^{1/3} \quad (5)$$

El coeficiente de estabilidad K_D , de la fórmula de Hudson (SPM, 1984) para la sección central del dique toma valores de 4 para escolleras naturales, 6 para cubos de hormigón y, a partir de los ensayos realizados, se obtuvo un valor superior a 40 para los Cubípodos. No obstante, estos valores se obtuvieron para oleaje no rompiente.

Como conclusión, el Cubípodo presenta una gran estabilidad hidráulica que permite un ahorro económico y de materiales respecto a los elementos cúbicos convencionales.

4 Diques exentos de baja cota de coronación

Los diques convencionales de baja cota de coronación o "Low Crested Structures" (LCS) como los diques exentos y los arrecifes artificiales se están proponiendo muy frecuentemente como medida de protección costera, en muchas ocasiones en combinación con regeneración artificial de las playas. Debido al menor impacto ambiental que producen, este tipo de defensas se utiliza con más frecuencia.

Los diques exentos de baja cota de coronación o "Low Crested Structures" (LCS) son estructuras marítimas dispuestas en serie paralelas a la línea de costa que permiten el rebase de las olas por encima de ellas, protegiendo así una determinada zona del litoral frente a la acción del oleaje reduciendo la cantidad de energía que penetra en ella.

Cuando las olas se aproximan al LCS, se producen varios procesos físicos. Una parte de la energía de las olas es reflejada en la pendiente relativamente pronunciada, mientras que otra parte se disipa al romper en la cresta de la estructura y/o por el flujo que atraviesa la estructura.

Este flujo poroso a través de la estructura es causado por las olas incidentes y la energía se disipa por el arrastre de aire y la fricción entre el agua y los bordes de los poros de la estructura (pérdidas por fricción).

En el caso de las olas no rompientes, este flujo poroso es el principal mecanismo de disipación de energía.

Por último, la parte restante de la energía se transmite por el flujo a través de la estructura y por el desbordamiento. Estos principios se ilustran en la Figura 9, donde también se muestra la diferencia entre una estructura emergida y otra sumergida

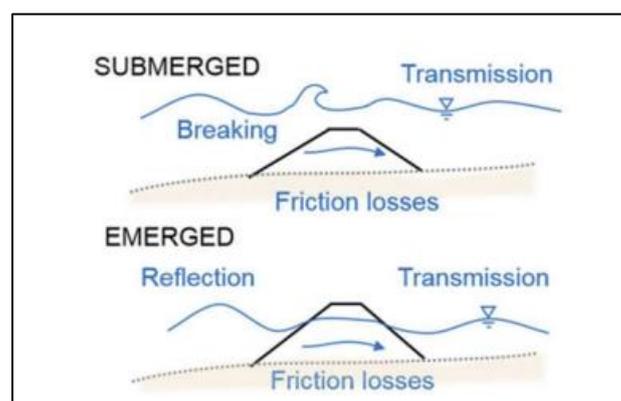


Figura 9: Energía de las olas en el dique sumergido y emergido

Fuente: (Schoonees et al., 2019).

Se caracterizan por tener la cota de coronación cercana al nivel del mar, estas estructuras son rebasadas por el oleaje con su nivel de cresta aproximadamente en torno al nivel de aguas tranquilas. Por lo tanto, se dividen en:

- estructuras emergentes con nivel de cresta por encima del nivel del mar: $R_c > 0$
- estructuras sumergidas con nivel de cresta por debajo del nivel del mar: $R_c < 0$

Esta definición podría llevar en algunos casos a la situación de que una estructura sea a veces una sumergida y otras veces una estructura emergente, debido a la variación de los niveles de agua.

Las ventajas principales de estos diques respecto a las convencionales son los siguientes:

- Menor impacto en la morfología de la costa, al tener un francobordo menor ya que dejan pasar una cierta cantidad del oleaje.
- Menores costes constructivos

- Bajo impacto visual.

Las LCS no sólo son valiosas para mitigar la erosión costera, sino que también pueden utilizarse para proteger las estructuras existentes y/o para adaptarlas a condiciones más severas como la subida del nivel del mar.

En aguas poco profundas es relevante evaluar la estabilidad del dique para todas las combinaciones de niveles de agua y olas. Hay que tener en cuenta, que las diferentes etapas de los impactos de las olas, los impactos que no rompen; las ya rotas y las que rompen son diferentes. (ver Karel De Keyser, Elias Jacobs 2019)

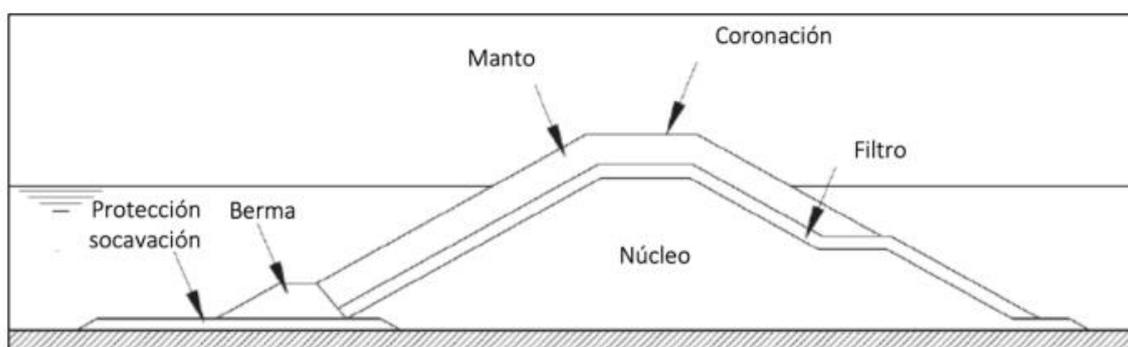


Figura 10: Sección transversal de un dique exento de baja cota de coronación.

Fuente: CIRIA, 2007

Una de las ventajas más importantes en las regiones turísticas es el bajo impacto visual. Además, el desbordamiento de la estructura favorece una buena circulación del agua en el lado de sotavento. Los LCS son similares a los arrecifes naturales, atraen a las especies marinas. En comparación con un dique sin rebase, el impacto en el clima de transporte y en la acumulación de la arena es más suave. Los LCS son estables y económicos.

La tendencia actual es construir diques exentos sumergidos, con coronación a nivel medio del mar, o con coronación que sobrepasa el nivel medio del mar en 0.5 m, eliminando el efecto antiestético que produce una muralla de piedras frente a la playa.

Respecto a las desventajas asociadas a las LCS, solo proporcionan una reducción de la acción de las olas y, por lo tanto, la protección de la orilla es parcial.

CIRIA (2007) define que la capa de armadura de un dique de cresta baja puede dividirse en diferentes segmentos: talud delantero (I), cresta (II) y talud trasero (III).

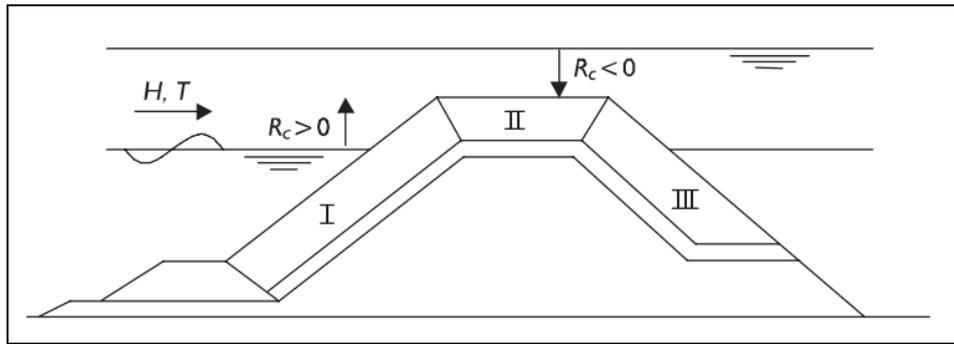


Figura 11: División del manto en fracciones.

Fuente: CIRIA, 2007

4.1 Modos de fallo

La estabilidad de los diques es un tema bastante relevante ya que para su análisis es necesario conocer sus posibles modos de fallo. Numerosos autores han tratado la estabilidad de los diques y Brunn (1979) define las principales causas de pérdida de estabilidad de un dique y las agrupa en once modos fundamentales. A continuación, se describen los once modos de fallo:

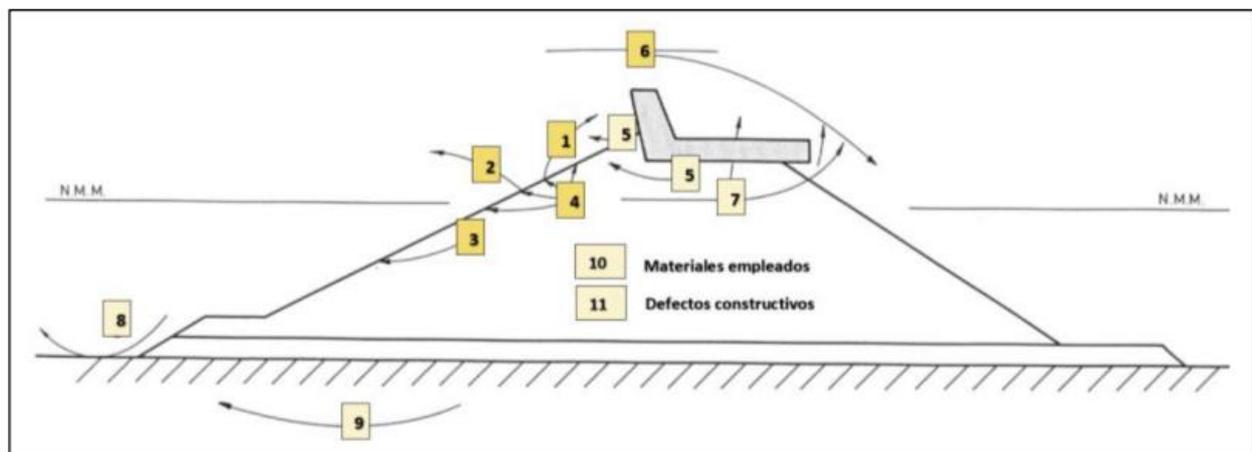


Figura 12: Modos de fallo de un dique en talud.

Fuente: CIRIA (2007)

1. Extracción de piezas o cantos del manto principal durante el ascenso del oleaje sobre el talud.
2. Extracción de piezas o cantos durante el descenso del oleaje sobre el talud.
3. Deslizamiento global del manto principal por falta de fricción con las capas subyacentes.
4. Movimientos continuos de los cantos del manto principal sin desplazamientos de su posición media, pero capaces de deteriorar en el tiempo la conformación del manto, ya que el cabeceo de una pieza está ligado a la estabilidad estructural de la misma (rotura por fatiga).
5. Socavación de la base del espaldón.
6. Averías en la coronación o en el manto del lado abrigado del dique por el rebase de las olas.

7. Falta de compacidad en las capas subyacentes, con excesiva transmisión de energía al interior del dique, provocando grandes fuerzas de levantamiento en el espaldón y capas interiores.
8. Erosión de pie o socavación en la parte inferior del dique, posible descalce de la estructura.
9. Asientos y hundimientos del terreno de cimentación.
10. Pérdida de las características mecánicas de los materiales.
11. Defectos o errores de construcción.

A estos modos de fallo habría que incluir la compactación heterogénea planteada por Gómez-Martín y Medina (2014), producida fundamentalmente en diques formados por cubos de hormigón prefabricados colocados aleatoriamente.

Estos once modos principales de fallo se pueden sintetizar en cinco grupos ya que han sido ampliamente estudiados a lo largo de los años:

GRUPO	CAUSAS DE FALLO ASOCIADAS
<i>Estabilidad global</i>	3, 5, 6 y 7
<i>Estabilidad hidrodinámica de las unidades</i>	1, 2, 3 y 4
<i>Estabilidad estructural</i>	4 y 10
<i>Estabilidad geotécnica</i>	8 y 9
<i>Errores constructivos</i>	10 y 11

Tabla 2: Asociación de las causas de Bruun a cada grupo de requerimientos.

Fuente: Gómez-Martín (2015)

Para el análisis de la estabilidad del manto del dique se debe considerar tanto la estabilidad de las unidades que lo conforman, como la del dique en conjunto.

El manto principal es la parte del dique más expuesta a la acción del oleaje y, por tanto, el elemento estructural que protege a sus capas internas evitando su extracción.

Cuando las grandes fuerzas del oleaje exceden un cierto límite afectan a la estabilidad hidrodinámica de los elementos del manto, provocando daños en la estructura. Estos daños son consecuencia de cadenas de sucesos, ya que el fallo de un elemento provocaría una sucesión de fallos, es decir, se provocaría una erosión por los movimientos de las piezas a causa del oleaje.

Gómez-Martín (2015) propone los siguientes cuatro modos de fallo del manto principal de un dique en talud:

- a. cabeceo (giro) de las piezas sobre sus apoyos en el manto,
- b. deslizamiento global del manto principal,
- c. extracción de piezas del manto debido a la fuerza de las olas, y
- d. Compactación heterogénea del manto (HeP).

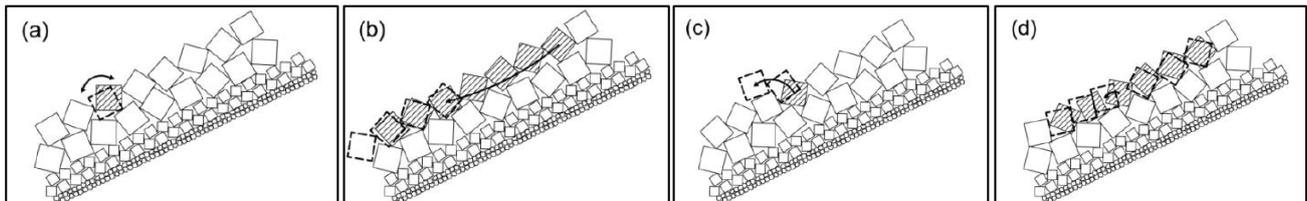


Figura 13: Modos de fallo del manto principal: (a) Cabeceo de piezas, (b) deslizamiento global del manto, (c) Extracción de piezas y (d) Compactación heterogénea del manto (HeP).

Fuente: Gómez-Martín (2015)

El primer movimiento, el cabeceo de las piezas, son continuos y no presenta grandes desplazamientos instantáneos. Está relacionado con la resistencia estructural y la rotura por fatiga de las piezas del manto.

El modo de fallo más relevante es la extracción de piezas del manto, debido a la pérdida de piezas en el manto ya que deja expuestas las capas inferiores a la acción del oleaje.

El deslizamiento global del manto se relaciona con la fricción insuficiente entre el manto y su capa inferior y/o con la excesiva inclinación del talud.

Por último, la compactación heterogénea definida por Gómez-Martín y Medina (2014) es habitual en piezas especiales de hormigón. Su impacto relativo depende de cuatro factores principales: (1) la geometría del elemento del manto, (2) la diferencia entre la porosidad inicial y la porosidad mínima que se puede alcanzar, (3) el talud del manto principal y (4) la fricción ente el manto principal y el secundario o filtro.

4.2 Estabilidad hidráulica

En este apartado se presentan los principales estudios existentes sobre la estabilidad hidráulica de un dique exento de baja cota de coronación (LCS) y sus fórmulas. En este trabajo de fin de grado se analiza la estabilidad hidráulica de diques de baja cota de coronación en condiciones de rotura del oleaje por fondo ($H_{m0} > 0.4h$).

Para el análisis de la estabilidad hidráulica, se hace uso del número de estabilidad, $N_s = H/(\Delta D_n)$, donde $D_n = \left(\frac{M}{\rho r}\right)^{1/3}$ es el diámetro nominal o lado del cubo equivalente de las piezas del manto, M es la masa de la pieza, ρr es la densidad de la escollera, $\Delta = (\rho r - \rho w) / \rho w$ es la densidad sumergida relativa, ρw es la densidad del agua y H es la altura de ola.

La estabilidad de estas estructuras es a veces mayor que la de las estructuras sin cresta, debido a que la energía de las olas puede pasar por encima de la cresta, lo que hace que las fuerzas de las olas sean menores en la capa de armadura de la pendiente hacia el mar.

El proyecto más importante sobre el estudio de estas estructuras fue el proyecto DELOS (Environmental design of low crested coastal defence structures). Para este proyecto se realizaron varios ensayos experimentales en 2D y 3D sobre la estabilidad del tronco y morro de protecciones costeras, identificando la influencia de la oblicuidad del oleaje, la altura de ola, el peralte del oleaje, el francobordo de coronación, el ancho de coronación y la pendiente de la estructura. El francobordo de estas estructuras se encuentra por debajo del nivel del mar $R_c < 0$ o próximo a él.

4.2.1 Tipos de estructuras

Van der Meer (1990) divide las estructuras de cresta baja en tres categorías en función de sus características estructurales y su finalidad.

En la *Figura 6* se observa un esquema de los tres tipos de LCS, básicamente se distinguen entre estructuras de cresta baja estáticamente estables y dinámicamente estables, también llamadas rompeolas de arrecife.

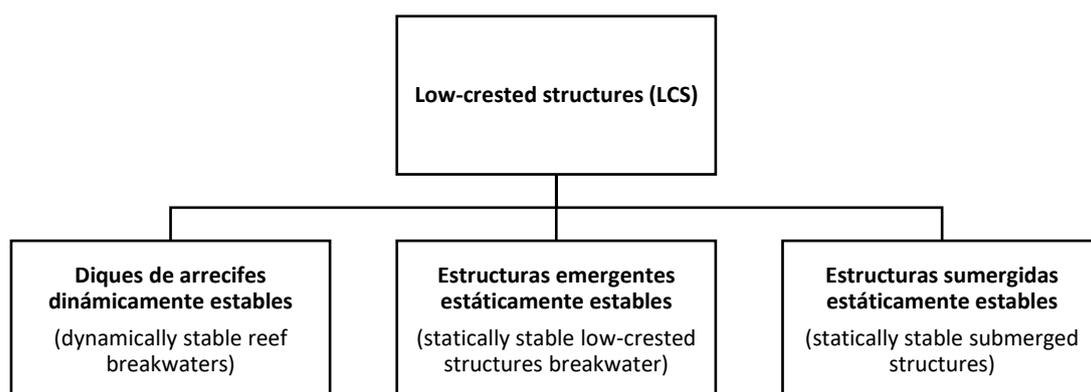


Figura 14: Clasificación de las estructuras de baja cota de coronación

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.1 Diques arrecifes dinámicamente estable (Dynamically stable reef breakwaters)

Ahrens (1987, 1989) y Van der Meer (1990) realizaron un análisis de la estabilidad hidráulica de las estructuras dinámicamente estables. Se enfocaron en el cambio de la altura de la cresta debido al

ataque de las olas. Ahrens definió una serie de parámetros adimensionales que describían el comportamiento de la estructura. El principal parámetro es el factor de reducción relativa de la altura de cresta h_c/h' , donde h_c y h' son la altura final de la estructura y la altura inicial respectivamente. El valor límite natural de h_c/h' es 1,0 (sin deformación) y 0,0 (la estructura ya no está presente), respectivamente.

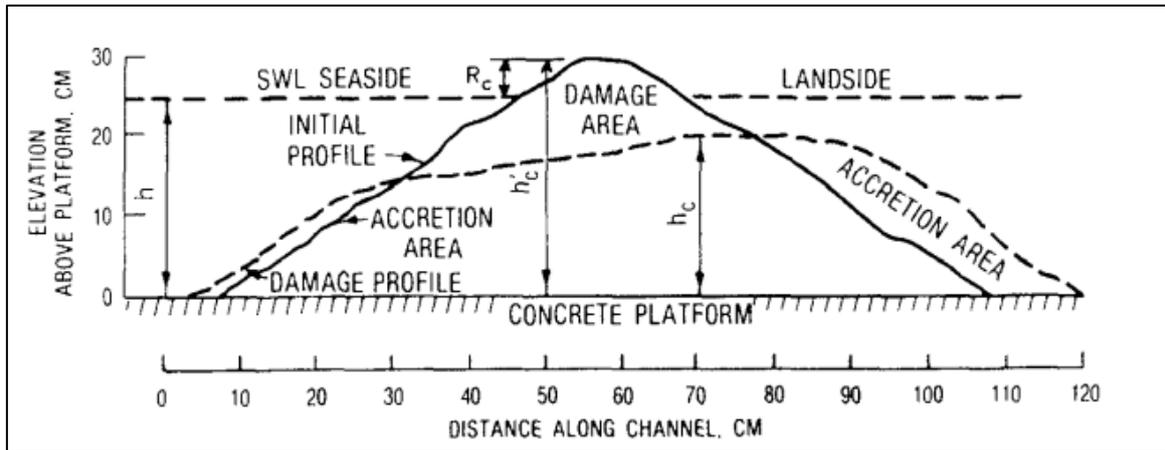


Figura 15: Ejemplo de un tipo de dique de arrecife

Fuente: Van der Meer 1990

La altura de ola puede caracterizarse por $H_s/\Delta D_{n50}$ (Van der Meer) o N_s (Ahrens).

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \quad (6)$$

Donde H_s = altura de ola significativa; D el diámetro nominal del material del manto (m) y Δ es la densidad flotante relativa (-) definida por:

$$\Delta = \frac{\rho_r - \rho_w}{\rho_w} = \frac{\rho_r}{\rho_w} - 1 \quad (7)$$

Donde ρ_r es la densidad del material que forma el manto (g/cm^3) y ρ_w la densidad del agua (g/cm^3).

Ahrens descubrió en el caso de dique arrecife que un periodo de ola más largo provocaba más desplazamiento del material que un periodo más corto. Por ello, introdujo el número de estabilidad espectral (o modificado), N^* , definido por:

$$N_s^* = \frac{H_s^{2/3} L_p^{1/3}}{\Delta D_{n50}} \quad (8)$$

$$L_p = T_p \cdot \sqrt{g \cdot h} \quad (9)$$

Donde L_p es la longitud de onda Airy calculada a partir del periodo de pico del espectro de densidad de energía de las olas (T_p) y la profundidad del agua (h).

Ahrens presento varias ecuaciones para el coeficiente a , tras mucho análisis Van der Meer presento la ecuación final:

$$a = -0,028 + 0,045 \frac{A_t}{h'^2_c} + 0,034 \left(\frac{h'_c}{h} \right) - 6 \cdot 10^{-9} \left(\frac{A_t}{D_{n50}^2} \right)^2 \quad (10)$$

$$hc = \sqrt{\frac{A_t}{\exp(aN_s^*)}} \quad (11)$$

Donde A_t es el área total de la sección de la estructura (m²); N_s^* es el parámetro de estabilidad modificado y a es un parámetro definido por Van der Meer (1990).

4.2.1.2 Estructuras emergentes estáticamente estables (Statically stable low-crested structures breakwater)

Estas estructuras son parecidas a un dique en talud convencional no rebasable, pero son más estables debido a que una gran parte de la energía del oleaje atraviesa el dique. Se trata de estructuras cuyas piezas permanecen estables ante oleajes extremos.

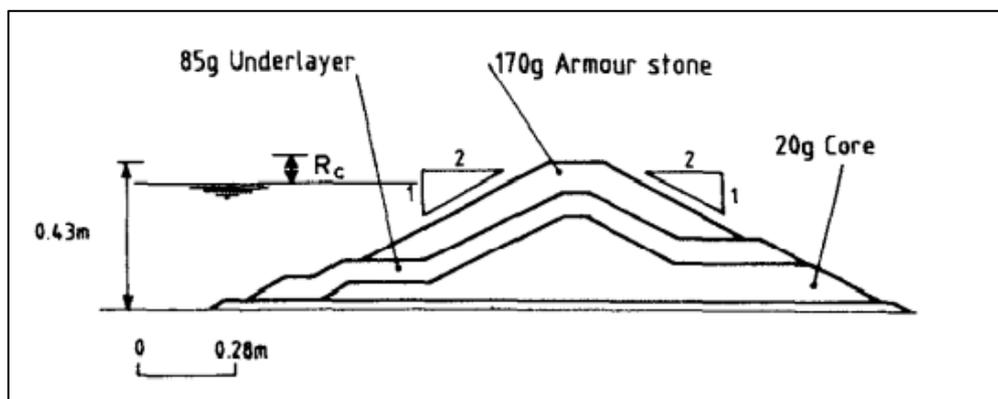


Figura 16: Ejemplo de estructuras de cresta baja.

Fuente: Van der Meer 1990

Powell y Allsop (1985) analizaron los datos recopilados por Allsop (1983) para las estructuras emergentes y propusieron la ecuación 12 como la relación entre el número de estabilidad, $N_s =$

$H_s/(\Delta D_{n50})$ y los parámetros estructurales e hidráulicos pertinentes, así como el nivel de daño, expresado como Nod/Na , permitido.

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \frac{\sqrt[3]{S_{op}}}{b} \cdot \ln\left(\frac{N_{od}}{a \cdot N_a}\right) \quad (12)$$

Donde a y b son los coeficientes que vienen definidos en función del francobordo relativo de la estructura Rc/h y del peralte S_{op} ; Nod y Na son el número de unidades del manto desplazadas fuera de la capa por ancho $Dn50$ a través de la cara del manto y el número total de unidades del manto en esa misma zona, respectivamente.

Los valores de los coeficientes a y b se dan en la *tabla xx* en función del francobordo relativo, Rc/h , donde h es la profundidad del agua (m) frente a la estructura:

Rc/h	a	b	$S_{op} = H_s/L_{op}$
0.29	$0.07 \cdot 10^{-4}$	1.66	<0.03
0.39	$0.18 \cdot 10^{-4}$	1.58	<0.03
0.57	$0.09 \cdot 10^{-4}$	1.92	<0.03
0.38	$0.59 \cdot 10^{-4}$	1.07	<0.03

Tabla 3: Coeficientes a y b para la ecuación 12.

Fuente: CIRIA 2007

La estabilidad de una estructura convencional de cresta baja se puede relacionar con la estabilidad de una estructura sin cresta o cresta marginal.

Van der Meer (1990) cuantifica el incremento de la estabilidad de una estructura rebasable entre un 20 y un 30%, proponiendo un factor reductor del diámetro nominal para el talud frontal, r_D :

$$r_D = \frac{1}{1.25 - 4.8R_p^*} \quad (13)$$

Donde $R_p^* = \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{S_{op}}{2\pi}}$ el francobordo adimensional introducido por Powell y Allsop (1985) dentro del rango $0 < R_p^* < 0.052$.

Van der Meer (1994) proponiendo el grafico de la *Figura 10* amplia el estudio sobre la estabilidad hidráulica de mantos de escollera y baja cota de coronación.

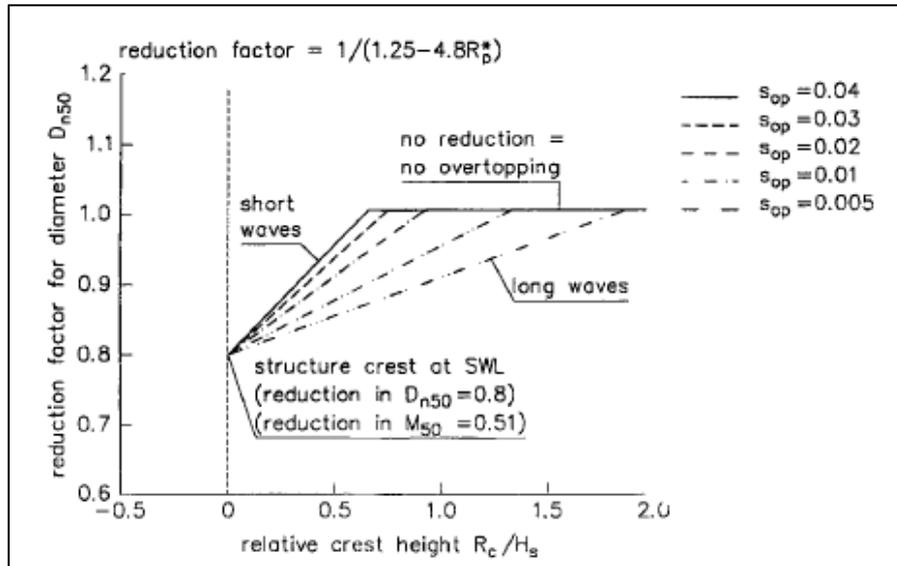


Figura 17: Gráfico de diseño para el factor de reducción, rD , en función del francobordo adimensional y el peralte del oleaje

Fuente: Van der Meer, 1994).

4.2.1.3 Estructuras sumergidas estáticamente estables. (Statically stable submerged structures)

Las estructuras sumergidas tienen su cresta por debajo del agua, pero la profundidad de inmersión de estas estructuras es que los procesos de rotura de las olas afectan a la estabilidad. Las estructuras sumergidas son sobrepasadas por todas las olas y la estabilidad aumenta considerablemente si aumenta la profundidad de inmersión.

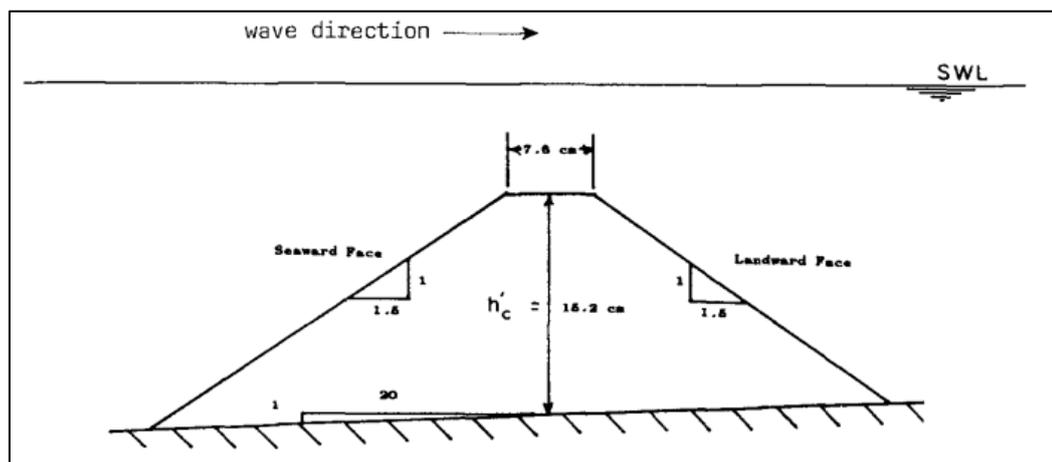


Figura 18: Ejemplo de estructuras sumergidas.

Fuente: Van der Meer 1990

Givler and Sorensen (1986) analizaron que en las estructuras sumergidas solo será válido para pendientes bastante pronunciadas, por ejemplo, de 1:1,5 a 1:2,5.

La estabilidad de las estructuras sumergidas es en función de la altura relativa de la cresta h'/h , del nivel de daño S y del número de estabilidad espectral N_s^* . El nivel de daño S está definido por Van der Meer (1988). Por lo tanto:

- $S=2$ significa inicio de daño
- $S = 5$ es daño moderado
- $S = 8-12$ significa daño severo (capa de filtro visible; no es aceptable).

La fórmula de diseño final viene dada por:

$$\frac{h'_c}{h} = (2.1 + 0.1S)\exp(-0.14N_s^*) \quad (14)$$

Vidal et al (1995) desarrolló una fórmula de estabilidad para estructuras de cresta baja (emergentes y sumergidas). Dividiendo la capa de recubrimiento de roca armada de la escollera en varios segmentos: talud frontal, la coronación, talud posterior y la sección total. (ver *Figura 4*)

Hizo uso de los siguientes cuatro niveles de daño propuestas por Losada et al (1986) y Vidal et al (1991):

- Inicio del daño (ID): algunas piezas se caen de la capa de la armadura superior.
- Daño de Iribarren (IR): una gran área de la capa de la armadura superior está dañada, por lo que es posible la extracción de unidades de la capa de la armadura inferior.
- Inicio de la destrucción (ID): el filtro es claramente visible debido a la extracción de al menos un elemento de la capa de armadura inferior
- Destrucción (D): se eliminan varios elementos de la capa de filtro.

Estos niveles pueden aproximarse mediante un parámetro de nivel de daño, S_d , en función del área erosionada A_e (ver *Figura 10*) y en la *Tabla 4* sus valores aproximados.

$$S_d = \frac{A_e}{D_{n50}} \quad (15)$$

Nivel de daño	Talud frontal	Coronación	Talud posterior	Sección total
<i>inicio del daño (ID)</i>	1.0	1.0	0.5	1.5
<i>daño de Iribarren (IR)</i>	2.5	2.5	2.0	2.5
<i>inicio de la destrucción (ID)</i>	4.0	5.0	3.5	6.5
<i>destrucción (D).</i>	9.0	10.0	-	12.0

Tabla 4: Valores aproximados de S_d para los diferentes sectores y estados de avería de un dique exento.

Fuente: CIRIA, 2007

Con la ecuación siguiente se puede determinar la estabilidad de la capa de protección rocosa del talud delantero en función de la altura relativa de la coronación basada en la relación R_c/D_{n50} :

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = A + B \frac{R_c}{D_{n50}} + C \left(\frac{R_c}{D_{n50}} \right)^2 \quad (16)$$

Donde los valores de A, B y C se proporcionan a continuación en la Tabla 5 en función de los sectores de la estructura.

Sector	A	B	C
Talud frontal	1,831	-0,245	0,012
Coronación	1,652	0,018	0,159
Talud posterior	2,575	-0,540	0,115
Sección total	1,544	-0,230	0,053

Tabla 5: Valores de A, B y C para la Ecuación 3.16 en función del sector del manto.

Fuente: CIRIA, 2007

5 Diques homogéneos de baja cota de coronación (HLCS)

5.1 Introducción

En el presente proyecto se va a realizar un estudio experimental y una posterior aplicación práctica de la estabilidad en estructuras homogéneas de baja cota de coronación (HLCS) de Cubípodos. Estas estructuras tienen la cota de coronación cercana al nivel medio del mar en reposo y están formados por un único material, el Cubípodo (ver el apartado 3. El Cubípodo)

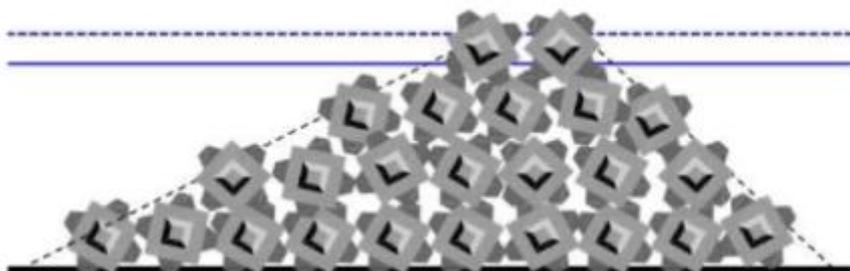


Figura 19: Sección típica de una HLCS de Cubípodos de cuatro capas.

Fuente: Medina et al. (2019)

Las HLCS están formadas por escollera grande u hormigón y se colocan para imitar las funciones de protección de la playa y eventualmente sirven como refugio para las especies. Este tipo de estructuras se consideran infraestructura verde funcionalmente similar a las estructuras convencionales de cresta baja, pero tiene una mayor porosidad y se desmantela más fácilmente para su reutilización. A diferencia de las estructuras convencionales de cresta baja, la funcionalidad de las playas de protección de HLCS depende de la malla seleccionada.

Se trata de estructuras muy porosas con huecos e iluminación muy heterogénea, con un impacto visual mínimo, que puede favorecer la colonización del coral en condiciones apropiadas.

Las HLCS protegen la playa cercana frente a los grandes temporales, mejoran las condiciones ambientales marinas y son un punto de interés turístico adicional ya que funcionan como arrecifes artificiales.

La tipología HLCS dispone de elementos robustos de un solo tipo y tamaño (por ejemplo, cubos, Cubípodos o grandes piedras) para formar una estructura de baja cota de coronación muy porosa y estable durante los temporales. Para regenerar arrecifes de coral, la estructura se construye sobre fondo duro con una ligera capa de arena y su elevada porosidad y múltiples caras genera una gran variedad de intensidades lumínicas favoreciendo la biodiversidad local. Las HLCS se colocan en aguas someras con oleaje limitado por fondo y la coronación se sitúa en una cota baja adecuada para reducir lo suficiente la transmisión de oleaje durante los grandes temporales sin producir demasiado impacto visual en condiciones normales.

Existen diferencias entre el comportamiento de un dique convencional de baja cota y una HLCS, ya que los HLCS se colocan sobre fondos duros con pendiente $2\% \leq m \leq 10\%$ con oleaje limitado por fondo; las HLCS son estructuras mucho más porosas que las convencionales y la relación H_{si}/D_{n50} es más pequeña.

Además, el talud del fondo, la forma de la pieza y la malla de colocación afectaría la estabilidad hidráulica.

5.2 Revisión histórica

A continuación, se va a realizar una recopilación de toda la información relevante para este proyecto de este tipo de estructuras.

Oderiz et al (2018) estudio la estabilidad hidráulica de las estructuras homogéneas de baja cota de coronación de Cubípedo (HLCS) para así garantizar una solución ante problemas de erosión costera considerando la estética del paisaje, la biodiversidad de los arrecifes de coral y el cambio climático.

Para ello, utilizó un método novedoso basando en mallas triangulares para colocar el Cubípedo y llevan a cabo ensayo en Laboratorio Autónoma de México (UNAM) o con tres tipos de modelos físicos formados por una, tres y cinco capas, también analizó la interacción hidrodinámica entre las olas y la estructura basada en los coeficientes de transmisión, debatió sobre los cambios en la forma de los espectro reflejadas y transmitidas, hasta llegar a las siguientes recomendaciones básicas para su diseño:

- La anchura de la cresta debe ser de al menos tres unidades de Cubípedo.
- La punta de la estructura debe tener al menos, tres unidades de Cubípedo.

Medina et al. (2019) estudia las HLCS de Cubípodos como solución de protección a la regeneración de ecosistemas coralinos. Analizó los resultados de los ensayos realizados en la UNAM para la transmisión, reflexión y disipación de la energía del oleaje y propone fórmulas para su estimación en función del francobordo adimensional ($R_c/H_s,i$). Recalca que la porosidad y la estabilidad hidráulica de un HLCS dependen en gran medida de las mallas de colocación.

De Keyser y Jacobs (2020) han llevado a cabo ensayos de colocación de modelos físicos de HLCS de Cubípodos de cinco capas midiendo los espesores de las capas correspondientes a seis mallas de colocación diferentes que afectan a los espesores de capa, la porosidad y la altura de la estructura de los HLCS. Estos autores concluyeron que las rejillas de colocación con mayores distancias horizontales entre las unidades conducían a espesores de capa más bajos.

Centi (2020) midió los espesores de capa de los HLCS de cinco capas a través de motor de videojuegos (Bullet Physics Engine, BPE) y encontró una buena concordancia entre los resultados numéricos y las pruebas de colocación del modelo físico a pequeña escala pruebas de colocación del modelo físico realizadas por De Keyser y Jacobs (2020).

Medina et al. (2020) estudia la influencia de la malla de colocación centrándose en la estimación de la altura de la estructura y los francobordos relacionados con la retícula de colocación, con el fin de proporcionar algunos criterios de ingeniería para el diseño de HLCS de Cubípodos.

Molines et al. (2021) realiza pruebas de colocación de modelos físicos y numéricos para simular diferentes mallas de colocación de los HLCS de Cubípodos midiendo el espesor de cada capa. Incorpora el motor Bullet Physics Engine (BPE) en el software de creación 3D libre y abierto Blender (Blender, 2019) para realizar los ensayos de colocación del modelo numérico y los coeficientes de capa, validados posteriormente con ensayos de colocación del modelo físico sin agua. Utilizan la metodología propuesta por de Keyser y Jacobs (2020) y los resultados obtenidos por Centi (2020) para representar la construcción de los HLCS de Cubípodos y así poder estimar la altura del HLCS y los coeficientes de capa.

Brisa et al (2021) realiza un estudio de la estabilidad hidráulica de esta tipología de diques a través de los ensayos realizados en la Universidad de México. Concluye descartando las estructuras formadas por una única capa de Cubípodos, ya que presenta mayores coeficientes de transmisión. Asume como solución eficaz las estructuras de cinco y tres capas.

5.3 Funcionalidad

Estas estructuras funcionalmente son similares a las LCS convencionales. Con la instalación de esta estructura se persiguen los siguientes objetivos:

- La **disipación de la energía del oleaje** permite la protección de la costa.
- **Mitigar problemas de erosión costera**, considerando la estética del paisaje, la biodiversidad de los arrecifes de coral y el cambio climático.
- Según su diseño, permite el **control de las corrientes litorales y de la evolución de las playas**.
- **Facilitar la colonización coralina pasiva**.
- **Atraer y sostener gran variedad otras especies marinas**.
- Crear **nuevas zonas de atracción turística** sostenibles.
- **Recuperación de arrecifes de coral en degradación**.

5.4 Ventajas e inconvenientes

Medina et al. (2020) presenta las ventajas de este tipo de estructuras:

- **Versátil** ya que se pueden utilizar unidades de hormigón si no se dispone de rocas de gran tamaño.
- Las HLCS son fáciles de **desmontar** y las unidades se pueden **reutilizar**, al estar compuestos con piezas individuales (el Cubípodo) pues su desmantelamiento es sencillo mediante la retirada de elementos con grúa y pinzas de manipulación, posteriormente se le puede dar una segunda vida.
- Las HLCS son estructuras **muy porosas** con diferentes exposiciones a la luz.
- Las unidades son **estables** y adecuadas para la colonización coralina y la regeneración de los arrecifes de coral.
- El HLCS puede atraer y albergar diferentes especies de peces, actuando como un arrecife artificial.
- El HLCS puede ser un punto de **atracción turística** sostenible.

Por otro lado, alguno de los inconvenientes de las HLCS de Cubípodo son los siguientes:

- El **uso de hormigón**, ya que tiene mayores huellas de carbono y energía en comparación con grandes rocas extraídas localmente; sin embargo, esta desventaja se reduce cuando las grandes rocas no están disponibles en la obra.
- Los HLCS deben ser **supervisados** tras su instalación para controlar la colonización de especies para garantizar una evolución positiva del ecosistema a lo largo del tiempo. En caso de no existir control pues se produciría la colonización de alguna especie invasora que supusiera un peligro para el resto.

5.5 Mallas de colocación

Las mallas de colocación son muy importantes para el diseño y construcción de las HLCS ya que influye en gran medida en la porosidad de la armadura, la estabilidad de la misma, el desbordamiento de las olas y el consumo de hormigón.

En el estudio de Medina et al. (2019) probaron en el canal de oleaje diferentes mallas de colocación, tipo rectangular y triangular, y obtuvieron mejores resultados con las del tipo triangular como se muestra en la Figura 20.

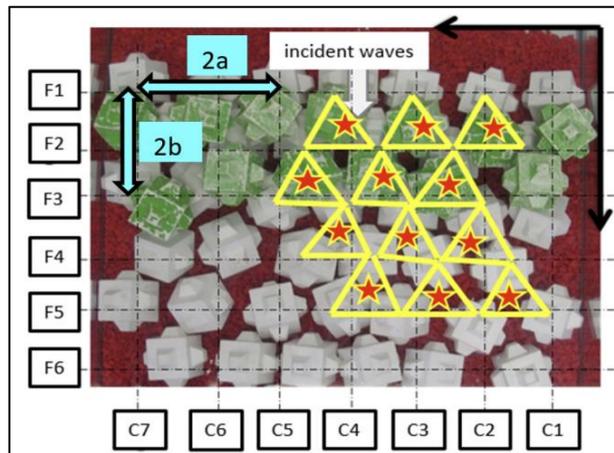


Figura 20: Malla de colocación triangular orientada al oleaje incidente.

Fuente: Medina et al. (2019)

Donde la capa inferior es colocada de forma convencional (ver Medina and Gómez-Martín, 2016) y cada elemento de la capa superior se apoya en tres de la inferior, dos detrás y una delante hacia el oleaje incidente.

La Tabla 6 muestra las características geométricas de las mallas de colocación de Cubípedo posibles para el HLCS de Cubípodos; la distancia entre las filas y columnas se refiere al diámetro nominal o lado del cubo de las unidades, D_{n50} .

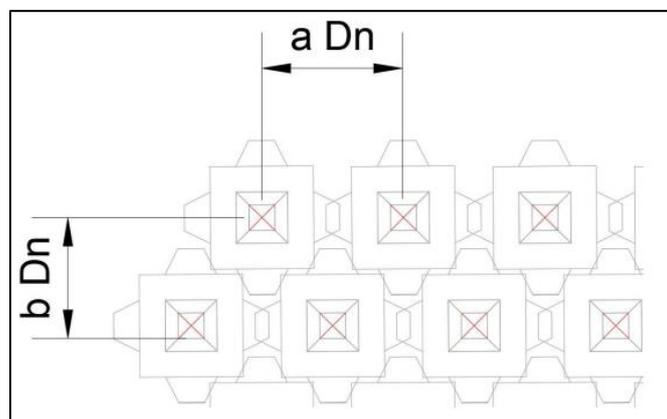


Figura 21: Dimensiones de la malla de colocación.

Fuente: Karel De Keyser, Elias Jacobs

Filas	Distancia	Distancia mínima	Distancia máxima	Distancia media
<i>C</i>	a/Dn50	1.31	1.84	1.58
<i>F</i>	b/Dn50	0.79	1.58	1.27

Tabla 6: Características geométricas de las mallas de colocación de HLCS de Cubípodos.

Fuente: Medina et al. (2019)

Se ha observado, a través de múltiples ensayos preliminares de estabilidad hidráulica para la selección de las mejores mallas de colocación, que los taludes frontales suaves de las HLCS tienen mayor estabilidad hidráulica. Y por ello, se seleccionó la malla triangular descrita en la Figura 20.

Tras recopilar información sobre las mallas de colocación que usaron los distintos autores mencionados anteriormente, en este presente proyecto se va a usar mallas de colocación tipo triangular.

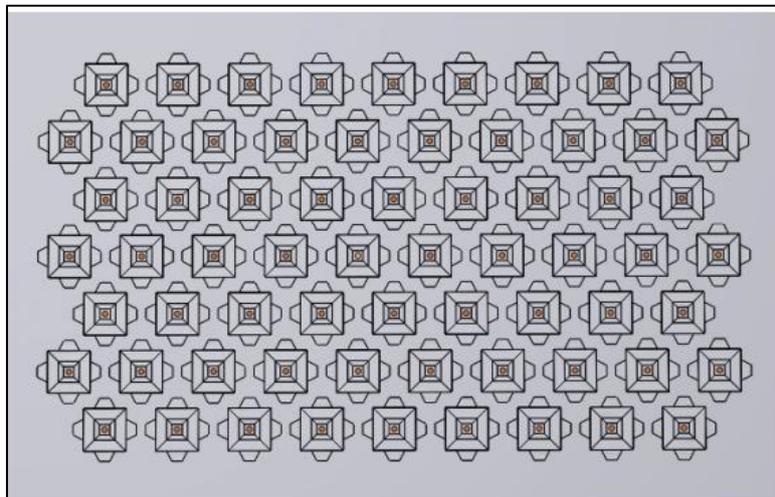


Figura 22: Malla de colocación tipo triangular.

Fuente: Riccardo Centi (2020)

5.6 Estabilidad

Tras el estudio realizados por Odériz et al. (2018), se asegura la estabilidad de la estructura para cualquier estado de mar, tanto para oleaje de mayor energía como de menor energía. Desde un punto de vista ecológico, es deseable que haya el menor movimiento posible, ya que los estratos estables y rocosos son los mejores para la colonización del coral.

Los resultados del estudio por Odériz et al. (2018), demuestran que las estructuras multicapa son más estables con una ligera inclinación frontal. Los taludes frontales de las diferentes estructuras con las que se realizaron los ensayos fueron: A (sin pendiente), estructura B ($H/V=3/2$) y estructura C ($H/V=2/1$), mientras que los taludes posteriores de las estructuras fueron: A (sin pendiente), estructura B ($H/V=3/2$) y estructura C ($H/V=3/2$).

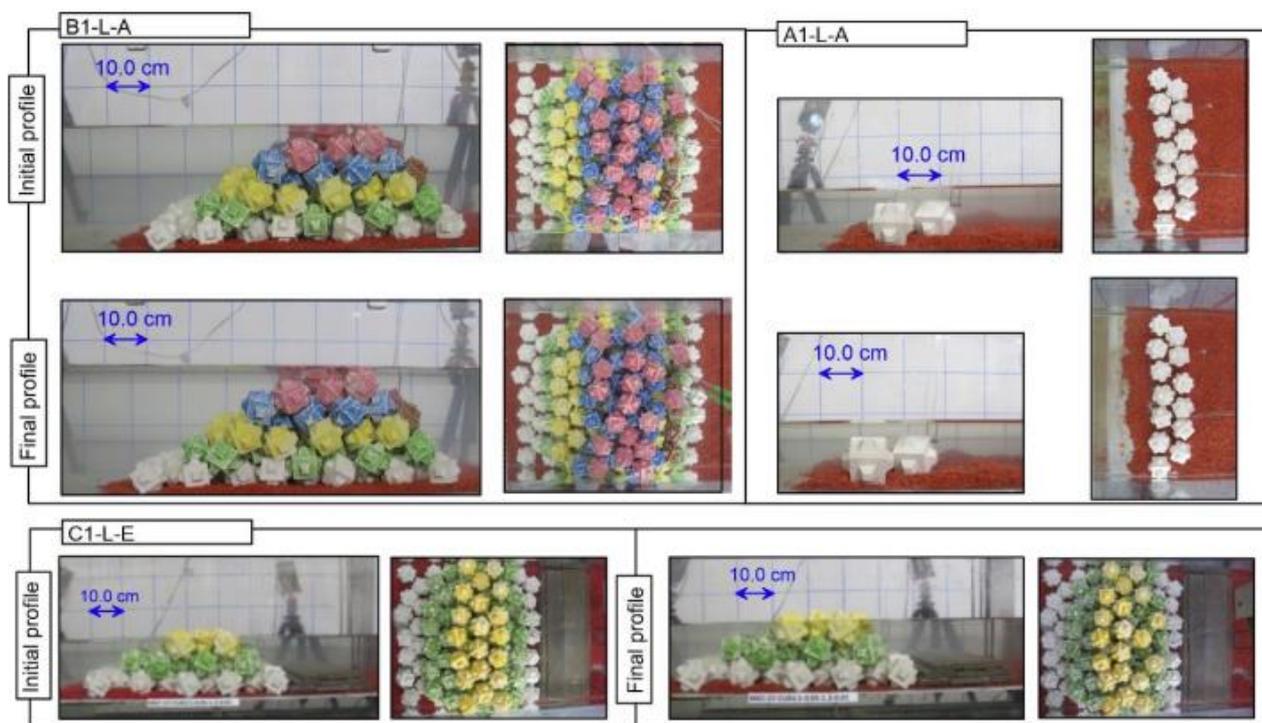


Figura 23: Perfil final e inicial de las estructuras HLCS-A1, HLCS-B5 y HLCS-C3.

Fuente: Odériz et al., 2018

La estructura A, de una sola capa, funcionó bien en aguas poco profundas. Para las estructuras B y C, los perfiles finales son bastante similares a los iniciales, es decir, no se han visto afectados y apenas han sufrido modificaciones.

Algunas conclusiones de la geometría de diseño del HLCS de Cubípodo son que la anchura de la cresta debe tener al menos 3 unidades. Para construir un talud suave, deben colocarse al menos 2 unidades en la punta de la estructura, pero que la estabilidad hidráulica aumenta considerablemente con 3 unidades. La estabilidad hidráulica de estos LCS se incrementa al suavizar el talud de sotavento.

6 Criterios de avería

La avería producida por la acción del oleaje se suele definir mediante criterios cualitativos relacionados con cambios más o menos importantes en la morfología de esta. Se suele considerar dos límites cualitativos del daño del manto principal: Inicio de Avería (IA) e Inicio de Destrucción (ID). Inicio de avería se refiere a un límite con movimientos insignificante de las piezas, mientras que Inicio de Destrucción o fallo se refiere al límite a partir del cual se produce el colapso de la estructura. (Gómez-Martín 2015)

Losada et al. (1986) y Vidal et al. (1991) definen cuatro niveles de avería para dique en talud con mantos bicapa:

1. **Inicio de Avería (IA):** Perdida de varias unidades en la capa superior del manto y presencia de algunos huecos claramente visibles del tamaño de las piezas.



Figura 24: Ejemplo de IA en manto bicapa de Cubípodos.

Fuente: Gómez-Martín (2015)

2. **Inicio de Avería de Iribarren (IAI):** Descrito por Iribarren (1965), o el daño en la capa superior del manto se ha extendido y concentrado en un área suficiente como para que piezas de la capa inferior del manto puedan ser extraídas por la acción del oleaje.



Figura 25: Ejemplo de IAI en manto bicapa de Cubípodos.

Fuente: Gómez-Martín (2015)

3. **Inicio de Destrucción (ID):** Cuando al menos un elemento de la capa inferior del manto ha sido extraído y el filtro es claramente visible.



Figura 26: Ejemplo de ID en manto bicapa de Cubípodos.

Fuente: Gómez-Martín (2015)

4. **Destrucción (D):** Varias unidades del filtro han sido extraídas y el colapso de la estructura es solo cuestión de tiempo, incluso con un oleaje de menor intensidad del que provocó el nivel de Destrucción.



Figura 27: Ejemplo de D en manto bicapa de Cubípodos.

Fuente: Gómez-Martín (2015)

Después de cada ensayo realizado, estos niveles de avería se basan en análisis visual.

Gómez Martín (2015) define los niveles de avería para mantos monocapa de Cubípodos. Al tener sólo una capa, el IAI no puede existir y debido a la capacidad de auto reordenación de los Cubípodos se definen tres niveles de avería:

1. **Inicio de Avería (IA):** cuando el manto principal ha perdido una o algunas unidades aisladas y existen algunos huecos en el manto, del tamaño de las piezas.
2. **Inicio de Destrucción (ID):** cuando varios elementos contiguos han sido extraídos o se ha producido una fisura o grieta en el manto, dejando huecos mayores que el tamaño de un elemento en el manto, de forma que el filtro es claramente visible.
3. **Destrucción (D):** cuando varias unidades del filtro han sido extraídas y muchas unidades del manto han sido desplazadas de su posición original, de forma que el colapso de la estructura es sólo cuestión de tiempo, incluso con un oleaje de menor intensidad del que provocó el nivel de Destrucción.

Lozano et al (2021) redefine los siguientes niveles de avería para los diques homogéneos:

1. **Inicio de Avería (IA):** Cuando algunas piezas de la capa superior hayan sido desplazadas o extraídas de su posición original.



Figura 28: Inicio de Avería
Fuente: Lozano (2021)-LPCUPV

2. **Inicio de Destrucción (IDe):** Cuando la mayoría de las piezas de la capa superior han sido extraídas y las piezas de las capas inferiores en la zona central de la estructura comienzan a ser extraídas, dejando huecos importantes.



Figura 29: Inicio de Avería
Fuente: Lozano (2021)-LPCUPV

3. **Destrucción (De):** Cuando las piezas de la capa superior han sido completamente extraídas y existen áreas en las capas inferiores, se han formado grandes huecos dejando visibles las capas de debajo.



Figura 30: Destrucción de la estructura.

Fuente: Lozano (2021)-LPCUPV

7 Método de malla virtual

En este proyecto se va a determinar el daño gracias al método de malla virtual propuesta por Gómez-Martín y Medina (2006), ya que tiene en cuenta los tres modos de fallo fundamentales del manto: extracción de piezas, deslizamientos globales y compactación heterogénea. (ver Figura 13)

El método de la Malla Virtual consiste en proyectar una malla virtual sobre las fotografías del manto tomadas desde una posición fija, de modo que esta malla divide el manto en bandas de ancho y largo constante.

Este método permite medir el daño adimensional equivalente (Se) teniendo en cuenta la diferencia de porosidad en las distintas zonas del manto con respecto a la porosidad inicial del mismo, ya sea debida a la extracción de piezas, a la compactación heterogénea o al deslizamiento global del manto.

Se realiza el conteo visual de todas las unidades que tienen su centro de gravedad dentro de cada una de las bandas (N_i), obteniéndose la porosidad de cada banda antes y después de la acción del oleaje, mediante la *Ecuación (17)*, donde $a = m \cdot D_n$ ancho de banda, $b = k \cdot D_n$ longitud de banda y D_n es el diámetro nominal de la pieza. Consecuentemente, el daño adimensional de cada banda (S_i) se obtiene mediante la *Ecuación (18)*, siendo m el número de filas de cada banda, p_i la porosidad de la banda i después de la acción del oleaje y p_{0i} la porosidad inicial de la banda i al comienzo del ensayo, antes del ataque del oleaje.

$$p_i = 1 - \frac{N_i D_n^2}{(a \cdot b)} = 1 - \frac{N_i}{mk} \quad (17)$$

$$S_i = m \left(1 - \frac{1 - p_i}{1 - p_{0i}} \right) = m \left(\frac{p_i - p_{0i}}{1 - p_{0i}} \right) \quad (18)$$

Integrando los daños adimensionales de las bandas a lo largo del talud, se obtiene el parámetro de daño adimensional equivalente (S_e), utilizando la Ecuación (19), donde l es el número total de bandas.

$$S_e = \sum_{i=1}^l S_i \quad \forall S_i \geq 0 \quad (19)$$



Figura 31: Fotografías perpendiculares al talud del manto bicapa de Cubipodos: (1) con marco de referencia y Malla Virtual, y (2) sin marco de referencia, con Malla Virtual y conteo de unidades en cada banda (N_i). Fuente: Gómez-Martín (2015)

El método de conteo visual y de la Malla Virtual proporcionan valores del daño adimensional sin tener en cuenta el número de capas del manto (monocapa o bicapa), reflejando así solo valores del daño de la capa superior del manto. Si pudiesen medirse daños de la capa inferior, los daños obtenidos serían mayores.

Gómez-Martín (2015) señaló que los valores del daño adimensional obtenidos en mantos monocapa y bicapa no son directamente comparables, ya que, en el caso de los mantos monocapa de piezas especiales, los valores de daño adimensional para IA son relativamente próximos a los valores de daño adimensional para ID; mientras que en el caso de mantos bicapa, los valores de daño adimensional para IA son mucho menores que los valores de daño obtenidos para ID.

8 Porcentaje de daño

Los daños en las bermas de los pies se suelen caracterizar con los números de daño N_d y N_{od} propuesta por CIRIA/CUR/CETMEF (2007) si el daño se mide contando las unidades desplazadas.

$$N_d = \frac{N}{N_t} \quad (20)$$

$$N_{od} = \frac{N}{b/D_n} \quad (21)$$

donde N es el número de unidades desplazadas, N_t es el número total de unidades dentro del y b es la anchura de la zona de referencia. CIRIA/CUR/CETMEF (2007) proporcionó valores típicos de N_d y N_{od} para tres niveles de daños para tres niveles de daño: (1) inicio del daño, (2) daño intermedio y (3) fallo.

Armor type	Damage number	Damage level		
		Start of Damage	Intermediate damage	Failure
Cube	N_{od}	0.2-0.5	1	2
Tetrapod		0.2-0.5	1	1-5
Accropode		0	-	>0.5
Cube	N_d	-	4%	-
Dolos		0-2%	-	≥15%
Accropode		0%	1-5%	≥10%

Tabla 7: Números de daño característicos para un rango de niveles de daño

Fuente: (CIRIA/CUR/CETMEF, 2007).

Pero este rango de valores no sirve para el material Cubípodo

Ebbens (2009) introdujo un nuevo parámetro de daño para caracterizar la berma de pie daño.

$$N\% = N \cdot \frac{D_{n50}^3}{(1 - n_v) \cdot V_{total}} \quad (22)$$

donde n_v es la porosidad de los vacíos, y V_{total} es el volumen aparente de la punta de la berma.

Desde un punto de vista cualitativo, CIRIA/CUR/CETMEF (1991) estableció los siguientes criterios para los niveles de daño y el daño medido en porcentaje:

1. 0-3 %: no hay movimiento de piedras (o sólo unos pocos) en la puntera.
2. 3-10 %: la puntera se aplana, pero sigue funcionando, siendo el daño aceptable.
3. >20 %: fallo

9 Daño adimensional para rotura por fondo

En el Manual del Cubípodo (2016) comparan diferentes ensayos la estabilidad hidráulica en tronco de los mantos monocapa y bicapa de Cubípodos con oleaje limitado por fondo. Midieron los daños adimensionales equivalente (De) en el manto, según la metodología de la malla virtual (Gómez-Martín, 2014), para cada profundidad como el daño máximo que cualquier combinación de temporales (oleaje irregular) pudiera ocasionar. Se comprobó que el oleaje irregular, cualquiera que fuese su intensidad, generaban alturas de olas máximas y daños muchos menores que los regulares lanzados.

Dado que hay una relación directa entre la profundidad y la altura de ola de cálculo normalizada, es posible determinar funciones adimensionales de estabilidad hidráulica. La función de fallo o curva de avería observada resulta:

$$De = 10^{-4} \left(\frac{h}{\Delta Dn} \right) \quad (23)$$

Donde De es el daño adimensional equivalente, $h=hs$ la profundidad, Δ es la densidad relativa sumergida de las piezas y Dn es el lado de cubo equivalente.

CAPÍTULO N° 4

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

1 Introducción

Para analizar la estabilidad hidráulica de diques homogéneos de baja cota de coronación de Cubípodos, se han realizado ensayos físicos en el canal de ensayos del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Polit cnica de Valencia (LPC-UPV). Este capítulo describe la metodología seguida en estos ensayos.

En primer lugar, se describirá las instalaciones y equipos utilizados para llevar a cabo estos ensayos. En segundo lugar, se detallarán los modelos físicos utilizados, las características de los materiales empleados para la construcción de la estructura y toda la instrumentación utilizada para recabar información sobre distintos parámetros.

Por último, se presentará el modelo físico ensayado y se explicar  el procesado de la información disponible tras la realización de los ensayos y las herramientas informáticas utilizadas para ello.



Figura 32: Canal de oleaje del LPC-UPV

Fuente: Elaboración propia

2 Descripción de instalaciones y equipos

2.1 Descripción del canal de oleaje del LPC-UPV

Los ensayos de modelo físico se han realizado en el canal de oleaje del LPC-UPV (30,0m×1,2m×1,2m) con pendientes de fondo suaves ($m=2\%$ y 4%) y con un generador de olas tipo pistón. El fondo de esta canal es variable, con un falso fondo de 25 cm para permitir la recirculación de agua y una rampa de 15,3m con una pendiente del 4% para simular el fondo del mar y generar condiciones de rotura del oleaje por fondo, y así poder estudiar en él la propagación del oleaje desde aguas profundas en la zona de generación a aguas someras donde se ubica el modelo físico.

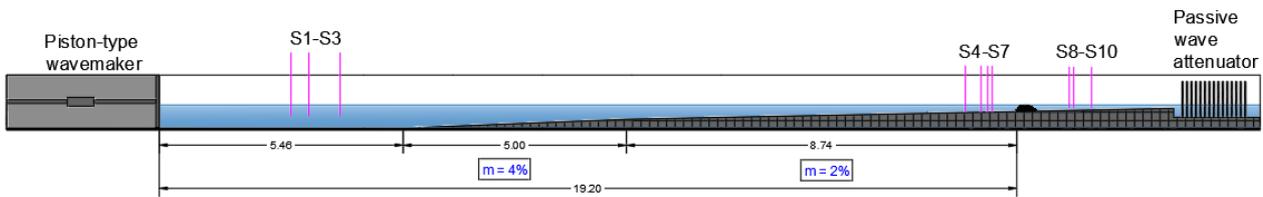


Figura 33: Sección longitudinal del canal de oleaje 2D.

Fuente: LPC-UPV

En el extremo izquierdo, se ubica el sistema de generación de oleaje formado por un pistón accionado por un motor eléctrico que cuenta con sistema AWACS (Active Wave Absorption System) de absorción activa para evitar reflexiones. Mientras que en el extremo derecho se encuentra el modelo a ensayar, el dissipador de energía y la entrada del sistema de recirculación de agua del canal.

A continuación, en los siguientes apartados, se va a describir los sistemas mencionados anteriormente.

2.1.1 Sistema generador de oleaje

Como se ha comentado anteriormente, en el extremo izquierdo del canal de oleaje de LPC-UPV se ubica el equipo generador del oleaje formado por una pala sobre unas guías cilíndricas con rodamientos empujada hacia delante y atrás mediante un pistón hidráulico con un recorrido de 80cm y motor eléctrico. Este movimiento en la dirección longitudinal del canal es el que genera el oleaje.



Figura 34: Pala generadora de oleaje del LPC-UPV.

Fuente: Elaboración propia

El oleaje se genera gracias a la pala y esta es controlada por el programa informático con el software DHI Wave Synthesizer, que toma los datos de la secuencia teórica preparada, bien sea una serie regular o una serie irregular y un actuador es el encargado de mover la pala según la velocidad y posición indicados en el programa, previamente a este paso la pala debe estar encendida por los interruptores que se observan en la *Figura 35: Interruptores del encendido de la pala*. La pala cuenta con dos sensores de oleaje en la propia estructura permitiendo, en tiempo real, realizar las correcciones necesarias sobre el movimiento del pistón y así evitar condiciones de oleaje irreales producidas por la re-reflexión del oleaje en la pala.



Figura 35: Interruptores del encendido de la pala.

Fuente: LPC-UPV

Existen varias posibilidades de generar oleaje, pero en este estudio se ha creado solo dos tipos; oleaje regular e irregular. Para la generación de oleajes regulares o irregulares los inputs a introducir son los siguientes:

- Escala del modelo físico
- Profundidad existente en la pala de generación
- Altura de ola significativa
- Periodo pico del oleaje
- Espectro (solo en oleaje irregular): Para el caso que nos ocupa el espectro utilizado es el JONSWAP, con un parámetro de 3,3.
- Duración del ensayo
- Periodo máximo y periodo mínimo

2.1.2 Sistema disipador de energía

En el extremo derecho final del canal, se encuentra un sistema disipador de energía, que permite disipar la energía del oleaje que se transmite a través de los modelos. Este sistema consta de una serie de paneles formados por perfiles de sección apuntada de diferentes porosidades y estos paneles provocarían la dispersión de la energía del oleaje evitando una posible reflexión, ya que podría afectar en los resultados del ensayo.



Figura 36: Sistema disipador de energía.

Fuente: Elaboración propia



Figura 37: Talud dissipador de energía.

Fuente: LPC-UPV

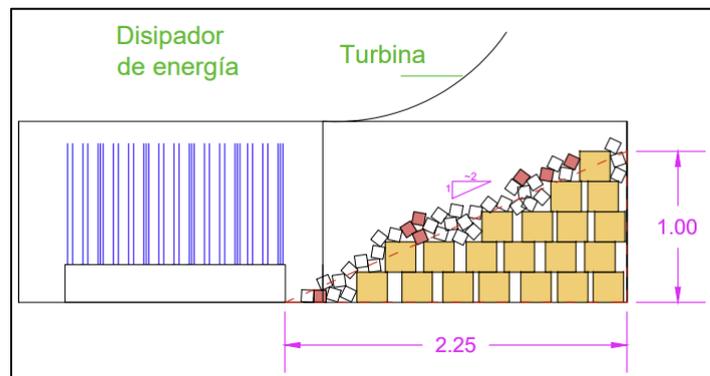


Figura 38: Croquis del dissipador de energía.

Fuente: LPC-UPV

2.2 Instrumentación

Existen varios instrumentos importantes para realizar los modelos físicos en el canal de oleaje y más adelante poder realizar su análisis. En el laboratorio se dispone de mucha variedad de instrumentos que facilitan la investigación, pero en este proyecto se va a hacer uso de sensores de nivel, material audiovisual, como puede ser cámara Canon y sensor Kinect para poder ver el modelo en 3D.

2.2.1 Sensores de nivel

Los sensores capacitivos (DHI) registran el oleaje generado, permitiendo obtener los datos de elevación del nivel del agua con la frecuencia elegida. Se colocan a lo largo del eje longitudinal del canal aguas arriba de la estructura, para determinar las características del oleaje incidente y reflejado.

Además de la medición del nivel del agua, estos sensores separan el oleaje incidente y reflejado, y por ello se colocan de manera estratégica a lo largo de la longitud del canal. Para el análisis de esta estructura se ha colocado en el canal nueve sensores y dos ultrasónicos, tres de los sensores se sitúan en generación (S1-S3), los otros cuatro frente al modelo(S4-S7) y los restantes junto a los ultrasónicos se encuentran tras el modelo y frente al dissipador de energía (S8-S11).

A continuación, en la tabla siguiente se puede observar el conjunto de los sensores y las distancias en centímetros medida desde el generador del oleaje.

Sensor	x (cm)	tipo	ubicación cualitativa
1	295	WG	Generación
2	335	WG	Generación
3	405	WG	Generación
4	1805	WG	Frente modelo
5	1840	WG	Frente modelo
6	1855	WG	Frente modelo
7	1865	WG	Frente modelo
8	2037	WG	Tras modelo
9	2047	WG	Tras modelo
10	2047	Ultra	Tras modelo
11	2087	Ultra	Tras modelo

Tabla 8: Posición x (xm) de los sensores

Fuente: LPC-UPV

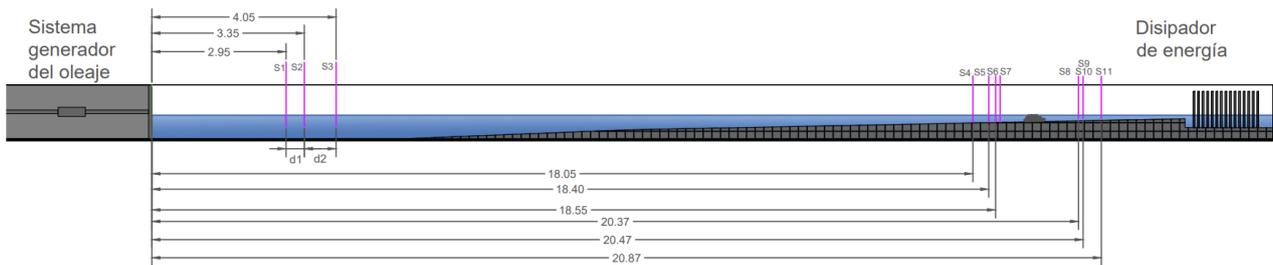


Figura 39: Separación de los sensores.

Fuente: Elaboración propia

La separación de los sensores (ver Figura 39) ha sido definida según las recomendaciones de Mansard y Funke (1980) para separar el oleaje incidente y reflejado, que varían en función de la longitud de onda.

$$\left\{ \begin{array}{l} d1 \approx L/10 \\ L/6 < d1 + d2 < L/3 \\ d1 + d2 \neq \frac{L}{5} \\ d1 + d2 \neq 3L/10 \end{array} \right. \quad (24)$$

Siendo L la longitud de onda, d1 la separación entre los dos primeros sensores y d2 la separación entre el segundo y el tercer sensor considerados.

Los sensores se conectan a los equipos DHI mediante cables que permiten su calibración y el envío de los datos medidos al ordenador. Se realiza esta calibración justo antes de empezar una tanda de ensayos ya que los cambios en el nivel del agua o las condiciones ambientales como la humedad

o la temperatura influyen significativamente en la toma de datos. Se calibra para el intercambio de los datos enviados por el sensor a centímetros de ascenso y descenso del agua con referencia al nivel inicial.

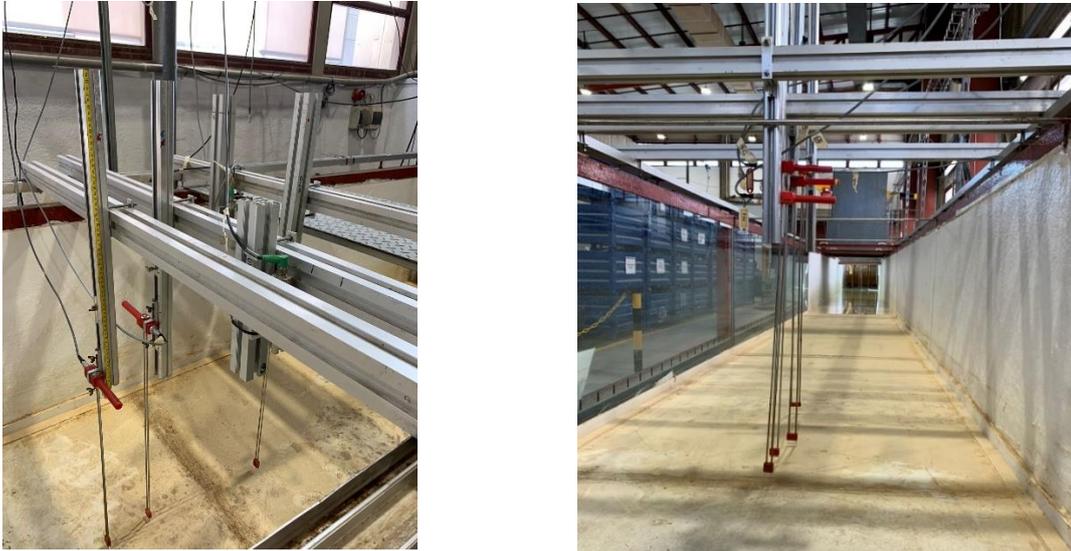


Figura 40: Sensores de nivel en la zona de modelo.

Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Material audiovisual

En el LPC-UPV se tiene mucha variedad de material para captar imágenes, vídeos y contenido audiovisual en el momento de realizar los ensayos o cuando sea necesario.

Las cámaras utilizadas tanto durante el proceso constructivo como durante los ensayos son la cámara Canon y la Kinect.



Figura 41: Material audiovisual

Fuente: Elaboración propia.

También se dispone de cámaras de video de red, llamadas cámaras IP ya que disponemos en el laboratorio de un ordenador con su propia dirección IP conectada directamente a la red, gracias a esto se emite el video en directo.



Figura 42: Material visual.

Fuente: Elaboración propia.

2.3 Modelo físico

Se han ensayado varias secciones de los diques homogéneos de baja cota de coronación formado por Cubípodos. Tiene 3 capas con distintas filas de Cubípodos según el modelo.

MODELO	CAPAS	FILAS CAPA 1	FILAS CAPA 2	FILAS CAPA 3
7_p=0.5	3	9	6	3
9_p=0.5	3	8	6	4
10_p=0.5	3	6	4	2

Tabla 9: Resumen de los distintos modelos.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se observan las secciones transversales de los distintos modelos ensayados.

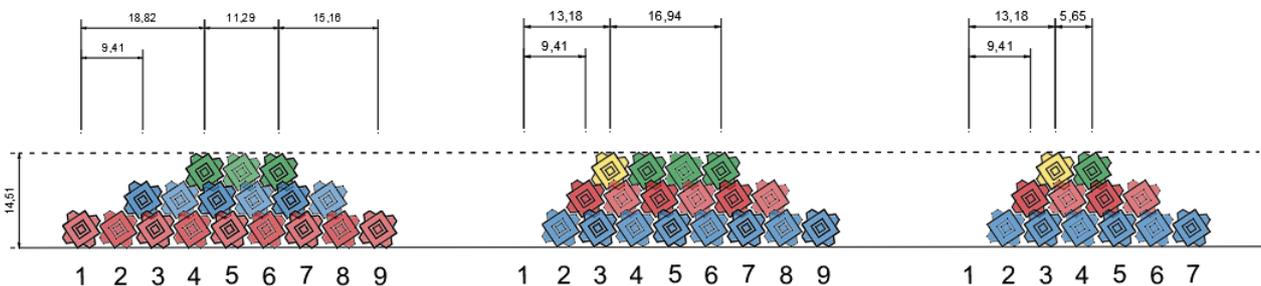


Figura 43: Sección transversal de los modelos construidos, 7, 9 y 10 respectivamente.

Fuente: Elaboración propia

Estos diferentes modelos presentan dos tipos de taludes: los más tendidos, 2:1 y los menos tendidos, 1:2.

Como se observa en la Figura 43 que cada sección transversal tiene un número de piezas de Cubípodos distintas, se empezó a ensayar con el primer modelo que es simétrico, el segundo

modelo tiene pendiente suave por delante y pendiente fuerte por detrás y el ultimo es más estrecho con menor número de piezas d Cubípodos. Esto es debido a que, en el primer modelo se observó que las piezas de Cubípodos de la primea fila de la primera capa eran desplazadas hacia agua a dentro, por la capacidad de pivotar que tiene el Cubípodo y por ello se distancia poco a poco de la estructura.

Como la primera fila no realizaba ninguna función y esas piezas se desplazaban fácilmente pues se optó por no hacerla simétrica y crear una pendiente suave delante, es decir, subir esa fila a la fila de coronación (la fila amarilla del modelo 9). De esta forma se aumenta significativamente la estabilidad hidráulica y se reducía la transmisión.

De esta manera, se ensayaron dos modelos distintos con diferente ancho de coronación. El último modelo se diseñó por el menor coste logístico ya que tiene menor cantidad de piezas.

Al ser una estructura homogénea, estará compuesto de un único material, los Cubípodos. A continuación, se describirá este material y las particularidades que se han tenido en cuenta.

2.3.1 Material

Se comenta más en detalle en el apartado 3 *El Cubípodo* sobre de donde proviene este material y de que este compuesto. Los Cubípodos empleados en los modelos ensayados son de resina inyectada, y tienen un diámetro nominal $D_n=4.36\text{cm}$. En la figura siguiente se puede observar las dimensiones del Cubípodo, y los valores de la densidad, peso y volumen se obtienen mediante una balanza hidrostática.

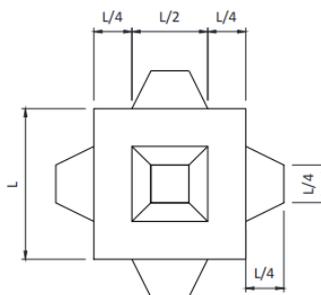


Figura 44: Dimensiones principales del Cubípodo. Vista frontal, lateral y superior.

Fuente: Medina y Gómez-Martín (2016).

Características	Cubípodo $D_n=4,36\text{cm}$
<i>Longitud (cm)</i>	4.08
<i>Densidad (g/cm³)</i>	2.27
<i>Peso(g)</i>	187.95
<i>Volumen (cm³)</i>	

Tabla 10: Características promedio de los Cubípodos utilizados.

Fuente: Elaboración propia

Cada capa del modelo se construye con Cubípodos de diferente color, para que sea más fácil detectar los desplazamientos entre Cubípodos en la estructura durante los ensayos. Esta colorimetría nos facilitara posteriormente para el análisis de la avería.

Para clasificar los Cubípodos según el color, se colocan en capazos cerca de done se vaya a construir el modelo.



Figura 45: Materiales clasificados por color.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2 Malla de colocación

Para el presente proyecto se ha ensayado un solo tipo de malla, la malla triangular, para llegar a esta conclusión se ha tenido que ensayar distintos tipos de mallas de colocación.

La malla de colocación queda definida por su porosidad, separación longitudinal y transversal y el coeficiente de capa.

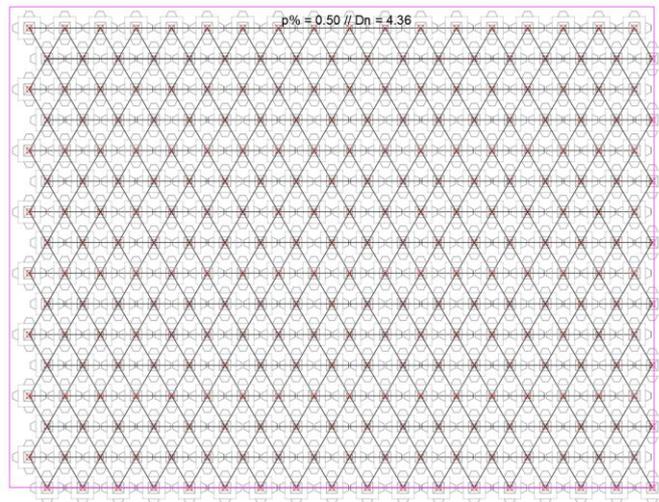


Figura 46: Malla de colocación del modelo ensayado.

Fuente: LPC-UPV

Se trata de una malla triangular equilateral donde los valores de los parámetros son $a/D_n=1,32$ y $b/D_n=1,52$. Por tanto, la distancia entre filas en la capa inferior es $a=5\text{cm}$ y la separación entre Cubípodos en una misma fila es $b=5,76\text{ cm}$.

La Figura 46 es el esquema de colocación de la primera capa del modelo. Una vez colocada la primera capa, se colocará la segunda capa encima de la primera, dejando una fila de la primera vacía para proporcionar el talud deseado a la estructura, los cubípodos de esta segunda capa se colocaran encima de tres cubípodos de la primera, es decir, dos cubípodos de la primera capa atrás y uno delante desde donde se recibe el oleaje. Para una mejor comprensión, más visual, ver *Figura 47: Proceso de colocación de los Cubípodos*.

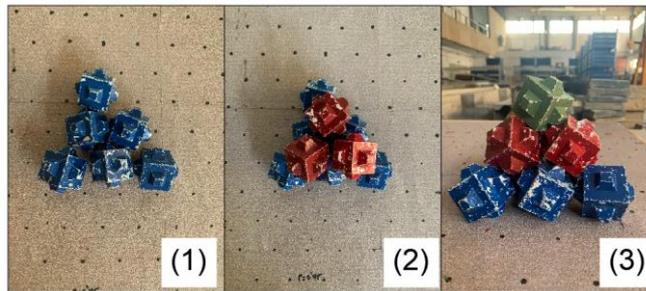


Figura 47: Proceso de colocación de los Cubípodos.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la porosidad de los diques homogéneos de baja cota de coronación de Cubípodos, se mide esta de forma cualitativa. Se asume un área de cinco filas (nF) y cinco columnas (nC), se calcula el número de Cubípodos que pueden colocarse en ella (n). una vez conocido todos los datos anteriores se calcula la porosidad ($p\%$) siguiendo el método de la malla virtual (ver Gómez-Martín y Medina, 2007).

$$p\% = \frac{1 - n * Dn^2}{nF * \frac{a}{Dn} * nC * \frac{b}{Dn} * Dn^2} \quad (25)$$

La siguiente tabla resume el cálculo de la porosidad de las estructuras ensayadas:

Variable	Valor
a/Dn	1.32
b/Dn	1.52
Dn	4.36 cm
Nf	5.00
nC	5.00
N	25.00
$p\%$	0.500
Obj	0.50
$e2$	4.67E-08
ϕ	0.500

Tabla 11: Cálculo de la porosidad ($p\%$) de la malla.

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el modelo estudiado tiene una porosidad del 50%.

2.4 Coeficiente de capa

Keyser y Jacobs (2020) elaboraron una metodología para determinar el coeficiente de capa de estructuras homogéneas de Cubípodos. Por lo que, siguiendo esta metodología se ha obtenido el coeficiente de capa de las estructuras ensayadas en el canal y utilizadas para el estudio de la estabilidad hidráulica y la trasmisión. Como todas las estructuras tienen el mismo número de capas y los Cubípodos tienen el mismo diámetro nominal, pues los coeficientes de capa obtenidos en un modelo sirven para el resto de modelos.

A continuación, se detallan los coeficientes de capa del modelo 9:

	Kt promedio	Varianza	CV (%)
K Δ1	1,30	0,00	1,95%
K Δ2	1,05	0,00	1,89%
K Δ3	1,00	0,00	3,95%

Tabla 12: Coeficientes de capa

Fuente: Elaboración propia

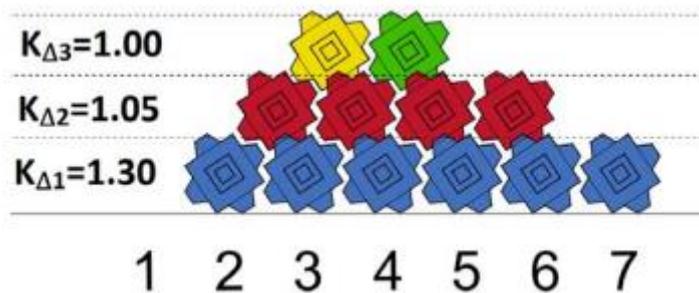


Figura 48: Croquis de los coeficientes de capa de la estructura.

Fuente: Elaboración propia

2.5 Método experimental y proceso de construcción

Para el comienzo del proceso constructivo del modelo físico a ensayar, el canal debería de estar limpio y los sensores bien colocados a sus respectivas distancias desde el generador del oleaje, por otro lado, también se dispone la pendiente de fondo establecida y si es necesario se modifican las condiciones del fondo en la zona donde quedará construido el modelo.

Una vez efectuadas todas las operaciones previas, se procede a llenar el canal para calibrar la pala de generación, esta operación solamente es necesario efectuarla una vez, al contrario que la calibración de sensores que se realiza diariamente. Una vez hecho esto, antes de construir la estructura y realizar los ensayos será necesario lanzar una serie de ensayos en vacío para validar los métodos de separación de oleaje incidente y reflejado.

Hasta aquí se ha descrito la metodología inicial para la puesta a punto del canal y los instrumentos necesarios para poder realizar los ensayos. A continuación, se describirá el proceso constructivo del modelo físico y los pasos para lanzar las tandas de oleaje programadas en una hoja de Excel.

Primero, habrá que obtener la malla de colocación a través de una serie de procesos mediante AutoCAD. Esta se imprime y se realizan los agujeros necesarios donde se hayan marcado los puntos en los que debería de ir colocados cada Cubípodo de la primera capa. Posteriormente se coloca en el fondo del canal, usándola como plantilla para realizar las marcas de los puntos (1). Una vez acabada la malla se mide el coeficiente de capa para saber a la altura a la que se encuentra, esto se realiza mediante un láser (2).

Segundo, al tener el canal preparado se dispone a construir la estructura a ensayar (3), cada vez que se acaba de construir una capa se mide el coeficiente de capa mediante el láser (4) y se realiza fotografías con la cámara canon y la Kinect.

Finalmente, ya construida la estructura se llena el canal hasta el nivel deseado, se calibra cada sensor de nivel y, posteriormente, se lanzan las tandas de ensayos.

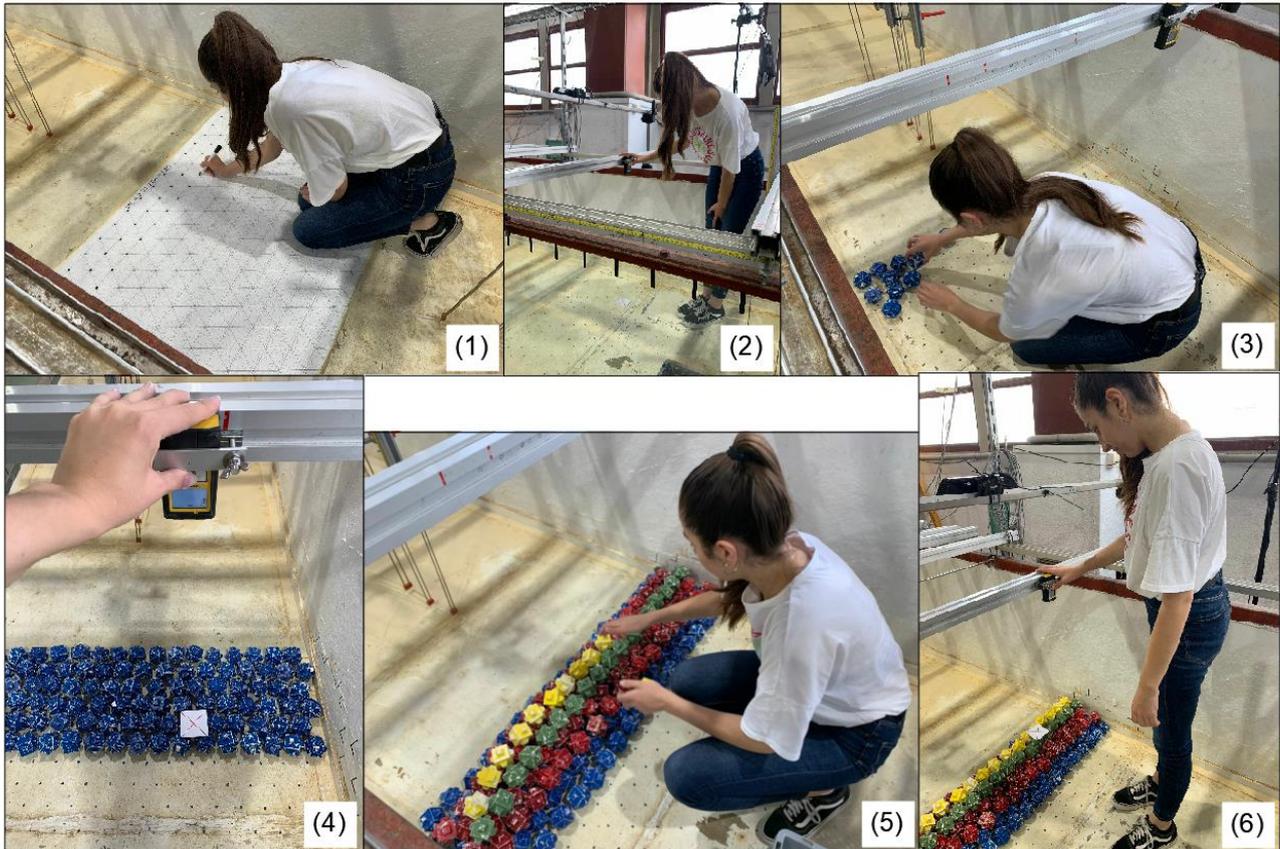


Figura 49: Proceso de construcción de la estructura.

Fuente: Elaboración propia

2.6 Test Matrix

Los ensayos realizados tienen por finalidad el estudio de la estabilidad y transmisión (Mazón et al 2022) de diques homogéneos de baja cota de coronación diseñados a rotura por fondo. Por ello, se ha llevado a cabo ensayos con un modelo físico de este tipo de estructura.

Previo a los ensayos regulares e irregulares, se lleva a cabo una tanda de ensayos en vacío para así calibrar el software de separación de oleaje incidente y reflejado. Una vez terminados, se construye el modelo y se comienza a lanzar oleaje.

Respecto a los ensayos irregulares, estos se generan con un espectro JONSWAP de parámetro pico 3,3. Cada ensayo está definido por una altura de ola y un periodo de pico, de esta manera, se comienza con una altura de ola de 2cm en el primer ensayo y se va incrementando 1 o 0,5 cm cada vez hasta que se produzca desplazamiento de piezas en la estructura. En cada ensayo irregular se lanzan 1000 olas irregulares, por lo que su duración queda definida por el periodo de pico:

$$Duración (s) = 1000olas \cdot \frac{T_p}{1,23} \quad (26)$$

Cada ensayo tiene un código para poder identificarlo, a continuación, se muestra lo que significa cada una de las partes del código:

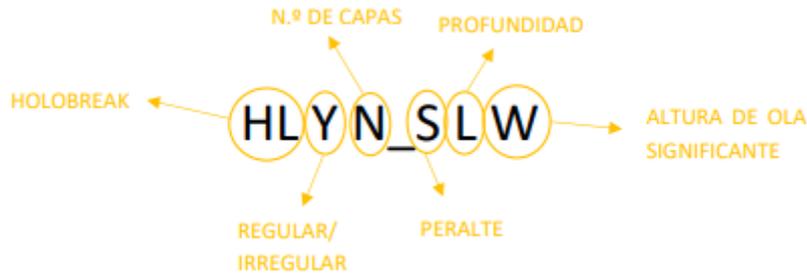


Figura 50: Nomenclatura de ensayos.

Fuente: Lozano (2021)

HL	Holobreak				
Y	0	Regular	L = Nivel del mar	1	-25%
	1	Irregular		2	0 cm
N = N° de capas	0	Ensayos en vacío		3	+25%
	1	1 capa	4	-50%	
	2	2 capas	W = Hs		
	3	3 capas	S = Peralte		
	4	4 capas	1	0,01	
	5	5 capas	2	0,02	

Tabla 13: Nomenclatura de ensayos.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra un ejemplo de las tablas de los ensayos realizados con los parámetros principales (altura de ola significativa, periodo de pico, peralte, etc.):

	Nombre	Modelo		L (cm)	Prof. Pala h (cm)	D.O. hc (cm)	DATOS A INTRODUCIR											
		H (cm)	T (s)				Escala	Profundidad (m)	H (m)	T (s)	L (m)	Profundidad (m)	Profundidad modelo (m)	Duración (s)	Duración (h:mm:ss)	Duración a grabar (s)		
hc=14.5cm	Sop=0.02	HL03_1204	4	1.13	200	52.5	14.5	50	26.25	2	8.00	200.00	26.25	7.25	15.85	0:00:16	76	
		HL03_1205	5	1.27	250	52.5	14.5	50	26.25	2.5	8.95	250.00	26.25	7.25	17.72	0:00:18	78	
		HL03_1206	6	1.39	300	52.5	14.5	50	26.25	3	9.80	300.00	26.25	7.25	19.41	0:00:19	80	
		HL03_1207	7	1.50	350	52.5	14.5	50	26.25	3.5	10.59	350.00	26.25	7.25	20.96	0:00:21	81	
		HL03_1208	8	1.60	400	52.5	14.5	50	26.25	4	11.32	400.00	26.25	7.25	22.41	0:00:22	83	
		HL03_1209	9	1.70	450	52.5	14.5	50	26.25	4.5	12.00	450.00	26.25	7.25	23.77	0:00:24	84	
		HL03_1210	10	1.79	500	52.5	14.5	50	26.25	5	12.65	500.00	26.25	7.25	25.05	0:00:25	86	
		HL03_1211	11	1.88	550	52.5	14.5	50	26.25	5.5	13.27	550.00	26.25	7.25	26.28	0:00:26	87	
		HL03_1212	12	1.96	600	52.5	14.5	50	26.25	6	13.86	600.00	26.25	7.25	27.44	0:00:27	88	
		HL03_1213	13	2.04	650	52.5	14.5	50	26.25	6.5	14.43	650.00	26.25	7.25	28.57	0:00:29	89	
		HL03_1214	14	2.12	700	52.5	14.5	50	26.25	7	14.97	700.00	26.25	7.25	29.64	0:00:30	90	
		HL03_1215	15	2.19	750	52.5	14.5	50	26.25	7.5	15.50	750.00	26.25	7.25	30.68	0:00:31	91	
		Sop = 0,05	HL03_3202	2	0.51	40.00	52.5	14.5	50	26.25	1	3.58	100.00	26.25	7.25	7.09	0:00:07	68
			HL03_3203	3	0.62	60.00	52.5	14.5	50	26.25	1.5	4.38	150.00	26.25	7.25	8.68	0:00:09	69
			HL03_3204	4	0.72	80.00	52.5	14.5	50	26.25	2	5.06	200.00	26.25	7.25	10.02	0:00:10	71
HL03_3205	5		0.80	100.00	52.5	14.5	50	26.25	2.5	5.66	250.00	26.25	7.25	11.20	0:00:11	72		
HL03_3206	6		0.88	120.00	52.5	14.5	50	26.25	3	6.20	300.00	26.25	7.25	12.27	0:00:12	73		
HL03_3207	7		0.95	140.00	52.5	14.5	50	26.25	3.5	6.70	350.00	26.25	7.25	13.26	0:00:13	74		
HL03_3208	8		1.01	160.00	52.5	14.5	50	26.25	4	7.16	400.00	26.25	7.25	14.17	0:00:14	75		
HL03_3209	9		1.07	180.00	52.5	14.5	50	26.25	4.5	7.59	450.00	26.25	7.25	15.03	0:00:15	76		
HL03_3210	10		1.13	200.00	52.5	14.5	50	26.25	5	8.00	500.00	26.25	7.25	15.85	0:00:16	76		
HL03_3211	11		1.19	220.00	52.5	14.5	50	26.25	5.5	8.39	550.00	26.25	7.25	16.62	0:00:17	77		
HL03_3212	12		1.24	240.00	52.5	14.5	50	26.25	6	8.77	600.00	26.25	7.25	17.36	0:00:17	78		
HL03_3213	13		1.29	260.00	52.5	14.5	50	26.25	6.5	9.12	650.00	26.25	7.25	18.07	0:00:18	79		
HL03_3214	14		1.34	280.00	52.5	14.5	50	26.25	7	9.47	700.00	26.25	7.25	18.75	0:00:19	79		
HL03_3215	15		1.39	300.00	52.5	14.5	50	26.25	7.5	9.80	750.00	26.25	7.25	19.41	0:00:19	80		

Tabla 14: Ejemplo de la tabla de Ensayos regulares del modelo 7_p=0,50 3_9-6-3

Fuente: LPC-UPV

2.7 Análisis de datos experimentales

En este apartado se va a describir la metodología mediante la cual se analizan los resultados obtenidos tras realizar cada ensayo. Esta metodología consiste en analizar el oleaje creado, determinar la avería y analizar la transmisión (Mazón et al 2022)

2.7.1 Análisis del oleaje

Para el análisis del oleaje, es necesario separar el oleaje incidente de reflejado, ya que los sensores registran el nivel de agua total, suma de los oleajes anteriores. La fiabilidad de los resultados obtenidos depende tanto del oleaje incidente como del reflejado, separar correctamente el incidente del reflejado suele afectar directamente a la fiabilidad de los modelos de respuesta estructural resultantes de los experimentos físicos.

Separar el oleaje en la zona de modelo no es del todo fiable en caso de rotura del oleaje, ya que los sensores capacitivos no realizan mediciones precisas debido a la aireación del flujo y las turbulencias.

Para llevar a cabo la separación del oleaje incidente del reflejado en este estudio se ha utilizado el método LASA-V (Medina 2001 y Figueres y Medina 2004), para el análisis de las alturas de ola registradas y sus respectivas partes incidentes y reflejadas se hace uso de una herramienta informática desarrollada en el LPC, el LPCLab. Este programa analiza el oleaje en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo, y genera un informe con todos los parámetros relevantes de dicho oleaje.

También se usa el modelo numérico de propagación de oleaje SwanOne, se aplica para la obtención del oleaje incidente en la zona de modelo. Para validar este modelo, se realiza una tanda de ensayos en vacío, teniendo la ola incidente limpia en los registros debido a la existencia del sistema disipador de energía, por lo que se asume que la medición de los sensores es correcta. El método se valida mediante la comparación del oleaje total en vacío medido por los sensores y los resultados del modelo numérico de propagación de oleaje.

2.7.1.1 LASA

El método LASA (Local Approximation using Simulated Annealing) fue desarrollado por el profesor Medina (2001). Este permite el análisis del oleaje incidente y reflejado en el dominio del tiempo. Está basado en un modelo local, de onda tipo lineal y de Stokes II (no lineal) y utiliza la cristalización simulada para optimizar los parámetros del modelo en cada ventana temporal.

Figueres y Medina (2004) mejoraron el LASA, para que pudiese trabajar con oleaje no estacionario y no lineal, llamado LASA-V, usando un modelo de onda no lineal aproximado de tipo Stokes-V.

Este modelo permite analizar experimentos con olas marcadamente no lineales. Se caracteriza por su aplicación a modelización física con olas irregulares y no estacionarias.

En este proyecto, se ha aplicado el método LASA-V sobre el grupo de sensores en la zona de generación (S1-S2), ya que no es aplicable si el oleaje presenta rotura. De esta manera, se conoce el oleaje incidente y reflejado en los cinco sensores de generación.

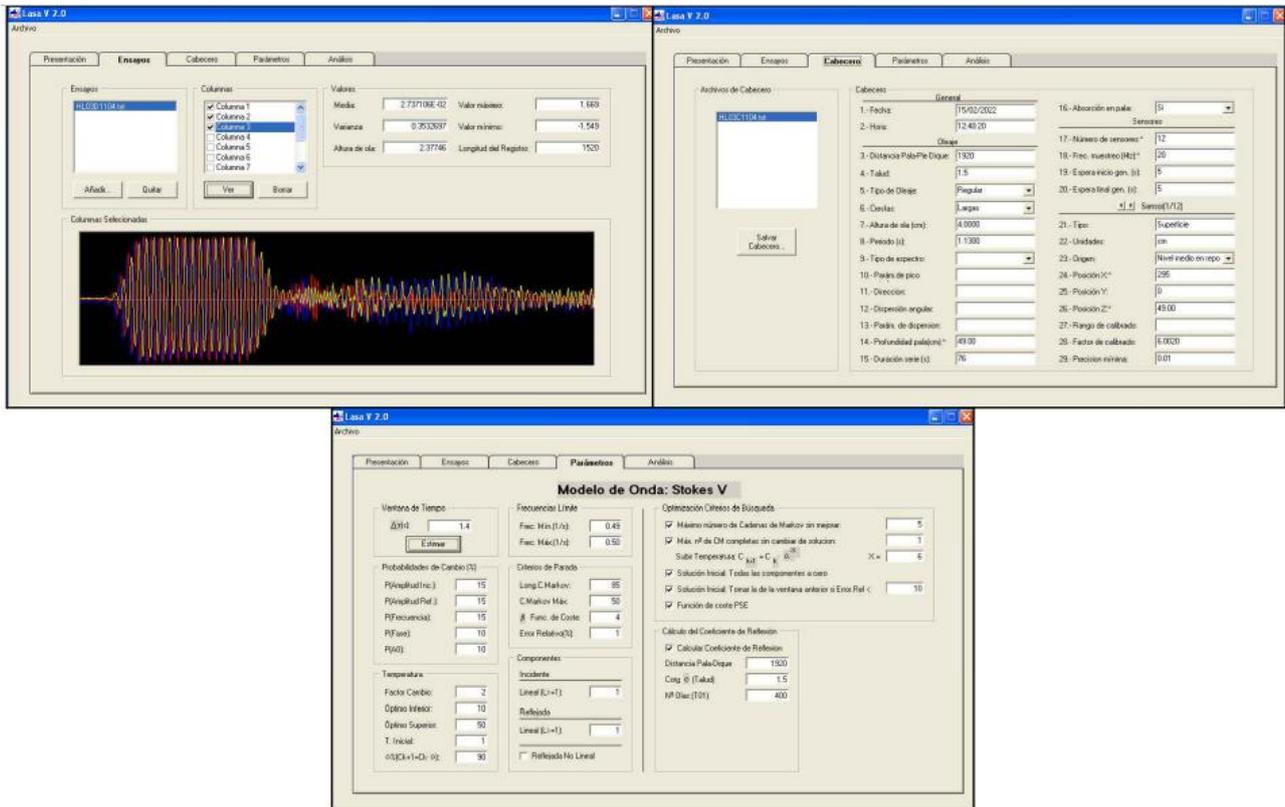


Figura 51: Software LASA-V (Figueres y Medina, 2005).

2.7.1.2 LPCLab

La herramienta informática LPCLab analiza el oleaje en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo, y genera un informe con todos los parámetros relevantes de dicho oleaje, así como gráficos que permiten controlar si la separación del oleaje ha sido suficientemente precisa. Se va a hacer uso de este programa para obtener los estadísticos de oleaje transmitido registrado por los sensores situados en la zona de modelo.

En el dominio de tiempo, cada altura de ola individual de las series incidente y reflejada se define como sucesivos pasos descendentes por cero. Entonces, la altura de ola media H_m se calcula a partir de estas series de olas individuales, tanto para las series del oleaje incidente como del reflejado.

En cuanto al dominio de la frecuencia, se calcula el espectro del oleaje de los ensayos realizados mediante la Transformada de Fourier Directa de la superficie del agua discretizada. El oleaje se puede dividir en diferentes ventanas definidas por el usuario.

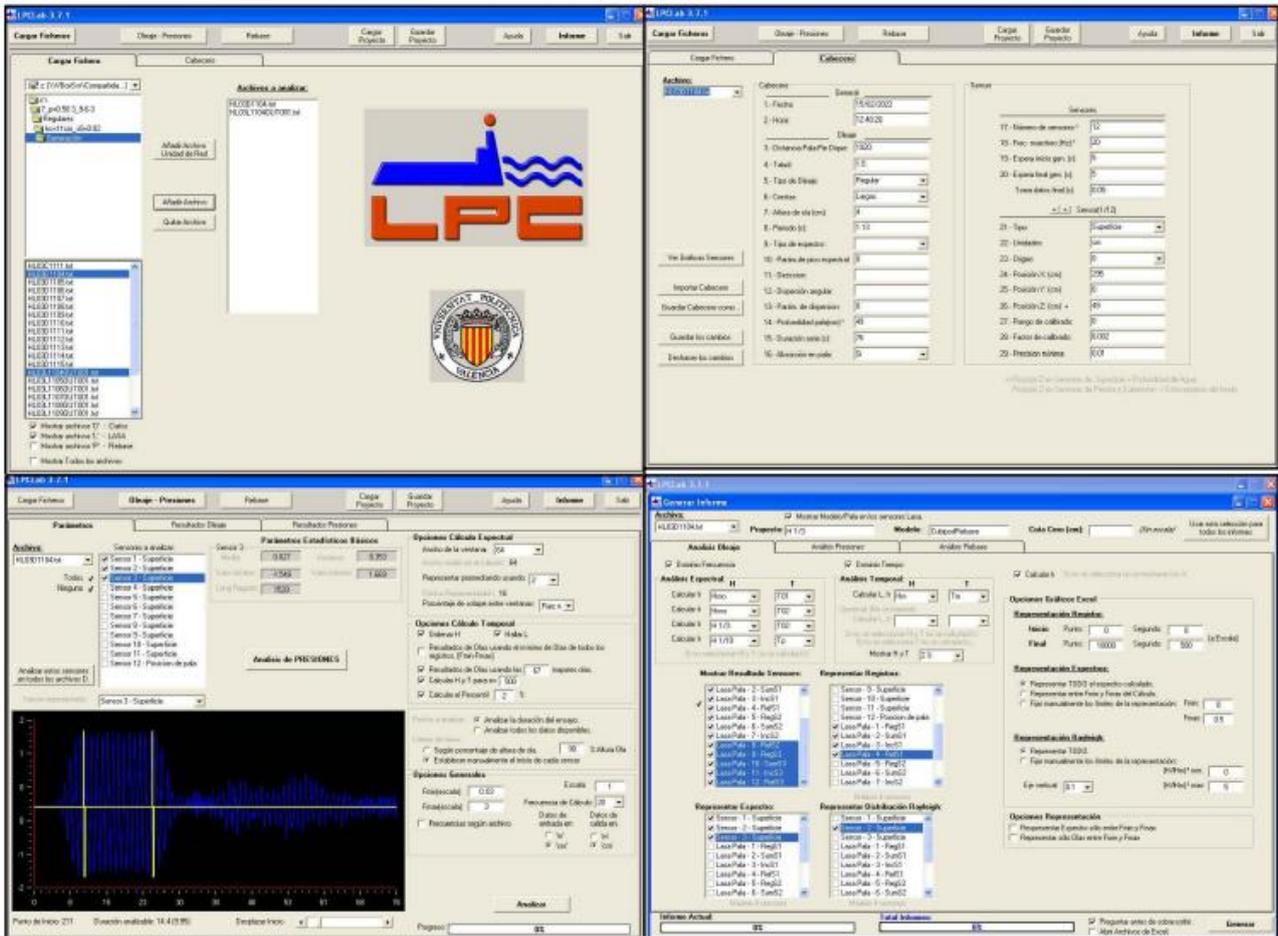


Figura 52: Aplicación LPCLab.

Fuente: LPC-UPV

2.7.1.3 SwanOne

SwanOne es un modelo de propagación de olas para batimetría paralela (canal de oleaje), fue desarrollado por la Delft University of Technology (TU Delft). SwanOne modela los siguientes fenómenos físicos:

- Propagación del oleaje en el tiempo y en el espacio, incluyendo los fenómenos de asomeramiento y la refracción causada por profundidad y las corrientes, y el cambio de frecuencia causado por la profundidad no estacionaria y corrientes no estacionarias.
- Interacciones no lineales entre onda-onda
- Generación de olas por el viento
- Rotura de olas inducida por la profundidad
- Bloqueo de las olas debido a las corrientes

La medición de los sensores no es precisa en caso de rotura del oleaje debido a la aireación que se produce en el flujo por las turbulencias. Por lo tanto, se han llevado a cabo simulaciones con el modelo SwanOne para determinar las características del oleaje incidente en la zona del modelo.

Como parámetro de entrada al modelo SwanOne se introduce el oleaje incidente y el perfil de la pendiente de fondo y a partir de estas entradas, el modelo crea un espectro JONSWAP con parámetro de pico $\gamma=3,3$ y lo propaga a lo largo del canal. Como outputs, el programa proporciona los siguientes parámetros en todo el canal: H_{m0} , $H_{1/10}$, $H_{2\%}$, T_p , T_{01} y $T_{m-1,0}$.

Hay que tener en cuenta que el modelo SwanOne considera frecuencias entre 0,03-0,8Hz ya que está preparado para condiciones de oleaje a escala de prototipo.

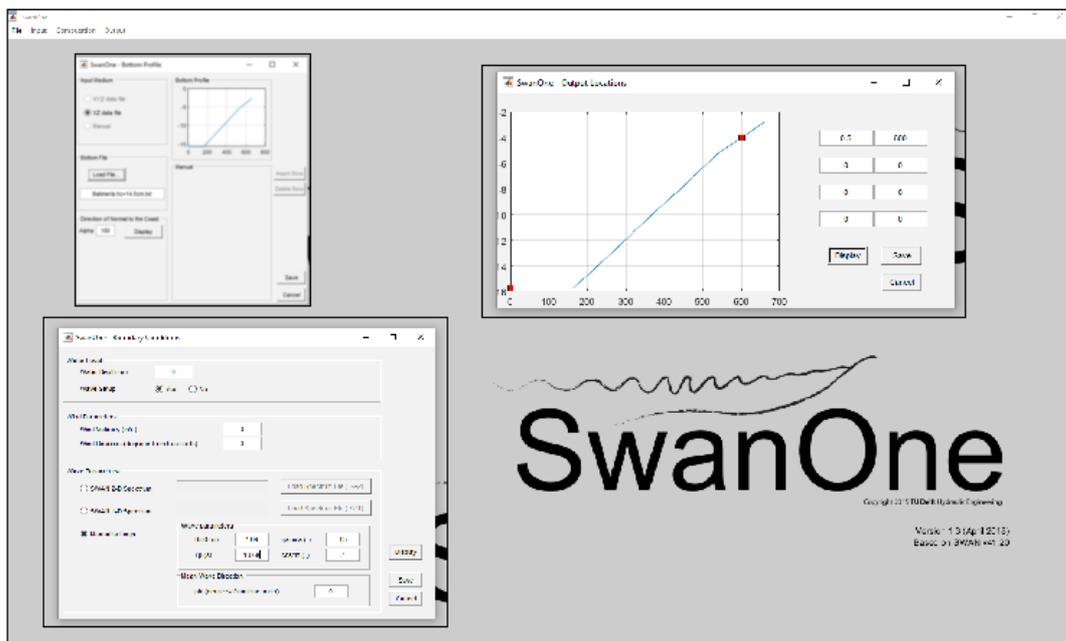


Figura 53: Software SwanOne de la TU Delft.

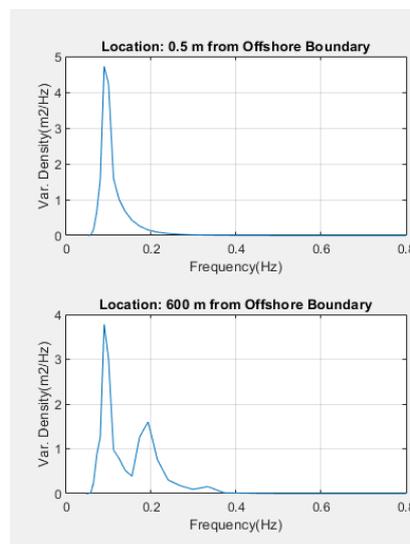


Figura 54: Ejemplo de espectro obtenido del SwanOne

Como se ha mencionado, antes de realizar los ensayos con la estructura, primero se hacen lo mismos ensayos en vacío. Esto permite tener condiciones de oleaje incidente únicamente, gracias al dissipador de energía. Esta metodología fue validada por Herrera y Medina (2015), que compararon las estimaciones del modelo numérico de SwanOne con las mediciones en vacío.

Se ha comparado la altura de ola incidente H_{m0} medida en los ensayos en vacío y la H_{m0} calculada mediante SwanOne en la zona de modelo. De igual forma se ha comparado también el periodo pico T_p . Esta comparación representa la capacidad del programa para reproducir y propagar el oleaje en condiciones de rotura por fondo.

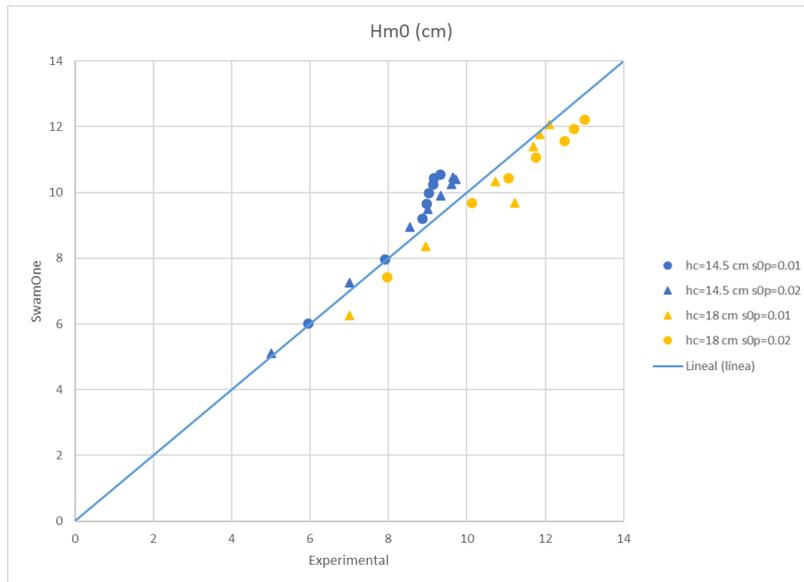


Figura 55: Comparación entre la H_{m0} medida en vacío y la calculada mediante SwanOne en la zona de modelo. Fuente: Elaboración propia junto a Mazón (2022)

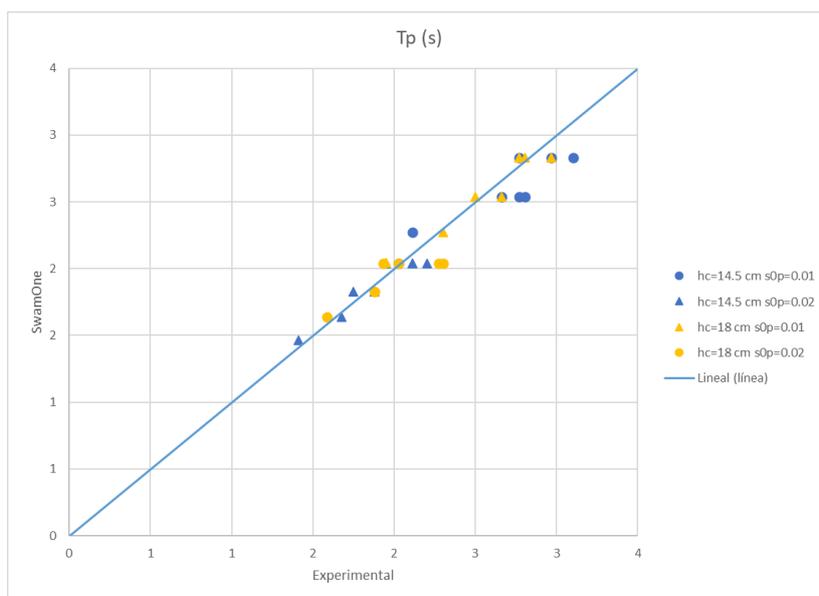


Figura 56: Comparación entre el T_p medida en vacío y el calculado mediante SwanOne en la zona de modelo. Fuente: Elaboración propia junto a Mazón (2022).

2.7.2 Criterios de avería y análisis de la estabilidad

En el *Apartado 6. Criterios de avería del Capítulo 2: Estado del arte* se definió los criterios de avería de Losada et al. (1986) y Vidal et al. (1991) para diques en talud con mantos bicapa, los criterios definidos por Gómez Martín (2015) para diques en talud con manto monocapa de Cubípodos y por último los criterios de Lozano (2021) para diques homogéneos de Cubípodos de cinco capas.

En el caso de diques homogéneos de baja cota de coronación de Cubípodos de tres capas es necesario redefinir los niveles de avería por los que pasa la estructura, ya que están formados por diversas capas de un mismo material. En este proyecto se concretan los siguientes niveles de avería para diques homogéneos de baja cota de coronación de Cubípodos:

1. **Inicio de Avería para daño tipo 1 (IA1):** Cuando algunas piezas han sido desplazadas de su banda, este daño es poco relevante porque no afecta a la funcionalidad de la estructura.

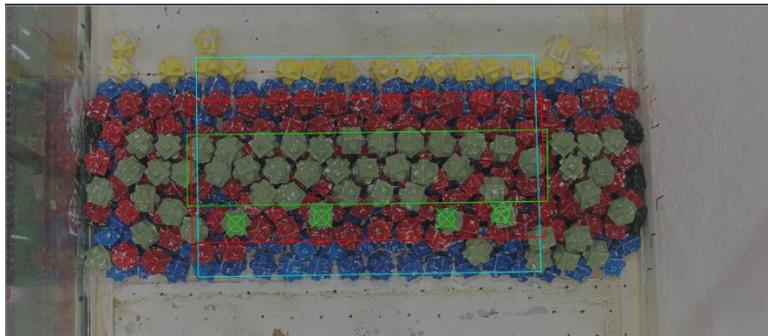


Figura 57: Inicio de avería de daño tipo 1 en la tercera capa.

Fuente: Elaboración propia

2. **Inicio de Avería para daño tipo 2 (IA2):** Cuando algunas piezas de la capa superior hayan sido desplazadas o extraídas de capa a la siguiente.

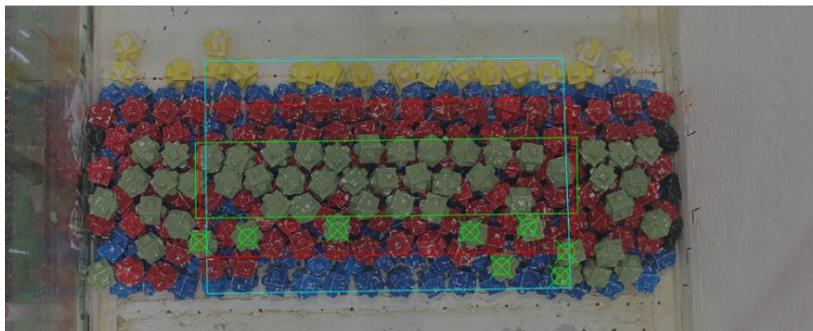


Figura 58: Inicio de avería de daño tipo 2 en la tercera capa.

Fuente: Elaboración propia

Para poder haber definido los dos tipos de daños anteriores, se ha usado el método de la malla virtual (Ver *Apartado 7. Método de malla virtual*) para poder definir la envolvente/banda de cada una de las capas de la estructura, es decir, proyectar una malla virtual sobre las fotografías tomadas

desde una posición fija, de modo que esta malla divide el manto en envolventes/bandas de ancho y largo constante.

Posteriormente, se realiza el conteo de todas las unidades que tienen su centro de gravedad dentro de cada una de las bandas (N_i), obteniendo así el número de piezas según el tipo de daño y consecuentemente el N% de cada banda después de la acción del oleaje, mediante la *Ecuación (27)*, donde n es el número de piezas desplazadas según el tipo de daño y n_{TOTAL} es el número total de piezas dentro de cada banda.

$$N\% = \frac{n}{n_{TOTAL}} \quad (27)$$

Mediante la *Ecuación (6)* se ha obtenido el número de estabilidad (N_s) que depende de la altura de ola registrada (H_i), el diámetro nominal (D_n) y la densidad relativa de la pieza. Además, se ha calculado el daño adimensional (D_e) por estar a rotura por fondo y las olas que atacan el dique dependen sobre todo de la profundidad a pie de dique, h_s . (Manual del Cubípodo 2016)

$$N_s(h_s) = h_s / (\Delta \cdot D_n) \quad (28)$$

Una vez recogidos y analizados los ensayos correspondientes al inicio de avería para el daño tipo 1 e inicio de avería para el daño tipo 2, se obtiene una representación gráfica de N% respecto a la profundidad adimensional N_s (h_s) y el N% del daño tipo 1 respecto al daño tipo 2. Estas graficas se adjuntan más adelante en el *Capítulo 5. Análisis de ensayos y resultados*.

CAPÍTULO N°5

ANÁLISIS DE ENSAYOS Y RESULTADOS

1 Introducción

En este capítulo se define los resultados que se han obtenido de los diferentes ensayos físicos 2D realizados en la investigación.

En primer lugar, se analiza la avería de las estructuras ensayadas por el método de la malla virtual o conteo visual. En segundo lugar, se interpretan los resultados registrados sobre el daño observado y calculado.

2 Método de medir el daño

En este apartado se va a medir el daño a través del método de la malla virtual (Ver *Apartado 7. Método de malla virtual*).

Previo a cada ensayo se coloca la cámara fotográfica en una posición fija, para que todas las fotografías se tomen exactamente igual. Se realiza una fotografía en seco de la estructura construida y otra con agua. De este modo se puede superponer la malla virtual posteriormente con el programa AutoCad, con el fin de definir la zona estudiada para determinar el daño producido con el método de la Malla Virtual (Gómez-Martín y Medina, 2014).

Se realizan fotografías de cada capa y después de cada oleaje lanzado para poder apreciar el movimiento de las piezas.

Para cada ensayo de estabilidad se comienza con una altura de ola que no va a producir avería en el dique, pero relativamente próxima a la que se espera que va a producir la iniciación de averías. Se va aumentando la altura de ola de 0.5 cm o 1 cm en cada escalón de altura de ola hasta alcanzar el Inicio de Destrucción de la estructura o producirse rebase excesivo.

Por lo tanto, se evalúa la avería del manto principal de Cubípodos de forma cualitativa, identificando los tipos de inicio de avería (IA1 y IA2), y de forma cuantitativa, obteniendo el daño adimensional mediante el conteo visual y el método de la Malla Virtual (Gómez-Martín y Medina, 2014).

2.1 Conteo visual y método de la Malla Virtual para HLCS

Antes de empezar el conteo visual, destacar que en el canal están colocadas unas “dianas” como referencia para marcar el límite de la envolvente y una vez montada la estructura se colocan unas barras para marcar una línea recta en la fotografía y así poder realizar paralelas. (Ver *Figura 59*)

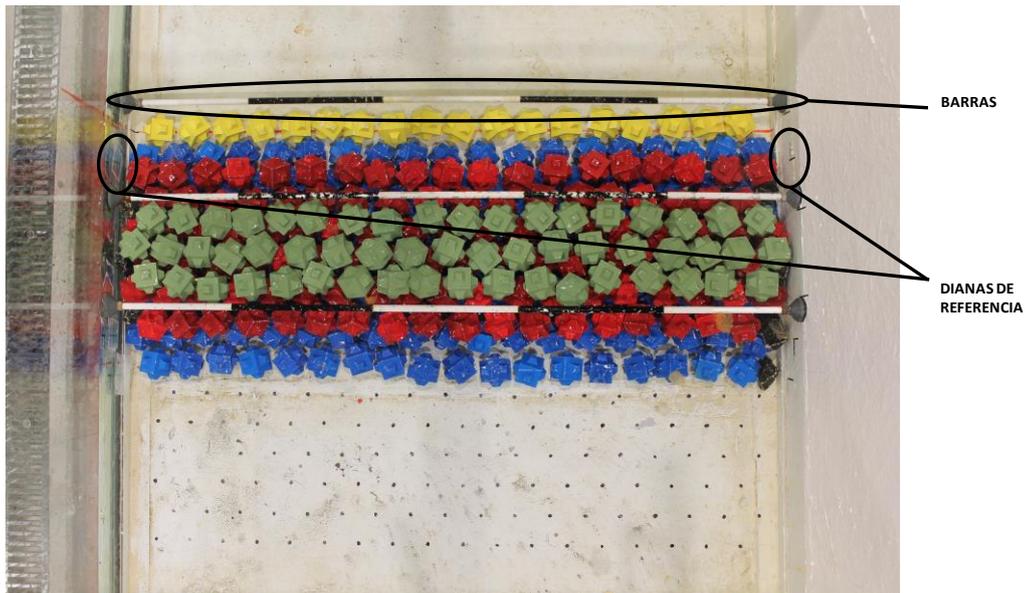


Figura 59: Barras y dianas
Fuente: Elaboración propia.

Se colocan las fotografías en AutoCad y se representa la banda de manera que queda paralela a las barras mencionadas anteriormente, se representa en cada capa su propia banda.

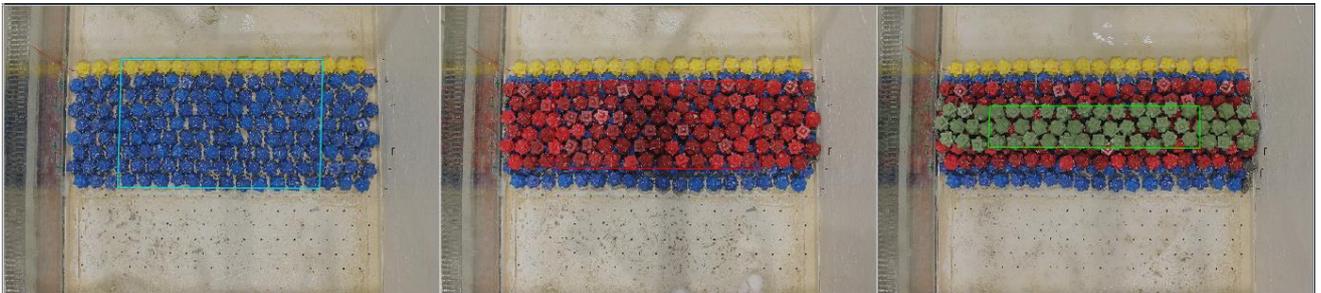


Figura 60: Bandas de las diferentes capas.
Fuente: Elaboración propia con AutoCAD

Una vez definidas las bandas de cada capa, se empieza a contar aquellos Cubípodos que su centro de gravedad se encuentre dentro de estas bandas, y así poder saber el total de Cubípodos y posteriormente saber cuáles han sido desplazadas.

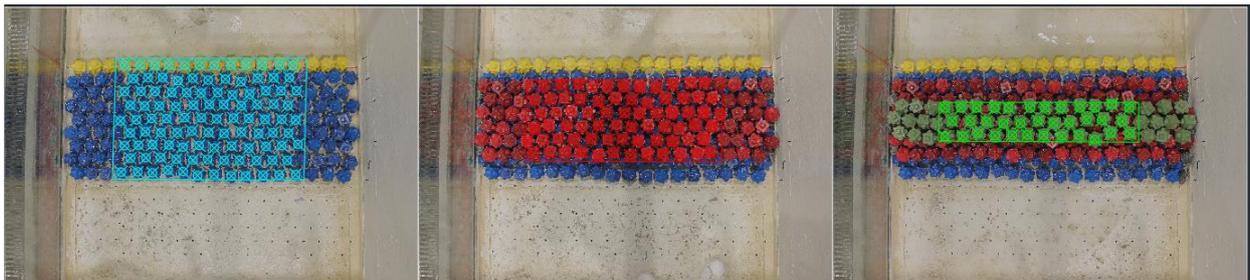


Figura 61: Conteo de piezas.
Fuente: Elaboración propia con AutoCAD

Al saber el número total de piezas que hay dentro de cada banda, se observa imagen por imagen después de cada oleaje lanzado para poder apreciar cada movimiento y se cuentan el número de las piezas desplazadas según los criterios definidos en el *Capítulo 2. Criterios de avería y análisis de la estabilidad*.

El daño observado después de cada tanda de oleaje se ha puesto acumulativo, es decir, si en el ensayo anterior se han desplazado dos piezas y en el ensayo posterior se han desplazado otras dos, pues son cuatro piezas desplazadas.

En la siguiente figura se puede observar cómo se ha contado visualmente las piezas desplazadas de la banda definida anteriormente en cada una de las capas. Este proceso se realiza para cada tanda de olas lanzadas de los tres diferentes modelos ensayados.

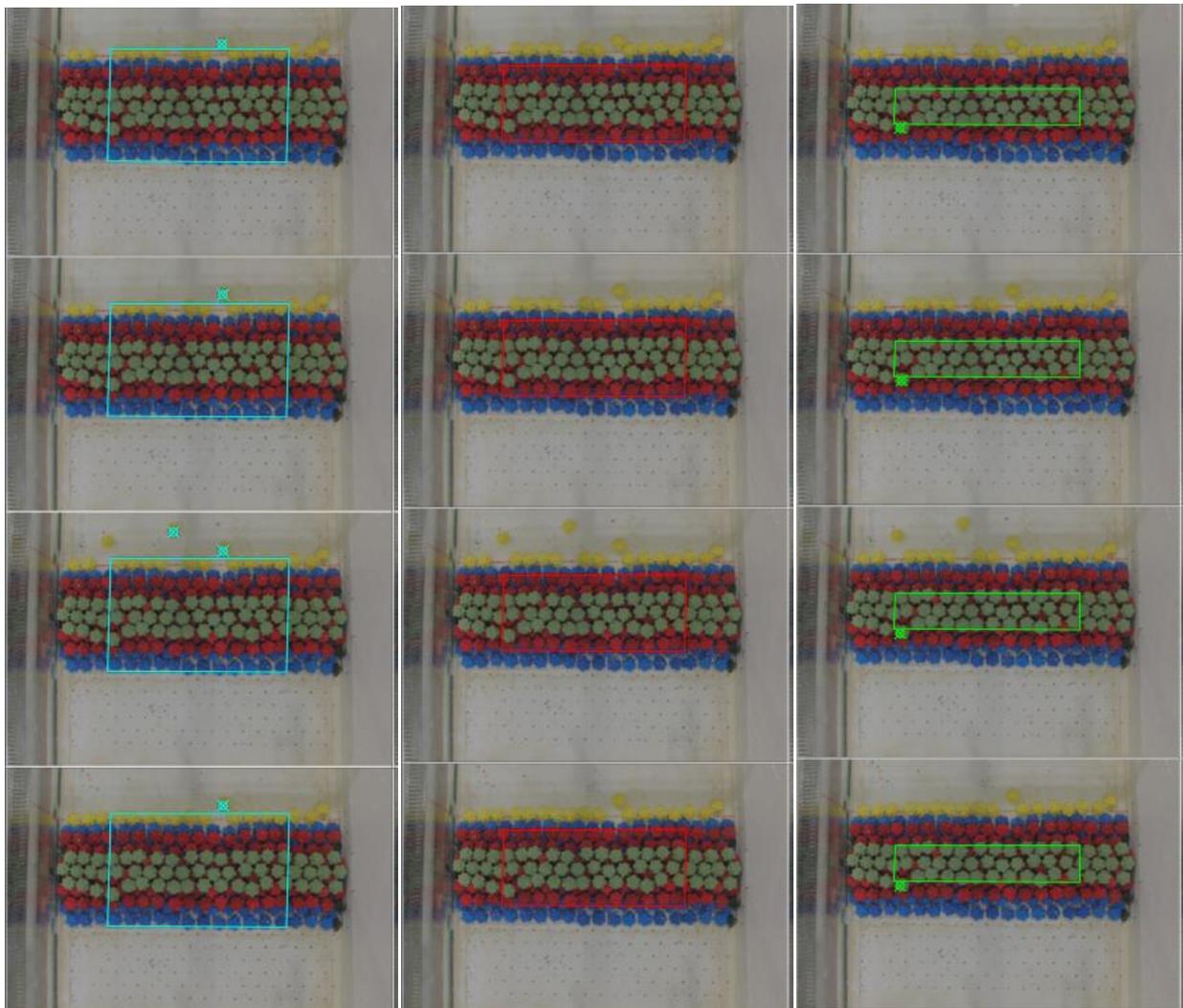


Figura 62: Ejemplo del conteo visual de las piezas desplazadas de su banda.

Fuente: Elaboración propia con AutoCAD

3 Resultados de los ensayos

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los objetivos definidos en este estudio es el análisis de la estabilidad hidráulica de esta tipología nueva de diques (HLCS).

Tras la revisión histórica del Capítulo 3 sobre la estabilidad de los distintos tipos de diques y la formulación utilizada, se observa que para los HLCS se puede medir el daño a través de N% (*Ecuación (27)*) y a través de la profundidad adimensional (*Ecuación (28)*). Se ha calculado el valor de estas dos variables y se ha representado gráficamente una respecto a la otra, tanto para oleaje regular como irregular.

A continuación, las siguientes figuras muestran una representación del porcentaje de piezas dañadas (eje de coordenadas) respecto a la profundidad adimensional (eje de abscisas) ya que este está relacionado con el número de capas de la HLCS. Esta representación se ha realizado tanto para daño tipo 1 como para daño tipo 2 de los dos distintos peraltes ensayados.

Se han representado los valores obtenidos para modelo los modelo 9 y 10 (ver *Tabla 9: Resumen de los distintos modelos.*), el modelo 7 se descartó en su momento ya que se observaba que las piezas de la primera fila de la primera capa eran desplazadas hacia aguas a dentro y esa fila no realizaba ninguna función.

En las siguientes tablas se pueden diferenciar cada una de las distintas capas y las diferentes profundidades ensayadas, correspondiéndose los romboides para profundidades de 11cm, los cuadrados para profundidades de 14,5cm y los círculos para profundidades de 18 cm. Se ha elegido esa colorimetría basándonos en los colores de los Cubípodos utilizados para los ensayos, siendo el azul para la capa 1, el rojo para la capa 2 y el verde para la capa 3.

Para el daño tipo 2 utilizaremos los criterios de daño de Berma (Ebbens, 2009), establece unos valores como límite para poder diferenciar los niveles de daño y el daño medido en porcentaje (N%), estos niveles se han mencionado en el *Apartado 8. Porcentaje de daño* y son los siguientes:

1. 0-3 %: no hay movimiento de piedras (o sólo unos pocos) en el pie delantero.
2. 3-10 %: el pie delantero se aplanan, pero sigue funcionando, siendo el daño aceptable.
3. >20 %: fallo

El daño tipo 1 no es relevante para la funcionalidad, pero es un indicador de estabilidad cuando el daño tipo 2 es muy pequeño (inferior a IDa). Solo consideraremos significativo el daño tipo 1 cuando exceda N%=10%.

En las representaciones se observa, si el porcentaje de daño si se encuentra entre 0-3% se indica a través de una línea solida con color mostaza y si el porcentaje de daño se encuentre entre 3-10% se indica con una línea naranja discontinua y si es mayor de 20% se indica en color rojo con una línea discontinua con puntos.

Entonces, el modelo 9, tiene pendiente suave por delante y pendiente fuerte por detrás, ya no es simétrica como el anterior. Se representa el daño analizado tanto en oleaje regular como irregular siguiendo los criterios anteriormente mencionados.

Se han realizado las siguientes representaciones, diferenciando el tipo de daño y el peralte:

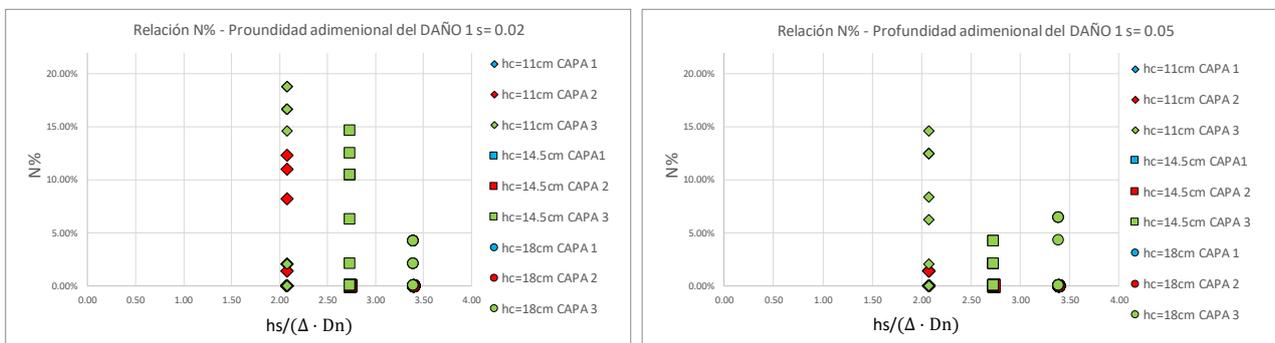


Figura 63: Relación N%- Profundidad adimensional del daño tipo 1, según peralte.

Fuente: Elaboración propia

En Figura 63 se observa el daño tipo 1 según cada peralte de oleaje, s=0.02 y s=0.05. Se aprecia mayores desplazamientos en las capas 2 y 3 que para la capa 1. Esto quiere decir, que las piezas se han desplazado de su banda, pero no han realizado movimientos significativos que lleguen a afectar a la funcionalidad de la estructura, ya que las piezas siguen haciendo su función solo que han recibido un ligero movimiento a causa del oleaje.

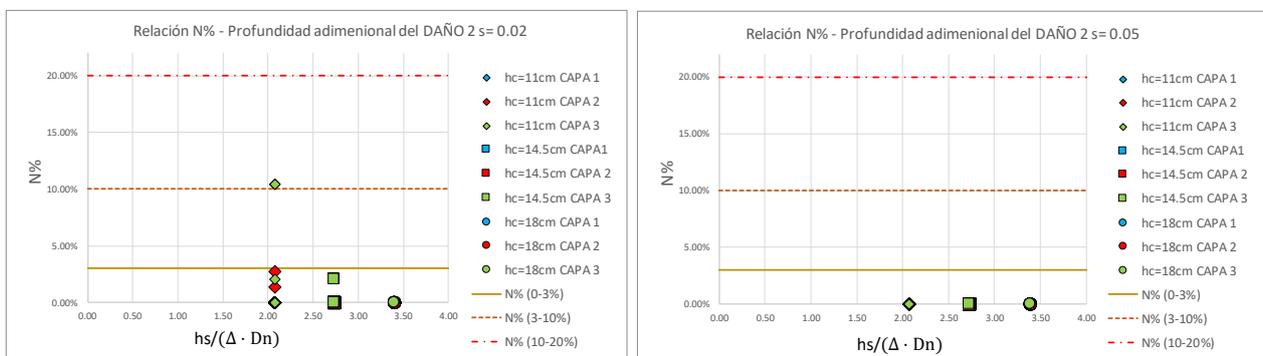


Figura 64: Relación N%- Profundidad adimensional del daño tipo 1, según peralte.

Fuente: Elaboración propia

Mientras que el daño tipo 2, los movimientos sí que afectan a la funcionalidad. Como se aprecia en la Figura 64 en estas estructuras de tipología nueva, no existen desplazamientos significativos, ya

que con peralte $s=0,02$, se observa que el porcentaje de daño es menor al 3% mientras que para peralte $s=0,05$ no existe ningún movimiento de piezas, es decir se mantiene intacta la estructura.

Para oleaje regular, por último, se ha analizado la relación que existe entre N% daño tipo 1 respecto N% daño tipo 2. Se observa en la *Figura 65*, en $s=0.05$ diversos daños tipo 1 son iguales a ningún daño tipo 2 y en $s=0,02$ que N% de daño tipo 1 son menores al 10% del N% de daño tipo 2.

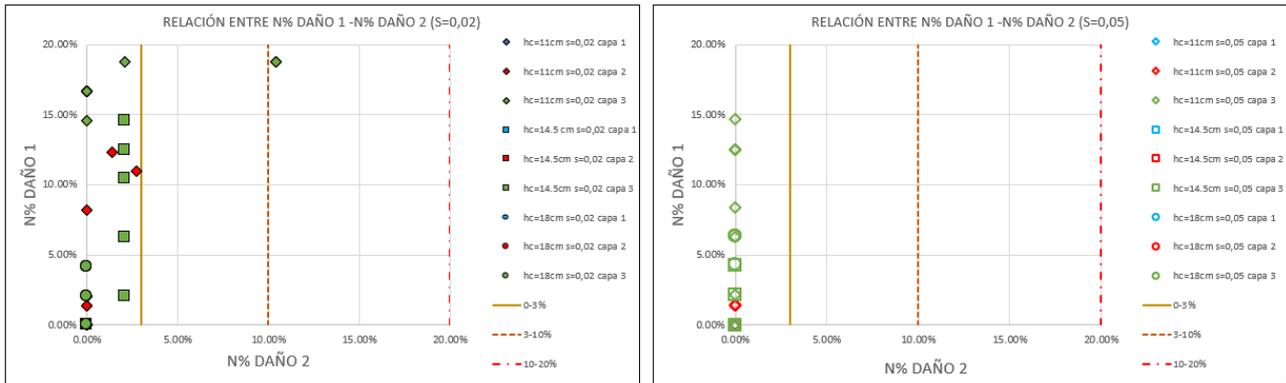


Figura 65: Relación entre N% daño 1 – N% daño 2, según peralte.

Fuente: Elaboración propia

En el modelo 9, para oleaje regular, no se aprecia ningún daño que llegue a afectar a la funcionalidad de la estructura. Por lo que, también se han realizado ensayos de esta estructura con oleaje irregular y posteriormente se han elaborado las mismas representaciones anteriormente mencionada.

Se han realizado ensayos para a una profundidad de 14,5cm con peralte 0,01 y 18cm con peraltes de 0,01 y 0,02. El único ensayo que tiene el peralte 0,02 es con la profundidad 18cm y por este motivo se ha decidido representar el peralte de 0,01 y 0,02 en una misma gráfica.

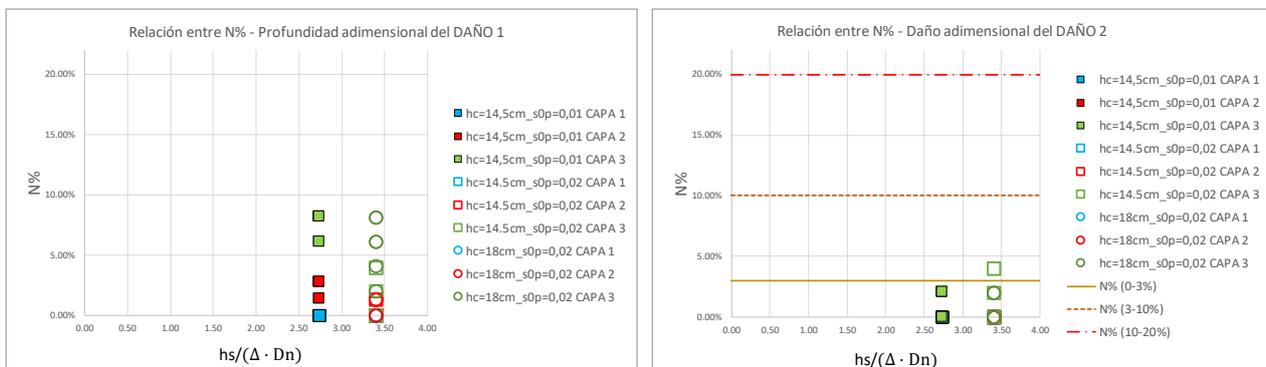


Figura 66: Relación N%- Profundidad adimensional del daño tipo 1 y tipo 2, para oleaje irregular.

Fuente: Elaboración propia

En la *Figura 66*, se observa que para el daño tipo 1 existen varios desplazamientos de piezas, sobre todo en la capa 3, pero sin llegar a afectar a la funcionalidad de la estructura. Mientras que para el

daño tipo 2 se observan daños menores al 3% según Ebbens (2009) y esto significa que tampoco llega a afectar a la funcionalidad de la estructura, ya que son desplazamientos mínimos.

Para oleaje irregular, también se ha analizado la relación que existe entre N% daño tipo 1 respecto N% daño tipo 2. Se observa en la *Figura 67* en $s=0.01$ diversos daños tipo 1 no coinciden con ningún daño tipo 2 y en $s=0,02$ que N% de daño tipo 1 son menores al 10% del N% de daño tipo 2.

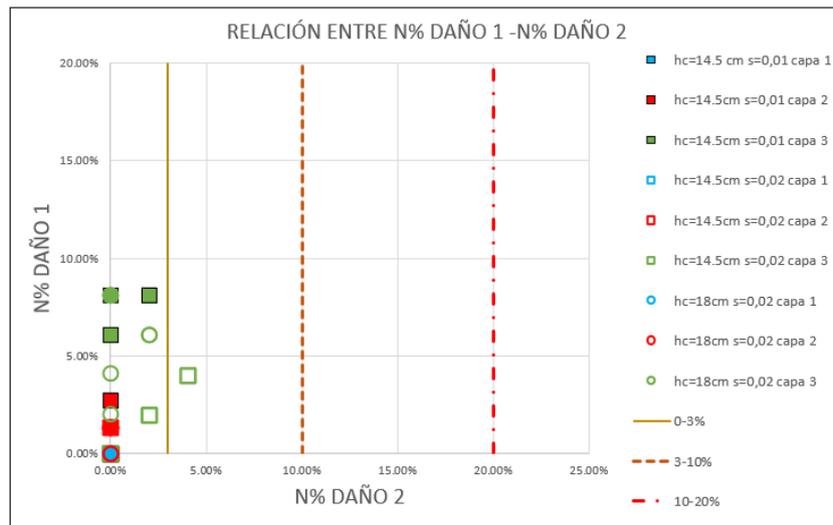


Figura 67: Relación entre N% daño 1 – N% daño 2, para oleaje irregular.
Fuente: Elaboración propia

Al observar que estas estructuras son tan estables, se decide ensayar con el modelo 10, tanto con oleaje regular como irregular. Este modelo es más estrecho ya que se quería comprobar si con menos piezas seguía siendo estable esta tipología nueva.

En la *Figura 68* se observa el daño tipo 1 según cada peralte de oleaje, $s=0.02$ y $s=0.05$. Y como en el modelo anterior (ver *Figura 63*) solo se pueden apreciar desplazamientos mínimos que no afectan a la funcionalidad de la estructura. Solo se desplazan o realizan un movimiento ligero las piezas de la capa 2 y 3.

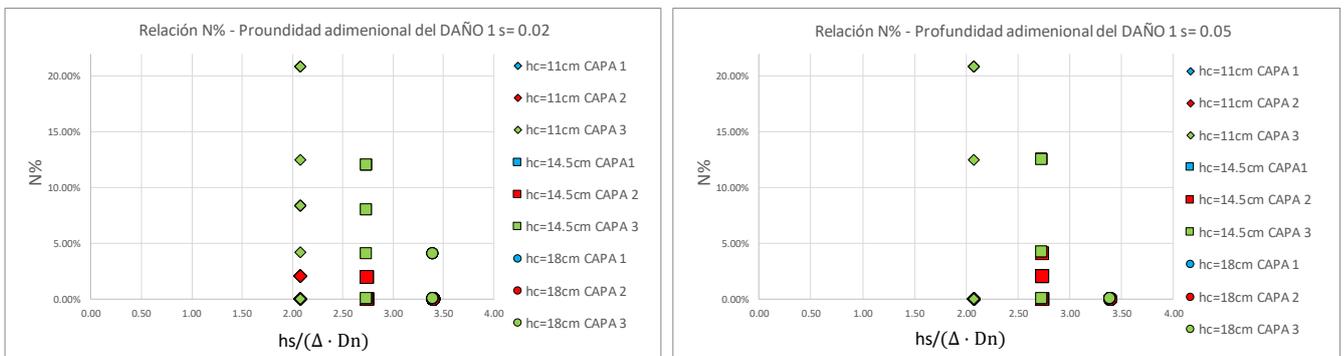


Figura 68: Relación N%- Profundidad adimensional del daño tipo 1, según peralte.
Fuente: Elaboración propia

En la *Figura 69* se observa la relación que existe entre el N% y la profundidad adimensional del daño tipo 2, según el peralte. Se ve claramente que no existe ningún daño del tipo 2 en esta estructura, es decir, no las piezas no han realizado ningún movimiento que haga perder la funcionalidad de la misma.

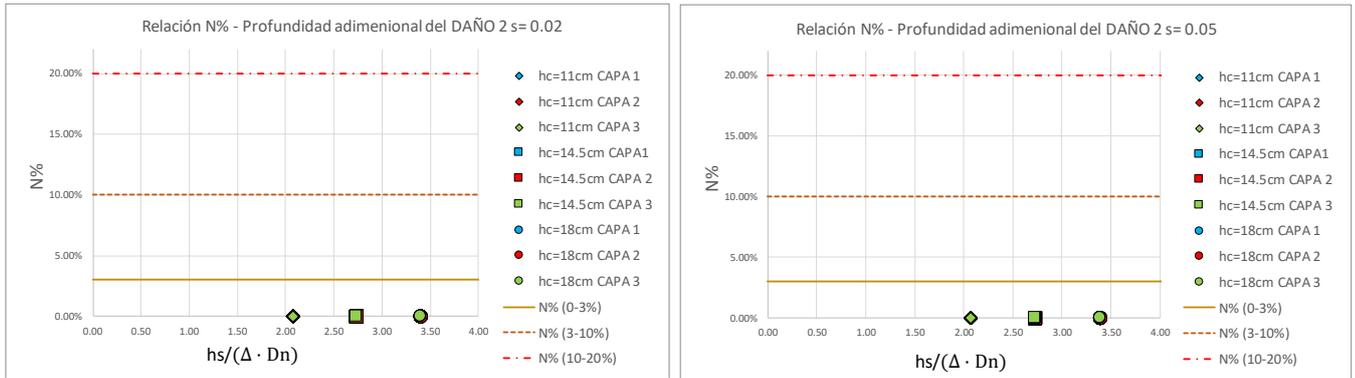


Figura 69: Relación N%- Profundidad adimensional del daño tipo 2, según peralte.

Fuente: Elaboración propia

Al igual que antes, para el modelo 10 en oleaje regular, se ha analizado la relación que existe entre N% daño tipo 1 respecto N% daño tipo 2. Se observa en la *Figura 70* que tanto en el peralte $s=0.02$ y peralte $s=0.05$ diversos daños tipo 1 no coinciden con ningún daño tipo 2.

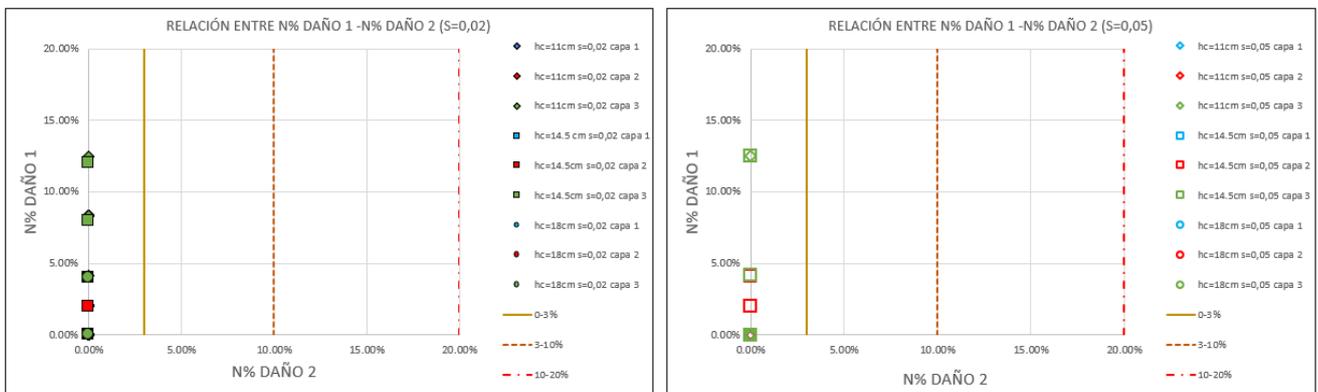


Figura 70: Relación entre N% daño 1 – N% daño 2, según peralte.

Fuente: Elaboración propia

Por último, se ha realizado las mismas representaciones del modelo 10 con oleaje irregular.

En la *Figura 71* se observa la relación entre N% y la profundidad adimensional del daño tipo 1 y del daño tipo 2. En el daño tipo 1 se aprecian algunos desplazamientos de las piezas, pero no llegan a afectar a la funcionalidad global de la estructura, mientras que en el daño tipo 2, se parecían daños menores al 10% según los criterios de Ebbens (2009).

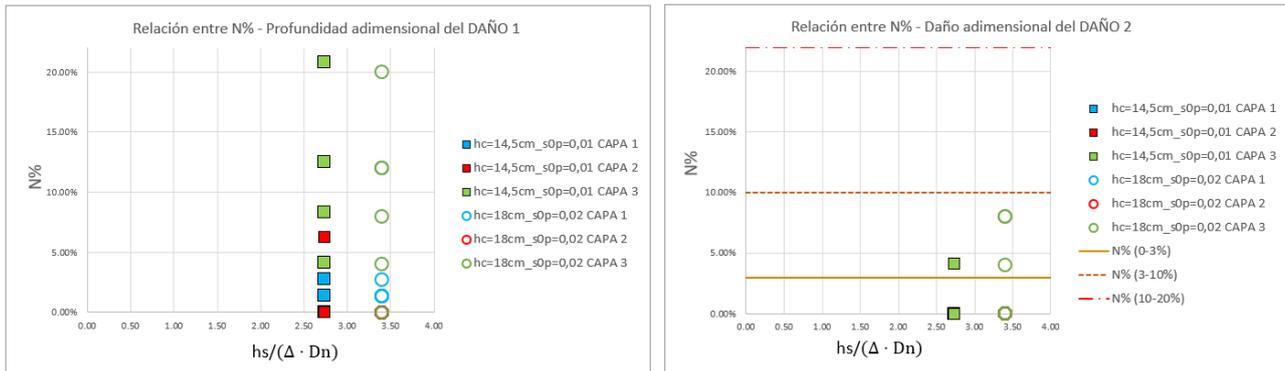


Figura 71: Relación N%- Profundidad adimensional del daño tipo 1 y tipo 2, para oleaje irregular.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 72 se observa la relación que existe entre N% de daño 1 respecto a N% de daño, y se ve claramente que las únicas piezas que han realizado ligeros movimientos menores del 10% del N% del daño 2 son las piezas de la capa 3 (verdes).

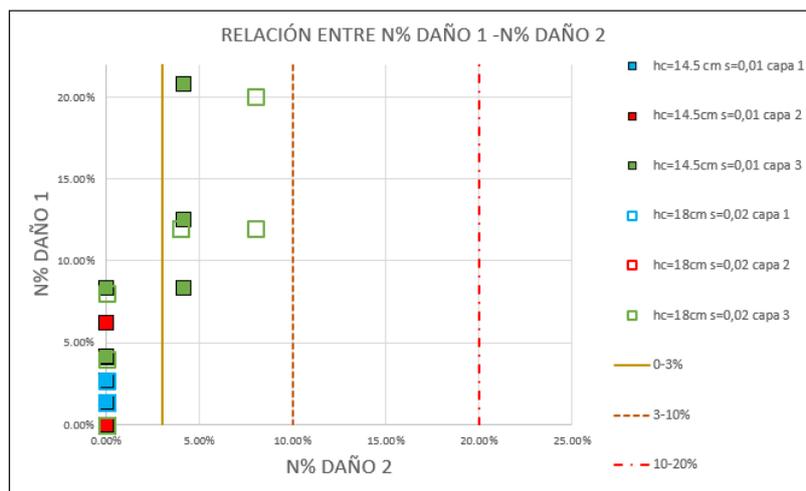


Figura 72: Relación entre N% daño 1 – N% daño 2, según peralte.

Fuente: Elaboración propia

Con esto se concluye, que según los criterios de daño de berma de Ebbens (2009) casi en ningún ensayo se han observado daños relevantes, por tanto, es una estructura muy estable, ya que con los criterios de bermas que son muy estrictos porque condicionan la seguridad total del manto del dique, aun así, no se aprecia ningún daño. En cuanto al daño tipo 1, se encuentran debajo del 10% y no hay una correlación plana entre el daño tipo 1 y el daño tipo 2.

CAPÍTULO N°6

CONCLUSIONES

1 Resumen y conclusiones

En este Trabajo Final de Grado se ha profundizado en el conocimiento de los diques homogéneo de baja cota de coronación formados por Cubípodos. Esta estructura presenta unas ventajas indudables en cuanto a defensa de la costa a la vez que reduce el impacto estético y medioambiental, siendo considerada una infraestructura verde.

Diferentes factores como el cambio climático, el turismo masificado, la acidificación de los océanos o la pesca destructiva dañan las estructuras coralinas que protegen las playas de países que económicamente dependen en gran medida de sus costas, como México y Colombia.

Este Trabajo Final de Grado se centra los arrecifes de coral como dique rompeolas naturales, ya que proporcionan diferentes beneficios al medio sobre el que se desarrollan, son lugares donde existe una extensa biodiversidad. Como la erosión y la degradación de estas estructuras marinas va a avanzar sin remedio los próximos años, se debe intervenir tanto por el bien de la biodiversidad del lugar como por la salud de las playas que tantos beneficios económicos aportan.

Gracias al proyecto europeo DELOS, la literatura de los diques de baja cota de coronación convencionales es amplia en cuanto a la definición, diseño y construcción. El objetivo de este trabajo no es solo proteger únicamente la costa de los países afectados por la erosión de los corales, si no, gracias a los estudios realizados por Medina et al (2019), estos diques pueden favorecer la colonización y desarrollo de corales gracias a su gran porosidad y su función como rompeolas frente a temporales.

Para determinar la eficacia de las estructuras homogéneas de Cubípodos, se realizaron diferentes ensayos físicos 2D en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) sobre tres tipos de estructuras: Modelo 7, Modelo 9 y Modelo 10, compuestas por tres capas de Cubípodos, pero diferente fila en cada una de las tres capas. Todos los ensayos verificaron la estabilidad hidráulica de este tipo de estructuras.

Se puede concluir, con los resultados obtenidos que las estructuras homogéneas de Cubípodos son totalmente estables frente a los posibles temporales que puedan darse en las costas de mar Caribe.

2 Elección del tipo de estructura

Puesto que este Trabajo Final de Grado está centrado en plantear una solución real, se debe escoger una de las tres estructuras estudiadas para su aplicación práctica. Se debe tener en cuenta dos criterios para escoger cual es la estructura que podría ser más eficaz; la estabilidad hidráulica frente a temporales y la menor transmisión de energía que pase (Mazón 2022).

Se ha comentado anteriormente, las tres estructuras son totalmente estables frente a rotura por fondo, pero el modelo 7 se ha descartado desde el principio porque había una fila que no realizaba ninguna función y se desplazaban las piezas.

Se puede asumir que tanto el modelo 9 como el 10 serían válidos para dar una solución eficaz. Puesto que, no se produce ningún daño significativo que llegue a afectar a la funcionalidad de la estructura. Los dos modelos son igual de estables.

Como los dos modelos funcionan igual, se decantaría por el modelo 10 ya que se usaría menos material y habría menor coste logístico y ambiental.

CAPÍTULO N°7

APLICACIÓN PRÁCTICA

1 Introducción

En este Capítulo, tras conocer la problemática existente con la recesión de los arrecifes coralinos y la erosión costera, se va a realizar una aplicación práctica real de las estructuras de baja cota de Cubípodos estudiadas a la protección de la costa de la playa San Luis en la Isla San Andrés (Colombia).

La barrera arrecifal de la isla de San Andrés lleva años protegiendo de los huracanes, tormentas y tsunamis a los habitantes de esta y el mismo territorio, pues actúan como una fortaleza que envuelve la estructura insular, y también como una reserva de peces para la alimentación de sus habitantes. Pues, estas estructuras naturales de protección se están degradando y por lo tanto se está erosionando la costa. (Muñoz, Lopez, O., L., 2020)

A lo largo de este capítulo se caracteriza la zona costera de la Isla San Andrés, analizando la batimetría, clima marítimo y dinámica litoral. También se explica todo el procedimiento constructivo necesario para implantar la estructura y el programa de trabajos que refleja el tiempo aproximado que durará la obra.

En todo este capítulo se va a hacer uso de los estudios realizados en el año 2013 (INVEMAR-CORALINA) de amenaza y vulnerabilidad por erosión costera, donde determinan que la amenaza por erosión costera es muy alta.

2 Localización

El archipiélago de San Andrés está ubicado en el sector occidental del mar caribe, al noroeste del territorio continental nacional de Colombia, aproximadamente a 700 km de la costa norte colombiana.

El área de interés de este trabajo corresponde a la isla de San Andrés (Colombia), esta se encuentra entre 12°28'55" y 12°35'37" de latitud Norte y 81°40'49" y 81°43'23" de longitud W, tiene un contorno alargado en sentido NNE con 12.6 km de longitud, 3.7 km de ancho máximo y una superficie promedio de 28 km².

Las playas que se ubican en el sector N y E de la isla, siendo las más importantes las localizadas en Sprat Bight (N de la isla), La Mansión, Rocky Cay, Sound Bay, Decamerón San Luis, Tom Hooker y Elsy Bar.

2.1 Playa San Luis

La isla San Andrés (Colombia) cuenta con 40 playas. Entre ellas, destaca la Playa San Luis, se ubica en la costa Este de la Isla.

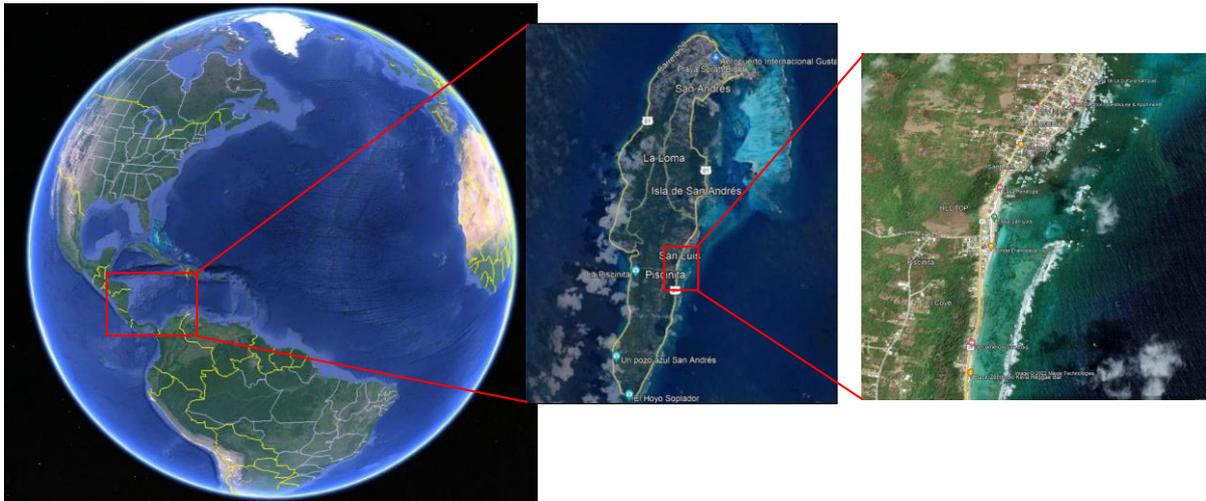


Figura 73: Ubicación de la Playa San Luis en la isla de San Andrés.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth

La principal característica de esta playa son sus fuertes vientos y por ello a veces se sobrenombre como “Bahía Sonora” o Sound Bay. Las playas son de color turquesa y transparente donde se puede visualizar fácilmente la fauna marina.

2.2 Accesos

Es fácil llegar, ya que la misma se encuentra a tan solo 20 minutos del centro de la isla.

Se puede llegar usando la carretera principal circular de la Isla, usando cualquier método de transporte público o privado.

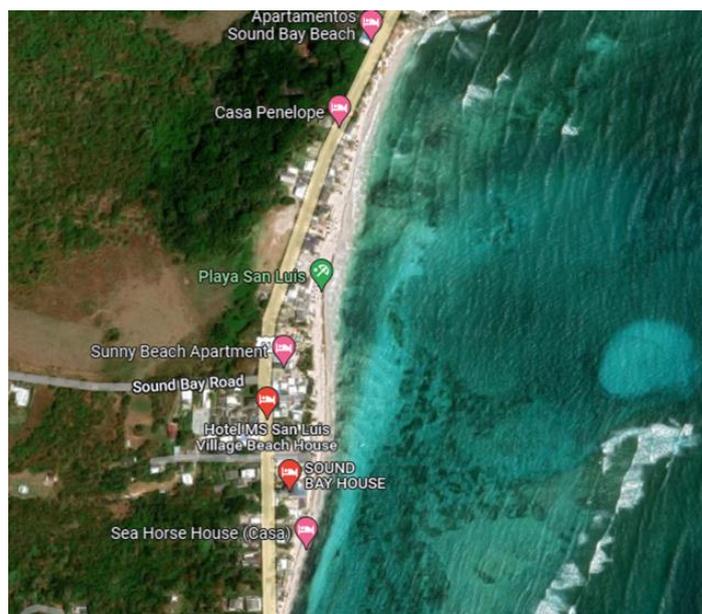


Figura 74: Playa San Luis.

Fuente: Google Earth

3 Subsistema físico y natural

En el presente apartado se va a analizar algunos de los aspectos más importantes del subsistema físico y natural para poner en contexto la Isla de San Andrés y en concreto a la Playa San Luis.

A continuación, se definirá la climatología existente, así como la clasificación de la costa y la batimetría que esta presenta. También se presentará la geomorfología e hidrología de la zona. Por último, se comentará algunos aspectos a tener en cuenta en cuanto al medio ambiente: cambio climático y zonas protegidas.

3.1 Climatología

En el presente apartado se va a describir el clima existente en la isla de San Andrés, así como de la playa San Luis.

Invemar (2014) clasificó el clima del archipiélago de San Andrés según con el sistema de clasificación de Koeppen (1973), como tropical lluvioso de bosque, es decir, húmedo con lluvias durante todo el año, pero con periodos menos lluviosos. El clima se encuentra influenciado por los desplazamientos norte-sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

El clima de San Andrés es cálido semihúmedo, con tres épocas climáticas marcadas: Seca (diciembre a abril), húmeda (julio a noviembre) y de transición (abril a junio). La temperatura media anual de 27.4°C, y una humedad relativa anual de 82%. Asimismo, se presentan precipitaciones anuales que superan los 1900 mm y un total de días de precipitación de 217 (CIOH)

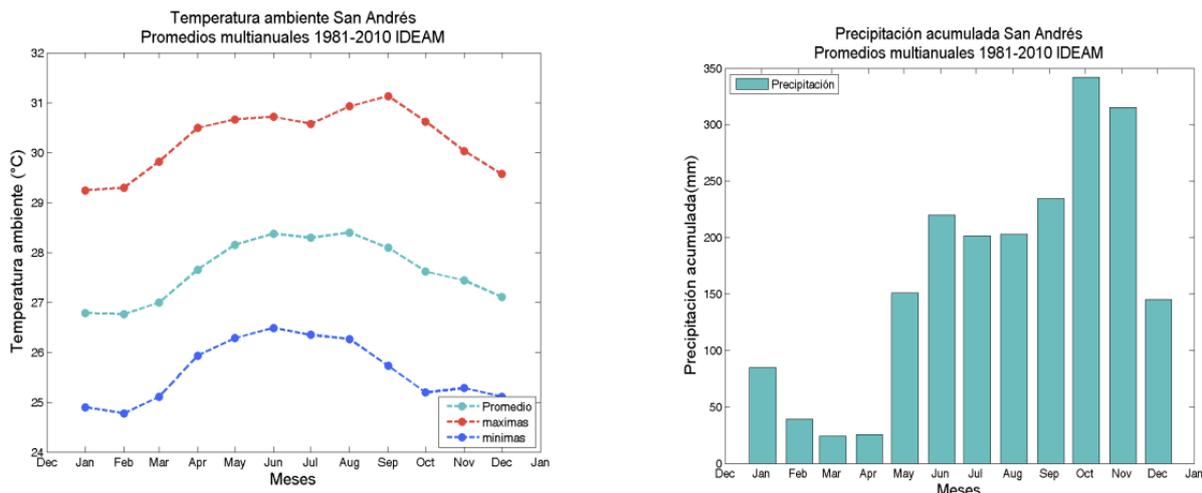


Tabla 15: Promedios multianuales

Fuente: CIOH (1981-2010)

Por otra parte, entre los meses de diciembre y abril se presenta el fenómeno de mar de leva, cuya duración es de 48 horas, y se refuerzan por las acciones de los vientos alisios que soplan en

dirección este-noreste en esta época (Invemar 2014). Este fenómeno también conocido como “mar de fondo” consiste en el aumento anormal de la altura del oleaje, aumento que es ocasionado por el viento, y cuando este deja de soplar, las olas siguen alejándose de su zona de origen. Una vez fuera ella, se transforman haciéndose más regulares, y llegan a áreas bien alejadas de su origen.

Otro fenómeno meteorológico que afecta al litoral del Archipiélago de San Andrés es el fenómeno El Niño y La Niña. El primer fenómeno es causado por el calentamiento global gradual del océano pacífico que provoca lluvias intensas e inundaciones. Mientras que el fenómeno La Niña es el enfriamiento anormal de las aguas del Océano Pacífico Tropical.

En resumen, el fenómeno El Niño es fase cálida y La Niña es fase fría. En el archipiélago, durante los años La Niña lleve más respecto a los años El Niño, para la temporada de diciembre a mayo y durante los meses de julio y octubre, presentándose la mayor diferencia durante el mes de julio con más de 50% de precipitación adicional. Sin embargo, para los meses de junio, agosto, septiembre y noviembre las lluvias son menores para años La Niña respecto a años El Niño, en especial durante el mes de noviembre. González y Grant (2003) en Posada y Guzmán (2007) plantean que la precipitación promedio presenta una diferencia de 30 mm entre los años Niño y Niña (Invemar, 2014).

3.2 Batimetría

Es necesario conocer la batimetría de la zona de aplicación para poder afrontar el diseño de la estructura de defensa y estabilización de la costa. Este análisis permitirá obtener información detallada sobre la forma del lecho marino, caracterizando el perfil geológico y geomorfológico de la playa, así como el estudio de la ubicación final de la estructura que se va a diseñar.

La figura siguiente muestra la batimetría de playa San Luis, obtenida de Navionics, junto a una representación esquemática del arrecife de coral que protege la costa, representado en color verde.

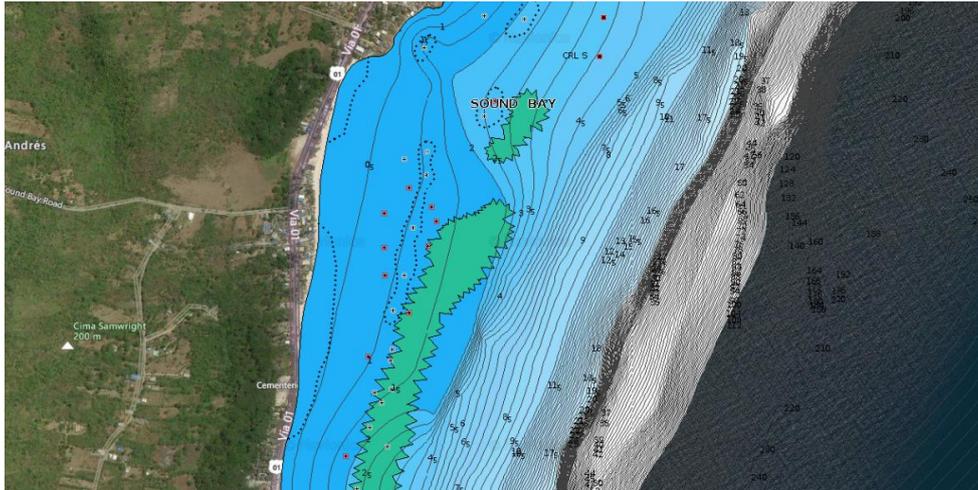


Figura 75: Batimetría de la playa San Luis.

Fuente: Navionics

En la anterior figura se puede observar que la playa cuenta con una amplia superficie que llega hasta los 4 metros de profundidad, en ella se depositan los arrecifes de coral. Después de esos cuatro metros hay una brusca bajada de cota en la profundidad que llega hasta los 11 y 18 metros hasta adentrarse en aguas profundas donde ya las profundidades van aumentando.

3.3 Geomorfología

En la Isla de San Andrés existen tres grandes grupos geomorfológicos (Invemar, 2014):

- La morfología de la costa con playas, borde costero acantilado, depósitos de tormenta y manglares, incluidos los rellenos antrópicos.
- Morfología de plataforma arrecifal periférica emergida
- Morfología de colinas en la parte central de la isla y depósitos cuaternarios asociados.

3.3.1 Clasificación de la costa

Se realizará una primera clasificación en función de los diferentes procesos a los que haya estado expuesta la playa, según costas bajas (playas) o altas (acantilados) resultado de los procesos de depósito y de erosión respectivamente.

Las costas bajas o costas el depósito son el resultado de descenso del nivel del mar o de la elevación de la corteza terrestre. Mientras, en las cosas altas o costa de erosión, producidas por el hundimiento de la corteza terrestre cerca del borde de un área continental o el aumento del nivel del mar.

Como puede verse en la siguiente figura, la playa San Luis es una costa baja de depósito formada por arenas.



Figura 76: Playa San Luis.

Fuente: Ylenia (2019)

P. Suárez Bores propone una clasificación genética de costas, en función de:

- **La naturaleza de fondo:** El fondo es fijo en costas de erosión y móvil si la costa es de depósito. En el caso de playa San Luis, es de fondo móvil con sedimentos de material fino en continuo desplazamiento.
- **La estabilidad:** Un tramo de costa puede ser hiperestable, si el tramo recibe mayor cantidad de sedimentos de los que cede; estable, si la cantidad de sedimentos que entran y salen es la misma; o inestable si en el tramo se produce una mayor pérdida de material suelto. Para el caso de la playa San Luis, se considera una costa inestable.

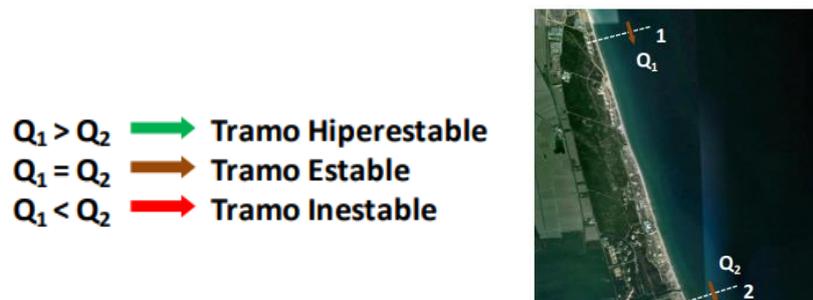


Figura 77: Clasificación genética de la costa según la estabilidad.

Fuente: Asignatura de Obras Marítimas 3ºGIC

- **Alzado o perfil:** Las playas pueden clasificarse siendo perfil completo si presenta todos los tramos característicos de un perfil de playa (escarpe, playa seca, estrán y playa sumergida). En el caso de que algunos de estos tramos no existan, se considerará que perfil es incompleto, lo que da lugar a una playa submarina o playa sustentada.



Figura 78: Tipos de perfil de playa.
Fuente: Lozano et al (2021)

En la siguiente figura puede verse el perfil existente de la Playa San Luis:



Figura 79: Perfil de fondo marino de playa San Luis.
Fuente: Elaboración propia en Google Earth

En el perfil de la playa San Luis se aprecia un tramo inicial bastante constante de 1 kilómetro que posteriormente se va tendiendo y aumentando considerablemente su pendiente. Podría considerarse como perfil completo.

- **Plantas (Singularidades):** Se puede clasificar la costa según las singularidades en planta, dividiéndose en tres grupos: singularidades másicas, singularidades geométricas y singularidades dinámicas. Estas singularidades pueden ser tanto positivas como negativas.
 - **Singularidad másica:** Esta singularidad si es positiva se refiere al aporte puntual y local de materiales sueltos a la corriente litoral del transporte, y si es negativa se refiere a la extracción o pérdida puntual y local de materiales sueltos a la corriente litoral del transporte.

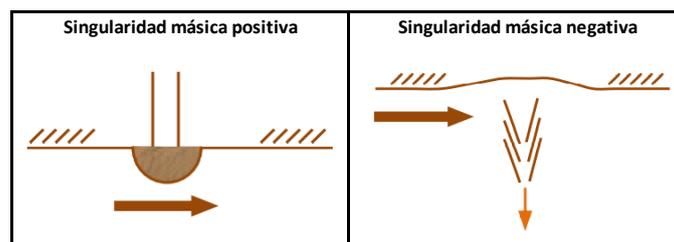


Figura 80: Singularidad másica positiva y negativa.
Fuente: Asignatura de Obras Marítimas 3ºGIC

- **Singularidad geométrica:** Esta singularidad tanto si es positiva como negativa se refiere al cambio brusco de la alineación de la costa, formando un ángulo positivo o negativo.

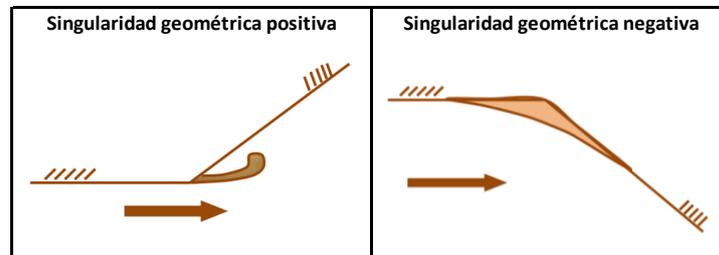


Figura 81: Singularidad geométrica positiva y negativa.

Fuente: Asignatura de Obras Marítimas 3ºGIC

- **Singularidad dinámica:** Se dan en caso de que la playa esté protegida por elementos como islas, arrecifes, espigones etc., siendo positivas en caso de que el abrigo sea de barlomar y negativo si el abrigo es de sotamar.

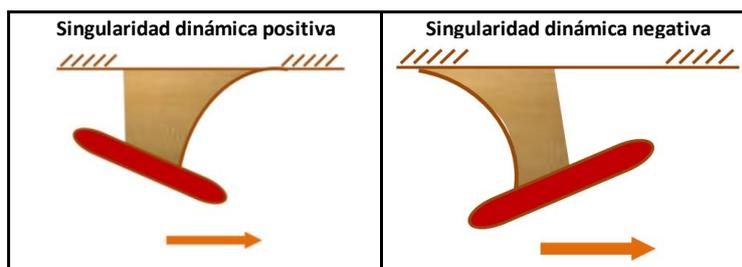


Figura 82: Singularidad dinámica positiva y negativa.

Fuente: Asignatura de Obras Marítimas 3ºGIC

En el caso de la Playa San Luis, presenta singularidades geométricas y dinámicas, ambas negativas al formar un ángulo cóncavo hacia el mar y estar resguardada a sotamar de un arrecife de coral.

3.4 Hidrología

Se hace un breve estudio de las características hidrológicas de la Isla San Andrés, con el fin de obtener información relevante acerca del lugar.

La isla de San Andrés cuenta con dos acuíferos que abastecen de agua a la población isleña. Estos son: el acuífero San Andrés, localizado en la parte central de la isla, el cual provee de agua a la red de acueducto, y el acuífero San Luis, que se halla alrededor del primero y del cual se abastece de agua la mayoría de la población. También, se capta agua lluvia y se potabiliza agua de mar con plantas desalinizadoras introducidas por los hoteleros. La escasa superficie terrestre y la permeabilidad y porosidad de la roca caliza hacen que los acuíferos estén expuestos a la contaminación de los pozos sépticos (Botet y Lowy, 2009)

En cuanto a aguas superficiales, la isla no cuenta con ninguna masa de agua destacable.

3.5 Cambio climático

El cambio climático es el fenómeno que produce la variación del sistema climático terrestre en su conjunto. Aunque durante la historia de la Tierra estos han existido por diversas causas, el actual es fruto de la acción antropogénica y está relacionado con la intensificación del efecto invernadero debido a la emisión de dióxido de carbono y otros gases relativos al uso de combustibles fósiles.

El calentamiento global esta evidenciada principalmente por indicadores como incremento en la temperatura promedio global del aire y el océano, acidificación del océano, derretimiento de la nieve glacial y el hielo en los polos, aumento de ocurrencia de eventos extremos y en el aumento en el nivel del mar (Invemar 2014).

Puesto que en este estudio se va a construir una estructura marítima que proteja la costa de la playa San Luis, es importante conocer el aumento del nivel del mar, ya que influirá en la cota de inundación estimada en la playa y en la planificación del litoral.

Invemar (2014) destaca que el nivel el mar en el archipiélago de San Andrés se va incrementando como consecuencia del calentamiento global pudiendo causar la inundación de 10,1% de la isla de San Andrés, representado en áreas de marismas, cordones litorales, rellenos artificiales y algunas terrazas coralinas bajas cubiertas por mangle.

La erosión de la línea de costa es un proceso que actualmente se presenta en las islas con mayor intensidad y consecuencias en San Andrés, donde ha producido la pérdida de playas, el retroceso de algunos sectores del litoral y la destrucción de algunas viviendas. Con el incremento del nivel del mar asociado con el cambio climático, es posible un aumento en la intensidad y extensión de los procesos de erosión, los cuales podrían afectar especialmente el 12,3% de la línea de costa de la isla de San Andrés que es altamente susceptible a la erosión, donde se verían afectados sectores de usos turístico y portuario de la isla. (Invemar, 2014)

Invemar (2014) compara la serie registrada en el mareógrafo de San Andrés, con la serie de mediciones de nivel del mar en el Caribe. La tendencia calculada para la serie de San Andrés muestra un incremento de 3,6mm/año, en comparación con lo registrado en el Caribe, de 2,4 mm/año.

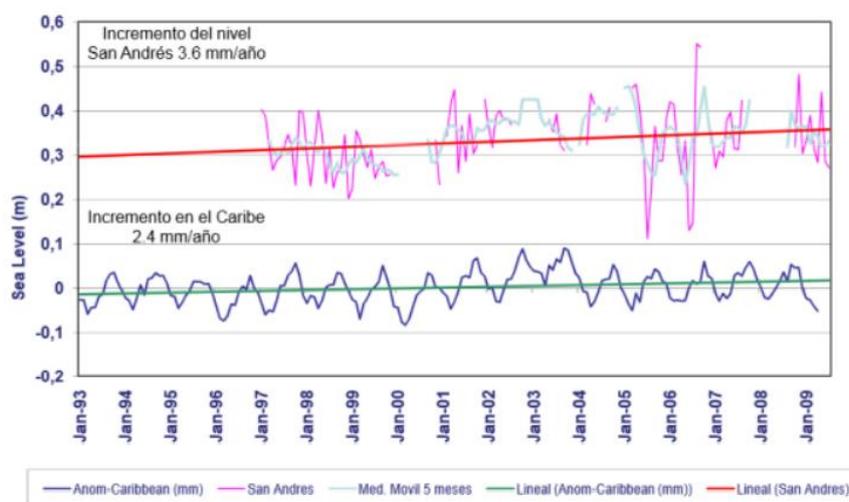


Figura 83: Análisis comparativo de series para San Andrés y nivel del mar Caribe.

Fuente: Invemar (2014)

Según diferentes escenarios establecidos por el IPCC (2001), se prevé que el nivel del mar global subirá entre 0,09 y 0,88 m entre 1990 y 2100 debiéndose principalmente a la expansión térmica y la pérdida de masa de los glaciares y de los casquetes polares. Sin embargo, el cambio en el NMM no es uniforme espacialmente ya que la tasa de incremento en algunas regiones puede ser incluso mayor al promedio mundial, mientras que en otras puede haber una disminución (IPCC, 2007)

Invemar (2014) simularon diferentes tasas del aumento del nivel del mar y concluyeron que en 2040 un incremento del nivel del mar de 5,98 cm tendría bajo impacto en el acuífero San Andrés e impacto moderado a bajo en el acuífero San Luis, debido a que es éste se encuentra en contacto con el agua del mar y que en la actualidad presenta salinidades muy altas.

3.6 Clima marítimo

Para llevar a cabo una obra marítima con su respectivo diseño y construcción, es necesario detallar el clima marítimo de la zona donde se vaya a realizar la obra. Dichos datos permiten una correcta planificación para los periodos de trabajo y poder realizar una estimación futura que tendrá la costa tras la implantación de la estructura.

A continuación, se extrae información de Thomas et al (2012) para caracterizar el clima marítimo y así poder analizar principalmente el viento y oleaje de la zona de estudio.

3.6.1 Oleaje

Steer (2002) en Posada, y Guzmán (2007), plantearon que el principal generador de olas es el viento y sus características depende la amplitud, dirección y frecuencia de las olas.

De acuerdo a su estudio, las olas llegan a la isla en dirección E-NE, con periodos entre 9 y 13 segundos y rompen en la barrera arrecifal donde son atenuadas y sólo las olas de menos amplitud pasan la barrera y llegan a la costa. En la costa occidental, las olas del E-NE llegan de forma indirecta, por la refracción que sufren en los extremos norte y sur de la isla. La terraza arrecifal al tener una profundidad de 15 a 4 metros hace que la ola rompa contra el acantilado, a excepción de aquellas de mayor periodo que sufren el proceso de asomeramiento antes de alcanzar la costa. Por último, las olas menos frecuentes de S-SW se asocian con tormentas tropicales o huracanes y atacan directamente la costa occidental de la isla. (Invemar 2014)

Thomas et al. (2012), plantean para la isla de San Andrés datos por temporadas, basados en los tres periodos estacionales claramente definidas para el Caribe colombiano:

- Estación 1: diciembre-marzo
- Estación 2: abril-julio
- Estación 3: agosto-noviembre

Luego el análisis de la base de datos reseñadas, en los periodos de tiempo indicados, se realizaron con los siguientes parámetros; altura significativa, periodo y dirección de las olas; altura de las olas en función de la dirección, dirección de las olas en función del periodo y altura de las olas en función del periodo.

Los siguientes histogramas representan la altura significativa (H_s) de las olas de la Isla de San Andrés (Colombia), escala en metros, periodo (T_p) de las olas escala en segundos y grafico polar de la dirección (D_p) de las olas escala en segundos; datos del 1 de julio de 1999 al 14 de febrero de 2005. La base de datos es “Noaa, National Weather Service, National Centers for Environmental Prediction”

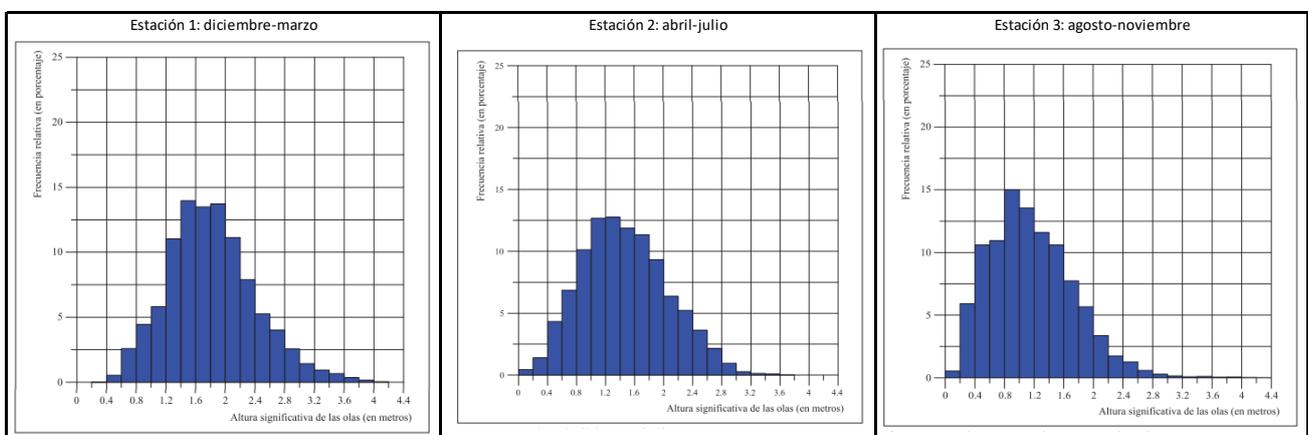


Figura 84: Histogramas de la altura significativa (H_s) de las olas, escala en m.

Fuente: Thomas et al (2012)

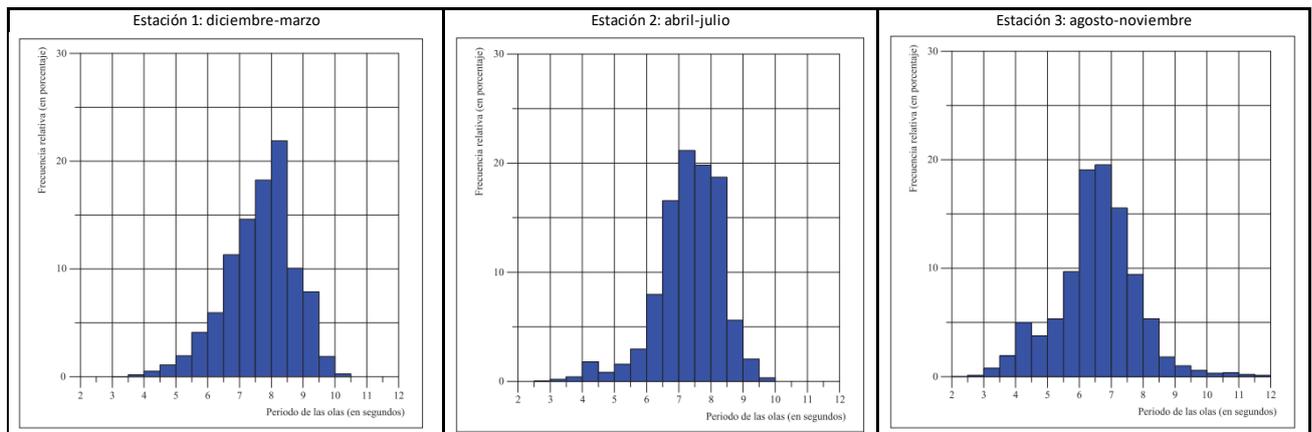


Figura 85: Histogramas del periodo (T_p) de las olas; escala en s.

Fuente: Thomas et al (2012)

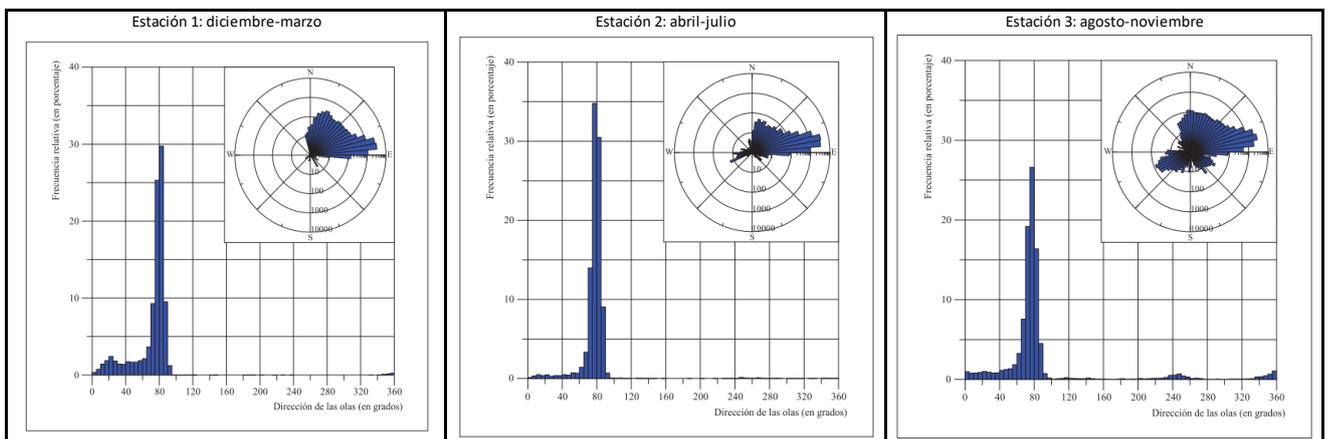


Figura 86: Histograma y gráfico polar de la dirección (D_p) de las olas para el punto "San Andrés"; escala en s.

Fuente: Thomas et al (2012)

En la siguiente figura se observa la dirección de las olas en el mar caribe (Thomas, 2012):

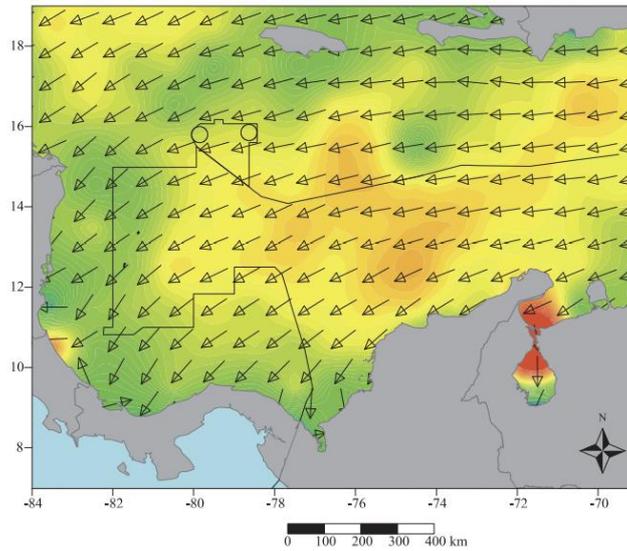


Figura 87: Dirección del oleaje.

Fuente: Thomas (2012)

Thomas et al (2012) analizó también la altura de ola con los siguientes parámetros: tempestades con altura ola significativa >2m y altura de ola significativa para periodo de retorno de 10, 50, 100 y 500 años.

A continuación, se van a insertar dos graficas con las curvas del periodo de retorno de la altura significativa, escala en metros;

Los datos de la Figura 88 se han extraído a través de la base de datos “Western North Atlantic 0.25 degree model” del 1 de julio de 1999 al 14 de febrero de 2005, es decir, en 6 años de observación ha habido un registro de 4,5 metros de altura de ola significante.

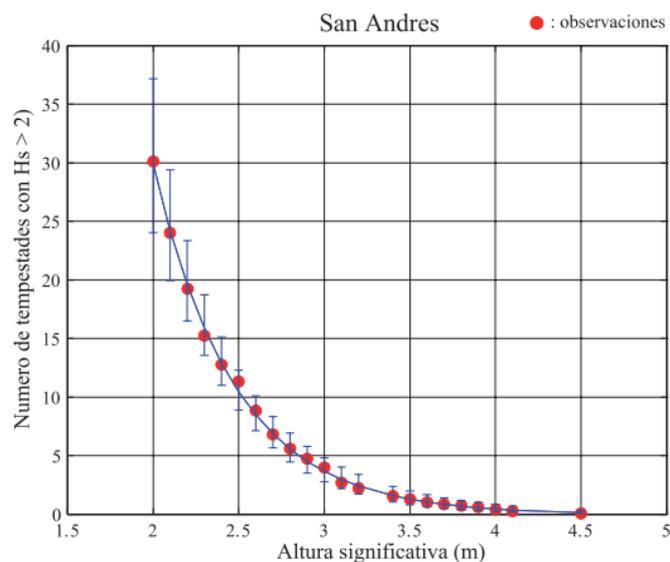


Figura 88: Curva de altura de ola significativa >2m; escala en m.

Fuente: Thomas et al (2012)

Los datos de la Figura 89 se han extraído a través de la base de e datos “AVISO, Centre national d’Études Spatiales”. Son Parámetros de la función Distribución Generalizada de Pareto. Se realiza una estimación de la ola significativa de probabilidad de retorno: 1 año = 3.52 m, 10 años = 5.01 m; 50 años = 6.62; y 100 años = 7.51 m

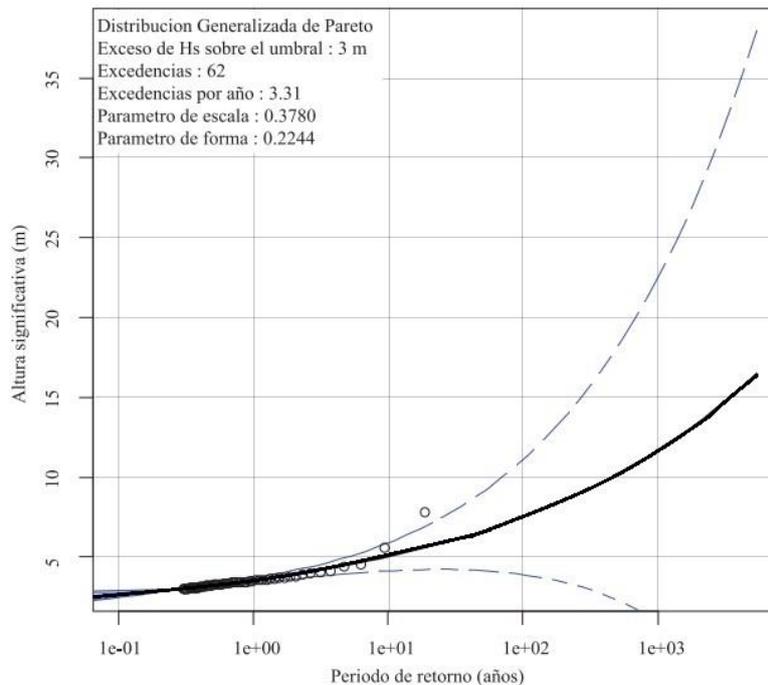


Figura 89: Curva del periodo de retorno de la altura significativa; escala en m.

Fuente: Thomas et al (2012)

3.7 Mareas

Invemar (2014) analizaron la marea en los períodos 1997-2008 y obtuvieron ciclos diurnos de marea para años El Niño, La Niña y años normales, a lo largo del año hidrológico (correspondiente al período junio – mayo).

En la siguiente figura se muestra el ciclo diurno de la marea total. Se observa que lo registros ms altos se presentaron a la hora 7:00 y la hora 20:00. durante los años El Niño se presentan, en general, mareas mucho más fuertes, con diferencias notables en los meses de diciembre y enero, y abril y mayo. Cabe resaltar que los valores de las diferencias en las mareas son de 13 ± 5 cm, tanto para años El Niño como para años La Niña, por lo cual el impacto real sobre el acuífero no representa un grave problema para la calidad del mismo.

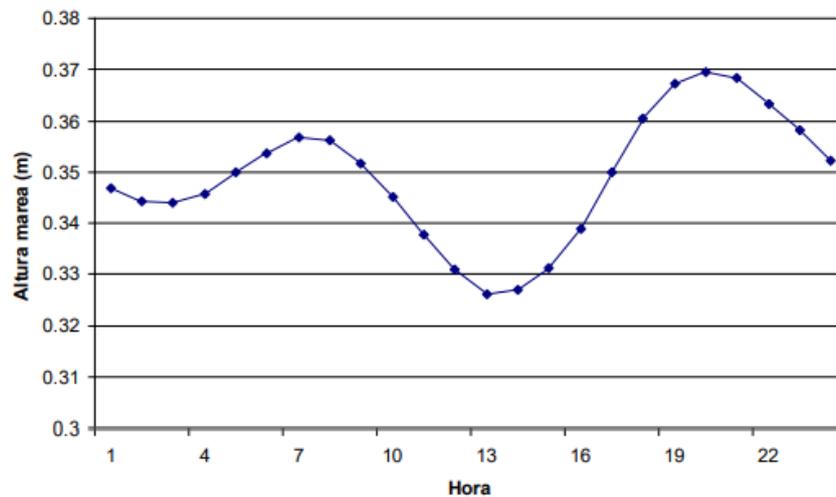


Figura 90: Ciclo diario de marea (tomado de CORALINA y Universidad Nacional, 2010)

Fuente: Invemar (2014)

4 Subsistema socioeconómico

El objetivo del análisis del subsistema socioeconómico es el conocimiento de los suelos y actividades que se desarrollan en la zona estudiada. En este apartado se incluye la descripción de la demografía y las actividades económicas que se desarrollan.

4.1 Demografía

El Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina registró una población de 70.554 habitantes en 2005 según el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) de la cual 65.627 habitantes residen en una superficie de 26 km² considerándose una de las islas más densamente pobladas de América. Entre la población existente en la zona de estudio predomina el grupo afroamericano antillano o raizal (56,98%), seguido de la población mestiza y blanca (42.,91%).

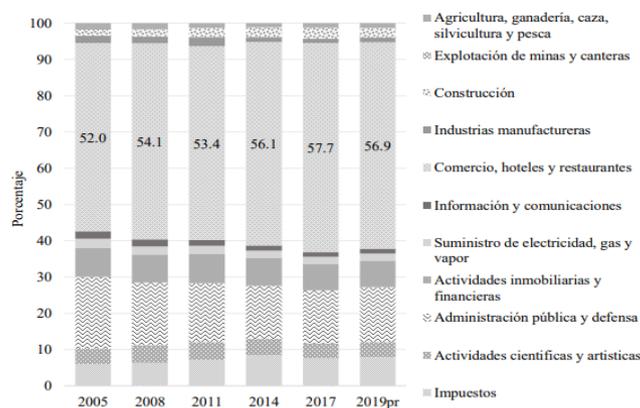
Por otro lado, al haber densidades de población tan altas en la isla, uno de los problemas de la isla es la sobrepoblación, la cual se debe principalmente a la migración desde Colombia continental, motivada fundamentalmente por el gobierno del presidente Gustavo Rojas Pinilla en 1953, que tuvo el objetivo de dinamizar la economía de la isla y atraer turistas. Este aumento de población también produce entre otros la pérdida de tierras de los campesinos isleños, el agotamiento de los pozos de agua y el daño ecológico en las áreas marinas cercanas a la playa.

4.2 Actividades económicas

Como se ha comentado en el apartado anterior, la presión demográfica cada vez es más intensa en la isla, produce necesidades entre las cuales se cuenta: la demanda de agua dulce, la necesidad

de materiales de construcción, adecuación de sitios para diversos propósitos, manejo de la tierra, y la disposición de aguas servidas y desechos sólidos. La satisfacción de tales necesidades produce desequilibrios en la naturaleza, los cuales deben ser cuidadosamente evaluados, buscando causar el mínimo impacto. La necesidad de adecuar terrenos urbanizables ha conducido a la realización de rellenos con material dragado del océano, y a la ocupación de antiguas áreas cenagosas generando en la mayoría de los casos impactos negativos en el ambiente (Vargas, 2004).

El principal recurso económico de los pobladores de la isla es el turismo, favorecido por el clima tropical caribeño y el comercio desde su creación como puerto libre en 1959 hasta la fecha. La agricultura es escasa, solo se manifiesta con cultivos de coco con una extensión de 2000 ha y localmente con cultivos de plátano y cítricos. La pesca tiene un carácter estrictamente doméstico y su producto se destina a satisfacer las necesidades alimenticias de la isla (Vargas, 2004).



Fuente: Cuentas departamentales DANE.

Figura 91: Actividades económicas.

Fuente: Bonet-Morón, J., Ricciulli-Marín, D., Peña, D. (2021)

En cuanto a la playa en concreto, esta no cuenta con la gran oferta de la industria hotelera con la que cuentan otras playas de la Isla y es por esto que los lugareños han acondicionado acogedoras posadas y hostales para hospedaje muy cómodos y accesibles para los turistas en los cuales se pueden hospedar y disfrutar de la cercanía de la playa, la comida, la amabilidad de sus habitantes, los maravillosos locales nocturnos y restaurantes que existen en la zona. Esto la convierte en uno de los lugares de interés turístico más apetecidos por los interesados en la cultura raizal.

Algunas actividades turísticas relacionadas con las playas son el buceo o careteo. El único hotel que existe alrededor de San Luis es el Decamerón San Luis.

5 Diseño de la estructura

En el presente apartado se va a realizar todos los cálculos necesarios para la definición del dique arrecife de Cubípodos que se quiere construir. Para ellos, en primer lugar, se obtendrán las características básicas de diseño, orientación del dique respecto a la costa, separación con la línea de costa, su longitud, ubicación, cota de coronación, etc.

Posteriormente se define la altura de ola de cálculo que afectará a la estructura tras su construcción.

5.1 Criterios básicos de diseño

Para el diseño de las HLCS de Cubípodos será necesario predeterminedar algunas de las características de estos.

La estructura que se va a diseñar tendrá unas características similares a los modelos estudiados y ensayados en el LPC-UPV. En este caso, estará formado por tres capas de Cubípodos, dispuestos mediante una malla de colocación con un 50% de porosidad compuesta por triángulos rectángulos de parámetros $a/D_n=1,32$ y $b/D_n=1,52$. La sección transversal presentará taludes de 2:1 con retranqueos de una fila en el lado de incidencia del oleaje y de 1:2 en el lado opuesto. Los Cubípodos tendrán una densidad de 2,21 t/m³.

El dique se situará sobre la batimétrica -4 metros, para así dar continuidad al arrecife. Una vez conocidas las dimensiones de los Cubípodos se definirá la longitud, ubicación y número de diques a colocar.

5.2 Altura de ola de cálculo

En primer lugar, será necesario obtener el periodo de retorno de la obra y así poder conocer el régimen de oleaje de cálculo que afectará a la estructura, puesto que las olas incidentes pueden estar o no en condiciones de rotura.

$$P_{n,v} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^V \quad (29)$$

Donde $P_{n,v}$ es la probabilidad conjunta de fallo; T_r es el periodo de retorno del temporal de cálculo (años) y V es la vida útil mínima en años.

A continuación, se van a insertar unas tablas del capítulo 2 de la normativa ROM 1.0-09 que presenta los valores de IRE (Índice de Repercusión Económica) e ISA (Índice de Repercusión Social y Ambiental) para obras de abrigo y defensa de la costa. Además, proponen valores de su vida útil y la probabilidad conjunta de fallo de acuerdo con la ROM 0.0.

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA				ÍNDICE ISA		P _{rel}	P _{rels}
COMERCIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₃	Alto	0.01	0.07	
		Pasajeros y Mercancías no peligrosas ¹	s ₂	Bajo	0.10	0.10	
	Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique		s ₁	No significativo	0.20	0.20	
PESQUERO	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₂	Bajo	0.10	0.10	
	Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₁	No signif.	0.20	0.20	
NÁUTICO-DEPORT.	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₂	Bajo	0.10	0.10	
	Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₁	No signif.	0.20	0.20	
INDUSTRIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₃	Alto	0.01	0.07	
		Mercancías no peligrosas	s ₂	Bajo	0.10	0.10	
	Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique		s ₁	No significativo	0.20	0.20	
MILITAR	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique ¹		s ₃	Alto	0.01	0.07	
	Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₁	No signif.	0.20	0.20	
PROTECCIÓN ⁴	Con zonas de almacenamiento adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₃	Alto	0.01	0.07	
		Mercancías no peligrosas	s ₂	Bajo	0.10	0.10	
DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ⁵				s ₄	Muy alto	0.0001	0.07
PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DEVERTIDO				s ₂ (s ₃) ⁶	Bajo (alto) ⁴	0.10	0.07
PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES				s ₂ (s ₄) ⁷	Bajo (muy alto) ⁵	0.10	0.07
REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS				s ₁	No signif.	0.20	0.20

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA				ÍNDICE IRE ⁷		VIDA ÚTIL MÍNIMA (V _m) ⁷ (años)	
PUERTO COMERCIAL	Puertos abiertos a todo tipo de tráfico			r ₃	Alto	50	
	Puertos para tráfico especializados			r ₂ (r ₃) ¹	Medio (alto) ¹	25 (50) ¹	
PUERTO PESQUERO				r ₂	Medio	25	
PUERTO NÁUTICO-DEPORTIVO				r ₂	Medio	25	
INDUSTRIAL				r ₂ (r ₃) ¹	Medio (alto) ¹	25 (50) ¹	
MILITAR				r ₂ (r ₃) ²	Medio (alto) ²	25 (50) ²	
PROTECCIÓN DE RELLENOS O DE MÁRGENES				r ₂ (r ₃) ³	Medio (alto) ³	25 (50) ³	
DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ⁴				r ₃	Alto	50	
PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DEVERTIDO				r ₂ (r ₃) ⁵	Medio (alto) ⁵	25 (50) ⁵	
PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES				r ₁ (r ₃) ⁶	Bajo (alto) ⁶	15 (50) ⁷	
REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS				r ₁	Bajo	15	

Figura 92: IRE, ISA y vida útil mínima en función del tipo de área abrigada.

Fuente: ROM 1.0-09.

Por tanto, como la función de la obra proyectada es proteger y defender la playa y se encuentra en un área del litoral, se tiene un IRE bajo con una vida útil mínima de 15 años y un ISA no significativa con una probabilidad conjunta de fallo de 0,20.

Siguiendo la Ecuación (29), se obtiene el periodo de retorno de la estructura:

$$0,20 = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{15} \rightarrow T_r = -\frac{15}{\ln(1 - 0,20)} = 67,22 \approx 68 \text{ años}$$

Una vez conocido el periodo de retorno, se introduce este dato en la Figura 89 que muestra la curva de altura de ola significativa respecto a un periodo de retorno de mil años. Por lo tanto, según el estudio de Thomas et al (2012) se deduce que la altura de ola significativa con periodo de retorno de 68 años es 7 metros.

Sin embargo, los datos de los que se dispone se encuentran en aguas profundas. Por tanto, para conocer las condiciones de oleaje existentes a pie de dique deberá realizarse la propagación del oleaje. Para ello, es necesario conocer el coeficiente de asomeramiento (Ks) y el coeficiente de refracción (Kr).

$$H_{s,p} = H_{s,o} \cdot k_r \cdot k_s \quad (30)$$

El siguiente ábaco desarrollado por el cuerpo de ingenieros militares de los EEUU (U.S Army Corps of Engineers) y recogido en el Shore Protección Manual, SPM (1984), permite la obtención del coeficiente Kr*Ks, conocida la dirección de incidencia del oleaje y el periodo de este.

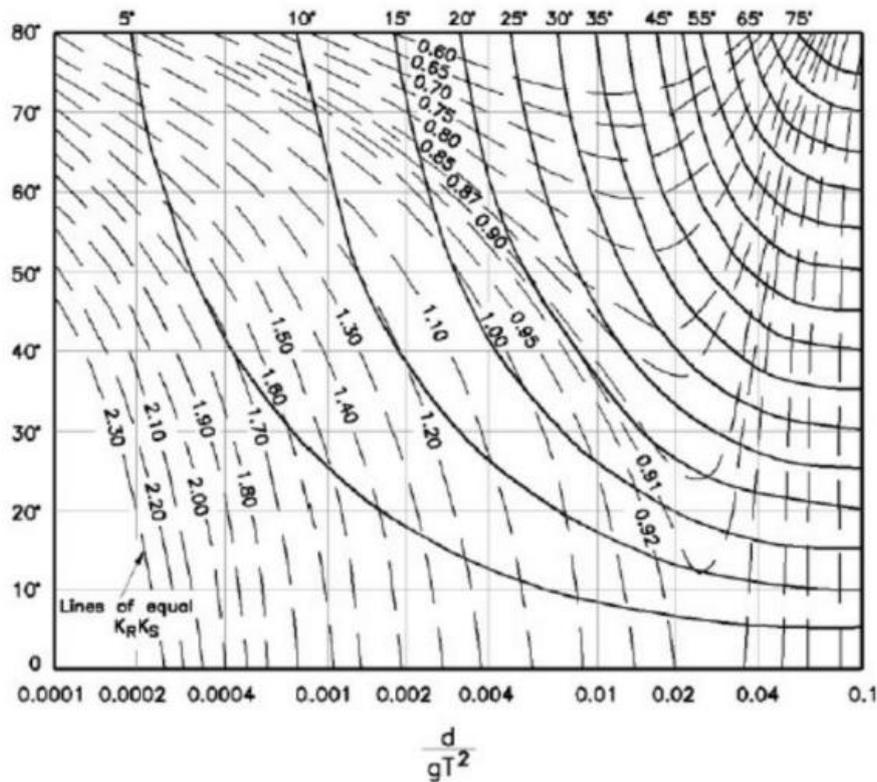


Figura 93: Ábaco para obtención de coeficientes de refracción y asomeramiento.

Fuente: SPM (1984)

Para poder utilizar este ábaco, se necesitan dos parámetros esenciales. Por un lado, el monomio $d/(g \cdot T^2)$, en el que d es la profundidad objetivo (pie de dique), g es la aceleración de la gravedad y T es el periodo del oleaje. Por otro lado, el ángulo de incidencia de los frentes de oleaje con respecto a la batimetría en aguas profundas, que depende de la dirección de procedencia del oleaje.

El periodo del oleaje es 8,5 segundos y se ha obtenido a través de los histogramas de Thomas (2012), ver Figura 85.

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{4}{9.81 \cdot 8.5^2} = 0.00564$$

La dirección del oleaje es de NE como se observa en la Figura 86, por lo que el ángulo de incidencia esta entre 70-80°.

Introduciendo estos valores en el ábaco anterior, se obtiene el valor del coeficiente $K_R \cdot K_S$ y el ángulo de la ola propagada a la profundidad indicada. La siguiente tabla muestra los coeficientes obtenidos para cada dirección y el ángulo de incidencia a la profundidad del dique.

Dirección	α_0 (°)	Hs,0	Kr-Ks	α (°)	Hs (d=4m)
NE	90	7	0.65	20	4.55

Figura 94: Resultados tras la propagación del oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, además de la altura de ola de cálculo, es necesario conocer la altura de oleaje con rotura por fondo (H_b), ya que supondría un límite al aumento que se produce en la altura del oleaje propagado debido al asomeramiento. En este caso, el valor considerado es:

$$H_b = 0,55 \cdot h \quad (31)$$

Donde la h es el calado existente a pie de dique en situación de pleamar, 3 metros y se añade 1 metro de más por la acción del oleaje.

La altura de ola de cálculo con la cual se llevará a cabo el diseño de la estructura es la menor entre la altura de ola propagada a pie de dique y la altura de ola en rotura, ya que olas mayores a la segunda romperán antes de llegar al emplazamiento del dique

Por tanto, la altura de ola de cálculo será: $H_b = 0,55 \cdot h = 0,55 \cdot 4 = 2,2$ metros.

5.3 Tamaño de Cubípodos

Es necesario obtener el tamaño de los Cubípodos que compondrá el dique homogéneo de baja cota. Para ello, se hará uso de la profundidad adimensional ($hs/\Delta \cdot D_n$), además conociendo los coeficientes de capa mencionado en el *Apartado 2.4. Coeficiente de capa*, se obtiene el diámetro nominal de las piezas a colocar introduciendo en la siguiente ecuación:

$$D_n = \frac{4}{(1,30 + 1,05 + 1,00)} = 1,2 \text{ metros}$$

Estos Cubípodos tendrán un peso de, siendo conocida la densidad del material, 2,21 g/cm³:

$$W = \gamma \cdot D_n^3 = 2,21 \cdot 1,2^3 = 3,82 \text{ t}$$

5.4 Definición de la sección

Una vez obtenido el tamaño necesario que deben tener los Cubípodos se puede definir la sección transversal de la HLCS. La sección será igual a la ensayada en el LPC-UPC y que es objeto de

análisis en este proyecto. Por tanto, tanto la malla de colocación como los coeficientes de capa serán los mismos.

Dicho esto, se puede obtener las principales dimensiones que definen la malla de colocación y la altura de coronación de cada una de las capas, así como el francobordo de la estructura. Por lo que respecta a la malla de colocación, sus dimensiones serán las siguientes:

$$\frac{a}{Dn} = 1,32 \rightarrow a = 1,60 \text{ metros}$$

$$\frac{b}{Dn} = 1,52 \rightarrow b = 1,83 \text{ metros}$$

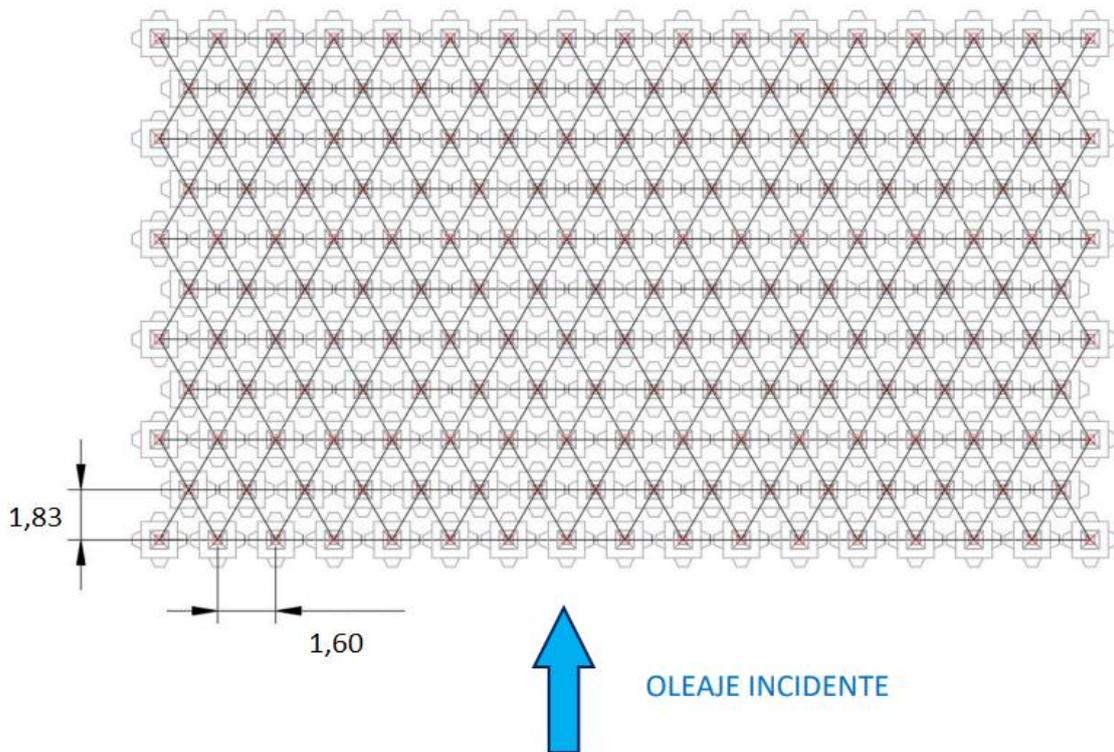


Figura 95: Malla de colocación de la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se definen los espesores de cada una de las capas y la cota de coronación de la estructura.

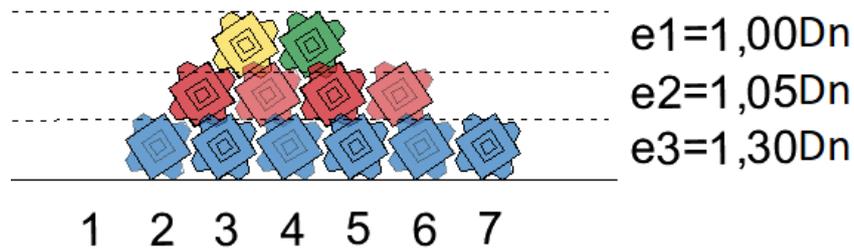


Figura 96: Espesor de las capas de la estructura diseñada.

Fuente: Elaboración propia.

5.5 Diseño en planta

Como se ha comentado anteriormente, la línea batimétrica sobre la que se apoyará la estructura será de -4 metros, con este dato y gracias a la información sobre la batimetría obtenida de Navionics, esta herramienta permite medir la distancia desde la costa hasta la zona de actuación, la cual es de aproximadamente 590 metros.

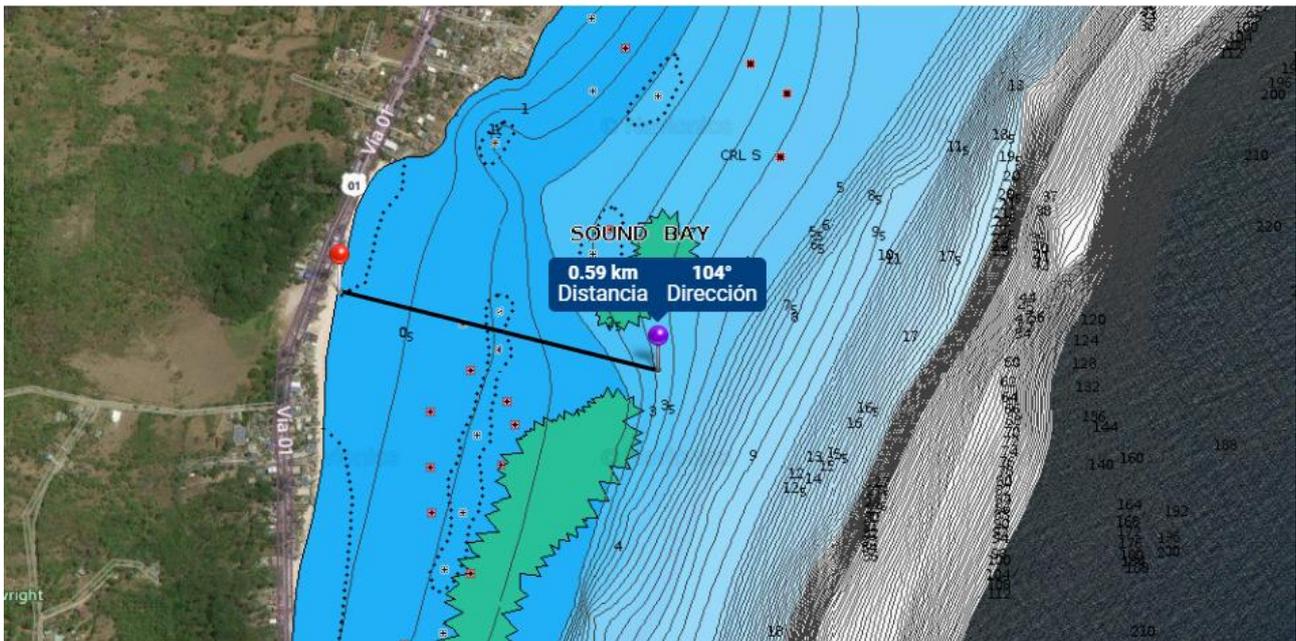


Figura 97: Distancia de la playa a la ubicación de la obra.

Fuente: Navionics, 2021

Como se observa en la imagen anterior, existen dos grupos de arrecifes separados a una distancia de 133 metros y se pretende construir el dique en el medio de los dos arrecifes para dar continuidad a estos y que los corales se implanten en la estructura y así evitar la erosión de la playa, ya que a través de las líneas batimétricas se observan que el oleaje llega a la costa y transporta los sedimentos a través de esa separación de corales.

En la siguiente imagen se puede apreciar la rotura del oleaje en la playa San Luis en el año 2018:



Figura 98: Rotura del oleaje en San Luis.
Fuente: Google Earth

Como la separación entre arrecifes es tan pequeña, no es necesario construir mas de dique, por lo que una buena solución sería la ejecución de un dique exento de 100 metros.

A continuación, se muestra la ubicación exacta que tendrá el dique rompeolas tras su ejecución en la playa San Luis. También se resumen en la Figura las dimensiones y distancias de la estructura, así como las calculadas anteriormente.



Figura 99: Vista en planta del dique diseñado.
Fuente: Elaboración propia

6 Procedimiento constructivo

En este apartado se describen las operaciones necesarias para llevar a cabo el proceso constructivo para la construcción de un dique diseñado con Cubípodos. Se definen también los equipos que serán necesarios en la fase de ejecución de la obra.

6.1 Fase de construcción

Una vez se ha definido el diseño de la estructura (descrito en los anteriores apartados) se comienza la fase de construcción.

La primera fase es el fabricando de las piezas que formaran la estructura. Para hacerlas se emplea un encofrado vertical específicamente diseñado para optimizar el rendimiento de producción. Se trata de un encofrado formado por una base y 6 articulaciones en la parte superior que permiten un llenado y vibrado homogéneo en todas las partes.

Después con un carril elevado de hormigonado, se permite a los camiones hormigoneras verter el hormigón en los moldes. Una vez se ha vibrado y fraguado el hormigón, se procede a desencofrar los Cubípodos gracias a unas pinzas que elevan el molde superior.



Figura 100: Encofrado del Cubípodo.

Fuente: Web del Cubípodo.

Este proceso de fabricación es muy sencillo y presenta un alto rendimiento (entre 1 a 3 puestas al día). Este tipo de encofrado permite trabajar con líneas de producción más compactas, optimizando espacio, con un menor número de moldes y sin la necesidad de realizar las grandes losas de nivelación necesarias para los encofrados de apertura lateral, lo que minimiza los costes y simplifica los procesos. El hormigonado se realiza con un carril elevado de hormigonado por el que pasan los

camiones hormigoneras vertiendo directamente el hormigón en los moldes colocados a ambos lados de este. Debido a que el Cubípodo es una pieza masiva, requiere una menor calidad del hormigón empleado en su fabricación.



Figura 101: Hormigonado de los Cubípodos en obra.

Fuente: Web del Cubípodo.

En cuanto a su almacenamiento, la forma del Cubípodo permite el acopio en distintas alturas, lo que reduce la necesidad de espacio. Para su almacenamiento es necesario comprobar la capacidad portante del terreno, depende de esta se pueden acopiar más o menos alturas. Una vez comprobada la capacidad portante, se nivela el terreno y se excava una serie de surcos o guías que acogerán la protuberancia inferior de la primera capa acopiada. Los niveles superiores se van colocando con un Cubípodo apoyado sobre otros dos con el tronco piramidal entre ellos.



Figura 102: Acopio de Cubípodos.

Fuente: Web del Cubípodo.

Ya acopiados se procede a transportarlos, para ello es importante conocer como manipularlos. Esta manipulación se realiza mediante pinzas de doble presión en el parque de fabricación. Mientras que para su puesta en obra se utilizan pinzas simples. Las pinzas son un sistema de manejo rápido y seguro, ya que no necesitan personal que realice operaciones manuales.

El transporte de los Cubípodos desde el parque de acopio al dique en construcción es muy sencillo, pudiéndose emplear camiones plataforma, barcazas, etc. Para un transporte seguro, se suelen

colocar sobre las propias bases de su encofrado o sobre estructuras simples (como por ejemplo de madera u hormigón) que hacen que la base del cubo central de Cubípedo se apoye perfectamente salvando su protuberancia inferior. Para este estudio, se opta el transporte marítimo mediante barcazas.

Por último, el Cubípedo se coloca de forma totalmente aleatoria, por lo que cada pieza no tiene que tener una orientación relativa con respecto a las piezas de su alrededor, hecho que simplifica en gran medida su colocación. Se utiliza un sistema de posicionamiento GPS en la pluma de grúa, indicando al operador de la misma en qué lugar debe colocar cada pieza según una malla de colocación diseñada previamente. Por lo general se obtienen unos rendimientos de colocación: 8-12 cubípedo/hora. No es necesario el empleo de buzos ni de mano de obra especializada.



Figura 103: Colocación de Cubípedo en obra.

Fuente: Web del Cubípedo.

6.2 Maquinaria y equipos

La maquinaria necesaria para llevar a cabo este proceso es la siguiente:

- Camión hormigonera para el vertido del hormigón en los moldes.
- Grúa y pinza de desencofrado para retirar el molde una vez esté fraguado el hormigón.
- Grúa con pinzas dobles de presión para la manipulación.
- Grúa con sistema de posicionamiento GPS sobre una pontona que se encargará de ubicar en su posición cada una de las piezas según la malla de colocación diseñada. Con rendimientos de 8-12 Cubípodos/h.
- Barcazas para el transporte de los Cubípodos a obra.

7 Programa de trabajos

Es necesario realizar una estimación del tiempo de ejecución para llevar a cabo una buena programación de la obra. Además del tiempo de ejecución, la programación debe tener en cuenta los recursos materiales y humanos necesarios, de manera que se consiga optimizar el coste y el plazo de ejecución.

La organización de las diferentes actividades se puede dividir en trabajos previos, fabricación y acopio de Cubípodos, construcción de diques, gestión de residuos y actividades relacionadas con la seguridad y salud.

En los apartados siguientes se definen los tiempos necesarios para cada una de las actividades mencionadas. Hay que tener en cuenta que se va a trabajar 5 días a la semana, unos 20 días de trabajo mensual de 8 horas diarias.

7.1 Trabajos previos

Entre los trabajos previos que hay que realizar previo a la obra, es la preparación del parque de fabricación y almacenamiento de Cubípodos, la instalación de casetas de obra, replanteo, preparación de equipos y maquinaria, vallado, señalización, zonas de acceso, etc.

Se estima una duración total de estas actividades de 2 semanas.

7.2 Fabricación y acopio de Cubípodos

La maquinaria necesaria para llevar a cabo la fabricación y el acopio de los Cubípodos será: sistema de encofrados, camión hormigonera y grúas con pinzas de presión dobles para la manipulación de las piezas.

Para conocer la duración de esta actividad, será necesario definir el número de Cubípodos a fabricar. La cantidad de Cubípodos quedan definidas por el número de filas de cada capa, como los Cubípodos se colocan entre dos Cubípodos de la fila anterior (ver *Figura 47: Proceso de colocación de los Cubípodos.*).

FILA	CAPA 1	CAPA 2	CAPA 3
6	192		
5	160		
4		128	
3		96	
2			64
1			32

Tabla 16: Número de Cubípodos según fila y capa.

En la tabla anterior se indican el número de Cubípodos que habrá en cada fila de cada capa, es decir, en la capa 1 habrá un total de 352 Cubípodos, en la capa 2 habrá un total de 224 Cubípodos y en la última capa habrá un total de 96 Cubípodos, por lo que el dique tendrá 672 Cubípodos.

Los Cubípodos se fabrican con un encofrado especial que presenta rendimientos de fabricación de 4 Cubípodos/día trabajando las 24 horas, ya que se debe esperar un mínimo de 6 horas para desencofrar. Se propone por tanto el uso de 5 encofrados, lo que supondría un plazo de fabricación de 34 días laborables. Considerando 20 días de trabajo al mes 24 horas/día a turnos de 8 horas, la fabricación de los Cubípodos llevaría un total de dos meses.

La fabricación y acopio de Cubípodos necesitan de un amplio espacio para llevarse a cabo. Por lo que, la opción más viable para realizar el acopio de los Cubípodos con seguridad será en el puerto de la Isla San Andrés (Colombia) (SAI PORT SOCIETY), ubicado a unos 7km de la zona de actuación.



Figura 104: Ubicación para acopio de Cubípodos.

Fuente: Elaboración propia

7.3 Construcción de los diques

Para la construcción de los diques se necesitará una grúa con sistema GPS para la colocación de las piezas, estas grúas alcanzan rendimientos de 12 Cubípodos/hora. Por tanto, el plazo necesario para colocar las 672 piezas será de 7 días.

Con el objetivo de minimizar los tiempos de ejecución de la obra, analizando los tiempos de encofrado, se debe comenzar la colocación de los Cubípodos antes de finalizar la fabricación de todas las piezas. Teniendo en cuenta que la fabricación de los 672 Cubípodos conllevaría 34 días laborables y la colocación de las piezas 7 días laborables se llega a la siguiente conclusión.

Con jornadas de 8 horas diarias la grúa será capaz de colocar 96 piezas diarias, mientras que, gracias a los 5 encofrados mencionados en el apartado anterior, se fabricarán 20 piezas cada día. Si fijamos como día 1 el día que se comienza a fabricar las piezas, la grúa podrá comenzar la colocación el día 28 de trabajo.

Durante los 27 primeros días de trabajo se irán almacenando las piezas, puesto que una vez comience a trabajar la grúa colocará más de las que se sigan fabricando. Se calcula que el plazo de fabricación más el plazo de colocación será de 34 días laborables.

La construcción se llevará a cabo mediante barcazas que recogerán los Cubípodos de la zona de acopio y los trasladarán hasta la zona de actuación, donde la grúa con sistema GPS, que estará apoyada sobre una plataforma tipo Jack-up colocará las piezas en su posición correspondiente.

7.4 Gestión de residuos, Seguridad y salud y Control Ambiental

Tanto la gestión de residuos, la seguridad y salud y el control del cumplimiento de la normativa ambiental son actividades esenciales en cualquier proyecto de construcción. Es fundamental llevarse a cabo durante todo el tiempo que duren las obras, desde la realización de los trabajos previos hasta la entrega de la obra.

7.5 Diagrama de Gantt

A continuación, se presenta el diagrama de Gantt en el que se muestra el programa de trabajos a realizar en el proyecto de construcción de los diques arrecife. Como puede observarse, la duración total es de 64 días.

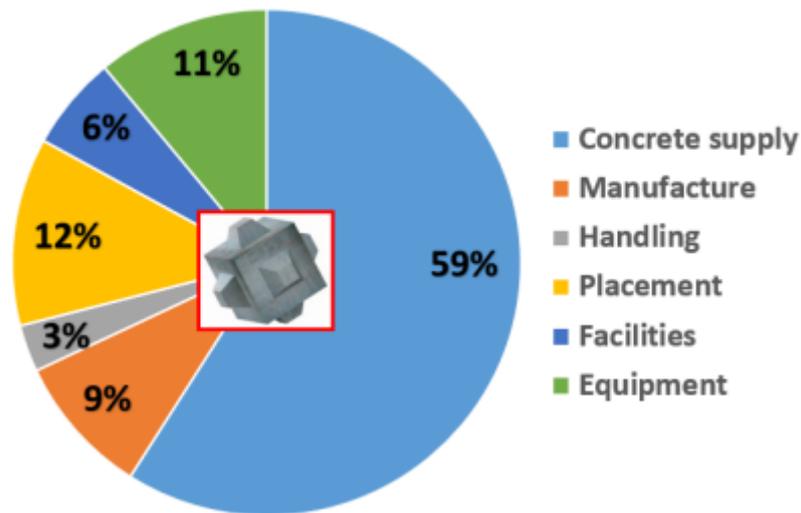


Figura 105: Clasificación de costes de construcción. Fuente: Cubipod Manual

Considerando los resultados de 153 casos analizados por Corredor et al. (2008), Molines (2009) y Medina et al. (2010) propusieron la siguiente ecuación para estimar el coste de construcción del manto de diques formados por Cubípodos.

$$C_c [\text{€}/\text{m}^3] = (265 + \text{HOR}) + 1 \left[10^5 \left(\frac{1}{\ln(V_c W_c)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(V_c W_c)} \right) \right] \quad (32)$$

Donde, HOR [€/m³] es el coste unitario del suministro de hormigón, W_c (t) es el peso de la unidad de Cubípodos y V_c (m³) es el volumen total de hormigón utilizado en la fabricación de las piezas.

Aplicando los datos obtenidos en el diseño de la estructura, se obtiene el coste que conlleva su construcción. Se considera un coste de suministro de hormigón en masa de 65 €/m³, el peso de cada Cubípodos es de 3,82 t y el volumen total de hormigón es:

$$672 \text{ Cubípodos} \cdot 1,59 \frac{\text{m}^3}{\text{Cub}} = 1.068,48 \text{ m}^3$$

$$\ln(1.068,48 \cdot 3,82) = 8,31$$

Por tanto, introduciendo estos datos en la ecuación 32 se obtiene:

$$C_c \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = (265 + 65) + 1 \left[10^5 \left(\frac{1}{8,31} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{8,31} \right) \right] = 574,73 \text{ €/m}^3$$

Con el objetivo de obtener precios unitarios para cada una de las unidades de obra, se va a obtener el coste relativo de estas en función del porcentaje sobre el coste total representado en la Figura 105:

- Suministro de hormigón $CH = 0,59 \cdot 574,73 = 339,1 \text{ €/m}^3$
- Encofrado $CE = 0,09 \cdot 574,73 = 51,73 \text{ €/m}^3$
- Manipulación $CM = 0,09 \cdot 574,73 = 51,73 \text{ €/m}^3$
- Transporte $CT = 0,11 \cdot 574,73 = 63,22 \text{ €/m}^3$
- Colocación $CCo = 0,12 \cdot 574,73 = 68,97 \text{ €/m}^3$

Por lo tanto, el hormigón HM-20/B/20/I+Qb fabricado en central y vertido desde camión tendría un coste total de 362.311,6€, el encofrado metálico con rendimientos de fabricación de 4Cubípodos/día tendrá un coste de 55.267,88€ y la maquinaria y equipamiento para la manipulación y acopio de piezas tendrá un coste de 55.267,88€.

El coste final de la actividad de fabricación y acopio de Cubípodos será de 472.847,4€.

7.6.3 Transporte y construcción de diques

Son las actividades relativas al transporte y colocación de Cubípodos en el lugar del emplazamiento final, incluyendo la manipulación desde el parque de almacenamiento hasta barcaza, transporte hasta emplazamiento y colocación por medios mecánicos dotados de sistema de posicionamiento GPS.

Por lo tanto, el coste del transporte de los Cubípodos por medios marítimos mediante barcaza sería de 67.549,63€ y el coste de colocación de las piezas, incluso transporte a obra y manipulación mediante barcaza y grúa dotada de sistema de posicionamiento GPS sería de 73.690,5€.

El coste final de esta actividad de transporte y construcción del dique es de 141.240,1€

7.6.4 Gestión de residuos

Son las actividades relacionadas con la gestión de residuos generados en la zona de fabricación y almacenamiento, así como los que puedan derivarse de la puesta en obra de las piezas.

Según Lozano (2021) la gestión de residuos de fabricación de piezas, incluso transporte con camión de residuos inertes a vertedero específico situado a 7 km de distancia es de 1.800€/Ud.

7.6.5 Seguridad y salud

Son las actividades relacionadas con la prevención de riesgos laborales y la seguridad y salud de los trabajadores.

Según Lozano (2021) el coste total de esta actividad sería de 11.000€, siendo 10.000€/Ud el conjunto de sistemas de protección colectiva y equipos de protección individual necesarios para cumplimiento de normativa, y 1.000€/Ud la medicina preventiva y primeros auxilios.

7.6.6 Control ambiental

Son las actividades que realizan el control del cumplimiento de las directivas en materia de protección del medio ambiente y la aplicación de medidas para mitigar los impactos cometidos.

Según Lozano (2021) el control del cumplimiento y seguimiento de las directivas en materia de impacto ambiental es de 10.000€.

7.6.7 Presupuesto de ejecución material

Capítulo	Importe
Trabajos previos	17.500
Fabricación de acopio de Cubípodos	472.847,4
Construcción del dique	141.240,1
Gestión de residuos	1.800
Seguridad y salud	11.000
Control ambiental	10.000
TOTAL	654.387,50€

El presupuesto de ejecución material a la cantidad de Seiscientos cincuenta y cuatro mil trescientos ochenta y siete euros con cincuenta céntimos.

REFERENCIAS

-
- Ahrens, John P. (1989). Stability of Reef Breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1989\)115:2\(221\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1989)115:2(221))
- Ahrens, J.P. (1987). *Characteristics of Reef Breakwaters*.
- Argente Garrido, G. (2019). *Estudio de Estabilidad Hidráulica de Diques en Talud Rebasables Protegidos con mantos de escollera, cubos y Cubípodos*. Tesis Doctoral. València: Universitat Politècnica de València <https://riunet.upv.es/handle/10251/134362>
- Allsop, W., & Powell, K. (1985). *Low-crest breakwaters, hydraulic performance and stability*.
- Bricio Garberi, L (2009). Comportamiento Funcional y Ambiental de los Diques Exentos de Baja Cota de Coronación y su Importancia en la Ingeniería de Costas. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid <http://oa.upm.es/2015/>
- Burcharth, H. F., Kramer, M., Lamberti, A., & Zanuttigh, B. (2006). *Structural stability of detached low crested breakwaters*. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.023>
- Burcharth, H. F., & Andersen, T. L. (2007, April). OVERTOPPING OF RUBBLE MOUND BREAKWATERS WITH FRONT RESERVOIR. *Coastal Engineering 2006*. https://doi.org/10.1142/9789812709554_0386
- Burke, L., Maidens, J. (2005). *Arrecifes en peligro en el Caribe*. World Resources Institute. WASHINGTON, DC
- CIRIA (2007). *The Rock Manual*. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). Londres.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Climatología Puertos del Caribe Colombiano. *Información general de San Andrés* [Climatología Puertos Caribe Colombiano \(cioh.org.co\)](http://climatologia.cioh.org.co)
- De Keyser, K. y Jacobs, E. (2020). *A literature review on low-crested and submerged structures*. Trabajo Final de Máster. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Ferrario, F., Beck, M.W., Storlazzi, C.D., Micheli, F., Shepard, C.C. Airoidi, L., 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*.
- Gómez-Martín, M.E. y Medina, J.R. (2014) "*Heterogeneous Packing and Hydraulic Stability of Cube and Cubipod Armor Units*", *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, ASCE, 140 (1), pp. 100-108.
- Gómez Martín, M. E. (2015). *Análisis de la evolución de averías en el manto principal de diques en talud formado por escolleras, cubos y Cubípodos*. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/59231>

Gómez-Martín, M. E., & Medina, J. R. (2007). Damage progression on cube armored breakwaters. In *Coastal Engineering 2006: (In 5 Volumes)* (pp. 5229–5240). World Scientific.

Iribarren, R., & Nogales, C. (1950). Generalización de la Fórmula para el Cálculo de los Diques de Escollera y Comprobación de sus Coeficientes. *Revista de Obras Públicas*, 239–277.

Invemar (2000). Áreas coralinas de Colombia.

Losada, M. A., Desire, J. M., & Alejo, L. M. (1986). *Stability of Blocks as Breakwater Armor Units*. *Journal of Structural Engineering*, 112(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1986\)112:11\(2392\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:11(2392))

Mares Nasarre, P. (2021). Overtopping flow on mound breakwaters under depth-limited breaking wave conditions. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/163154>

Mares-Nasarre, P., Molines, J., Gomez-Martín, M. E., & Medina, J. R. (2020). Individual wave overtopping volumes on mound breakwaters in breaking wave conditions and gentle sea bottoms. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103703>

Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E., Mares-Nasarre, P., Odériz, I., Mendoza, E., Silva, R. (2019). “*Diques exentos contruidos solo con elementos prefabricados de hormigón*”. Libro de las XV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Editorial Universitat Politècnica de València (en prensa)

Medina, J.R. y Vidal, C. (2014). “*Diseño y construcción de diques rompeolas*” en Ingeniería del agua.

Medina, J.R. y Gómez-Martín, M.E. (2016). *Manual del Cubípedo*, 2016. Editorial Universitat Politècnica de València.

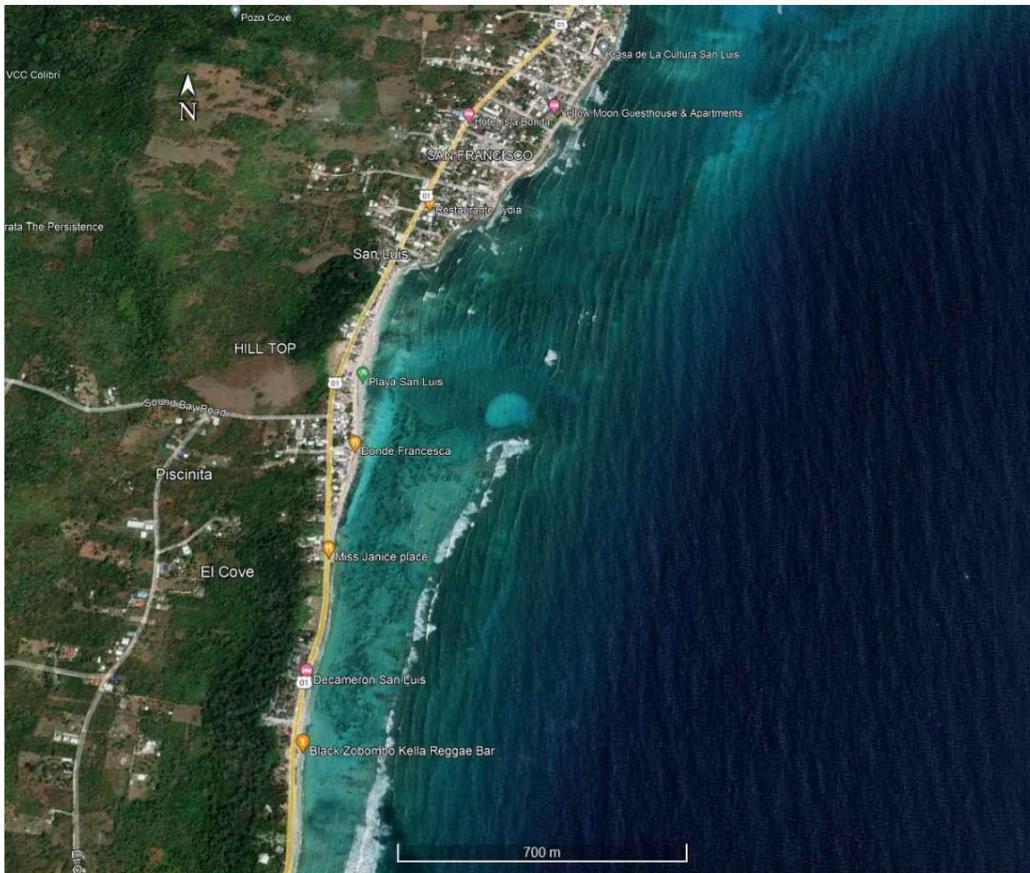
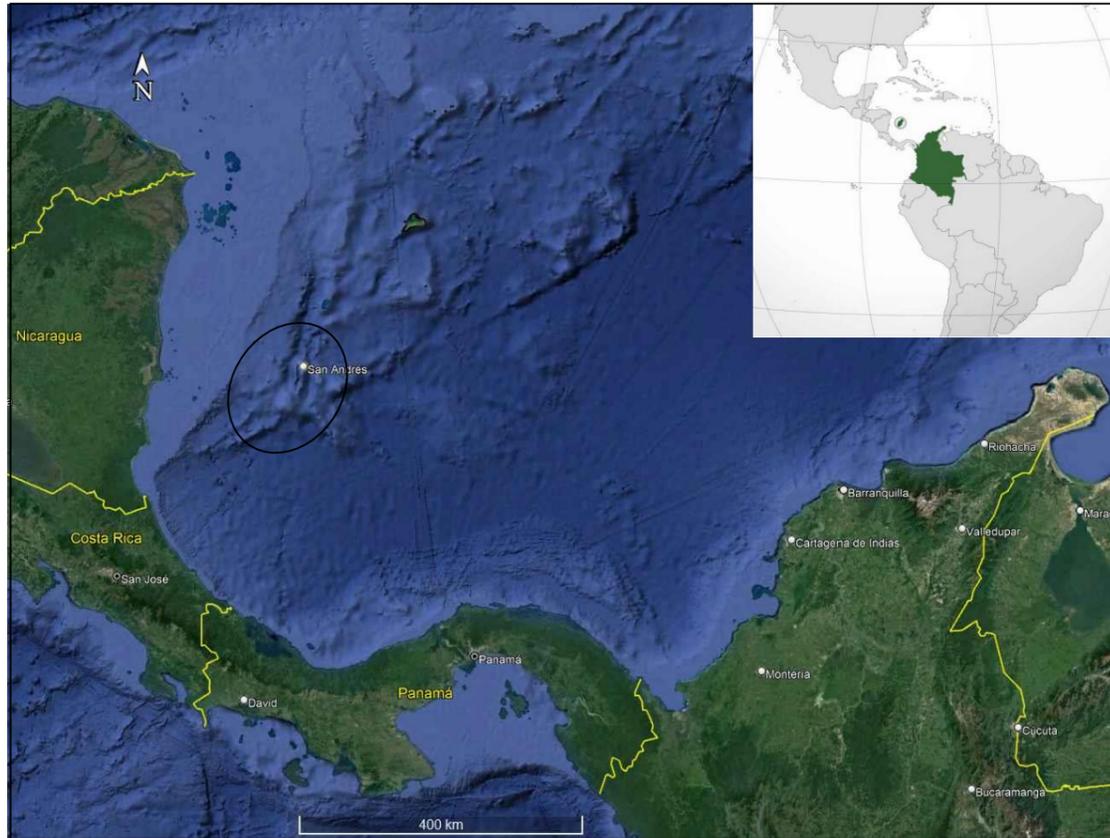
Medina, J., Gómez-Martín, M. E., Mares-Nasarre, P., Odériz, I., Mendoza, E., & Silva, R. (2019). Hydraulic performance of homogeneous low-crested structures. *Coastal Structures*, 60– 68.

Medina, J. R. (2001). Estimation of Incident and Reflected Waves Using Simulated Annealing. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 127(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2001\)127:4\(213\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2001)127:4(213))

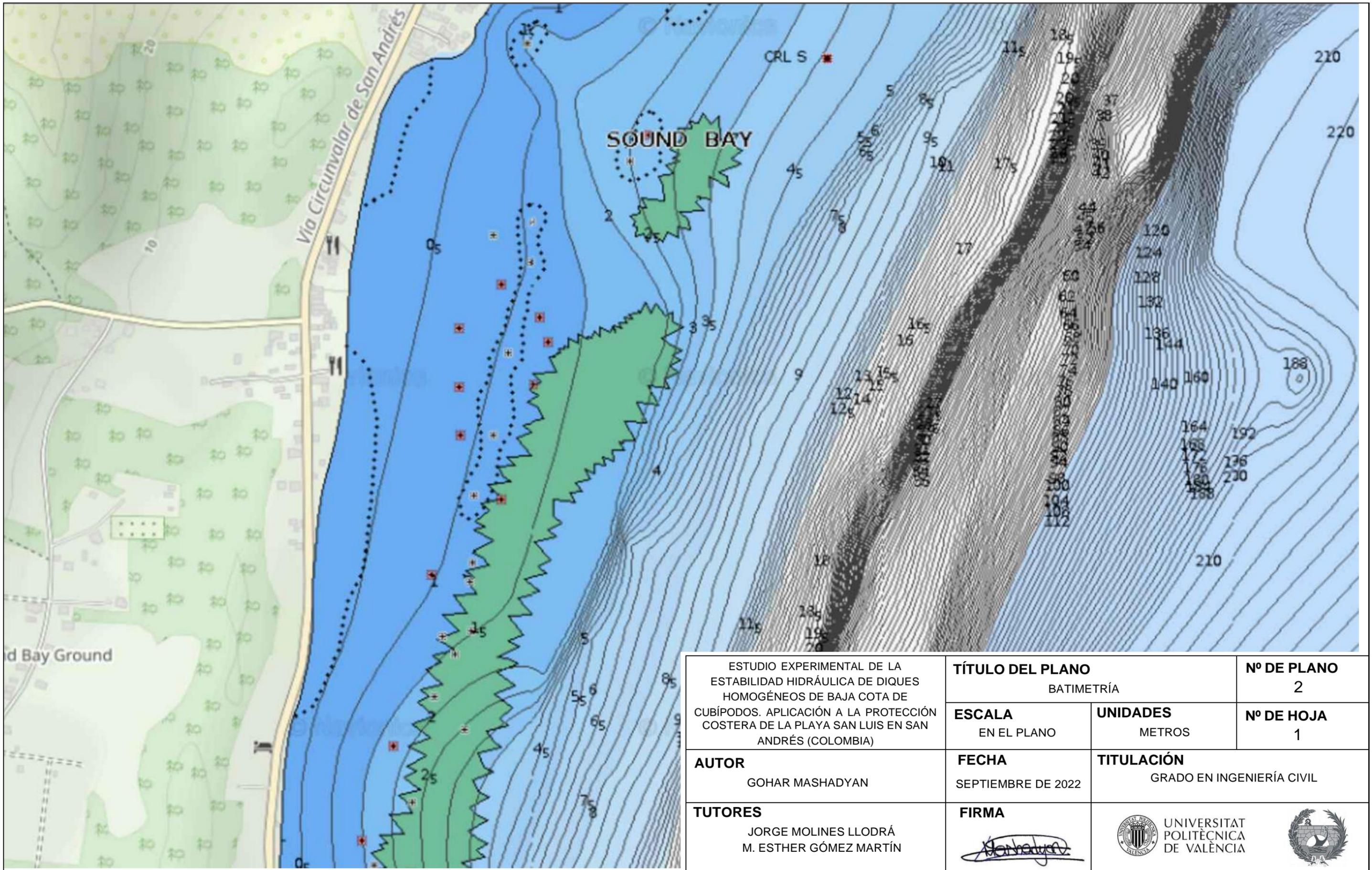
Medina, J. R., Gomez-Martin, M. E., Mares-Nasarre, P., Escudero, M., Oderiz, I., Mendoza, E., & Silva, R. (2020). HOMOGENEOUS LOW-CRESTED STRUCTURES FOR BEACH PROTECTION IN CORAL REEF AREAS. *Coastal Engineering Proceedings*, 36v. <https://doi.org/10.9753/icce.v36v.papers.59>

-
- Medina, J. R., & Vidal, C. (2014). Design and construction of mound breakwaters. *Ingeniería Del Agua*, 18(1). <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3074>
- Molines, J., Centi, R., di Risio, M., & Medina, J. R. (2021). Journal Pre-proof Estimation of layer coefficients of Cubipod homogeneous low-crested structures using physical and numerical model placement tests. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103901>
- Muñoz, Lopez, O., L. (2020). Arrecifes coralinos blindan y alimentan a San Andrés. Periódico UNAL <https://unperiodico.unal.edu.co/pages/detail/arrecifes-coralinos-blindan-y-alimentan-a-san-andres/>
- Odériz, I., Mendoza, E., Silva, R., & Medina, J. (2018). *Stability and hydraulic performance of a homogeneous cubipod low-crested mound breakwater*.
- ROM 1.0-09. (2009). ROM 1.0-09 Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo. (Parte 1a: Bases y factores para el proyecto. Agentes climáticos). Puertos del Estado. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- Posada, P., O., B. y Henao, P., W. (2007). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe Colombiano. Invemar
- Rinkevich, B., 2014. Rebuilding coral reefs: does active reef restoration lead to sustainable reefs? *Current Opinion in Environmental Sustainability*.
- Silva, R., Mendoza, E., Mariño-Tapia, I., Martínez, M. L., & Escalante, E. (2016). An artificial reef improves coastal protection and provides a base for coral recovery. *Journal of Coastal Research*, 75(sp1). <https://doi.org/10.2112/SI75-094.1>
- Thomas, Y.T., A. Nicolae-Lerma y B. Posada, 2012. *Atlas climatológico del mar Caribe colombiano. Convenio Especial de Cooperación Colciencias - Gobernación del Magdalena - INVEMAR*.
- Van der Meer, J.W., & Daemen, I. F. R. (1994). *Stability and wave transmission at low-crested rubble-mound structures*. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 120(1), 1–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1994\)120:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1994)120:1(1))
- Vidal, C., Losada, M. A., & Medina, R. (1991). *Stability of Mound Breakwater's Head and Trunk*. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 117(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1991\)117:6\(570\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1991)117:6(570))

PLANOS



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ESTABILIDAD HIDRÁULICA DE DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA SAN LUIS EN SAN ANDRÉS (COLOMBIA)	TÍTULO DEL PLANO LOCALIZACIÓN		Nº DE PLANO 1
	ESCALA EN EL PLANO	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR GOHAR MASHADYAN	FECHA SEPTIEMBRE DE 2022	TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	
TUTORES JORGE MOLINES LLODRÁ M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN	FIRMA 	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA 	



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ESTABILIDAD HIDRÁULICA DE DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA SAN LUIS EN SAN ANDRÉS (COLOMBIA)

TÍTULO DEL PLANO
BATIMETRÍA

Nº DE PLANO
2

ESCALA
EN EL PLANO

UNIDADES
METROS

Nº DE HOJA
1

AUTOR
GOHAR MASHADYAN

FECHA
SEPTIEMBRE DE 2022

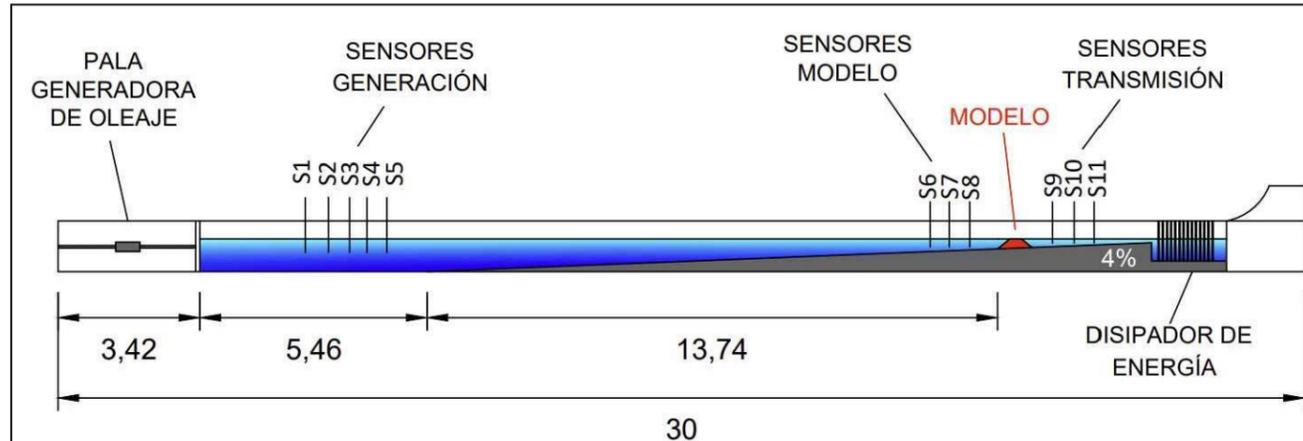
TITULACIÓN
GRADO EN INGENIERÍA CIVIL

TUTORES
JORGE MOLINES LLODRÁ
M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN

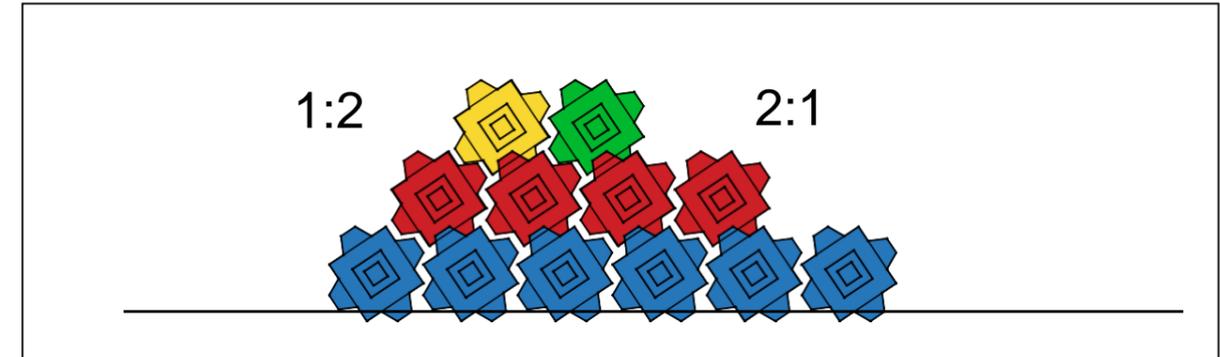
FIRMA



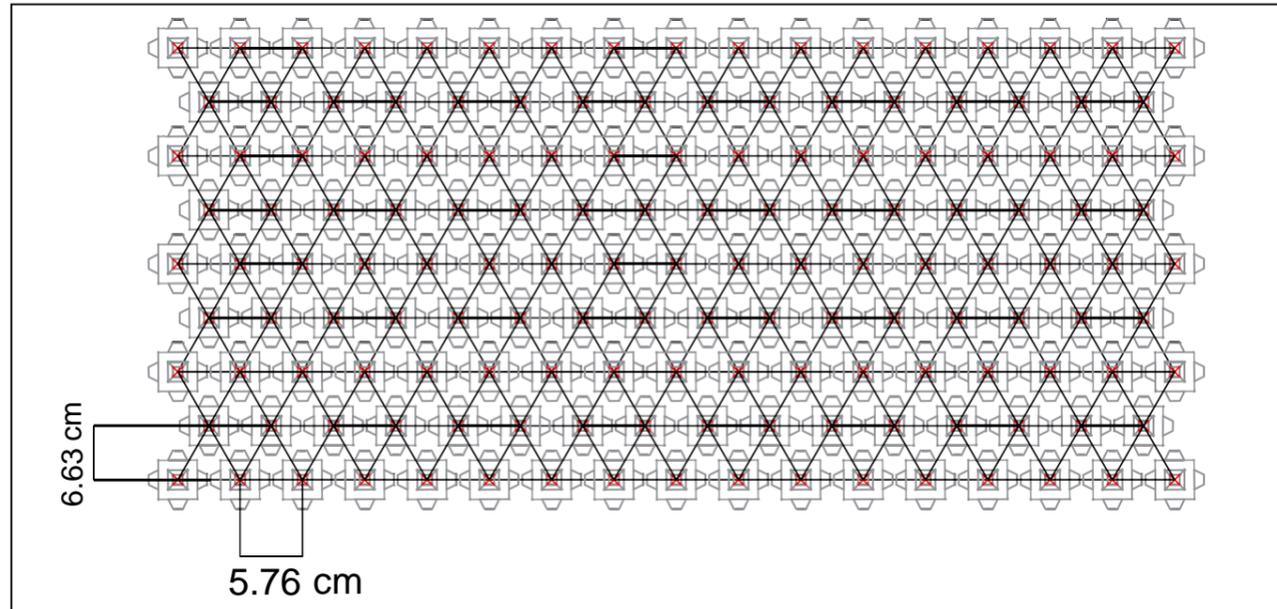
Sección en alzado del canal de oleaje



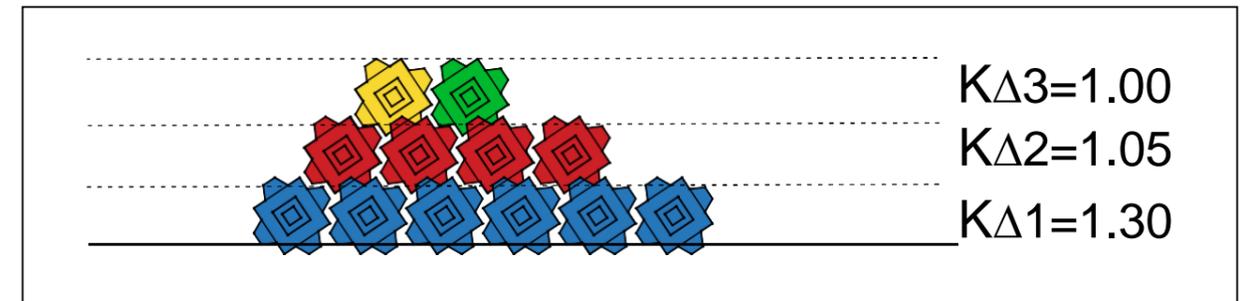
Sección transversal del modelo ensayado



Malla de colocación



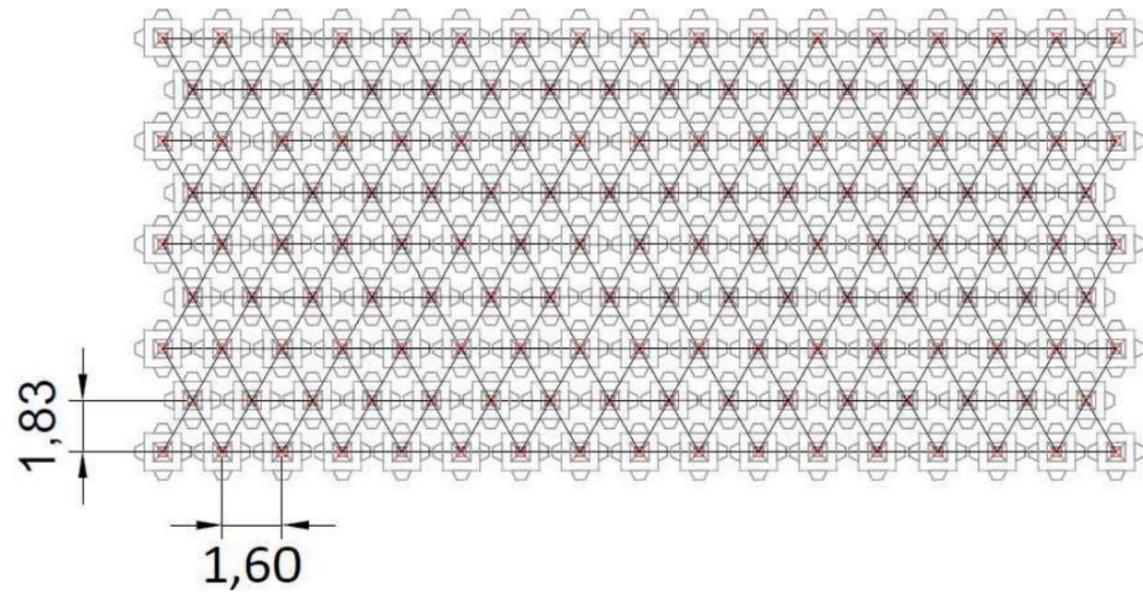
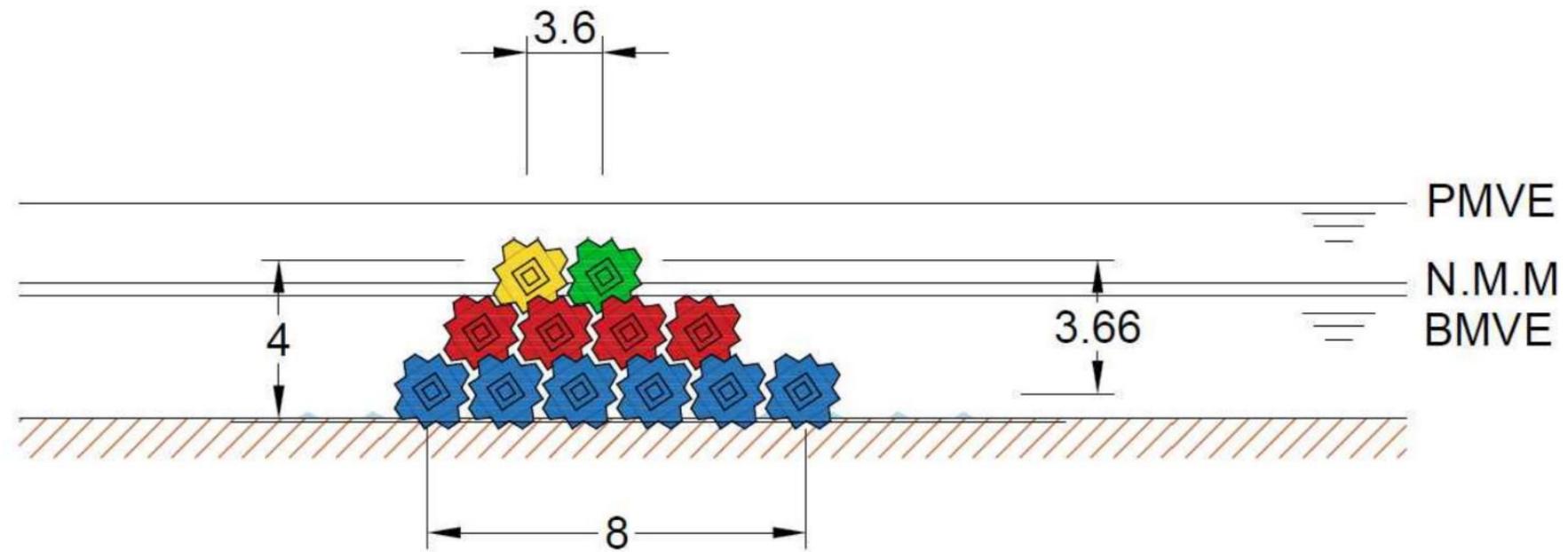
Coeficientes de capa



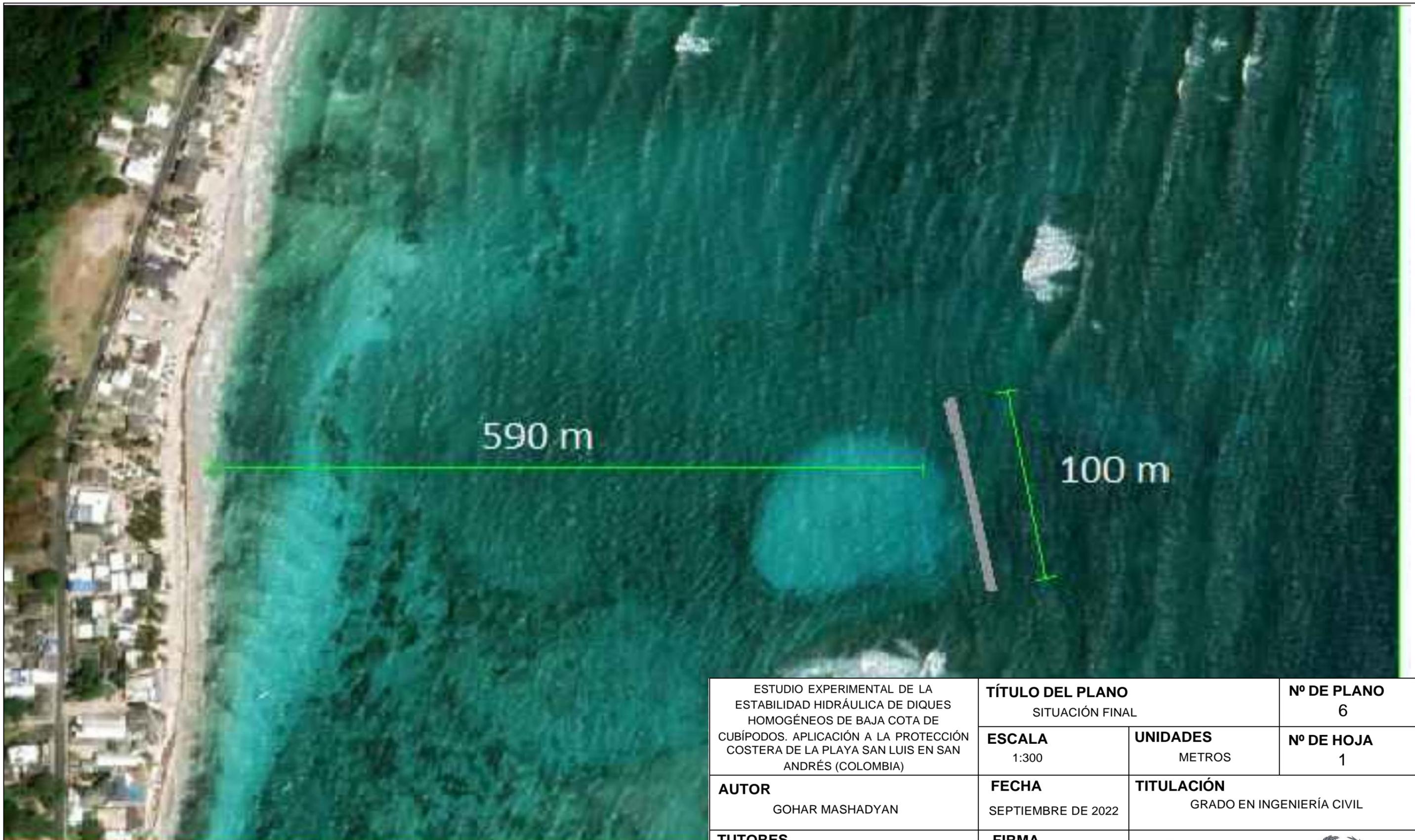
ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ESTABILIDAD HIDRÁULICA DE DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA SAN LUIS EN SAN ANDRÉS (COLOMBIA)	TÍTULO DEL PLANO METODOLOGÍA EXPERIMENTAL		Nº DE PLANO 3
	ESCALA VARIAS	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR GOHAR MASHADYAN	FECHA SEPTIEMBRE 2022	TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	
TUTORES JORGE MOLINES LLODRÁ M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN	FIRMA 	UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	

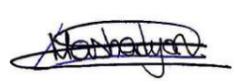


ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ESTABILIDAD HIDRÁULICA DE DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA SAN LUIS EN SAN ANDRÉS (COLOMBIA)	TÍTULO DEL PLANO LUGAR DE CONSTRUCCIÓN		Nº DE PLANO 4
	ESCALA EN EL PLANO	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR GOHAR MASHADYAN	FECHA SEPTIEMBRE DE 2022	TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	
TUTORES JORGE MOLINES LLODRÁ M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN	FIRMA 	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ESTABILIDAD HIDRÁULICA DE DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA SAN LUIS EN SAN ANDRÉS (COLOMBIA)	TÍTULO DEL PLANO SECCIÓN CONSTRUCTIVA		Nº DE PLANO 5
	ESCALA VARIOS	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR GOHAR MASHADYAN	FECHA SEPTIEMBRE DE 2022	TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	
TUTORES JORGE MOLINES LLODRÁ M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN	FIRMA 	UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ESTABILIDAD HIDRÁULICA DE DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA SAN LUIS EN SAN ANDRÉS (COLOMBIA)	TÍTULO DEL PLANO SITUACIÓN FINAL		Nº DE PLANO 6
	ESCALA 1:300	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR GOHAR MASHADYAN	FECHA SEPTIEMBRE DE 2022	TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	
TUTORES JORGE MOLINES LLODRÁ M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN	FIRMA 	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	