



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Estudio de transmisión de oleaje para el diseño de
diques arrecife homogéneos de Cubípodos. Aplicación
a la protección del litoral del Parque Nacional
Corcovado (Costa Rica)

Presentado por

Lozano Tovar, Sergio

Para la obtención del

Master Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos


Curso: 2020/2021

Fecha: 13/07/2021

Tutor: M. Esther Gómez Martín

Patricia Mares Nasarre

Jorge Molines Llodrà



RESUMEN

Las estructuras de baja cota (LCS) se utilizan habitualmente como diques exentos para la protección y estabilización de playas. En los últimos años, los procesos erosivos se están intensificando en el litoral de todo el mundo debido al cambio climático y el correspondiente aumento del nivel del mar. Además, el incremento de temperatura, la acidificación de los océanos y otros fenómenos debidos a la acción humana suponen una seria amenaza para los arrecifes de coral del planeta. Su degradación progresiva es un claro indicador de la mala calidad de los ecosistemas marinos y la amenaza para la biodiversidad.

Los diques homogéneos de baja cota (HLCS) son una tipología estructural marítima que presenta múltiples ventajas en cuanto a protección del litoral, disipando parte de la energía del oleaje incidente, y favoreciendo la conservación y regeneración de ecosistemas marinos como los arrecifes de coral.

El proyecto DELOS permitió desarrollar métodos de diseño de LCS. Sin embargo, estos no son válidos para las estructuras homogéneas. Por esto, el proyecto HOLOBREAK, en desarrollo en el LPC-UPV, se centra en el estudio de las HLCS formadas por Cubípodos, analizando su desempeño en cuanto a transmisión y reflexión de oleaje, con el fin de obtener criterios de diseño. En este contexto se ha llevado a cabo el presente Trabajo Final de Máster. Se han realizado ensayos físicos 2D en HLCS de cinco capas formados por Cubípodos dispuestos según mallas de colocación triangulares. Posteriormente, se han analizado los resultados obtenidos para estudiar la transmisión de oleaje que se produce en este tipo de estructuras.

El francobordo relativo (R_c/H_{m0}) y el peralte (s_{0p}) son dos de las variables más recomendadas en la literatura científica para el cálculo del coeficiente de transmisión de los diques de baja cota. En el presente proyecto, se han utilizado redes neuronales para el estudio de la influencia de estas variables en la transmisión observada en las HLCS de Cubípodos ensayadas. Como resultado, se ha obtenido una expresión empírica para la estimación del coeficiente de transmisión en este tipo de estructuras.

Para el análisis de los ensayos de oleaje es indispensable un correcto registro del nivel del agua. Este registro se realiza mediante sensores capacitivos (DHI). Sin embargo, se trata de una técnica intrusiva, muy aceptada, pero que presenta una serie de limitaciones. Por esta razón, se lleva tiempo buscando una nueva técnica, no intrusiva, que permita obtener el registro continuo del oleaje. En este proyecto, se ha desarrollado un programa informático de tratamiento de imágenes que, basándose en la aplicación de algoritmos de detección de contornos y umbralización, permite el aislamiento de la superficie de las olas fotograma a fotograma, obteniendo así un registro continuo del nivel de agua, que presenta un desempeño similar al de los sensores de nivel.

Finalmente, se ha estudiado la aplicación de esta tipología estructural para la protección de la playa Rincón de San Josecito en el Parque Nacional Corcovado (Costa Rica). Tras el diseño los diques, se ha observado que su construcción permitiría mitigar los efectos relativos al aumento del nivel del mar en los próximos 40 años, debido a su capacidad de disipación de la energía del oleaje incidente.

ABSTRACT

Low Crested Structures (LCS) are commonly used as detached breakwaters for beach protection and stabilisation. In recent years, erosion processes are intensifying along the world's coastline due to climate change and the corresponding rise in sea level. In addition, rising temperatures, ocean acidification and other human-induced phenomena pose a serious threat to the world's coral reefs. Their progressive degradation is a clear indicator of the poor quality of marine ecosystems and the threat to biodiversity.

Homogeneous Low Crested Structures (HLCS) are a maritime structural typology that offers multiple advantages in terms of coastal protection, dissipating part of the energy of incident waves, and favouring the conservation and regeneration of marine ecosystems such as coral reefs.

The DELOS project allowed the development of LCS design methods. However, these are not valid for homogeneous structures. For this reason, the HOLOBREAK project, under development at the LPC-UPV, focuses on the study of HLCS formed by Cubipods, analysing their performance in terms of wave transmission and reflection, in order to obtain design criteria. On this context, this Master's Thesis has been carried out. 2D physical tests have been carried out on five-layer HLCS formed by Cubipods arranged according to triangular placement meshes. Subsequently, the results obtained have been analysed to study the wave transmission that occurs in this type of structures.

Relative freeboard (R_c/H_{m0}) and steepness (s_{0p}) are two of the most recommended variables in the scientific literature for the calculation of the transmission coefficient of LCS. In this project, neural networks have been used to study the influence of these variables on the transmission observed in the Cubipod HLCS tested. As a result, an empirical expression has been obtained for the estimation of the transmission coefficient in this type of structure.

For the analysis of wave tests, a correct recording of the water level is indispensable. This is done by means of capacitive sensors (DHI). However, this is an intrusive technique, which is widely accepted, but has a number of limitations. For this reason, a new, non-intrusive technique has been sought for some time to obtain a continuous wave recording. In this project, an image processing software has been developed which, based on the application of contour detection and thresholding algorithms, allows the isolation of the wave surface frame by frame, thus obtaining a continuous record of the water level, which has a performance similar to that of level sensors.

Finally, the application of this structural typology has been studied for the protection of the Rincón de San Josecito beach in the Corcovado National Park (Costa Rica). After designing the breakwaters, it was observed that their construction would mitigate the effects of sea level rise over the next 40 years, due to their capacity to dissipate the energy of the incident waves.

RESUM

Les estructures de baixa cota (LCS) s'utilitzen habitualment com a dics exempts per a la protecció i estabilització de platges. En els últims anys, els processos erosius s'estan intensificant en el litoral de tot el món a causa del canvi climàtic i el corresponent augment del nivell de la mar. A més, l'increment de temperatura, l'acidificació dels oceans i altres fenòmens deguts a l'acció humana suposen una seriosa amenaça per als esculls de coral del planeta. La seua degradació progressiva és un clar indicador de la mala qualitat dels ecosistemes marins i l'amenaça per a la biodiversitat.

Els dics homogenis de baixa cota (HLCS) són una tipologia estructural marítima que presenta múltiples avantatges quant a protecció del litoral, dissipant part de l'energia de l'onatge incident, i afavorint la conservació i regeneració d'ecosistemes marins com els esculls de coral.

El projecte DELOS va permetre desenvolupar mètodes de disseny de LCS. No obstant això, aquests no són vàlids per a les estructures homogènies. Per això, el projecte HOLOBREAK, en desenvolupament en el LPC-UPV, se centra en l'estudi de les HLCS formades per Cubípodos, analitzant el seu acompliment quant a transmissió i reflexió d'onatge, amb la finalitat d'obtenir criteris de disseny. En aquest context s'ha dut a terme el present Treball Final de Màster. S'han realitzat assajos físics 2D en HLCS de cinc capes formats per Cubípodos disposats segons malles de col·locació triangulars. Posteriorment, s'han analitzat els resultats obtinguts per a estudiar la transmissió d'onatge que es produeix en aquesta mena d'estructures.

El francbord relatiu (R_c/H_{m0}) i el peralt (s_{0p}) són dos de les variables més recomanades en la literatura científica per al càlcul del coeficient de transmissió dels dics de baixa cota. En el present projecte, s'han utilitzat xarxes neuronals per a l'estudi de la influència d'aquestes variables en la transmissió observada en les HLCS de Cubípodos assajades. Com a resultat, s'ha obtingut una expressió empírica per a l'estimació del coeficient de transmissió en aquesta mena d'estructures.

Per a l'anàlisi dels assajos d'onatge és indispensable un correcte registre del nivell de l'aigua. Aquest registre es realitza mitjançant sensors capacitius (DHI). No obstant això, es tracta d'una tècnica intrusiva, molt acceptada, però que presenta una sèrie de limitacions. Per aquesta raó, s'emporta temps buscant una nova tècnica, no intrusiva, que permeta obtenir el registre continu de l'onatge. En aquest projecte, s'ha desenvolupat un programa informàtic de tractament d'imatges que, basant-se en l'aplicació d'algorismes de detecció de contorns i umbralització, permet l'aïllament de la superfície de les ones fotograma a fotograma, obtenint així un registre continu del nivell d'aigua, que presenta un acompliment similar al dels sensors de nivell.

Finalment, s'ha estudiat l'aplicació d'aquesta tipologia estructural per a la protecció de la platja Rincón de San Josecito al Parc Nacional Corcovado (Costa Rica). Després del disseny dels dics, s'ha observat que la seua construcció permetria mitigar els efectes relatius a l'augment del nivell de la mar en els pròxims 40 anys, a causa de la seua capacitat de dissipació de l'energia de l'onatge incident.

ÍNDICE

1. Objeto del proyecto	19
1.1. Motivación	19
1.2. Objetivos	20
2. Antecedentes	23
2.1. Introducción	23
2.2. Conceptos previos	23
2.2.1. El oleaje: Definición, características y estadísticos	23
2.2.1.1. Estadísticos del oleaje	23
2.2.1.2. Propagación del oleaje	25
2.2.1.3. Rotura del oleaje	25
2.2.2. Diques exentos	26
2.2.2.1. Funcionalidad	27
2.2.2.2. Tipología en función de la cota de coronación	28
2.2.2.3. Tipología en función de su composición estructural	28
2.2.3. El Cubípedo	31
2.2.3.1. Ventajas	32
2.2.3.2. Proceso constructivo	32
2.3. Estructuras de baja cota de coronación (LCS)	34
2.3.1. Definición, funcionalidad y objetivos	34
2.3.2. Estabilidad	35
2.3.3. Transmisión del oleaje	38
2.3.3.1. Parámetros fundamentales	38
2.3.3.2. Estado del arte	38
2.4. HLCS de Cubípodos	42
2.4.1. Introducción	42
2.4.2. Revisión histórica	42
2.4.3. Funcionalidad	43
2.4.4. Ventajas e inconvenientes	44

2.4.5. Mallas de colocación	45
2.4.6. Transmisión de oleaje	48
3. Metodología experimental.....	50
3.1. Descripción de instalaciones y equipos.....	51
3.1.1. Descripción del canal de oleaje	51
3.1.1. Sistema generador de oleaje.....	51
3.1.2. Sistema disipador de energía	52
3.2. Instrumentación	53
3.2.1. Sensores de nivel.....	53
3.2.2. Material audiovisual.....	55
3.3. Modelo físico	56
3.3.1. Material	58
3.3.2. Malla de colocación.....	58
3.4. Técnica experimental y proceso constructivo del modelo	61
3.5. Test Matrix	65
3.6. Análisis de datos experimentales.....	70
3.6.1. Medición de la bondad del ajuste	70
3.6.2. Análisis de oleaje.....	71
3.6.2.1. LASA-V	72
3.6.2.2. LPCLab	72
3.6.2.3. SwanOne	73
3.6.3. Criterios de avería	76
3.6.4. Análisis de la transmisión	79
4. Desarrollo de programa de tratamiento de imágenes.....	81
4.1. Motivación	81
4.2. Software e instrumentación.....	82
4.2.1. MATLAB.....	82
4.2.2. Cámaras de red o IP	82

4.3. División de vídeo en imágenes	85
4.4. Corrección de distorsión de imágenes	85
4.4.1. Distorsión de imagen	86
4.4.1.1. Distorsión radial	86
4.4.1.2. Distorsión tangencial.....	87
4.4.1.3. Ojo de pez	87
4.4.2. Calibración de la cámara	87
4.4.3. Aplicación Matlab.....	88
4.5. Detección de superficie libre.....	92
4.5.1. Detección de contornos	92
4.5.2. Umbralización	95
4.5.3. Técnica utilizada	95
4.6. Medición del nivel de agua	99
4.6.1. Conversión Píxel-Cm.....	100
4.6.2. Medición en sensores virtuales.....	101
4.6.3. Registro de oleaje obtenido	102
4.7. Validación del modelo.....	104
4.7.1. Superficie libre	104
4.7.2. Análisis de oleaje registrado	108
4.8. Perspectivas de mejora	111
5. Análisis de transmisión de oleaje de diques homogéneos de baja cota de coronación.....	113
5.1. Introducción	113
5.2. Resumen transmisión oleaje	113
5.3. Evaluación de las fórmulas existentes para estimar la transmisión de oleaje.....	115
5.4. Nueva fórmula para la estimación de K_t en estructuras homogéneas de baja cota.....	117
5.4.1. Influencia de $R_c/H_{m0,i}$ y S_{0p} en el coeficiente de transmisión K_t	117
5.4.2. Análisis de la transmisión mediante redes neuronales.....	119
5.4.2.1. Red neuronal para estimación de K_t	120



5.4.3. Nueva expresión empírica para estimación de K_t	124
6. Conclusiones.....	128
7. Aplicación práctica al Parque Nacional de Corcovado	132
7.1. Introducción	132
7.2. El Parque Nacional Corcovado	133
7.2.1. Playa Rincón de San Josecito.....	133
7.2.2. Accesos.....	135
7.3. Contexto	135
7.4. Subsistema físico y natural.....	136
7.4.1. Climatología.....	137
7.4.2. Batimetría.....	137
7.4.3. Geomorfología	138
7.4.3.1. Clasificación de la costa.....	139
7.4.4. Hidrología	141
7.4.5. Cambio Climático	142
7.4.6. Clima marítimo.....	143
7.4.6.1. Oleaje	143
7.4.7. Mareas.....	151
7.5. Subsistema socioeconómico	154
7.5.1. Demografía.....	154
7.5.2. Actividades económicas	154
7.6. Dinámica litoral	156
7.7. Diseño de la estructura	157
7.7.1. Criterios básicos de diseño.....	157
7.7.2. Altura de ola de cálculo.....	159
7.7.3. Tamaño de los Cubípodos	163
7.7.4. Definición de la sección.....	164
7.7.5. Diseño en planta	166

7.8. Estudio de transmisión.....	167
7.8.1. Cota de inundación	169
7.9. Procedimiento constructivo	172
7.9.1. Fases de construcción	172
7.9.2. Maquinaria y equipos.....	175
7.9.3. Espacios	176
7.10. Programa de trabajos.....	177
7.10.1. Condicionantes.....	177
7.10.1.1. Calendario	177
7.10.1.2. Licencias y permisos	178
7.10.1.3. Equipo, maquinaria y materiales	178
7.10.1.4. Clima marítimo	178
7.10.1.5. Impacto ambiental	179
7.10.2. Actividades	179
7.10.2.1. Trabajos previos	179
7.10.2.2. Fabricación y acopio de Cubípodos.....	179
7.10.2.3. Construcción.....	179
7.10.2.4. Gestión de residuos, Seguridad y Salud y Control Ambiental.....	180
7.10.3. Plan de obra	180
7.11. Valoración económica.....	182
7.11.1. Capítulos.....	182
7.11.2. Precios unitarios.....	183
7.11.3. Valoración económica	185
7.11.4. Presupuesto de ejecución material.....	187
7.11.5. Presupuesto de licitación	187
8. Referencias.....	188
Anexo 1. Código del programa.....	196
Anexo 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible	205
Planos	209

Índice de figuras

Figura 1.1. Sección típica de estructura de baja cota (LCS). Fuente: CIRIA (2007).	20
Figura 2.1. Parámetros característicos del oleaje. Fuente: Singlequiver.com.	24
Figura 2.2. Tipos de rotura del oleaje. Fuente: Mares Nasarre (2021)	26
Figura 2.3. Diques exentos. Fuente: Google.	27
Figura 2.4. Piezas especiales de hormigón. Fuente: Dupray y Roberts (2010).	29
Figura 2.5. Dique multicapa convencional.	30
Figura 2.6. Dique homogéneo de escollera. Fuente: Steve Simon (2012).	30
Figura 2.7. El Cubípedo. Fuente: Medina y Gómez-Martín (2016)	31
Figura 2.8. Contradique de Langosteira II. Fuente: Web del Cubípedo.	32
Figura 2.9. Acopio de Cubípodos. Fuente: Web del Cubípedo.	33
Figura 2.10. Transporte de Cubípedo en camión. Fuente: Medina y Gómez-Martín (2016).....	34
Figura 2.11. Sección transversal de dique exento de baja cota de coronación. Fuente: CIRIA (2007).	35
Figura 2.12. Modos de fallo de un dique en talud. Fuente: CIRIA (2007).	36
Figura 2.13. Dique arrecife descrito por Ahrens (1987).....	36
Figura 2.14. Ejemplo de LCS estáticamente estable. Fuente: Allsop & Powell (1985).....	37
Figura 2.15. Esquema de dique rebasable. Fuente: Givler y Sorensen (1986).	38
Figura 2.16. Parámetros que gobiernan la transmisión del oleaje. Fuente: van der Meer et al. (2005)	38
Figura 2.17. Sección de HLCS de Cubípodos de 3 capas. Fuente: Medina et al. (2019).....	42
Figura 2.18. HLCS con distintas mallas de colocación: a) Mayor Rc b) Menor Rc. Fuente: Medina et al. (2020)	45
Figura 2.19. Malla de colocación triangular orientada al oleaje incidente. Fuente: Odériz et al. (2018)	46
Figura 2.20. Coeficientes de capa de una HLCS de Cubípodos de 5 capas con malla de colocación de $a/D_n=1,58$ y $b/D_n=1,27$. Fuente: Medina et al. (2020)	47
Figura 3.1. Vista general del canal de oleaje del LPC-UPV. Fuente: Elaboración propia	50
Figura 3.2. Sección longitudinal del canal de oleaje 2D. Fuente: Elaboración propia.	51

Figura 3.3. Pala generadora de oleaje del LPC-UPV. Fuente: Elaboración propia	52
Figura 3.4. Sistema disipador de energía. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 3.5. Sensor de nivel. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 3.6. Sensores de nivel en la zona de generación (izquierda) y frente al modelo (derecha). Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 3.7. Dispositivo audiovisual. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 3.8. Sección transversal del modelo construido. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 3.9. Modelo físico ensayado.....	57
Figura 3.10. Dimensiones principales de los Cubípodos. Fuente: Medina y Gómez-Martín (2016).	58
Figura 3.11. Malla de colocación del modelo ensayado. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 3.12. Coeficientes de capa (K_{Δ}) del modelo ensayado. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 3.13. Proceso constructivo: malla de colocación. Fuente: LPC-UPV.....	61
Figura 3.14. Proceso constructivo: (a,b) Construcción de la 1ª capa (c) Construcción de la 3ª capa. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 3.15. Proceso constructivo: (a) Construcción de la 3ª capa (b) Medición de altura de capa (c) Modelo construido. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 3.16. Nomenclatura de ensayos. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 3.17. Software LASA-V (Figueres y Medina, 2005).....	72
Figura 3.18. Aplicación LPCLab. Fuente: LPC-UPV.....	73
Figura 3.19. Software SwanOne de la TU Delft.	74
Figura 3.20. Comparación entre la H_{m0} medida en vacío y la calculada mediante SwanOne en la zona de modelo. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 3.21. Comparación entre el T_p medida en vacío y el calculado mediante SwanOne en la zona de modelo. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 3.22. Inicio de Avería. Fuente: LPC-UPV.....	77
Figura 3.23. Inicio de Destrucción. Fuente: LPC-UPV.....	77
Figura 3.24. Destrucción de la estructura. Fuente: LPC-UPV	78
Figura 3.25. Obtención de $N_s(IA)$ y $N_s(IDE)$. Fuente: Elaboración propia.	79
Figura 4.1. Cámara Axis P1375. Fuente: Elaboración propia.	83

Figura 4.2. Aplicación Synology Surveillance Station. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 4.3. Sección del canal de oleaje en planta. Fuente: Elaboración propia.....	84
Figura 4.4. Situación de la cámara CAMAXIS10	85
Figura 4.5. Tipos de distorsión radial. Fuente: MathWorks.....	86
Figura 4.6. Esquema de calibración de imagen. Fuente: MathWorks.	88
Figura 4.7. Detección de los puntos en el tablero de ajedrez. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura 4.8. Errores de reproyección de imágenes corregidas. Fuente: Elaboración propia.	90
Figura 4.9. Gráfico de parámetros extrínsecos de cámara AXIS P1375. Fuente: Elaboración propia.	90
Figura 4.10. a) Imagen original y b) Imagen corregida. Fuente: Elaboración propia.	91
Figura 4.11. Fotograma extraído para pruebas de detección de contorno. Fuente: Elaboración propia.	92
Figura 4.12. Esquema de detección de bordes. Fuente: http://alojamientos.us.es/gtocom/pid/tema4.pdf	93
Figura 4.13. Comparación de métodos de detección de contornos: Canny (1), Prewitt (2), Roberts (3) y Sobel (4). Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 4.14. Detección de la superficie libre de agua mediante el algoritmo de Prewitt. Fuente: Elaboración propia.	95
Figura 4.15. Resultado de resta entre imágenes. Fuente: Elaboración propia.....	96
Figura 4.16. Imagen $I_t - I_0$ en escala de grises. Fuente: Elaboración propia.....	97
Figura 4.17. Imagen $I_t - I_0$ binarizada. Fuente: Elaboración propia.	97
Figura 4.18. Imagen $I_t - I_0$ tras aplicar el filtro rectangular. Fuente: Elaboración propia.	98
Figura 4.19. Imagen con la ola del instante "t" aislada. Fuente: Elaboración propia.	98
Figura 4.20. Superposición de la ola aislada en su fotograma correspondiente. Fuente: Elaboración propia.	99
Figura 4.21. Interfaz gráfica para calibración espacial. Fuente: Elaboración propia.	100
Figura 4.22. Comprobación de la calibración. Fuente: Elaboración propia.	101
Figura 4.23. Medición de nivel de agua en imagen. Fuente: Elaboración propia.	102
Figura 4.24. Registro obtenido mediante cámaras del ensayo regular HL05_2210. Fuente: Elaboración propia.	102

Figura 4.25. Detalle de la Figura 4.24. Fuente: Elaboración propia.	103
Figura 4.26. Registro obtenido mediante cámaras del ensayo irregular HL15_3310. fuente: Elaboración propia.	103
Figura 4.27. Detalle de la Figura 4.26.....	104
Figura 4.28. Comparación de registro mediante sensor y cámara de oleaje regular. Fuente: Elaboración propia.	105
Figura 4.29. Detalle de la Figura 4.28.....	105
Figura 4.30. Comparación de registro mediante sensor y cámara de oleaje irregular. Fuente: Elaboración propia.	106
Figura 4.31. Detalle de la Figura 4.30.....	106
Figura 4.32. Comparación de H_{m0} medida en cámaras y medida en sensor. Fuente: Elaboración propia.	109
Figura 4.33. Comparación de T_p medida en cámaras y medida en sensor. Fuente: Elaboración propia.	109
Figura 4.34. Comparación de $H_{1/10}$ medida en cámaras y medida en sensor. Fuente: Elaboración propia.	110
Figura 4.35. Comparación de $H_{m0,r}$ medida en cámaras y medida en sensor. Fuente: Elaboración propia.	110
Figura 5.1. Comparación del K_t medido y estimado con los métodos de la literatura. Fuente: Elaboración propia.	116
Figura 5.2. Relación entre K_t y $R_c/H_{m0,i}$. Fuente: Elaboración propia.	118
Figura 5.3. Relación entre K_t y s_{op} . Fuente: Elaboración propia.	118
Figura 5.4. Estructura típica de una red neuronal. Fuente: MathWorks.	119
Figura 5.5. Estructura de la red neuronal utilizada. Fuente: Elaboración propia.	121
Figura 5.6. Regresión del modelo neuronal. Fuente: Elaboración propia.	122
Figura 5.7. Influencia de $R_c/H_{m0,i}$ en K_t con s_{op} constante. Fuente: Elaboración propia.	123
Figura 5.8. Influencia de s_{op} en K_t con $R_c/H_{m0,i}$ constante. Fuente: Elaboración propia.	123
Figura 5.9. Representación gráfica de la función $\tanh(-x)$. Fuente: Elaboración propia.....	124
Figura 5.10. Comparación entre el K_t medido y estimado usando la Ec. 5.3. Fuente: Elaboración propia.	125
Figura 6.1. Sección transversal del modelo físico ensayado. Fuente: Elaboración propia.	128

Figura 6.2. Comparación de H_{m0} medida en cámaras y medida en sensor. Fuente: Elaboración propia.	129
Figura 6.3. Comparación de los registros de altura de ola obtenidos mediante los sensores y mediante las cámaras. Fuente: Elaboración propia.	129
Figura 6.4. Comparación entre el K_t medido y estimado usando la Ec. 5.3. Fuente: Elaboración propia.	130
Figura 7.1. Ubicación del Parque Nacional Corcovado en Costa Rica. Fuente: San Lorenzo (1997).	133
Figura 7.2. Localización de la Playa Rincón de San Josecito en el mapa de la península de Osa. Fuente: ACOSA.	134
Figura 7.3. Ubicación de la Playa Rincón de San Josecito. Fuente: Elaboración propia en Google Earth.	134
Figura 7.4. Situación de la zona de estudio. Fuente: Google Maps.	136
Figura 7.5. Batimetría de playa San Josecito. Fuente: Navionics.	138
Figura 7.6. Playa Rincón de San Josecito. Fuente: Paz, D (2012).	139
Figura 7.7. Tipos de perfil de playa. Fuente: UPV (2021).	140
Figura 7.8. Perfil de Playa Rincón de San Josecito. Fuente: Elaboración propia.	140
Figura 7.9. Imagen aérea de la zona de actuación. Fuente: Google Earth.	141
Figura 7.10. Promedios mensuales de altura de ola (m) frente al Humedal Nacional Térraba-Sierpe entre 1997 y 2008. Fuente: Lizano (2016)	142
Figura 7.11. Previsión de aumento del nivel medio del mar (NMM) en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Slangen et al. (2014).	143
Figura 7.12. Histograma de alturas de ola. Fuente: Elaboración propia.	144
Figura 7.13. Rosa anual de oleaje. Fuente: Elaboración propia.	145
Figura 7.14. Rosas estacionales de oleaje. Fuente: Elaboración propia.	146
Figura 7.15. Función de densidad de log-normal de la variable H_s . Fuente: Elaboración propia.	147
Figura 7.16 Función de distribución log-normal de la variable H_s . Fuente: Elaboración propia.	147
Figura 7.17. Régimen extremal de oleaje total. Fuente: Elaboración propia.	149
Figura 7.18. Régimen extremal de oleaje direccional (SSW). Fuente: Elaboración propia.	150

Figura 7.19. Regimen extremal de oleaje direccional (SW). Fuente: Elaboración propia.....	150
Figura 7.20. Relación Tp-Hs. Fuente: Elaboración propia.	151
Figura 7.21. Variación del nivel del mar respecto al promedio en la estación mareográfica de Santa Cruz en las Islas Galápagos. Fuente: Lizano (1997)	152
Figura 7.22. Pirámide de población por edades en el cantón de Osa. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INCE.	154
Figura 7.23. Transporte sólido litoral. Fuente: Sardà, R. (2009).	156
Figura 7.24. Parámetros de diseño de la malla de colocación y la sección transversal. Fuente: Elaboración propia.	157
Figura 7.25. Ábaco para obtención de coeficientes de refracción y asomeramiento. Fuente: SPM (1984)	162
Figura 7.26. Malla de colocación de la estructura diseñada. Fuente: Elaboración propia.	164
Figura 7.27. Malla de colocación de la estructura. Fuente: Elaboración propia.....	165
Figura 7.28. Espesor de las capas de la estructura diseñada. Fuente: Elaboración propia.	165
Figura 7.29. Sección transversal de la estructura diseñada. Fuente: Elaboración propia.	166
Figura 7.30. Distancia de la playa a la ubicación de la obra. Fuente: Navionics, 2021.	166
Figura 7.31. Vista en planta de los diques diseñados. Fuente: Elaboración propia.....	167
Figura 7.32. Esquema del cálculo de la cota de inundación. Fuente: Elaboración propia.....	169
Figura 7.33. Área de inundación de la Playa Rincón de San Josecito: Situación previa. Fuente: Elaboración propia.	170
Figura 7.34. Área de inundación de la Playa Rincón de San Josecito: Situación posterior. Fuente: Elaboración propia.	171
Figura 7.35. Área de inundación de la Playa Rincón de San Josecito: Comparación. Fuente: Elaboración propia.	172
Figura 7.36. Encofrado del Cubípedo. Fuente: Web del Cubípedo.....	172
Figura 7.37. Hormigonado de los Cubípodos en obra. Fuente: Web del Cubípedo.	173
Figura 7.38. Acopio de Cubípodos. Fuente: Web del Cubípedo.	173
Figura 7.39. Parque de fabricación y acopio de Cubípodos. Fuente: Web del Cubípedo.....	174
Figura 7.40. Colocación de Cubípedo en obra. Fuente: Web del Cubípedo.	175
Figura 7.41. Fotografía aérea de Puerto Caldera, Costa Rica. Fuente: Google Earth.	176



Figura 7.42. Plano de situación de Puerto Caldera y la Playa Rincón de San Josecito. Fuente: Elaboración propia. 177

Figura 7.43. Clasificación de costes de construcción. Fuente: Cubipod Manual. 183

Índice de tablas

Tabla 2.1. Clasificación del tipo de rotura en función del número I_r . Fuente: Elaboración propia.	26
Tabla 2.2. Características geométricas de las mallas de colocación de HLCS de Cubípodos. Fuente: Odériz et al. (2018).	46
Tabla 3.1. Características de la sección de modelo. Fuente: Elaboración propia.	57
Tabla 3.2. Características promedio de los Cubípodos utilizados. Fuente: Elaboración propia .	58
Tabla 3.3. Cálculo de la porosidad ($p\%$) de la malla. Fuente: Elaboración propia,	60
Tabla 3.4. Coeficientes de capa (K_Δ) del modelo ensayado. Fuente: Elaboración propia.....	60
Tabla 3.5. Test Matrix. Fuente: LPC-UPV.....	66
Tabla 3.6. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=20\text{cm}$ y $s_{op}=0,01$	67
Tabla 3.7. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=20\text{cm}$ y $s_{op}=0,02$	67
Tabla 3.8. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=20\text{cm}$ y $s_{op}=0,04$	68
Tabla 3.9. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=23\text{cm}$ y $s_{op}=0,01$	68
Tabla 3.10. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=23\text{cm}$ y $s_{op}=0,02$	68
Tabla 3.11. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=23\text{cm}$ y $s_{op}=0,04$	69
Tabla 3.12. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=15\text{cm}$ y $s_{op}=0,01$	69
Tabla 3.13. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=15\text{cm}$ y $s_{op}=0,03$	69
Tabla 3.14. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=10\text{cm}$ y $s_{op}=0,01$	69
Tabla 3.15. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=10\text{cm}$ y $s_{op}=0,03$	69
Tabla 3.16. Nomenclatura de ensayos. Fuente: Elaboración propia.	70
Tabla 4.1. Valores de la relación C_m/Pixel . Fuente: Elaboración propia.	101
Tabla 4.2. Análisis de ensayos regulares para validación del método. Fuente: Elaboración propia.	107
Tabla 4.3. Análisis de la tanda de ensayos irregulares $h_s=20\text{cm}_{s_{op}=0,01}$ para validación del método. Fuente: Elaboración propia.	107
Tabla 4.4. Análisis de la tanda de ensayos irregulares $h_s=23\text{cm}_{s_{op}=0,04}$ para validación del método. Fuente: Elaboración propia.	107

Tabla 4.5. Análisis de la tanda de ensayos irregulares $h_s=23\text{cm}$, $s_{op}=0,01$ para validación del método. Fuente: Elaboración propia.	108
Tabla 5.1. Relación de variables utilizadas en la definición de K_t por los distintos autores. Fuente: Elaboración propia.	114
Tabla 5.2. Rangos de aplicación de las fórmulas para estimar K_t . Fuente: Elaboración propia.	115
Tabla 7.1. Periodo pico (T_p) - Altura de ola (H_s). Fuente: Elaboración propia.....	144
Tabla 7.2. Altura de ola (H_s) - Dirección de procedencia del oleaje. Fuente: Elaboración Propia.	145
Tabla 7.3. Condiciones de respuesta de la costa ante la construcción de diques exentos. Fuente: Elaboración propia.	158
Tabla 7.4. IRE, ISA y vida útil mínima en función del tipo de área abrigada. Fuente: ROM 1.0-09.	160
Tabla 7.5. Ángulo de incidencia del oleaje. Fuente: Elaboración propia.	162
Tabla 7.6. Resultados tras la propagación del oleaje. Fuente: Elaboración propia.	163
Tabla 7.7. Altura de ola de cálculo. Fuente: Elaboración propia.	163
Tabla 7.8. Regimen medio correspondiente a la estación seca. Fuente: Elaboración propia. .	180
Tabla 0.1. Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)....	205



CAPÍTULO 1. OBJETO DEL ESTUDIO

1. Objeto del proyecto

1.1. Motivación

Las estructuras de baja cota (“Low-Crested Structures” LCS) se utilizan habitualmente como diques exentos en la defensa de playas frente a la erosión. El proyecto europeo DELOS (2003-2005) permitió desarrollar métodos de diseño de diques en talud con baja cota de coronación para proteger las costas frente a los procesos erosivos que se están intensificando en el mundo debido al cambio climático y el correspondiente aumento del nivel del mar.

Por otro lado, el aumento de la temperatura, la acidificación de los océanos debido al incremento de CO₂ en la atmósfera y otras actividades humanas (contaminantes, pesca descontrolada, accidentes, etc.) suponen serias amenazas para los arrecifes de coral del mundo. Su degradación progresiva en las últimas décadas (Mumby et al., 2007) es un claro indicador de la mala calidad de los ecosistemas marinos y de la amenaza que representa para la biodiversidad marina. Los arrecifes de coral son ecosistemas de enorme valor medioambiental en el planeta; además, son barreras físicas naturales que permiten la protección de playas de enorme valor económico y social en muchos países, actuando como LCS naturales (Ferrario et al., 2014).

Considerando este deterioro de los ecosistemas marinos, la conservación de los arrecifes de coral requiere de medidas activas de restauración (ver Rinkevich, 2005); entre ellas podemos señalar: los diques arrecife (heterogéneos) y las estructuras homogéneas de escollera o elementos de hormigón que favorecen la colonización coralina (Odériz et al., 2018). En este contexto, los diques homogéneos de baja cota (“Homogeneous Low-Crested Structures”, HLCS) formados por piezas prefabricadas de hormigón son una tipología de dique en talud de baja cota que presenta múltiples ventajas como infraestructura verde con distintos usos. Si se utilizan como diques exentos, pueden proteger la costa y las playas del mismo modo que las LCS convencionales pero con ventajas adicionales como una alta porosidad e iluminación, lo que favorece la colonización de especies marinas y permite regenerar los arrecifes de coral (Silva et al., 2016).

Los elementos que forman estas estructuras las hacen estáticamente estables, a diferencia de los diques arrecife heterogéneos (Ahrens, 1989); es decir, los elementos que lo forman no se desplazan significativamente durante temporales. Otras ventajas son el fácil desmantelamiento y reutilización de sus elementos y la consideración de infraestructura verde, ya que protege y estabiliza las playas de arena y favorece la biodiversidad marina, pudiendo convertirse en un punto de atracción turístico.

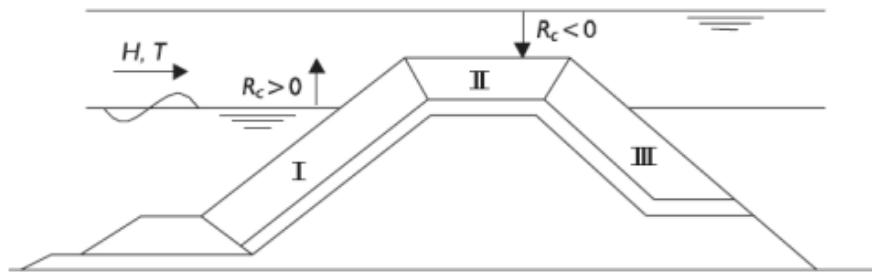


Figura 1.1. Sección típica de estructura de baja cota (LCS). Fuente: CIRIA (2007).

El diseño de estas estructuras vendrá definido por su cota de coronación o su francobordo (R_c), que dependerá de una solución de compromiso entre la transmisión de oleaje y su impacto visual en condiciones de servicio normales. Puesto que su funcionalidad se basa en permitir cierta transmisión del oleaje, el estudio del oleaje transmitido, reflejado y disipado en condiciones de rotura de oleaje por fondo es un factor fundamental de su diseño.

A lo largo de los años, se han llevado a cabo múltiples estudios sobre LCS convencionales (Figura 1.1) actuando como diques exentos para la protección de la costa. Por ejemplo, el proyecto DELOS permitió obtener unas guías generales de diseño en este tipo de estructuras, tanto emergidas como sumergidas (Burcharth et al., 2006; Burcharth et al., 2007). Vidal et al. (1991) y CIRIA (2007) proponen distintas expresiones para el diseño de sus elementos principales, mientras que van der Meer et al. (2005) recogen una serie de expresiones para estimar los coeficientes de transmisión y reflexión.

Sin embargo, las expresiones existentes para el diseño y el estudio de la estabilidad hidráulica en LCS no son válidas para las HLCS, por lo que es necesario su estudio e investigación para conocer y modelizar su desempeño. El proyecto HOLOBREAK (2019-2022) en desarrollo en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València (LPC-UPV) se centra en el estudio de estructuras homogéneas de baja cota formadas por Cubípodos (Medina y Gómez-Martín, 2016) y escollera, analizando la estabilidad hidráulica, la transmisión y la influencia de las mallas de colocación utilizadas en la construcción de este tipo de estructuras (Odériz et al., 2018; Medina et al., 2019; Medina et al., 2020; Molines et al., 2021).

La estabilidad hidráulica depende del tamaño de las piezas, la altura de la estructura, la pendiente de fondo, la longitud de ola y el francobordo, entre otros. Mientras que la transmisión de oleaje depende principalmente del francobordo ligado a la malla de colocación y el fondo marino (generalmente duro en las zonas de coral degradadas).

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Final de Máster es caracterizar la transmisión del oleaje de los diques homogéneos de baja cota de coronación (o diques arrecife) de Cubípodos. Se prestará especial atención al oleaje limitado por fondo (Herrera et al., 2016) que suele afectar a este tipo de estructuras, buscando la manera de obtener formulaciones específicas para estimar adecuadamente el coeficiente de transmisión correspondientes a oleajes extremos. Además, se



obtendrá información y se estudiará el desempeño de este tipo de estructuras con oleajes menores, de forma que se pueda caracterizar el nivel de daño de las estructuras.

Por otro lado, se planteará una nueva metodología para la obtención del registro de oleaje en el canal de ensayos, basada en el tratamiento de imágenes de vídeo. Esta nueva técnica servirá de alternativa a los métodos convencionales intrusivos (sensores capacitivos DHI) y consistirá en el desarrollo de un programa informático en MATLAB.

Finalmente, el estudio las HLCS de Cubípodos se pondrá en práctica en la protección de una playa en el Parque Nacional Corcovado, Costa Rica.



CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2. Antecedentes

2.1. Introducción

En este capítulo se pretende exponer la literatura o estado del arte referente al diseño de los diques arrecife, o diques exentos, poniendo el foco sobre las estructuras homogéneas de baja cota de coronación formadas por Cubípodos para su posterior aplicación práctica en el Parque Nacional Corcovado de Costa Rica.

En primer lugar, se llevará a cabo la definición de algunos conceptos previos necesarios para el diseño de este tipo de estructuras. Posteriormente, se entrará en materia haciendo una revisión de la literatura existente relativa al diseño de estructuras de baja cota de coronación. Se presentarán las diversas tipologías y se analizará su comportamiento en cuanto a estabilidad y transmisión. Finalmente, se hablará de las estructuras homogéneas formadas por Cubípodos.

2.2. Conceptos previos

Antes de exponer el estado del arte de las estructuras comentadas, es necesario definir los conceptos clave que conforman este proyecto. Entre estos encontramos el oleaje, las tipologías estructurales para la defensa de la costa y los elementos que son parte de estas, destacando el Cubípedo.

2.2.1. El oleaje: Definición, características y estadísticos

El oleaje es el agente climático marino con mayor influencia en el conjunto de procesos costeros. Su acción es la causante de la modificación de la línea costera, siendo responsable de la morfología costera tanto en planta como en perfil.

El oleaje es una alteración de la superficie del mar generado por la acción continua del viento sobre la superficie del agua (fetch) del mar durante cierto periodo de tiempo. Esto produce un conjunto de ondas aleatorias de forma más o menos irregular, con distintas direcciones de propagación y periodos entre 1 y 30 segundos.

2.2.1.1. Estadísticos del oleaje

Los estadísticos del oleaje son aquellos parámetros que permiten su caracterización. A continuación, se describen los más importantes, utilizados en este proyecto para la determinación de las características del oleaje.

- **Altura de ola significativa ($H_{1/3}$, H_{m0} o H_s):** Es la media aritmética del tercio mayor de alturas de ola registradas. También es definido como cuatro veces la desviación estándar de la elevación de la superficie.

$$H_s = H_{m0} = 4(m_0)^{1/2} \quad (2.1)$$

Donde m_0 es la varianza del oleaje registrado.

- **Altura de ola 1/10 ($H_{1/10}$):** Media aritmética del décimo de olas más altas de un registro.
- **Altura de ola media (H_{rms}):** Media aritmética de la totalidad de olas registradas.

$$H_{rms} = (8m_0)^{1/2} \quad (2.2)$$

- **Altura de ola máxima: H_{max} ,** suele ser utilizada en el diseño de algunas estructuras marítimas.
- **Periodo del oleaje (T):** Tiempo (s) que transcurre entre dos olas consecutivas medido en un punto fijo (normalmente cresta o seno).

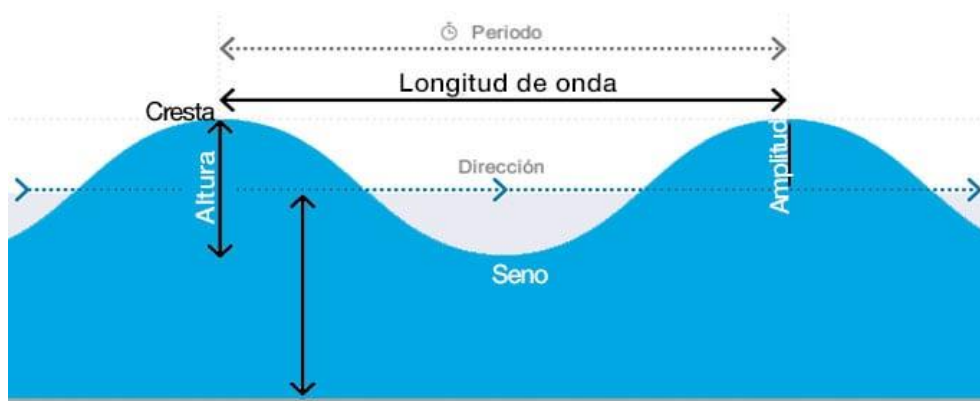


Figura 2.1. Parámetros característicos del oleaje. Fuente: Singlequiver.com.

- **Periodo pico (T_p):** Periodo del grupo de olas de mayor energía en el espectro de oleaje.
- **Periodo medio (T_m):** Periodo medio de todas las olas que constituyen el registro del oleaje.
- **Longitud de ola (L):** Es la distancia entre dos crestas. Esta varía con la propagación del oleaje, siendo la longitud de ola en aguas profundas (L_0) la más utilizada.

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.3)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad y T el periodo del oleaje.

- **Peralte:** Se trata de la relación existente entre la altura de ola y su longitud correspondiente. En este proyecto se utilizará el s_{0p} , es decir, el peralte obtenido con el periodo pico (T_p) y la altura de ola en aguas profundas (L_0).

$$s_{0p} = \frac{T_p}{L_0} \quad (2.4)$$

A continuación, se presentan algunas relaciones útiles entre las distintas alturas de ola:

$$H_{1/3} = 1,416 H_{rms} \quad (2.5)$$

$$H_{1/10} = 1,80 H_{rms} \quad (2.6)$$

$$H_{max} = 1,86 H_{1/3} \quad (2.7)$$

2.2.1.2. Propagación del oleaje

El oleaje abandona la zona de generación y se propaga en la dirección del viento que lo ha creado. Cuando se aproxima a la costa, por efecto de la disminución de la profundidad, o la existencia de obstáculos, sufre una serie de alteraciones que acaban provocando su extinción. Entre estas transformaciones encontramos la refracción, el asomeramiento, la reflexión y la difracción.

El asomeramiento es el fenómeno producido por la reducción de la profundidad cuando el oleaje se acerca a aguas someras. El fondo provoca la reducción de la velocidad y la longitud de la ola, lo que hace que el peralte de esta aumente.

La refracción es el efecto que se produce al incidir un frente de ola oblicuo sobre una batimétrica. Por efecto de reducción de la profundidad, el frente de onda presentará diferentes velocidades, provocando su cambio de dirección con tendencia a colocarse paralelo a las batimétricas.

En su propagación, el oleaje puede alcanzar directamente la costa o encontrarse con un obstáculo. En el primer caso, cuando el efecto del fondo comienza a ser notable, la ola comienza a deformarse hasta volverse totalmente inestable, en este momento se produce la rotura del oleaje. Sin embargo, si antes de la rotura se encuentra con un obstáculo como una estructura, se puede producir el fenómeno de difracción, que consiste en la cesión lateral de energía al desviarse el oleaje en los extremos de este; y la reflexión del oleaje, que implica la formación de un oleaje que viaja en sentido opuesto al incidente.

2.2.1.3. Rotura del oleaje

La rotura del oleaje se produce cuando por efecto del fondo la altura de ola comienza a crecer y las partículas de la cresta viajan a mayor velocidad que la ola en sí, provocando la desestabilización y rotura de esta. Es este fenómeno el que provoca la mayoría de los procesos que ocurren en el litoral debido a la gran cantidad de energía que descarga y el responsable de las mayores acciones en algunas estructuras costeras.

Existen dos mecanismos de rotura de ola:

- Rotura por fondo, en la que existe una profundidad relativa excesiva, H/h .
- Rotura debido a la existencia de un peralte excesivo. Siendo H la altura de ola [L] y h la profundidad [L].

Iribarren y Nogales (1950) definieron el número de Iribarren (I_r), también conocido como parámetro de semejanza de rotura de Battjes (1974), como un indicador para caracterizar la rotura del oleaje.

$$I_r = \frac{m}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad (2.8)$$

Siendo m la pendiente de fondo, H la altura de ola (m), $L_0 = gT^2/2\pi$ (m) la longitud de ola en aguas profundas, g la aceleración de la gravedad (m/s^2) y T el periodo del oleaje (s).

En función del número I_r se caracterizan los cuatro tipos de rotura definidos por Galvin (1968):

Tipo de rotura	I_r
Oscilación (Surging)	$I_r > 3,00$
Colapso (Collapsing)	$2,5 < I_r < 3,0$
Voluta (Plunging)	$0,5 < I_r < 2,5$
Descrestamiento (Spilling)	$I_r < 0,5$

Tabla 2.1. Clasificación del tipo de rotura en función del número I_r . Fuente: Elaboración propia.

La rotura tipo *spilling* se produce con pendientes suaves y peraltes elevados. En situaciones con peraltes medios y pendientes mayores se produce la rotura *plunging*. La rotura tipo *surging* se da si existen peraltes bajos y pendientes más pronunciadas. Por último, la rotura tipo *collapsing* es una situación intermedia entre las roturas *plunging* y *surging*.

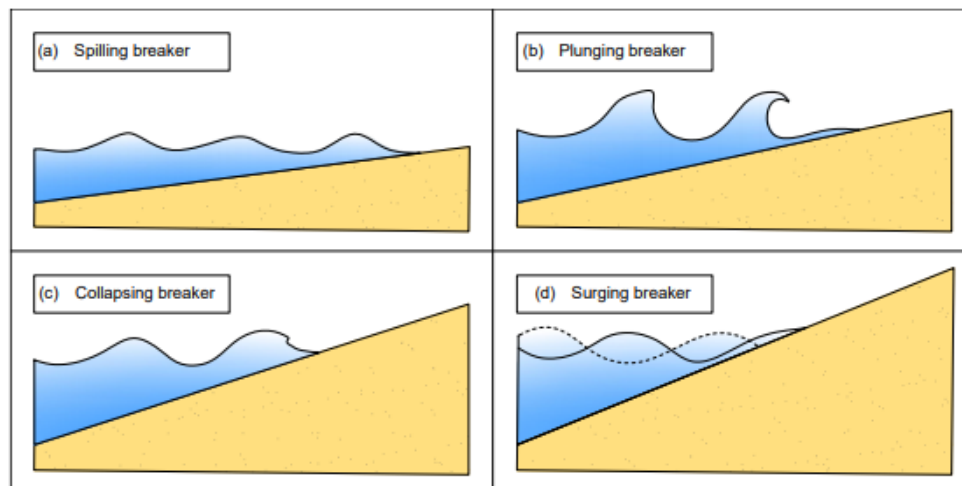


Figura 2.2. Tipos de rotura del oleaje. Fuente: Mares Nasarre (2021)

2.2.2. Diques exentos

Existe multitud de tipologías estructurales empleadas en la defensa del litoral con el objetivo de detener la regresión de la costa, crear áreas abrigadas del oleaje para el desarrollo de actividades portuarias o recreativas o forzar el depósito de sedimentos. Entre estas se encuentran las

defensas longitudinales, los diques en talud, los diques verticales, los espigones o los diques exentos entre otras.

En el presente proyecto se va a poner el foco sobre los diques exentos, los cuales pueden ser conocidos como diques arrecife si se dan una serie de condiciones que se verán a continuación.

Los diques exentos son obras marítimas situadas frente a la costa a bajas profundidades y con una disposición generalmente paralela a esta. Su principal objetivo es la protección y estabilización del litoral costero mediante la reducción de la energía del oleaje incidente, generando un área abrigada y reteniendo material sedimentario.

Entre los tipos de diques exentos se puede realizar una primera diferenciación en función de su cota de coronación o de su francobordo, ya que pueden ser emergidos o sumergidos. Estos últimos también se conocen como diques arrecife debido a que las funciones que ejerce son similares a las de los arrecifes naturales. Son considerados estructuras de baja cota de coronación.



Figura 2.3. Diques exentos. Fuente: Google.

2.2.2.1. Funcionalidad

A continuación, se describen las principales funciones que ejercen los diques exentos:

- Reducir la energía del oleaje incidente generando un área más o menos abrigada en función de su diseño. Esto permite también la protección de la playa y sus elementos frente a la acción de temporales.
- Estabilizar las playas, modificando su morfología en planta y garantizando la existencia de un ancho mínimo al permitir la sedimentación natural de arenas según su diseño.
- Evitar la regresión de la costa.
- Crear una barrera parcial al transporte sólido litoral mediante la formación de un tómbolo.

2.2.2.2. Tipología en función de la cota de coronación

Como se ha comentado anteriormente, los diques exentos pueden clasificarse a priori en emergidos o sumergidos en función de su francobordo, es decir, según si su cota de coronación se encuentra por encima (francobordo positivo) o por debajo (francobordo negativo) del nivel del mar. De la Peña y Sánchez (2008) proponen la siguiente clasificación de diques exentos en función de su cota de coronación:

- **Diques exentos sumergidos:** Se encuentran permanentemente por debajo del nivel del mar. Por tanto, su francobordo es negativo. No producen impacto visual.
- **Diques exentos bajos:** Producen un pequeño impacto visual, permitiendo al usuario de la playa divisar el horizonte. Presentan francobordos menores a 1,5 metros suponiendo que esta es la altura media de los ojos de un observador.
- **Diques exentos medios:** Se incluye en este grupo los diques con francobordos entre 1,5 metros y esta altura más la altura de la berma.
- **Diques exentos altos:** Producen un gran impacto visual, impidiendo al espectador ver el mar tras el mismo. Se consideran diques exentos altos aquellos cuyo francobordo sea superior a 1,5 metros más la de la berma.

Aparte de presentar la ventaja de reducir el impacto visual, los diques exentos sumergidos o de baja cota de coronación también son más económicos, debido al menor uso de material en su construcción. Otro de los efectos favorables es la menor influencia en la dinámica litoral y la morfología de la costa. Además, favorecen la rotura del oleaje y evitan su impacto directo, reduciendo esfuerzos sobre la estructura y permitiendo la renovación del agua en el área protegida, lo que mejora su calidad.

2.2.2.3. Tipología en función de su composición estructural

Esta clasificación de los diques exentos tiene en cuenta los elementos con los que están contruidos. De esta manera, se puede diferenciar en diques multicapa, formados por diferentes materiales con manto, filtro y núcleo; o diques homogéneos, compuestos por un solo material. Aquí se puede hacer también una diferencia si se atiende a su porosidad, ya que los primeros son impermeables y los últimos permeables, permiten el paso de agua a través de ellos.

Las piezas principales de los diques pueden ser escolleras o elementos prefabricados de hormigón. Entre los elementos prefabricados de hormigón que pueden formar parte de estos encontramos piezas masivas como cubos o bloques, fáciles de fabricar y colocar en obra. Estos presentan un comportamiento flexible frente a la acción del oleaje, con una resistencia estructural alta. Sin embargo, presentan algunas limitaciones como el consumo de hormigón, la baja estabilidad hidráulica o los procesos de compactación heterogénea debido al acoplamiento entre sus caras.

En 1950, con la aparición del Tetrapod, se comenzó a utilizar otro tipo de piezas especiales prefabricadas de hormigón, con formas distintas que buscaban paliar las limitaciones que

presentan los elementos cúbicos (Grau, 2008). De esta manera, se ha inventado gran variedad de piezas especiales con diferentes características para construir diques en talud o diques homogéneos. Cada una tiene unas características geométricas que le confiere ventajas y desventajas respecto a las otras.

Entre sus objetivos principales siempre está la reducción de los costes de construcción por ahorro de hormigón, el incremento de la estabilidad hidráulica o la reducción de la huella de carbono. La calidad del hormigón tiene su importancia, ya que se trata de piezas esbeltas de gran tamaño que pueden romperse frágilmente.

Entre las piezas masivas (ver Medina y Vidal, 2014) destacan los cubos, paralelepípedos, cubos Antífer y cubos modificados, cuya colocación puede ser orientada o aleatoria; los Cubípodos son también piezas masivas pero que solo se pueden colocar aleatoriamente.

Entre las piezas esbeltas destacan Tetrapod y Dolos, que se colocan con cierta orientación, y Accropode, Core-Loc y Xbloc. En la siguiente imagen se muestran algunos de ellos.

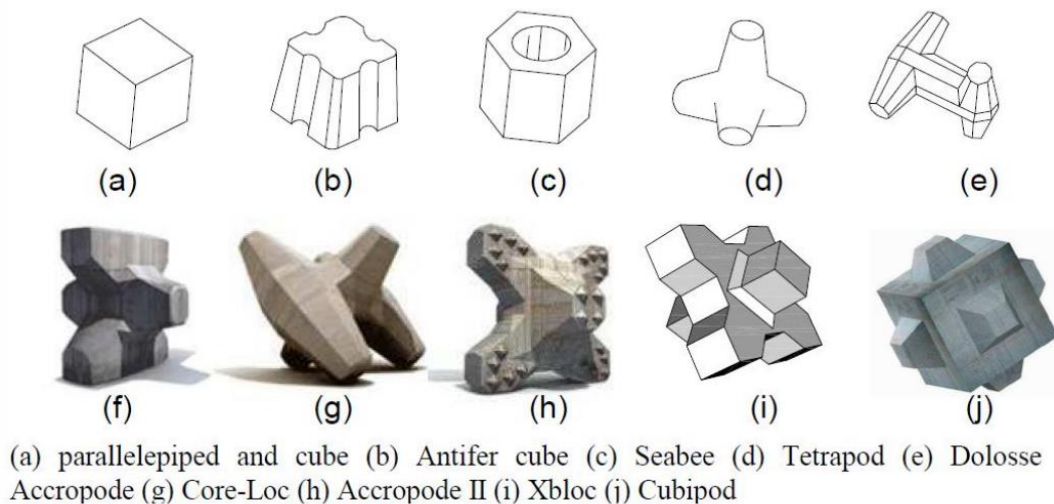


Figura 2.4. Piezas especiales de hormigón. Fuente: Dupray y Roberts (2010).

– Diques multicapa o convencionales

Este tipo de diques suelen ser similares a los diques en talud convencional, ya que están formados por un núcleo impermeable, un filtro con distinto material algo más permeable, y finalmente por una o dos capas de un material de mayor tamaño como la escollera o elementos de hormigón en el manto.

En su uso como diques exentos, generalmente se construyen como estructuras de baja cota de coronación o LCS. Como veremos en apartados posteriores, existe multitud de estudios relativos a la estabilidad, transmisión y reflexión del oleaje y disipación de energía en este tipo de estructuras.

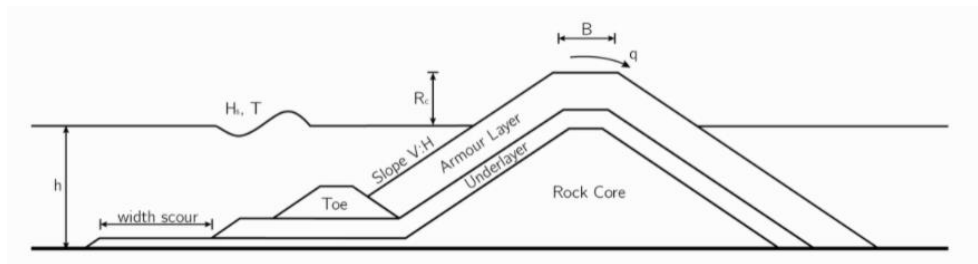


Figura 2.5. Dique multicapa convencional.

– Diques homogéneos

Los diques homogéneos son estructuras formadas por un solo material, ya sea escollera o elementos prefabricados de hormigón. También pueden estar formados por módulos prefabricados de hormigón cuya estructura es el dique en sí.

Ahrens (1987), definió por primera vez este tipo de estructuras con el nombre de diques arrecife, formados por escolleras de diferente tamaño. En este proyecto, se estudiará los diques homogéneos o diques arrecife formados por Cubípodos.

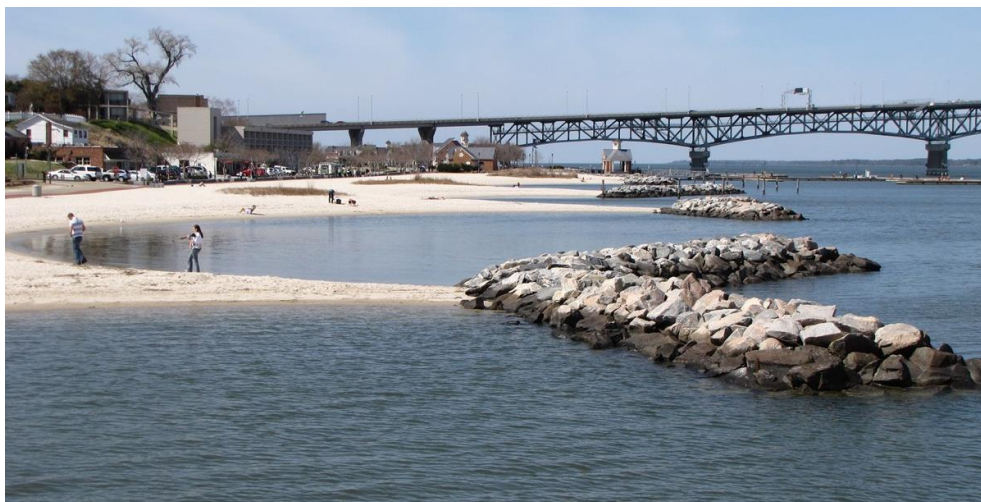


Figura 2.6. Dique homogéneo de escollera. Fuente: Steve Simon (2012).

2.2.3. El Cubípodo

El Cubípodo es un elemento prefabricado de hormigón diseñado en el LPC-UPV por Josep R. Medina y M.E. Gómez Martín para la formación de estructuras marítimas de defensa de la costa, tales como diques en talud, diques longitudinales, espigones o diques exentos. Se trata de un elemento de forma cúbica con una serie de protuberancias de forma tronco piramidal en sus caras con el objetivo de evitar el acoplamiento o aumentar la trabazón entre elementos (Gómez Martín, 2015).



Figura 2.7. El Cubípodo. Fuente: Medina y Gómez-Martín (2016)

Como se ha comentado, los elementos de hormigón utilizados normalmente presentan elevada resistencia estructural pero una baja estabilidad hidráulica. El Cubípodo surge como respuesta a la búsqueda de un elemento que suponga una solución de compromiso entre estas características. Es decir, una pieza que tenga mayor estabilidad hidráulica, pero sin que esto ponga en compromiso su resistencia.

Para incrementar la estabilidad, los Cubípodos aumentan la trabazón entre piezas mediante unas protuberancias en todas sus caras. Esto le proporciona un comportamiento flexible frente a la acción del oleaje manteniendo una resistencia estructural similar al cubo convencional.

Por tanto, el Cubípodo mantiene las ventajas de las piezas masivas de hormigón, con elevada robustez estructural y resistencia frente al oleaje por peso propio, y resuelve sus limitaciones: aumenta la estabilidad hidráulica frente al oleaje y garantiza su colocación aleatoria. Además, mantiene también las ventajas logísticas de los cubos, es decir, fabricación, acopio, manipulación, colocación, etc.

Se trata de una pieza de colocación aleatoria que puede utilizarse en mantos bicapa o monocapa, como alternativa al cubo o paralelepípedo o a las piezas *bulky* tipo Acrópodo o Xbloc (Gómez Martín, 2015).



Figura 2.8. Contradique de Langosteira II. Fuente: Web del Cubípedo.

2.2.3.1. Ventajas

A continuación, se describen las ventajas más destacadas del Cubípedo:

- **Evita el adoquinamiento del bloque cubico tradicional:** impide el acoplamiento cara a cara, aumentando la fricción entre elementos. Se dificulta la extracción de elementos.
- **Mantiene la porosidad del manto homogénea.**
- **Elevada estabilidad hidráulica** debido a su forma.
- **Ahorro económico y de materiales:** Estos elementos son capaces de resistir, con piezas más pequeñas, los mismos temporales que cubos de mayor tamaño. Esto implica una reducción del consumo de hormigón requerido para la construcción de la estructura con el consiguiente ahorro económico y reducción de la huella energética y de carbono.
- **Gran robustez:** elevada resistencia estructural a rotura debido a la poca esbeltez de sus partes. Uno de sus puntos fuertes es su elevada resistencia ante impactos, muy superior en comparación a otras piezas como Acrópedo o Xbloc. Su robustez hace que la calidad del hormigón no sea un factor crítico como las piezas tipo bulky.
- **Facilidad de manipulación y colocación aleatoria:** sencillez de ejecución de obras. No exigen una colocación orientada como por ejemplo el Acrópedo, lo que penaliza mucho en tiempo de ejecución. Su colocación es aleatoria con pinzas de presión que permiten una colocación eficiente (8 Uds./h).
- **Elevados rendimientos de fabricación, manipulación y acopio de piezas**

2.2.3.2. Proceso constructivo

Como se ha comentado, una de las ventajas del Cubípedo es la facilidad de construcción. A continuación, se expone el proceso seguido para la fabricación y puesta en obra de estos elementos.

Para su fabricación se emplea un encofrado vertical específicamente diseñado para optimizar el rendimiento de producción, lo que conlleva a reducción de costes y necesidades de espacio que hacen al Cubípedo muy competente. El proceso de fabricación es muy sencillo y presenta un alto rendimiento.

Su forma cúbica con protuberancias permite su acopio en varios niveles de altura, lo que permite disponer de zonas de almacenamiento muy compactas e inferiores a las de otros elementos como el Acrópedo. En función de su tamaño, se utilizan sistemas de acopio con porosidades entre el 30 y el 50%. La manipulación en el parque de fabricación se realiza mediante pinzas de doble presión. Estas suponen un sistema de manejo rápido y seguro, ya que no necesitan personal que realice operaciones manuales.



Figura 2.9. Acopio de Cubípodos. Fuente: Web del Cubípedo.

El transporte de las piezas desde el parque de acopio a la construcción se realiza bien mediante camiones o bien mediante barcas, como cualquier otro elemento. Para ello se utilizan las mismas bases del encofrado o simples estructuras de madera.



Figura 2.10. Transporte de Cubípedo en camión. Fuente: Medina y Gómez-Martín (2016).

Por último, su colocación se realiza mediante pinzas simples de presión. Esta colocación es totalmente aleatoria, sin que cada pieza deba tener una orientación específica respecto al resto y no requiere de buzos ni mano de obra especializada. Se utiliza un sistema de posicionamiento GPS situado en la pluma de la grúa para indicar la posición exacta de la malla de colocación. Los rendimientos rondan los 8-12 Cubípodos por hora.

2.3. Estructuras de baja cota de coronación (LCS)

2.3.1. Definición, funcionalidad y objetivos

Las estructuras de baja cota de coronación o LCS (Low-Crested Structures) son estructuras marítimas de defensa de la costa cuya cota de coronación se encuentra cercana al nivel del mar y permiten cierto rebase del oleaje sobre ellas. Este tipo de estructuras se utiliza generalmente en la protección del litoral costero o como protección de áreas abrigadas en las que se permite cierto oleaje.

Su uso se extendió a raíz del paso del Ciclón David por Australia en 1976, que provocó daños importantes en el dique de Rosslyn Bay, reduciendo su altura de coronación cuatro metros. Aun así, este siguió funcionando dos años más como dique sumergido hasta que fue reparado. Basándose en el sorprendente desempeño de este dique y tras la realización de ensayos de laboratorio, se diseñó una LCS para la construcción de un dique en Townsville Harbor, con la innovación de que su construcción se realizó únicamente con escollera en lugar de con diferentes capas como los diques en talud convencionales. Este tipo de estructura homogénea fue posteriormente descrito por Ahrens (1987) como dique arrecife.

Las LCS pueden presentar tipologías distintas en cuanto a los materiales empleados en su construcción o en función de su cota de coronación. Generalmente, su uso se ha extendido hacia el diseño de diques exentos en talud convencionales de menor altura. Su sección transversal suele tener forma trapezoidal con distintos taludes. Además, puede incorporar una berma de pie que permite incrementar la estabilidad en caso de erosión del fondo.

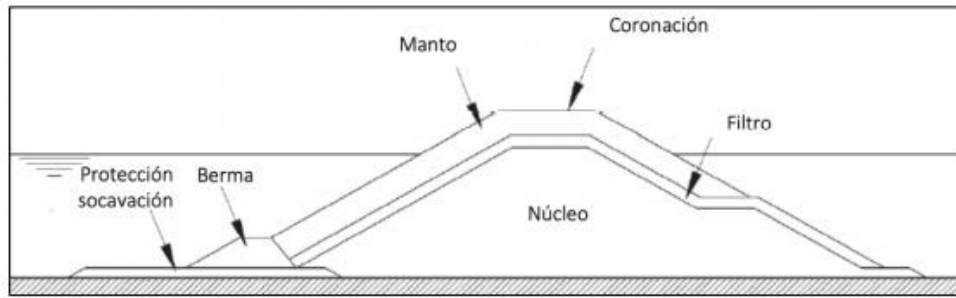


Figura 2.11. Sección transversal de dique exento de baja cota de coronación. Fuente: CIRIA (2007).

En cuanto a su funcionalidad y objetivos, las LCS son mayormente utilizadas como diques exentos para la protección y estabilización de playas. Por tanto, sus principales funciones son las mismas que los diques exentos, es decir, reducir la energía del oleaje incidente generando un área abrigada, modificar la morfología en planta para estabilizar las playas, evitar la regresión de la línea de costa e influir en la dinámica litoral.

A continuación, se describirá el comportamiento de este tipo de estructuras en cuanto a modos de fallo, estabilidad y transmisión de oleaje.

2.3.2. Estabilidad

Para comprender los aspectos relativos a la estabilidad de las estructuras de baja cota de coronación, Bruun (1979) define once modos de fallo distintos que pueden afectar a este tipo de estructuras. A estos modos recogidos en la Figura 2.12 hay que añadir el efecto de la compactación heterogénea descrito por Gómez-Martín y Medina (2014), producida fundamentalmente en diques formados por cubos de hormigón prefabricados. A continuación se describe los modos de fallo descritos por Bruun (1979).

- 1.- Extracción de piezas del manto principal durante el ascenso del oleaje en la estructura.
- 2.- Extracción de piezas durante el descenso del oleaje en la estructura.
- 3.- Deslizamiento global del manto principal.
- 4.- Movimiento continuo de las piezas del manto principal sin desplazamientos de posición pero con capacidad para deteriorar el manto en su conjunto, ya que el cabeceo de las piezas puede producir la rotura por fatiga.
- 5.- Socavación de la base del espaldón.
- 6.- Daños en coronación o en el trasdós de la estructura por rebase del oleaje.
- 7.- Falta de compacidad de las capas inferiores, con excesiva transmisión de energía al interior del dique, provocando levantamiento en el espaldón.

- 8.- Socavación o erosión en la parte inferior del pie, que puede provocar el descalce de la estructura.
- 9.- Asientos y hundimientos en el terreno.
- 10.- Pérdida de las características mecánicas de los materiales.
- 11.- Defectos o errores de construcción.

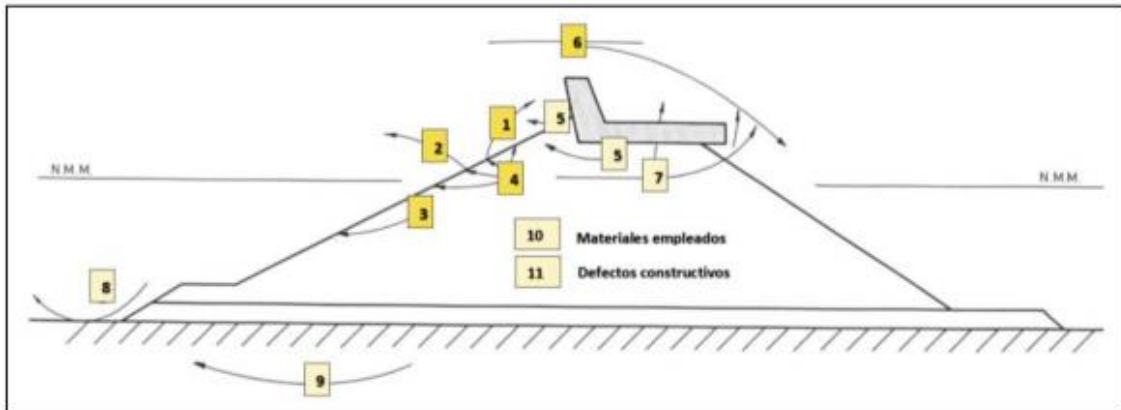


Figura 2.12. Modos de fallo de un dique en talud. Fuente: CIRIA (2007).

Puesto que los diques de baja cota no suelen tener espaldón, los modos de fallo relativos a este pueden despreciarse en nuestro caso. Por otro lado, en el caso de diques homogéneos, los modos de fallo relativos a capas de filtro o núcleo desaparecen.

En cuanto a su estabilidad, las LCS pueden clasificarse en tres tipos:

- **Diques arrecife dinámicamente estables**

Un dique arrecife es una estructura de baja cota de coronación homogénea formada por escolleras de distintos tamaños y pesos. Fue descrita por primera vez por Ahrens (1987), por lo que se le conoce también como dique de Ahrens. Sus parámetros fundamentales de diseño son el coeficiente de transmisión y la cota de coronación de equilibrio.

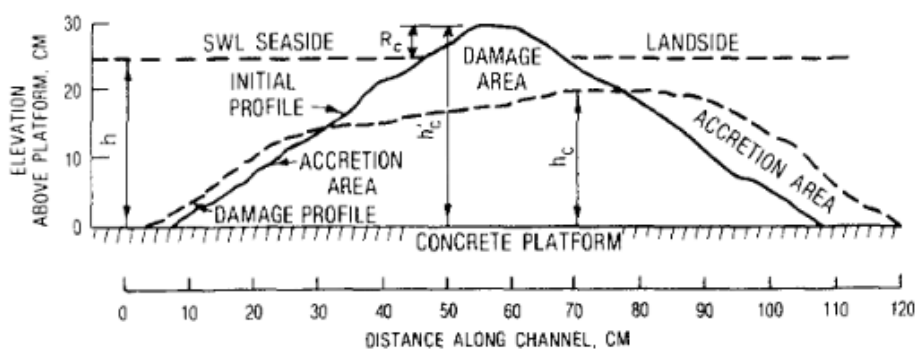


Figura 2.13. Dique arrecife descrito por Ahrens (1987).

La coronación inicial de estas estructuras se encuentra próxima al nivel medio de agua en reposo. Sin embargo, bajo condiciones de oleaje extremas como las que se pueden dar durante una tormenta, se permite cierto movimiento de las piezas, lo que genera un descenso de la cota de coronación hasta una altura conocida como cota de equilibrio. Por esto se dice que son estructuras dinámicamente estables, porque sus piezas se mueven durante los oleajes extremos hasta alcanzar un equilibrio.

Ahrens (1987) realiza ensayos de estabilidad en estas estructuras y obtiene una expresión para calcular esta cota de equilibrio, utilizando el número de estabilidad espectral o modificado.

Estas estructuras parecen suponer una forma efectiva y económica de estabilizar playas o proteger el litoral de la erosión en muchas situaciones (Fulford, 1985). Puesto que no tienen núcleo, no pueden colapsar de forma catastrófica y por tanto un buen criterio de diseño es permitir su ajuste y deformación hasta una condición de equilibrio natural.

Entre sus ventajas con respecto a las LCS convencionales destaca su elevada porosidad, lo que hace que los diques arrecife sean muy estables ante el ataque del oleaje a la vez que disipa su energía de manera efectiva. Además, su construcción es más simple y económica, lo que permite simularlos más fácilmente mediante modelización física o numérica.

Pueden incluso reemplazar o impulsar arrecifes naturales de coral que han sido degradados por el impacto humano (Clark y Edwards, 1999). Sin embargo, las estructuras de defensa de la costa pueden tener también impactos negativos, por ejemplo impulsando el desarrollo de especies distintas a las naturales de los arrecifes de coral (Moschella et al., 2005).

– **Estructura de baja cota estáticamente estable ($R_c > 0$)**

Se trata de una estructura cercana a un dique en talud convencional no rebasable, pero con mayor estabilidad que este debido al hecho de que gran parte de la energía del oleaje puede pasar a través y sobre el dique. Se trata de estructuras cuyas piezas permanecen estables ante oleajes extremos.

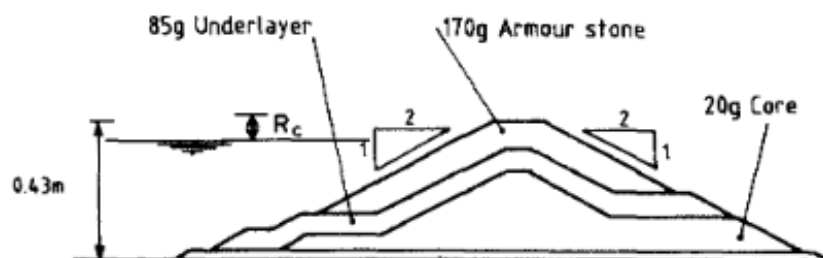


Figura 2.14. Ejemplo de LCS estáticamente estable. Fuente: Allsop & Powell (1985).

– **Dique sumergido estáticamente estable ($R_c < 0$)**

Todas las olas rebasan estas estructuras. Su estabilidad aumenta claramente si la altura de coronación disminuye.

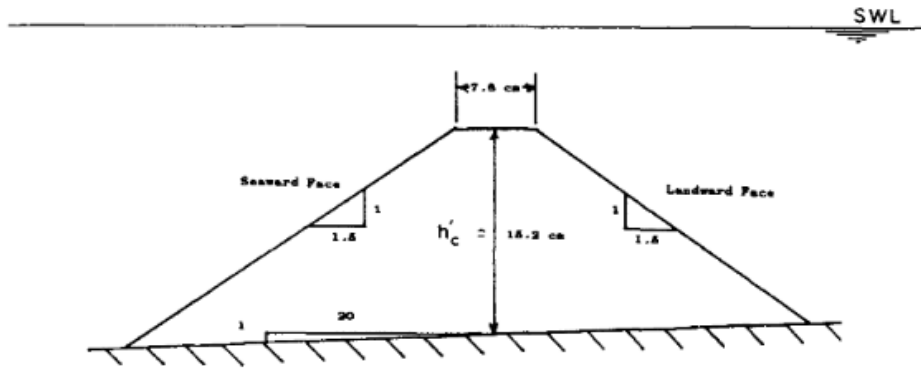


Figura 2.15. Esquema de dique rebasable. Fuente: Givler y Sorensen (1986).

2.3.3. Transmisión del oleaje

Puesto que las estructuras de baja cota de coronación se utilizan como defensa de la costa permitiendo la transmisión de parte del oleaje, la predicción de esta cantidad de energía transmitida detrás de ellas es un factor fundamental de su diseño. Muchos investigadores se han centrado en el estudio de este fenómeno, obteniendo fórmulas para su estimación. En este apartado se presenta una revisión histórica en cuanto a la transmisión de oleaje en LCS.

2.3.3.1. Parámetros fundamentales

En primer lugar, resulta necesario definir los principales parámetros que describen la transmisión del oleaje. Entre estos parámetros encontramos la altura de ola significativa incidente al pie de la estructura ($H_{m0,i}$); la altura de ola significativa transmitida ($H_{m0,t}$); el periodo pico (T_p); el peralte (s_{op}); el francobordo de la estructura (R_c), definido como la diferencia entre la cota de coronación de la estructura y el nivel medio del mar; la altura de la estructura (h_c); la anchura de la coronación (B); el diámetro nominal de las piezas del manto (D_{n50}); el número de Iribarren (I_r); la pendiente de fondo; y el coeficiente de transmisión ($K_t = H_{m0,t}/H_{m0,i}$). Otros factores menos influyentes podrían ser la fricción del fondo y la porosidad de la estructura. La siguiente imagen recoge de forma esquemática los parámetros comentados:

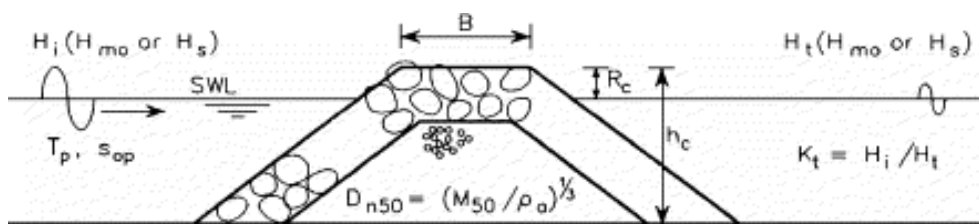


Figura 2.16. Parámetros que gobiernan la transmisión del oleaje. Fuente: van der Meer et al. (2005)

2.3.3.2. Estado del arte

En las últimas décadas, multitud de investigadores se han centrado en estudiar el desempeño hidráulico de las estructuras de baja cota (LCS), analizando la influencia de los distintas geometrías, materiales y características que las definen y obteniendo diversas expresiones para

estimar la transmisión del oleaje en función de estas. A continuación, se resumen dichas investigaciones, presentando sus conclusiones y las fórmulas obtenidas.

Seelig (1980) ensaya un gran número de modelos físicos con diferentes secciones estructurales ante oleajes regulares en mayor medida y mide la altura de ola transmitida.

Takayama et al. (1985) realizan ensayos físicos en LCS formadas por Tetrápodos (TTP) en condiciones de oleaje irregular y proponen la Ec. 2.9 para obtener el coeficiente de transmisión, en la que interviene el ancho de coronación adimensionalizado con la longitud de onda en aguas profundas, el francobordo adimensional y la altura de ola relativa a la longitud en aguas profundas:

$$K_t = -0,92 \left(\frac{B}{L_0} \right) + 0,42 \left(\frac{R_c}{H_0'} \right) + 3,80 \left(\frac{H_0'}{L_0} \right) + 0,51 \quad (2.9)$$

Powell y Allsop (1985) describen el desempeño hidráulico de las LCS con la cota de coronación sobre el nivel de agua en reposo utilizando un francobordo adimensionalizado con la altura de ola y el peralte: R_p^* . Daemrich y Kahle (1985) observan la transmisión de oleaje en estructuras con la coronación bajo o a nivel medio del agua en reposo. Y Givler y Sorensen (1986) realizan una serie de ensayos de estabilidad en diques sumergidos.

Ahrens (1987) investiga la estabilidad estructural y la transmisión de oleaje en diques arrecife dinámicamente estables. Llega a la conclusión de que para el diseño de estas estructuras es necesario definir una altura de coronación de equilibrio y presenta una fórmula para estimarla. Posteriormente, Hearn (1987) profundiza en el análisis de los datos de Ahrens (1987) y presenta una nueva expresión para estimar la transmisión.

Van der Meer (1990b) recoge gran parte de los ensayos realizados por los anteriores investigadores y analiza la transmisión asumiendo que esta depende en gran medida del francobordo adimensional. Estudia su influencia definiéndolo comúnmente (R_c/H_{si}) y utilizando también el definido por Powell y Allsop (1985): R_p^* . Tras analizar el coeficiente de transmisión propone la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Para } -2,0 < \frac{R_c}{H_{si}} < -1,13 & \quad K_t = 0,80 \\ \text{Para } -1,13 < \frac{R_c}{H_{si}} < 1,2 & \quad K_t = 0,46 - 0,3 \frac{R_c}{H_{si}} \\ \text{Para } 1,2 < \frac{R_c}{H_{si}} < 2,0 & \quad K_t = 0,10 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Daemen (1991) realiza ensayos de transmisión de oleaje en LCS estáticamente estables y vuelve a analizar la base de datos de ensayos recogida por Van der Meer (1990b). Este decide separar el francobordo de la altura de ola y relaciona ambos parámetros con el diámetro nominal de las piezas para considerar la influencia de la altura de coronación en la transmisión del oleaje.

Obtiene la Ec. 2.11, que incorpora también la influencia del peralte y de la anchura de coronación (B) con relación al D_{n50} . Esta expresión es publicada posteriormente por Van der Meer y Daemen (1994).

$$K_t = a \frac{R_c}{D_{n50}} + b$$

$$a = 0,031 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0,24 \quad (2.11)$$

$$b = -5,42s_{0p} + 0,0323 \frac{H_i}{D_{n50}} - 0,017 \left(\frac{B}{D_{n50}} \right)^{1,84} + 0,51$$

Además, presentan una expresión similar para diques arrecife, sustituyendo el parámetro b por la siguiente expresión:

$$b = -2.6s_{0p} + 0,05 \frac{H_i}{D_{n50}} + 0,85 \quad (2.12)$$

D'Angremond et al. (1996) observan que la forma de rotura de las olas influye en el coeficiente de transmisión y que hasta ahora no se había tenido en cuenta. Por ello, realizan nuevos ensayos y vuelven a analizar la base de datos existente sin considerar $s_{0p} > 0,06$, $H_{si}/h > 0,54$ y solo considerando francobordos adimensionales (R_c/H_{si}) dentro del rango $[-2,5; 2,5]$. Presentan la Ec. 2.13, que incluye el número de Iribarren (Ir) o *surf-similarity parameter* (Battjes, 1974), ξ , que define la forma rotura del oleaje. Esta expresión es válida para diques en talud de escollera y diques impermeables con valores de K_t limitados en el rango: $0,075 < K_t < 0,75$.

$$K_t = -0,4 \frac{R_c}{H_i} + 0,64 \left(\frac{B}{H_i} \right)^{-0,31} (1 - e^{-0,5\xi}) \quad (2.13)$$

Seabrook y Hall (1998) llevan a cabo experimentos 2D y 3D y observan que las expresiones anteriores muestran imprecisiones al incrementar el ancho de coronación en diques sumergidos de escollera. En consecuencia, proponen la Ec. 2.14, que presenta una alta fiabilidad si se aplica en diques sumergidos muy anchos:

$$K_t = 1 - \left(e^{-0,65 \left(\frac{R_c}{H_i} \right) - 1,09 \left(\frac{H_i}{B} \right)} + 0,047 \left(\frac{BR_c}{LD_{n50}} \right) - 0,067 \left(\frac{R_c H_i}{BD_{n50}} \right) \right) \quad (2.14)$$

Esta ecuación presenta buenos resultados dentro de los siguientes rangos

$$0 \leq \frac{BR_c}{LD_{n50}} \leq 7,08 \quad ; \quad 0 \leq \frac{R_c H_i}{BD_{n50}} \leq 2,14$$

Hirose et al. (2002) realizan un estudio extenso de estructuras con coronaciones anchas formadas por Aquareef. Melito y Melby (2002) investigan la respuesta hidráulica de estructuras Core-Loc.

En el marco del proyecto DELOS, financiado por la Unión Europea, se llevaron a cabo distintos ensayos de oleaje en LCS para medir la estabilidad y el desempeño hidráulico de estas. Destacan los ensayos de la Universidad de Cantabria (UCA) y de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) descritos en Gironella et al. (2003) con un amplio rango de anchuras de coronación; y los ensayos a gran escala llevados a cabo en el Large Wave Channel del *Coastal Research Centre* (FZK) en Hannover, posteriormente descritos y analizados en la Universidad de Nápoles por Calabrese et al. (2002).

Van der Meer et al. (2005) recoge una extensa base de datos (2337 ensayos) formada por los resultados obtenidos por todos los investigadores anteriores comentados en este apartado. Esta base de datos incluye ensayos realizados con distintos tipos de estructuras (diques sumergidos, LCS convencionales, etc.) y distintos tipos de elementos (escollera, Tetrapod, Accropode, etc.).

Van der Meer et al. (2005) analizan las expresiones formuladas por Van der Meer y Daemen (1994) y d'Angremond et al. (1996) y observan que la eficacia de la segunda se reduce al aumentar el ancho de coronación. Por tanto, indican que esta es válida para valores de $B/H_{si} < 8$ y la actualizan con una nueva expresión para $B/H_{si} > 12$ (Ec. 2.15), proponiendo la interpolación lineal en valores intermedios.

$$K_t = -0,35 \frac{R_c}{H_i} + 0,51 \left(\frac{B}{H_i} \right)^{-0,65} (1 - e^{-0,41\xi}) \quad (2.15)$$

El límite inferior de aplicación de esta expresión es $K_t=0,05$. Mientras que el superior viene definido por:

$$K_{tu} = -0,006 \frac{B}{H_i} + 0,93 \quad (2.16)$$

Jeong et al. (2021) analizan la transmisión de oleaje en diques sumergidos muy porosos formados por Tetrápodos (TTP) en Bongpo, Corea del Sur. Las estructuras construidas en Corea suelen tener bajos francobordos y coronaciones anchas. Es por esto por lo que tras analizar las fórmulas existentes no obtienen buenos resultados y deciden desarrollar su propia expresión a partir de mediciones reales en las playas locales:

$$K_t = \frac{0,78 R_c \operatorname{erf} \left(\frac{H_i}{R_c} \right)}{H_i} \quad (2.17)$$

Donde el 0,78 representa el parámetro de rotura.

2.4. HLCS de Cubípodos

2.4.1. Introducción

Como ya se ha indicado, en el presente proyecto se va a realizar un estudio experimental y una posterior aplicación práctica de la transmisión en estructuras homogéneas de baja cota de coronación (HLCS) de Cubípodos. Estas son estructuras cuya cota de coronación se encuentra cercana al nivel medio del mar en reposo y están formadas por un único material, el Cubípedo.

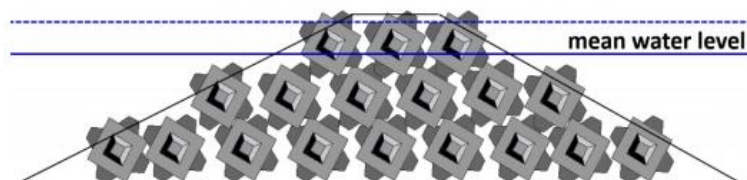


Figura 2.17. Sección de HLCS de Cubípodos de 3 capas. Fuente: Medina et al. (2019)

Se trata de estructuras con una elevada porosidad, debido al hecho de que no presentan un núcleo formado por materiales impermeables. Suelen utilizarse como diques exentos, ubicados a profundidades relativamente pequeñas en condiciones de rotura del oleaje por fondo.

En primer lugar, resulta necesario realizar una revisión histórica de este tipo de estructuras. A continuación, se describirán los distintos tipos de mallas de colocación utilizadas hasta el momento y las diferentes posibilidades que estas ofrecen al caracterizar la porosidad o definir la estabilidad y transmisión en la estructura. Posteriormente, se describirán los criterios a tener en cuenta para su diseño, así como un análisis de su estabilidad y la transmisión de oleaje que estas presentan.

2.4.2. Revisión histórica

Las estructuras homogéneas de baja cota o HLCS (Homogeneous Low-Crested Structures) formadas por Cubípodos surgen como solución para la protección de los ecosistemas marinos de las zonas en las que el turismo de sol y playa es una de las actividades económicas principales Odériz et al. (2018). En países del Caribe y de zonas tropicales y subtropicales en general los ecosistemas costeros están sufriendo una degradación progresiva derivada de la presión turística que puede llegar a afectar seriamente a esta actividad económica (ver Medina et al., 2019).

El Cambio Climático y las actividades antrópicas en el litoral (contaminación, vertido de residuos, pesca incontrolada, accidentes, etc.) degradan y aumentan la vulnerabilidad de los ecosistemas marinos (ver Lowe et al., 2011). Entre estos ecosistemas cabe destacar los arrecifes de coral. Su degradación afectaría también a las playas cercanas, ya que estos protegen la playa de los grandes oleajes actuando como diques exentos y alimentando a las playas con arena biogénica (Medina et al., 2019). Autores como Rinkevich (2005) y Schoonees et al. (2019) indican que es necesario recuperar y reforzar la adaptación de los sistemas marinos mediante medidas activas y soluciones naturales que aporten ventajas sociales, económicas y técnicas.

En este contexto, las HLCS pueden utilizarse como diques exentos, lo que permitiría proteger las playas de igual manera que los diques convencionales pero reduciendo el impacto ambiental, ya que estas son consideradas infraestructuras verdes. Además, aumentarían la colonización marina y la biodiversidad (Odériz et al., 2018). Estas estructuras se diseñan para ser estáticamente estables, sin movimiento durante temporales (Medina et al., 2019), a diferencia de los diques arrecife definidos por Ahrens (1987), que son diques dinámicamente estables (con grandes movimientos durante los temporales).

Odériz et al. (2018) presentan las HLCS de Cubípodos como la solución ante problemas de erosión costera considerando la estética del paisaje, la biodiversidad de los arrecifes de coral y el cambio climático. Proponen la construcción de estas mediante mallas triangulares y llevan a cabo ensayos de laboratorio con tres tipos de modelos físicos formados por una, tres y cinco capas. Estudian la estabilidad y el comportamiento hidráulico de estas estructuras, llegando a una serie de recomendaciones básicas para su diseño.

Medina et al. (2019) estudian las HLCS de Cubípodos con distinto número de capas como solución a la regeneración de ecosistemas coralinos en declive. Utilizando ensayos realizados en el canal de ensayos de la Universidad Autónoma de México (UNAM) analizan los resultados en cuanto a transmisión, reflexión y disipación de la energía del oleaje y proponen fórmulas para su estimación en función del francobordo adimensional ($R_c/H_{s,i}$). Destacan que las HLCS muestran coeficientes de transmisión superiores a las LCS convencionales debido a su mayor porosidad. Concluyen que las HLCS de Cubípodos pueden ser la base para recrear las funciones hidráulicas y ambientales de los arrecifes de coral con el fin de recuperar los ecosistemas marinos y proteger el litoral.

De Keyser y Jacobs (2020) realizan ensayos de colocación sobre fondo plano y estudian la colocación con mallas rectangulares y triangulares. Proponen una metodología para estimar el espesor de cada capa y la altura global de la estructura.

Centi (2020) utiliza un motor de videojuegos (Bullet Physics Engine, BPE) para simular la construcción de este tipo de estructuras y analizar su influencia en los espesores de capa y la altura de la estructura.

Medina et al. (2020) estudian la influencia de la malla de colocación en la altura de la estructura y su francobordo, que tienen relación directa con la transmisión del oleaje, con el fin de proporcionar criterios de diseño adecuados. Molines et al. (2021) utilizan la metodología propuesta por de Keyser y Jacobs (2020) y los resultados obtenidos por Centi (2020) para obtener los coeficientes de capa que influyen en la altura global y la porosidad de la estructura.

2.4.3. Funcionalidad

Como ya se ha comentado, este tipo de estructuras son funcionalmente similares a las LCS convencionales. Entre los objetivos que se persigue con su instalación destacan:

- **Disipación de la energía del oleaje**, lo que permite la protección de playas y los elementos que en ella se encuentran frente a la acción de temporales.

- **Mitigar problemas de erosión costera**, a la vez que considera la estética del paisaje, la biodiversidad de los arrecifes de coral y el cambio climático.
- **Control de las corrientes litorales y de la evolución de las playas.** Según su diseño permite estabilizar playas y controlar su morfología en planta.
- **Facilitar la colonización coralina pasiva.**
- **Atraer y sostener gran variedad de peces y otras especies marinas.** Fomenta la biodiversidad.
- **Crear nuevas zonas de atracción turística sostenibles.**
- **Recuperación de arrecifes de coral en degradación**

2.4.4. Ventajas e inconvenientes

Entre las ventajas que presenta este tipo de estructuras destacan:

- ✓ **Versatilidad**
- ✓ **Fácil desmantelamiento:** Al estar formadas por piezas individuales su desmantelamiento es relativamente sencillo mediante la retirada de elementos con grúa y pinzas de manipulación.
- ✓ **Posibilidad de reutilización:** Las piezas pueden tener una segunda vida tras un desmantelamiento del dique.
- ✓ **Construcción limpia**
- ✓ **No supone un obstáculo visual:** El impacto visual es escaso o inexistente al ser estructuras con la coronación cercana al nivel del mar o incluso sumergidas. Consideran la estética del paisaje.
- ✓ **Elevada porosidad:** La disposición de los Cubípodos y la malla de colocación definen la porosidad de la estructura, que por su morfología presenta altos valores de porosidad en comparación con otros tipos de diques como los convencionales.
- ✓ **Facilita la colonización coralina:** Presenta condiciones perfectas para que se produzca el establecimiento de un ecosistema submarino de arrecifes de coral.
- ✓ **Favorece la biodiversidad y la protección de especies:** En línea con la ventaja anterior, las HLCS de Cubípodos favorecen el establecimiento de especies de fauna y flora

submarinas en su entorno, lo que puede ayudar a la protección de especies amenazadas.

- ✓ **Estructuras estáticamente estables:** Los elementos que la forman permanecen estables durante temporales.
- ✓ **Mejora las condiciones ambientales marinas**
- ✓ **Constituyen puntos de interés turístico:** Su funcionamiento como arrecife artificial puede atraer al turismo de buceo y pesca.
- ✓ **Infraestructura verde:** Por todo lo expuesto son considerados infraestructuras verdes.

Por otro lado, algunos de los inconvenientes de las HLCS de Cubípodos son:

- **Consumo de hormigón:** Estas estructuras consumen menos hormigón en comparación con otras formadas por elementos prefabricados, pero más que las formadas por escollera, un material natural, por lo que su huella de carbono es mayor.
- **Escaso control sobre especies colonizadoras:** Podría producirse la colonización de alguna especie invasora que supusiera un peligro para el resto. Esto puede controlarse mediante monitorización. Este inconveniente podría paliarse mediante el desmantelamiento de la estructura.

2.4.5. Mallas de colocación

La malla de colocación utilizada para la construcción de una HLCS de Cubípodos es un factor fundamental de su diseño, ya que de esta dependerá la cota final de coronación de la estructura, su francobordo y, por tanto, el comportamiento hidráulico de la estructura (transmisión, reflexión y disipación de oleaje).

En las LCS, el francobordo (R_c) puede ajustarse fácilmente controlando la elevación del núcleo, pero en las HLCS solamente puede modificarse cambiando el número de capas y la malla de colocación (Medina et al., 2020).

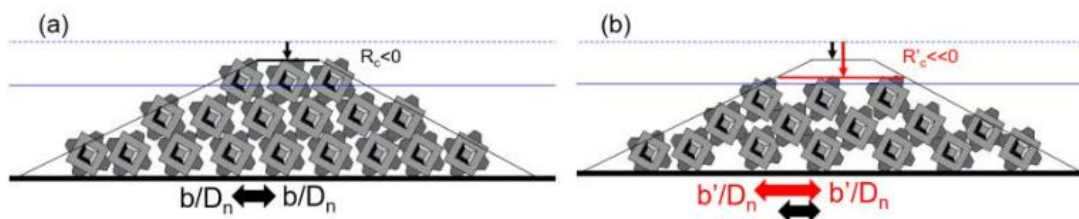


Figura 2.18. HLCS con distintas mallas de colocación: a) Mayor R_c b) Menor R_c . Fuente: Medina et al. (2020)

Medina y Gómez-Martín (2016) recomendaron mallas tipo diamante para la colocación de Cubípodos en los mantos de diques convencionales. Sin embargo, las HLCS son estructuras muy

distintas, cuya construcción se realiza por capas horizontales y requieren de mallas de colocación diferentes.

Como se ha comentado en la revisión histórica, Odériz et al. (2018) ensayan distintas mallas con geometrías rectangulares y triangulares, analizando su estabilidad hidráulica. Concluyen que las que muestran un mejor comportamiento son las mallas triangulares orientadas al oleaje incidente, donde la capa inferior es colocada de forma convencional (ver Medina y Gómez-Martín, 2016) y cada elemento de la capa superior se apoya en tres de la capa inmediatamente inferior, uno a barloamar y dos a sotamar como se muestra en la siguiente figura.

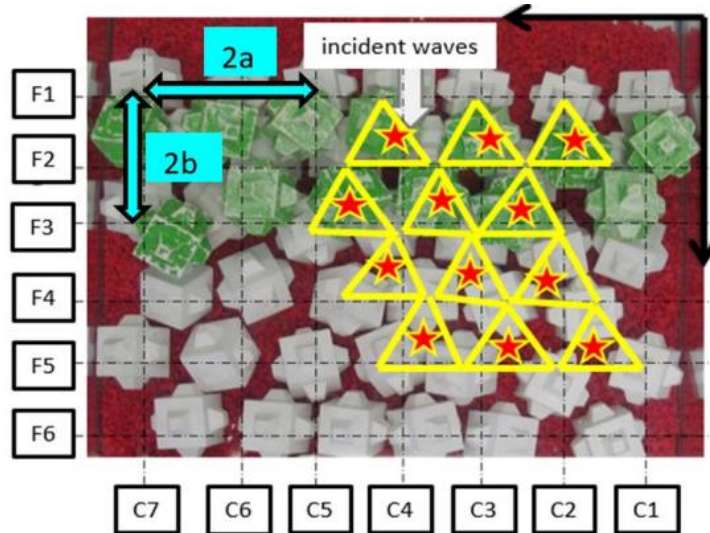


Figura 2.19. Malla de colocación triangular orientada al oleaje incidente. Fuente: Odériz et al. (2018)

La Tabla 2.2 muestra las características geométricas de las mallas definidas por Odériz et al. (2018). La distancia entre filas y columnas de Cubípodos está referida al lado del cubo equivalente o diámetro nominal de la pieza (D_{n50}):

Filas	Distancia	Distancia mínima	Distancia máxima	Distancia media
C	a/D_{n50}	1.31	1.84	1.58
F	b/D_{n50}	0.79	1.58	1.27

Tabla 2.2. Características geométricas de las mallas de colocación de HLCS de Cubípodos. Fuente: Odériz et al. (2018).

La malla de colocación es un aspecto relevante del diseño de las HLCS de Cubípodos no solo por la función de determinación del francobordo de la estructura, que controla la transmisión de oleaje; sino también por razones logísticas y económicas, ya que definen el número de Cubípodos a colocar y el espacio relativo entre ellos.

Además de las distancias entre filas y columnas de piezas, el espesor de cada capa también es un parámetro importante, ya que afecta directamente al francobordo, a la transmisión y a la

porosidad de la estructura. Por tanto, es necesaria la definición de un criterio claro para estimar el coeficiente de capa.

La porosidad describe la proporción de huecos existentes en el sistema estructural. También juega un papel en la disipación de energía del oleaje. Su medición es complicada en estructuras con elementos colocados aleatoriamente. Por ello, algunos manuales de estructuras construidas con piezas de hormigón recomiendan coeficientes de capa específicos y porosidades relacionadas con la densidad de colocación. Por ejemplo, la siguiente ecuación definida en el SPM (1984):

$$\varphi = n(k_{\Delta})(1 - P\%)\left(\frac{\gamma_r}{W}\right)^{2/3} \quad (2.18)$$

Donde n es el número de capas, k_{Δ} es el coeficiente de capa, $P\%$ la porosidad nominal, W es el peso de la pieza y γ_r es el peso específico del material.

Medina et al. (2020) estudian la porosidad y el coeficiente de capa en las HLCS de Cubípodos basándose en la metodología y los resultados de de Keyser y Jacobs (2020) y Centi (2020). El espesor de la primera capa viene determinado por la geometría del Cubípodo colocado con orientación aleatoria: $k_{\Delta 1} = 1,30$. Los espesores de capas superiores van disminuyendo debido a que partes de las piezas pueden estar situadas bajo la envolvente de coronación de la capa inferior. Este coeficiente depende además de los valores de a y b de la malla de colocación: si a y b aumentan, el coeficiente de capa decrece. La siguiente figura muestra los coeficientes de capa medidos en una malla de colocación triangular con $a/D_n=1,58$ y $b/D_n=1,27$.

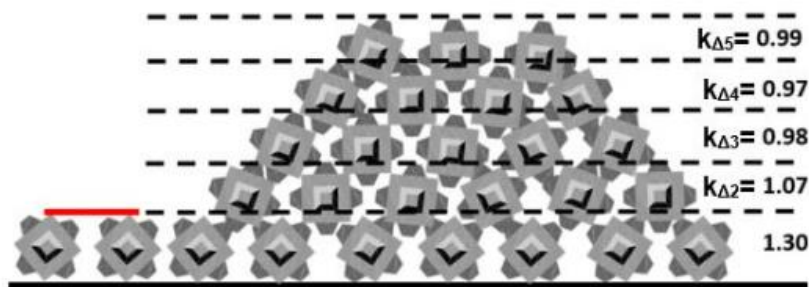


Figura 2.20. Coeficientes de capa de una HLCS de Cubípodos de 5 capas con malla de colocación de $a/D_n=1,58$ y $b/D_n=1,27$. Fuente: Medina et al. (2020)

En el marco del proyecto HOLOBREAK, en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València (LPC-UPV) se están ensayando mallas triangulares equiláteras, en lugar de triangulares isósceles como las ensayadas por Odériz et al. (2018). En el Apartado 3.3.2 se definirá la metodología utilizada para el cálculo de la porosidad en la malla utilizada en este trabajo, de triángulos equiláteros.

2.4.6. Transmisión de oleaje

Para llevar a cabo la función protectora de playas, el factor más importante de las HLCS es la transmisión del oleaje y la correspondiente disipación de energía. Como se ha comentado en el *Apartado 2.3.3*, d'Angremond et al. (1996) relacionaron el coeficiente de transmisión con el francobordo adimensional ($R_c/H_{s,i}$), el número de Iribarren y la anchura de coronación adimensional ($B/H_{s,i}$) de acuerdo con la Ec. 2.13.

Medina et al. (2019) aplicaron dicha fórmula a las estructuras ensayadas por Odériz et al. (2018) y observaron que las HLCS presentaban un mayor coeficiente de transmisión que las LCS convencionales, como era de esperar al ser más permeables. Debido a la escasez de ensayos, estos obtuvieron fórmulas sencillas en las que la única variable explicativa es el francobordo adimensional. De esta manera, las Ecs. 2.19, 2.20 y 2.21 estiman el coeficiente de transmisión para HLCS de una, tres y cinco capas respectivamente. Estas son válidas en los rangos $-1,47 \leq R_c/H_{s,i} \leq 0,00$ para las estructuras de una capa; $-0,43 \leq R_c/H_{s,i} \leq +0,63$ para las de tres capas; y $-0,36 \leq R_c/H_{s,i} \leq +0,89$ para las de cinco capas.

$$K_t(1 \text{ capa}) = 0,45 - 0,30 \left(\frac{R_c}{H_{s,i}} \right) \quad (2.19)$$

$$K_t(3 \text{ capas}) = 0,60 - 0,35 \left(\frac{R_c}{H_{s,i}} \right) \quad (2.20)$$

$$K_t(5 \text{ capas}) = \max [0,54; 0,54 - 0,40 \left(\frac{R_c}{H_{s,i}} \right)] \quad (2.21)$$

Donde K_t es el coeficiente de transmisión, R_c es el francobordo de la estructura y $H_{s,i}$ es la altura de ola significativa incidente. Estas expresiones mostraron buenos resultados para su rango de aplicación.

Además, obtuvieron expresiones (Ec. 2.22 y Ec. 2.23) para estimar también el coeficiente de reflexión (K_r) que relaciona la altura de ola reflejada y la incidente; y la proporción de energía disipada (C_d^2) con un rango de aplicación de $-1,47 \leq R_c/H_{s,i} \leq +0,89$.

$$K_r = 0,36 + 0,05 \left(\frac{R_c}{H_{s,i}} \right) \quad (2.22)$$

$$C_d^2 = 1 - K_t^2 - K_r^2 \quad (2.23)$$

Como conclusión, hay que destacar que la energía reflejada y disipada aumenta con el francobordo adimensional. Como resultado, la transmitida descende. Por tanto, un adecuado diseño de HLCS requiere de la estimación correcta de su cota de coronación, que está directamente relacionada con el francobordo.



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3. Metodología experimental

En el marco del proyecto HOLOBREAK, se han llevado a cabo ensayos con modelos físicos en 2D para analizar el funcionamiento de las estructuras homogéneas de baja cota de coronación formadas por Cubípodos en el canal de oleaje del Laboratorio de Puertos y Costas de la *Universitat Politècnica de València* (LPC-UPV). Estos ensayos se centran en el análisis de la transmisión y estabilidad en este tipo de estructuras.

En el presente capítulo se describirá en primer lugar las instalaciones y equipos existentes para llevar a cabo estos ensayos. En segundo lugar, se presentará la instrumentación utilizada para recabar información sobre distintos parámetros. Posteriormente se presentará el modelo físico ensayado, así como el proceso constructivo seguido y la matriz de ensayos.



*Figura 3.1. Vista general del canal de oleaje del LPC-UPV.
Fuente: Elaboración propia*

3.1. Descripción de instalaciones y equipos

3.1.1. Descripción del canal de oleaje

Los ensayos de oleaje se han llevado a cabo en el canal de oleaje existente en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia. Este canal tiene 30 metros de largo y 1,2 metros de ancho y alto. Además, tiene un falso fondo de 25cm para permitir la recirculación de agua y se ha colocado 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. En la zona de generación de oleaje el fondo es plano y tendido.

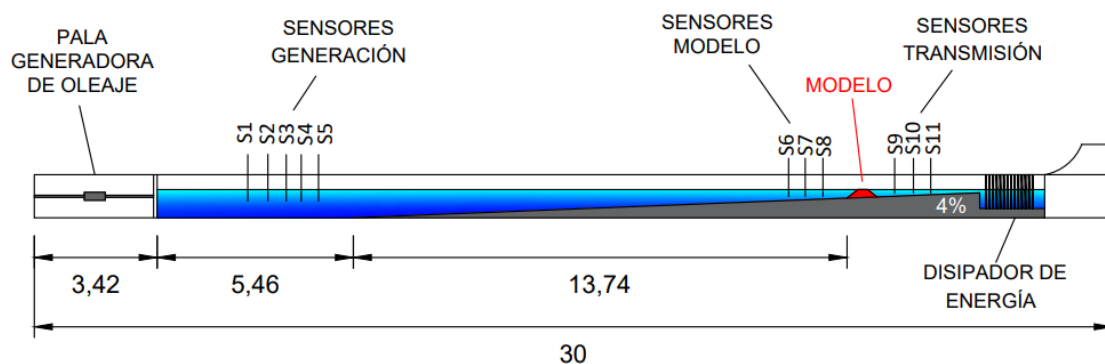


Figura 3.2. Sección longitudinal del canal de oleaje 2D. Fuente: Elaboración propia.

En el extremo inicial del canal, encontramos 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. En el otro extremo se encuentra el sistema de disipación de energía. Delante de este último se encuentra situado el modelo ensayado. Además, en el extremo final del canal se encuentra también un sistema de generación de oleaje por viento, que funciona tapando y generando corrientes de aire en el interior de este. En el siguiente apartado se describirá más detalladamente el primero de los sistemas de generación mencionados, ya que es el que se ha utilizado en los ensayos a los que se hace referencia en este proyecto.

La profundidad de agua en el canal varía en función del francobordo en cada ensayo. Así, en el pie del modelo se tienen valores de profundidad de 10, 15, 20 o 23 cm y en generación se tienen calados de 69, 74, 79 y 82 cm respectivamente.

3.1.1. Sistema generador de oleaje

El sistema de generación de oleaje del canal del LPC-UPV está 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 3.3. Pala generadora de oleaje del LPC-UPV. Fuente: Elaboración propia

La generación de oleaje se ejecuta mediante el sistema AWACS (Active Wave Absorption System). Este sistema se activa desde un ordenador con el software DHI Wave Synthesizer. Un controlador es el encargado de mover la pala según la velocidad y posición indicados en el programa. Como se ha dicho anteriormente, el sistema es capaz de absorber dobles reflexiones gracias a unos sensores de nivel situados sobre la pala, lo que permite al software realizar correcciones en tiempo real y evitar condiciones de oleaje irreales producidas por la re-reflexión del oleaje en la pala.

Existen tres posibilidades de generación: la reproducción de un oleaje grabado previamente, la creación de oleaje regular o la creación de oleaje 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

El software comprueba los parámetros de desplazamiento necesarios para generar el oleaje introducido y en caso de no ser posibles aparece un aviso impidiendo la realización del ensayo.

3.1.2. Sistema disipador de energía

En la zona final del canal, tras el modelo, se encuentra un sistema disipador de energía. Este sistema consiste en una serie de paneles con “rejillas” formadas por perfiles de sección apuntada de diferentes porosidades, lo que provoca la dispersión de la energía del oleaje evitando una posible reflexión que afectaría a los resultados del ensayo.



Figura 3.4. Sistema disipador de energía. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Instrumentación

Además del sistema de generación del oleaje hay otros instrumentos indispensables para poder realizar ensayos con modelos físicos, que permiten realizar su análisis posterior. Estos son los sensores de nivel, cámaras de vídeo y fotos, y sistemas de captación y medida del rebase. A continuación, se desarrollan los utilizados en este proyecto.

3.2.1. Sensores de nivel

Para el registro continuo del nivel del agua se utilizan sensores capacitivos (DHI). Estos permiten tener los datos de elevación del nivel del agua con la frecuencia elegida. Los sensores están formados por dos varillas verticales paralelas que funcionan como electrodos y miden la conductividad del volumen de agua existente entre ellas. Se trata de un sistema utilizado ampliamente en los laboratorios de ingeniería marítima, dada su fiabilidad y simplicidad de funcionamiento.

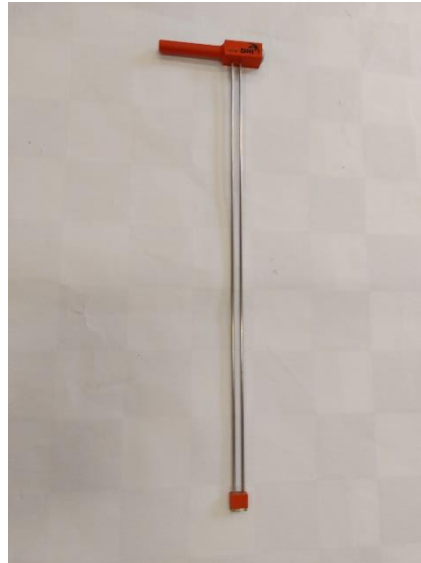


Figura 3.5. Sensor de nivel. Fuente: Elaboración propia.

Estos sensores se conectan mediante cables con los equipos DHI que permiten su calibración y el envío de los datos medidos al ordenador. La calibración se realiza para permitir el cambio de los datos enviados por el sensor a centímetros de ascenso y descenso del agua con referencia al nivel inicial. Esta calibración se realiza todos los días antes del inicio de los 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.

Además de la medición del nivel del agua, una de las utilidades más importante de los sensores de nivel es la separación del oleaje incidente y reflejado. Para ello, es necesario colocarlos por grupos estratégicamente en la longitud del canal, siendo necesario como mínimo tener tres en cada grupo. En nuestro caso, se ha colocado un primer grupo formado por cinco sensores (S1-S5) en la zona de generación de oleaje, cerca de la pala; un segundo grupo de tres sensores (S6-S8) delante del modelo; y un último grupo de otros tres sensores (S9-S11) detrás del modelo, para medir el oleaje transmitido tras la estructura.



Figura 3.6. Sensores de nivel en la zona de generación (izquierda) y frente al modelo (derecha). Fuente: Elaboración propia.

La separación de los sensores ha sido definida siguiendo las recomendaciones de Mansard y Funke (1980) para separar el oleaje incidente y reflejado (Ec 3.1).

$$\begin{cases} d_1 \approx L/10 \\ L/6 < d_1 + d_2 < L/3 \\ d_1 + d_2 \neq L/5 \\ d_1 + d_2 \neq 3L/10 \end{cases} \quad (3.1)$$

Siendo L la longitud de onda, d_1 la separación entre los dos primeros sensores y d_2 la separación entre el segundo y el tercer sensor considerados.

Una regla práctica podría ser la separación que permita que en dos sensores se pueda medir simultáneamente dos o más puntos de una misma onda. Con esto, se establecen separaciones entre sensores que permitan abarcar la totalidad de las longitudes de onda ensayadas, evitando así la recolocación de estos cada tanda de ensayos.

3.2.2. Material audiovisual

Además de los sensores de nivel, en el LPC-UPV se tiene diferente tipología de material para captar imágenes, vídeos y contenido audiovisual en general. Existen cámaras compactas y cámaras Réflex, utilizadas durante los ensayos para hacer fotos del proceso constructivo y del estado general en planta después de cada ensayo para llevar a cabo análisis de estabilidad.

Por otro lado, se dispone de cámaras de vídeo de red, también conocidas como cámaras IP por tener al igual que un ordenador su propia dirección IP, funcionando directamente conectada a la red. Gracias a estas características emiten señal de vídeo en directo, a la cual se puede acceder mediante una plataforma de visionado y manejo.

Los vídeos de los ensayos grabados mediante estas últimas han servido para desarrollar el programa informático de tratamiento de imagen descrito en el *Capítulo 4*.

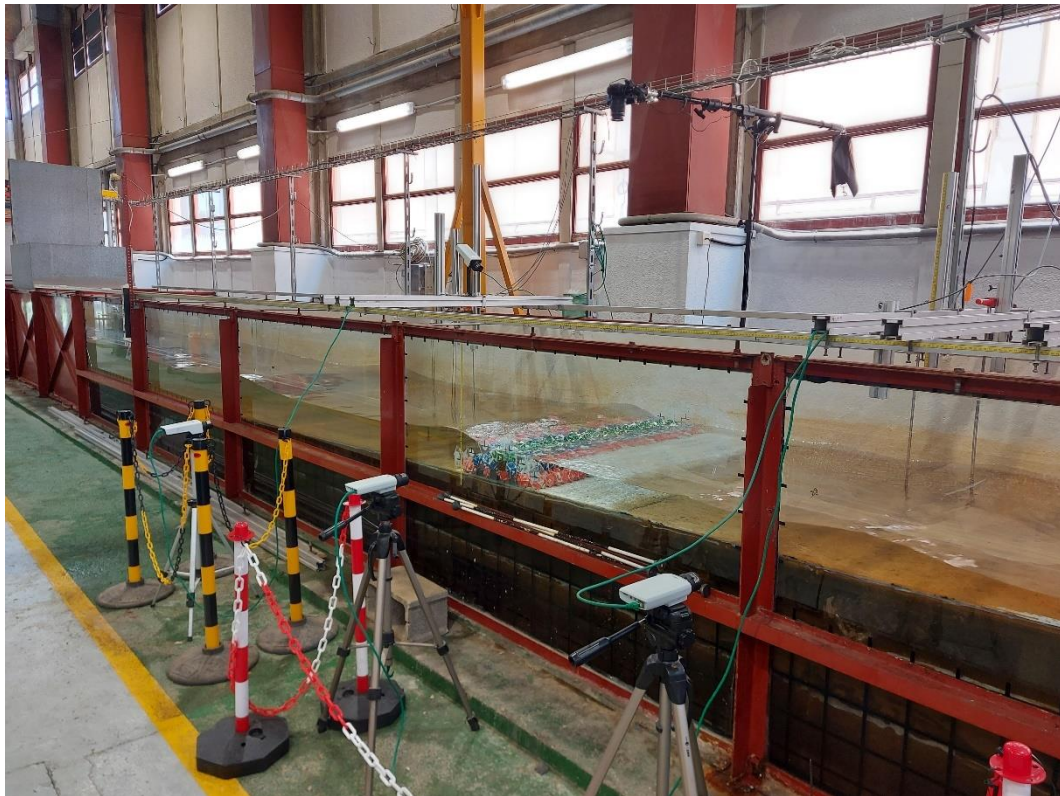


Figura 3.7. Dispositivo audiovisual. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Modelo físico

La sección ensayada que se puede ver en la Figura 3.8 corresponde a un dique homogéneo de baja cota de coronación formado por Cubípodos. Esta sección presenta un talud de 2:1 aproximadamente en el lado de incidencia del oleaje y de 1:2 en el lado opuesto. Tiene 5 capas con 11, 9, 7, 5 y 3 filas de Cubípodos respectivamente. En la Tabla 3.1 se muestra el ancho y altura de cada capa.

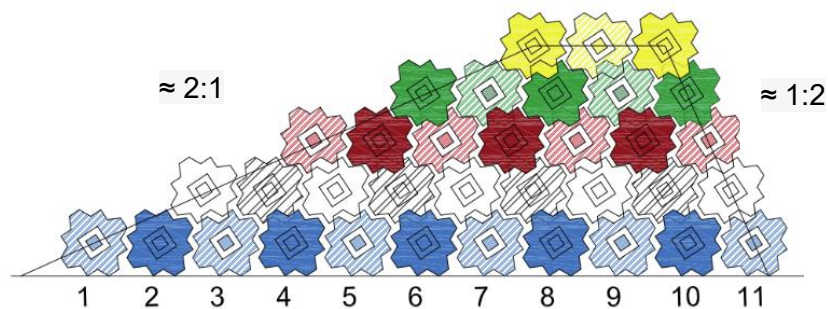


Figura 3.8. Sección transversal del modelo construido. Fuente: Elaboración propia.

Capa	ANCHO CAPA		ALTURA CAPA	
	Filas	B (cm)	K_{Δ}	z (cm)
1	11	50,03	1,26	4,93
2	9	40,02	1,05	8,91
3	7	30,02	0,98	12,62
4	5	20,01	0,96	16,22
5	3	10,01	0,94	19,82

Tabla 3.1. Características de la sección de modelo. Fuente: Elaboración propia.

Al tratarse de una estructura homogénea, está compuesta de un único material, los Cubípodos. A continuación, se describirán las características de este material, así como las particularidades de la malla de colocación, clave en el desempeño y la eficacia de este tipo de estructuras.

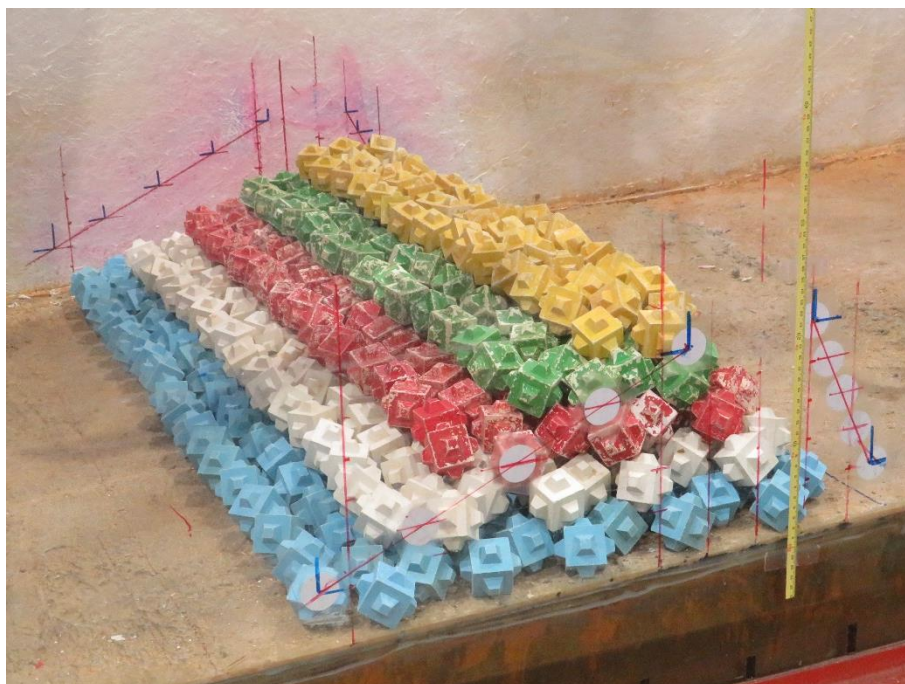


Figura 3.9. Modelo físico ensayado.

3.3.1. Material

Como se ha comentado en el *Capítulo 2*, el Cubípodo es una pieza de hormigón prefabricada utilizada en estructuras de defensa de la costa. Los Cubípodos empleados en el modelo ensayado son de resina inyectada, y tienen un diámetro nominal $D_n=3,79\text{cm}$. En la Figura 3.10 se muestra un esquema de las dimensiones de los Cubípodos mientras que el valor promedio de la densidad, peso y volumen, obtenidos mediante la caracterización de una muestra de 120 Cubípodos con una balanza hidrostática, se puede ver en la Tabla 3.2.

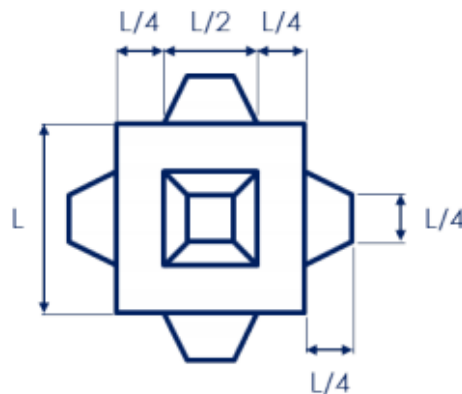


Figura 3.10. Dimensiones principales de los Cubípodos. Fuente: Medina y Gómez-Martín (2016).

Características	Cubípodo $D_n=3,79\text{cm}$
L (cm)	3,55
Densidad (g/cm ³)	2,21
Peso (g)	120,4
Volumen (cm ³)	54,58

Tabla 3.2. Características promedio de los Cubípodos utilizados. Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la Figura 3.8, cada capa del modelo se ha construido con Cubípodos de un color, de abajo a arriba: azul, blanco, rojo, verde y amarillo. Esto facilita la detección de desplazamientos entre Cubípodos en la estructura durante los ensayos y favorece el posterior análisis de estabilidad, identificando rápidamente las posiciones perdidas y el lugar donde se produce la avería.

3.3.2. Malla de colocación

En los ensayos del proyecto HOLOBREAK realizados en el LPC-UPV se han ensayado distintos tipos de mallas de colocación de estructuras homogéneas de baja cota de coronación de Cubípodos. Sin embargo, en el presente proyecto se ha ensayado una sola malla triangular. Como se ha visto, estas quedan definidas por su porosidad, las separaciones longitudinal y transversal y el coeficiente de capa.

Se trata de una malla de triángulos equiláteros 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 $b=5,76\text{ cm}$.

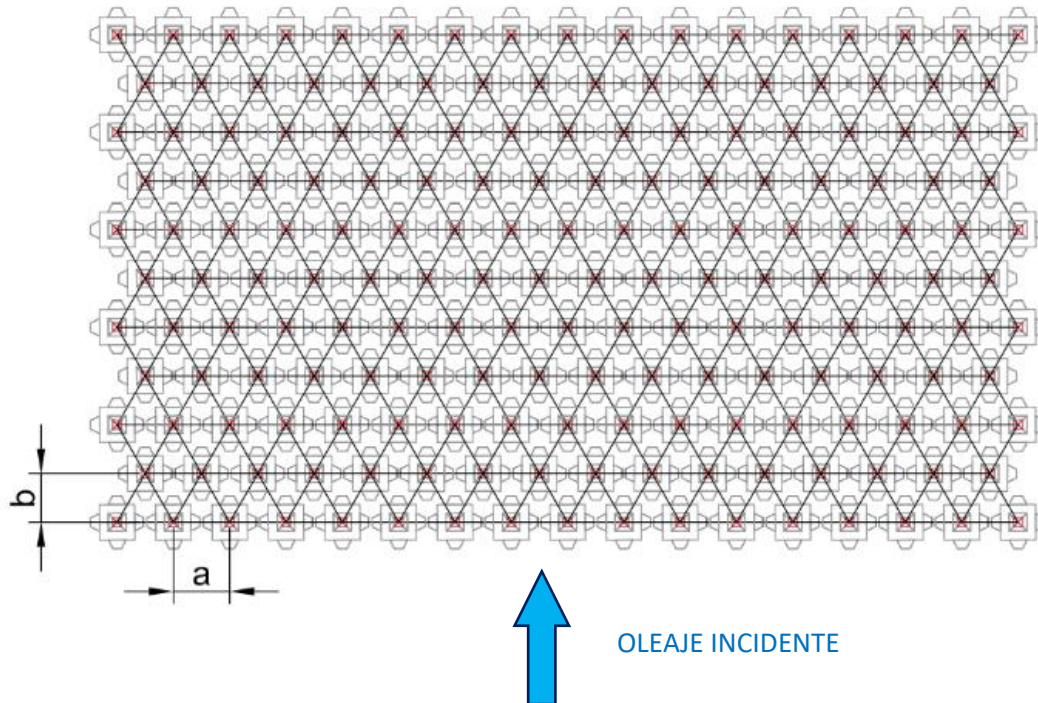


Figura 3.11. Malla de colocación del modelo ensayado. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.11 muestra el esquema de colocación de la primera capa del modelo. Sobre esta, se colocará una segunda capa de la siguiente manera: cada capa comienza con un retranqueo de una fila para proporcionar el talud deseado; por tanto, la primera fila de las siguientes capas se situará entre la segunda y tercera fila de la capa inmediatamente inferior. El esquema triangular hace que cada Cubípodo apoye sobre tres de la capa inferior, uno de la fila anterior y dos de la fila posterior. Para una mejor comprensión, más visual, ver Figura 3.9.

En cuanto a su porosidad, en el *Apartado 2.4.5* se presenta una fórmula general para el cálculo de la porosidad en diques. Sin embargo, los diques homogéneos de Cubípodos tienen unas características muy particulares y debe plantearse una nueva manera de medir la porosidad de forma cualitativa. En este caso, asumiendo un área de cinco filas (n_F) y cinco columnas (n_C), se ha calculado el número de Cubípodos que pueden colocarse en ella (n). Una vez conocido, se calcula la porosidad ($p\%$) siguiendo el método de la malla virtual (ver Gómez-Martín y Medina, 2007).

$$p\% = \frac{1 - n * D_n^2}{n_F * \frac{a}{D_n} * n_C * \frac{b}{D_n} * D_n^2} \quad (3.2)$$

La siguiente tabla resume el cálculo de la porosidad de la estructura ensayada.

Variable	Valor
a/Dn	1,32
b/Dn	1,52
Dn (cm)	3,79
n _F	5,00
n _C	5,00
n	25,00
p%	0,500

Tabla 3.3. Cálculo de la porosidad (p%) de la malla. Fuente: Elaboración propia,

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

Por otro lado, el espesor de cada una de las capas es otro parámetro fundamental en el diseño de la estructura, ya que afecta directamente al francobordo final y, por tanto, a la transmisión de oleaje permitida. Este espesor se define mediante el coeficiente de capa, cuyo valor depende de la malla de colocación, así como de la pendiente de fondo y el tamaño de las piezas utilizadas.

En este caso, puesto que no se dispone de una expresión empírica que relacione estas variables, se ha llevado a cabo ensayos de colocación con la malla definida en un taludómetro. Este permite variar la pendiente del fondo para ensayar distintos escenarios de colocación. Por tanto, se ha medido los espesores de capa con pendientes del 0%, 1%, 2%, 4% y 10%. Posteriormente, se ha realizado un promedio para obtener los coeficientes de cada una de las capas K_{Δ} , obteniendo los siguientes resultados:

Capa	K_{Δ}
1	1,26
2	1,05
3	0,98
4	0,96
5	0,94

Tabla 3.4. Coeficientes de capa (K_{Δ}) del modelo ensayado. Fuente: Elaboración propia.

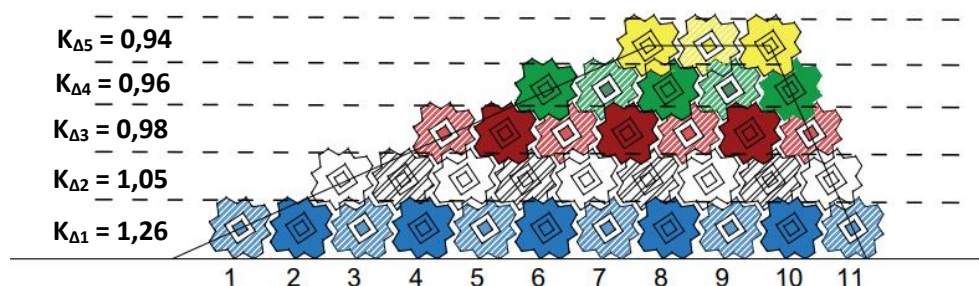


Figura 3.12. Coeficientes de capa (K_{Δ}) del modelo ensayado. Fuente: Elaboración propia.

3.4. Técnica experimental y proceso constructivo del modelo

El proceso constructivo del modelo físico ensayado comienza con la puesta a punto del canal de oleaje. Para ello, se hace una limpieza general de este y de los sensores de nivel que se va a utilizar. Por otro lado, 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. En este caso se vertió una pequeña capa de mortero para simular cierta rugosidad del fondo. Al mismo tiempo se colocan los disipadores de energía.

Una vez efectuadas estas operaciones se procede a la distribución de los sensores de nivel por grupos en la longitud del canal, tal y como se ha comentado en el *Apartado 3.2.1*. Esto supone la colocación de las estructuras utilizadas para sostenerlos y su conexión con los sistemas de captación de datos mediante cables.

A continuación, se llena el canal para proceder a la calibración de 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, nos encontramos en disposición de poder realizar ensayos. Sin embargo, todavía no se construye la estructura, ya que en primer lugar es necesario lanzar una serie de ensayos en vacío, es decir, sin estructura, para validar los métodos de separación de oleaje incidente y reflejado como se comentará más adelante.

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 a seguir para la realización de los ensayos.

El primer paso es la obtención de la malla de colocación. Esta se imprime y se realiza agujeros en los puntos en los que debería ir colocado cada Cubípodos de la primera capa. Posteriormente se coloca sobre el fondo del canal en la zona en que debe quedar construida la estructura y se realizan unas marcas. Una vez hecho esto se está en disposición de comenzar con la construcción del modelo.



Figura 3.13. Proceso constructivo: malla de colocación. Fuente: LPC-UPV.



El modelo se construye capa a capa utilizando para cada una de ellas Cubípodos de un color, lo que permitirá diferenciarlos y controlar sus movimientos. Tras la colocación de cada capa se realiza una medida de la altura a la que se encuentra mediante un láser, lo que permite conocer el coeficiente de capa de cada una de ellas. Además, se realiza una foto para realizar comparaciones tras los ensayos y medir la porosidad del dique.

Una vez construida la estructura completa se procede al llenado del canal hasta el nivel deseado y, posteriormente, se calibra cada sensor de nivel. Tras lo cual se está en disposición de lanzar una tanda de ensayos.



Figura 3.14. Proceso constructivo: (a,b) Construcción de la 1ª capa
(c) Construcción de la 3ª capa. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.15. Proceso constructivo: (a) Construcción de la 3ª capa (b) Medición de altura de capa (c) Modelo construido. Fuente: Elaboración propia.

3.5. Test Matrix

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

En primer lugar, y como se ha comentado en apartados anteriores, se llevó a cabo una serie de tandas de ensayos en vacío para poder calibrar el software de separación de oleaje incidente y reflejado y compararlo con SwanOne. Una vez terminados, se construye el modelo y se comienza a lanzar tandas de ensayos regulares e irregulares.

En cuanto a los ensayos irregulares, estos se generan con un espectro JONSWAP de parámetro pico 3,3. Cada ensayo queda definido por una altura de ola y un periodo pico, de esta manera, se comienza con una altura de ola de 2cm en el primer ensayo y se va incrementando 1cm cada vez hasta que se produce el inicio de avería o la destrucción del modelo. En cada ensayo se lanzan 1000 olas irregulares, por lo que su duración queda definida por el periodo pico:

$$Duración (s) = 1000 \text{ olas} * \frac{T_p}{1,23}$$

Para tener oleajes y situaciones diferentes, se han empleado distintos calados a pie de dique: 10, 15, 20 y 23cm. Además, en cada uno de ellos se han utilizado dos o tres peraltes distintos: 0.01, 0.02, 0,03 o 0,04.

La Tabla 3.5 muestra un ejemplo de matriz de ensayos con las características del oleaje en modelo y en prototipo, así como la duración del ensayo.

Nombre	Modelo		Prof. Pala		hc (cm)	Escala	Profundidad (m)	Hs (m)	Lp (m)	Tp (s)	Tmin	Tmax	Profundidad modelo (m)	Duración (s)	Duración (h:mm:ss)	Duración a grabar (s)
	Hs (cm)	Tp (s)	Lp (cm)	h (cm)												
HL15_1202	2	1,13	200	79	20	50	39,5	1	100	8,00	3,20	13,34	10	920,16	0:15:20	981
HL15_1203	3	1,39	300	79	20	50	39,5	1,5	150	9,80	3,92	16,34	10	1126,97	0:18:47	1187
HL15_1204	4	1,60	400	79	20	50	39,5	2	200	11,32	4,53	18,86	10	1301,31	0:21:41	1362
HL15_1205	5	1,79	500	79	20	50	39,5	2,5	250	12,65	5,06	21,09	10	1454,91	0:24:15	1515
HL15_1206	6	1,96	600	79	20	50	39,5	3	300	13,86	5,54	23,10	10	1593,77	0:26:34	1654
HL15_1207	7	2,12	700	79	20	50	39,5	3,5	350	14,97	5,99	24,95	10	1721,47	0:28:41	1782
HL15_1208	8	2,26	800	79	20	50	39,5	4	400	16,01	6,40	26,68	10	1840,33	0:30:40	1901
HL15_1209	9	2,40	900	79	20	50	39,5	4,5	450	16,98	6,79	28,30	10	1951,96	0:32:32	2012
HL15_1210	10	2,53	1000	79	20	50	39,5	5	500	17,90	7,16	29,83	10	2057,55	0:34:18	2118
HL15_1211	11	2,65	1100	79	20	50	39,5	5,5	550	18,77	7,51	31,28	10	2157,98	0:35:58	2218
HL15_1212	12	2,77	1200	79	20	50	39,5	6	600	19,60	7,84	32,67	10	2253,93	0:37:34	2314
HL15_1213	13	2,89	1300	79	20	50	39,5	6,5	650	20,40	8,16	34,01	10	2345,97	0:39:06	2406
HL15_1214	14	2,99	1400	79	20	50	39,5	7	700	21,17	8,47	35,29	10	2434,53	0:40:35	2495
HL15_1215	15	3,10	1500	79	20	50	39,5	7,5	750	21,92	8,77	36,53	10	2519,97	0:42:00	2580
HL15_3202	2	0,65	66,67	79	20	50	39,5	1	25	4,62	1,85	7,70	10	531,26	0:08:51	592
HL15_3203	3	0,80	100,00	79	20	50	39,5	1,5	37,5	5,66	2,26	9,43	10	650,65	0:10:51	711
HL15_3204	4	0,92	133,33	79	20	50	39,5	2	50	6,53	2,61	10,89	10	751,31	0:12:31	812
HL15_3205	5	1,03	166,67	79	20	50	39,5	2,5	62,5	7,31	2,92	12,18	10	839,99	0:14:00	900
HL15_3206	6	1,13	200,00	79	20	50	39,5	3	75	8,00	3,20	13,34	10	920,16	0:15:20	981
HL15_3207	7	1,22	233,33	79	20	50	39,5	3,5	87,5	8,64	3,46	14,41	10	993,89	0:16:34	1054
HL15_3208	8	1,31	266,67	79	20	50	39,5	4	100	9,24	3,70	15,40	10	1062,51	0:17:43	1123
HL15_3209	9	1,39	300,00	79	20	50	39,5	4,5	112,5	9,80	3,92	16,34	10	1126,97	0:18:47	1187
HL15_3210	10	1,46	333,33	79	20	50	39,5	5	125	10,33	4,13	17,22	10	1187,93	0:19:48	1248
HL15_3211	11	1,53	366,67	79	20	50	39,5	5,5	137,5	10,84	4,33	18,06	10	1245,91	0:20:46	1306
HL15_3212	12	1,60	400,00	79	20	50	39,5	6	150	11,32	4,53	18,86	10	1301,31	0:21:41	1362
HL15_3213	13	1,67	433,33	79	20	50	39,5	6,5	162,5	11,78	4,71	19,63	10	1354,44	0:22:34	1415
HL15_3214	14	1,73	466,67	79	20	50	39,5	7	175	12,22	4,89	20,37	10	1405,57	0:23:26	1466
HL15_3215	15	1,79	500,00	79	20	50	39,5	7,5	187,5	12,65	5,06	21,09	10	1454,91	0:24:15	1515

Tabla 3.5. Test Matrix. Fuente: LPC-UPV

Se han realizado un total de 101 ensayos. A continuación, se muestran los realizados con los parámetros principales descritos arriba (altura de ola significativa, periodo pico y peralte):

Código ensayo	Profundidad (cm)	Peralte	Hs (cm)	Tp (s)
HL15_1202	20	0,01	2	1,13
HL15_1203	20	0,01	3	1,39
HL15_1204	20	0,01	4	1,6
HL15_1205	20	0,01	5	1,79
HL15_1206	20	0,01	6	1,96
HL15_1207	20	0,01	7	2,12
HL15_1208	20	0,01	8	2,26
HL15_1209	20	0,01	9	2,4
HL15_1210	20	0,01	10	2,53
HL15_1211	20	0,01	11	2,65
HL15_1212	20	0,01	12	2,77
HL15_1213	20	0,01	13	2,89
HL15_1214	20	0,01	14	2,99

Tabla 3.6. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=20\text{cm}$ y $s_{op}=0,01$

Código ensayo	Profundidad (cm)	Peralte	Hs (cm)	Tp (s)
HL15_2202	20	0,02	2	0,8
HL15_2203	20	0,02	3	0,98
HL15_2204	20	0,02	4	1,13
HL15_2205	20	0,02	5	1,27
HL15_2206	20	0,02	6	1,39
HL15_2207	20	0,02	7	1,5
HL15_2208	20	0,02	8	1,6
HL15_2209	20	0,02	9	1,7
HL15_2210	20	0,02	10	1,79
HL15_2211	20	0,02	11	1,88
HL15_2212	20	0,02	12	1,96
HL15_2213	20	0,02	13	2,04
HL15_2214	20	0,02	14	2,12
HL15_2215	20	0,02	15	2,19

Tabla 3.7. Ensayos correspondientes a la tanda: $h_s=20\text{cm}$ y $s_{op}=0,02$

Código ensayo	Profundidad (cm)	Peralte	Hs (cm)	Tp (s)
HL15_3202	20	0,04	2	0,57
HL15_3203	20	0,04	3	0,69
HL15_3204	20	0,04	4	0,8
HL15_3205	20	0,04	5	0,89
HL15_3206	20	0,04	6	0,98
HL15_3207	20	0,04	7	1,06
HL15_3208	20	0,04	8	1,13
HL15_3209	20	0,04	9	1,2
HL15_3210	20	0,04	10	1,27

HL15_3211	20	0,04	11	1,33
HL15_3212	20	0,04	12	1,39
HL15_3213	20	0,04	13	1,44
HL15_3214	20	0,04	14	1,5
HL15_3215	20	0,04	15	1,55

Tabla 3.8. Ensayos correspondientes a la tanda: $hs=20\text{cm}$ y $s0p=0,04$

Código ensayo	Profundidad (cm)	Peralte	Hs (cm)	Tp (s)
HL15_1302	23	0,01	2	1,13
HL15_1303	23	0,01	3	1,39
HL15_1304	23	0,01	4	1,6
HL15_1305	23	0,01	5	1,79
HL15_1306	23	0,01	6	1,96
HL15_1307	23	0,01	7	2,12
HL15_1308	23	0,01	8	2,26
HL15_1309	23	0,01	9	2,4
HL15_1310	23	0,01	10	2,53
HL15_1311	23	0,01	11	2,65
HL15_1312	23	0,01	12	2,77
HL15_1313	23	0,01	13	2,89
HL15_1314	23	0,01	14	2,99
HL15_1315	23	0,01	15	3,1

Tabla 3.9. Ensayos correspondientes a la tanda: $hs=23\text{cm}$ y $s0p=0,01$

Código ensayo	Profundidad (cm)	Peralte	Hs (cm)	Tp (s)
HL15_2302	23	0,02	2	0,8
HL15_2303	23	0,02	3	0,98
HL15_2304	23	0,02	4	1,13
HL15_2305	23	0,02	5	1,27
HL15_2306	23	0,02	6	1,39
HL15_2307	23	0,02	7	1,5
HL15_2308	23	0,02	8	1,6
HL15_2309	23	0,02	9	1,7

Tabla 3.10. Ensayos correspondientes a la tanda: $hs=23\text{cm}$ y $s0p=0,02$

Código ensayo	Profundidad (cm)	Peralte	Hs (cm)	Tp (s)
HL15_3302	23	0,04	2	0,57
HL15_3303	23	0,04	3	0,69
HL15_3304	23	0,04	4	0,8
HL15_3305	23	0,04	5	0,89
HL15_3306	23	0,04	6	0,98
HL15_3307	23	0,04	7	1,06
HL15_3308	23	0,04	8	1,13
HL15_3309	23	0,04	9	1,2
HL15_3310	23	0,04	10	1,27

HL15_3311	23	0,04	11	1,33
HL15_3312	23	0,04	12	1,39
HL15_3313	23	0,04	13	1,44
HL15_3314	23	0,04	14	1,5
HL15_3315	23	0,04	15	1,55

Tabla 3.11. Ensayos correspondientes a la tanda: $hs=23\text{cm}$ y $s0p=0,04$

Código ensayo	Profundidad (cm)	Peralte	Hs (cm)	Tp (s)
HL15_1102	15	0,01	2	1,13
HL15_1103	15	0,01	3	1,39
HL15_1204	15	0,01	4	1,6
HL15_1205	15	0,01	5	1,79
HL15_1206	15	0,01	6	1,96

Tabla 3.12. Ensayos correspondientes a la tanda: $hs=15\text{cm}$ y $s0p=0,01$

Código ensayo	Profundidad (cm)	Peralte	Hs (cm)	Tp (s)
HL15_3104	15	0,03	4	0,92
HL15_3105	15	0,03	5	1,03
HL15_3106	15	0,03	6	1,13
HL15_3107	15	0,03	7	1,22

Tabla 3.13. Ensayos correspondientes a la tanda: $hs=15\text{cm}$ y $s0p=0,03$

Código ensayo	Profundidad (cm)	Peralte	Hs (cm)	Tp (s)
HL15_1402	10	0,01	2	1,13
HL15_1403	10	0,01	3	1,39
HL15_1404	10	0,01	4	1,6
HL15_1405	10	0,01	5	1,79
HL15_1406	10	0,01	6	1,96
HL15_1407	10	0,01	7	2,12

Tabla 3.14. Ensayos correspondientes a la tanda: $hs=10\text{cm}$ y $s0p=0,01$

Código ensayo	Profundidad (cm)	Peralte	Hs (cm)	Tp (s)
HL15_3404	10	0,03	4	0,92
HL15_3405	10	0,03	5	1,03
HL15_3406	10	0,03	6	1,13
HL15_3407	10	0,03	7	1,22
HL15_3408	10	0,03	8	1,31
HL15_3409	10	0,03	9	1,39
HL15_3410	10	0,03	10	1,46

Tabla 3.15. Ensayos correspondientes a la tanda: $hs=10\text{cm}$ y $s0p=0,03$

Cada ensayo tiene un código para poder identificarlo. Las dos primeras letras corresponden al código del proyecto: HOLOBREAK. El siguiente número indica si el ensayo es regular o irregular y el siguiente el número de capas del modelo. Después del guion bajo, el primer número indica el peralte utilizado; el segundo corresponde al nivel de agua respecto a la coronación a pie de dique; y el último, la altura de ola significativa con dos cifras (P.e., 01). En la Tabla 3.16 se presentan los valores que puede tomar cada código.

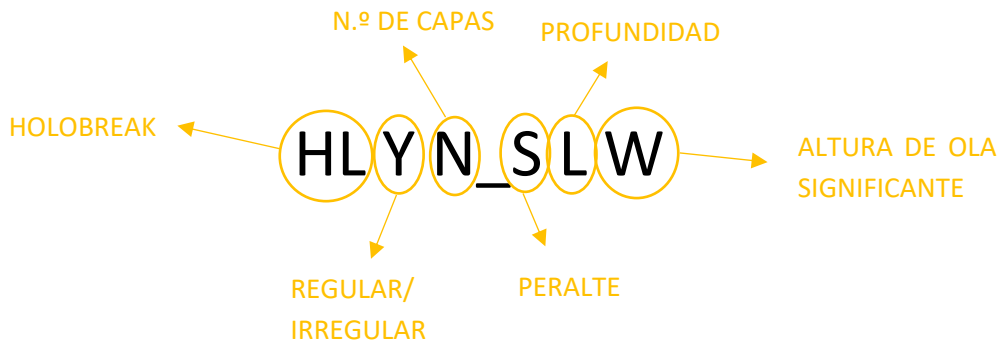


Figura 3.16. Nomenclatura de ensayos. Fuente: Elaboración propia.

Y	0	Regular	S	1	0,01
	1	Irregular		2	0,02
N	0	Ensayos en vacío		3	0,03
	1	1 capa		4	0,04
	2	2 capas	L	1	-25%
	3	3 capas		2	0cm
	4	4 capas		3	+25%
5	5 capas	4	-50%		

Tabla 3.16. Nomenclatura de ensayos. Fuente: Elaboración propia.

3.6. 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 el análisis del oleaje creado, la determinación del punto de inicio de avería y el análisis de la transmisión.

3.6.1. Medición de la bondad del ajuste

Para comprobar la bondad del ajuste en los análisis realizados en este proyecto se han utilizado principalmente dos funciones estadísticas: el coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2).

El coeficiente de correlación es una medida de dependencia lineal entre dos variables aleatorias, es decir, se trata de un índice que indica el grado de relación de dos variables. Este índice varía entre -1 y 1, siendo 1 una correlación positiva perfecta, es decir, cuando una de las variables

umenta, la otra lo hace en una proporción constante; y -1 una correlación negativa perfecta que representa una relación inversa. El coeficiente de correlación se define como:

$$r = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}} \quad (3.3)$$

Siendo X e Y dos variables aleatorias.

Por su parte, el R^2 determina la calidad del modelo para replicar resultados, y la proporción de variación de resultados. Este toma valores de 0 a 1, cuanto mayor sea, mejor ajuste presentará el modelo.

$$R^2 = 1 - rMSE \quad (3.4)$$

$$rMSE = \frac{MSE}{\sigma^2(t)} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2}{\sigma^2(t)} \quad (3.5)$$

Siendo rMSE el error cuadrático medio relativo, MSE el error cuadrático medio, t_i el valor objetivo y a_i el valor estimado mediante el modelo.

3.6.2. Análisis de oleaje

Para llevar a cabo el análisis del oleaje, en primer lugar, es necesario hacer una separación del incidente y reflejado, ya que los sensores registran el nivel de agua total, suma de los dos oleajes anteriores. Una correcta separación del oleaje es clave, ya que la fiabilidad de los resultados posteriormente obtenidos depende de ello. Esta separación se realiza tanto en la zona de generación como en la zona del modelo.

La separación en la zona del 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.

Existen distintas metodologías para llevar a cabo esta separación de oleajes. En el LPC-UPV se utilizan el método LASA-V y el modelo numérico de propagación de oleaje SwanOne. El primero de ellos se va a utilizar para la separación del oleaje en los sensores de generación, mientras que el segundo se aplicará para la obtención del oleaje incidente en la zona del modelo.

Para la validación del método SwanOne se realiza primero una serie de ensayos en vacío, sin estructura. En estos, se tiene 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.

Por otro lado, para la obtención de los estadísticos del oleaje transmitido se utilizará la aplicación LPCLab.

3.6.2.1. LASA-V

El modelo LASA (Local Approximation using Simulated Annealing) fue desarrollado por Medina (2001). Este permite el análisis del oleaje incidente y reflejado en el dominio del tiempo. Está basado en un modelo de aproximación local de onda lineal y onda no lineal de Stokes II y utiliza la cristalización simulada para optimizar los 17 parámetros de este modelo local en cada ventana temporal minimizando el error cuadrático medio.

Figueres y Medina (2005) desarrollan posteriormente LASA-V, optimizando el modelo LASA mediante un modelo de onda de orden superior, el Stokes-V. Esta optimización implica el uso de un modelo de oleaje totalmente no lineal para la aproximación local. 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 situado en la zona de generación, 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.

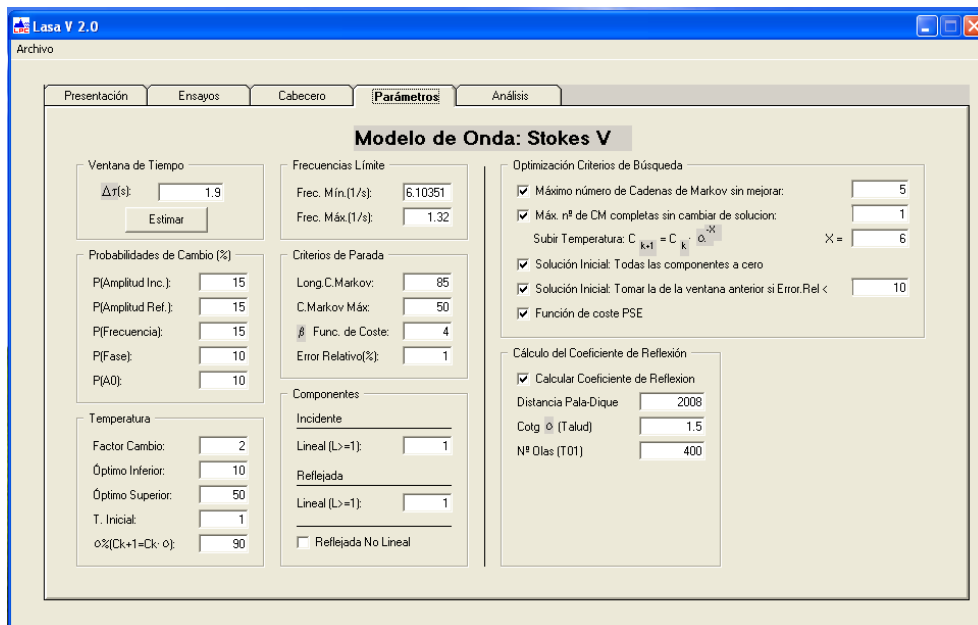


Figura 3.17. Software LASA-V (Figueres y Medina, 2005).

3.6.2.2. LPCLab

La aplicación o herramienta informática LPCLab permite el análisis del oleaje tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo. Esta, se va a utilizar para la obtención de los estadísticos de oleaje transmitido registrado por los sensores capacitivos situados en la zona tras el modelo.

En el dominio de la frecuencia se obtiene el espectro del oleaje mediante la Transformada de Fourier Directa de la superficie de agua discretizada. El oleaje se puede dividir en ventanas diferenciadas definidas por el usuario como puede verse en la Figura 3.18. La Transformada Rápida de Fourier (FFT) actúa sobre cada ventana, sumando los resultados parciales al final.

En cuanto al dominio del tiempo, se contabilizan las olas mediante los distintos pasos por el cero. La altura de ola de estas se calcula como la media de todas las olas individuales.

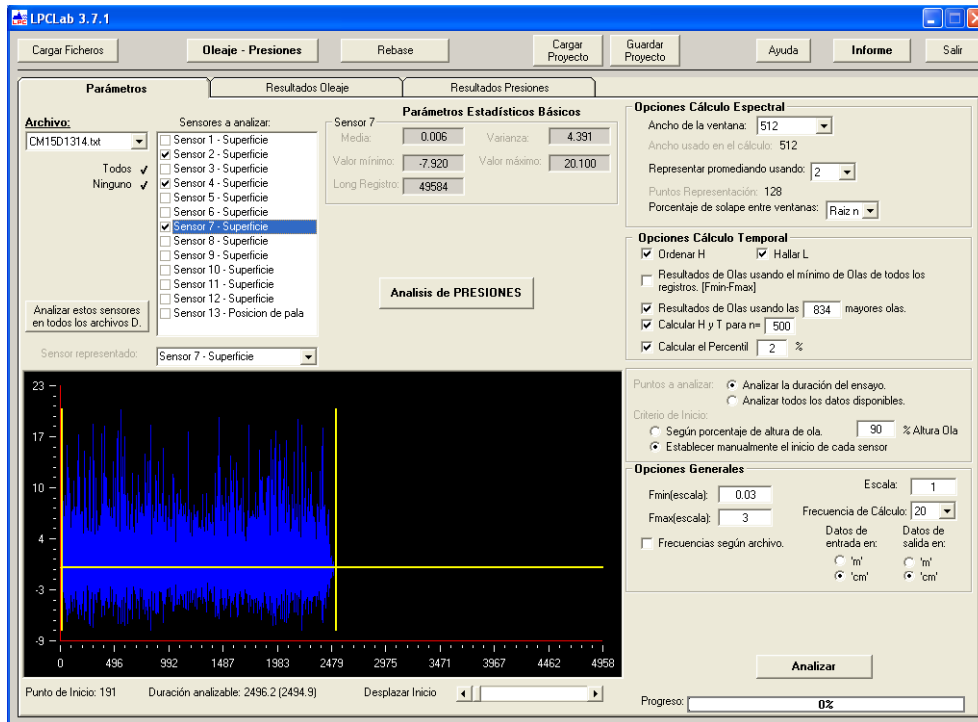


Figura 3.18. Aplicación LPCLab. Fuente: LPC-UPV.

3.6.2.3. SwanOne

SwanOne es un software desarrollado por la *Delft University of Technology (TU Delft)* basado en el programa Swan (Simulating WAVes Nearshore) pero utilizando un modelo unidimensional que asume la batimetría paralela (canal de oleaje). SwanOne permite modelar los siguientes fenómenos físicos, entre otros:

- Propagación de oleaje en tiempo y espacio, incluyendo los fenómenos de asomeramiento y refracción, producidos por la profundidad; y las corrientes y variaciones de frecuencia causadas por la profundidad y corrientes no estacionarias.
- Interacciones no lineales onda-onda.
- Generación de oleaje por viento.
- Rotura de oleaje por fondo

Como ya se ha comentado, 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. Esto hace que los métodos existentes para separar el oleaje incidente y reflejado no sean fiables. Es por esto por lo que se ha llevado a cabo simulaciones con SwanOne para determinar el oleaje incidente en la zona de modelo.

Los parámetros de entrada introducidos son la batimetría del canal y las condiciones de oleaje existentes en la zona de generación. Basándose en estas condiciones de oleaje, SwanOne crea un espectro JONSWAP con parámetro de pico $\gamma=3,3$ y lo propaga a lo largo de la longitud 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 $T_{m-1,0}$.

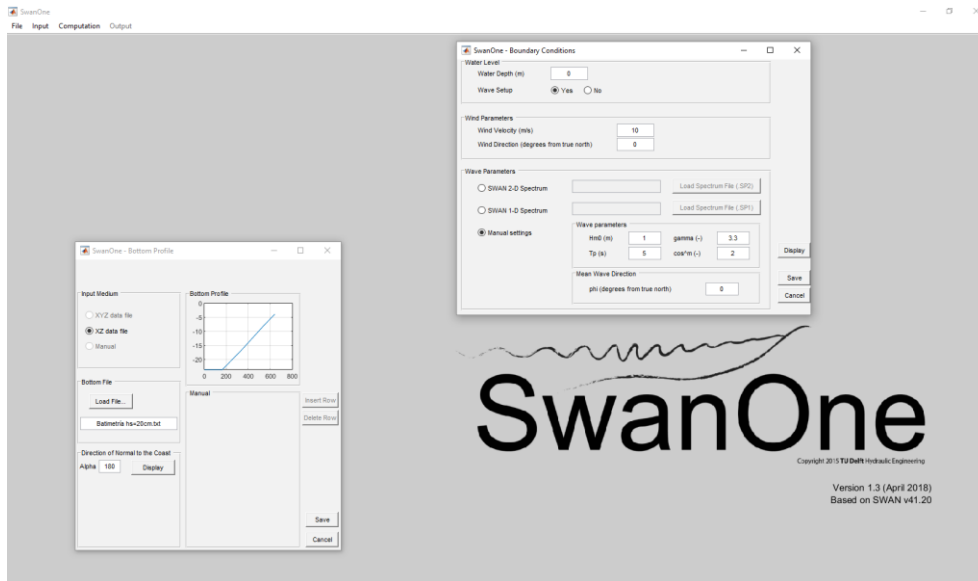


Figura 3.19. Software SwanOne de la TU Delft.

Como se ha mencionado, antes de realizar ensayos con la estructura construida, se han llevado a cabo los mismos ensayos en vacío (sin estructura). Esto permite tener condiciones de oleaje incidente únicamente, gracias al dissipador de energía colocado al final del canal. De esta manera, es posible validar los resultados obtenidos con SwanOne. Esta metodología fue validada por Herrera y Medina (2015), que compararon las estimaciones del modelo numérico de SwanOne con las mediciones en vacío en el canal de oleaje. En este proyecto se ha llevado a cabo una comparación similar.

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 (Figura 3.20). De igual forma se ha comparado también el periodo pico T_p (Figura 3.21). Esta comparación representa la capacidad del programa para reproducir y propagar el oleaje en condiciones de rotura por fondo.

Como puede observarse, los resultados obtenidos son muy buenos, con valores del coeficiente de correlación superiores a 0,98 y de R^2 muy cercanos a uno.

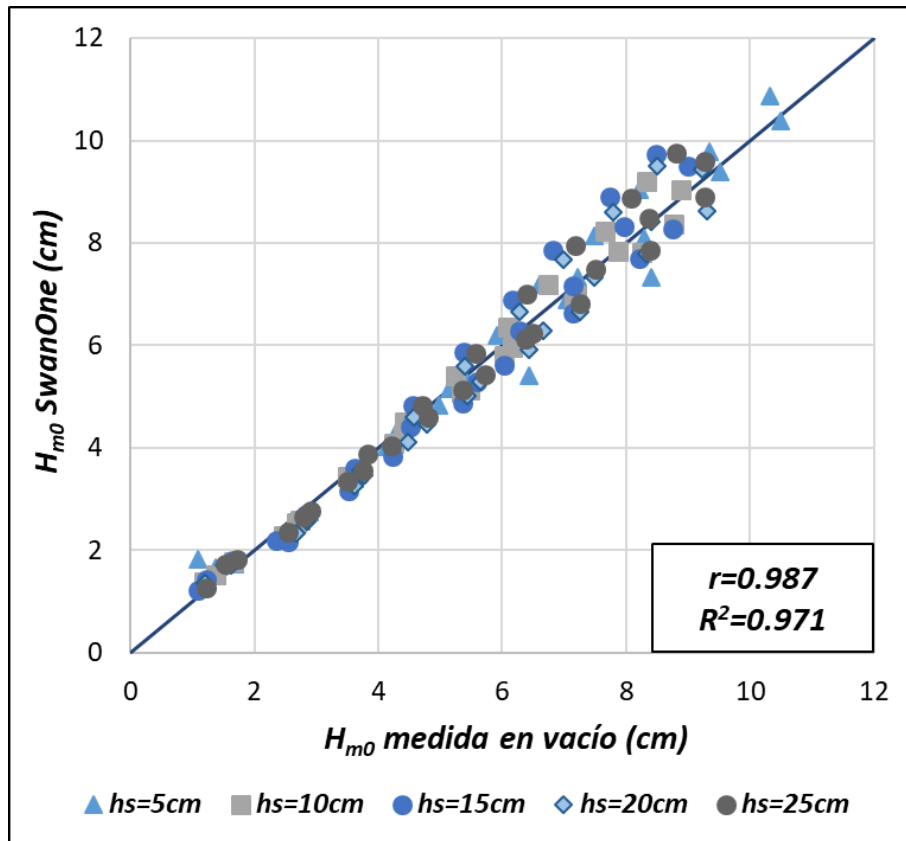


Figura 3.20. Comparación entre la H_{m0} medida en vacío y la calculada mediante SwanoOne en la zona de modelo. Fuente: Elaboración propia.

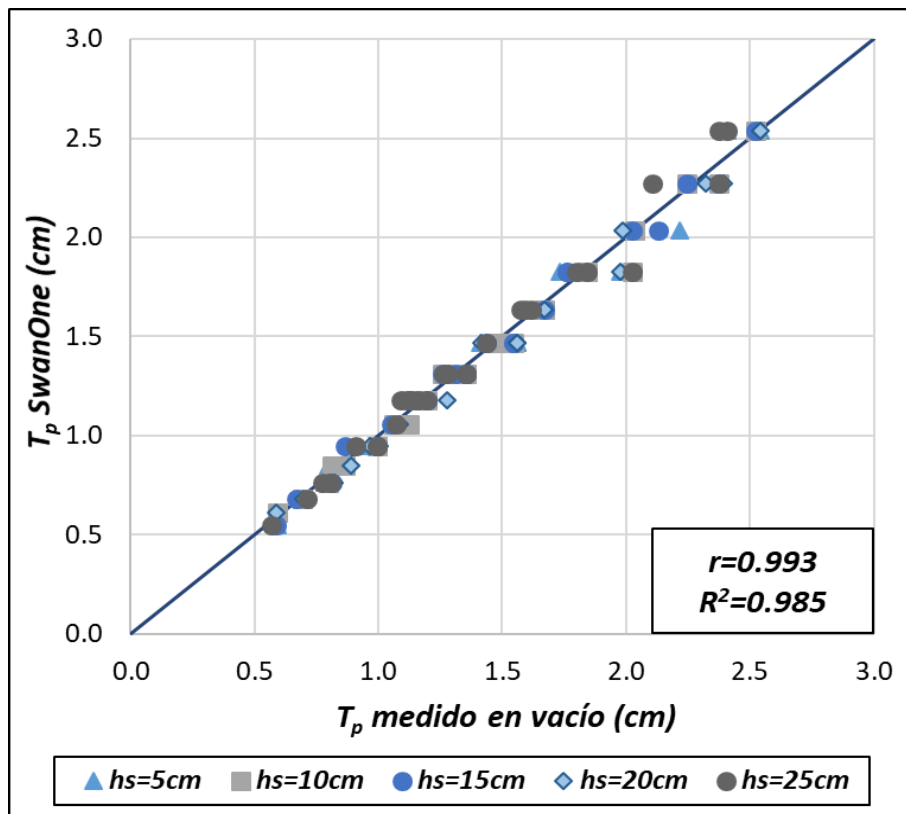


Figura 3.21. Comparación entre el T_p medida en vacío y el calculado mediante SwanoOne en la zona de modelo. Fuente: Elaboración propia.

3.6.3. Criterios de avería

La avería de las estructuras sujetas a la acción del oleaje se suele medir de forma cualitativa mediante criterios relacionados con cambios en la morfología de esta. Se suelen considerar dos límites cualitativos del daño en el manto principal: Inicio de Avería (IA) e Inicio de Destrucción (ID). El primero se refiere a un límite que implica pequeños movimientos de las piezas, mientras que el segundo se refiere al límite a partir del cual se produce el colapso progresivo de la estructura.

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

1. **Inicio de Avería (IA):** la capa superior del manto pierde varias unidades y existen algunos huecos del tamaño de las piezas claramente visibles.
2. **Inicio de Avería de Iribarren (IAI):** Descrito por Iribarren (1965), el daño en la capa superior del manto se ha extendido y concentrado en un área suficiente que permite la extracción de capas inferiores por la acción del oleaje.
3. **Inicio de Destrucción (IDe):** Cuando al menos un elemento de la capa inferior del manto ha sido extraído y el filtro es claramente visible.
4. **Destrucción (De):** Varias unidades del filtro han sido extraídas y el colapso de la estructura es cuestión de tiempo, incluso con oleajes de intensidad menos que el que provocó el nivel de Destrucción.

Gómez Martín (2015) define los niveles de avería para los diques en talud con manto monocapa de Cubípodos teniendo en cuenta que, al tener una sola capa, el IAI no puede existir y dada la capacidad de auto reordenación de los Cubípodos, es necesario modificar la definición del resto de niveles:

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 (IDe):** 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, dejando el filtro claramente visible.
3. **Destrucción (De):** Cuando varias unidades del filtro han sido extraídas y muchas unidades del manto han sido desplazadas de su posición original, de manera que el colapso de la estructura es cuestión de tiempo, incluso con oleajes de menor intensidad del que provocó el nivel de Destrucción.

En el caso de los diques homogéneos 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 Cubípodos:

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

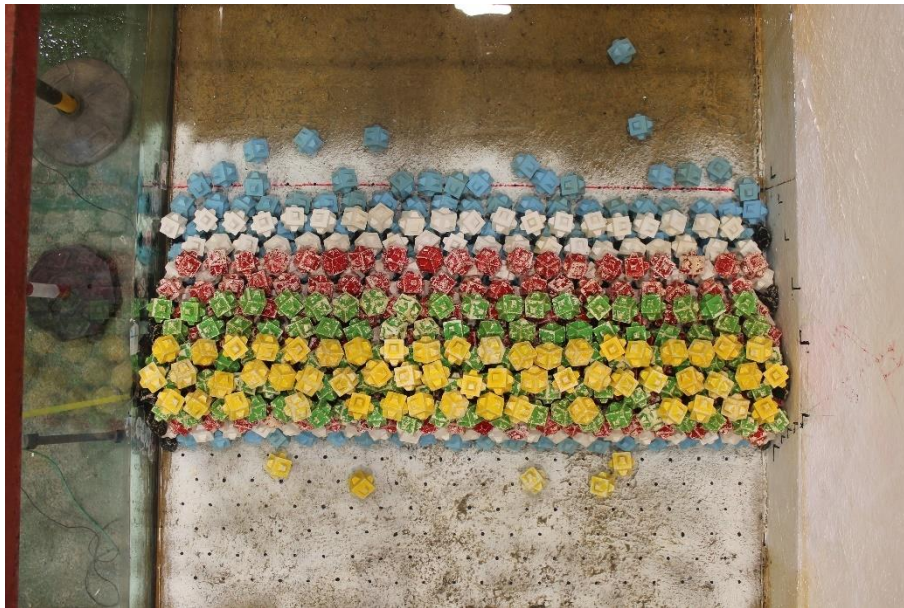


Figura 3.22. Inicio de Avería. Fuente: LPC-UPV.

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 3.23. Inicio de Destrucción. Fuente: LPC-UPV.

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



Figura 3.24. Destrucción de la estructura. Fuente: LPC-UPV

En el presente proyecto se considerarán únicamente los ensayos hasta el inicio de avería (48 ensayos) con el objetivo de analizar la transmisión para las estructuras en que todavía no se haya alcanzado este nivel de avería.

Por tanto, se ha llevado a cabo el cálculo del número de estabilidad (N_s) que se corresponde con el IA y el IDE. El número de estabilidad se define de la siguiente manera:

$$N_s = \frac{H_{m0}}{\Delta D_n} \quad (3.6)$$

Donde H_{m0} es la altura de ola significativa incidente, Δ es la densidad relativa sumergida ($[\rho_r/\rho_w]-1$), ρ_r es la densidad de la pieza, ρ_w es la densidad del agua y D_n es el lado del cubo equivalente de la pieza.

Una vez recogidos y analizados los ensayos correspondientes al inicio de avería e inicio de destrucción, se ha obtenido el número de estabilidad (N_s) medio. Como puede verse en la Figura 3.25, para el IA, $N_s = 1,4$, y para el IDE, $N_s = 2,3$.

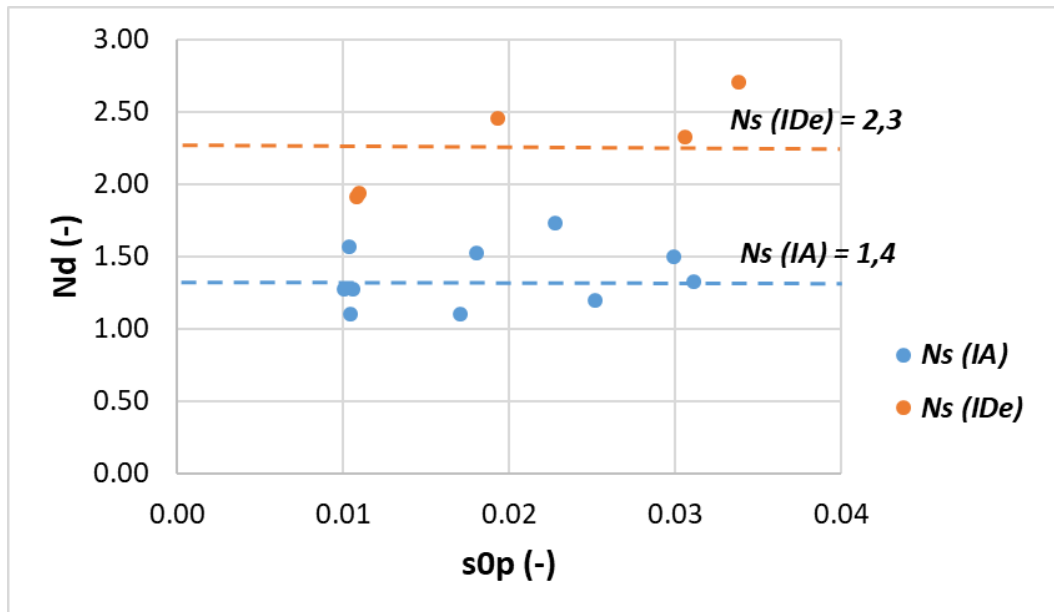


Figura 3.25. Obtención de $Ns(IA)$ y $Ns(IDe)$. Fuente: Elaboración propia.

3.6.4. Análisis de la transmisión

El análisis de la transmisión tras el modelo ensayado es uno de los objetivos de este proyecto. Para su obtención no es necesario realizar la separación de oleaje incidente y reflejado, ya que al final del canal, tras el modelo, se encuentra el dispositivo de disipación de energía mencionado en el *Apartado 3.1.2*, que evita la reflexión del oleaje. Por tanto, en la zona de transmisión (entre el modelo y el dissipador de energía) únicamente se tiene el oleaje que traspasa la estructura (oleaje transmitido). Para la obtención de las características de este oleaje se utiliza el software LPC-LAB descrito en el *Apartado 3.6.2.2*.

El oleaje transmitido es diferente para cada estructura, ya que es función de distintos parámetros tanto de la estructura como del oleaje. Para describirlo, se utiliza el coeficiente de transmisión K_t , que es el cociente entre la altura de ola significativa transmitida ($H_{m0,t}$) y la altura de ola significativa incidente ($H_{m0,i}$).

La altura de ola transmitida se obtiene mediante el análisis con la aplicación LPC-Lab de los estadísticos del oleaje registrado por los sensores de nivel situados en esta zona del canal. Por otro lado, para la altura de ola incidente se toma el valor obtenido mediante el modelo SwanOne siguiendo las recomendaciones de Mares-Nasarre et al. (2020).

$$K_t = \frac{H_{m0,transmitida}(LPC-Lab)}{H_{m0,incidente}(SwanOne)} \quad (3.7)$$



CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE PROGRAMA DE TRATAMIENTO DE IMÁGENES

4. Desarrollo de programa de tratamiento de imágenes

4.1. Motivación

El registro continuo del nivel de agua en el transcurso del tiempo es una de las principales herramientas que se tiene para llevar a cabo el análisis de los ensayos de oleaje. Este registro nos lo proporcionan los sensores de nivel descritos en el *Apartado 3.2.1*, y nos permite conocer parámetros del oleaje como la altura de ola significativa, el periodo pico, la altura máxima de ola o el periodo medio entre otros.

Como ya se ha comentado, los sensores capacitivos (DHI) presentan limitaciones a la hora del registro del oleaje en condiciones de rotura debido a la aireación del flujo. Por otro lado, las varillas de los sensores son intrusivas, se necesita tenerlas sumergidas en medio de la sección del canal continuamente para poder realizar la medición, lo que podría alterar el oleaje. Además, en las varillas se produce el fenómeno de capilaridad, lo que implica que la medición realizada siempre será algo mayor a la real. Asimismo, entre los sensores siempre hay que dejar una separación (ver *Apartado 3.2.1*), una limitación que impide poder tener mayor cantidad de registros en una zona específica. Así pues, la medición del registro de oleaje mediante los sensores utilizados en el canal del LPC-UPV es un método intrusivo que presenta pequeñas limitaciones.

Por esta razón, desde hace tiempo el LPC-UPV quiere desarrollar una metodología innovadora y no intrusiva a partir del análisis de vídeos. Carantino (2013) llevó a cabo un algoritmo para el análisis de imágenes de vídeo con el objetivo de detectar la altura del oleaje y el punto en que se producía su rotura.

En este proyecto se ha desarrollado un programa informático en MATLAB para, aplicando técnicas de tratamiento de imagen a los vídeos de los ensayos, obtener con precisión similar a la de los sensores capacitivos un registro temporal continuo del nivel de agua en cualquier punto del canal. De esta manera, se tendrá la posibilidad de conocer las características del oleaje en todos los puntos del canal que aparezcan en el vídeo. Esto supondría la generación de un método no intrusivo que no implicara la colocación de instrumentación dentro del canal de oleaje, evitando alteraciones en la medición.

El algoritmo desarrollado realiza primero una división del vídeo en imágenes o fotogramas. A continuación, realiza una corrección de la distorsión de las imágenes mediante la estimación de los parámetros relativos a la distorsión de la lente de la cámara y guarda un nuevo vídeo con las imágenes ya corregidas. Posteriormente, se lleva a cabo el tratamiento de imágenes mediante estructuras geométricas básicas y técnicas de detección de contornos. Después se procede a la medición del nivel de agua mediante operaciones algebraicas básicas entre imágenes y la conversión de distancia píxel-centímetro. Por último, se obtiene un archivo con la medición del nivel de agua en el transcurso del tiempo similar al proporcionado por los sensores DHI.

En el capítulo en que nos encontramos se describirá en primer lugar la instrumentación utilizada para grabar los ensayos en vídeo y el software empleado para poder llevar a cabo el programa

informático. Posteriormente se irá detallando cada uno de los pasos principales del algoritmo descritos en el párrafo anterior.

4.2. Software e instrumentación

4.2.1. MATLAB

Para llevar a cabo el algoritmo de tratamiento de imágenes se ha empleado el software MATLAB de MathWorks. Se trata de un entorno de programación y computación numérica utilizado para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos en un lenguaje de programación propio (lenguaje M). MATLAB proporciona “Toolbox” desarrolladas profesionalmente para procesamiento de señales e imágenes, sistemas de control, aprendizaje profundo e inteligencia artificial, etc.

En este caso, las “Toolbox” utilizadas son las siguientes:

- Computer Vision Toolbox: Proporciona algoritmos y funciones para diseñar y probar sistemas de procesamiento de vídeo, visión artificial y 3D. Se utiliza para realizar detección y seguimiento de objetos o calibración de cámaras simple y de ojo de pez entre otras funciones.
- Image Processing Toolbox: Proporciona un conjunto de algoritmos estándar para el procesamiento, análisis y visualización de imágenes, así como para el desarrollo de algoritmos. Permite llevar a cabo mejora de imágenes, reducción de ruido, segmentación de imágenes o transformaciones geométricas entre otras funciones.

4.2.2. Cámaras de red o IP

Para la grabación de vídeos de los ensayos se dispone de cámaras de vídeo de red, también conocidas como cámaras IP, ya que igual que un ordenador, estas tienen su propia dirección IP, funcionando directamente conectadas a la red. En el LPC-UPV hay un total de cuatro cámaras IP, dos AXIS P1355 y dos AXIS P1375.

Estas emiten señal de vídeo en directo, a la cual se puede acceder mediante una conexión a su dirección IP en una plataforma de visionado y manejo de las mismas. En el caso del Laboratorio de Puertos y Costas, se utiliza el sistema Synology Surveillance Station. Esta aplicación permite el control de la transmisión de vídeo de varias cámaras en tiempo real.



Figura 4.1. Cámara Axis P1375. Fuente:
Elaboración propia.

Esta herramienta, además de permitir la visualización de vídeo en directo, permite personalizar diversas opciones de grabación, así como controlar los siguientes parámetros que definen el vídeo:

- **Zoom:** Aumento óptico definido por la distancia focal y el ángulo de visión.
- **Foco:** Dispone de una opción de autofocus para visualizar la imagen lo más nítida posible.
- **Número de fotogramas por segundo (fps):** Se trata de la cantidad de imágenes consecutivas mostradas cada segundo de vídeo. Para evitar un tiempo de procesamiento muy grande, se ha fijado el número de fps en 10, lo que se traducirá en una frecuencia de toma de datos para la medición del nivel de agua de 10 Hz (un fotograma cada 0,1 segundos).
- **Resolución:** Define el tamaño de la imagen en píxeles. Se ha determinado una resolución de 1920x1080.
- **Bits por píxel (bpp):** Determina el número de colores distintos que pueden ser representados por un píxel.
- **Velocidad de bits (Kbps):** Define el número de bits que se transmiten por unidad de tiempo, es decir, la velocidad de transferencia de datos. Se ha fijado en 10000 kbps.

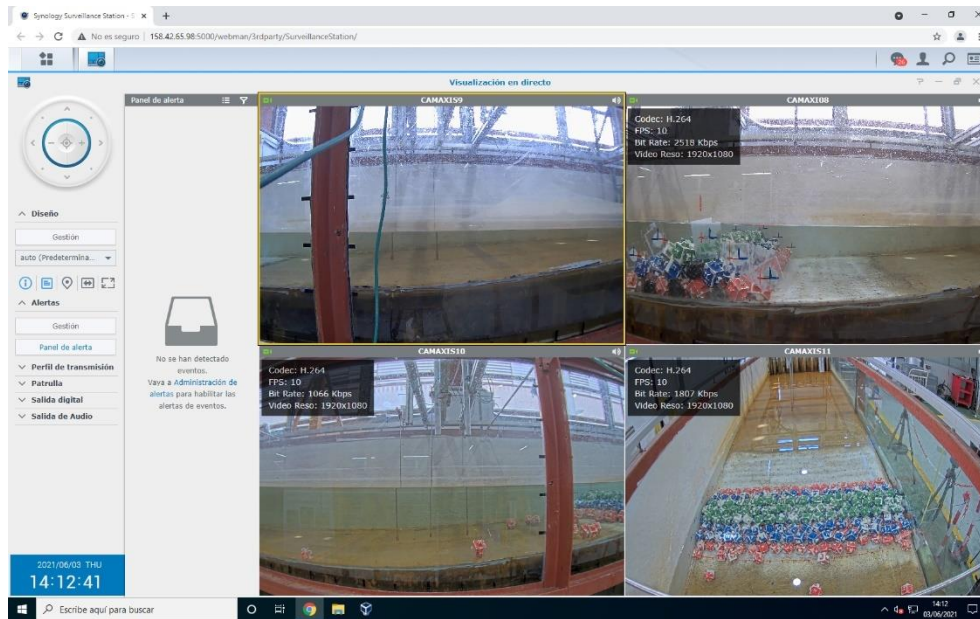


Figura 4.2. Aplicación Synology Surveillance Station. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la distribución de las cámaras utilizadas, como se puede ver en la Figura 4.3 se tiene una cámara fija (CAMAXIS10) apuntando a los sensores 6, 7 y 8, en la zona frente al modelo físico; y otra (CAMAXIS09) apuntando a los sensores 9, 10 y 11, en la zona de transmisión. Se han colocado en estos puntos para poder comprobar la eficacia del algoritmo comparando los datos obtenidos con los adquiridos por los sensores de nivel, cuyo desempeño está más que comprobado.

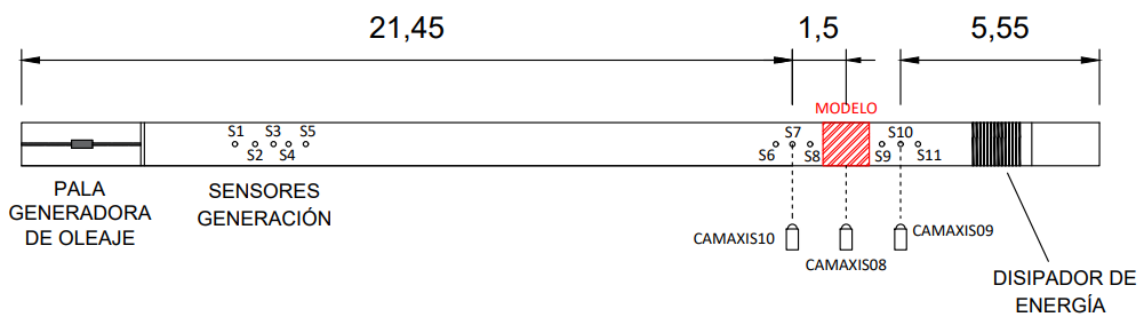


Figura 4.3. Sección del canal de oleaje en planta. Fuente: Elaboración propia.

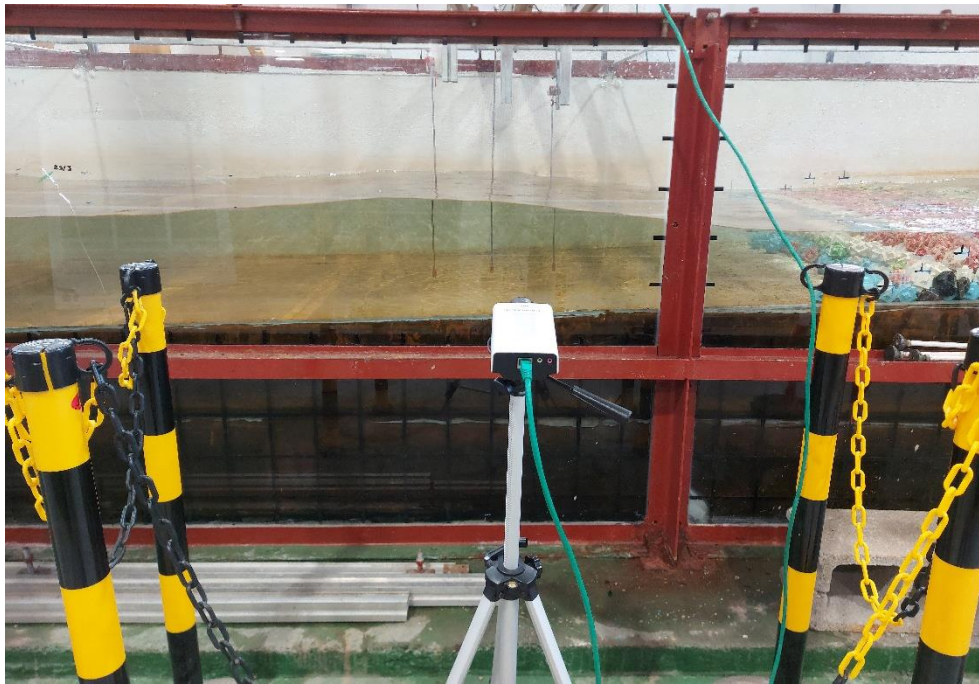


Figura 4.4. Situación de la cámara CAMAXIS10

4.3. División de vídeo en imágenes

Como se ha indicado en el apartado anterior, el número de fotogramas por segundo (fps) de los vídeos utilizados es 10, lo que indica que cada segundo de vídeo contiene 10 imágenes. Por lo tanto, la primera fase para llevar a cabo el programa que se quiere desarrollar es la separación del vídeo en fotogramas.

En MATLAB, se ha programado un bucle que permite ir recorriendo el vídeo fotograma a fotograma. De esta manera se obtiene un número de imágenes igual a la duración del vídeo en segundos por diez. Cada imagen obtenida tiene unas dimensiones de 1920x1080 píxeles y se representa en MATLAB como un conjunto de 3 matrices RGB de 1920x1080. Cada una de estas matrices corresponde a un color fundamental (Red, Green, Blue) y los elementos de la matriz representan la intensidad de este color en una escala de 0 a 256. Por tanto, la estructura de la imagen es 1920x1080x3.

4.4. Corrección de distorsión de imágenes

El desarrollo de un programa de tratamiento de imágenes tiene como objetivo disponer de un instrumento capaz de registrar el nivel del agua en el canal de oleaje. Por lo tanto, este debe llevar a cabo mediciones de distancia en imágenes y que estas se correspondan con la realidad.

Toda imagen lleva asociada cierta distorsión o deformación óptica que viene definida por las lentes y características de la cámara. Esto implica que para poder realizar mediciones precisas es necesario corregir esta distorsión al máximo, reduciendo así el error en la medición.

La corrección de la distorsión de la imagen permitirá también absorber errores debidos a la posición de la cámara, ya que su colocación puede no estar totalmente perpendicular al cristal del canal de oleaje.

4.4.1. Distorsión de imagen

En el proceso de formación de la imagen se forman distorsiones lineales derivadas de la proyección de puntos 3D sobre un plano 2D. Además, las lentes utilizadas producen distorsiones no lineales, desviando el sistema óptico de un comportamiento ideal e impidiendo reproducir matemáticamente la imagen de un objeto. La distorsión es una aberración geométrica que causa el desplazamiento de los puntos que componen una imagen respecto de su posición ideal.

La distorsión tiene componentes radiales y tangenciales. En la Figura 4.2 se aprecia la citada distorsión en las cuatro imágenes que aparecen.

4.4.1.1. Distorsión radial

Este tipo de distorsión es simétrica respecto al eje óptico y crea un desplazamiento de los puntos de la imagen hacia fuera o dentro respecto del punto principal de simetría. La distorsión radial ocurre cuando los rayos de luz se doblan más cerca de los bordes de la lente que en su centro óptico y es el resultado de la esfericidad de la lente. Cuanto más pequeña sea la lente, mayor será la distorsión.

En la Figura 4.5 se ven los tres ejemplos de distorsión: distorsión radial negativa o en corsé, en la que las rectas se curvan hacia dentro; distorsión radial positiva o en barril, en la que las rectas se curvan hacia los bordes de la imagen; y distorsión nula.

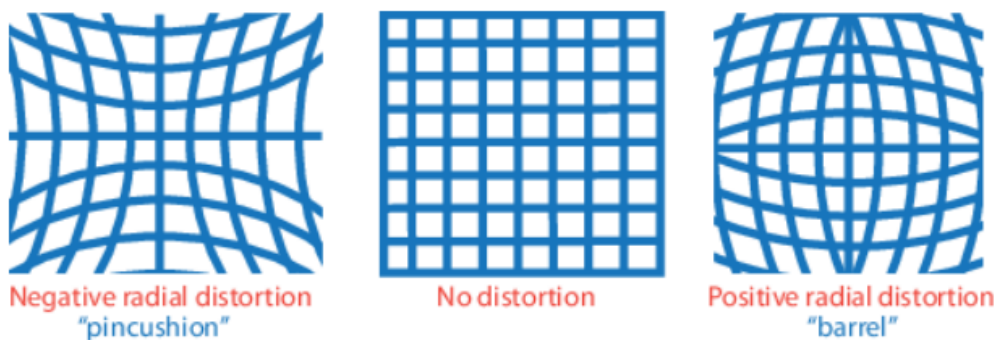


Figura 4.5. Tipos de distorsión radial. Fuente: MathWorks.

Los coeficientes de distorsión radial modelan este tipo de distorsión. Los puntos distorsionados se definen como:

$$x_{\text{distorsionado}} = x(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6)$$

$$y_{\text{distorsionado}} = y(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6)$$

Donde:

- x, y son las ubicaciones reales de los píxeles en coordenadas de imagen normalizadas.
- k_1 , k_2 y k_3 son los coeficientes de distorsión radial del objetivo

– $r^2=x^2+y^2$

4.4.1.2. Distorsión tangencial

Este tipo de distorsión se produce cuando la lente y el plano de la imagen no son paralelos. De forma parecida a la distorsión radial, la distorsión tangencial se modela mediante los coeficientes de distorsión tangencial. Los puntos distorsionados se definen como:

$$x_{distorsionado} = x + [2 + p_1 * x * y + p_2 * (r^2 + 2 * x^2)]$$

$$y_{distorsionado} = y + [p_1 * ((r^2 + 2 * x^2) + 2 * p_2 * x * y]$$

Donde:

- x , y son las ubicaciones reales de los píxeles en coordenadas de imagen normalizadas.
- p_1 y p_2 son los coeficientes de distorsión tangencial del objetivo
- $r^2=x^2+y^2$

4.4.1.3. Ojo de pez

Los objetivos ojo de pez tienen una lente de ángulo ancho que produce distorsiones visuales importantes. Estas lentes reproducen imágenes con apariencia convexa no rectilínea en lugar de apariencia rectilínea debido a una distancia focal muy corta.

4.4.2. Calibración de la cámara

La calibración de una cámara consiste en la estimación de los parámetros de la lente y del objetivo. Esta estimación permite corregir la distorsión producida en las imágenes, medir el tamaño de objetos en unidades globales o determinar la ubicación de la cámara en escena. Como se ha comentado anteriormente, en este proyecto se quiere calibrar la cámara para poder corregir la distorsión de los vídeos y poder medir en unidades reales.

Entre los parámetros de una cámara encontramos coeficientes intrínsecos, extrínsecos y de distorsión. Para estimar los parámetros se necesita disponer de los puntos reales 3D y sus correspondientes puntos de imagen 2D. Esta correspondencia se puede obtener mediante varias imágenes de un patrón de calibración conocido tomadas por la misma cámara.

Los parámetros intrínsecos representan una transformación proyectiva de las coordenadas de la cámara 3D a las coordenadas de la imagen 2D. Estos son la distancia focal, el centro óptico y el coeficiente de sesgo. Estos parámetros se recogen en la matriz intrínseca de la cámara:

$$K = \begin{bmatrix} F_x & 0 & 0 \\ s & F_y & 0 \\ c_x & c_y & 1 \end{bmatrix}$$

Siendo:

- c_x y c_y : los puntos principales del centro óptico en píxeles.
- F_x y F_y : la longitud focal en píxeles.
- s : coeficiente de sesgo, distinto de cero si los ejes de la imagen no son perpendiculares.

Por otro lado, los parámetros extrínsecos representan una transformación rígida del sistema de coordenadas del mundo 3D al sistema de coordenadas de la cámara 3D. Estos parámetros consisten en una rotación, R , y una traslación, t .

Para llevar a cabo la calibración, los puntos del mundo real se transforman en coordenadas de cámara utilizando los parámetros extrínsecos. Posteriormente, las coordenadas de la cámara se llevan al plano de la imagen mediante los parámetros intrínsecos (ver

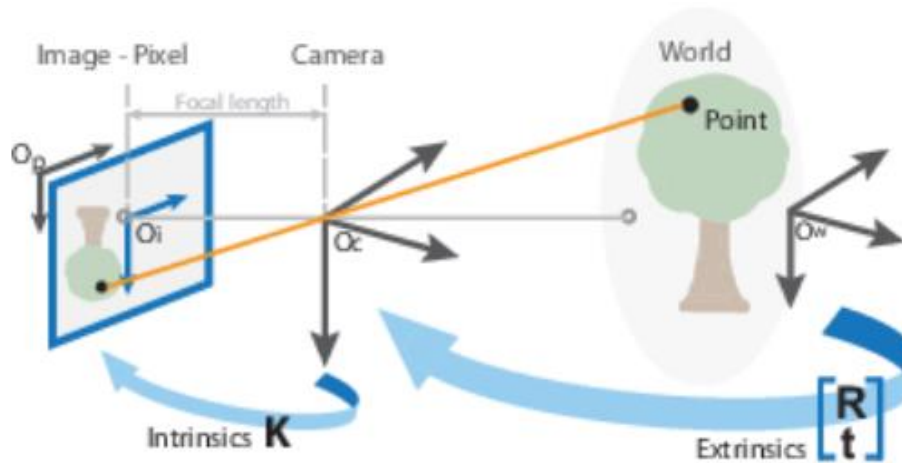


Figura 4.6. Esquema de calibración de imagen. Fuente: MathWorks.

4.4.3. Aplicación Matlab

MATLAB dispone de la aplicación *Camera Calibrator* dentro del bloque *Computer Vision Toolbox*. Esta permite calibrar una cámara mediante la estimación de los parámetros extrínsecos, intrínsecos y de distorsión de su lente.

Para el uso de esta aplicación es necesario preparar un patrón de calibración de tablero de ajedrez y capturar imágenes de este desde diferentes posiciones y orientaciones relativas de la cámara. Para una buena calibración es necesario tomar entre 10 y 20 imágenes diferentes del tablero de ajedrez. Este tablero de ajedrez debe estar formado por cuadrados alternos blancos y negros de una dimensión conocida, ya que esta será la clave para obtener la calibración.

Se debe agregar las imágenes en la aplicación, indicando la dimensión de los cuadrados del patrón. De esta forma el calibrador detecta los puntos de corte en el tablero de ajedrez (ver Figura 4.7), rechazando aquellas imágenes que no cumplen con los requisitos.

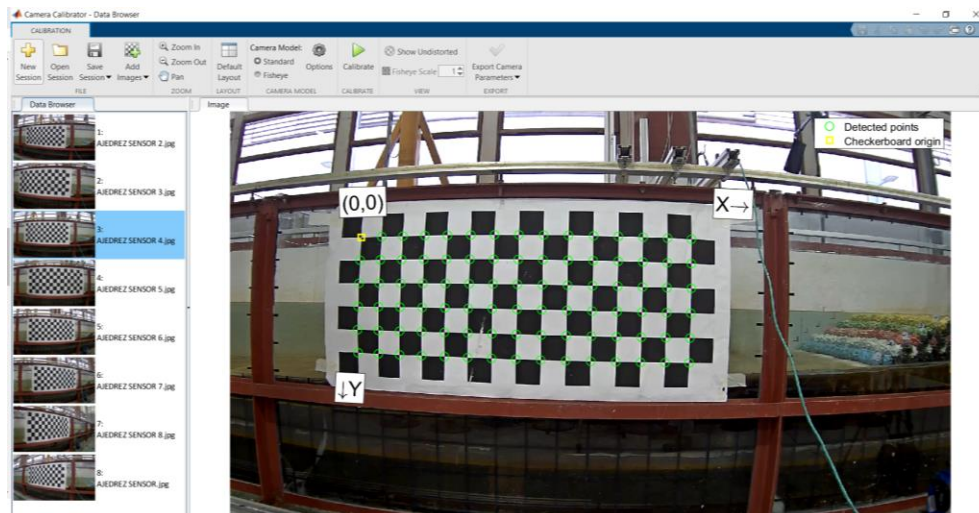


Figura 4.7. Detección de los puntos en el tablero de ajedrez. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se deben configurar las opciones de calibración seleccionando el tipo de cámara (estándar u ojo de pez), número de coeficientes de distorsión radial, y estimación de la distorsión tangencial y el coeficiente de sesgo.

Para evaluar la precisión de la calibración la aplicación nos permite examinar los errores de reproyección y visualizar los parámetros extrínsecos y la imagen corregida.

Tras realizar diversas pruebas, se ha llegado a la conclusión que para las cámaras de este proyecto la mejor opción es la selección de un modelo de cámara estándar, con tres coeficientes de distorsión radial y realizar la estimación de la distorsión tangencial y el coeficiente de sesgo, ya que de esta manera se obtiene el menor error de reproyección y el resultado obtenido tras la corrección de la imagen es adecuado.

Los errores de reproyección son las distancias, en píxeles, entre los puntos detectados y reproyectados. Como regla general, se aceptan errores medios menores a un píxel. En nuestro caso, los errores medios medidos son de 0,5 píxeles como se puede ver en la siguiente figura.

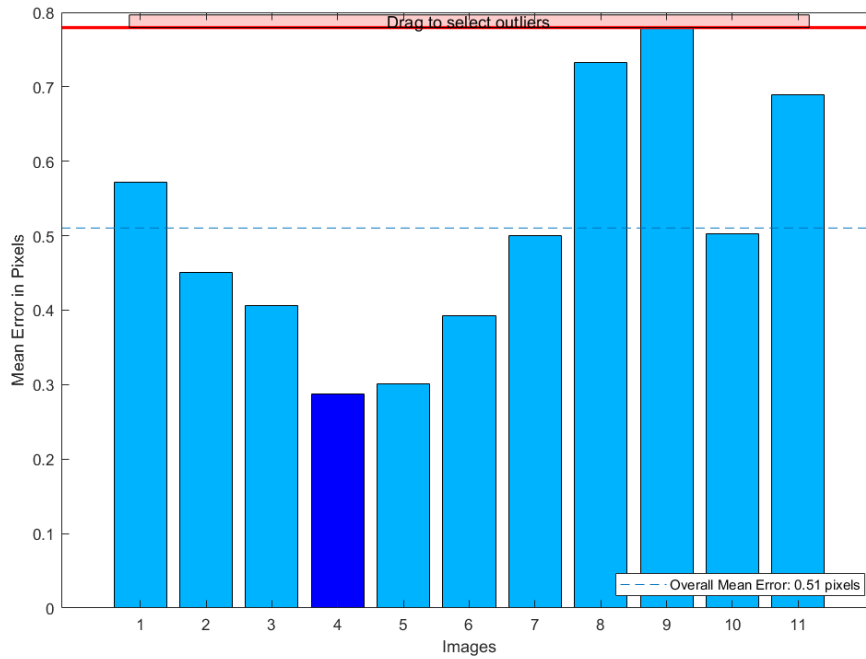


Figura 4.8. Errores de reproyección de imágenes corregidas. Fuente: Elaboración propia.

En la aplicación se puede visualizar un gráfico de los parámetros extrínsecos 3D con una vista de los tableros centrada en la cámara y una vista de la cámara centrada en el tablero. En la siguiente figura se muestra un ejemplo del resultado tras la calibración de una cámara.

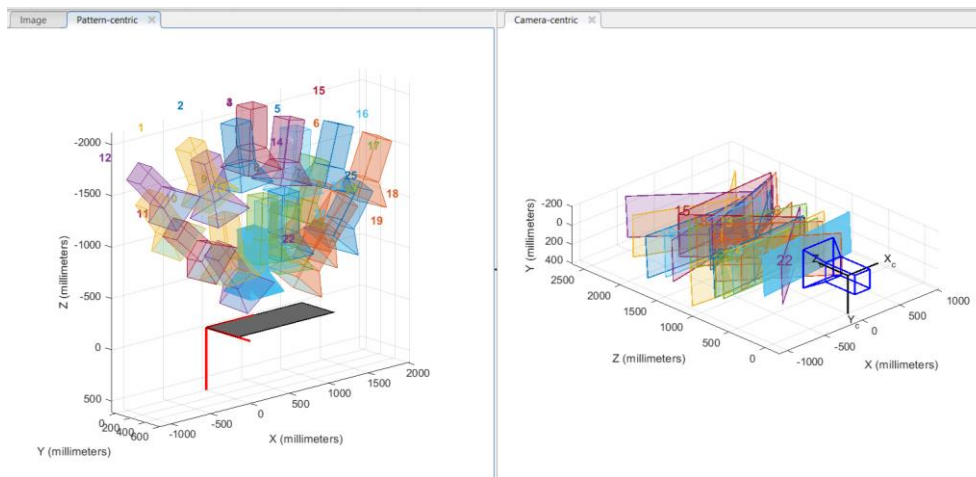


Figura 4.9. Gráfico de parámetros extrínsecos de cámara AXIS P1375. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 4.10 puede verse una comparación entre la imagen original tomada por la cámara y la imagen corregida.

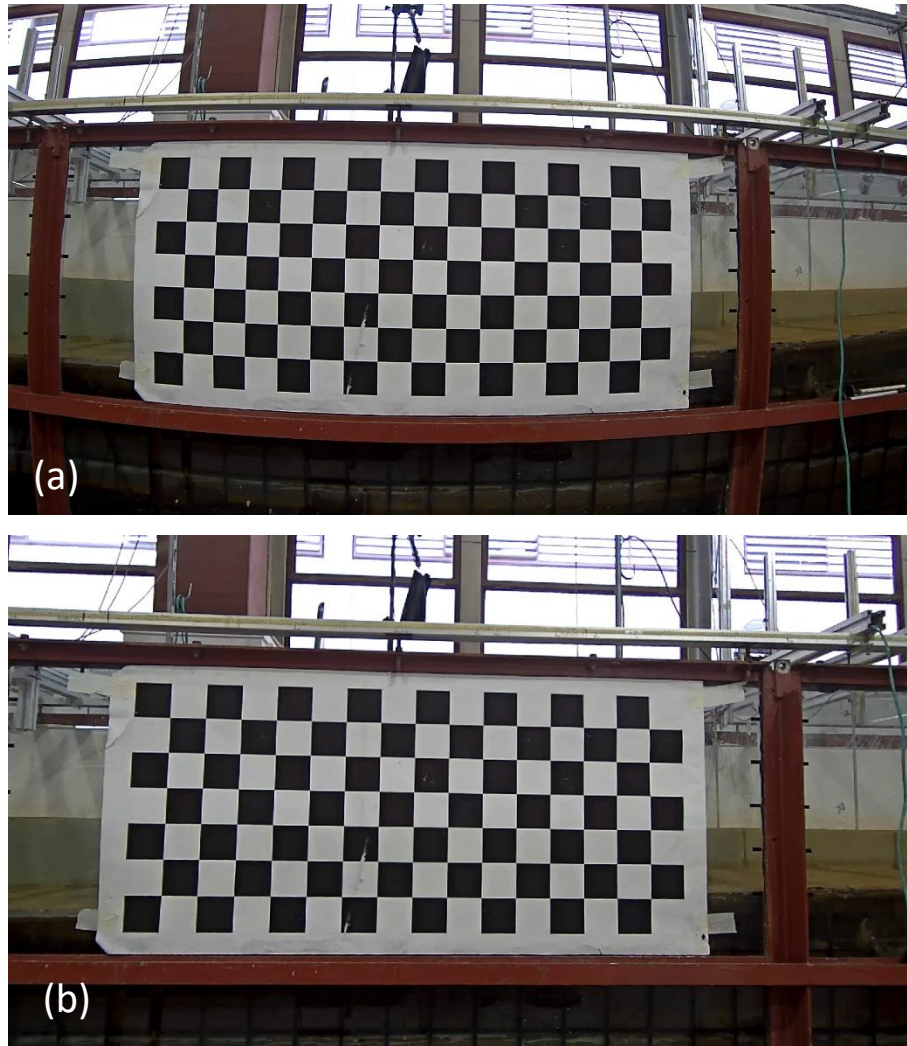


Figura 4.10. a) Imagen original y b) Imagen corregida. Fuente: Elaboración propia.

4.5. Detección de superficie libre

Una vez corregida la distorsión de las imágenes, nos encontramos en disposición de poder medir sobre estas. Antes de eso es necesario poder detectar la superficie libre del agua. De esta manera, se tendrá un registro continuo del oleaje fotograma a fotograma sobre el que poder medir alturas de ola.

Para ello, durante el desarrollo del programa se probaron diferentes algoritmos y funciones basadas en la segmentación de imágenes. La segmentación de imágenes es un proceso de clasificación que asigna una categoría a cada píxel de la imagen analizada. Los algoritmos de segmentación están basados en la discontinuidad o semejanza entre los niveles de gris de píxeles vecinos:

- Discontinuidad: Divide y clasifica los píxeles de la imagen basándose en cambios bruscos de intensidad de gris. Esta técnica da lugar a algoritmos de detección de puntos aislados, líneas y detección de contornos.
- Semejanza: Divide y clasifica la imagen basándose en zonas con valores similares a unos criterios prefijados. Dentro de esta categoría encontramos la umbralización y el crecimiento de regiones.

En el desarrollo del proyecto se han empleado tanto técnicas de discontinuidad como de semejanza para observar su desempeño en la labor que se quiere realizar. Concretamente, se han utilizado métodos de detección de contorno y de umbralización, descritos con mayor amplitud a continuación. Para estas pruebas, se ha utilizado un solo fotograma de un vídeo (Figura 4.11).



Figura 4.11. Fotograma extraído para pruebas de detección de contorno. Fuente: Elaboración propia.

4.5.1. Detección de contornos

En una imagen, un contorno o borde es una línea curva o recta en la que se produce un cambio brusco de intensidad en relación con los píxeles vecinos. Estos están relacionados con los límites

de los objetos o superficies de la fotografía. Las funciones básicas se basan en encontrar estos bordes mediante el cálculo de un operador local de derivación con uno de estos criterios:

- Lugares en los que la primera derivada de la intensidad es mayor que un umbral.
- Lugares en los que la segunda derivada de la intensidad tiene un cruce cero.

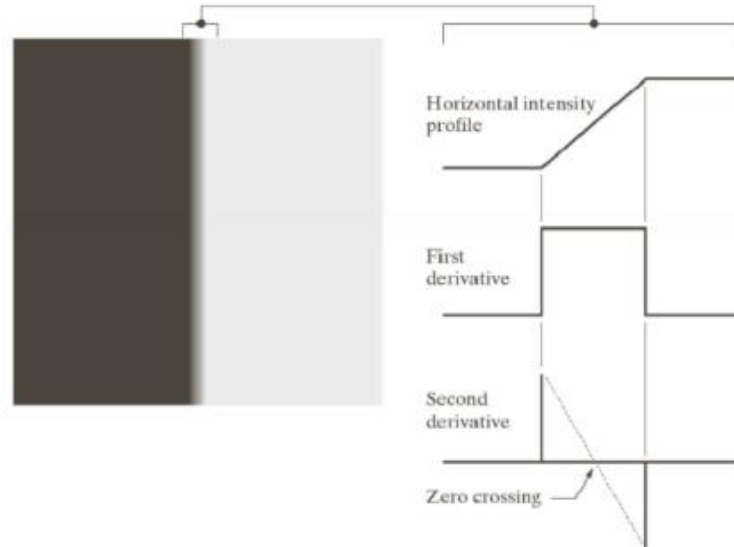


Figura 4.12. Esquema de detección de bordes. Fuente: <http://alojamientos.us.es/gtocom/pid/tema4.pdf>

Uno de los problemas derivados de esta metodología es que en la búsqueda de cambios marcados de intensidad también se puede detectar ruido.

Entre los métodos o filtros de detección de bordes podemos encontrar los siguientes:

- **Sobel:** Busca aquellos puntos en que el degradado de la imagen es extremo y los caracteriza como borde.
- **Kirsch:** Utiliza máscaras brújula de Kirsch (matrices) que representan 8 rotaciones en las direcciones principales. Por ejemplo, si al aplicar la primera máscara sobre un píxel se obtiene el mayor valor, quiere decir que existe un borde en dirección vertical. Para llevarlo a cabo, se realiza una convolución aplicando todas las máscaras a cada píxel.
- **Marr-Hildreth:** Aplica un filtro Gaussiano y calcula el Laplaciano de la imagen resultante, determinando los píxeles de “paso por cero”.
- **Prewitt:** Busca aristas en aquellos puntos donde el degradado es máximo utilizando la aproximación de Prewitt a la derivada primera.
- **Roberts:** Utiliza la aproximación de Roberts a la derivada primera mediante la aplicación de máscaras.
- **Canny:** Se trata del método más potente. Este se distingue del resto en que emplea dos umbrales distintos para detectar bordes fuertes y débiles, incluyendo los bordes débiles únicamente si tienen conexión con los fuertes. Consiste en la aplicación de un filtro gaussiano para eliminación de ruidos (suaviza la imagen) y el cálculo de gradientes de variación de intensidad en píxeles en direcciones vertical y horizontal a partir de los

cuales se determina el gradiente de borde y su dirección. Finalmente aplica un proceso de doble umbralización.

MATLAB dispone de funciones que permiten la aplicación de algunos de estos tipos de filtro. El input de estas funciones es la imagen en la cual se quiere detectar los bordes. Como output devuelve una imagen binaria con los bordes encontrados mediante el algoritmo especificado, pudiendo incluir umbrales de sensibilidad. Entre los métodos de detección de contornos que incorpora están: Sobel, Prewitt, Roberts y Canny.

Para comparar su eficacia, se implementaron los cuatro y se procedió a la comparación de las cuatro imágenes con los bordes detectados obtenidos (ver Figura 4.13).

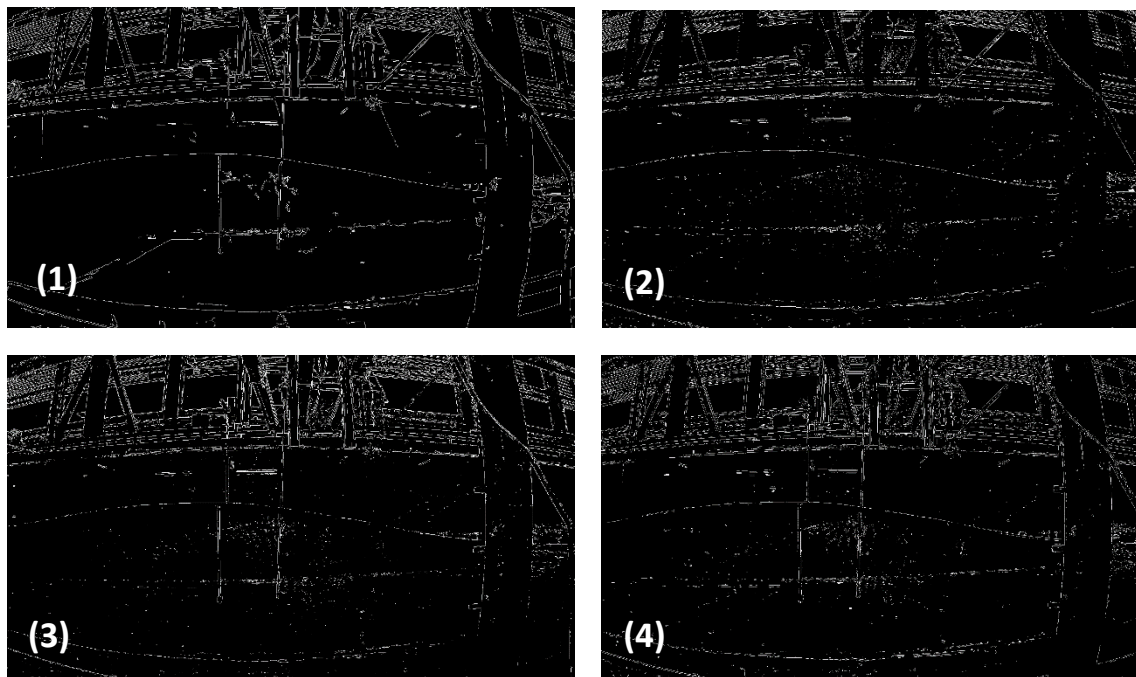


Figura 4.13. Comparación de métodos de detección de contornos: Canny (1), Prewitt (2), Roberts (3) y Sobel (4). Fuente: Elaboración propia.

Los cuatro métodos tienen un desempeño parecido. Cabe destacar que cuando se utilizó el método de Prewitt (2), se implementó también un filtro mediante gradientes para evitar detectar bordes marcadamente verticales, lo que como puede verse claramente en la zona de los sensores funciona bastante bien.

Puesto que el objetivo de implementar estos algoritmos es la detección de la superficie libre del agua se recortó las imágenes para centrar la atención en la zona en que esta aparece:



Figura 4.14. Detección de la superficie libre de agua mediante el algoritmo de Prewitt. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la figura anterior, en una primera aproximación se logra la detección de la superficie del agua en la imagen. Sin embargo, para tener una imagen en la que se pueda medir distancias a esta curva y registrar el oleaje todavía sería necesario aplicar un filtro con el que se eliminara el ruido que puede verse en la imagen e interpolar los puntos de la curva que se han perdido en la detección de bordes. Antes de implementar estas cuestiones en el programa, se decidió probar la segmentación de la imagen mediante umbralización.

4.5.2. Umbralización

La umbralización es un método de segmentación de imágenes que consiste en convertir una imagen en escala de grises a una nueva imagen binaria con solo dos niveles (blanco o negro), con el objetivo de separar y diferenciar un objeto del fondo de una imagen. Esto se conoce también como segmentación binaria o binarización, que consiste en operar sobre cada píxel de manera independiente clasificándolo en función de su intensidad de gris en relación con el umbral dado. Todos los niveles de grises menores a este umbral se convertirán en blanco y los mayores en negro.

De alguna manera, este método es similar a las técnicas de detección de contornos, ya que también consiste en clasificar los píxeles en función del gradiente de intensidad, lo que permite detectar bordes.

4.5.3. Técnica utilizada

Durante las pruebas de detección con las dos técnicas comentadas se pensó que lo más conveniente era trabajar previamente sobre las imágenes para reducir al máximo las probabilidades de encontrar ruido que dificultara la detección de la superficie libre. Por ello, se investigó sobre la posibilidad de realizar operaciones aritméticas básicas sobre imágenes.

La aritmética de imagen se utiliza mucho en procesamiento de imágenes como paso previo para operaciones más complejas, como es el caso. Es por esto por lo que se decidió utilizar la resta entre los fotogramas del vídeo.

La idea es comparar cada imagen de instante “t” del vídeo con la imagen inicial ($t=0$) de este, cuando todavía no ha comenzado el ensayo. Con la resta de estas imágenes se obtienen las diferencias entre las dos, es decir, se eliminan aquellos elementos que se encuentran en la misma posición durante el vídeo y se mantienen aquellos que se encuentran en movimiento, es decir, el oleaje. Las imágenes fruto de esta diferencia se corresponden con las crestas y valles de las ondas del oleaje por encima y por debajo del nivel inicial del agua antes del comienzo del ensayo. Además, se consigue eliminar parte del ruido que se obtenía mediante los algoritmos

de detección de bordes y los contornos relativos a la estructura del canal, ventanas y demás objetos del laboratorio que aparecen en los vídeos.

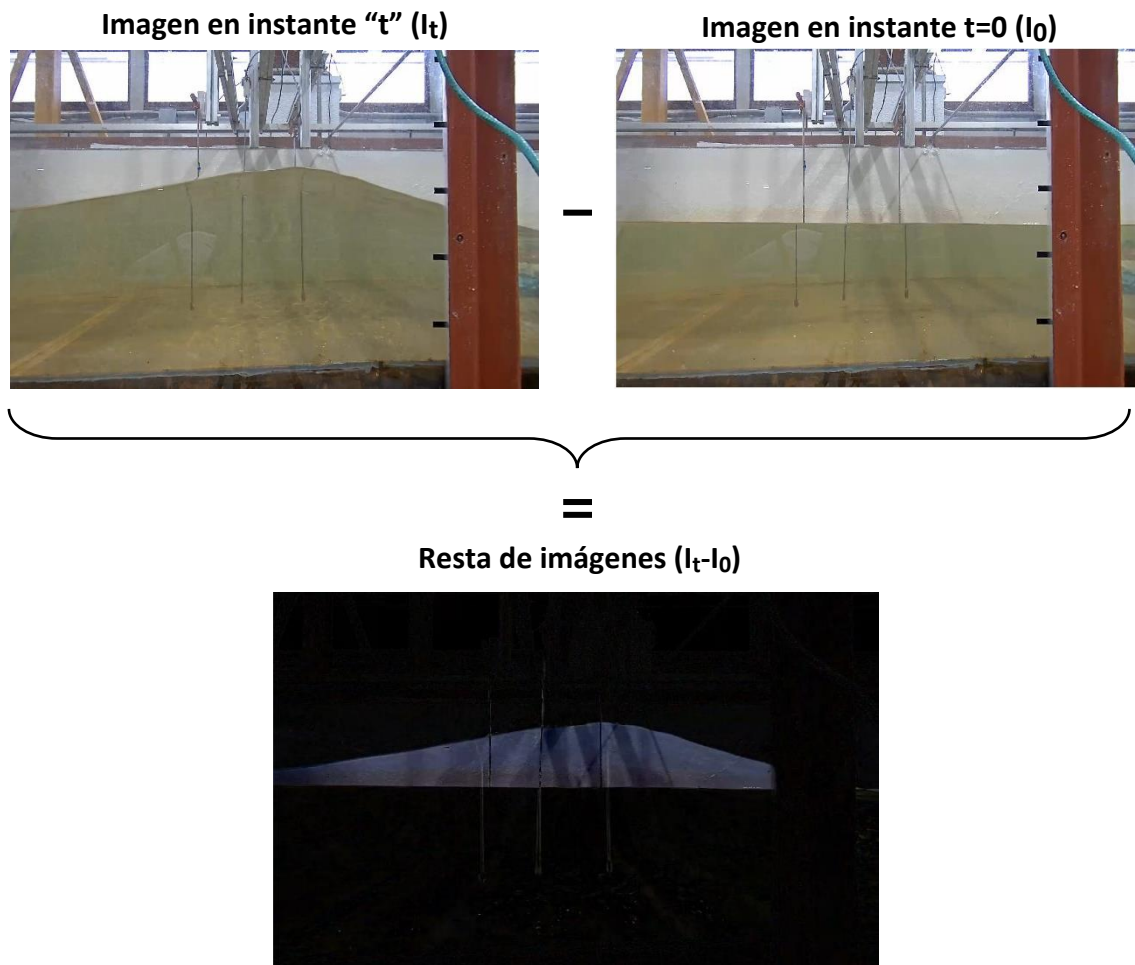


Figura 4.15. Resultado de resta entre imágenes. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se procede al tratamiento de la imagen obtenida mediante segmentación por umbralización, ya que se ha comprobado que resulta más eficaz en términos de coste computacional y eficiencia del programa. A continuación se muestra el proceso seguido:

1. El primer paso consiste en convertir la imagen obtenida por diferencia (en formato RGB) en una imagen en escala de grises. Esta última toma valores de gris entre 0 y 1 en función de la intensidad siendo 0 el color negro y 1 el color blanco.



Figura 4.16. Imagen I_t-I_0 en escala de grises. Fuente: Elaboración propia.

2. A continuación se aplica un umbral de grises, lo que implica que cada píxel de la imagen tomará valor de 0 o 1 en función de si se encuentra por encima o debajo de este umbral. De esta forma se crea una imagen binaria formada por ceros (color negro) y unos (color blanco), teniendo en color blanco el área existente entre la cresta o valle de la ola en el instante "t" de la imagen y el nivel inicial de agua en el instante $t=0$.

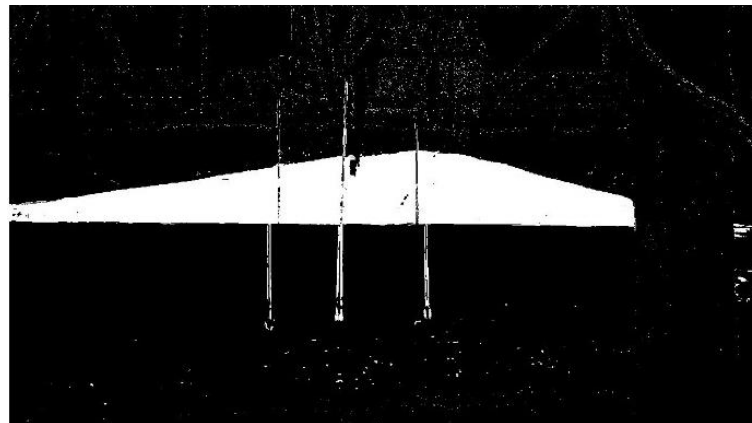


Figura 4.17. Imagen I_t-I_0 binarizada. Fuente: Elaboración propia.

3. El siguiente paso es la eliminación del ruido visible en la Figura 4.17, de forma que se aísle la ola para poder realizar mediciones sobre ella. Para eliminar este ruido se aplica una serie de filtros formados por elementos estructuradores con morfologías básicas.

Un elemento estructurador es un elemento matricial de morfología plana o tridimensional concreta (cubo, cuadrado, esfera, círculo, etc.) que se aplica a cada píxel de la imagen procesada de manera que analiza los píxeles vecinos con el objetivo de determinar si presentan morfologías similares a la del elemento estructurador. Si no presentan una morfología similar, cambia el valor de blanco a negro. En este caso, para eliminar el ruido se ha utilizado un elemento estructurador plano rectangular, con los resultados visibles en la Figura 4.18.

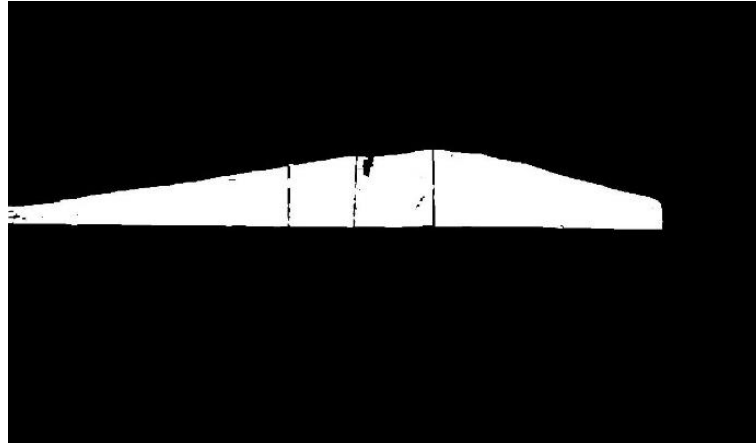


Figura 4.18. Imagen $I_t - I_0$ tras aplicar el filtro rectangular. Fuente: Elaboración propia.

4. Finalmente, para poder realizar mediciones sobre la imagen como si de un sensor se tratara en cualquier columna, es necesario rellenar los huecos libres que quedan dentro del área blanca. Para ello, se aplica un segundo elemento estructurador, en este caso circular, obteniendo la ola aislada.



Figura 4.19. Imagen con la ola del instante "t" aislada. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de proporcionar una imagen más visual del aislamiento de la ola, en la Figura 4.20 se ha superpuesto la ola aislada con el fotograma del vídeo correspondiente.

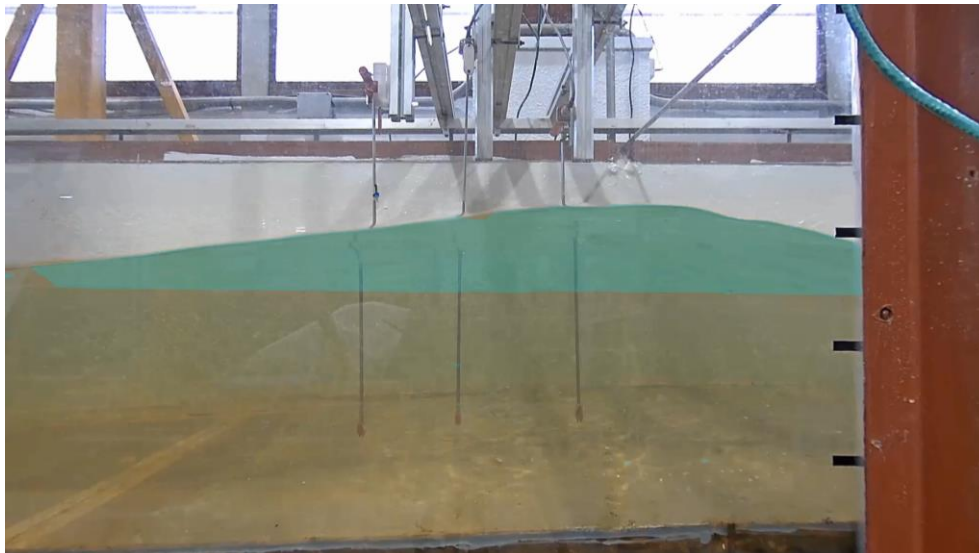


Figura 4.20. Superposición de la ola aislada en su fotograma correspondiente. Fuente: Elaboración propia.

A modo de resumen, a continuación se presentan los pasos seguidos para llevar a cabo la detección del nivel de la superficie del agua en el canal:

1. Resta de imagen en el instante “t” y en el instante inicial ($t=0$).
2. Transformar la imagen RGB obtenida tras la resta en una imagen en escala de grises.
3. Aplicación de un umbral para transformar la imagen en escala de grises en una imagen binaria.
4. Eliminación del ruido mediante elementos estructuradores de morfología rectangular plana.
5. Relleno de los huecos mediante elementos estructuradores de morfología circular plana.

4.6. Medición del nivel de agua

Una vez obtenida y aislada la superficie de la imagen correspondiente a la ola, se está en disposición de medir sobre ella la distancia respecto al nivel inicial del agua. Para ello es necesario obtener primero la relación entre la dimensión de un píxel en la imagen con su dimensión real en centímetros.

Para obtener el registro de oleaje se procede de forma similar al funcionamiento de los sensores capacitivos descritos en el *Apartado 3.2.1*. Estos miden diferencias de conductividad del volumen de agua, con relación al nivel inicial del ensayo, transformando este valor en distancia (cm) posteriormente.

Con el programa desarrollado se pretende obtener el registro de oleaje mediante la medición de la diferencia del nivel de agua en cada fotograma con respecto al nivel inicial del ensayo en píxeles, transformándolo después en centímetros. En este caso se tendría tantos sensores como columnas de píxeles tiene la imagen (1920).

Aplicando este procedimiento en cada uno de los fotogramas de un vídeo se obtendría el registro del oleaje del ensayo completo con una frecuencia de 0,1 segundos, ya que la frecuencia de fotogramas en un vídeo es de 10 Hz (10 fotogramas por segundo). El nivel inicial del ensayo correspondería al “cero”, midiendo distancias positivas en las crestas de las olas y negativas en los valles de estas.

4.6.1. Conversión Píxel-Cm

Para la obtención de la relación de conversión píxel/cm que permitirá obtener el registro de oleaje en unidades de longitud se ha implementado una interfaz gráfica en MATLAB. En esta se muestra la imagen correspondiente al instante inicial del vídeo (I_0). La interfaz guía al usuario en los pasos a seguir para realizar la calibración espacial y obtener la relación de conversión mencionada.

En primer lugar, se debe trazar una línea que conecte dos puntos cuya separación se conozca de antemano. Para ello, en el borde del cristal del canal, junto al perfil, se ha dejado una serie de marcas con cinta adhesiva que se encuentran separadas 10 centímetros. Una vez trazada la línea, se pide introducir su longitud y unidades en coordenadas reales.

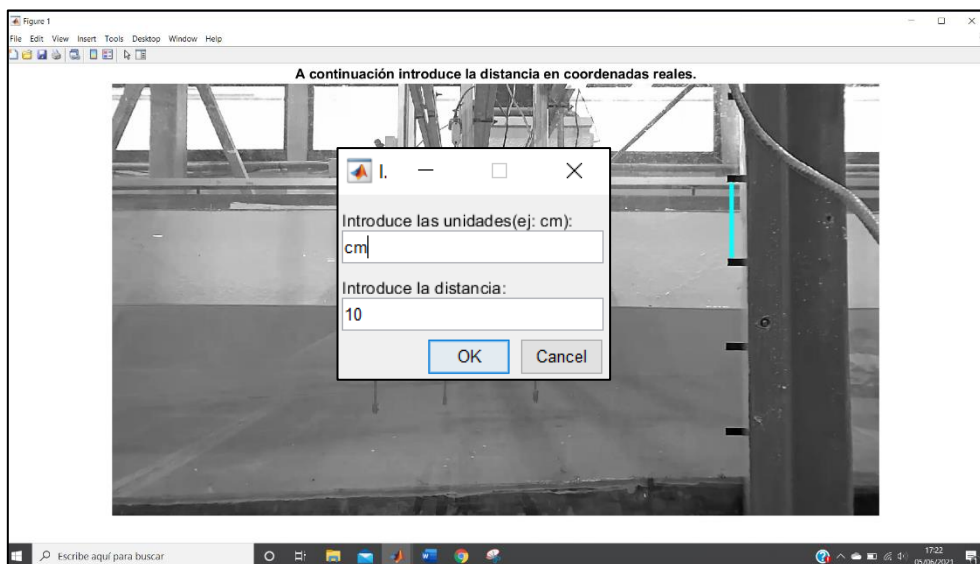


Figura 4.21. Interfaz gráfica para calibración espacial. Fuente: Elaboración propia.

Al trazar la línea, se conoce la cantidad de píxeles que separan las marcas de cinta adhesiva y con una simple operación se obtiene la relación cm/píxel que caracteriza las imágenes. A modo de comprobación, la interfaz permite comprobar si la calibración espacial es buena solicitando al usuario el trazado de una nueva línea (amarilla) y devolviendo la longitud de esta tanto en centímetros como en píxeles (ver Figura 4.22).

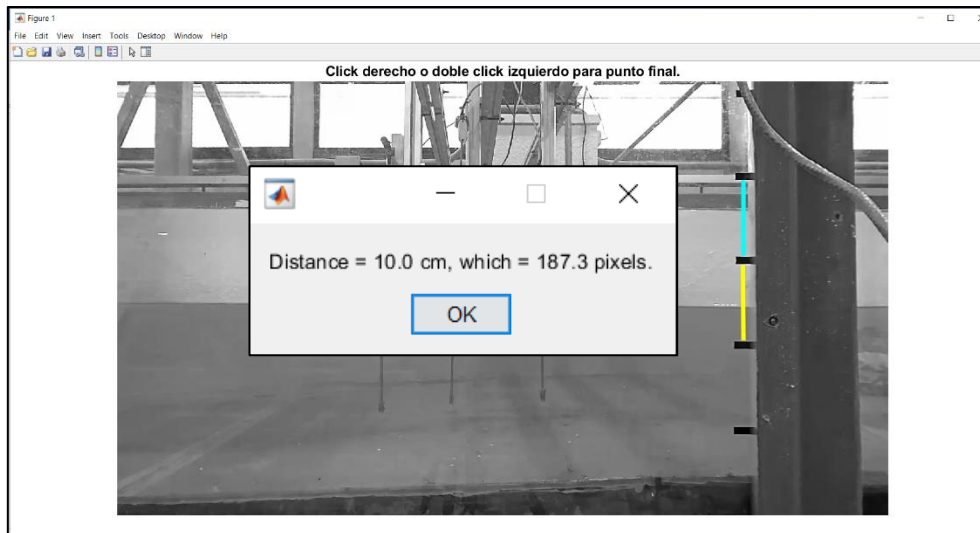


Figura 4.22. Comprobación de la calibración. Fuente: Elaboración propia.

La calibración de la relación Cm/Píxel es válida para los parámetros de la cámara y de la corrección de distorsión establecidos. Por tanto, es necesario volver a obtenerla si se modifica alguno de estos. A continuación se muestra una tabla que incluye el valor de esta relación para las cámaras utilizadas. Cabe destacar que la diferencia entre estas es mínima, lo que indica un buen funcionamiento del método.

Cámara	Cm/Píxel
CAMAXIS08	0,055
CAMAXIS09	0,053
CAMAXIS10	0,057

Tabla 4.1. Valores de la relación Cm/Píxel. Fuente: Elaboración propia.

4.6.2. Medición en sensores virtuales

Para llevar a cabo la medición y obtener el registro del oleaje se trata cada columna de la imagen como si fuera un “sensor virtual”. Es necesario definir en qué fila de la imagen se encuentra el “cero” de la medición, que es igual al nivel de agua antes de comenzar el ensayo.

A partir de este nivel cero se realiza un conteo fotograma a fotograma de los píxeles con un valor de 1 (color blanco) diferenciando aquellos que se encuentran por encima y por debajo del nivel inicial (ver Figura 4.23). Una vez hecho esto, se resta el número de píxeles positivos menos el número de píxeles negativos y se aplica la conversión Píxel-Centímetro, obteniendo así la elevación del agua.

Realizando esta medición en cada uno de los fotogramas del vídeo se obtiene el registro de oleaje final.

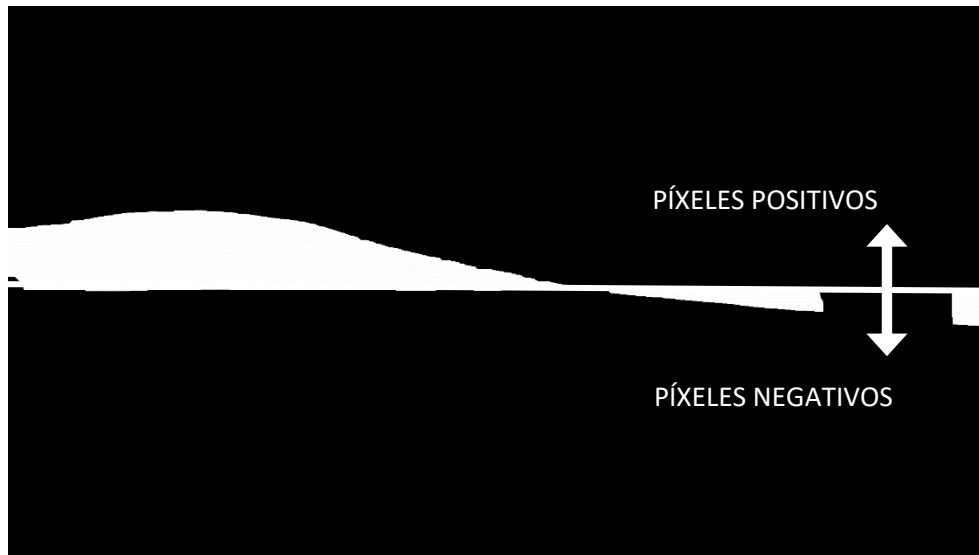


Figura 4.23. Medición de nivel de agua en imagen. Fuente: Elaboración propia.

4.6.3. Registro de oleaje obtenido

Tras realizar todas las operaciones anteriores se está en disposición de representar el registro de oleaje a lo largo del tiempo de ensayo. Las siguientes figuras muestran dos ejemplos de registro de oleaje detectado mediante el programa desarrollado en un ensayo regular y en uno irregular.

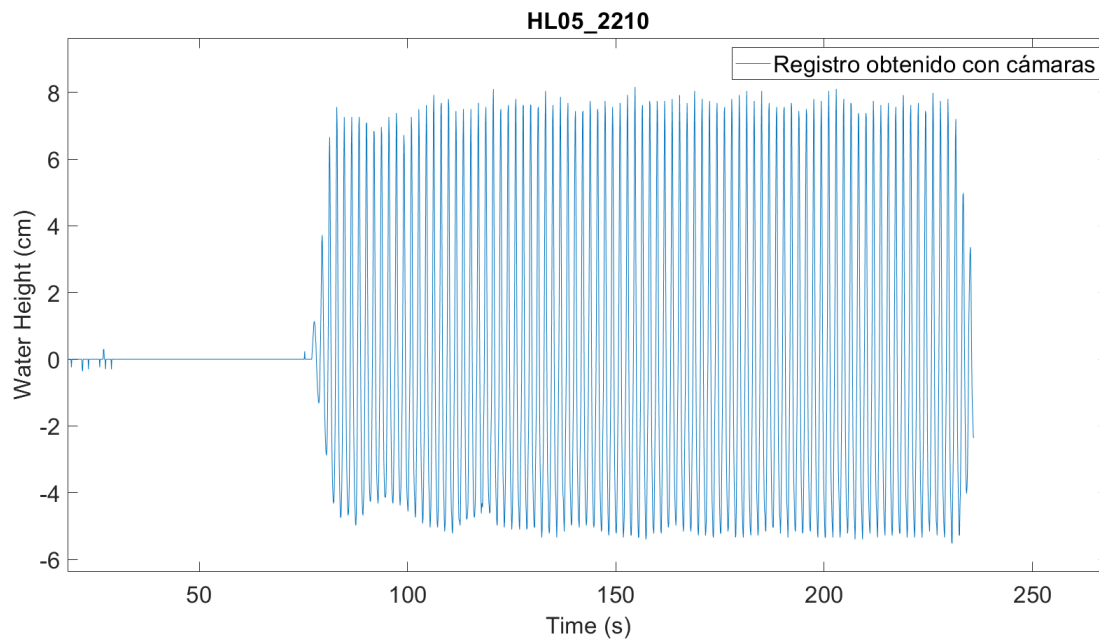


Figura 4.24. Registro obtenido mediante cámaras del ensayo regular HL05_2210. Fuente: Elaboración propia.

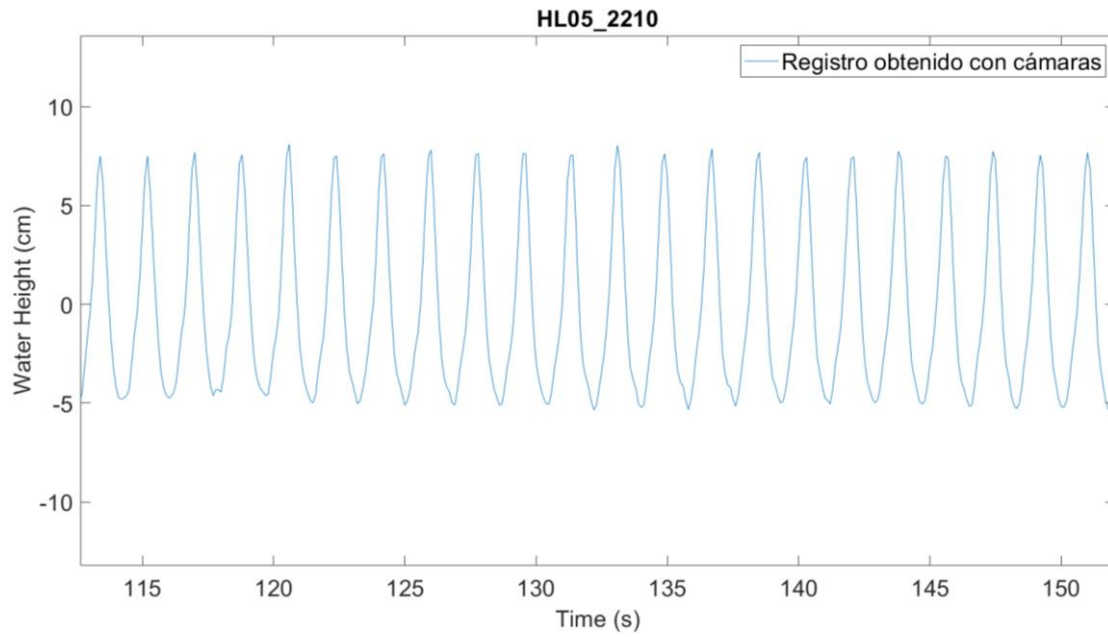


Figura 4.25. Detalle de la Figura 4.24. Fuente: Elaboración propia.

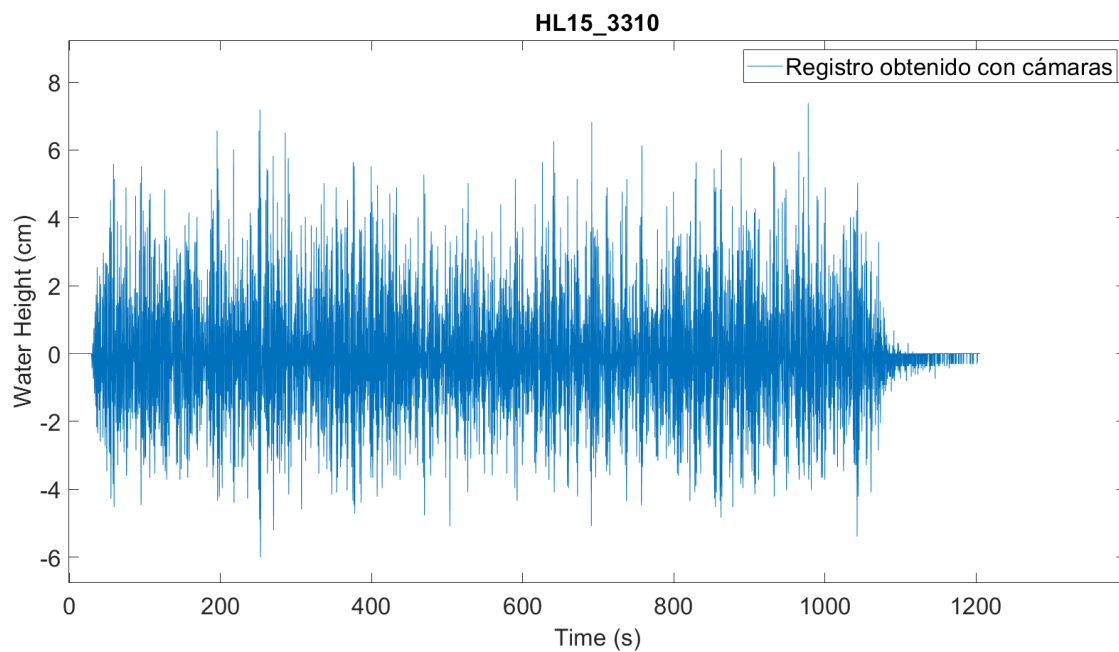


Figura 4.26. Registro obtenido mediante cámaras del ensayo irregular HL15_3310. fuente: Elaboración propia.

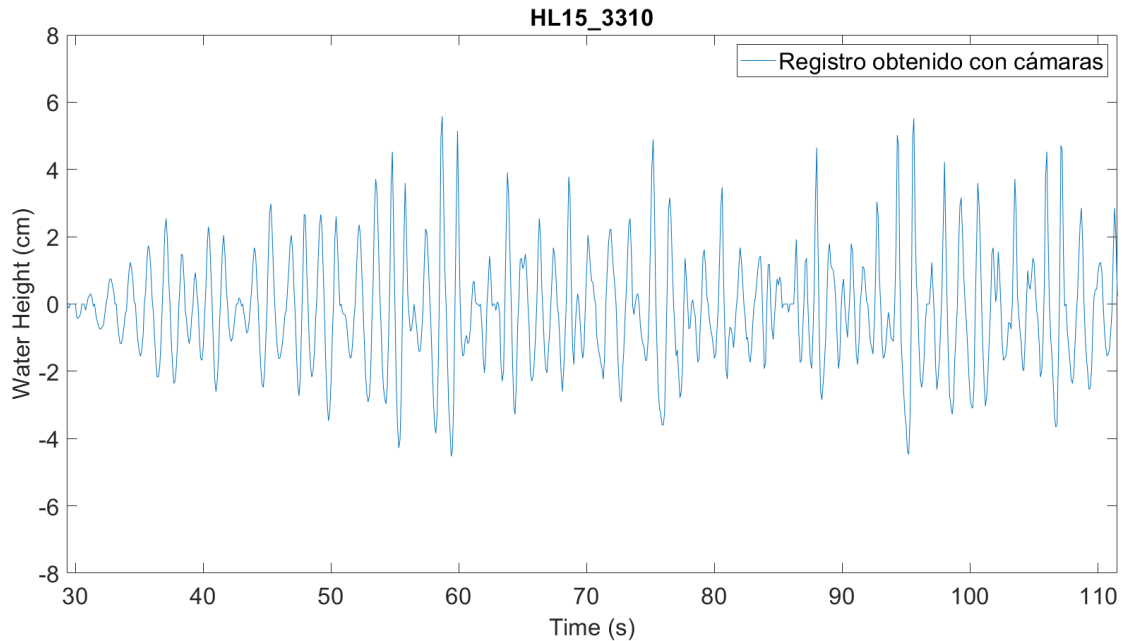


Figura 4.27. Detalle de la Figura 4.26.

4.7. Validación del modelo

El objetivo del desarrollo de un programa informático para el registro de oleaje era plantear una posible técnica no invasiva que sustituyera a los sensores capacitivos, ampliamente usados y probados en el ámbito de modelización física en ingeniería marítima. Por ello, en el presente apartado se comparan ambos métodos, con el objetivo de validar el algoritmo desarrollado.

Se ha analizado el oleaje de los vídeos de tres tandas de ensayos: (1) $h_s=20\text{cm}$ y $s_{0p}=0,01$; (2) $h_s=23\text{ cm}$ y $s_{0p}=0,01$; y (3) $h_s=23\text{cm}$ y $s_{0p}=0,04$. De esta manera se comparan distintos francobordos (distancia de la coronación de la estructura al nivel del agua) y distintos peraltes. Los ensayos analizados presentan alturas de ola de entre 7 y 15 cm. En primer lugar, se presentará una serie de gráficas en las que se compara la medida del nivel de la superficie del agua a lo largo del ensayo.

Posteriormente, se analiza el oleaje de igual forma que se hace con los sensores de nivel (ver Apartado 3.6.2): separación de oleaje incidente y reflejado mediante el método LASA-V y análisis de los estadísticos de ambos oleajes mediante el método LPCLab para los vídeos de los ensayos grabados en la zona de los sensores frente al modelo; análisis de los estadísticos del oleaje transmitido de los vídeos de ensayos grabados en la zona de transmisión mediante el LPCLab.

4.7.1. Superficie libre

En las siguientes figuras se muestra una serie de gráficas que reflejan la similitud existente entre ambos métodos a la hora de detectar y registrar el nivel de la superficie libre de agua a lo largo del tiempo de ensayo. Como puede observarse, los resultados son buenos tanto para oleajes regulares como irregulares.

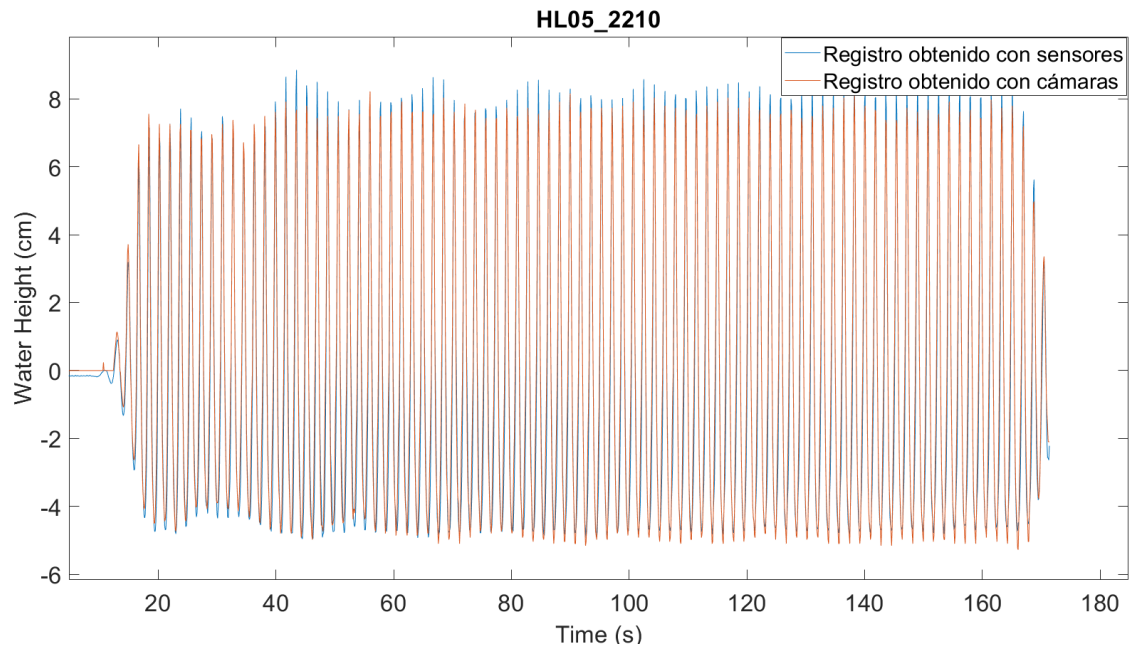


Figura 4.28. Comparación de registro mediante sensor y cámara de oleaje regular. Fuente: Elaboración propia.

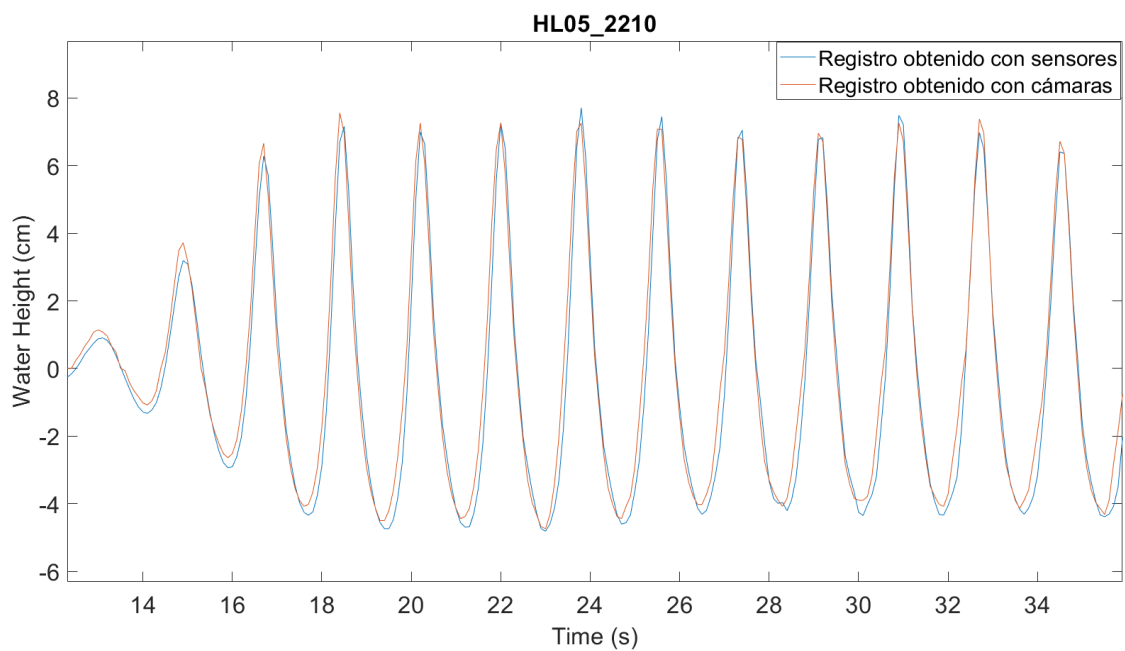


Figura 4.29. Detalle de la Figura 4.28.

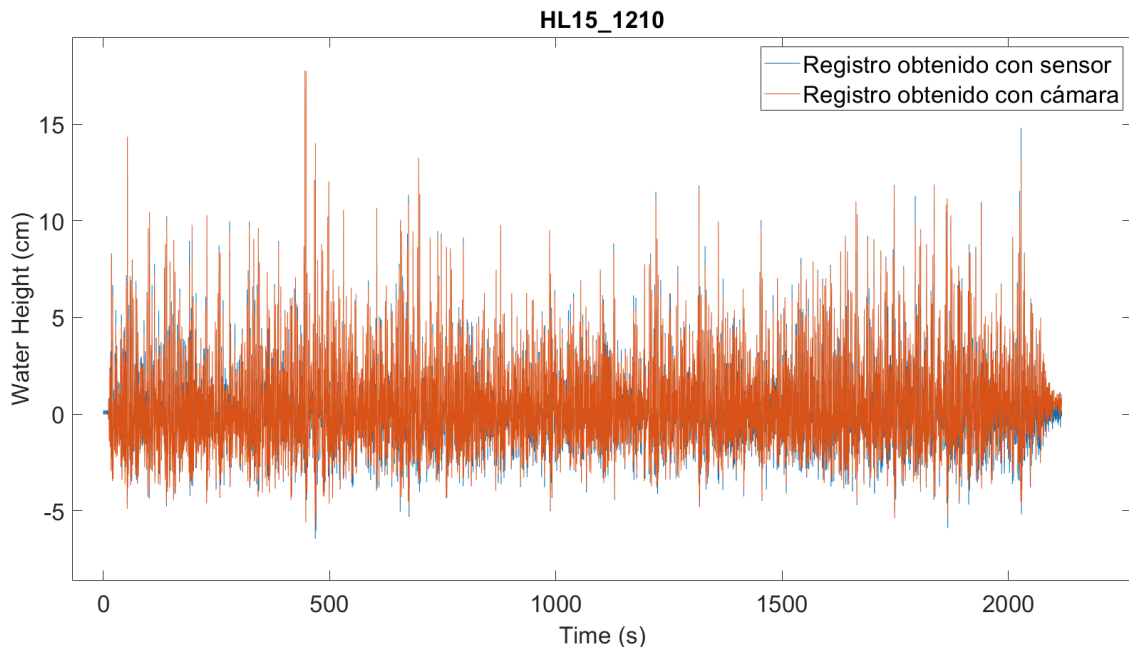


Figura 4.30. Comparación de registro mediante sensor y cámara de oleaje irregular. Fuente: Elaboración propia.

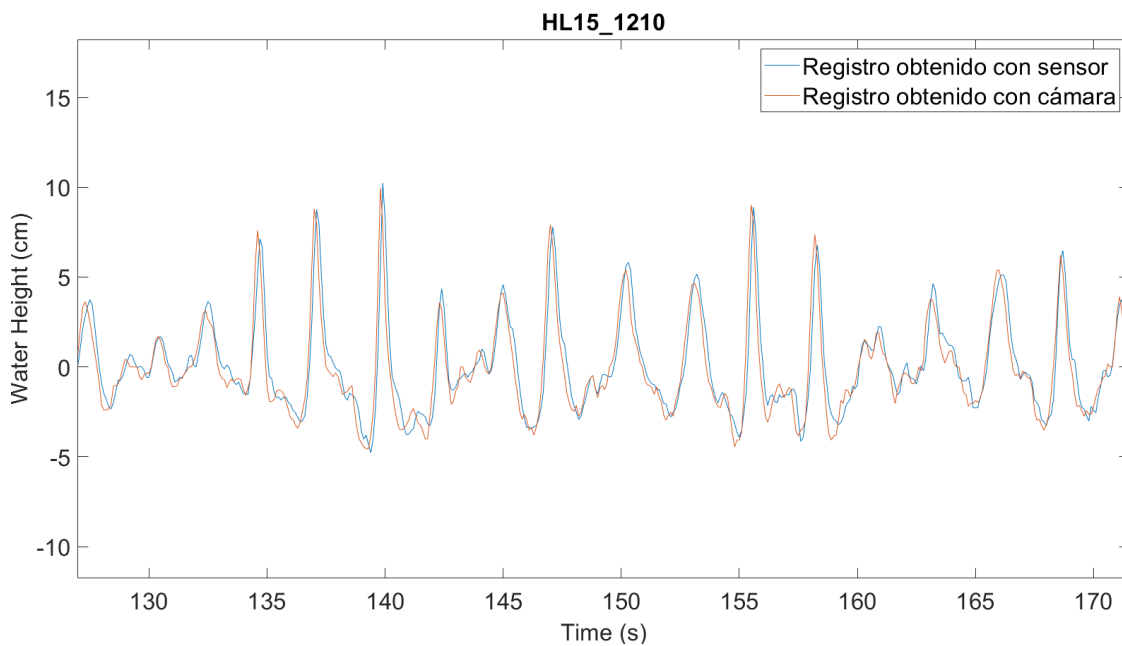


Figura 4.31. Detalle de la Figura 4.30.

Cabe destacar que en todos los ensayos analizados se detecta una serie de errores a los que se ha intentado buscar una explicación. En la gran mayoría de ensayos, el registro obtenido con la cámara es algo más corto en la cresta de la ola. Este error podría tener su origen en la capilaridad de los sensores, lo que provoca que el registro sea algo mayor. Por otro lado, la cámara mide el nivel del agua en el cristal, mientras que el sensor lo hace en el medio del canal, lo que podría suponer otra fuente de error. Habría que sumar también los errores relativos a la corrección de la distorsión.

Además de estas comparaciones, también se han comparado los registros numéricamente con el objetivo de realizar un análisis cuantitativo. Para ello, se ha obtenido el coeficiente de correlación y coeficiente de determinación de cada uno de los ensayos tal como se indica en el *Apartado 3.6.1*.

Se llevó a cabo el análisis de ensayos regulares, para comprobar si el método se comportaba bien y posteriormente aplicarlo a ensayos irregulares, más complejos. Como puede verse en la Tabla 4.2 estos presentan un alto coeficiente de correlación mayor a 0,98 en todos los casos.

Una vez comprobada la eficacia de la técnica, se procedió al análisis de tres tandas de oleajes irregulares. En general, la gran mayoría presenta valores de R^2 superiores a 90%, excepto en la tanda de mayor peralte, donde los menores y mayores oleajes tienen valores inferiores al 90%, pero con mínimos en el 86%.

Código ensayo	Coef. De Corr.	R^2
HL05_1212	0,984	0,965
HL05_1313	0,983	0,962
HL05_2210	0,987	0,973
HL05_2308	0,993	0,984
HL05_1210	0,983	0,964

Tabla 4.2. Análisis de ensayos regulares para validación del método.
Fuente: Elaboración propia.

Código ensayo	Coef. De Corr.	R^2
HL15_1207	0,972	0,940
HL15_1208	0,973	0,946
HL15_1209	0,965	0,930
HL15_1210	0,958	0,916
HL15_1211	0,965	0,930
HL15_1212	0,963	0,926
HL15_1213	0,962	0,925
HL15_1214	0,965	0,929

Tabla 4.3. Análisis de la tanda de ensayos irregulares $hs=20cm$, $s_{op}=0,01$ para validación del método. Fuente: Elaboración propia.

Código ensayo	Coef. De Corr.	R^2
HL15_3307	0,943	0,885
HL15_3308	0,921	0,866
HL15_3309	0,953	0,909
HL15_3310	0,955	0,905
HL15_3311	0,953	0,908
HL15_3312	0,945	0,902
HL15_3313	0,945	0,887
HL15_3314	0,931	0,865
HL15_3315	0,930	0,862

Tabla 4.4. Análisis de la tanda de ensayos irregulares $hs=23cm$, $s_{op}=0,04$ para validación del método. Fuente: ~~Elaboración propia.~~

Código ensayo	Coef. De Corr.	R ²
HL15_1308	0,974	0,948
HL15_1309	0,962	0,914
HL15_1310	0,971	0,937
HL15_1311	0,966	0,933
HL15_1312	0,962	0,906
HL15_1313	0,975	0,948
HL15_1314	0,976	0,936
HL15_1315	0,923	0,942

Tabla 4.5. Análisis de la tanda de ensayos irregulares $hs=23cm$, $s_{op}=0,01$ para validación del método. Fuente: Elaboración propia.

4.7.2. Análisis de oleaje registrado

Tras validar el funcionamiento del algoritmo mediante la medición de la superficie libre y su comparación con la obtenida por los sensores, se ha procedido al análisis del oleaje registrado de forma análoga a como se realiza con los sensores (ver Apartado 3.6.2). Para ello, se ha obtenido el registro de oleaje en la columna de la imagen que se corresponde con los sensores S6, S7 Y S8 de la zona de modelo y S10 en la zona de transmisión para que la toma de datos sea lo más similar posible. En la zona de modelo se utilizan tres sensores para poder realizar la separación del oleaje incidente y reflejado mediante el LASA-V. Por otro lado, en la zona de transmisión únicamente es necesario medir los estadísticos de oleaje en un sensor con el LPCLab.

Una vez llevado a cabo el análisis se han representado distintos estadísticos de oleaje registrado con las cámaras frente a los mismos estadísticos obtenidos analizando el oleaje registrado con los sensores capacitivos. Se ha realizado la comparación de la altura de ola incidente $H_{m0,i}$, ($H_{m0,t}$ en el caso de la transmisión), del periodo pico T_p , de la media del décimo mayor de alturas de ola registradas $H_{1/10}$ y de la altura de ola reflejada $H_{m0,r}$.

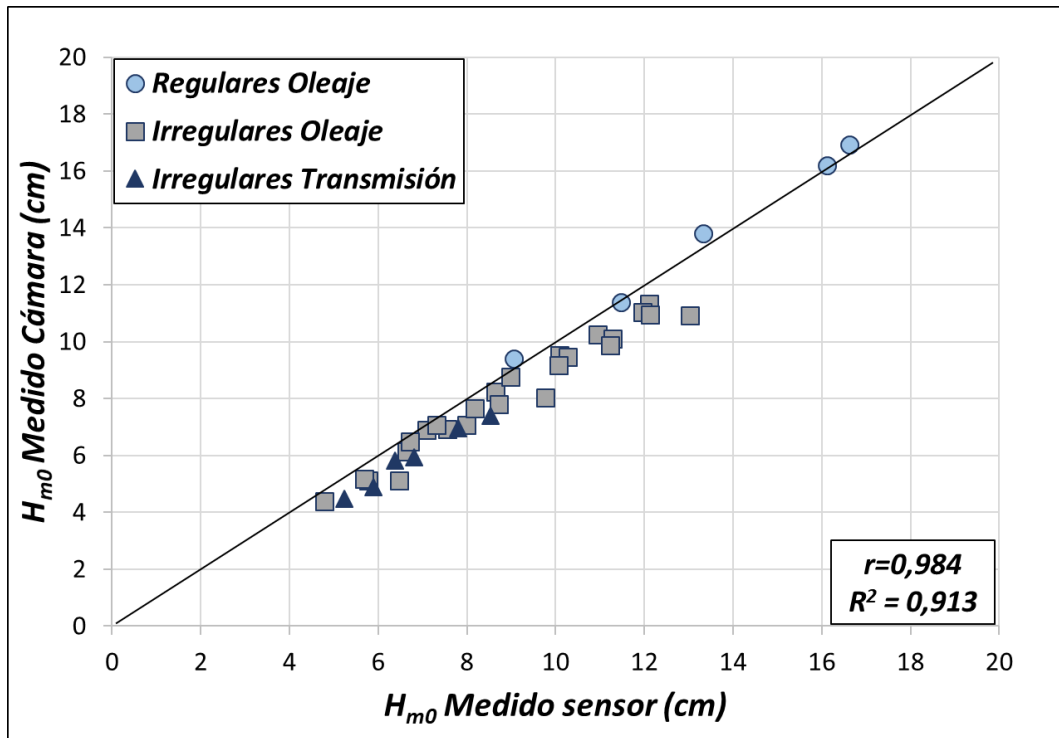


Figura 4.32. Comparación de H_{m0} medida en cámaras y medida en sensor.
 Fuente: Elaboración propia.

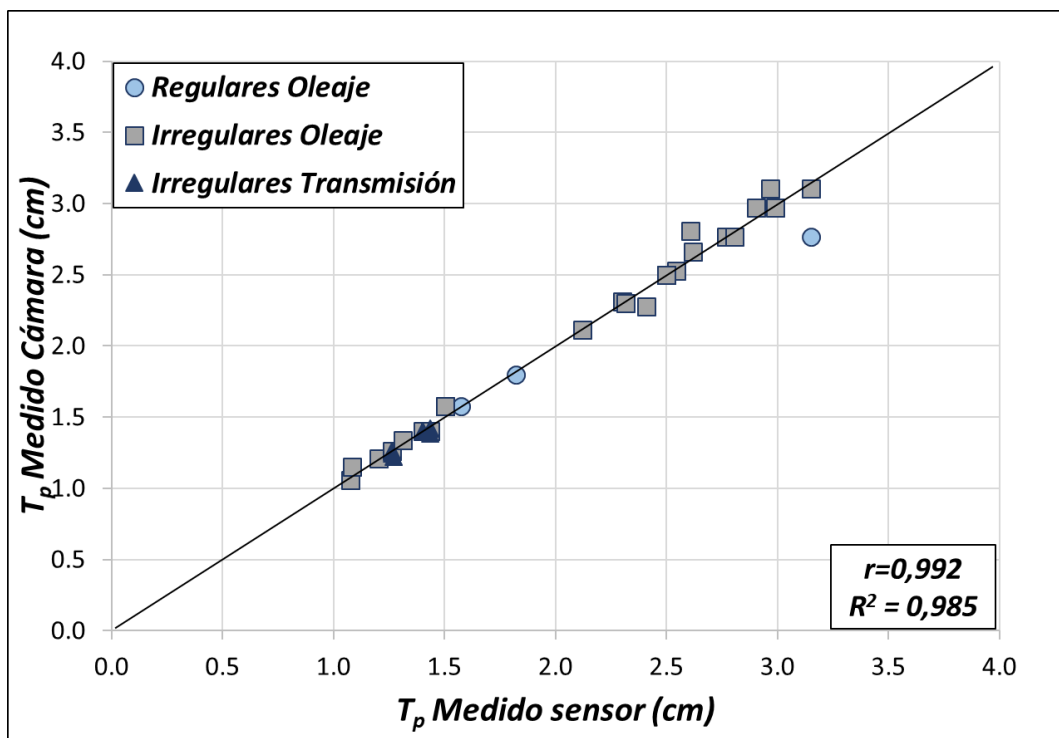


Figura 4.33. Comparación de T_p medida en cámaras y medida en sensor.
 Fuente: Elaboración propia.

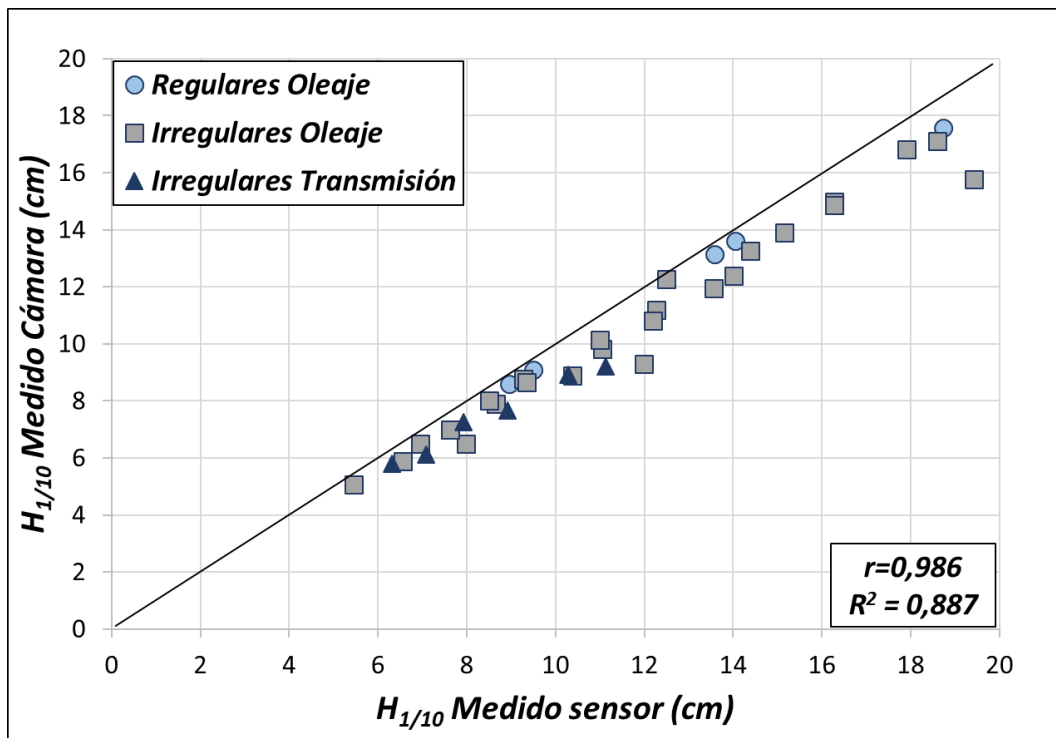


Figura 4.34. Comparación de $H_{1/10}$ medida en cámaras y medida en sensor.
 Fuente: Elaboración propia.

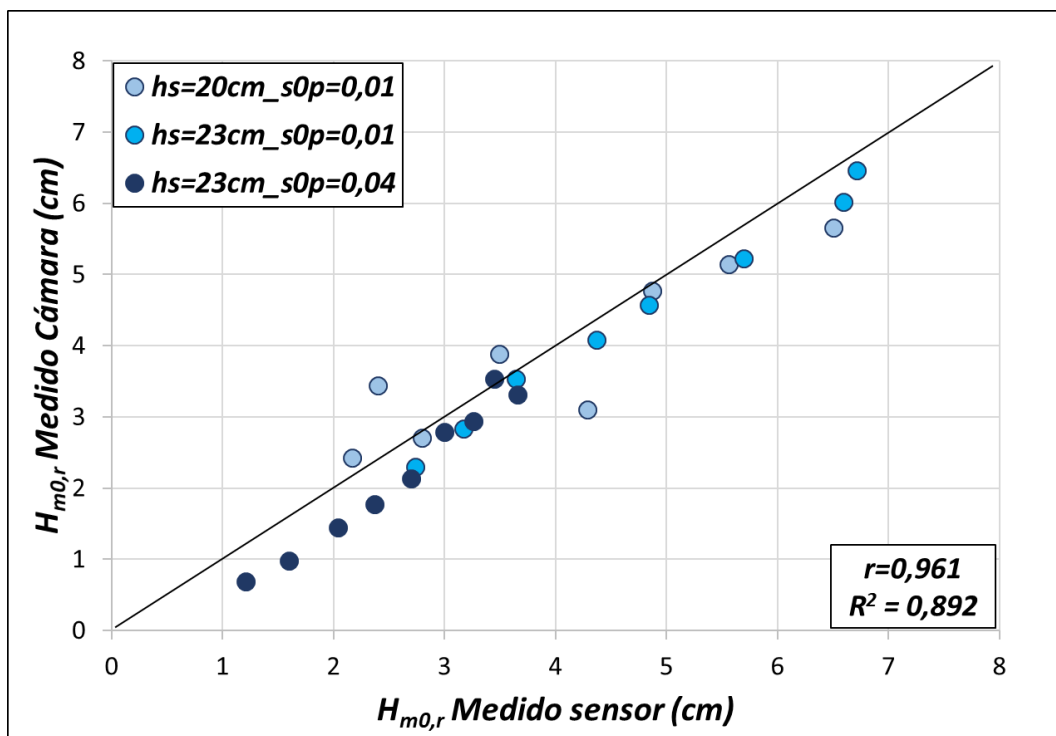


Figura 4.35. Comparación de $H_{m0,r}$ medida en cámaras y medida en sensor.
 Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar que, en general, la medición de los sensores ofrece valores algo mayores que la de las cámaras, como se ha comentado en el apartado anterior. Se tienen valores muy buenos del coeficiente de correlación ($0,961 < r < 0,992$) en todos los casos. Además, la altura de ola significativa y el periodo pico presentan R^2 superiores al 90%. El modelo presenta mayores limitaciones a la hora de detectar la $H_{1/10}$ o la altura de ola reflejada ($R^2 = 0,887$ y $R^2 = 0,892$ respectivamente).

4.8. Perspectivas de mejora

Como se ha visto en los apartados anteriores, el programa desarrollado tiene un buen funcionamiento en general. Sin embargo, hay algunos aspectos susceptibles de mejora. El desarrollo de este se ha cerrado en este punto debido a que se ha conseguido el principal objetivo que se pretendía, el registro del oleaje utilizando cámaras de vídeo, pero todavía tiene margen de mejora. A continuación se comentan algunos aspectos a mejorar.

1. En primer lugar, el algoritmo es propenso a presentar errores cuanto menor es el oleaje, entendiendo estos errores como diferencia de registro con respecto a la medición que realizan los sensores. La explicación a esta cuestión podría estar en inexactitudes al corregir la distorsión de las imágenes o errores relativos a la presencia del cristal en el canal, como por ejemplo un fenómeno de refracción.
2. Por otro lado, existen problemas para aislar las olas que presentan rotura por fondo, ya que las turbulencias que aparecen rompen el contorno nítido que forma la superficie libre. Para resolver este problema, sería necesario simplificar la zona de la imagen donde rompe la ola mediante el uso de algún tipo de filtro y posteriormente interpolar los puntos no detectados.
3. Otra posible mejora sería incorporar funciones que permitan la medición de otras características de oleaje. Un ejemplo sería medir la velocidad de llegada de la ola a la zona de modelo, lo que permitiría poder determinar su energía. Para ello, bastaría con detectar un punto de una ola en diversos fotogramas y, conociendo el lapso entre fotogramas, determinar la velocidad de esta.
4. Por último, podría fortalecerse el programa mediante la reducción del coste computacional o mejoras en la programación. Esto seguramente permitiría reducir el tiempo de análisis de cada ensayo.



CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE TRANSMISIÓN

5. Análisis de transmisión de oleaje de diques homogéneos de baja cota de coronación

5.1. Introducción

El análisis de la transmisión de oleaje en las HLCS es uno de los objetivos de este proyecto. El uso de este tipo de estructuras como diques exentos o diques arrecife para la defensa de la costa y el hecho de que estas tengan cierta porosidad y permitan el paso del oleaje hace que el estudio de la transmisión sea algo indispensable para poder afrontar su diseño de manera correcta y eficiente.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras llevar a cabo el análisis de los datos experimentales de los ensayos en el canal de oleaje hasta el inicio de avería (IA) tal como se describió en el *Capítulo 3*. Este análisis consta de una primera fase de recogida de datos mediante los sensores de nivel, una segunda fase en la que se analiza el oleaje registrado separando el incidente del reflejado y una tercera fase en la que se analizan los estadísticos que caracterizan el oleaje.

Tras haber desarrollado el programa informático para el registro del oleaje mediante cámaras, se tiene un nuevo modelo de análisis con el que podría llevarse a cabo el estudio del oleaje. Sin embargo, las técnicas descritas en el *Capítulo 3* son las que se utilizarán para realizar este análisis, ya que están ampliamente aceptadas,

Por tanto, se tomará el oleaje obtenido mediante el modelo numérico SwanOne en la zona de modelo como oleaje incidente y el oleaje medido por los sensores y analizado mediante la aplicación LPCLab como oleaje transmitido.

En el presente capítulo se llevará a cabo un breve análisis o resumen del estado del arte de la transmisión de oleaje en estructuras de baja cota. Posteriormente se aplicarán los resultados obtenidos tras el análisis de los ensayos a las fórmulas empíricas existentes más representativas, para conocer su capacidad de estimación de la transmisión de oleaje en HLCS, que en principio debería ser pobre debido a que no se diseñaron para ello. Por último, se presenta una nueva expresión empírica capaz de estimar la transmisión de oleaje en las estructuras ensayadas.

5.2. Resumen transmisión oleaje

En los *Apartados 2.3.3 y 2.4.6* se han recogido los principales estudios relativos a la transmisión de oleaje en estructuras de baja cota (LCS) y estructuras homogéneas de baja cota (HLCS) formadas por Cubípodos. Puesto que en el presente proyecto se va a llevar a cabo un estudio del comportamiento de estas últimas, es importante definir los principales parámetros que afectan en este proceso. En la siguiente tabla se presentan las variables que cada autor ha decidido incluir en su estudio de la transmisión de oleaje:

Autor	$H_{m0,i}$	R_c	D_{n50}	B	ξ	S_{0p}	L_0
Takayama et al. (1985)	X	X		X			X
Van der Meer (1990)	X	X					
Van der Meer y Daemen (1994)	X	X	X	X		X	X
d'Angremond et al. (1996)	X	X		X	X	X	
Seabrook y Hall (1998)	X	X	X	X			X
Van der Meer et al. (2005)	X	X		X	X		
Medina et al. (2019)	X	X					
Jeong et al. (2021)	X	X					

Tabla 5.1. Relación de variables utilizadas en la definición de K_t por los distintos autores. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse, parece claro que tanto el francobordo como la altura de ola significativa incidente son los parámetros más influyentes en el fenómeno de transmisión de oleaje, ya que están incluidos en todas las expresiones. Intuitivamente, es normal pensar que una de las variables principales debe estar relacionada con altura de la estructura, lo que definirá si está sumergida o emergida. Además, si se expresa junto con la altura de ola, se obtiene la relación de alturas de ola que pueden rebasar el dique para un francobordo determinado.

En lo que respecta al resto de variables, están representadas equitativamente entre las expresiones, lo que indica que cada investigador ha utilizado aquellas variables que tenía más ampliamente representadas en su base de datos.

Como se menciona en el *Capítulo 3*, los ensayos realizados se han llevado a cabo con un solo tipo de sección, por lo que no se tienen distintas representaciones de anchos de coronación (B). Por otro lado, se han construido siempre con Cubípodos del mismo tamaño, por lo que la variable que define el tamaño de las piezas (D_{n50}) tampoco varía. Al carecer de una amplia base experimental con distintos valores de estas variables, no serán utilizadas en este estudio de transmisión de oleaje.

5.3. Evaluación de las fórmulas existentes para estimar la transmisión de oleaje

En este apartado se va a analizar el desempeño de algunos de los métodos para estimar la transmisión de oleaje vistos en el *Capítulo 2*. En este caso, se han seleccionado las expresiones que más aceptación tienen en cuanto a estructuras de baja cota, y para las que se tiene el rango de aplicación de cada una de las variables que intervienen. Además, se ha considerado también la única fórmula existente para calcular la transmisión en HLCS de Cubípodos.

De esta manera, se ha comparado la transmisión medida en los ensayos físicos realizados (*Capítulo 3*) y la estimada utilizando la Ec. 2. 11 (Daemen, 1991) para LCS convencionales; la Ec. 2. 12 (Daemen, 1991) para diques arrecife (Reef); la Ec. 2. 13 (d'Angremond et al., 1996); la Ec. 2. 15 (Van der Meer et al., 2005); y la Ec. 2. 21 (Medina et al., 2019) para HLCS de Cubípodos de cinco capas. Para llevar a cabo esta comparación, se han seleccionado en cada caso los ensayos que cumplen con los rangos de aplicación de las fórmulas. Estos rangos se recogen en la siguiente tabla:

Autor	$H_{s,i}/D_{n50}$	R_c/H_{si}	R_c/D_{n50}	B/H_{si}	s_{op}	H_{si}/h	K_t
Daemen (1991) (Conv)	1-6		-3-5		0,01-0,05		0,075-0,75
Daemen (1991) (Reef)	1-6		-2-6		0,01-0,05		0,15-0,6
d'Angremond et al. (1996)	-	-2,5-2,5	-	<8	<0,06	<0,54	0,075-0,8
Van der Meer et al. (2005)	<6	-8,7-8,9	-	>10	0,002-0,07	0,03-0,87	0,05-Ktu
Medina et al. (2019)	-	-0,36-0,89					

Tabla 5.2. Rangos de aplicación de las fórmulas para estimar K_t . Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar cada expresión se han seleccionado los ensayos que cumplen con los rangos establecidos. En total, se dispone de 48 ensayos en los que todavía no se produce el Inicio de Avería, de estos, 13 cumplen los rangos en la fórmula de Daemen (1991) para LCS convencionales y 20 para la expresión de diques arrecife; 28 los cumplen para la fórmula de d'Angremond et al. (1996); ninguno para la expresión de van der Meer et al. (2005), ya que se utiliza para anchuras de coronación amplias; y 17 para la fórmula en HLCS de Cubípodos de Medina et al. (2019).

En la Figura 5.1 se presenta la comparación entre la transmisión medida en los ensayos y la estimada utilizando las fórmulas mencionadas.

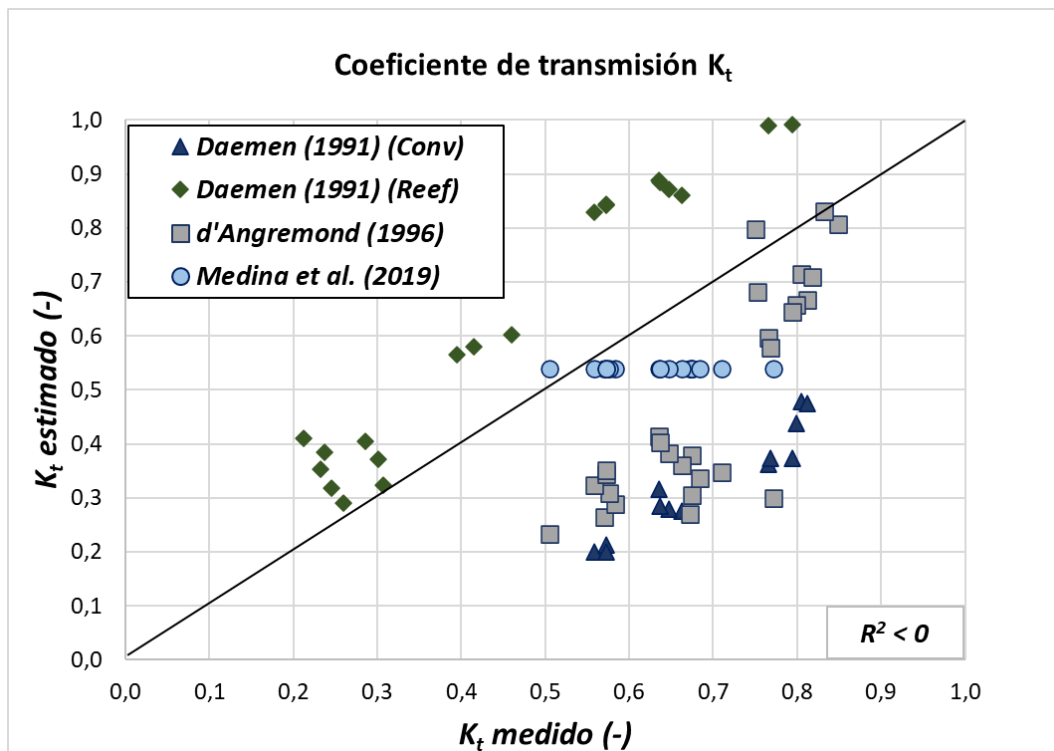


Figura 5.1. Comparación del K_t medido y estimado con los métodos de la literatura. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, todas las fórmulas proporcionan resultados pobres en la aplicación a las HLCS de Cubípodos estudiadas, con valores de R^2 negativos en todos los casos. Las fórmulas de Daemen (1991) para LCS convencionales y d'Angremond et al. (1996) infravaloran la transmisión de oleaje, ya que están diseñadas para otra tipología estructural. Por otro lado, la expresión de Daemen (1991) para diques arrecife sobreestima ligeramente la transmisión con K_t pequeños ($<0,4$) y en mayor magnitud para valores más grandes. Por último, la única fórmula desarrollada para HLCS de Cubípodos proporciona siempre el mismo valor de K_t debido a su limitación de $K_t=0,54$ como umbral superior.

Los resultados obtenidos en este apartado confirman que los métodos existentes en la literatura para estimar la transmisión de oleaje no son aplicables a las HLCS de Cubípodos. Por tanto, se necesitan nuevas expresiones empíricas que permitan su estimación.

5.4. Nueva fórmula para la estimación de K_t en estructuras homogéneas de baja cota

Como se ha visto en el apartado anterior, ninguna de las expresiones empíricas que estiman la transmisión de oleaje en estructuras de baja cota es válida para describir satisfactoriamente la transmisión en los diques estudiados. Por eso, en este apartado se va a desarrollar una nueva expresión basada en los resultados obtenidos tras llevar a cabo el análisis de los ensayos.

5.4.1. Influencia de $R_c/H_{m0,i}$ y s_{0p} en el coeficiente de transmisión K_t

Como se ha visto en el *Apartado 5.2*, el francobordo adimensional $R_c/H_{m0,i}$ es una de las variables más influyentes en la transmisión del oleaje, representando la altura de la estructura con respecto al nivel del mar en reposo frente a la altura de ola significativa incidente al pie de la estructura. Otras variables que pueden influir en la transmisión de oleaje son el ancho coronación de la estructura (B), el diámetro nominal de las piezas utilizadas (D_{n50}), el peralte del oleaje (s_{0p}) o la longitud de onda (L_0) entre otras.

En las tandas de ensayos de oleaje en canal realizados, descritos en el *Apartado 3.5*, se han variado diferentes parámetros con el fin de tener una amplia base experimental que permita el análisis de la transmisión. Así, se tienen diferentes peraltes (0,01, 0,02, 0,03 y 0,04) y distintos francobordos (-3, 0, 5 y 10cm). Sin embargo, el ancho de coronación y el tamaño de las piezas es constante en toda la base experimental.

Por esta razón, se pretende estudiar la transmisión de oleaje evaluando la influencia del francobordo adimensional y el peralte.

En la Figura 5.2 se ha representado la relación entre el francobordo adimensional $R_c/H_{m0,i}$ y el coeficiente de transmisión K_t , medido como la relación entre la altura de ola transmitida ($H_{m0,t}$) y la altura de ola incidente en la zona de modelo ($H_{m0,i}$), analizadas de acuerdo con lo expuesto en el *Apartado 3.6*.

Como era de esperar, cuanto menor es la altura de la estructura, mayor es el rebase existente, hay una mayor transmisión. Mientras que, conforme va incrementando el francobordo, la transmisión es cada vez menor. Se aprecia una tendencia aproximadamente lineal descendente entre ambas variables, con cierta variabilidad en los resultados cuando el francobordo adimensional es cero. En general, existe bastante dispersión de datos.

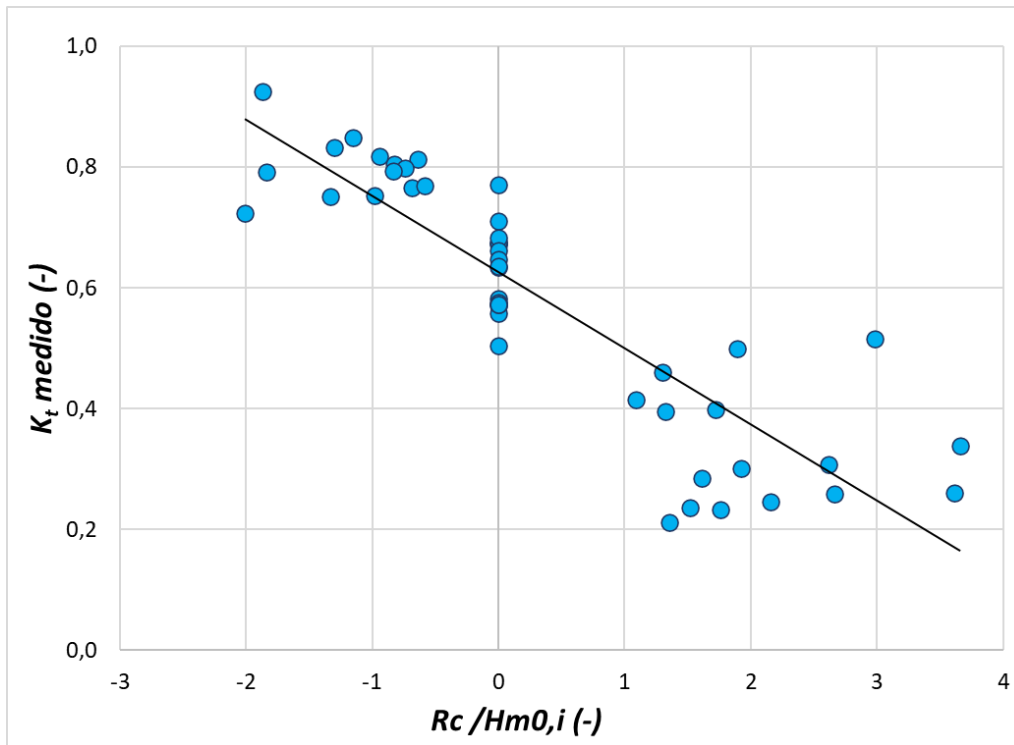


Figura 5.2. Relación entre K_t y $R_c/H_{m0,i}$. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, también se ha representado la relación entre el coeficiente de transmisión y el peralte, teniendo en cuenta la influencia del francobordo:

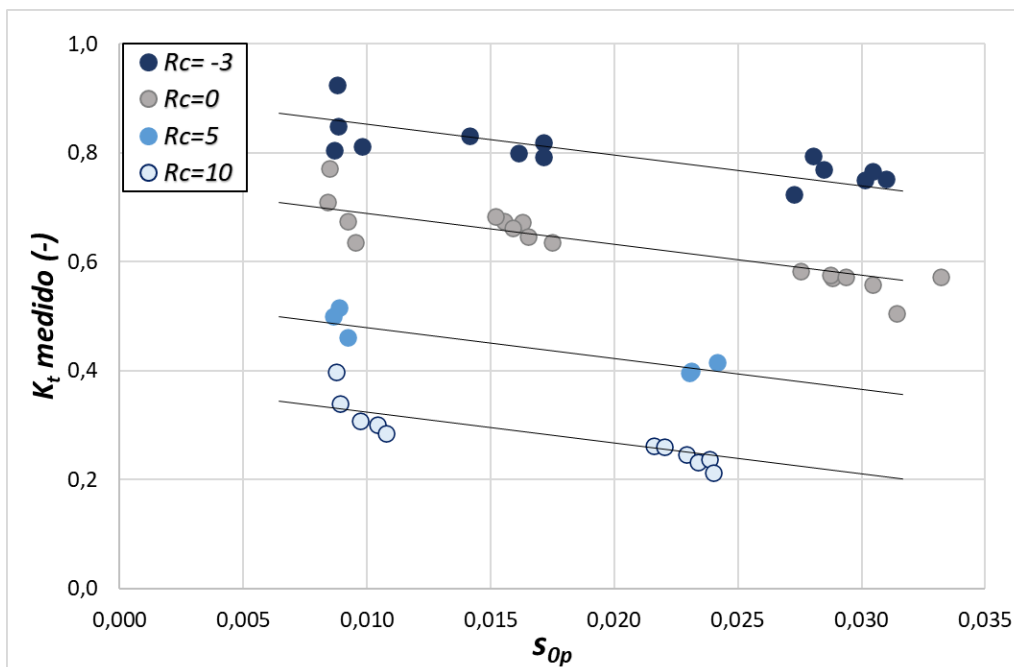


Figura 5.3. Relación entre K_t y s_{0p} . Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en la Figura 5.3, cuanto menor es el francobordo, mayor es el coeficiente de transmisión. En este caso se aprecia una tendencia lineal con una pequeña pendiente

descendiente, lo que indica que cuanto mayor es el peralte, menor es la transmisión de oleaje. Sin embargo, la separación entre las líneas paralelas definidas para cada peralte no es constante, lo que indica que la influencia del francobordo no se puede caracterizar directamente como lineal.

Puesto que la dispersión de datos en la relación $K_t - R_c/H_m0$ es considerable y no se puede asumir a priori una tendencia o correlación concreta, se va a analizar los datos mediante redes neuronales, de forma que se evite el posible ruido experimental y se pueda obtener la tendencia de la base experimental.

5.4.2. Análisis de la transmisión mediante redes neuronales

Las redes neuronales artificiales son sistemas de aprendizaje de la inteligencia artificial capaces de obtener relaciones complejas no lineales entre variables de entrada y salida de un modelo. Su comportamiento está inspirado en el funcionamiento del cerebro humano y se basa en una estructura formada por neuronas conectadas que se transmiten información entre sí.

Las redes neuronales aprenden de los datos introducidos, por tanto, pueden entrenarse para que reconozca patrones entre variables y pronostique eventos. Las conexiones entre los elementos individuales que la forman (nodos) y la ponderación de estas conexiones modela el comportamiento de la red neuronal.

La estructura básica de una red neuronal (ver Figura 5.4) se compone de varias capas interconectadas entre sí. La primera capa es la de entrada o inputs, a continuación se tiene una o varias capas ocultas y finalmente una capa de salida u outputs.

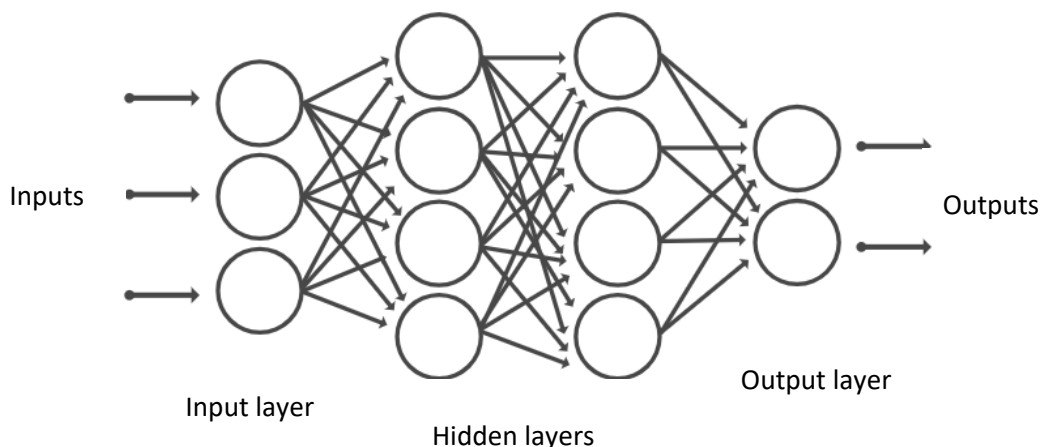


Figura 5.4. Estructura típica de una red neuronal. Fuente: MathWorks.

El algoritmo de aprendizaje de la red es el mecanismo mediante el cual se produce la adaptación de los parámetros y pesos de las conexiones entre la capa de inputs, la capa oculta y la capa de outputs para que las variables de entrada reproduzcan las de salida. Consiste en encontrar la mejor combinación de parámetros a través de un proceso iterativo en el que se van analizando los patrones de entrada, reajustando la relación de pesos hasta que se minimice la función de error que mide el rendimiento de la red.

La segunda fase consiste en realizar la validación de la red diseñada con otro conjunto de datos para los cuales se conocen los resultados, a fin de comprobar la eficiencia de esta.

Una vez entrenada una red se puede utilizar después para realizar predicciones introduciendo únicamente variables de entrada.

Para realizar las redes neuronales se ha utilizado la aplicación “*Neural Net Fitting*” de la toolbox “*Machine and Deep Learning*” de MATLAB. Esta aplicación sirve para la modelación de problemas de ajuste utilizando redes neuronales feed-forward supervisadas.

Mediante esta aplicación se define la estructura de la red y se entrena utilizando alguno de los algoritmos disponibles. En este caso, el algoritmo utilizado es el de Levenberg-Marquardt, que se usa comúnmente para resolver problemas de mínimos cuadrados no lineales. Posteriormente, permite evaluar el rendimiento de la red utilizando el error cuadrático medio y el análisis de regresión.

5.4.2.1. Red neuronal para estimación de K_t .

Cuando no pueden asumirse simples relaciones lineales entre variables, las redes neuronales permiten obtener resultados fiables de esta relación, limpiando el ruido experimental que pueda haber y quedándose con la verdadera tendencia detrás de los datos. En este apartado, se han aplicado redes neuronales para estimar la influencia del francobordo adimensional y el peralte en la transmisión de las HLCS de Cubípodos; y ajustar una función que las relacione. Se quiere obtener la red neuronal óptima que mejor relacione las variables de entrada con la de salida.

Las variables a introducir para el entrenamiento de la red neuronal son el francobordo adimensional ($R_c/H_{m0,i}$) y el peralte (s_{0p}) como variables de entrada y el coeficiente de transmisión (K_t) como variable de salida. Estos datos se obtuvieron en el procesamiento de los ensayos del modelo físico descritos en el *Capítulo 3*. Como se ha comentado en otros apartados, se quiere ajustar una función válida para estructuras que no presenten avería, por lo que se ha seleccionado los ensayos anteriores al IA. Se tiene un total de 48 ensayos con los que modelar la red.

El conjunto de los datos experimentales se divide de forma aleatoria en un grupo para el entrenamiento y aprendizaje de la red (70% = 34) y otro grupo para realizar test con la técnica aprendida (30% = 14). Este criterio de separación de las variables se conoce como *early stopping*. Los datos del primer grupo se utilizan para entrenar la red neuronal mediante la iteración de los valores de las relaciones y los pesos hasta minimizar el error. Sin embargo, los del segundo grupo no se incluyen en este proceso de aprendizaje evolutivo ya que servirán para realizar una validación cruzada y confirmar la fiabilidad del modelo creado. Esta validación cruzada es necesaria para comprobar que la red neuronal se ajusta al proceso físico y no solo a los datos de aprendizaje.

La red neuronal utilizada está compuesta de 3 capas: una capa de entrada de variables con dos neuronas (N_i), una capa oculta con tres o cuatro neuronas (N_h) y una capa de salida de variables con una neurona (N_o). Es importante tener en cuenta que, si el número de parámetros es

superior al número de datos introducidos para el entrenamiento de la red, se puede producir sobreaprendizaje.

El sobreaprendizaje o sobreajuste (*overfitting* en inglés) se produce cuando el algoritmo de aprendizaje se ajusta demasiado a las características específicas de los datos de entrenamiento (T) y es incapaz de modelar nuevos datos de entrada. Para evitarlo, se ha utilizado un número de parámetros (P) tal que $P/T < 1$.

El número de parámetros de la red lo forman el número de neuronas ocultas, el número de neuronas de salida y las conexiones existentes en toda la red:

$$P = N_o + N_h(N_i + N_o + 1) \quad (5.1)$$

En este caso se han considerado redes con tres y cuatro neuronas en la capa oculta, con relaciones P/T de 0,39 y 0,51 respectivamente, lo que implica un amplio margen para evitar el *overfitting*.

En la Figura 5.5 se presenta la configuración de la estructura de la red neuronal. Como se ha comentado, las variables de entrada consideradas son el francobordo adimensional ($R_c/H_{m0,i}$) y el peralte (s_{0p}).

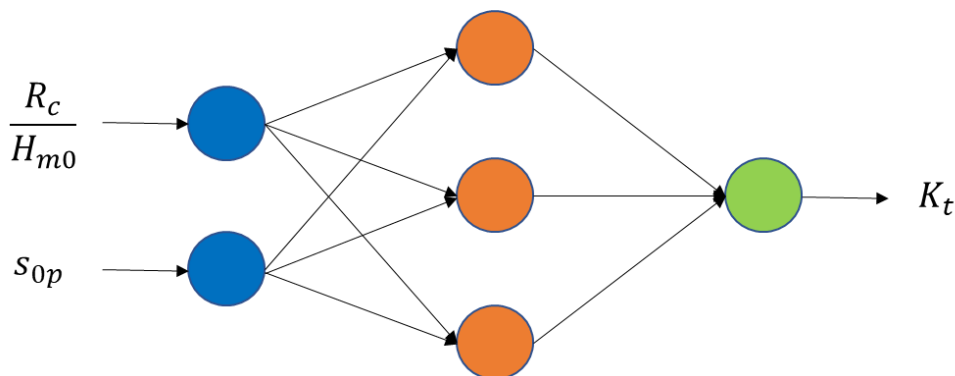


Figura 5.5. Estructura de la red neuronal utilizada. Fuente: Elaboración propia.

Tras realizar las redes neuronales con tres y cuatro neuronas ocultas, la primera ha presentado mejor resultados y, además, es más sencilla al tener menos parámetros. Por tanto, la red finalmente utilizada es una red neuronal con una capa oculta formada por tres neuronas.

Para la validación del rendimiento de la red se utilizan los gráficos de regresión proporcionados por la aplicación. En estos se muestra las salidas de la red con relación a los objetivos para el entrenamiento, la validación, las pruebas y la respuesta global. A continuación se muestra el ejemplo de la red creadas, cuyo ajuste es bastante bueno, con R mayor a 0,96 en todos los casos.

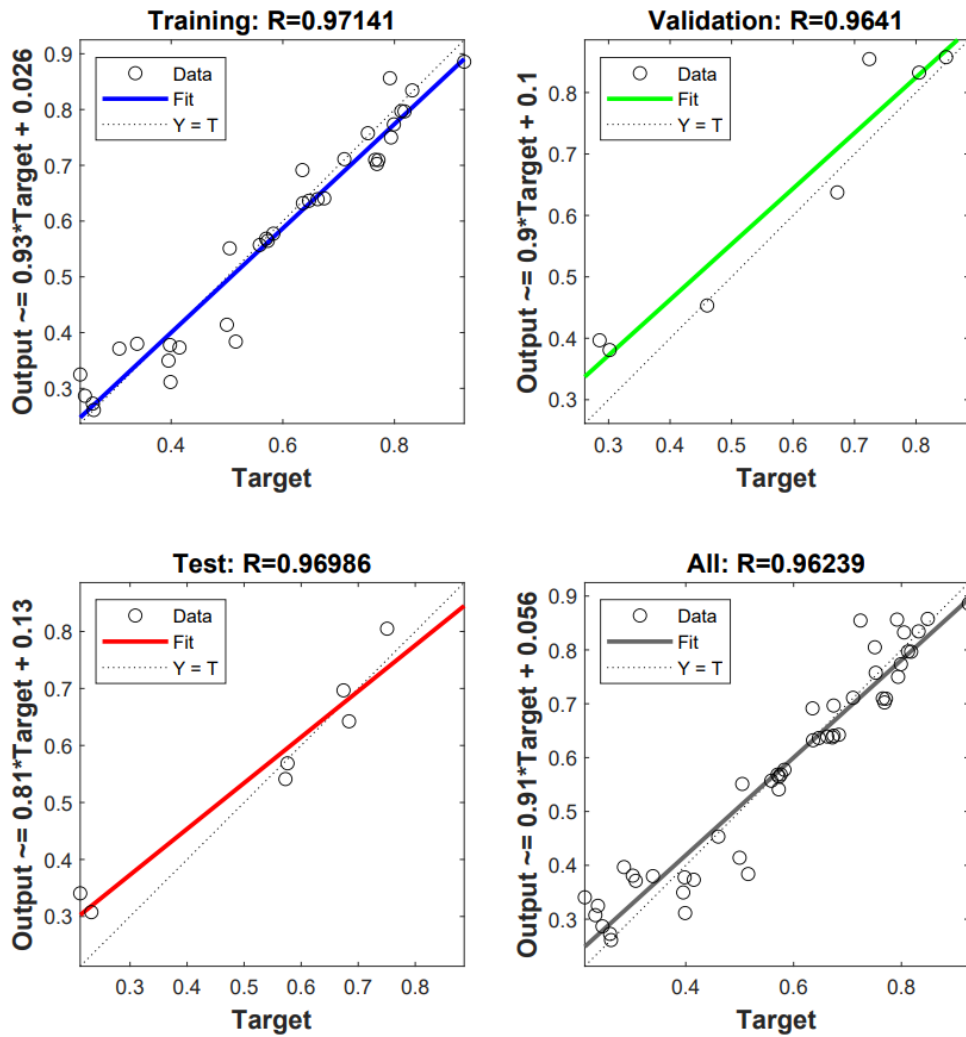


Figura 5.6. Regresión del modelo neuronal. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se han generado valores para las variables de entrada dentro del rango establecido para el que ha sido entrenada la red. Los rangos de las variables de entrada son el valor máximo y mínimo de cada variable en la totalidad de ensayos analizados:

$$-2 < \frac{R_c}{H_{m0,i}} < 3,6$$

$$0,008 < s_{0p} < 0,035$$

A continuación, se han utilizado estos valores de entrada para realizar simulaciones con la red neuronal desarrollada con el fin de obtener las tendencias de las variables de entrada sobre el coeficiente de transmisión. Las redes limpian el ruido experimental que pueda haber, quedándose con la tendencia que hay detrás de los datos. En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos:

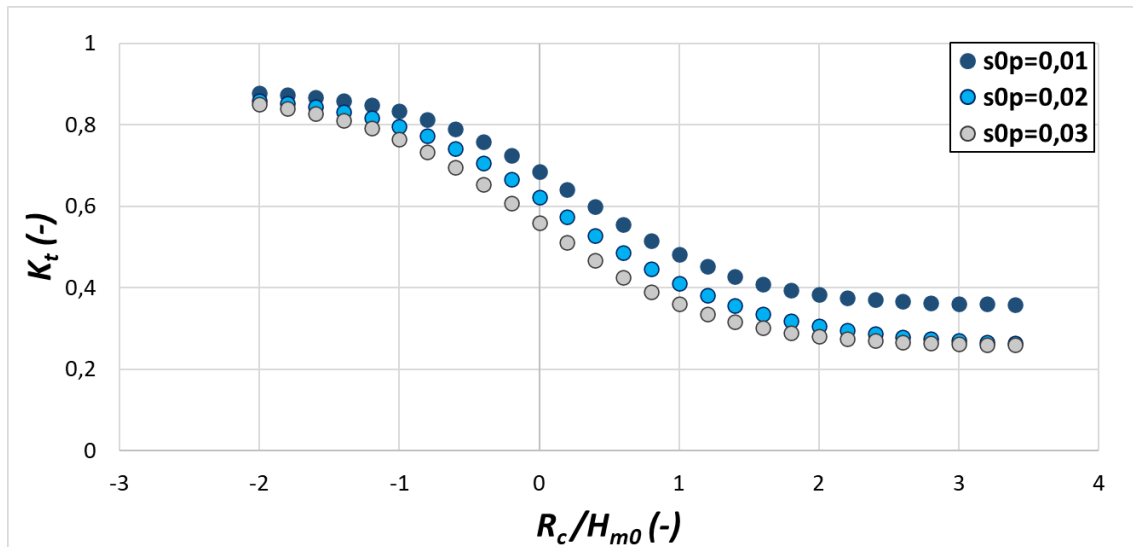


Figura 5.7. Influencia de $R_c/H_{m0,i}$ en K_t con s_{0p} constante. Fuente: Elaboración propia.

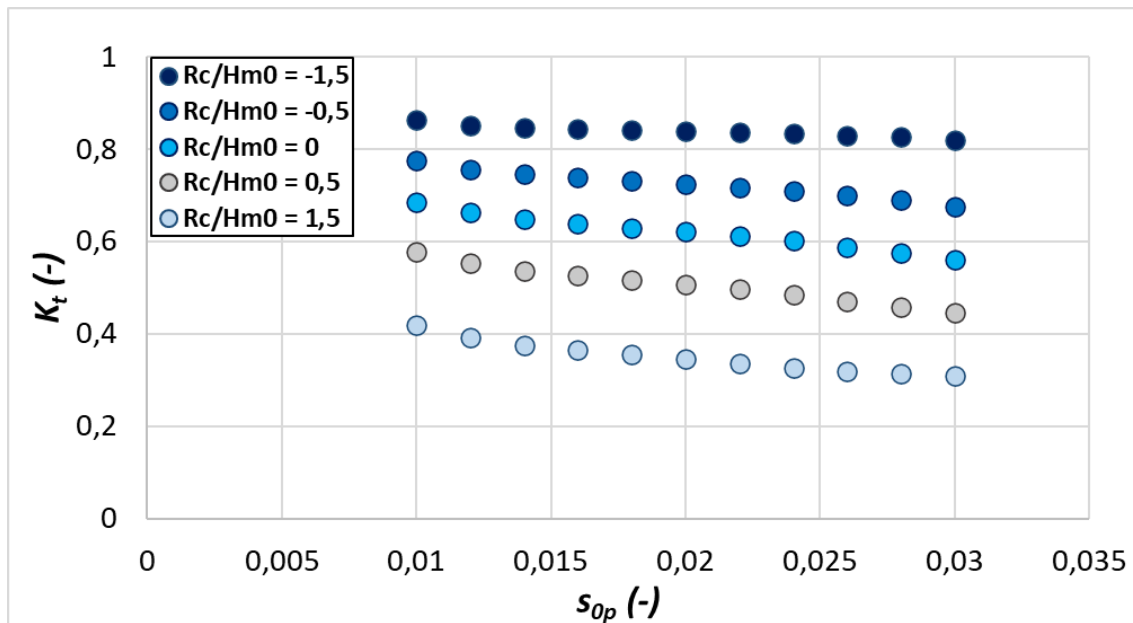


Figura 5.8. Influencia de s_{0p} en K_t con $R_c/H_{m0,i}$ constante. Fuente: Elaboración propia.

Recordando lo visto en el *Apartado 5.4.1*, se apreciaban tendencias aproximadamente lineales descendientes entre ambas variables y el coeficiente de transmisión. Sin embargo, esta no era suficientemente clara en el caso del francobordo adimensional, de ahí el análisis mediante redes neuronales.

Como puede verse en la Figura 5.7, la tendencia que se aprecia en la relación entre el francobordo adimensional y el coeficiente de transmisión no es lineal, sino que tiene una especie de forma sinusoidal que podría aproximarse a la representación de una función tangente hiperbólica negativa. En este caso, parece tener dos asíntotas horizontales en $K_t=0,9$ y $K_t=0,2$ aproximadamente. Además, observando la separación entre las curvas que definen cada peralte

se puede decir que es prácticamente constante, lo que indica que la relación del peralte con las anteriores variables es lineal.

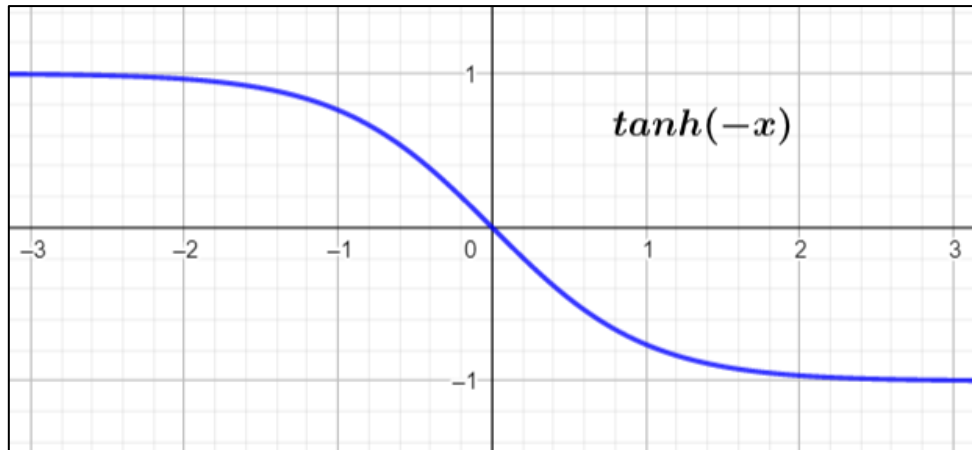


Figura 5.9. Representación gráfica de la función $\tanh(-x)$. Fuente: Elaboración propia.

Analizando ahora la Figura 5.8, el resultado derivado de la simulación de la relación entre el coeficiente de transmisión y el peralte en este caso sí que verifica la tendencia lineal descendiente vista en el *Apartado 5.4.1*. Además, se observa también que la separación entre las líneas de distinto francobordo adimensional no es constante y que la pendiente de estas va aumentando con el incremento de R_c/H_{m0} , lo que verifica la hipótesis de dependencia no lineal de esta última.

5.4.3. Nueva expresión empírica para estimación de K_t

Tras el análisis del modelo desarrollado mediante redes neuronales, se conocen las tendencias que gobiernan la relación entre K_t y $R_c/H_{m0,i}$ y s_{0p} . Como se ha visto, la función tangente hiperbólica parece describir mejor la correlación entre el francobordo adimensional y el coeficiente de transmisión. Mientras que el peralte y este coeficiente tienen una relación de dependencia lineal. Por esto, se propone la siguiente expresión que permitirá estimar el coeficiente de transmisión existente en HLCS de Cubípodos.

$$K_t = a * s_{0p} + b * \tanh\left(\frac{R_c}{H_{m0,i}}\right) + c \quad (5.2)$$

Donde a , b y c son coeficientes empíricos que deben ser calibrados.

Estos coeficientes empíricos han sido calibrados utilizando los datos de los 48 ensayos con los que se ha llevado a cabo el estudio minimizando el error cuadrático medio (MSE). De esta manera, se obtienen los siguientes valores: $a = -5$, $b = -0,3$ y $c = 0,7$. Por lo que la Ec 5.1 queda de la siguiente manera:

$$K_t = -5 \cdot s_{op} - 0,3 \cdot \tanh\left(\frac{R_c}{H_{m0,i}}\right) + 0,7 \quad (5.3)$$

En la Figura 5.10 se presenta la comparación entre el K_t observado y el estimado utilizando la Ec. 5.3 con los valores de a , b y c obtenidos. Además, en la figura se muestran los percentiles del 95% y 5% para la estimación. Los parámetros de medición de la bondad del ajuste indican una buena estimación del coeficiente de transmisión ($R^2 = 0,91$).

Se asume que el error en la estimación de K_t sigue una distribución de Gauss de media 0 y varianza constante $\sigma^2(\varepsilon)=0,0039$. Por tanto, el intervalo de confianza del 90% para el K_t estimado mediante la Ec. 5.3 con el peralte y francobordo adimensional medidos experimentalmente viene dado por la expresión:

$$K_t|_{5\%}^{95\%} = K_t \pm 1,645\sqrt{\sigma^2(\varepsilon)} = K_t \pm 0,103 \quad (5.4)$$

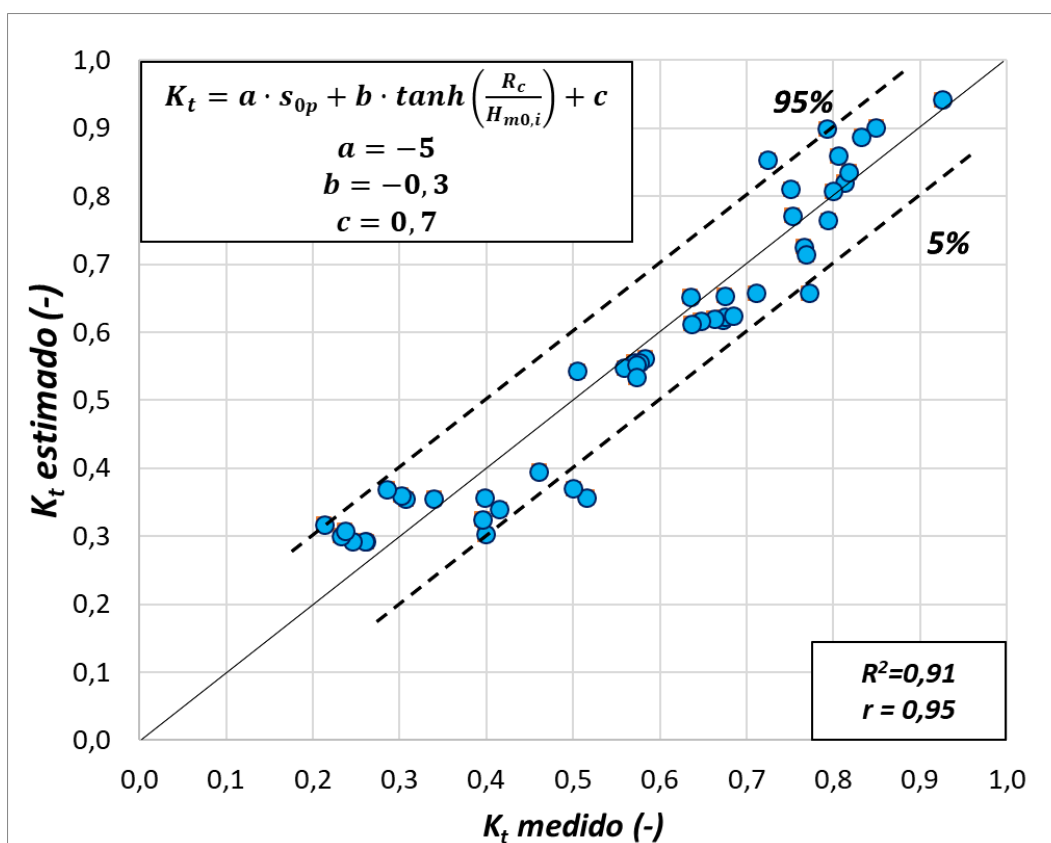


Figura 5.10. Comparación entre el K_t medido y estimado usando la Ec. 5.3. Fuente: Elaboración propia.

El rango de aplicación de la Ec. 5.3 es el siguiente:

$$-2 < \frac{R_c}{H_{m0,i}} < 3,6 \quad (5.5)$$

$$0,008 < s_{op} < 0,035 \quad (5.6)$$



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

6. Conclusiones

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

El objetivo principal de este estudio era el análisis del desempeño de este tipo de estructuras en cuanto a la disipación de la energía que produce, reduciendo la transmisión en su trasdós. Para comprender mejor su comportamiento, se ha realizado una breve introducción acerca de los principales condicionantes que intervienen en el proceso.

Posteriormente, se ha realizado una revisión de la literatura existente en cuanto a transmisión en estructuras marítimas de baja cota de coronación. Además, se ha revisado el estado del arte acerca del diseño de las HLCS de Cubípodos, incluyendo su estabilidad, transmisión y criterios constructivos en general.

Con el objetivo de ampliar el conocimiento de este tipo de estructuras se han llevado a cabo ensayos en el canal de oleaje del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València. Al final del canal se ha dispuesto un modelo a escala de dique homogéneo de Cubípodos (ver Figura 6.1).

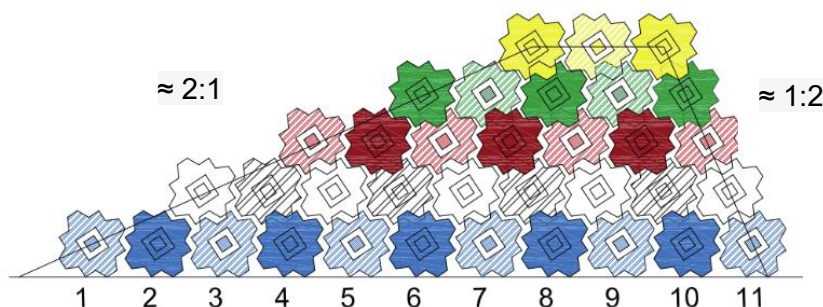


Figura 6.1. Sección transversal del modelo físico ensayado. Fuente: Elaboración propia.

Se han realizado ensayos con oleaje irregular, distintos calados a pie de dique (10, 15, 20 y 23cm) y cuatro peraltes (0,01, 0,02, 0,03 y 0,04). El registro del oleaje se ha realizado mediante sensores capacitivos situados a lo largo del canal por grupos: en zona de generación, en zona de modelo y en zona de transmisión. Lo que ha permitido llevar a cabo el estudio de la relación entre la altura de ola transmitida y la altura de ola incidente, es decir, el coeficiente de transmisión.

Por otro lado, en el *Capítulo 4* se ha desarrollado un algoritmo de tratamiento de imágenes de vídeo para el registro de oleaje en el canal, basado en la aplicación de técnicas de detección de contornos y umbralización. Esta idea surge como alternativa a técnicas intrusivas utilizadas hasta ahora como la medición mediante sensores de nivel, que, si bien están ampliamente aceptadas, pueden presentar diversas fuentes de error. El desempeño del programa desarrollado en MATLAB ha sido comprobado mediante la comparación de sus mediciones con las de los sensores (ver Figura 6.2 y Figura 6.3).

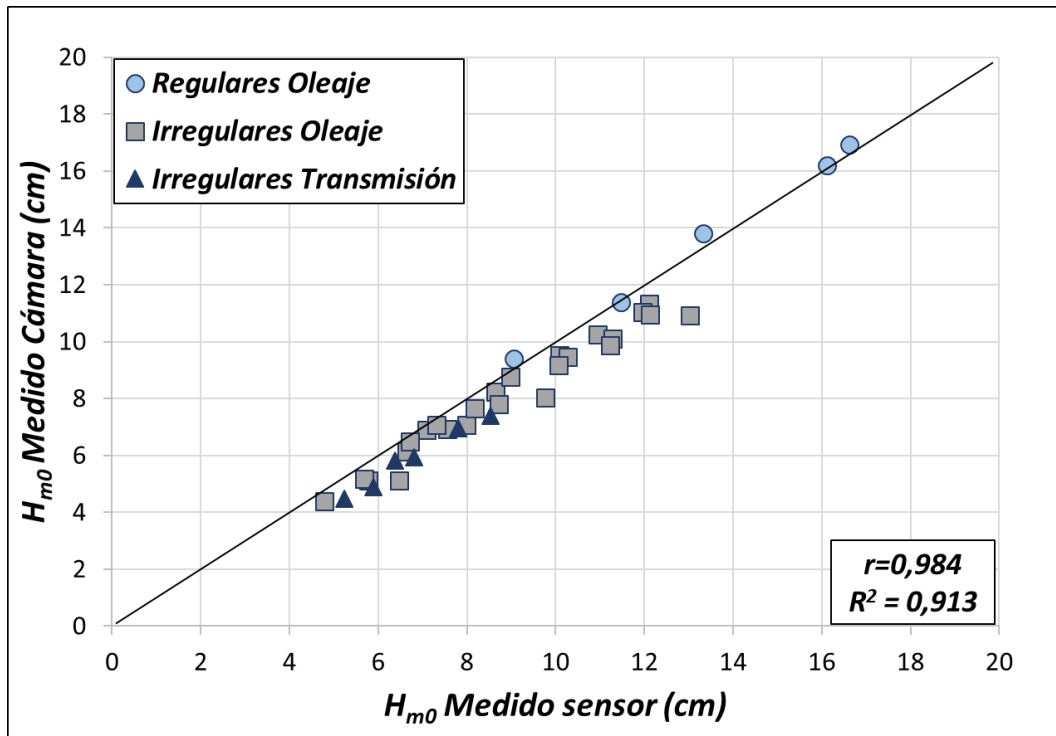


Figura 6.2. Comparación de H_{m0} medida en cámaras y medida en sensor. Fuente: Elaboración propia.

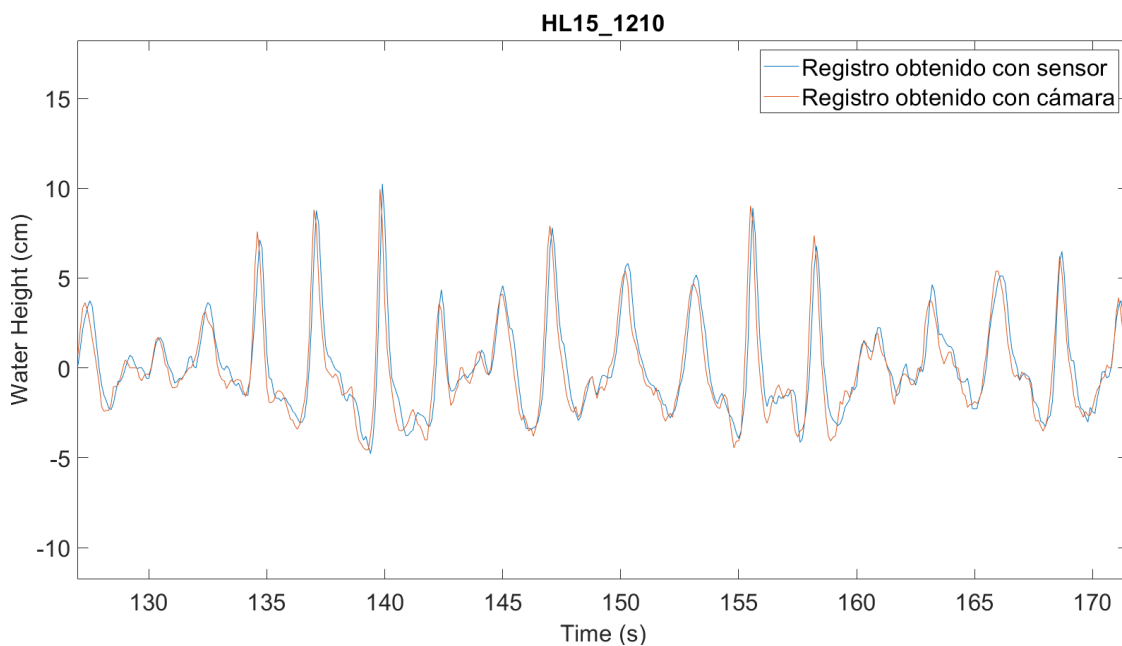


Figura 6.3. Comparación de los registros de altura de ola obtenidos mediante los sensores y mediante las cámaras. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento del algoritmo es satisfactorio, si bien presenta diversas perspectivas de mejora que se podrían afrontar en el futuro como se comenta en el Apartado 4.8.

Finalmente, se han aplicado los datos obtenidos en los ensayos de oleaje a la formulación existente para la estimación de la transmisión del modelo físico. Como era evidente, estas no son aplicables al caso estudiado, ya que fueron desarrolladas para otras tipologías estructurales.

Por ello, se ha desarrollado una nueva formulación empírica aplicable a las HLCS de Cubípodos. Se han utilizado redes neuronales para el estudio de las tendencias subyacentes entre el coeficiente de transmisión y las variables que intervienen en su estimación: el francobordo adimensional y el peralte.

A continuación se presenta la nueva expresión para la estimación del coeficiente de transmisión, así como la comparación entre los resultados que ofrece y la medición real obtenida en los ensayos:

$$K_t = -5 \cdot s_{0p} - 0,3 \cdot \tanh\left(\frac{R_c}{H_{m0,i}}\right) + 0,7$$

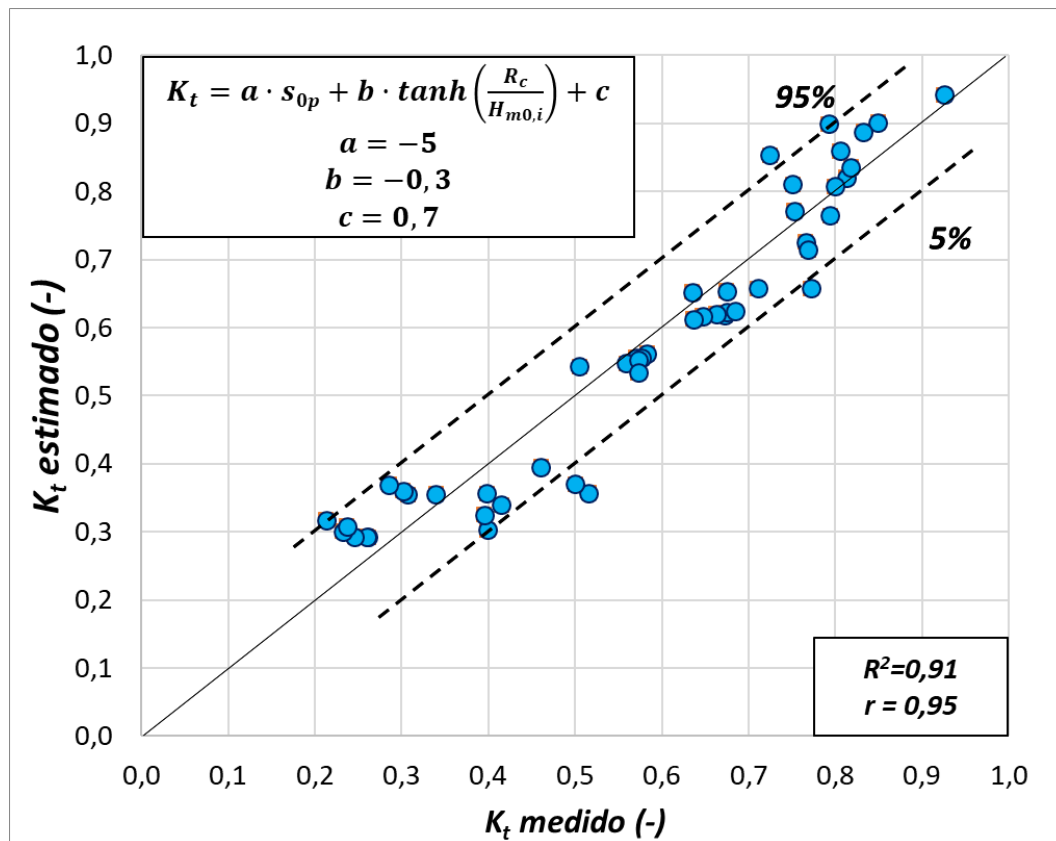


Figura 6.4. Comparación entre el K_t medido y estimado usando la Ec. 5.3. Fuente: Elaboración propia



CAPÍTULO 7. APLICACIÓN PRÁCTICA AL PARQUE NACIONAL DE CORCOVADO (COSTA RICA)

7. Aplicación práctica al Parque Nacional de Corcovado

7.1. Introducción

En este Capítulo se va a realizar una aplicación práctica real de las estructuras de baja cota de Cubípodos estudiadas a la protección de la costa del Parque Nacional Corcovado en Costa Rica.

El litoral pacífico de Costa Rica se encuentra en estado general de recesión debido a diversos factores como el aumento del nivel medio del mar debido al Cambio Climático. Además, los fenómenos climatológicos extremos son cada vez más frecuentes (El Niño, mareas extraordinarias, temporales, etc.). Su superposición está incrementando el riesgo de inundación y, por tanto, la intensificación de los procesos erosivos (Lizano, 2011).

Estos procesos erosivos han sido detectados en playas del Parque Nacional Corcovado entre Punta San Pedrillo y Bahía Drake. Lizano (2013) destaca que se trata de un fenómeno asociado al aumento del nivel del mar ligado con seguridad al calentamiento global y, con alguna posibilidad, al basculamiento de la costa debido a hundimientos tectónicos.

Si se une esto con el hecho del estado general de recesión de los arrecifes de coral (Odériz et al., 2018), parece necesario poner en marcha algún tipo de medida que frene la recesión del litoral, impulse el desarrollo de la diversidad de arrecifes coralinos y establezca las playas del Parque Nacional Corcovado.

A lo largo de este capítulo se estudiará las principales características del Parque Nacional Corcovado. Además, se llevará a cabo un análisis de la dinámica litoral existente y se propondrá la construcción de un dique exento homogéneo de Cubípodos que proteja la costa de la erosión y favorezca la recuperación de los arrecifes de coral.

7.2. El Parque Nacional Corcovado

El Parque Nacional Corcovado se emplaza en la Península de Osa, al suroeste de Costa Rica. Administrativamente se encuentra en la provincia de Puntarenas. Forma parte del Área de Conservación Osa (ACOSA) dentro del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) de Costa Rica que protege recursos naturales y culturales de los principales ecosistemas del país.



Figura 7.1. Ubicación del Parque Nacional Corcovado en Costa Rica. Fuente: San Lorenzo (1997).

El Parque fue creado en 1975 y cuenta con una superficie de 42.570 hectáreas terrestres y 3.354 hectáreas marinas. Se trata del área con mayor biodiversidad del planeta, con un 2,5% del total de esta, por lo que es considerado una pieza clave en el sistema de reservas biológicas del país. *National Geographic* lo define como “el lugar más intenso del mundo, biológicamente hablando, en términos de biodiversidad”. Cuenta con un total de 375 especies de aves, 124 de mamíferos terrestres, 61 de peces de agua dulce, 71 de reptiles, 8000 especies de insectos y 46 de anfibios, representando el 50% de las especies conocidas en todo el país.

Esto es así debido a que el conjunto del país forma un corredor biológico entre el Caribe y el Pacífico y entre América del Sur y el resto de América Central. Además, el conjunto de sus características ha dado lugar a un conjunto de hábitats terrestres y acuáticos que hace posible la gran diversidad de especies que posee: bosques, playas, arrecifes de coral, manglares, pantanos de agua dulce, etc. El área incluye entre 25 y 30 ecosistemas que hospedan a las poblaciones más grandes de especies como el jaguar, el puma o el tapir en el país.

A pesar de la distancia a la capital, el Parque Nacional Corcovado es una de las áreas más visitadas de Costa Rica, con en torno a 100.000 visitantes internacionales al año. Por ello, alrededor del Área Silvestre Protegida (ASP) se han formado clúster turísticos que dan servicio al turismo de la zona. Uno de estos es Bahía Drake, una de las puertas de entrada al Parque. Muy cerca de esta bahía se encuentra la playa en la que se va a realizar la aplicación de este proyecto.

7.2.1. Playa Rincón de San Josecito

El Parque Nacional Corcovado cuenta con 39 kilómetros de playas. Entre ellas, en la costa noroeste del Parque destaca la Playa San Josecito. La playa, formada por arena dorada, presenta

arrecifes naturales en su parte norte. Con el Parque Nacional Corcovado a sus espaldas, está limitada por Punta San José al norte y Punta San Pedrillo al sur. En las siguientes figuras se muestra la ubicación de la playa.



Figura 7.2. Localización de la Playa Rincón de San Josecito en el mapa de la península de Osa. Fuente: ACOSA.



Figura 7.3. Ubicación de la Playa Rincón de San Josecito. Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

Ubicada junto a la Bahía Drake, esta playa es uno de los principales destinos turísticos de la península de Osa debido a su calidad y a su oferta turística. El Rincón de San Josecito es un lugar tranquilo, en el que hay varios hoteles y restaurantes para los visitantes. Entre las actividades que se puede realizar destaca la natación, el snorkel o la pesca deportiva. Sus principales atractivos turísticos son los cercanos arrecifes de coral, el avistamiento de ballenas jorobadas, delfines, tortugas y demás especies marinas. Además, la playa está rodeada de reservas naturales y bosques y es punto de partida de múltiples excursiones por el Parque Nacional Corcovado.

7.2.2. Accesos

La Carretera Interamericana Sur conecta la capital de Costa Rica, San José, con la península de Osa en la ciudad Chacarita. Desde esta se puede llegar por carretera hasta Bahía Drake y la playa Rincón de San Josecito. Sin embargo, esta se encuentra la mayor parte del año cerrada debido a las inundaciones.

La forma más rápida de llegar es mediante un vuelo desde San José hasta el aeropuerto existente en la ciudad de Bahía Drake. Otra posibilidad es el viaje en ferry desde la ciudad de Sierpe.

7.3. Contexto

Desde hace ya décadas, la comunidad científica viene declarando que los bordes costeros mundiales se encuentran en estado de erosión (Cooper et al., 2008; Dickson et al., 2007), con un 70% de las playas de arena en retroceso (Gornitz, 1995). Asimismo, las islas y costas del Océano Pacífico han sido declaradas en riesgo de inundación debido al aumento del nivel del mar.

Además, se pronostica un aumento de la intensidad de los ciclones tropicales, lo que implica mayores alturas de ola y mayor impacto tierra adentro (Lizano y Lizano, 2010). La realidad es que los fenómenos climatológicos extremos son cada vez más frecuentes, y la superposición de estos elementos (El Niño, mareas extraordinarias, tormentas, oleajes extremos, etc.) está provocando el aumento de la cota y el riesgo de inundación (Lizano, 2011). Este autor destaca que la altura del oleaje en la zona de península de Osa viene aumentando en los últimos años, consecuencia también del calentamiento global.

Por otro lado, la zona de estudio es una región tectónicamente activa (Espinoza et al., 2005), con la confluencia de la Placa Nazca, la Placa Coco y la Placa del Caribe. La tectónica de placas crea una geodinámica costera que podría tener una implicación en el aumento relativo del nivel del mar y los procesos erosivos debido al efecto de la subducción de placas. Estos procesos han sido detectados por diversos investigadores en la costa del Pacífico de Costa Rica (Norabuena et al., 2004; Protti et al., 2001).

Al norte de la península de Osa, la gran cantidad de sedimentos aportada por el río Térraba mantiene estable la región al norte de su desembocadura. Sin embargo, el río Sierpe, cuya desembocadura se encuentra a unos km al este de la playa Rincón de San Josecito, aporta un menor caudal de material sólido, lo que está generando el incremento de los procesos erosivos.

Además, se prevé la acentuación de estos procesos en los próximos años debido a la explotación de los recursos del río.

En definitiva, el aumento del nivel del mar y la existencia de fenómenos climatológicos extremos cada vez más frecuentes y que pueden superponerse unos con otros, está provocando que el litoral costarricense muestre procesos de erosión cada vez más acentuados. En la zona estudiada en este proyecto, diversos autores han observado la existencia de estos procesos erosivos en el delta del Río Sierpe, así como en playas entre la Bahía Drake y Punta San Pedrillo. Indican que este es un problema generalizado de toda la costa de Costa Rica y que, como menciona Lizano (2013), se trata de un fenómeno asociado al aumento del nivel del mar, con bastante seguridad, ligado al calentamiento global y, con alguna posibilidad, al basculamiento de la costa debido a hundimientos tectónicos.



Figura 7.4. Situación de la zona de estudio. Fuente: Google Maps.

7.4. 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 el Parque Nacional Corcovado y en concreto a la Playa Rincón de San Josecito.

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.

7.4.1. Climatología

En el presente apartado se va a describir el clima existente en el Parque Nacional de Corcovado. Como en el resto de Costa Rica, no existen cuatro estaciones al uso, sino que hay un periodo de tiempo entre el mes de diciembre y marzo que se caracteriza por ser seco, y un periodo más largo y lluvioso entre los meses de mayo y octubre. Los meses de abril y noviembre son considerados de transición.

En la península de Osa, se encuentra una de las áreas que presentan mayor volumen de precipitación del pacífico Sur de Costa Rica, entre 4000 y 6000 mm anuales. Esto es debido a la orografía existente, con una de las cordilleras más altas del país en la zona. Además, Costa Rica se encuentra en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI), un cinturón de baja presión formado por corrientes de aire descendente en el que se unen grandes masas de aire húmedo y cálido procedentes del sur y del norte. Se trata de la zona donde confluyen los vientos alisios del hemisferio norte y los del hemisferio sur.

La convergencia entre sistemas de vientos ciclónicos como los vientos monzones procedentes del Pacífico y las brisas marinas dan lugar a intensas lluvias al colisionar con la Cordillera del Talamanca, que constituye una barrera orográfica. Los meses más lluviosos del año son septiembre y octubre. En estos suele producirse la inundación de áreas de llanura y el desbordamiento de los ríos.

Las temperaturas en el Parque Nacional Corcovado varían entre los 18°C y los 35°C, siendo el promedio anual de 27°C.

Uno de los fenómenos meteorológicos que más afecta al litoral de Costa Rica es el fenómeno El Niño. Se trata de un evento climático relacionado con el calentamiento del Pacífico oriental ecuatorial que provoca lluvias intensas e inundaciones en la zona intertropical, afectando de primera mano a la costa sur de Costa Rica.

7.4.2. Batimetría

Para poder afrontar el diseño de la estructura de defensa y estabilización de la costa es necesario conocer la batimetría de la zona de aplicación, es decir, el mapa de líneas isobatas (de igual profundidad) del fondo marino. La batimetría permitirá la caracterización del perfil geomorfológico de la playa, así como el estudio de la ubicación final de la estructura que se pretende diseñar.

La siguiente figura muestra la batimetría de la playa San Josecito obtenida a través de Navionics, en la que se muestra también el arrecife de coral existente en la parte norte de la playa.

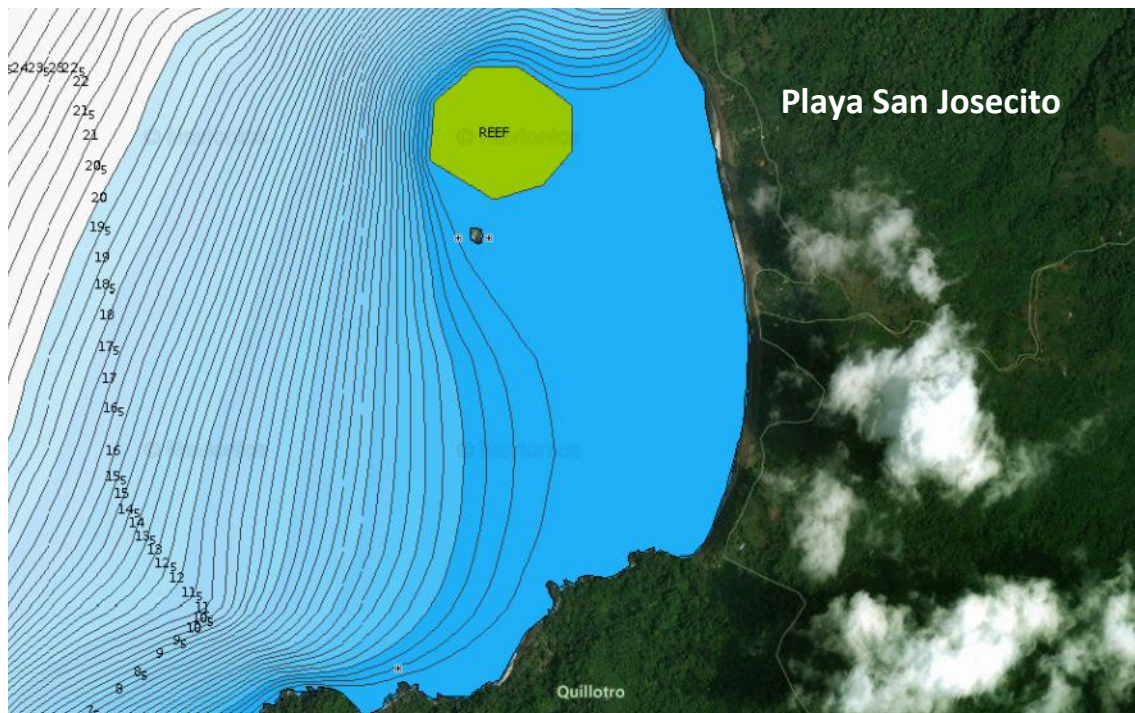


Figura 7.5. Batimetría de playa San Josecito. Fuente: Navionics.

7.4.3. Geomorfología

En el área del Parque Nacional Corcovado se manifiestan cuatro unidades geomorfológicas principales (ACOSA, 2018):

- El litoral está formado por playas arenosas con manglares en la zona del Golfo situado en la parte Sur y playas arenosas cerradas por cocoteros en el cordón Este y las playas del Norte.
- Existe un sistema montañoso con colinas fuertemente disectadas desarrollado sobre un basamento de rocas del Cretáceo conocidas como Complejo de Nicoya y recubiertas por sedimentos del Terciario (Formación Golfito).
- Al pie de estas montañas se desarrollan glaciares de acumulación de superficie ligeramente cóncava. Muestran cuatro niveles de terrazas y abanicos aluviales.
- Las llanuras desarrolladas desde el borde de estas terrazas están formadas por depósitos recientes de materiales fluvio-marinos.
- Depresiones tectónicas en áreas de subsidencia en cuyos fondos tienden a producirse procesos de solevamiento. Algunos ejemplos son las depresiones de Corcovado, Chacuaco y Golfo Dulce.

7.4.3.1. Clasificación de la costa

Se puede realizar una primera clasificación de la costa en función de su forma general resultado de los procesos naturales de erosión y depósito. De esta manera, existen las costas altas o costas de erosión, producidas por el hundimiento de la corteza terrestre cerca del borde de un área continental o el aumento del nivel del mar. Sus principales formaciones son los acantilados. Por otro lado, las costas bajas o costas de depósito son el resultado del descenso del nivel del mar o de la elevación de la corteza terrestre. Su principal forma de presentación son las playas.

Como puede verse en la Figura 7.6, la Playa Rincón de San Josecito es una costa baja de depósito formada por arenas.



Figura 7.6. Playa Rincón de San Josecito. Fuente: Paz, D (2012).

Suárez Bores (1979) propone una clasificación genética de costas basándose en los siguientes factores:

- **La naturaleza del fondo:** El fondo es fijo en el caso de costas de erosión y móvil si la costa es de depósito. En este caso, la playa estudiada es de fondo móvil formada por arenas que se encuentran en continuo desplazamiento debido a los procesos de la dinámica litoral.
- **La estabilidad del tramo:** En función de la estabilidad un tramo de costa puede ser hiperestable, si el tramo recibe mayor cantidad de sedimentos de los que cede; estable, si el balance de sedimentos que entran y salen está compensado; o inestable si en el tramo se produce una mayor pérdida de material suelto. La playa objeto de estudio se considera un tramo estable.
- **El perfil:** Se considera que el perfil es completo si presenta todo los tramos característicos de un perfil de playa (escarpe, playa seca, estrán y playa sumergida). Si alguno de estos tramos no existe, se considera que el perfil está incompleto, lo que da lugar a playas submarinas o playas sustentadas (ver Figura 7.7).

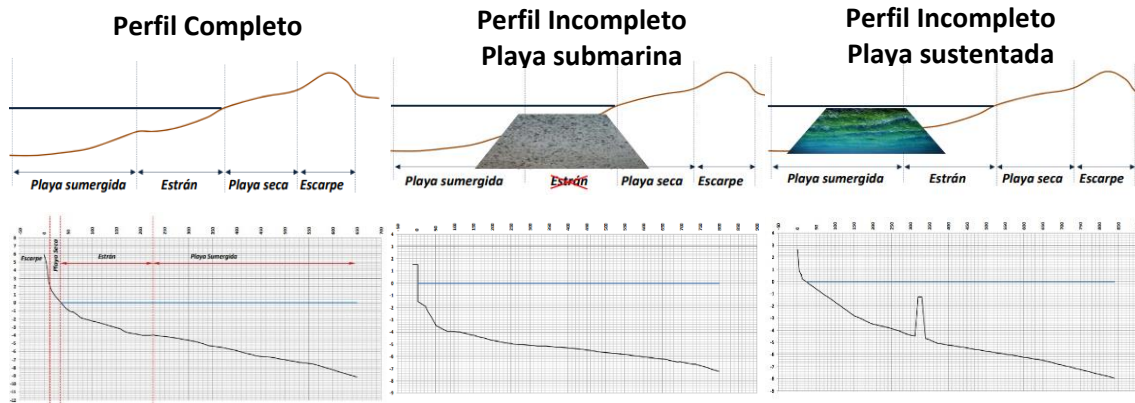


Figura 7.7. Tipos de perfil de playa. Fuente: UPV (2021).

En la siguiente figura puede verse el perfil existente en la Playa Rincón de San Josecito:

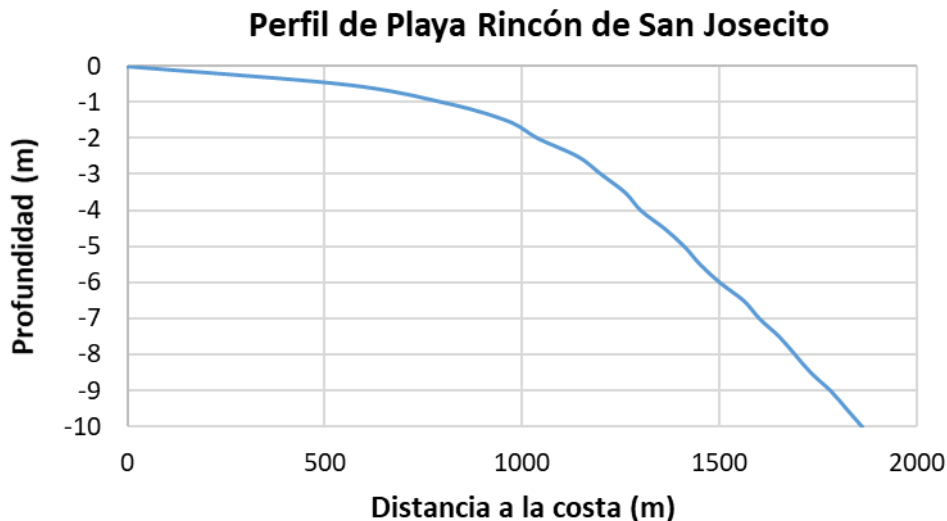


Figura 7.8. Perfil de Playa Rincón de San Josecito. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse, se aprecia un tramo inicial muy tendido de unos 500 metros que posteriormente va aumentando considerablemente su pendiente. Esta situación es característica de las playas situadas en zonas de formación volcánica. Podría considerarse como perfil completo.

- **La planta:** Realiza una clasificación según las singularidades existentes en planta, ya sean másicas, geométricas o dinámicas. La playa estudiada no presenta singularidades másicas. Sin embargo, delimitando la playa se encuentran la punta San José y la punta San Pedrillo situadas al norte y al sur respectivamente. Estas constituyen dos singularidades geométricas positivas (salientes hacia el mar). Mientras que el propio Rincón de San Josecito podría ser considerado una pequeña bahía (ver Figura 7.3). Por último, el arrecife existente en la zona norte de la playa constituye una singularidad dinámica que proporciona cierto abrigo a la costa.

7.4.4. Hidrología

Se ha realizado un breve estudio de las características hidrológicas del Parque Nacional Corcovado, con el fin de poder obtener información acerca de la dinámica fluvial y como afecta a la dinámica litoral.

La cuenca de la península de Osa ocupa un área de 1970 Km² desde el río Térraba, cerca de Palmar Sur hasta el río Esquinas, abarcando todos los ríos de la península de Osa. En la zona del Rincón de San Josecito destacan el río Agujitas y el río Drake.

Los ríos situados dentro del parque tienen un marcado carácter torrencial debido a la diferencia de precipitaciones durante la estación seca y la estación lluviosa. Estos evacuan el agua durante las fuertes precipitaciones. Los caudales correspondientes a picos de avenida se mantienen por poco tiempo. Sin embargo, durante estas épocas de intensas lluvias, se producen inundaciones que obligan al cierre de carreteras y caminos durante algunos días. Debido a las condiciones climatológicas y topográficas el sistema fluvial presenta características torrenciales de gran velocidad y con caudales muy variados.

Al noreste de la playa Rincón de San Josecito, muy cercana a la Bahía Drake, se encuentra la desembocadura del río Sierpe, el mayor río de la zona (ver Figura 7.9). Su curso es lento y propenso a provocar inundaciones, además aporta gran cantidad de sedimentos de grano fino. Su desembocadura es conocida como Delta Térraba-Sierpe, conocida por ser la reserva de manglares más grande de América Latina.

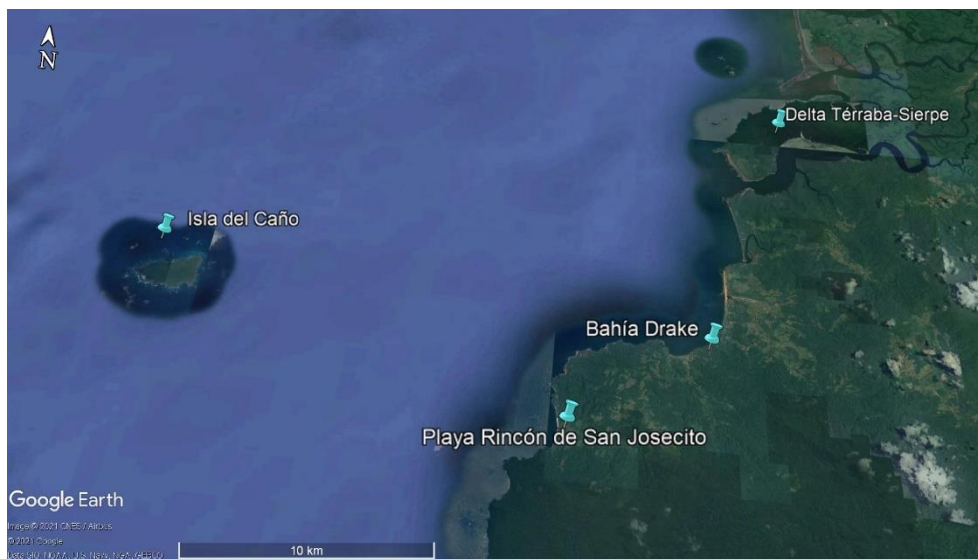


Figura 7.9. Imagen aérea de la zona de actuación. Fuente: Google Earth.

7.4.5. 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. Entre las consecuencias derivadas del cambio climático destaca el aumento de la temperatura global, que genera el derretimiento de los polos y el aumento del nivel del mar, pudiendo producir inundaciones. Además, también afecta a la variabilidad, intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos, como el fenómeno El Niño comentado en *el Apartado 7.4.1.*

Puesto que en este proyecto se va a construir una estructura marítima que estabilice y proteja la costa del Parque Nacional Corcovado, conocer la evolución del aumento del nivel del mar en la zona es vital, ya que esto influirá en la cota de inundación estimada en la playa y, por tanto, en la planificación del litoral.

Lizano (2011) destaca que la altura de ola en el litoral de la península de Osa se está incrementando en los últimos años como consecuencia del calentamiento global (ver Figura 7.10).

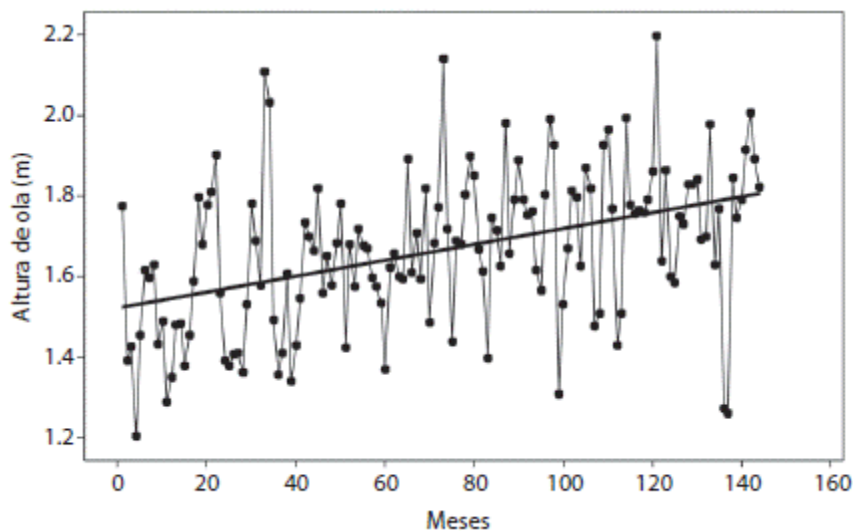


Figura 7.10. Promedios mensuales de altura de ola (m) frente al Humedal Nacional Térraba-Sierpe entre 1997 y 2008. Fuente: Lizano (2016)

Slangen et al. (2014) presentaron la proyección del incremento del nivel del mar regional y las incertidumbres asociadas para el siglo 21. Gracias a las estimaciones de estos autores se tiene la previsión de aumento del nivel medio del mar en la zona de actuación hasta el año 2100:

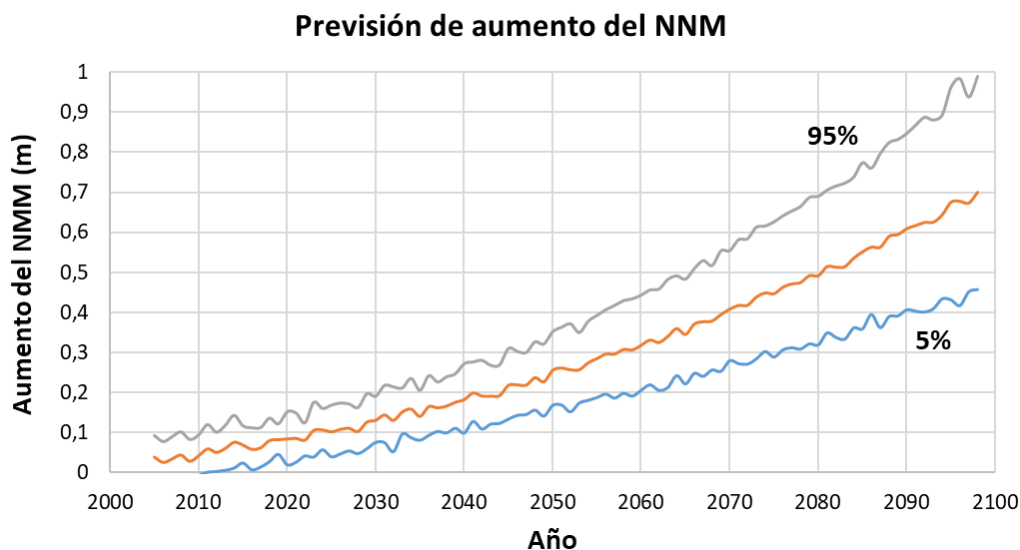


Figura 7.11. Previsión de aumento del nivel medio del mar (NMM) en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Slangen et al. (2014).

Puesto que la vida útil prevista para la estructura homogénea de Cubípodos es de unos 15 años, se va a estudiar la influencia del cambio climático en 2040. Como puede verse en la Figura 7.11, el aumento del nivel del mar previsto para este año es de unos 20cm.

7.4.6. Clima marítimo

Para llevar a cabo el diseño y la construcción de un dique exento frente a la Playa Rincón de San Josecito es imprescindible caracterizar el clima marítimo de la zona de actuación. Este comprende los regímenes medio y extremal de oleaje, las mareas y las corrientes existentes.

Para analizar el clima marítimo de la zona se ha utilizado la base de datos ERA5, quinta generación del reanálisis del clima global del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF, por sus siglas en inglés). Esta combina datos de modelos numéricos que aplican las leyes de la física con observaciones en todo el mundo. Proporciona datos horarios de distintas variables atmosféricas, oceánicas y continentales desde 1979 hasta la actualidad en las coordenadas solicitadas.

El principio utilizado se conoce como asimilación de datos y está basado en el método empleado en los centros de predicción meteorológicos. Cada 12 horas, la predicción se combina de manera óptima con los nuevos datos de observación disponibles, produciendo una nueva y mejor estimación del modelo. Los datos observados son proporcionados por el satélite del Programa de Observación de la Tierra: “Copernicus”, de la Agencia Espacial Europea.

7.4.6.1. Oleaje

Como se ha dicho anteriormente, los datos de oleaje en aguas profundas se han extraído de la base de datos ERA5. En este caso, se ha obtenido la serie de datos con frecuencia horaria desde el 01/01/2000 hasta el 31/12/2020. Cada hora, se tiene el valor de la altura de ola significativa (H_s), del periodo pico (T_p) y de la dirección de procedencia del oleaje.

Estas series temporales han sido analizadas mediante el software AMEVA desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental (IH Cantabria). Se trata de un conjunto de funciones que integra diversas metodologías de análisis estadístico que permite estudiar y caracterizar variables medioambientales. Mediante el uso de esta herramienta se ha obtenido el régimen medio y el régimen extremal del oleaje existentes en la zona de actuación.

7.4.6.1.1. Régimen medio

Definir el régimen de oleaje medio es fundamental para determinar los periodos más favorables para llevar a cabo la obra marítima. En primer lugar, se muestra el histograma de las alturas de ola y las tablas que relacionan la altura de ola con el periodo pico (Tabla 7.1) y con las distintas direcciones de procedencia (Tabla 7.2).

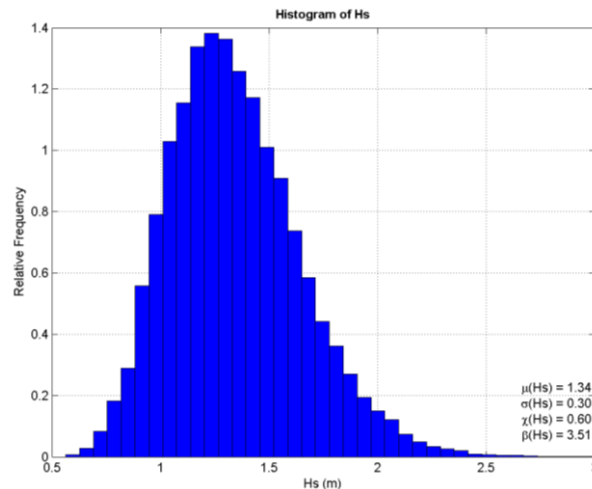


Figura 7.12. Histograma de alturas de ola. Fuente: Elaboración propia.

Hs (m)	Tp (s)										TOTAL
	< 4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
< 0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,75	0	0,078	0,143	0,238	0,188	0,016	0,011	0,000	0,000	0,003	0,678
1	0	0,607	1,119	3,639	3,234	1,463	0,463	0,108	0,041	0	10,674
1,25	0	2,392	0,888	6,645	11,712	6,063	1,831	0,418	0,055	0	30,021
1,5	0	3,382	0,629	3,393	11,833	8,080	2,933	0,501	0,077	0	30,850
1,75	0	1,898	0,272	1,442	5,350	6,562	2,205	0,375	0,034	0	18,159
2	0	0,626	0,151	0,285	1,387	3,009	1,181	0,208	0,017	0	6,865
2,25	0	0,145	0,043	0,027	0,273	0,932	0,596	0,105	0,012	0	2,133
2,5	0	0,039	0,024	0,002	0,010	0,186	0,185	0,039	0,002	0	0,487
2,75	0	0,023	0,014	0	0	0,008	0,052	0,023	0	0	0,119
3	0	0,002	0,002	0	0	0	0,003	0,007	0	0	0,013
TOTAL	0,057	9,190	3,286	15,672	33,987	26,319	9,461	1,783	0,240	0,006	100

Tabla 7.1. Periodo pico (Tp) - Altura de ola (Hs). Fuente: Elaboración propia.

Dirección	Hs (m)											TOTAL
	< 0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	
N 0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
NNE 22,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
NE 45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
ENE 67,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
E 90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
ESE 112,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
SE 135	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
SSE 157,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
S 180	0,001	0,001	0,001	0,116	0,0746	0,0652	0,0348	0,0174	0,0098	0	0	0,321
SSW 202,5	0,001	0,281	6,345	20,515	23,268	13,370	4,887	1,622	0,350	0,081	0,009	70,730
SW 225	0,001	0,387	3,831	8,129	7,196	4,410	1,756	0,452	0,114	0,027	0,004	26,306
WSW 247,5	0,001	0,010	0,493	1,149	0,296	0,305	0,187	0,041	0,014	0,011	0	2,507
W 270	0,001	0,001	0,003	0,110	0,013	0,009	0	0	0	0	0	0,136
WNW 292,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
NW 315	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
NNW 337,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
TOTAL	0,005	0,680	10,672	30,018	30,848	18,159	6,865	2,133	0,487	0,119	0,013	100

Tabla 7.2. Altura de ola (Hs) - Dirección de procedencia del oleaje. Fuente: Elaboración Propia.

Como puede observarse por los porcentajes totales, la dirección predominante de procedencia del oleaje es SSW. La altura significativa es menor de 1,75 metros en aproximadamente el 90% de los casos. Destacan los periodos de pico entre 10 y 14 segundos.

Para conocer de forma más visual la dirección predominante de procedencia del oleaje se ha obtenido la rosa correspondiente (ver Figura 7.13). Como puede observarse en esta, la dirección de procedencia predominante es SSW (202,5°), siendo las alturas de ola más frecuentes de entre 1,2 y 1,5 metros.

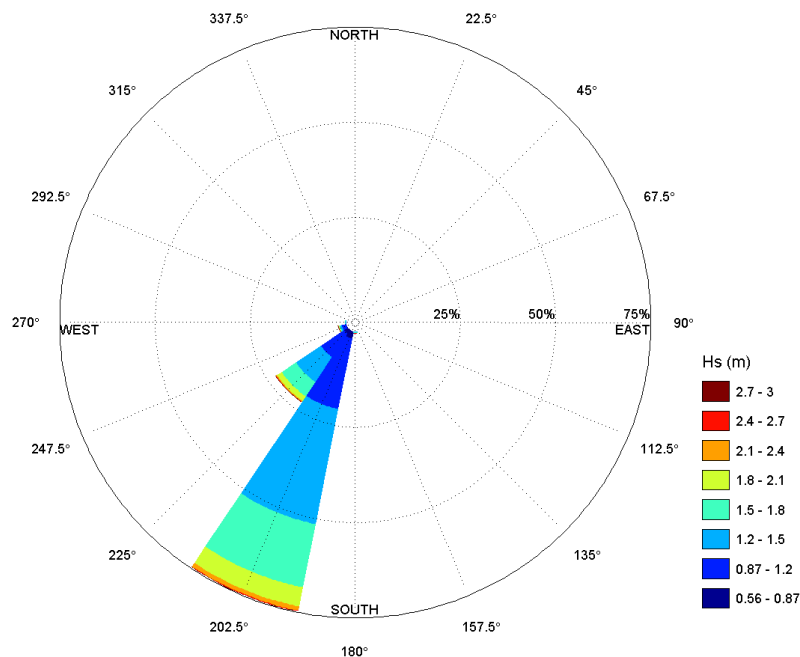


Figura 7.13. Rosa anual de oleaje. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, es interesante conocer las rosas de oleaje para cada una de las estaciones. En estas se observa la influencia de la climatología de la zona: durante la estación seca (de diciembre a marzo) las alturas de ola son menores, siendo las alturas de ola más probables de entre 0,8 y 1,2 m. y con máximos de 1,8 m.; mientras que el resto del año (estación lluviosa y meses de transición) las alturas de ola más repetidas se encuentran entre 1 y 2 metros, con máximos que alcanzan los 3 metros.

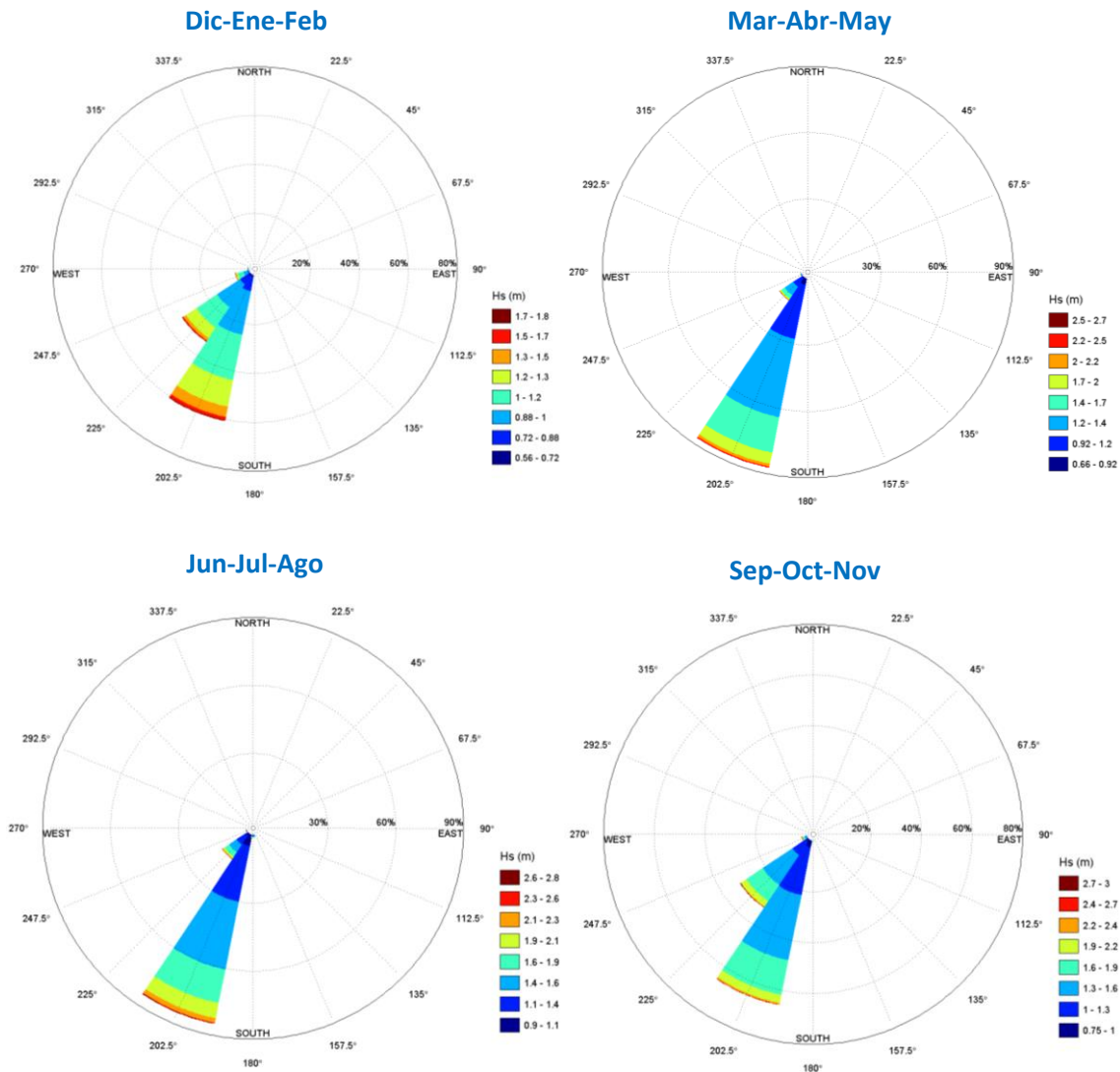


Figura 7.14. Rosas estacionales de oleaje. Fuente: Elaboración propia.

Por último, tras el análisis del régimen medio del oleaje se ha intentado ajustar la función de distribución que mejor modela la variable de la altura significativa. En la siguientes figura se muestra la función de densidad y la función de distribución log-normal. En esta última se representa la probabilidad de no excedencia de cada una de las alturas de ola desde el año 2000.

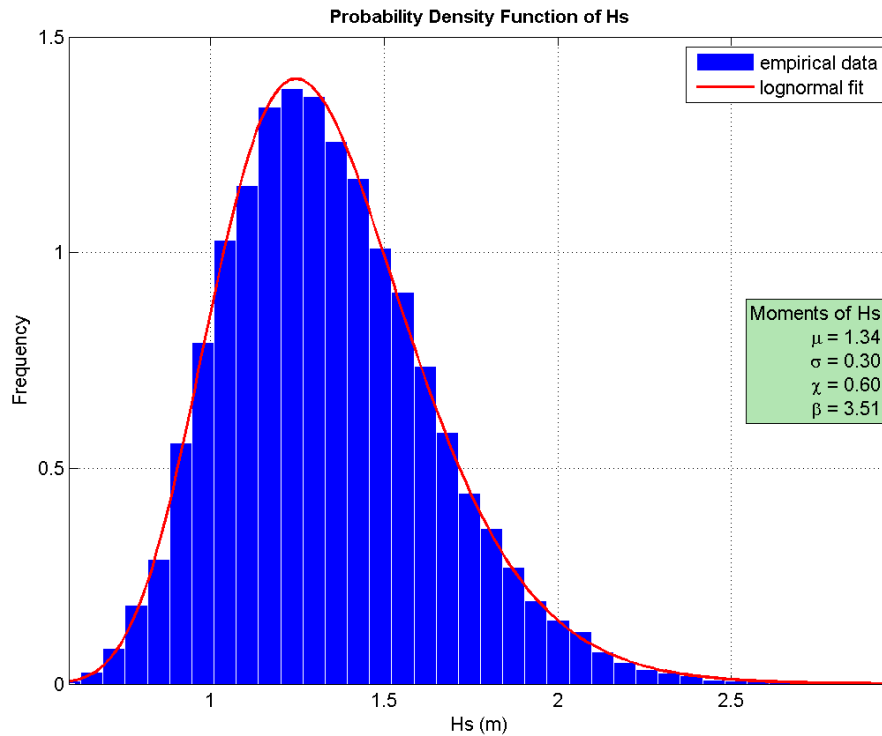


Figura 7.15. Función de densidad de log-normal de la variable H_s . Fuente: Elaboración propia.

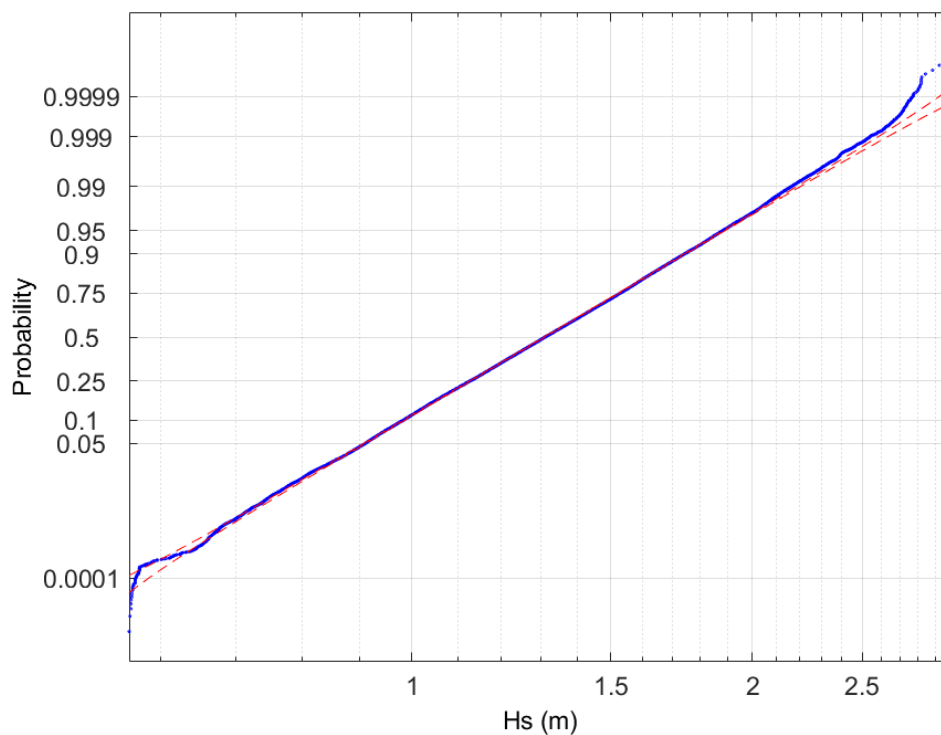


Figura 7.16 Función de distribución log-normal de la variable H_s . Fuente: Elaboración propia.

Esta distribución permite calcular la altura de ola excedida un periodo de tiempo al año. En este caso, es interesante conocer H_{s12} , es decir, la que se supera únicamente 12 horas al año.

$$1 - P_{exc} = 1 - \frac{12}{24 * 365} = 0,9986$$

$$P[x < H_{s12}] = 0.9986 \rightarrow P \left[Z < \frac{H_{s12} - 1.34}{0.3} \right] = 0.9986$$

$$\frac{H_{s12} - 1.34}{0.3} = 2.99 \rightarrow H_{s12} = 2,237m$$

7.4.6.1.2. Régimen extremal

Una estructura marítima debe estar diseñada para soportar las acciones producidas por el oleaje durante el peor escenario posible, es decir, los temporales. Las características de los mayores oleajes, producidos durante los temporales, pueden comprometer la estabilidad de la estructura y, por tanto, la de la costa protegida. Por esta razón es necesario definir el régimen extremal en la zona de actuación.

Para ello se ha llevado a cabo un análisis de los valores máximos anuales de altura de ola mediante la herramienta POT, Pareto-Poisson del software AMEVA. Esta herramienta permite realizar el análisis de una serie de datos mediante la técnica POT (Peak Over Threshold), con ajuste a una distribución de Pareto, en la que la frecuencia anual de los datos se ajusta a la distribución de Poisson.

Se ha obtenido la siguiente gráfica que muestra la distribución del régimen extremal de oleaje total. Para ello se ha ajustado el umbral de H_s correspondiente al cuantil 0,95 ($H_s=1,88$):

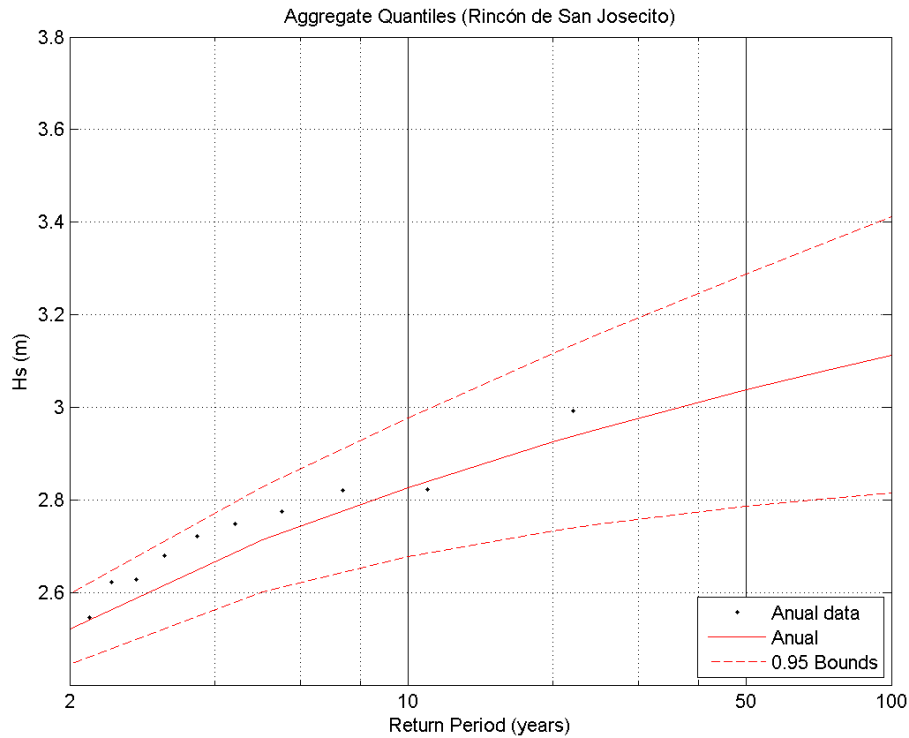


Figura 7.17. Régimen extremal de oleaje total. Fuente: Elaboración propia.

Puesto que en la propagación del oleaje desde aguas profundas se necesitará el régimen extremal direccional, se han obtenido las siguientes gráficas correspondientes a las direcciones SSW y SW de la misma manera que para el régimen extremal total. Las direcciones S, WSW y W no tienen suficiente cantidad de datos para poder ajustar una función.

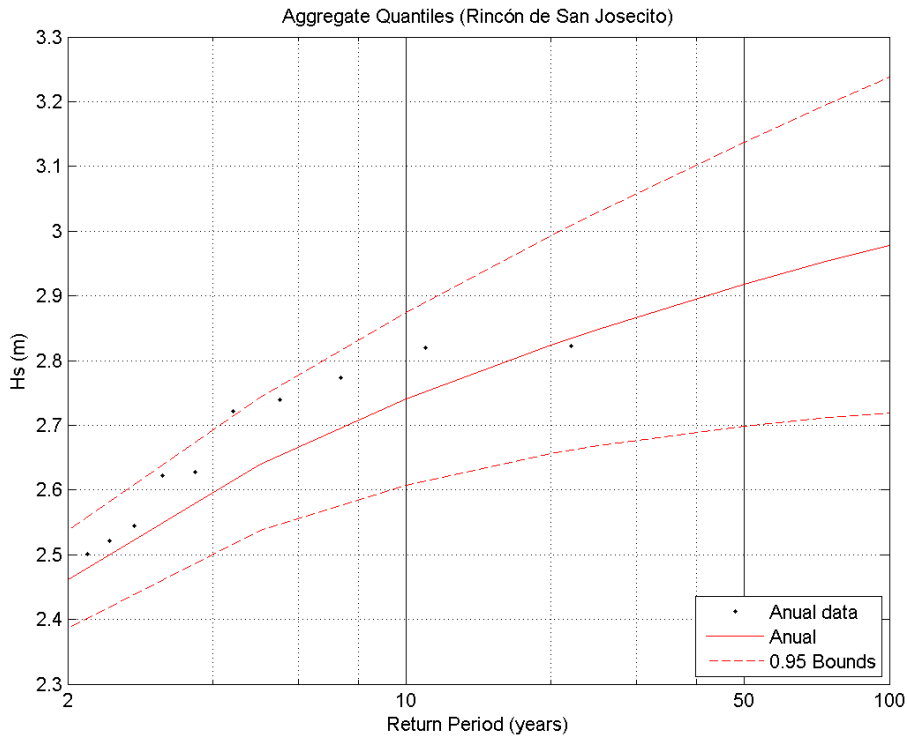


Figura 7.18. Régimen extremal de oleaje direccional (SSW). Fuente: Elaboración propia.

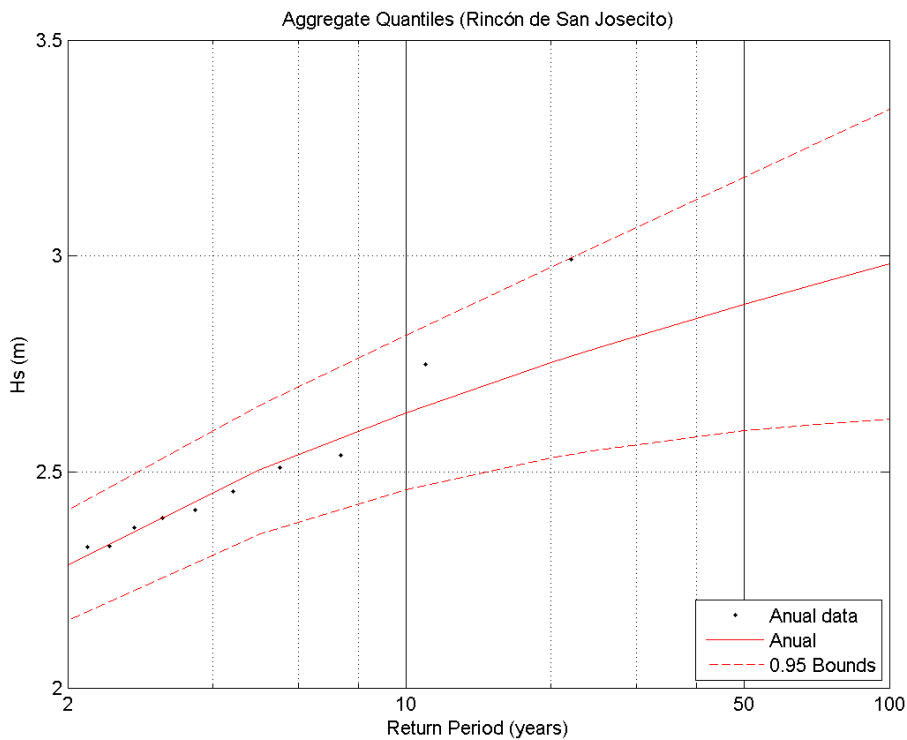


Figura 7.19. Régimen extremal de oleaje direccional (SW). Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se ha obtenido la relación T_p - H_s aproximada obteniendo la línea de tendencia de la totalidad de los datos y de los datos extremales, obteniendo un ajuste muy similar para ambos.

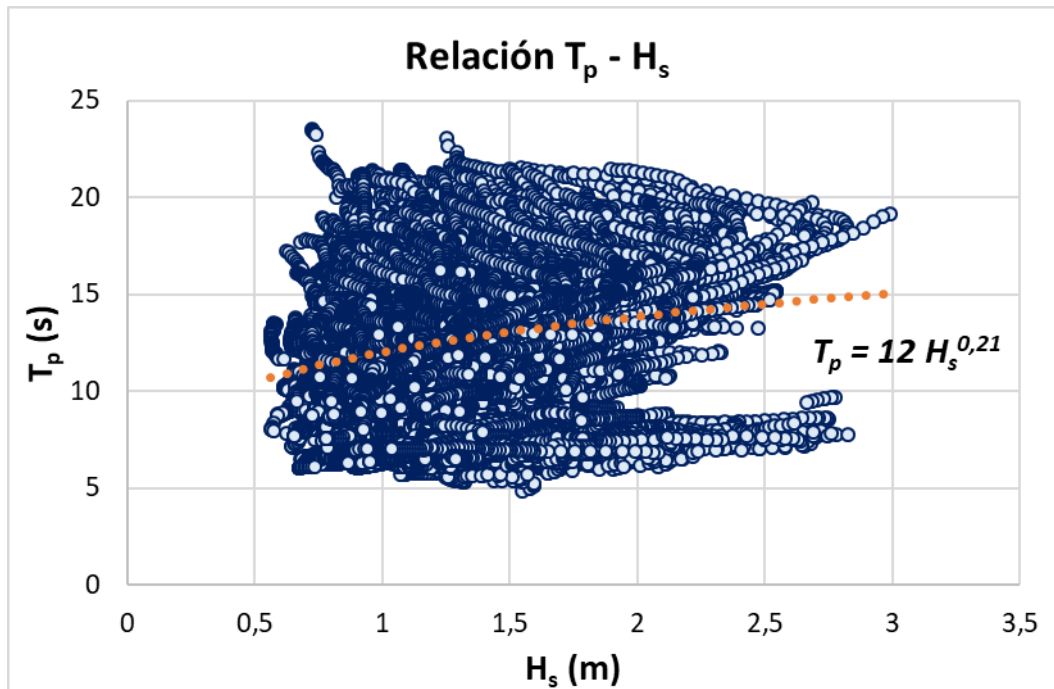


Figura 7.20. Relación T_p - H_s . Fuente: Elaboración propia.

$$T_p = 12 H_s^{0,21} \quad (7.1)$$

7.4.7. Mareas

Las mareas son oscilaciones periódicas del nivel del mar asociadas a varios fenómenos. En el caso de la costa pacífica de Costa Rica, la marea mayoritaria es la astronómica, generada por la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol. Las mareas en el Pacífico presentan incrementos cíclicos cada 4 o 5 años como consecuencia de los periodos de rotación y la posición relativa de la Tierra, la Luna y el Sol. Los fenómenos atmosféricos también producen variaciones en el nivel del mar, como el viento, la presión atmosférica o las corrientes marinas.

En Costa Rica, el comportamiento de las mareas durante todo el año se corresponde con el de marea astronómica semidiurna pura, con ciclos de unas 12 horas. Además, presenta variaciones quincenales asociadas con las fases de la Luna, con las mayores mareas alrededor de la luna llena y la luna nueva

Según Lizano (1997), además de la astronómica, en el Pacífico costarricense existen otras componentes que producen variaciones del nivel del mar:

- Movimientos tectónicos, que además inician procesos de erosión costeros.
- Alteración de las cuencas hidrográficas: Debido a la actuación antrópica, está la cantidad y calidad de los sedimentos que alcanzan los bordes costeros. Las principales causas se

encuentran en la deforestación y la canalización de las aguas. Esto ha roto el equilibrio costero, produciendo la modificación de sus bordes.

- Marea meteorológica o atmosférica: Es debida a los fenómenos meteorológicos comunes como la variación de la presión atmosférica o la acción del viento. Sin embargo, también influyen los fenómenos extraordinarios como El Niño. El fenómeno de El Niño explica las anomalías que presentan las mareas en la zona de actuación Lizano (1997). Durante este, la temperatura del océano aumenta y los vientos alisios se debilitan, lo que produce una onda con gran longitud que genera una oscilación del nivel del mar en toda la costa Pacífica. En la siguiente figura se muestra la variación del nivel del mar entre los años 1980 y 1997 en la estación mareográfica de Santa Cruz, en las islas Galápagos. En esta puede observarse que en los años en los que se ha dado el fenómeno de El Niño, el nivel del mar ha aumentado considerablemente.

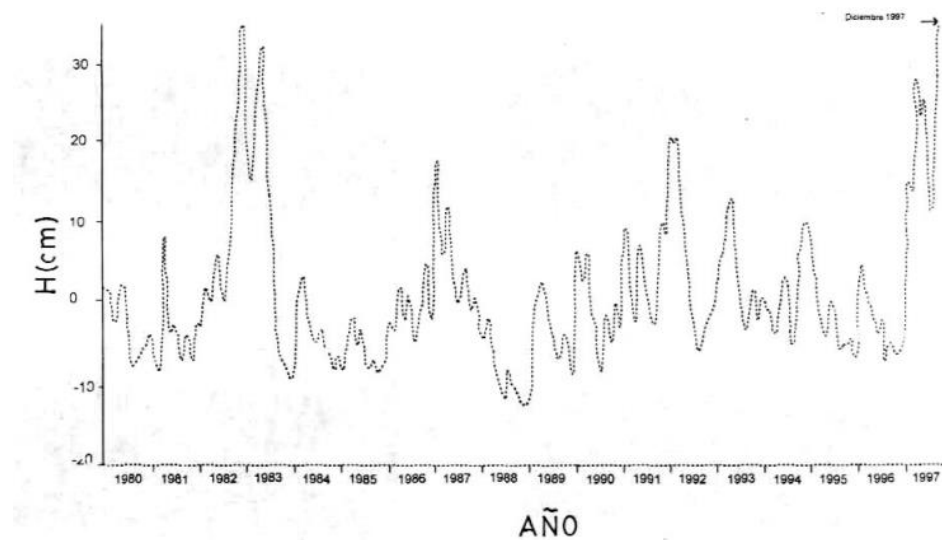


Figura 7.21. Variación del nivel del mar respecto al promedio en la estación mareográfica de Santa Cruz en las Islas Galápagos. Fuente: Lizano (1997)

Los efectos estos factores pueden acumularse, lo que produce mareas mayores. Por ejemplo, si el fenómeno El Niño coincide con un periodo de marea astronómica extraordinaria, ambos efectos se suman generando un incremento considerable en el rango de marea que provoca importantes inundaciones en la costa.

Por todo lo comentado, conocer la carrera de marea es importante para el diseño de una infraestructura, el planeamiento de operaciones y la gestión de su repercusión en el litoral. Para obtener la amplitud de marea existente en la zona de actuación se ha consultado distintas fuentes.

Lizano (2006) analiza los fenómenos de mareas extraordinarias producidos hasta 2006, señalando que el valor máximo de la pleamar alcanzó los 3,29 metros en Puntarenas. El autor destaca que el rango de marea promedio de la costa pacífica de Costa Rica es de 2,80 metros.



Por otro lado, se ha consultado la herramienta Tabla de Mareas en la estación de Quepos, un lugar cercano y con condiciones similares a la zona de actuación. Esta herramienta proporciona el valor diario de las mareas en comparación a los valores máximos registrados.

La pleamar máxima registrada en la estación de Quepos es de 3,3 metros, igual a la indicada por Lizano (2006) en Puntarenas. Por otro lado, la bajamar mínima es de -0,5 metros. En la estación de Quepos, se considera nivel cero al nivel de Sicigias, que corresponde con el nivel medio de las bajamares extremas o mayores. Con estos datos, se tiene que la carrera de marea más amplia es de 3,8 metros.

7.5. Subsistema socioeconómico

El análisis del subsistema socioeconómico tiene como objetivo el conocimiento de los usos 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.

7.5.1. Demografía

El área de influencia del Parque Nacional Corcovado se localiza en los cantones de Osa y Golfito. Sin embargo, la Playa Rincón de San Josecito se encuentra específicamente en el distrito de Bahía Drake, cantón de Osa y provincia de Puntarenas.

Los habitantes de Bahía Drake tienen como principal medio de vida las actividades asociadas al turismo del Parque Nacional Corcovado y la Isla del Caño, dos de los atractivos de referencia de la zona sur de Costa Rica. El 90% de la población se dedica a ofrecer servicios turísticos, ya sea de actividades de ocio o de alojamiento.

En cuanto a indicadores demográficos, según el último censo elaborado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica (INEC), el cantón de Osa tiene 29.483 habitantes, de los cuales 1.030 viven en Bahía Drake. Al tratarse de una zona rural, la densidad de población es bastante baja, un 15,2%.

Como puede verse en la pirámide de población, su forma indica que la población es joven en general, con una natalidad bastante grande y una población mayor de 65 años de apenas un 7%. Presenta una estructura típica de zonas rurales. Además, el porcentaje de hombres es ligeramente mayor que el de mujeres.

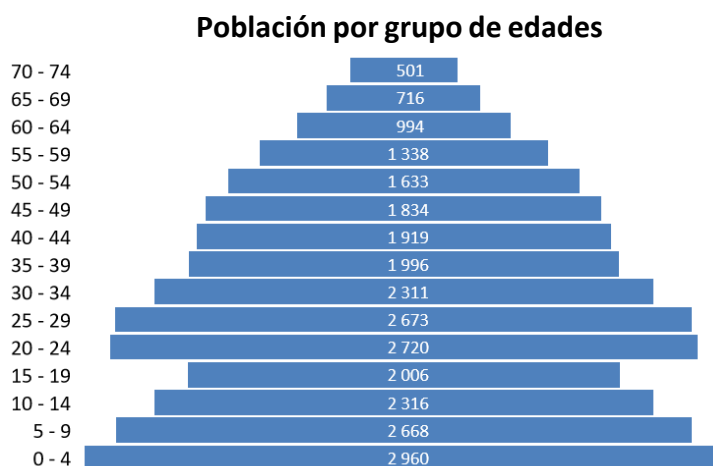


Figura 7.22. Pirámide de población por edades en el cantón de Osa.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INCE.

7.5.2. Actividades económicas

Costa Rica es un destino turístico reconocido mundialmente por su naturaleza gracias a sus destacados Parques Nacionales, entre los que se encuentra el Parque Nacional Corcovado. Como

se ha comentado en apartados anteriores, este Parque está muy bien posicionado en el mercado turístico internacional. Algunos medios como *National Geographic* lo describen como “un Parque de gran belleza escénica y variedad ecológica y uno de los lugares biológicos más intensos del mundo”. Es por esto por lo que una gran parte de las actividades económicas desarrolladas en la zona alrededor del Parque, en la península de Osa, están enfocadas al turismo, lo que ha llevado a la formación de verdaderos clústeres turísticos en algunos distritos.

En el cantón de Osa, la tasa de desempleo ronda el 3% de la población, con un porcentaje muy bajo de dependencia económica (1,8%). En cuanto a la distribución de la ocupación, el 28% se dedica al sector primario, el 13% al sector secundario y el 58,8% al sector terciario, lo que indica la clara tendencia a los servicios turísticos. Sin embargo, si se analiza en concreto el distrito Bahía Drake, el porcentaje de población ocupada en el sector terciario asciende al 71%, ya que este es un puerto de salida de barcos hacia las playas del Parque o hacia Isla del Caño.

Su importancia a nivel económico fue analizada en el estudio *Estimación del Aporte Económico del Parque Nacional Corcovado al desarrollo local, regional y nacional en 2010*. Este muestra la distribución de los beneficios económicos generados por el Parque. Estima que el Parque genera alrededor de 41,1 millones de dólares (US\$), de los cuales un 48% corresponden al transporte aéreo, un 31% a proyectos de empresas, un 14% a hostelería y un 4% a restauración y otras actividades. En este mismo estudio se cuantifica el aporte del Parque Nacional Corcovado a la economía nacional, alcanzando un total de 91,6 US\$ incluyendo el pago de entradas al Parque, investigación y otras actividades relacionadas (combustibles, insumos agrícolas, etc.).

A continuación se describen los principales atractivos turísticos del Parque Nacional Corcovado:

- Lagunas y ríos de gran valor paisajístico y biológico.
- Arrecifes de coral con gran diversidad de especies de fauna y flora marina.
- Playas vírgenes de arena.
- Cataratas de San Pedrillo y Llorona.
- Formaciones geológicas como la Piedra de Arco, Caverna Marina o la Roca la Chancha.
- Biodiversidad: Se trata de uno de los sitios con mayor biodiversidad del planeta. Con una gran cantidad de especies de plantas (más de 2000), mamíferos (124), aves (375), anfibios (48) y reptiles (60).
- Avistamiento de delfines, ballenas y otras especies de mamíferos marinos: Existen diversas empresas que ofrecen excursiones en barco para el avistamiento de estos animales.
- Bosque tropical muy lluvioso: Supone un elemento de exuberancia tropical muy atractivo para los visitantes.
- Multitud de senderos permiten realizar excursiones a pie por el Parque con guía.
- Avistamiento del desove de tortugas marinas.

En los distritos de la zona como Bahía Drake, existen empresas (turoperadores) que ofrecen todo tipo de actividades desarrolladas en el Parque y sus inmediaciones. Algunas de estas actividades son la pesca en mar abierto, el snorkel en arrecifes de coral, observación de delfines, ballenas y tortugas, observación de aves, excursiones a pie por el Parque y actividades de ocio acuático en general (kayak, surf, etc.).

7.6. Dinámica litoral

La dinámica litoral es el conjunto de los procesos costeros causados por los agentes climáticos que producen cambios en la morfología de la costa. Los elementos fundamentales que actúan son los agentes climáticos (viento, oleaje, mareas, corrientes, etc.), el medio en el que actúan y los procesos que producen, como el transporte sólido litoral.

En este apartado se va a analizar la dinámica litoral poniendo el foco sobre el transporte sólido litoral existente en la Playa Rincón de San Josecito. El transporte sólido litoral es el movimiento de material causado por la incidencia y propagación del oleaje, que, al incidir de forma oblicua sobre la costa, genera dos tipos de corrientes: una longitudinal, paralela a la línea de costa, y otra transversal, normal a esta.

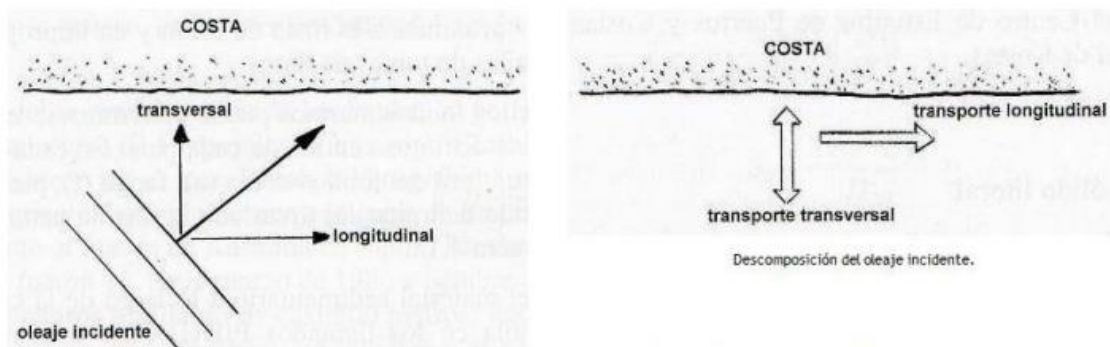


Figura 7.23. Transporte sólido litoral. Fuente: Sardà, R. (2009).

Como puede verse en la Figura 7.3, la playa Rincón de San Josecito se encuentra encajada entre la Punta San José y Punta San Pedrillo. Además, está protegida por el arrecife que puede observarse en el *Apartado 7.4.2*. Por estas razones, es sencillo asumir que la playa experimentará cierto basculamiento.

El CERC (Coastal Engineering Research Center) propone una formulación que permite realizar una estimación teórica aproximada del potencial de transporte longitudinal de sedimentos de la zona. Se recoge en el Shore Protection Manual: SPM (1984). Sin embargo, las condiciones de la playa estudiada hacen que sea difícil asimilar el transporte sólido litoral existente en esta, ya que el modelo del CERC no tiene en cuenta la energía disipada por agentes externos como podría ser el arrecife.

En definitiva, Rincón de San Josecito es una playa encajada, protegida por un arrecife que disipa parte de la energía de oleaje existente en esta. Con la información disponible es difícil establecer los ratios de transporte y el posible basculamiento de la playa.

7.7. Diseño de la estructura

En el presente apartado se va a proceder al cálculo de las características necesarias para la definición del dique arrecife de Cubípodos que se quiere construir. Para ello, será necesario obtener en primer lugar las características básicas de diseño, entre las que se encuentran la orientación del dique respecto de la costa, su separación con la línea de costa, su longitud, ubicación, cota de coronación, etc.

Posteriormente se obtienen las condiciones del oleaje de diseño que afectará a la estructura tras su construcción.

7.7.1. Criterios básicos de diseño

Para el diseño de la HLCS de Cubípodos es necesario predefinir algunas de las características de estos.

En primer lugar, es necesario señalar que la estructura que se va a diseñar tendrá unas características similares a los modelos estudiados, ensayados en el LPC-UPV (ver *Capítulo 3*). En este caso, debido a la batimetría, estará formada por cuatro 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 $2,21 \text{ t/m}^3$.

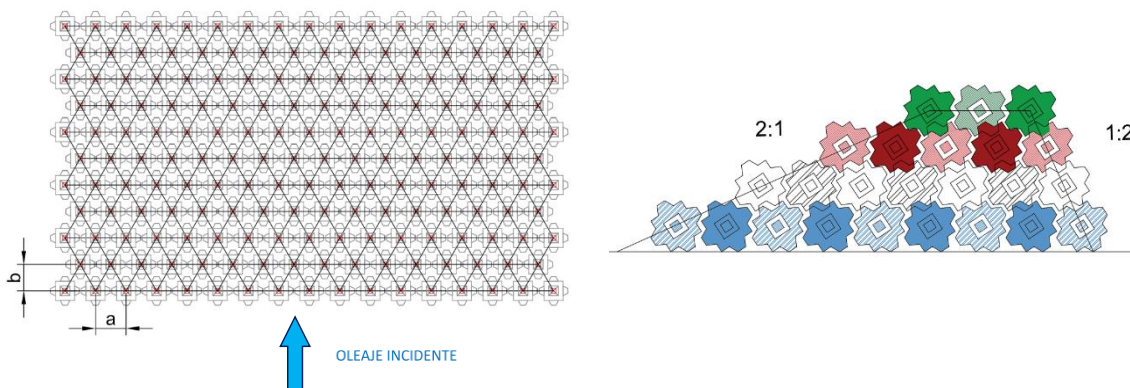


Figura 7.24. Parámetros de diseño de la malla de colocación y la sección transversal. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, puesto que no se quiere que se produzcan averías, se llevará a cabo el diseño de la estructura en función del número de estabilidad relativo al inicio de averías (IA) obtenido en el *Capítulo 3*.

En cuanto a la cota de coronación, el diseño se realizará para poder aplicar la ecuación del coeficiente de transmisión obtenida (Ec 5.3). Por tanto, esta debe tener un francobordo dentro del rango de aplicación de esta ecuación:

$$-2 < \frac{R_c}{H_{m0,i}} < 3,6 \quad (7.2)$$

Además, debe tenerse en cuenta que entre los objetivos de la actuación está el evitar impactos visuales, por lo que la estructura no deberá sobrepasar demasiado el nivel medio del mar. Se admitirá que el dique sea visible en algunos estados de mar siempre que nunca suponga un obstáculo visual.

Otro de los objetivos de los diques exentos es amortiguar la energía del oleaje incidente, de manera que se reduzca su potencial erosivo. Por esta razón su orientación es otro parámetro fundamental. Lo más normal es que el oleaje incidente a bajas profundidades se vaya colocando normal a la línea de costa debido a la refracción. Por esto, aunque la dirección del oleaje predominante sea SSW y exista cierta oblicuidad respecto a la línea de costa, se decide disponer el dique exento paralelo a esta.

Por lo que respecta a la ubicación de la infraestructura, la distancia de separación del dique y la costa es esencial para determinar las condiciones que se quiere crear en la playa en que se va a actuar. En función de esta distancia la costa presentará una u otra respuesta. Si es reducida, la acumulación de sedimentos en el trasdós del dique será mayor, lo que llevará a la formación de un tómbolo o hemitómbolo. Por el contrario, a mayor separación, menor será la sedimentación. Algunos de los criterios de diseño en función de la respuesta de la costa se recogen en la siguiente tabla:

Autor	Expresión	Respuesta de la costa
Gourlay (1981)	$L/y < 1$	No hay tómbolo
S.P.M. (1984)	$L/y < 0,4 - 0,5$	Saliente
Dally y Pope (1986)	$L/y = 0,5 - 0,67$	Saliente
Suh y Dalrymple (1987)	$L/y < 1$	No hay tómbolo (Dique Aislado)
Suh y Dalrymple (1987)	$L/y < 2G/L$	No hay tómbolo (Grupo de diques)
Ahrens y Cox (1990)	$L/y < 1,5$	Saliente bien desarrollado
Ahrens y Cox (1990)	$L/y < 0,8 - 1,5$	Pequeño saliente

L: Longitud del dique.

Y: Distancia del dique a la línea de costa

G: Separación entre diques exentos alineados

Tabla 7.3. Condiciones de respuesta de la costa ante la construcción de diques exentos. Fuente: Elaboración propia.

En este caso se quiere evitar la formación de cualquier tómbolo o hemitómbolo y además se prevé la construcción de un grupo de diques. Por tanto, se utilizará la formulación propuesta por Suh y Dalrymple (1987) para el diseño en planta de los diques. Además, el hecho de tener una batimetría llana en la zona cercana a la costa implica que la zona de rompientes seguramente esté lejos de la playa y no genere mucho transporte cerca de la línea de costa.

El dique se situará sobre la batimétrica -5 metros, donde no supondrá un obstáculo para los bañistas. Una vez conocidas las dimensiones de los Cubípodos se definirá la longitud, ubicación y número de diques a colocar. Estos parámetros determinan la cantidad de sedimento acumulado en la zona protegida.

7.7.2. Altura de ola de cálculo

Para conocer el régimen de oleaje de cálculo que afectará a la estructura es necesario en primer lugar obtener el periodo de retorno de la obra, que depende de su vida útil y del valor de riesgo admisible:

$$P_{fELU} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^V \quad (7.3)$$

Siendo P_{fELU} la probabilidad conjunta de fallo, T_r el periodo de retorno del temporal en años y V la vida útil de la infraestructura en años.

La ROM 1.0-09 presenta en su apartado 2.8 unas tablas (Tabla 7.4) con los valores recomendados del 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 IRE ⁷		VIDA ÚTIL MÍNIMA (V _m) ⁷ (años)	
ÁREAS PORTUARIAS	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
	ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ⁴		r ₃	Alto
PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO		r ₂ (r ₃) ⁵	Medio (alto) ⁵	25 (50) ⁵	
PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES		r ₁ (r ₃) ⁶	Bajo (alto) ⁵	15 (50) ⁷	
REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS		r ₁	Bajo	15	

¹ El índice IRE se elevará a r₃ cuando el tráfico esté asociado con el suministro energético o con materia primas minerales estratégicos y no se disponga de instalaciones alternativas adecuadas para su manipulación y/o almacenamiento.
² El índice IRE se elevará a r₃ cuando la instalación militar se considere esencial para la defensa nacional.
³ En obras de protección de rellenos o de defensa de márgenes se tomará un índice IRE igual al señalado para el área portuaria en que se localiza.
⁴ Se entienden como diques de defensa ante grandes inundaciones, aquéllos que en caso de fallo podrían producir importantes inundaciones en el territorio.
⁵ El índice IRE se elevará a r₃ cuando la toma de agua o el punto de vertido esté asociado con el abastecimiento de agua para uso urbano o con la producción energética.
⁶ El índice IRE se elevará a r₂ cuando en su zona de afección se localicen edificaciones o instalaciones industriales.
⁷ Los índices inferiores a r₃ de la tabla se elevarán un grado por cada 30 ME de coste de inversión inicial de la obra de abrigo.

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA			ÍNDICE ISA	P _{IELU}	P _{IELS}		
ÁREAS PORTUARIAS	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 *	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	
ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ³			s ₄	Muy alto	0.0001	0.07
	PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO			s ₂ (s ₃) ⁴	Bajo (alto) ⁴	0.10	0.10
	PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES			s ₂ (s ₄) ⁵	Bajo (muy alto) ⁵	0.10	0.10
	REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS			s ₁	No signif.	0.20	0.20

Tabla 7.4. IRE, ISA y vida útil mínima en función del tipo de área abrigada. Fuente: ROM 1.0-09.

Puesto que la obra proyectada se encuentra en un área del litoral y su función es proteger y defender una playa, se tiene un IRE bajo con una vida útil mínima de 15 años y un ISA no significativo con valores de probabilidad de fallo de 0,20. Con esto, aplicando la Ec. 7.3 se obtiene el periodo de retorno de la estructura:

$$0,2 = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{15} \rightarrow T_r = -\frac{15}{\ln(1 - 0,2)} = 67,22 \rightarrow 68 \text{ años}$$

Introduciendo este periodo de retorno en la Figura 7.18 y la Figura 7.19, que muestran la distribución del régimen extremal de oleaje para las direcciones SSW y SW, se obtiene la altura de ola de cálculo en cada una de estas, que tiene una probabilidad de excedencia asociada de aproximadamente un 1,5% ($1/68=0,0147$).

$$H_{\text{cal},0}(\text{SSW}) = 2,95 \text{ metros.}$$

$$H_{\text{cal},0}(\text{SW}) = 2,9 \text{ metros.}$$

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 (K_s) y el coeficiente de refracción (K_r).

$$H_{s,p} = H_{s,o} * K_r * K_s \quad (7.4)$$

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 $K_r * K_s$, conocida la dirección de incidencia del oleaje y el periodo de este.

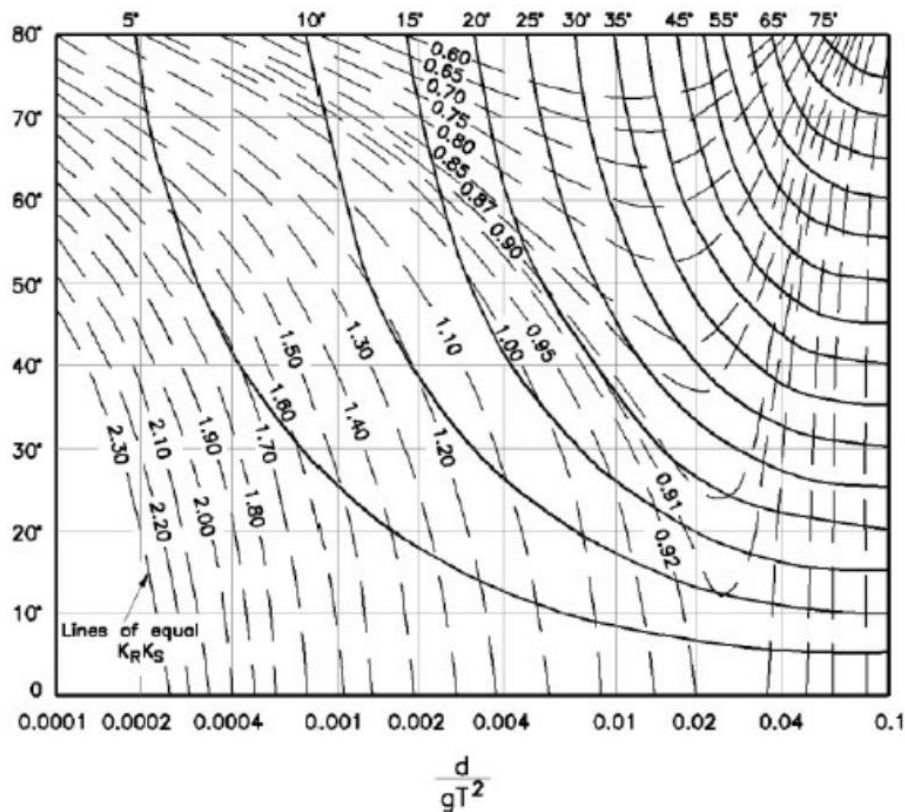


Figura 7.25. Ábaco para obtención de coeficientes de refracción y asomeramiento.
Fuente: SPM (1984)

Para poder utilizar este ábaco, se necesitan dos parámetros esenciales. Por un lado, el monomio $\frac{d}{gT^2}$, 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. Y 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.

Obteniendo el periodo del oleaje en cada dirección según la Ec. 7.1 y el monomio solicitado:

$$T_{p,SSW} = 12 * 2,95^{0,2} = 14,90 \text{ s}$$

$$T_{p,SW} = 12 * 2,90^{0,2} = 14,85 \text{ s}$$

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{5}{9,81 * 14,90^2} = 0,0023$$

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{5}{9,81 * 14,85^2} = 0,0023$$

Los ángulos de incidencia con respecto a una batimetría considerada paralela de cada una de las direcciones se muestran en la siguiente tabla:

Dirección	α_0 (°)
SSW	19,80
SW	42,30

Tabla 7.5. Ángulo de incidencia del oleaje. Fuente: Elaboración propia.

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 (°)	$H_{s,0}$	$K_r \cdot K_s$	α (°)	H_s (d=5m)
SSW	19,8	2,95	1,32	5	3,89
SW	42,3	2,9	1,32	5	3,83

Tabla 7.6. Resultados tras la propagación del oleaje. Fuente: Elaboración propia.

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

$$H_b = 0,55 * h \quad (7.5)$$

Donde la h es el calado existente a pie de dique en situación de pleamar, 5 metros.

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. En la siguiente tabla se ha recogido los valores de alturas de ola correspondientes a aguas profundas, la propagada a pie de dique y la de rotura.

Dirección	$H_{s,0}$	H_s (d=5m)	H_b (d=5m)
SSW	2,95	3,89	2,75
SW	2,9	3,83	2,75

Tabla 7.7. Altura de ola de cálculo. Fuente: Elaboración propia.

Como puede verse, las olas romperán antes de llegar a la estructura. Por tanto, la altura de ola de cálculo será:

$$H_{cal} = 2,75 \text{ metros}$$

7.7.3. Tamaño de los Cubípodos

Tras obtener la altura de ola de cálculo se procede a la obtención del tamaño necesario de los Cubípodos que compondrán el dique homogéneo de baja cota. Para ello, se recoge la ecuación que define el número de estabilidad (N_s):

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta \cdot D_n} \quad (7.6)$$

$$\Delta = \frac{\rho_r - \rho_w}{\rho_w} = \frac{\rho_r}{\rho_w} - 1 \quad (7.7)$$

Donde H_s es la altura de ola (m), Δ es la densidad flotante relativa, ρ_w es la densidad del agua (g/cm^3), ρ_r es la densidad del material y D_n es el diámetro nominal de las piezas (m).

Como se comentó en el *Apartado 3.6.3*, para el diseño de las piezas que conformarán el dique homogéneo se asumirá el número de estabilidad correspondiente al inicio de avería (IA) obtenido en los ensayos de laboratorio para el tipo de estructura que se quiere construir. Este tiene un valor de 1,4 tal y como puede verse en la Figura 3.25.

Conociendo además que la densidad media del agua del mar del océano Pacífico es de $1,027 \text{ g/cm}^3$ y que la densidad del hormigón será igual a la de los Cubípodos ensayados, $2,21 \text{ g/cm}^3$, se obtiene el diámetro nominal de las piezas a colocar introduciendo en la Ec. 7.6 la altura de ola de diseño calculada:

$$1,4 = \frac{2,75}{\left(\frac{2,21}{1,027} - 1\right) \cdot D_n} \rightarrow D_n = 1,59 \text{ m.}$$

Estos Cubípodos tendrán un peso de:

$$W = \gamma * D_n^3 = 2,21 * 1,27^3 = 8,88 \text{ t}$$

7.7.4. Definición de la sección

Una vez obtenido el tamaño necesario que deben tener los Cubípodos se puede definir la sección transversal de la HLCS. Como se ha comentado en el *Apartado 7.7.1*, 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:

$$\frac{a}{D_n} = 1,32 \rightarrow a = 2,10 \text{ m}$$

$$\frac{b}{D_n} = 1,52 \rightarrow a = 2,42 \text{ m}$$

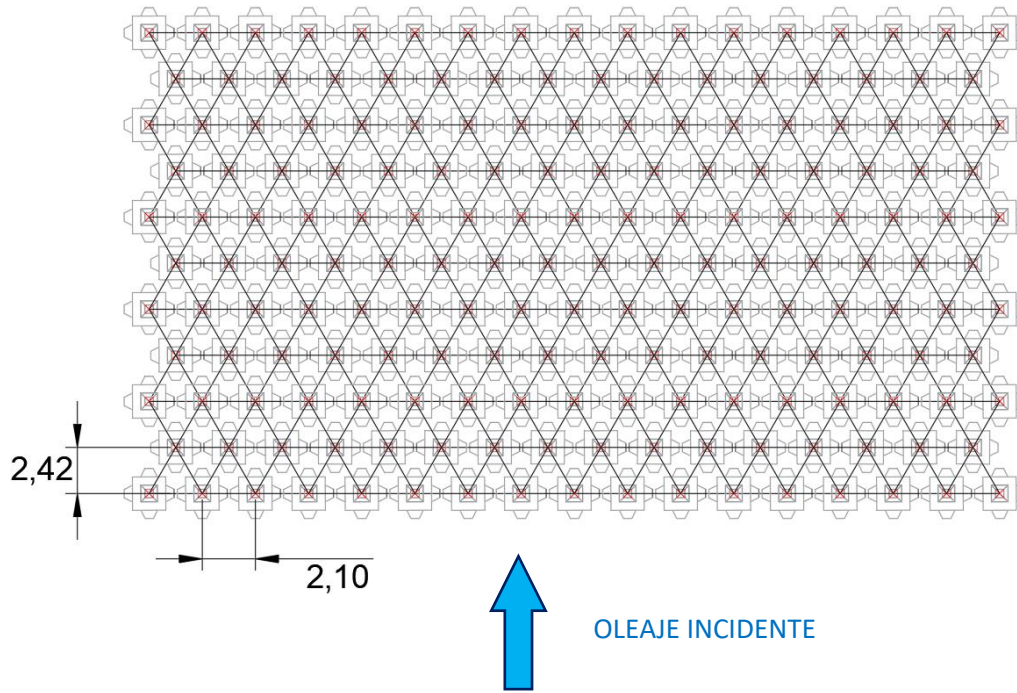


Figura 7.27. Malla de colocación de la estructura. Fuente: Elaboración propia.

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

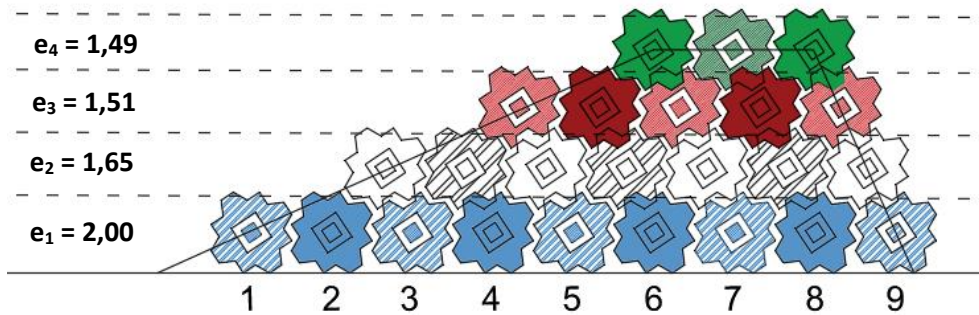


Figura 7.28. Espesor de las capas de la estructura diseñada. Fuente: Elaboración propia.

Con esto, se tiene una altura total de la estructura de 6,65 metros, es decir, 1,15 metros sobre el N.M.M. y 2,15 metros bajo la PMVE. De esta forma la estructura quedará por encima del nivel del mar durante el nivel más bajo de este, con un francobordo positivo máximo de 1,65 metros. Dada la distancia a la playa, este francobordo no supondrá un obstáculo visual. Por otro lado, durante la pleamar, el francobordo de la estructura será de -2,15 metros. Ambos francobordos se encuentran dentro del rango prefijado para la aplicación de la ecuación del coeficiente de transmisión.

$$-2 < [-0,78 ; 0,6] < 3,6$$

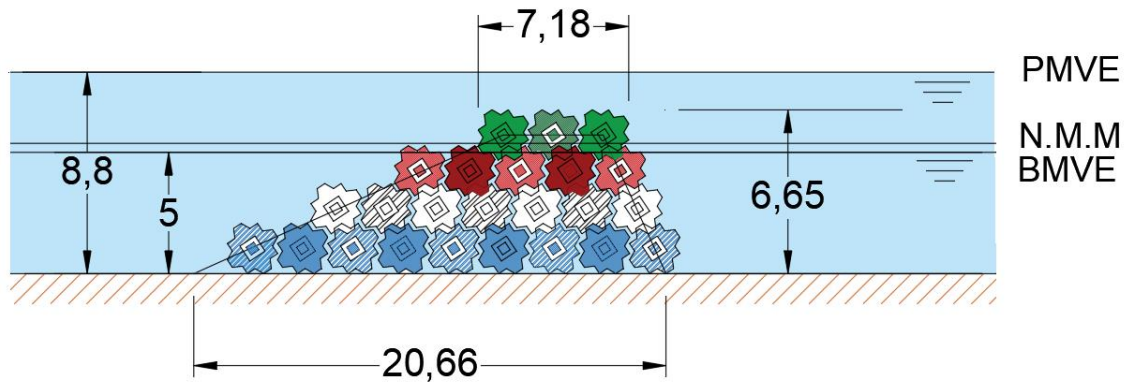


Figura 7.29. Sección transversal de la estructura diseñada. Fuente: Elaboración propia.

7.7.5. Diseño en planta

Como se ha comentado, el dique se situará sobre la batimétrica -5 metros, a una distancia de aproximadamente 1400 m como puede verse en la siguiente figura.

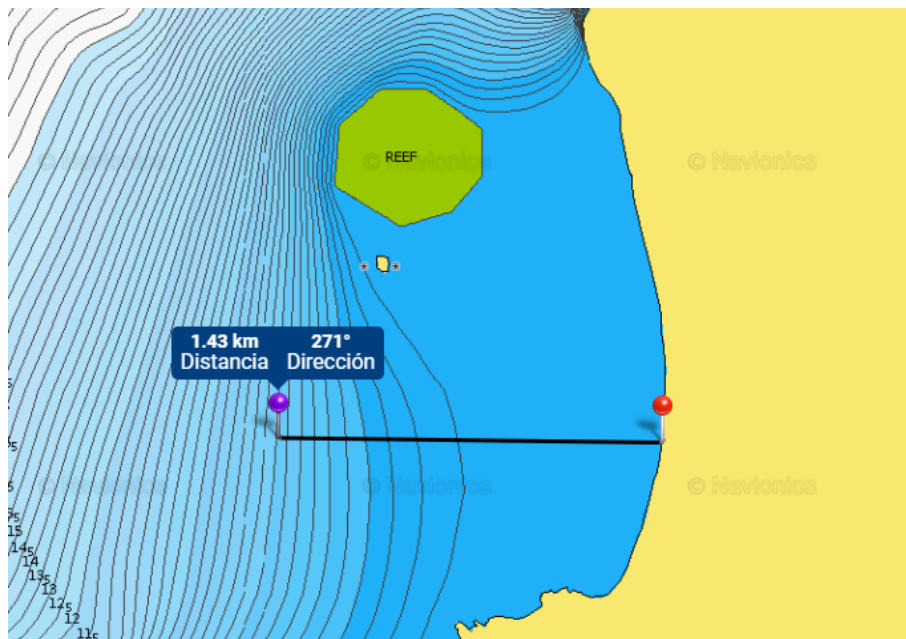


Figura 7.30. Distancia de la playa a la ubicación de la obra. Fuente: Navionics, 2021.

Por otro lado, es necesario determinar el número de diques a construir, su longitud y la separación entre ellos. Puesto que el espacio existente entre el arrecife y la punta San Pedrillo al sur de la playa es de 1100 metros aproximadamente, se estima necesario la colocación de un sistema de diques exentos alineados.

Como se ha indicado en los criterios de diseño, se quiere evitar la respuesta de la costa en forma de tómbolos o hemitómbolos. Para ello se utilizará la expresión de Suh y Dalrymple (1987) para un sistema de diques exentos alineados (ver Tabla 7.3). Una buena solución sería la ejecución de dos diques exentos de 200 metros con una separación de 450 metros entre ellos.

$$200/1400 < 2 * 450/200$$

Las siguientes figuras muestran la ubicación final de los diques diseñados, así como las características de diseño en planta definidas:

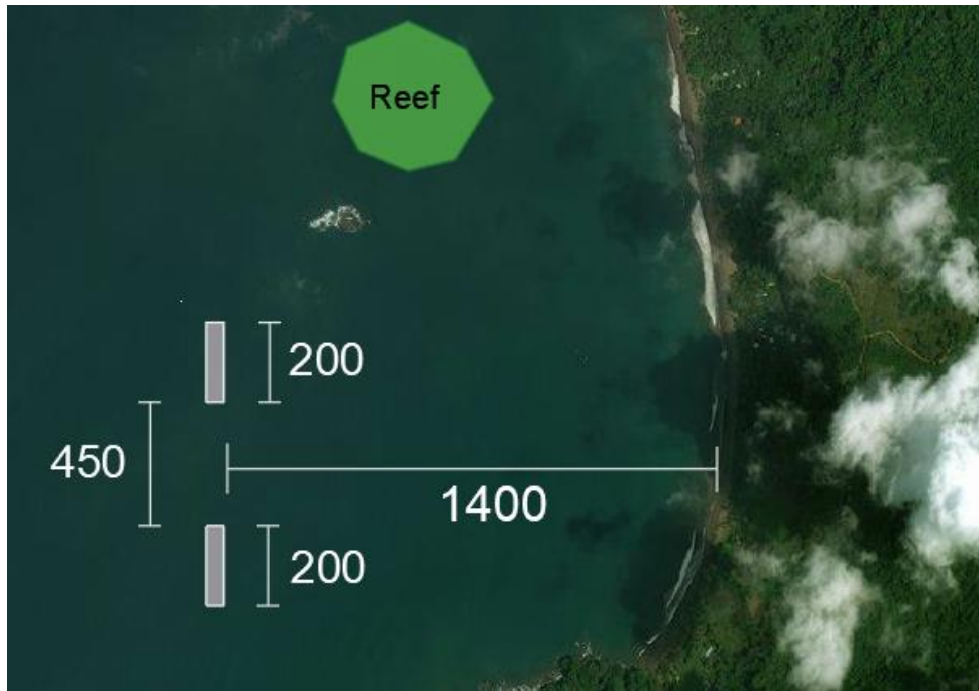


Figura 7.31. Vista en planta de los diques diseñados. Fuente: Elaboración propia.

7.8. Estudio de transmisión

El estudio de la transmisión en HLCS de Cubípodos es el principal objeto de este proyecto. En el *Capítulo 5* se desarrolló una expresión empírica para la obtención del coeficiente de transmisión (Ec. 5.3). En el presente apartado se va a aplicar esta expresión al caso práctico que se está estudiando, para determinar las características del oleaje en la playa Rincón de San Josecito tras la construcción de los diques arrecife.

En primer lugar, es necesario comprobar que se cumplen las condiciones de utilización de la fórmula. Como se ha visto en apartados anteriores, el francobordo de la estructura tomará valores dentro del intervalo $[-2,15; 1,65]$ y la altura de ola $H_{m0,i}$ correspondiente es la altura incidente a pie de dique, $H_{m0,i} = 2,75$ metros. Por tanto, se cumple el rango de aplicación del francobordo relativo:

$$-2 < [-0,78 ; 0,6] < 3,6 \quad \checkmark$$

En cuanto al peralte del oleaje en aguas profundas, es necesario obtener el valor de la longitud de onda:

$$L_0 = \frac{g * T_p^2}{2\pi} = \frac{9,81 * 14,90^2}{2\pi} = 346,63 \text{ metros}$$

$$s_{0p} = \frac{H_{s0}}{L_0} = \frac{2,95}{346.63} = 0,009$$

$$0,008 < 0,009 < 0,035 \quad \checkmark$$

Aplicando la Ec. 5.3 se obtiene el coeficiente de transmisión y la altura de ola transmitida tras la HLCS de Cubípodos:

$$K_t = -5 \cdot s_{0p} - 0,3 \cdot \tanh\left(\frac{R_c}{H_{m0,i}}\right) + 0,7 \quad (5.3)$$

$$K_{t,PMVE} = -5 \cdot 0,009 - 0,3 \cdot \tanh(-0,78) + 0,7 = 0,851 \approx 85\%$$

$$K_{t,BMVE} = -5 \cdot 0,009 - 0,3 \cdot \tanh(0,6) + 0,7 = 0,494 \approx 50\%$$

Una vez conocidos los coeficientes de transmisión en situación de pleamar y en situación de bajamar, se obtiene la altura de ola transmitida en cada una de las situaciones:

$$K_t = \frac{H_{m0,t}}{H_{m0,i}} \quad (7.8)$$

$$H_{m0,t,PMVE} = 0,85 * 2,75 = 2,34 \text{ metros}$$

$$H_{m0,t,BMVE} = 0,5 * 2,75 = 1,37 \text{ metros}$$

$$H_{m0,t} = [1,37m ; 2,34m]$$

Las alturas de ola transmitidas variarán entre 1,37 y 2,34 metros en función del nivel de mar existente. Esta reducción de la energía del oleaje que llega a la playa implica un descenso del transporte sólido litoral. Por tanto, la playa vería aumentada su estabilidad. Además, la disminución de la altura del oleaje conlleva una reducción del set up, y por ende, de la cota de inundación.

Por otro lado, es interesante conocer cuál será la transmisión al final de la vida útil para la que se ha proyectado la estructura, es decir, en el horizonte del año 2040, cuando se haya producido un aumento del nivel del mar debido al cambio climático. Según la Figura 7.11 el aumento estimado del nivel medio del mar en la zona de actuación para el año 2040 es de 0,2 metros. Realizando de nuevo el análisis de las condiciones existentes en el área abrigada se tiene:

$$R_c = [-2,35; 1,45] \rightarrow \frac{R_c}{H_{m0,i}} = [-0,85 ; 0,53]$$

$$K_{t,PMVE} = -5 \cdot 0,009 - 0,3 \cdot \tanh(-0,85) + 0,7 = 0,862 \approx 86\%$$

$$K_{t,BMVE} = -5 \cdot 0,009 - 0,3 \cdot \tanh(0,53) + 0,7 = 0,509 \approx 51\%$$

$$H_{m0,t,PMVE} = 0,86 * 2,75 = 2,35 \text{ metros}$$

$$H_{m0,t,BMVE} = 0,51 * 2,75 = 1,40 \text{ metros}$$

$$H_{m0,t} = [1,40m ; 2,35m]$$

Como era de esperar, el aumento del nivel del mar implicaría una mayor transmisión, ya que el francobordo de la estructura se reduce. Esto se traduce en una menor protección de la playa. Sin embargo, puesto que el año horizonte es bastante cercano, el aumento es relativamente pequeño y conllevaría un aumento en la altura de ola de apenas 3 cm en el caso de la bajamar y 1 cm en pleamar.

7.8.1. Cota de inundación

Una vez estudiada la transmisión de oleaje que se produce con la construcción de los diques es interesante estudiar el efecto que tiene en la cota de inundación de la playa. Esta se define normalmente como la suma de los diferentes niveles que se mencionan a continuación:

- Incremento del nivel del mar por marea astronómica
- Incremento del nivel del mar por marea meteorológica
- Set-up del oleaje
- Remonte del oleaje (Run-up)
- Incremento del nivel medio del mar debido al cambio climático

Hay que destacar que el remonte del oleaje no suele considerarse en el cálculo de la cota de inundación debido a su carácter temporal. Sin embargo, en este caso se ha decidido incluirlo, ya que puntualmente podría afectar. Por otro lado, en el apartado anterior se ha considerado la carrera de marea conjunta (astronómica + meteorológica), por lo que esta se considerará como PMVE.

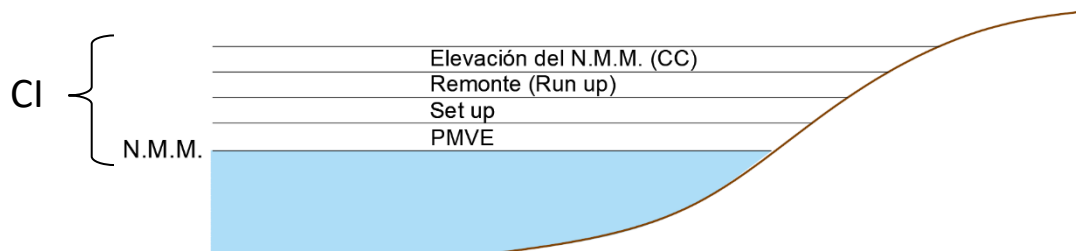


Figura 7.32. Esquema del cálculo de la cota de inundación. Fuente: Elaboración propia.

La siguiente expresión propuesta por Atkinson et al. (2017) permite realizar el cálculo del set-up y del remonte:

$$R_2 = 0,92\beta\sqrt{H_{m0,i}L_0} + 0,16H_{m0,i} \quad (7.9)$$

Donde R_2 representa el set-up y el remonte excedido por el 2% de las olas, β es la pendiente de la playa, H_{s0} es la altura de ola significativa en aguas profundas y L_0 es la longitud de ola en aguas profundas.

La pendiente de la playa se ha obtenido del perfil de elevación proporcionado por Google Earth, esta tiene un valor medio de un 5%.

Aplicando esta ecuación se obtiene el valor de set-up y remonte buscado para los siguientes escenarios: (1) situación previa y (2) construcción de diques. Para el escenario de la construcción de los diques se analizará tanto la situación de bajamar como la de pleamar, ya que, como se ha visto, la transmisión será distinta en cada caso.

1. Situación previa:

$$R_2(1) = 0,92 \frac{1}{20} \sqrt{2,75 * 346,56} + 0,16 * 2,75 = 1,86 \text{ metros}$$

2. Construcción de diques

$$R_{2,BMVE}(2) = 0,92 \frac{1}{20} \sqrt{1,37 * 346,56} + 0,16 * 1,37 = 1,11 \text{ metros}$$

$$R_{2,PMVE}(2) = 0,92 \frac{1}{20} \sqrt{2,34 * 346,56} + 0,16 * 2,34 = 1,58 \text{ metros}$$

Por tanto, calculando la cota de inundación en cada caso se obtiene:

$$CI(1) = PMVE + R_2(1) + \Delta CC = 3,3 + 1,86 + 0,2 = 5,36 \text{ metros}$$



Figura 7.33. Área de inundación de la Playa Rincón de San Josecito: Situación previa. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse, el área de inundación se encuentra muy próxima al complejo de construcciones existente en la zona central de la playa, lo que podría provocar daños materiales en caso de subida de inundaciones o subida del nivel del mar.

Calculando también la cota de inundación para el peor caso de la situación tras la construcción de los diques (2), se obtiene:

$$CI(2) = 3,3 + 1,58 + 0,2 = 5,08 \text{ metros}$$

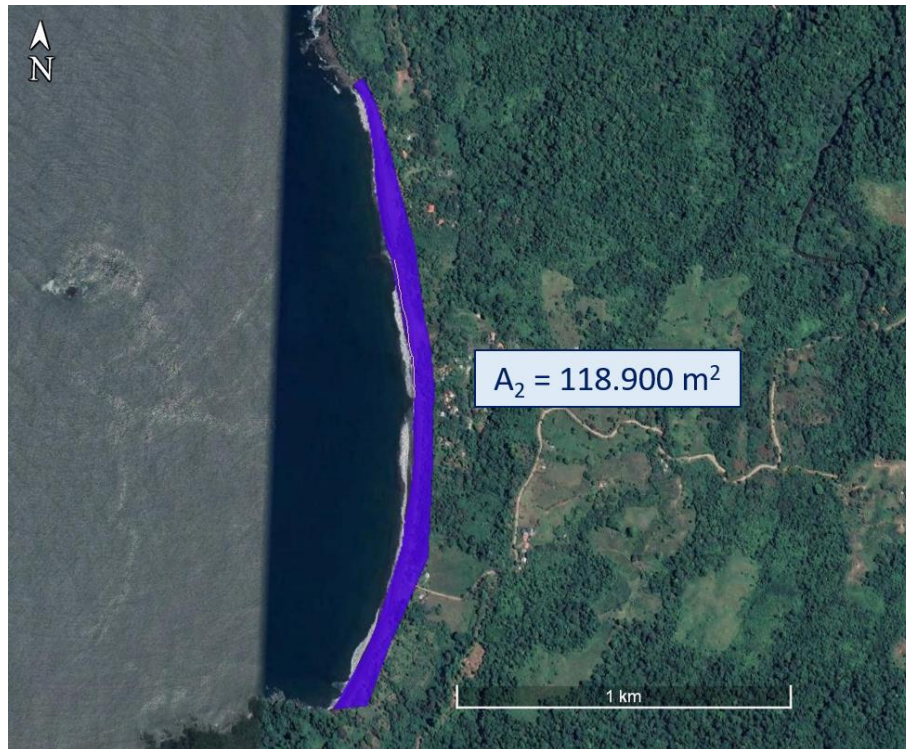


Figura 7.34. Área de inundación de la Playa Rincón de San Josecito: Situación posterior. Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados, se consigue reducir 30 cm el nivel máximo que alcanza el agua. Es decir, la función de los diques en cuanto a la influencia sobre la cota de inundación es la de contrarrestar el efecto del ascenso del nivel medio del mar debido al cambio climático. Su implantación supondría evitar notar los efectos derivados del cambio climático en cuanto a ascenso del nivel del mar hasta que se produzca el ascenso de 0,3 metros en el año 2060 (ver Figura 7.11). Además, se consigue reducir el área de inundabilidad en 25.000 m².

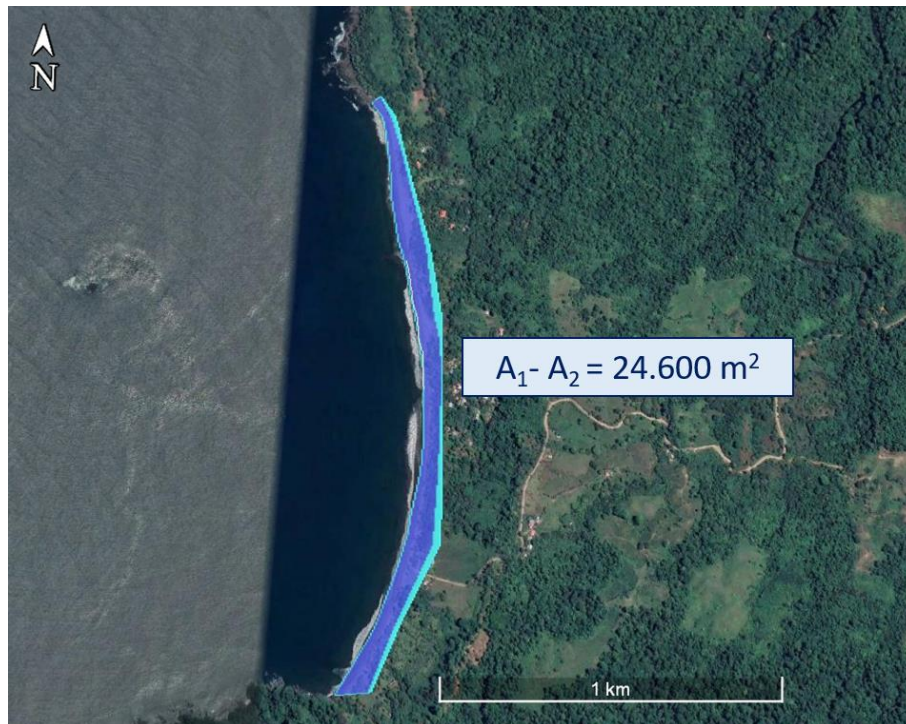


Figura 7.35. Área de inundación de la Playa Rincón de San Josecito: Comparación. Fuente: Elaboración propia.

7.9. Procedimiento constructivo

En el *Apartado 2.2.3.2* se expone a grandes rasgos las principales operaciones del proceso constructivo de una infraestructura marítima que incorpore Cubípodos. El apartado actual se describe de manera más pormenorizada el procedimiento a seguir para la construcción del dique diseñado, así como los equipos necesarios para ello.

7.9.1. Fases de construcción

La primera fase es la **fabricación** de las piezas. Para ello, 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. Permiten el desencofrado vertical, facilitado por una ligera conicidad en el encofrado, a las 6 horas del hormigonado. Todo esto lleva a una reducción de costes y de necesidades de espacio que lo hacen muy competente.



Figura 7.36. Encofrado del Cubípedo. Fuente: Web del Cubípedo.

El proceso de fabricación es muy sencillo y presenta un alto rendimiento (hasta 4 puestas al día). Se trabaja con líneas de producción compactas, optimizando el espacio y sin necesidad de losas de nivelación, lo que reduce los costes y hace más simple el proceso. El hormigonado se realiza desde un carril elevado para el paso de camiones hormigoneras que vierten directamente en los encofrados. Debido a que el Cubípodo es una pieza masiva, la calidad del hormigón utilizado no es un asunto crítico, por lo que se puede emplear hormigones de menor resistencia que en otro tipo de piezas.



Figura 7.37. Hormigonado de los Cubípodos en obra. Fuente: Web del Cubípodo.

Por lo que respecta a su **almacenamiento**, su forma permite el **acopio** en distintas alturas, lo que reduce las necesidades de espacio. Para su acopio, en primer lugar, 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 7.38. Acopio de Cubípodos. Fuente: Web del Cubípodo.

En la siguiente imagen se aprecia muy bien el parque de fabricación y de acopio de las piezas (fases 1 y 2 del proceso). En el centro se observa el carril preparado para el paso de los camiones hormigonera que realizan el hormigonado sobre los encofrados (en rojo). Mientras que a ambos costados se puede ver distintas pilas de Cubípodos acopiados.



Figura 7.39. Parque de fabricación y acopio de Cubípodos. Fuente: Web del Cubípedo.

La **manipulación** de las piezas 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 las piezas desde el parque de acopio hasta el emplazamiento de la obra se puede realizar mediante medios terrestres o marítimos. Como se ha comentado, los accesos terrestres a la zona de actuación son escasos y se encuentran en muy malas condiciones. Por tanto, se opta por el transporte marítimo mediante barcazas. Esta metodología de transporte se ha empleado en la construcción del dique oeste del puerto de Hanstholm (Dinamarca). Los Cubípodos utilizados se transportaron hasta Hanstholm más de 300 km por vía marítima.

Por último, la **colocación** en obra se realiza mediante pinzas de presión simples de forma totalmente aleatoria, sin que las piezas tengan una orientación específica unas con respecto a otras. Se utiliza un sistema de posicionamiento GPS situado en la pluma de la grúa que indica la posición exacta en la malla de colocación. Los rendimientos obtenidos están entre los 8 y 12 Cubípodos/hora.



Figura 7.40. Colocación de Cubípedo en obra. Fuente: Web del Cubípedo.

A modo de resumen, las fases en las que se divide el proceso constructivo de la obra proyectada son las siguientes:

1. Fabricación: Encofrado y hormigonado.
2. Almacenamiento: Acopio en diferentes alturas.
3. Transporte a obra mediante barcazas.
4. Colocación mediante pinzas de presión.

7.9.2. Maquinaria y equipos

A continuación se expone la maquinaria y los equipos que serán necesarios para el desarrollo de la actuación:

- Encofrados especiales para la fabricación de los Cubípodos con rendimientos de 3 Cub/día.
- Camiones hormigonera para el vertido del hormigón en el encofrado.
- Grúa y pinza para izar el encofrado una vez haya fraguado el hormigón.
- Grúa con pinzas dobles de presión para la manipulación de las piezas en el parque de almacenamiento.
- Camiones góndola para transporte de Cubípodos de acopio a barcaza.
- Barcaza para el transporte de los Cubípodos a obra.

- Grúa dotada de sistema de posicionamiento GPS y pinzas simples de presión. Montada sobre la pontona para la colocación de las piezas según la malla de colocación diseñada. Con rendimientos de 8-12 Cubípodos/h.

7.9.3. Espacios

La fabricación y acopio de Cubípodos necesitan de un amplio espacio para llevarse a cabo. Además, este debe encontrarse cercano al punto de embarque de las barcazas que transportarán los Cubípodos a obra. El Puerto más cercano en el que es viable el embarque de las piezas es Puerto Caldera, situado a unos 190 km de la zona de actuación. Además, como puede verse en la siguiente figura, cuenta con espacio suficiente para instalar el parque de fabricación y acopio de Cubípodos.



Figura 7.41. Fotografía aérea de Puerto Caldera, Costa Rica. Fuente: Google Earth.

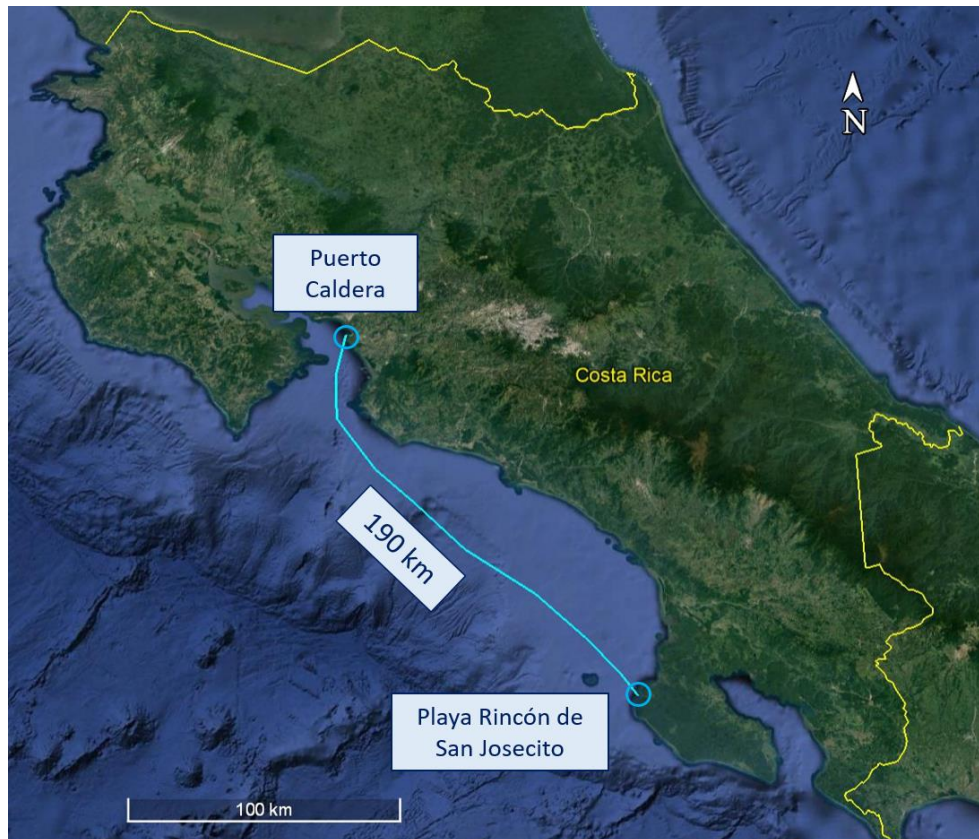


Figura 7.42. Plano de situación de Puerto Caldera y la Playa Rincón de San Josecito. Fuente: Elaboración propia.

7.10. Programa de trabajos

Definir los trabajos a realizar y estimar el tiempo de ejecución necesario para llevarlos a cabo es vital para realizar 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.

En primer lugar, se analizarán los posibles condicionantes que pudieran afectar al desarrollo de las actividades, siendo susceptibles de provocar retrasos. Estos deberán tenerse en cuenta a la hora de definir holguras para ejecutar las obras en los plazos previstos.

Posteriormente se definirá la organización de las actividades, que pueden dividirse en trabajos previos, fabricación y acopio de Cubípodos, construcción de diques, gestión de residuos y actividades relacionadas con la seguridad y salud.

7.10.1. Condicionantes

7.10.1.1. Calendario

El calendario es uno de los condicionantes a tener en cuenta a la hora de programar la ejecución de una obra marítima. Más aún si se trata de una actuación de defensa o regeneración de una playa, ya que los trabajos realizados podrían afectar a los usuarios de esta.

Como se ha comentado en apartados anteriores, la principal actividad económica de la zona de actuación es el turismo, ya que está situada en el Parque Nacional Corcovado. Parte de este turismo es atraído por la zona costera y las actividades marítimas. Por tanto, habrá que tener en cuenta los periodos de máxima afluencia al Parque para evitar afectar a los bañistas. Este periodo va de los meses de febrero a agosto.

Como se ha visto en el *Apartado 7.4.1*, los meses de diciembre a marzo se corresponden con la estación seca. Durante esta estación es cuando se dan mejores condiciones de oleaje. Mientras que de mayo a octubre la estación es lluviosa, por lo que se dan las peores condiciones de oleaje, con temporales más frecuentes. Por lo que respecta a las actividades turísticas, la buena climatología diurna general (las precipitaciones suelen darse al atardecer y por la noche) durante todo el año no impide realizar excursiones por el Parque Nacional o actividades de ocio marítimo.

Una vez definidos los condicionantes marcados por el calendario, se llega a la conclusión de que la mejor época para llevar a cabo la construcción de los diques arrecife son los meses de noviembre (mes de transición entre estaciones) y los meses de la estación seca (diciembre a febrero). Sin embargo, es preferible finalizar las obras antes de febrero, fecha a partir de la cual comienza la temporada turística con mayor afluencia al Parque.

7.10.1.2. Licencias y permisos

La obtención de licencias y permisos por parte de los organismos correspondientes es fundamental para poder dar comienzo a las actividades constructivas. Más aún al tratarse de una actuación en un área protegida como es el Parque Nacional Corcovado. El condicionante legal es uno de los más limitantes en este caso, ya que en el Parque Nacional existe una gran cantidad de especies protegidas, incluyendo fauna y flora terrestre y marina. La falta de los permisos necesarios podría retrasar la ejecución de las obras.

A continuación se nombran algunos de los permisos y licencias que deberán obtenerse:

- Autorización de ejecución de obra.
- Ocupación de superficie para fabricación y acopio de las piezas.
- Balizamiento provisional de la obra

7.10.1.3. Equipo, maquinaria y materiales

La disponibilidad de los equipos necesarios es un condicionante técnico a tener en cuenta, ya que de ello depende la ejecución de la obra. Los equipos necesarios para la ejecución de las obras se han definido en el *Apartado 7.9.2*. Por otro lado, el material necesario para llevar a cabo la ejecución de los trabajos será hormigón en masa para la fabricación de los Cubípodos.

7.10.1.4. Clima marítimo

El clima marítimo es un condicionante que puede provocar retrasos en la ejecución de las obras, ya que la existencia de oleajes de tamaño relevante podría impedir la colocación de los Cubípodos.

Este factor se ha tenido en cuenta en el condicionante relativo al calendario, ya que se ha mencionado que la mejor ventana de ejecución relativa al clima marítimo se da durante la estación seca o durante los meses de transición.

7.10.1.5. Impacto ambiental

Los permisos obtenidos para la ejecución de las obras tendrán multitud de condiciones relativas a generar el mínimo impacto ambiental posible para proteger la biodiversidad del área protegida.

De esta manera, habrá que tener especial cuidado con las actividades que puedan generar polvo o ruido. Desde las relativas a la fabricación y acopio de los Cubípodos hasta su puesta en obra. Se preverán riegos con agua sobre los viales de acceso de los camiones, así como lonas si fueran necesarias.

7.10.2. Actividades

7.10.2.1. Trabajos previos

Entre estos se encuentran las actividades relativas a 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 que la duración de estos trabajos puede ser de dos semanas aproximadamente.

7.10.2.2. Fabricación y acopio de Cubípodos

Para llevar a cabo la fabricación y el acopio de los Cubípodos son necesarios los siguientes equipos: encofrados, camión hormigonera y grúas con pinzas de presión dobles para la manipulación de las piezas.

En primer lugar es necesario definir el número de Cubípodos a fabricar. La cantidad de Cubípodos quedan definidas por el número de filas de cada capa y la longitud de los diques:

$$N = 2 * (9 + 7 + 5 + 3) * \frac{200}{a} = 2 * 24 * \frac{200}{2,42} = 3.967 \text{ Cubípodos}$$

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 20 encofrados, lo que supondría un plazo de fabricación de 66 días laborables. Considerando 25 días de trabajo al mes 24 horas/día a turnos de 8 horas, la fabricación de los Cubípodos llevaría un total de 50 días: dos meses.

7.10.2.3. Construcción

Para la construcción por vía marítima es necesario encontrar una ventana operativa que permita la colocación segura de los Cubípodos. Como se ha explicado, los meses de la estación seca son los que presentan menores alturas de ola y por tanto los que tienen ventanas operativas mayores.

Se considera que para que sea posible la operación mediante barcazas la altura de ola debe ser menor a 1 metro. A continuación se muestra una tabla que muestra la probabilidad de presentación de alturas de ola (Hs) frente a periodos pico (Tp) durante los meses de noviembre a febrero:

Hs (m)	Tp (s)								TOTAL
	< 8,25	10,5	12,75	15	17,25	19,5	21,75	24	
< 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	0
0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	0
0,75	0,426	0,650	0,941	0,341	0,057	0,013	0,000	0,011	2,439
1	1,648	5,351	13,601	8,373	2,450	0,723	0,215	0,009	32,371
1,25	2,316	2,450	17,878	18,020	5,868	1,600	0,297	-	48,429
1,5	1,198	0,097	2,914	7,428	2,116	0,558	0,064	-	14,375
1,75	0,103	-	0,114	1,125	0,796	0,178	0,029	-	2,345
2	-	-	-	-	0,042	-	-	-	0,042
TOTAL	5,692	8,549	35,447	35,287	11,329	3,072	0,604	0,020	100

Tabla 7.8. Regimen medio correspondiente a la estación seca. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse, en el 35% de los casos la altura de ola es menor a 1 metros, lo que implica que en los cuatro meses (2880 horas) se tendría un total de 1008 horas para llevar a cabo la construcción de los diques, considerando jornadas de construcción de 12 horas con dos turnos de 6 horas.

Considerando un rendimiento de colocación de 8 Cubípodos/hora por tratarse de construcción por medios marítimos, se necesitaría un total de 496 horas para llevar a cabo la construcción de los diques arrecife. Considerando además 12 horas de luz solar para poder ejecutar las operaciones, los días necesarios son 42. Por lo tanto, la ventana operativa existente en los meses de la estación seca es completamente amplia como para afrontar la fase de construcción.

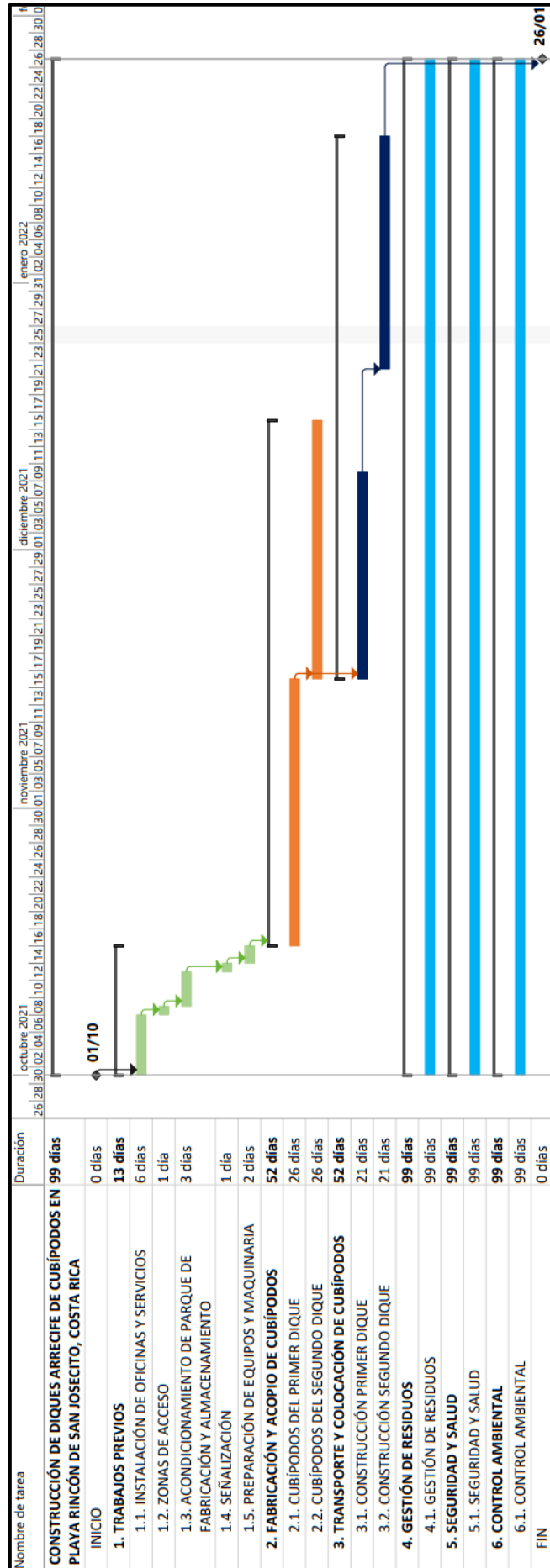
Por otro lado, la previsión de clima marítimo se conocerá con una antelación de unos tres días, lo que permitirá ir adaptando la construcción a la situación existente.

7.10.2.4. 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. Estas deben llevarse a cabo durante todo el tiempo que duren las obras, desde la realización de los trabajos previos hasta la entrega de la obra.

7.10.3. Plan de obra

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 99 días. Con fecha de comienzo el 1 de octubre de 2021 y fecha de finalización el 26 de enero de 2021, teniendo en cuenta posibles retrasos en el transporte y colocación de las piezas debidos a inexistencia de ventana operativa con alturas de ola menores a un metro.



7.11. Valoración económica

En el presente apartado se va a llevar a cabo la valoración económica de la actuación propuesta considerando las mediciones y precios unitarios de las principales actividades definidas en el *Apartado 7.10*. De esta forma se conocerá el coste aproximado que supondría la ejecución de las obras.

7.11.1. Capítulos

A continuación se definen los capítulos que constarán en la valoración económica y que recogen las principales actividades definidas.

CAPÍTULO 01.- TRABAJOS PREVIOS

Corresponde a las actividades relativas a la preparación y acondicionamiento de la zona de fabricación y acopio de Cubípodos, así como los servicios necesarios para el personal, señalización y preparación de equipos.

CAPÍTULO 02.- FABRICACIÓN Y ACOPIO DE CUBÍPODOS

Corresponde a las actividades relacionadas con la fabricación, manipulación y acopio de los Cubípodos, incluyendo la preparación de encofrados, vertido de hormigón, desencofrado y transporte de las piezas hasta su acopio en parque.

CAPÍTULO 03.- TRANSPORTE Y CONSTRUCCIÓN DE DIQUES ARRECIFE

Corresponde a las actividades de transporte y colocación de Cubípodos en el lugar de 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.

CAPÍTULO 04.- GESTIÓN DE RESIDUOS

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

CAPÍTULO 05.- SEGURIDAD Y SALUD

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

CAPÍTULO 06.- CONTROL AMBIENTAL

Corresponde a las actividades relacionadas con el control del cumplimiento de las directivas en materia de protección del medio ambiente y la aplicación de medidas para mitigar los impactos cometidos.

7.11.2. Precios unitarios

El Cubipod Manual incluye un apartado para el cálculo de los costes de construcción de diques formados por Cubípodos. En este, se analizan distintos tipos de costes: (1) suministro de hormigón, (2) fabricación, (3) manipulación, (4) transporte y colocación, (5) almacenamiento y (6) encofrados. La siguiente figura muestra el porcentaje que supone cada uno de estos costes sobre el total.

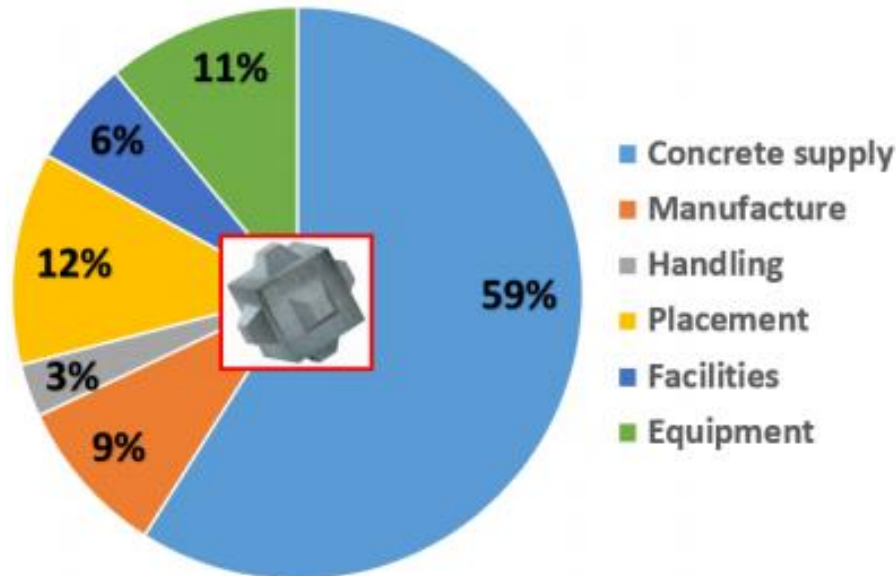


Figura 7.43. Clasificación de costes de construcción. Fuente: Cubipod Manual.

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

$$C_c \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = (265 + \text{HOR}) + 1 \left[10^5 \left(\frac{1}{\ln(V_c W_c)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(V_c W_c)} \right) \right] \quad (7.10)$$

En la que 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 8,88 t y el volumen total de hormigón es:

$$3.967 \text{ Cubípodos} * 1,59^3 \frac{\text{m}^3}{\text{Cub}} = 15.946 \text{ m}^3$$

Por tanto, introduciendo estos datos en la ecuación 7.10 se obtiene:

$$\ln(15.946 * 8,88) = 11,86$$

$$C_C = (265 + 65) + 1 \left[10^5 \left(\frac{1}{11,86} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{11,86} \right) \right] = 197,7 \text{ €/m}^3$$

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 7.43:

- Suministro de hormigón $C_H = 0,59 * 197,7 = 116,64 \text{ €/m}^3$
- Encofrado $C_E = 0,09 * 197,7 = 17,79 \text{ €/m}^3$
- Manipulación $C_M = 0,09 * 197,7 = 17,79 \text{ €/m}^3$
- Transporte $C_T = 0,11 * 197,7 = 21,75 \text{ €/m}^3$
- Colocación $C_{Co} = 0,12 * 197,7 = 23,72 \text{ €/m}^3$

7.11.3. Valoración económica

CAPÍTULO 01.- TRABAJOS PREVIOS					
CÓDIGO	Ud.	Descripción	€/Ud.	Uds.	Total
C1001	-	Delimitación y acondicionamiento del parque de fabricación y las zonas de acopio de Cubípodos.	15.000	1	15.000
C1002	-	Establecimiento de caseta de obra y resto de servicios para el personal	2.000	1	2.000
C1003	-	Señalización de la zona implicada y balizamiento del emplazamiento de la obra	500	1	500
TOTAL CAPÍTULO 01					17.500

CAPÍTULO 02.- FABRICACIÓN Y ACOPIO DE CUBÍPODOS					
CÓDIGO	Ud.	Descripción	€/Ud.	Uds.	Total
C2001	m ³	Hormigón HM-20/B/20/I+Qb fabricado en central y vertido desde camión	116,64	15.946	1.859.941,44
C2002	m ³	Encofrado metálico con rendimientos de fabricación de 4 Cubípodos/día	17,79	15.946	283.679,34
C2003	m ³	Maquinaria y equipamiento para manipulación y acopio de piezas en parque.	17,79	15.946	283.679,34
TOTAL CAPÍTULO 02					2.427.300,12

CAPÍTULO 03.- CONSTRUCCIÓN DE DIQUES ARRECIFE					
CÓDIGO	Ud.	Descripción	€/Ud.	Uds.	Total
C3001	m ³	Transporte de los Cubípodos por medios marítimos mediante barcaza.	21,75	15.946	346.825,5
C3002	m ³	Colocación de las piezas, incluso transporte a obra y manipulación mediante barcaza y grúa dotada de	23,72	15.946	378.302,9

sistema de posicionamiento GPS		TOTAL CAPÍTULO 03	725.128,4
--------------------------------	--	--------------------------	-----------

CAPÍTULO 04.- GESTIÓN DE RESIDUOS					
CÓDIGO	Ud.	Descripción	€/Ud.	Uds.	Total
C4001	-	Gestión de residuos de fabricación de piezas, incluso transporte con camión de residuos inertes a vertedero específico situado a 10 km de distancia	1.800	1	1.800
				TOTAL CAPÍTULO 04	1.800

CAPÍTULO 05.- SEGURIDAD Y SALUD					
CÓDIGO	Ud.	Descripción	€/Ud.	Uds.	Total
C5001	-	Conjunto de sistemas de protección colectiva y equipos de protección individual necesarios para cumplimiento de normativa.	10.000	1	10.000
C5002	-	Medicina preventiva y primeros auxilios	3.000	1	1.000
				TOTAL CAPÍTULO 05	11.000

CAPÍTULO 06.- CONTROL AMBIENTAL					
CÓDIGO	Ud.	Descripción	€/Ud.	Uds.	Total
C6001	-	Control del cumplimiento y seguimiento de las directivas en materia de impacto ambiental.	10.000	1	10.000
				TOTAL CAPÍTULO 06	10.000

7.11.4. Presupuesto de ejecución material

Capítulo	Importe
01.- Trabajos previos	17.500
02.- Fabricación y acopio de Cubípodos	2.427.300,12
03.- Construcción de diques arrecife	725.128,4
04.- Gestión de residuos	1.800
05.- Seguridad y Salud	11.000
06. Control ambiental	10.000
TOTAL	3.192.728,52 €

El Presupuesto de Ejecución Material a la cantidad de TRES MILLONES CIENTO NOVENTA MIL DOSCIENTOS SETENTA Y DOS EUROS CON OCHENTA Y CUATRO CÉNTIMOS.

7.11.5. Presupuesto de licitación

PRESUPUESTO DE LICITACIÓN

	Importe
Presupuesto de ejecución material	3.192.728,52
16,00% Gastos Generales	510.836,56
6,00% Beneficio Industrial	191.563,71
Suma	3.895.128,79
21,00% I.V.A	817.977,05
Presupuesto de licitación	4.713.105,84 €

El presupuesto de Licitación asciende a CUATRO MILLONES SETECIENTOS TRECE MIL CIENTO CINCO EUROS CON OCHENTA Y CUATRO CÉNTIMOS.

8. Referencias

- ACOSA. (2018). *Plan de Turismo Sostenible del Parque Nacional Corcovado*.
- 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*.
- Allsop, W., & Powell, K. (1985). *Low-crest breakwaters, hydraulic performance and stability*.
- Atkinson, A. L., Power, H. E., Moura, T., Hammond, T., Callaghan, D. P., & Baldock, T. E. (2017). Assessment of runup predictions by empirical models on non-truncated beaches on the south-east Australian coast. *Coastal Engineering*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.10.001>
- Battjes, J. A. (1974, June 24). Surf Similarity. *Coastal Engineering* 1974. <https://doi.org/10.1061/9780872621138.029>
- Bores, P. S. (1979). Clasificación de formas costeras. *Estudios Geográficos*, 40(155), 165.
- Bruun, P. (1979). *Practical views on the design of mound breakwaters*. Division of Port and Ocean Engineering, University of Trondheim, Norwegian
- 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
- 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>
- Calabrese, M., Vicinanza, D., & Buccino, M. (2003, March). LARGE-SCALE EXPERIMENTS ON THE BEHAVIOUR OF LOW CRESTED AND SUBMERGED BREAKWATERS IN PRESENCE OF BROKEN WAVES. *Coastal Engineering* 2002. https://doi.org/10.1142/9789812791306_0160
- Carantino, V. (2013). *Essais en canal à houle: traitement d'image pour l'analyse des vagues*.
- Centi, R. (2020). *Placement of homogeneous artificial mound breakwaters using a game engine*. MSc. Thesis, University of L'Aquila (ITA). October 2020, 80.
- Clark, S., & Edwards, A. J. (1999). *An evaluation of artificial reef structures as tools for marine habitat rehabilitation in the Maldives*.
- Cooper, M. J. P., Beevers, M. D., Oppenheimer, M., Cooper, M. J. P., Oppenheimer, : M, Oppenheimer, M., & Beevers, M. D. (2008). The potential impacts of sea level rise on the coastal region of New Jersey, USA. *Climatic Change*, 90, 475–492. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9422-0>
- Daemen, I. F. R. (1991). *Wave transmission at low crested structures*.

- d'Angremond, K., van der Meer, J. W., & de Jong, R. J. (1996, August 5). Wave Transmission at Low-Crested Structures. *Coastal Engineering* 1996. <https://doi.org/10.1061/9780784402429.187>
- De Keyser, K., Jacobs, E. (2020). *A literature review on low-crested and submerged structures*. 2020. MSc. Thesis, Ghent University (BE), p.116. June 2020. <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:002945666>
- de la Peña, J. M., & Sánchez, F. J. (2008). Diques exentos: inventario y comportamiento en las costas españolas. *Revista Digital Del Cedex*, 0(149). <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2208>
- Dickson, M. E., Walkden, M. J. A., & Hall, J. W. (n.d.). *Systemic impacts of climate change on an eroding coastal region over the twenty-first century*. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9200-9>
- Dupray, S., & Roberts, J. (2010). Review of the use of concrete in the manufacture of concrete armour units. In *Coasts, marine structures and breakwaters: Adapting to change*. Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/cmsb.41301.0021>
- Espinoza, J., Rojas, E., Solís, L., Aguilar, J., Gutiérrez, V., Granados, G., & Rodríguez, H. (2005). Análisis Sedimentológico del delta Térraba (Costa Rica). *Informe de La Campaña Geológica 2005. Universidad de Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología*.
- 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*. <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>
- FIGUERES, M., & MEDINA, J. R. (2005, April). ESTIMATING INCIDENT AND REFLECTED WAVES USING A FULLY NONLINEAR WAVE MODEL. *Coastal Engineering* 2004. https://doi.org/10.1142/9789812701916_0047
- Folgado, J. R. M., Martín, M. E. G., Molguero, A. C., & Huertes, M. S. (2010). Diseño de diques en talud con el manto principal de cubípodos. *Revista de Obras Públicas*, 157(3.515).
- Fulford, E. T. (1985). Reef type breakwaters for shoreline stabilization. *Coastal Zone'85*, 1776–1795.
- Galvin, C. J. (1968). Breaker type classification on three laboratory beaches. *Journal of Geophysical Research*, 73(12). <https://doi.org/10.1029/JB073i012p03651>
- Gironella, X., Sánchez-Arcilla, A., Brigantti, R., Sierra, J. P., & Moreno, L. (2003, March). SUBMERGED DETACHED BREAKWATERS: TOWARDS A FUNCTIONAL DESIGN. *Coastal Engineering* 2002. https://doi.org/10.1142/9789812791306_0149
- Givler, L. D., & Sorensen, R. M. (1986). *An investigation of the stability of submerged homogeneous rubble-mound structures under wave attack*.

- 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.
- Gornitz, V. (1995). Monitoring sea level changes. *Climatic Change*, 31(2–4). <https://doi.org/10.1007/BF01095160>
- Grau, I. (2008). Avances en la construcción de diques de abrigo en España. *Libro Del III Congreso Nacional de La Asociación Técnica de Puertos y Costas*, 13–60.
- Herrera, M. P., & Medina, J. R. (2015). *Toe berm design for very shallow waters on steep sea bottoms*. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.06.005>
- Hirose, N., Watanuki, A., & Saito, M. (2002). *New type units for artificial reef development of eco-friendly artificial reefs and the effectiveness thereof*.
- 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.
- Jeong, J.-H., Kim, J.-H., & Lee, J.-L. (2021). Analysis of Wave Transmission Characteristics on the TTP Submerged Breakwater using a Parabolic-Type Linear Wave Deformation Model. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 35(1). <https://doi.org/10.26748/KSOE.2020.066>
- Lizano, O. (2011). *Erosión en las costas de Costa Rica, un problema de todos*.
- Lizano, O. G. (1997). Las mareas extraordinarias de 1997 en la costa Pacífica de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 4(2), 169–179.
- Lizano, O. G. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 24(1).
- Lizano, O. G. (2016). La dinámica oceanográfica frente al Humedal Nacional Terraba-Sierpe y su relación con la muerte del manglar. *Revista de Biología Tropical*. <https://doi.org/10.15517/rbt.v63i1.23092>
- Lizano R, O. G. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *InterSedes*, 14, 6–27.
- 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))
- Lowe, J. A., Woodworth, P. L., Knutson, T., McDonald, R. E., McInnes, K. L., Woth, K., von Storch, H., Wolf, J., Swail, V., Bernier, N. B., Gulev, S., Horsburgh, K. J., Unnikrishnan, A. S., Hunter, J. R., & Weisse, R. (2010). Past and Future Changes in Extreme Sea Levels and Waves. In

- Understanding Sea-Level Rise and Variability.* Wiley-Blackwell.
<https://doi.org/10.1002/9781444323276.ch11>
- Mansard, E. P. D., & Funke, E. R. (1980, March 23). The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method. *Coastal Engineering 1980*.
<https://doi.org/10.1061/9780872622647.008>
- 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., 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>
- Medina, Josep, & Gómez-Martín, M. (2016). *Cubipod® Manual 2016*.
- Melito, I., & Melby, J. A. (2002). Wave runup, transmission, and reflection for structures armored with CORE-LOC®. *Coastal Engineering*, 45(1), 33–52. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(01\)00044-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(01)00044-8)
- MelvinAlizano, A., & OmarGLizano, R. (2010). *Creación de escenarios de inundación en la Ciudad de Puntarenas ante el aumento del nivel del mar*.
- 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>
- Moschella, P. S., Abbiati, M., Airoidi, L., Anderson, J. M., Bacchiocchi, F., Bulleri, F., Dinesen, G. E., Frost, M., Gacia, E., Granhag, L., Jonsson, P. R., Satta, M. P., Sundelöf, A., Thompson, R. C., & Hawkins, S. J. (2005). *Low-crested coastal defence structures as artificial habitats for marine life: Using ecological criteria in design*.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.09.014>

- Mumby, P. J., Hastings, A., & Edwards, H. J. (2007). Thresholds and the resilience of Caribbean coral reefs. *Nature*, 450(7166), 98–101.
- Norabuena, E., Dixon, T. H., Schwartz, S., DeShon, H., Newman, A., Protti, M., Gonzalez, V., Dorman, L., Flueh, E. R., & Lundgren, P. (2004). Geodetic and seismic constraints on some seismogenic zone processes in Costa Rica. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B11).
- Odériz, I., Mendoza, E., Silva, R., & Medina, J. (2018). *Stability and hydraulic performance of a homogeneous cubipod low-crested mound breakwater*.
- Protti Quesada, J. M., Güendel Umaña, F., & Malavassi Rojas, E. (2001). Evaluación del potencial sísmico de la península de Nicoya. In *Evaluación del potencial sísmico de la península de Nicoya* (p. 144).
- Rinkevich, B. (2005a). Conservation of Coral Reefs through Active Restoration Measures: Recent Approaches and Last Decade Progress. *Environmental Science & Technology*, 39(12), 4333–4342. <https://doi.org/10.1021/es0482583>
- Rinkevich, B. (2005b). What do we know about Eilat (Red Sea) reef degradation? A critical examination of the published literature. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 327(2). <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2005.06.014>
- 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.
- Schoonees, T., Gijón Mancheño, & A., Scheres, & B., Bouma, T. J., Silva, & R., Schlurmann, T., & Schüttrumpf, & H. (n.d.). *Hard Structures for Coastal Protection, Towards Greener Designs*. <https://doi.org/10.1007/s12237-019-00551-z>
- Seabrook, S. R., & Hall, K. R. (1998). Wave transmission at submerged rubblemound breakwaters. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 2, 2000–2013.
- Seelig, W. (1980). *Estimation of wave transmission coefficients for overtopping of impermeable breakwaters*.
- 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>
- Slangen, A. B. A., Carson, · M, Katsman, C. A., van de Wal, · R S W, Köhl, · A, Vermeersen, L. L. A., Stammer, · D, van de Wal, R. S. W., & Carson, M. (2014). Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124, 317–332. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1080-9>
- Suh, K., & Dalrymple, R. A. (1987). Offshore Breakwaters in Laboratory and Field. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 113(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1987\)113:2\(105\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1987)113:2(105))

- Takayama, T., Nagai, K., & Sekiguchi, T. (1985). Irregular Wave Experiments on Wave Dissipation Function of Submerged Breakwater with Wide Crown. *Proceedings of 32th Japanese Conference on Coastal Engineering*, 545–549.
- (US), C. E. R. C. (1984). *Shore Protection Manual*. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers
- van der Meer, Jentsje W, Briganti, R., Zanuttigh, B., & Wang, B. (2005). *Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change*. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.09.005>
- van der Meer, J.W. (1990). Data_on_Wave_Transmission_Due_to_Overtop. *Delft Hydraulics Report, H 986(b)*.
- 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))

Con esto se da por concluida la memoria del presente Trabajo Final de Máster, que comprende el “Estudio de transmisión de oleaje para el diseño de diques arrecife homogéneos de Cubípodos. Aplicación al Parque Nacional Corcovado (Costa Rica)”.

Valencia, Julio de 2021

EL AUTOR:



Sergio Lozano Tovar



ANEXO 1. CÓDIGO DEL PROGRAMA

Anexo 1. Código del programa

CAMERA CALIBRATION

```
clear;
clc;
close all;

% Image Introduction

imageFileNames = {'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602
(2).jpg',...
'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602 (3).jpg',...
'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602 (4).jpg',...
'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602 (5).jpg',...
'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602 (6).jpg',...
'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602 (7).jpg',...
'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602 (8).jpg',...
'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602 (9).jpg',...
'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602 (10).jpg',...
'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602 (11).jpg',...
'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602 (12).jpg',...
'D:\TFM\Fotos ajedrez\260221\Ajedrezsensor 2602.jpg',...
};

% Checkerboard points detection

[imagePoints, boardSize, imagesUsed] =
detectCheckerboardPoints(imageFileNames);
imageFileNames = imageFileNames(imagesUsed);

% Read the first image to obtain image size

originalImage = imread(imageFileNames{1});
[mrows, ncols, ~] = size(originalImage);

% Generate world coordinates of the corners of the squares

squareSize = 8.700000e+00; % in units of 'centimeters'
worldPoints = generateCheckerboardPoints(boardSize, squareSize);

% Calibrate the camera, Estimate parameters

[cameraParams, imagesUsed, estimationErrors] =
estimateCameraParameters(imagePoints, worldPoints, ...
```

```
'EstimateSkew', true, 'EstimateTangentialDistortion', true, ...
'NumRadialDistortionCoefficients', 3, 'worldUnits', 'centimeters',
...
'InitialIntrinsicMatrix', [], 'InitialRadialDistortion', [], ...
'ImageSize', [mrows, ncols]);

% View reprojection errors

h1=figure; showReprojectionErrors(cameraParams);
showReprojectionErrors(params, 'ScatterPlot');

% Visualize pattern locations

h2=figure; showExtrinsics(cameraParams, 'PatternCentric');
%'CameraCentric' muestra la cámara fija y 'PatternCentric' muestra el
tablero fijo

% Display parameter estimation errors

displayErrors(estimationErrors, cameraParams);
```

CORRECTS THE VIDEO DISTORTION

```
tic
videoFReader=vision.VideoFileReader('HL15_3207.mp4'); % Read the video
frame by frame
%videoPlayer=vision.VideoPlayer; %vision.VideoPlayer = Display the
video
videoFWriter=vision.VideoFileWriter('HL15_3207Undist.mp4', 'FrameRate',
videoFReader.info.VideoFrameRate, 'FileFormat', 'MPEG4');
%VideoInfo=info(videoFReader);

while ~isDone(videoFReader) % Continue with the loop till the end of
the file
    DistFrame=videoFReader(); % Reads each frame one by one
    UndistFrame=undistortImage(DistFrame, cameraParams); % Undistort
the frame
    videoFWriter(UndistFrame); %Write the frame into a new video file
with the same characteristics as the original one
end

release(videoFWriter);
release(videoFReader);
release(videoPlayer);
```

toc

VIDEO DISPLAY

```
videoFReader=vision.VideoFileReader('HL15_3207Undist.mp4');  
videoPlayer=vision.VideoPlayer;  
  
while ~isDone(videoFReader) % Display the video by reading each frame  
    frame=step(videoFReader);  
    step(videoPlayer, frame);  
    videoPlayer(frame);  
end  
  
release(videoFReader);  
release(videoPlayer);
```

VIDEO TREATMENT

```
% Read the undistorted video and get the first frame  
  
videoFReader=vision.VideoFileReader('HL15_3207Undist.mp4');  
frame1=videoFReader();  
%imwrite(frame1, 'frame1.png')  
  
% Read the video to obtain the number of frames  
  
v=VideoReader('HL15_3207Undist.mp4');  
%numFrames = 0;  
    %while hasFrame (v)  
        %readFrame (v);  
        %numFrames = numFrames + 1;  
    %end  
%v.CurrentTime=56.7;  
numFrames=v.NumberofFrames; % If this function does not work well, use  
the above loop  
  
% Video treatment to detect the water surface by substracting each  
frame  
% from the first one to obtain the difference, i.e., waves and water  
% movement  
  
tic  
x=frame1;
```

```
videoFWriter=vision.VideoFileWriter('HL15_3207UndistBN.mp4','FrameRate',videoFReader.info.VideoFrameRate,'FileFormat','MPEG4');
C=cell(numFrames,1);
se1=strel('rectangle',[3 8]); % Definition of a rectangular structure to eliminate image noise
se2=strel('disk',10); % Definition of a circular structure to eliminate image noise and fill in wave gaps

for i=1:numFrames
    frame=step(videoFReader);
    y=frame;
    FrameDif=imabsdiff(x,y); % Difference of first image with each one
    FrameDifGray=rgb2gray(FrameDif); % Get the frame in gray scale
    BN=(FrameDifGray>0.07); % Binary thresholding to detect the water contour
    filled=imopen(BN, se1); % Application of the rectangular structure to eliminate noise
    %I2=im2double(filled);
    CloseArea=imclose(filled,se2); % Application of the circular structure to fill gaps
    FillHoles=imfill(CloseArea,'holes');
    C(i,:)={FillHoles};
    videoFWriter(FillHoles); % Write the treated frame into a new video file
end

%j=C(1093,1);
%A=cell2mat(j); %Convertir celda en matriz
%figure
%imshow(A);

toc
release(videoFReader);
release(videoFWriter);
```

DISTANCE CALIBRATION

```
frame1Gray=rgb2gray(frame1); % Get the first frame in gray scale
figureHandle=figure;
imshow(frame1Gray);
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);

[cx, cy, rgbvalues, xi,yi] = improfile(1000);
rgbvalues = squeeze(rgbvalues);
distanceInPixels = sqrt( (xi(2)-xi(1)).^2 + (yi(2)-yi(1)).^2);
```

```
distanceY=yi(2)-yi(1);

% Draw a line

hold on;
Linea=plot(xi, yi, 'c-', 'Linewidth', 2);

% Ask for the real distance in cm

userPrompt = {'Introduce las unidades(ej: cm):','Introduce la
distancia:'};
dialogTitle = 'Información de calibración';
numberOfLines = 1;
def = {'cm', '10'};
answer = inputdlg(userPrompt, dialogTitle, numberOfLines, def);
close(figureHandle);

%Cm-Pixel conversion

units=answer{1};
distanceInUnits=str2double(answer{2});
distancePerPixel=distanceInUnits/distanceInPixels;
```

WATER DEPTH MEASUREMENT

```
% Read the treated video

vBN=VideoReader('HL15_3207UndistBN.mp4');
numFramesBN=vBN.NumberofFrames; % Get the number of frames of the new
video
%distancePerPixel=0.0524; %cm/pixel

videoFReader=vision.VideoFileReader('HL15_3207UndistBN.mp4');
frame1BN=videoFReader();
gray1BN=rgb2gray(frame1BN);
[rows,cols]=size(gray1BN);

% Get the number of pixels below and above the still water level on
each frame

tic
Frames=cell(numFramesBN,1);
Sensorposit=zeros(1,numFramesBN);
Sensorneg=zeros(1,numFramesBN);
```



```
for i=1:numFramesBN
    frame=step(videoFReader);
    gray=rgb2gray(frame);
    BN2=(gray>0.99);
    PixelsPosit=0;
    PixelsNeg=0;
        for k=1:rows
            if BN2(k,875)==1 && k>490 % BN2(k,875) indicate the
position of the virtual wave gauge (column of the image) and k>490 the
row of the still water level
                PixelsNeg=PixelsNeg-1;
            elseif BN2(k,875)==1 && k<=490 % The same as above but for
positive pixels. If wanted, all columns of the image can be considered
gauges.
                PixelsPosit=PixelsPosit+1;
            end
        end
        Sensorposit(1,i)=PixelsPosit;
        Sensorneg(1,i)=PixelsNeg;
        Frames(i,:)={BN2};
end
toc

Sensor=Sensorposit+Sensorneg; % Obtain the height of water level by
summing positive and negative pixels
SensorCm=Sensor.*distancePerPixel; % Convert pixels to cm
x=(1:numFramesBN);
y=SensorCm;
```

COMPARISON WITH WAVE GAUGES MEASUREMENT

```
% In order to compare this technique with the swell registered by wava
gauges,
% a graphic is created with both measurements

data=xlsread('HL15D1212.xlsx');
time=data(:,1);
WG=data(:,8);
figure;
plot(time,WG);
hold on
timeCamera=x*0.1-116.6; % 116.6 is the difference in record start
between the video and gauges
plot(timeCamera,y);
legend('Gauge','Camera');
```

```
title('HL05{\_}1313');
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
xlabel('Time (s)');
ylabel('Water Height (cm)');

% If the previous section does not fit well, the following functions
can equalize the start points of both measurements by maximizing the
correlation

%Comparison(:,1)=y;
%Comparison(:,2)=WG;
%xlswrite('Comparison.xlsx',y);

CameraMeasurement=y;
timeAux=(0:0.1:199.9); %Time duration of wave gauge measurement
timeCameraAux=(0:0.1:189.5); % Time duration of camera measuremet
L=length(timeCameraaux);

WG=WG(1:L);
CameraMeasurement=CameraMeasurement(1:L);
timeAux=timeAux(1:L);

%plot(timeAux,WG);
%hold on
%plot(timeCameraAux,CameraMeasurement);

%[val,pos]=max(CameraMeasurement);
%[val2,pos2]=max(WG);
CoefdeCorr=(1:300);

% Calculate the correlation coefficient of the first 300 data by
moving
% forward one of them

for i=1:300
    CameraAux=CameraMeasurement(i+1:end);
    WGAux=WG(1:L-i);
    Coef=corrcoef(WGAux,CameraAux);
    CoefdeCorr(1,i)=Coef(1,2);
end

% Obtain the position where the maximum correlation coefficient is
obtained

[Peaks,pos]=findpeaks(CoefdeCorr,'MinPeakHeight',0.7);
```

```
[MaxCorr, PosMaxCorr]=max(Peaks);  
PosMax=pos(PosMaxCorr);  
  
WGAux2=WG(1:end-PosMax);  
CameraAux2=CameraMeasurement(PosMax+1:end);  
timeAux=timeAux(1:end-PosMax);  
timeCameraAux=timeCameraaux(1:end-PosMax);  
  
%Plot the results  
  
plot(timeAux,WGAux2);  
hold on  
plot(timeCameraAux, CameraAux2);
```



ANEXO 2. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Anexo 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible

Relación del TFG/TFM “Estudio de transmisión de oleaje para el diseño de diques arrecife homogéneos de Cubípodos. Aplicación al Parque Nacional Corcovado (Costa Rica)” con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.				X
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.				X
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.				X
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.				X
ODS 12. Producción y consumo responsables.				X
ODS 13. Acción por el clima.	X			
ODS 14. Vida submarina.	X			
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.			X	
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

Tabla 0.1. Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

A continuación se describen los ODS mayormente relacionados con el proyecto presentado:

- **Objetivo 13: Acción por el clima**

El cambio climático es una realidad que afecta a todos los continentes del planeta. Está alterando las economías nacionales y afectando a las vidas de la población. Los sistemas meteorológicos están cambiando, produciéndose fenómenos extremos cada vez con mayor frecuencia.



Uno de los efectos más significativos es el aumento del nivel del mar, consecuencia directa del incremento global de temperatura que provoca el derretimiento de los polos. Se estima que desde 1880 el nivel del mar promedio ha aumentado cerca de 20 cm y se proyecta que aumentará entre 30 y 120 cm para el año 2100.

El Acuerdo de París de 2015 espera mejorar la respuesta mundial a la amenaza que supone el cambio climático manteniendo el aumento global de la temperatura durante este siglo por debajo de 2 grados Celsius con respecto a los niveles anteriores a la era industrial. Este acuerdo también aspira a reforzar la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático.

Las pérdidas económicas anuales causadas por catástrofes climáticas alcanzan cientos de billones de dólares, mientras que las pérdidas humanas superan el millón. Este objetivo busca la movilización de fondos para impulsar la adaptación al cambio climático de los países en vías de desarrollo y los países subdesarrollados. Pero estas acciones deben ir de la mano con los esfuerzos destinados por estos países a implementar medidas de reducción de riesgos de desastres.

- **Objetivo 14: Vida Submarina**

Los océanos son los principales impulsores de la vida en la Tierra. De ellos dependen gran parte de los fenómenos atmosféricos, regulan la lluvia y el clima y proporcionan agua, comida y oxígeno.

La gestión de este recurso esencial es clave para la humanidad y para contrarrestar los efectos del cambio climático. Sin embargo, actualmente existe un deterioro continuo debido a la contaminación y a la acidificación de los océanos que está teniendo un efecto adverso sobre el funcionamiento de los ecosistemas y la biodiversidad.

Proteger los océanos debe ser una prioridad para el ser humano. La biodiversidad marina es vital para nuestra salud y la del planeta. Los recursos que proporcionan deben ser gestionados de forma efectiva, y deben ponerse en marcha reglamentos que reduzcan la contaminación, la acidificación y la pesca descontrolada. Este objetivo genera un marco para ordenar y proteger los ecosistemas marinos y costeros de manera sostenible.

Los océanos contienen casi 200.000 especies identificadas, pero se estima que las cifras reales pueden ser de millones. Por otro lado, los niveles de acidez han aumentado un 26% desde la Revolución Industrial, lo que supone un peligro para estas especies.

El diseño de diques arrecife homogéneos de Cubípodos es el tema principal en torno al cual gira el presente proyecto. Estas estructuras marítimas surgen como solución a los procesos erosivos que se están intensificando en el mundo debido al cambio climático y sus consecuencias.

El aumento de la temperatura, la acidificación de los océanos y otras actividades humanas suponen una seria amenaza para el desarrollo de los arrecifes de coral. Su degradación progresiva en las últimas décadas (Mumby et al., 2007) es un claro indicador de la mala calidad

de los ecosistemas marinos y de la amenaza que representa para la biodiversidad marina. Los arrecifes de coral son ecosistemas de enorme valor medioambiental en el planeta.

Las HLCS de Cubípodos son estructuras que permiten limitar el paso de la energía del oleaje, frenando procesos de recesión del litoral. Además, presentan una alta porosidad e iluminación, lo que favorece la colonización de especies marinas y permite regenerar arrecifes de coral en claro estado de degradación.

Por otro lado, en el *Capítulo 7* se ha planteado la ejecución de diques arrecife homogéneos para la estabilización y protección del litoral del Parque Nacional Corcovado, Costa Rica. Como se ha visto, se estima que el nivel del mar ascenderá 20 cm para el año 2040 y unos 30 cm para el año 2060 en el litoral de la Península de Osa, donde se ubica el Parque Nacional. Esto conlleva un incremento de la cota de inundación. Además, como se ha comentado en el proyecto, los fenómenos climáticos extremos que se producen en la costa pacífica (El Niño, mareas extraordinarias, tormentas, etc.) se están dando cada vez con mayor frecuencia, lo que en muchos casos implica riesgo real de inundación.

Las estructuras diseñadas permiten hacer frente a este incremento del nivel del mar, reduciendo la transmisión de oleaje entre un 50 y un 85%. Además, favorecerán la colonización de especies submarinas, formando un arrecife. Esto podrá favorecer la economía de la zona, impulsando el turismo.

A continuación, se presentan las metas de desarrollo sostenible correspondientes a los objetivos 13 y 14 y que están relacionadas con el proyecto:

- **13.1.** Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.
- **13.2** Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.
- **13.3** Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana.
- **14.2** De aquí a 2020, gestionar y proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros para evitar efectos adversos importantes, incluso fortaleciendo su resiliencia, y adoptar medidas para restaurarlos a fin de restablecer la salud y la productividad de los océanos.
- **14.3** Minimizar y abordar los efectos de la acidificación de los océanos, incluso mediante una mayor cooperación científica a todos los niveles.



- **14.5** De aquí a 2020, conservar al menos el 10% de las zonas costeras y marinas, de conformidad con las leyes nacionales y el derecho internacional y sobre la base de la mejor información científica disponible.

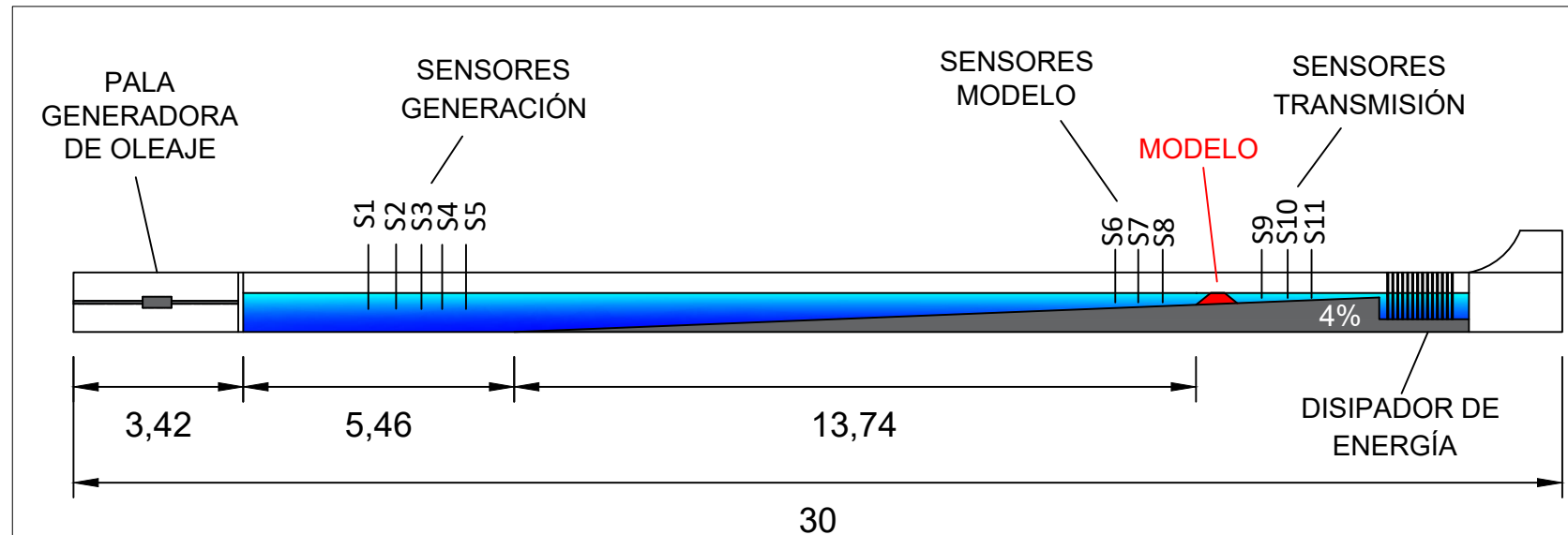
- **14.7** De aquí a 2030, aumentar los beneficios económicos que los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países menos adelantados obtienen del uso sostenible de los recursos marinos, en particular mediante la gestión sostenible de la pesca, la acuicultura y el turismo.

- **14.a** Aumentar los conocimientos científicos, desarrollar la capacidad de investigación y transferir tecnología marina, teniendo en cuenta los Criterios y Directrices para la Transferencia de Tecnología Marina de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental, a fin de mejorar la salud de los océanos y potenciar la contribución de la biodiversidad marina al desarrollo de los países en desarrollo, en particular los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países menos adelantados.

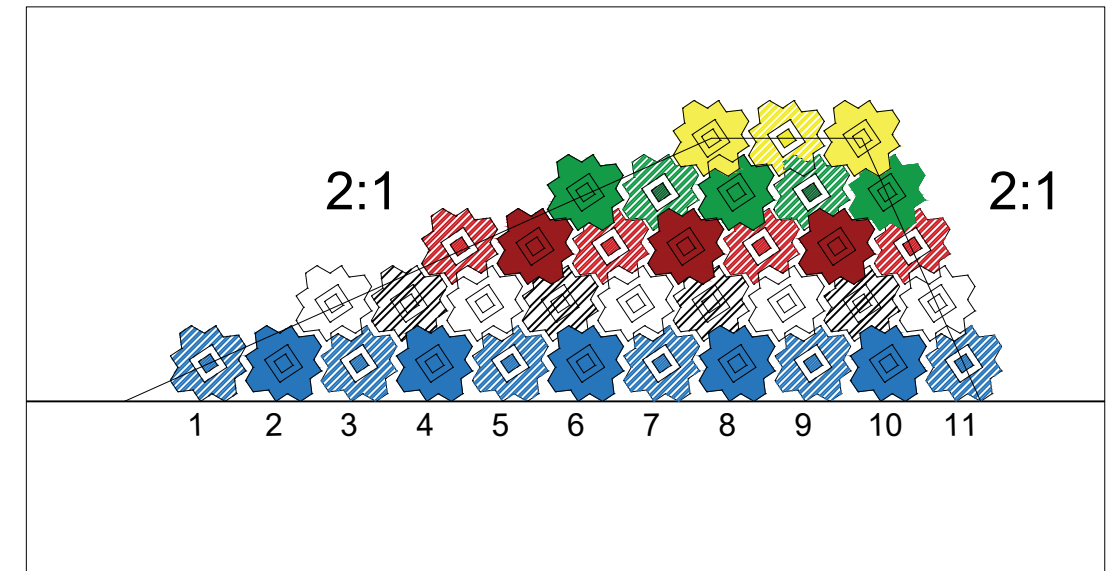
- **15.5** Adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales, detener la pérdida de la diversidad biológica y, para 2020, proteger las especies amenazadas y evitar su extinción



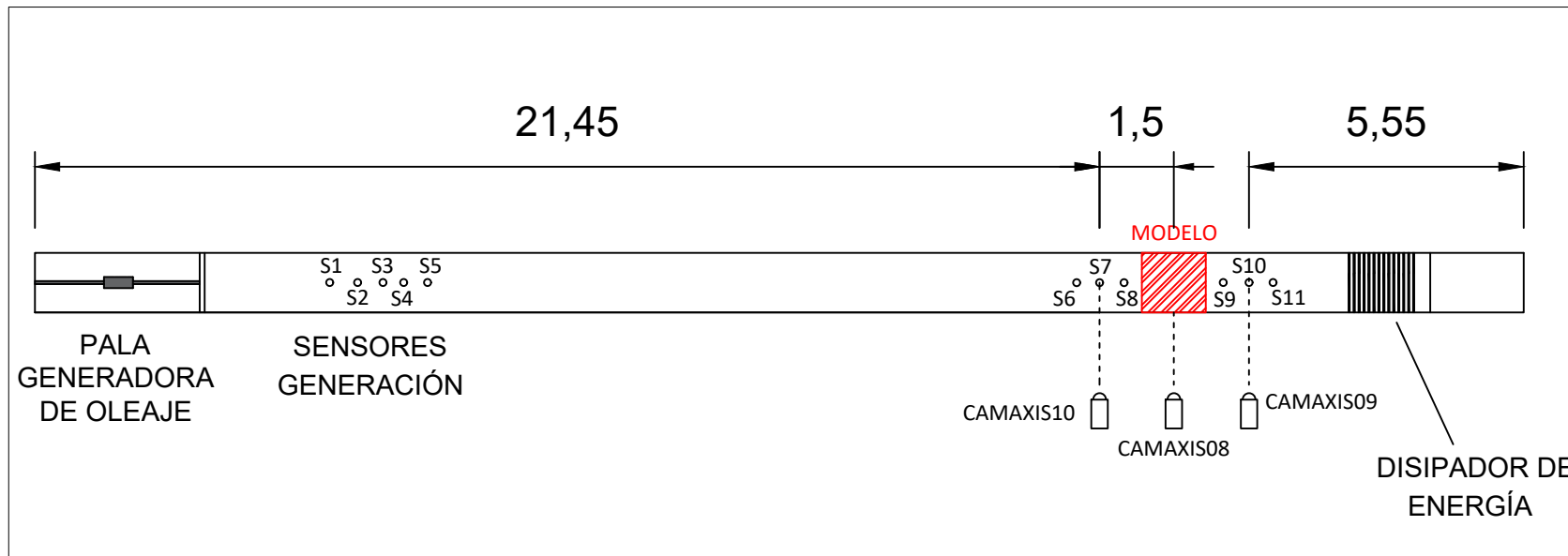
PLANOS



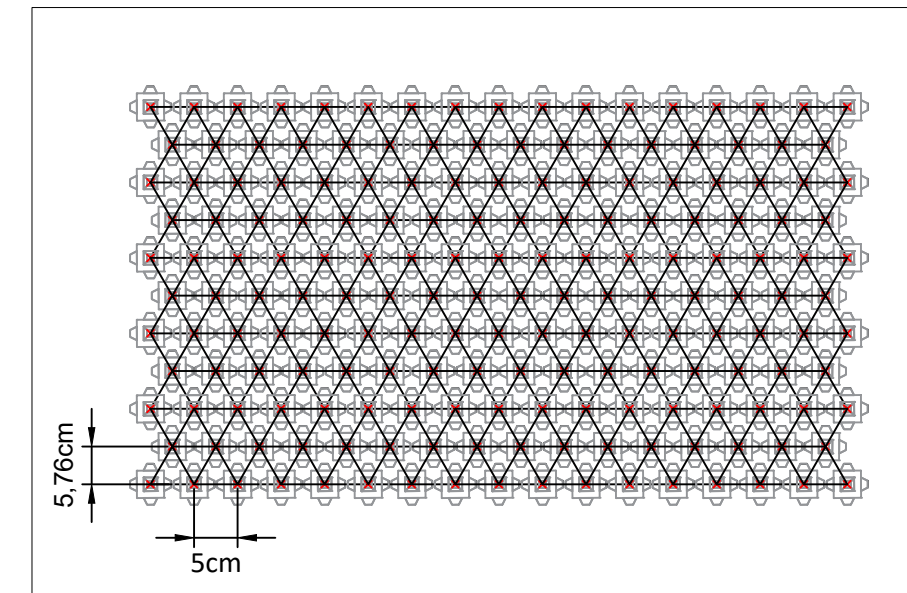
Sección en alzado del canal de oleaje



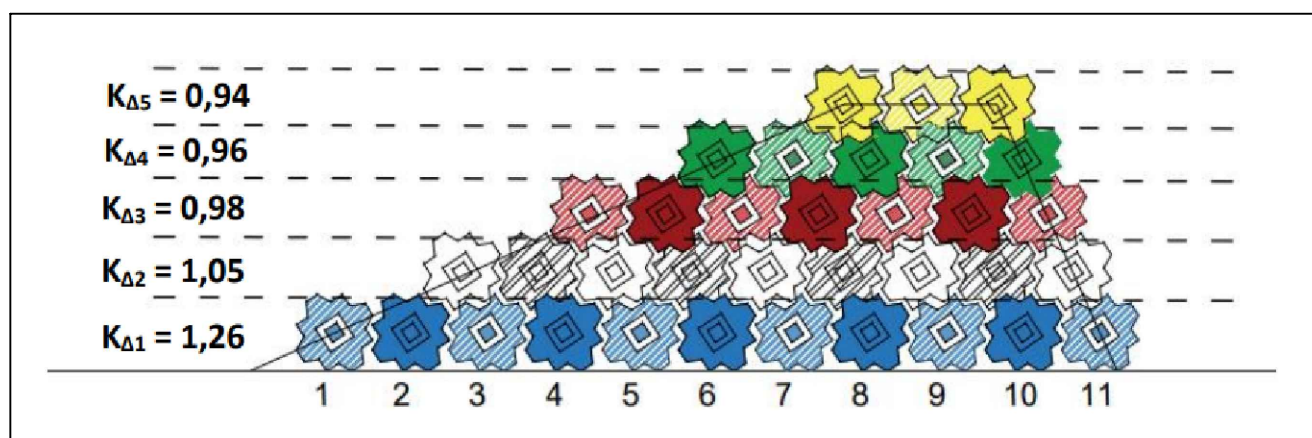
Sección transversal del modelo ensayado



Sección en planta del canal de oleaje

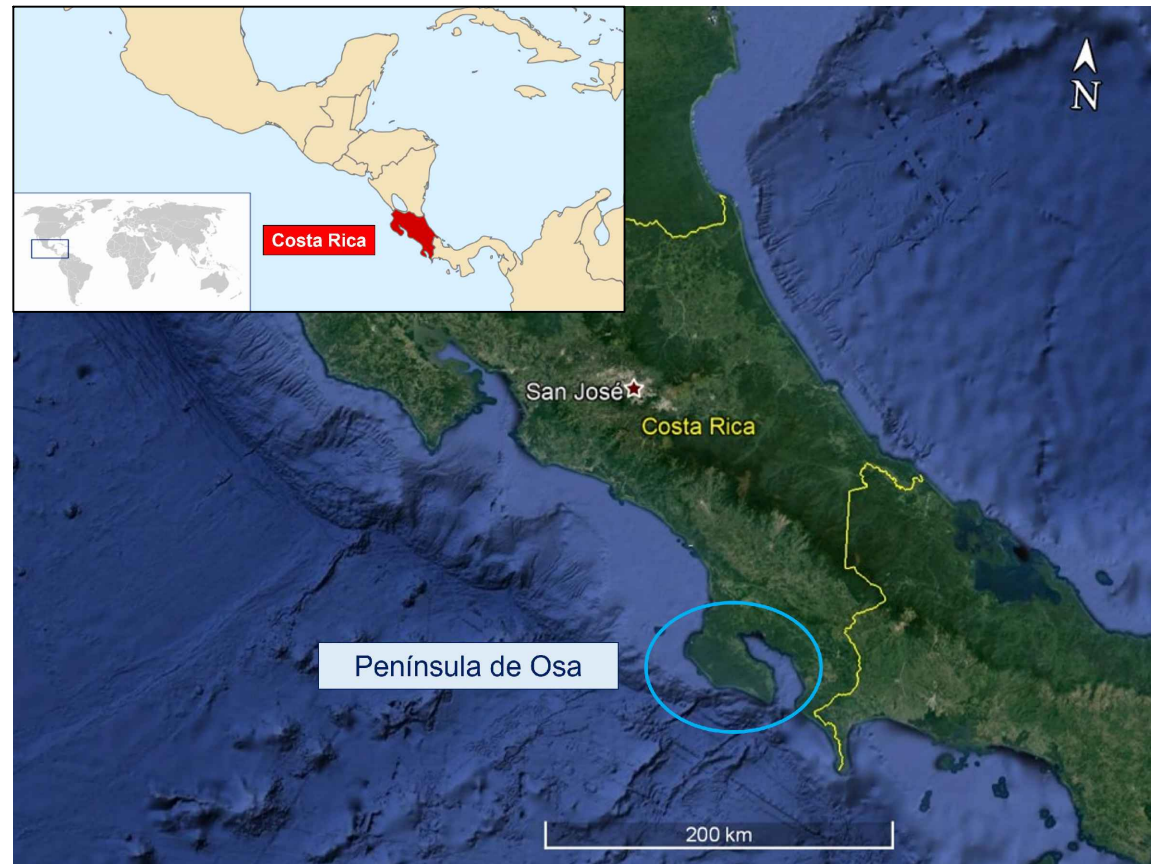


Malla de colocación

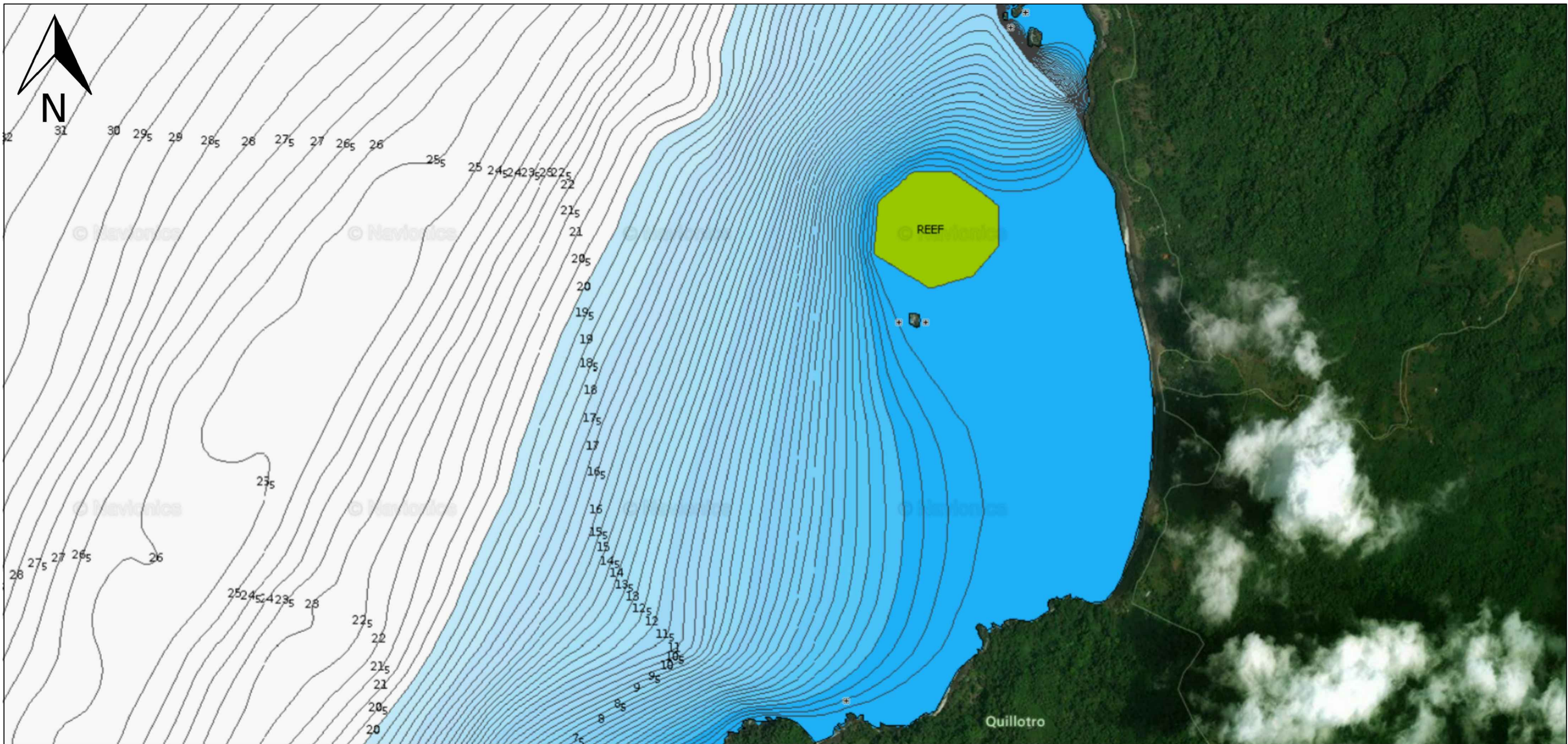





Coeficientes de capa

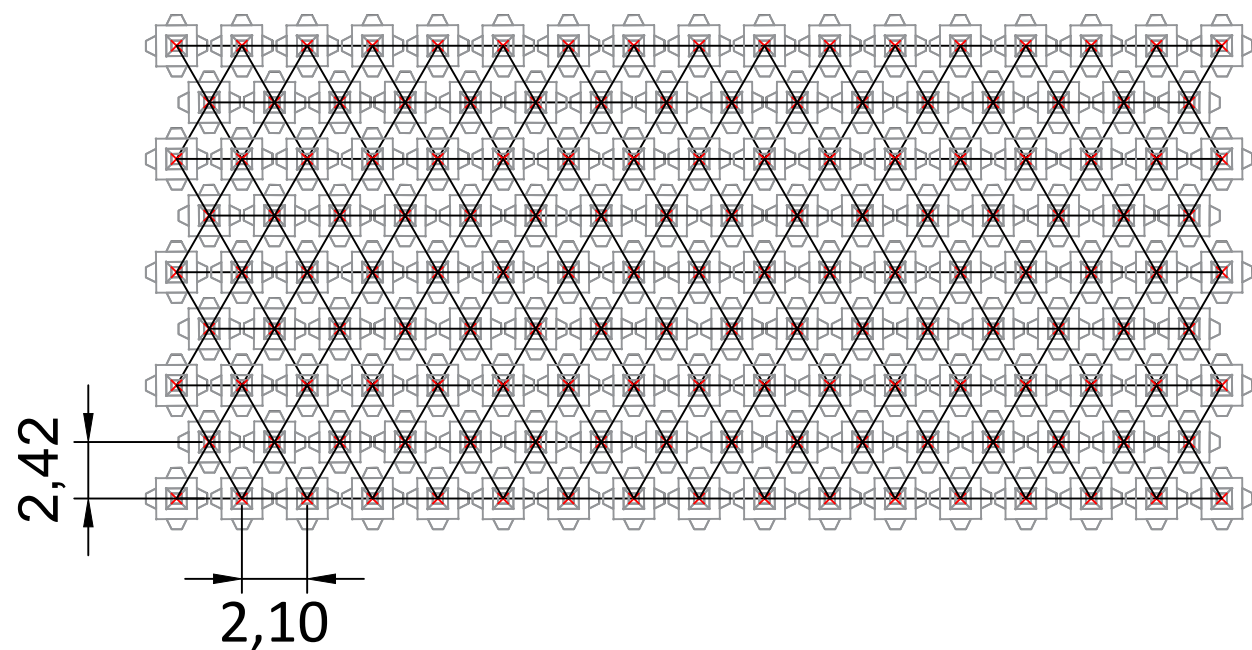
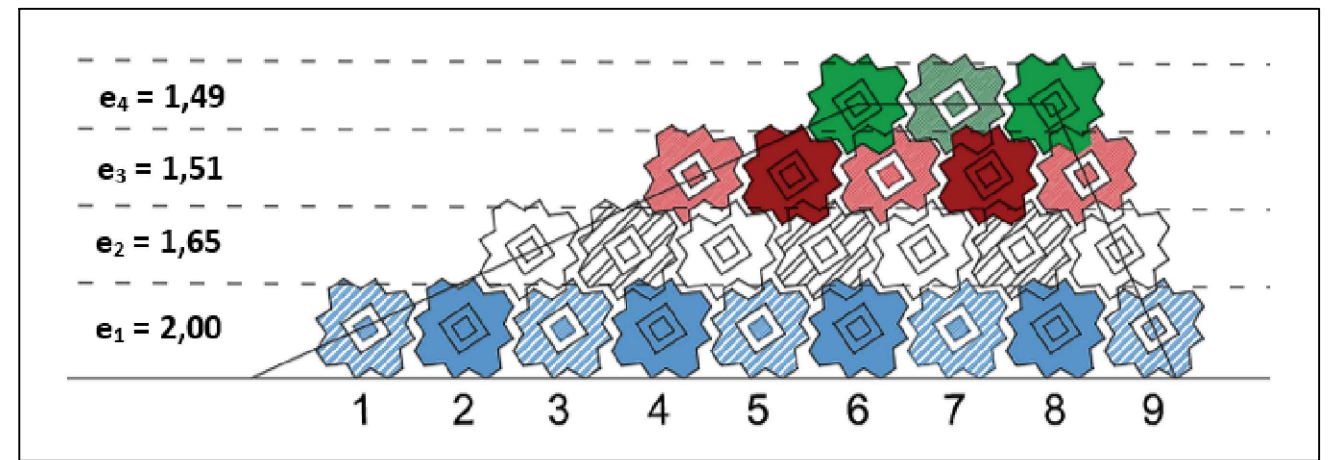
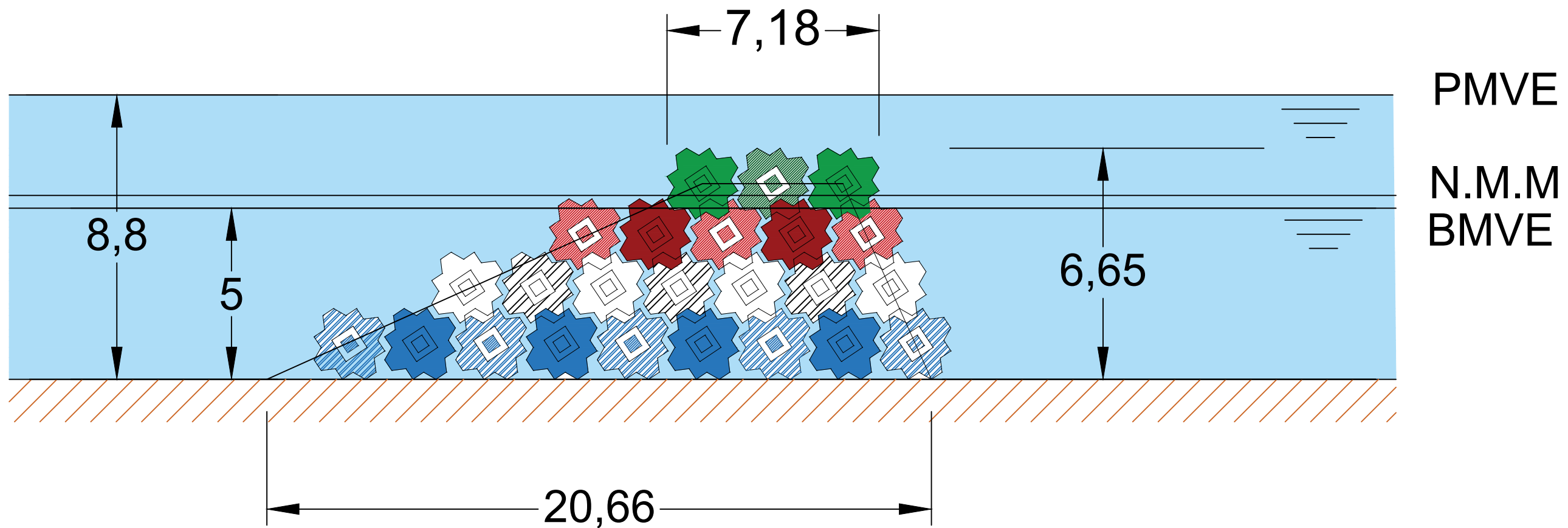
ESTUDIO DE TRANSMISIÓN DE OLAJE PARA EL DISEÑO DE DIQUES ARRECIFE HOMOGÉNEOS DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN AL PARQUE NACIONAL CORCOVADO (COSTA RICA).	TÍTULO DEL PLANO METODOLOGÍA EXPERIMENTAL		Nº DE PLANO 1
	ESCALA VARIAS	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR SERGIO LOZANO TOVAR	FECHA JULIO DE 2021	TITULACIÓN MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS	
TUTORES M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN PATRICIA MARES NASARRE JORGE MOLINES LLODRÁ	FIRMA 		



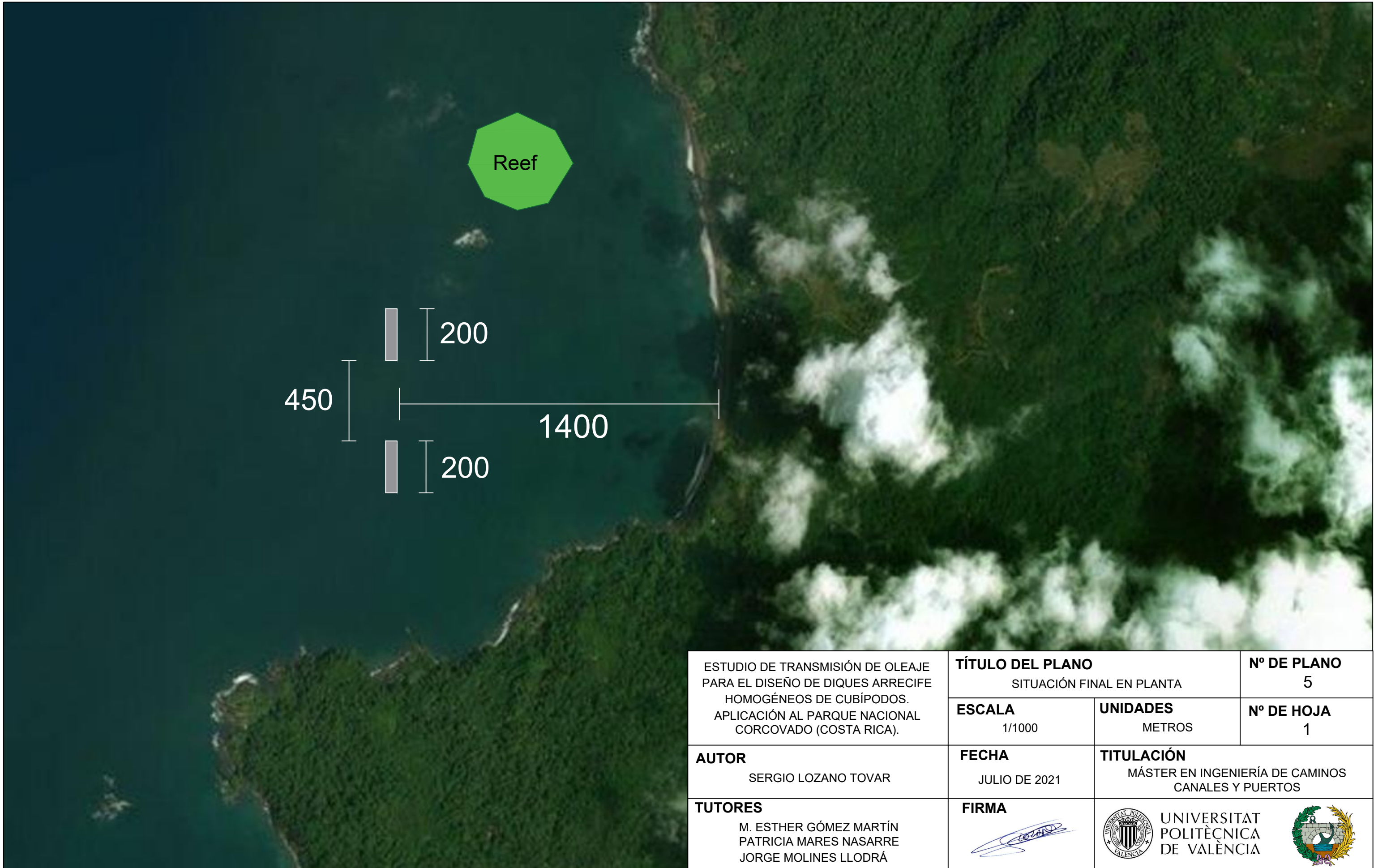
ESTUDIO DE TRANSMISIÓN DE OLEAJE PARA EL DISEÑO DE DIQUES ARRECIFE HOMOGÉNEOS DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN AL PARQUE NACIONAL CORCOVADO (COSTA RICA).	TÍTULO DEL PLANO LOCALIZACIÓN		Nº DE PLANO 2
	ESCALA EN EL PLANO	UNIDADES -	Nº DE HOJA 1
AUTOR SERGIO LOZANO TOVAR	FECHA JULIO DE 2021	TITULACIÓN MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS	
TUTORES M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN PATRICIA MARES NASARRE JORGE MOLINES LLODRÁ	FIRMA 	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	



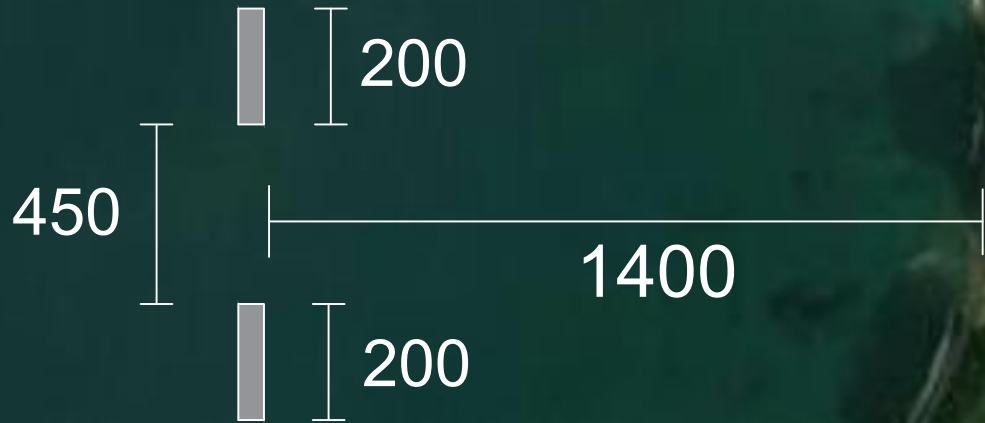
ESTUDIO DE TRANSMISIÓN DE OLEAJE PARA EL DISEÑO DE DIQUES ARRECIFE HOMOGÉNEOS DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN AL PARQUE NACIONAL CORCOVADO (COSTA RICA).	TÍTULO DEL PLANO BATIMETRÍA		Nº DE PLANO 3
	ESCALA EN EL PLANO	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR SERGIO LOZANO TOVAR	FECHA JULIO DE 2021	TITULACIÓN MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS	
TUTORES M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN PATRICIA MARES NASARRE JORGE MOLINES LLODRÁ	FIRMA 	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	



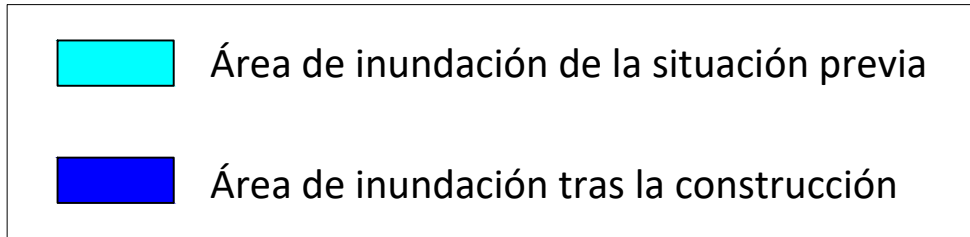
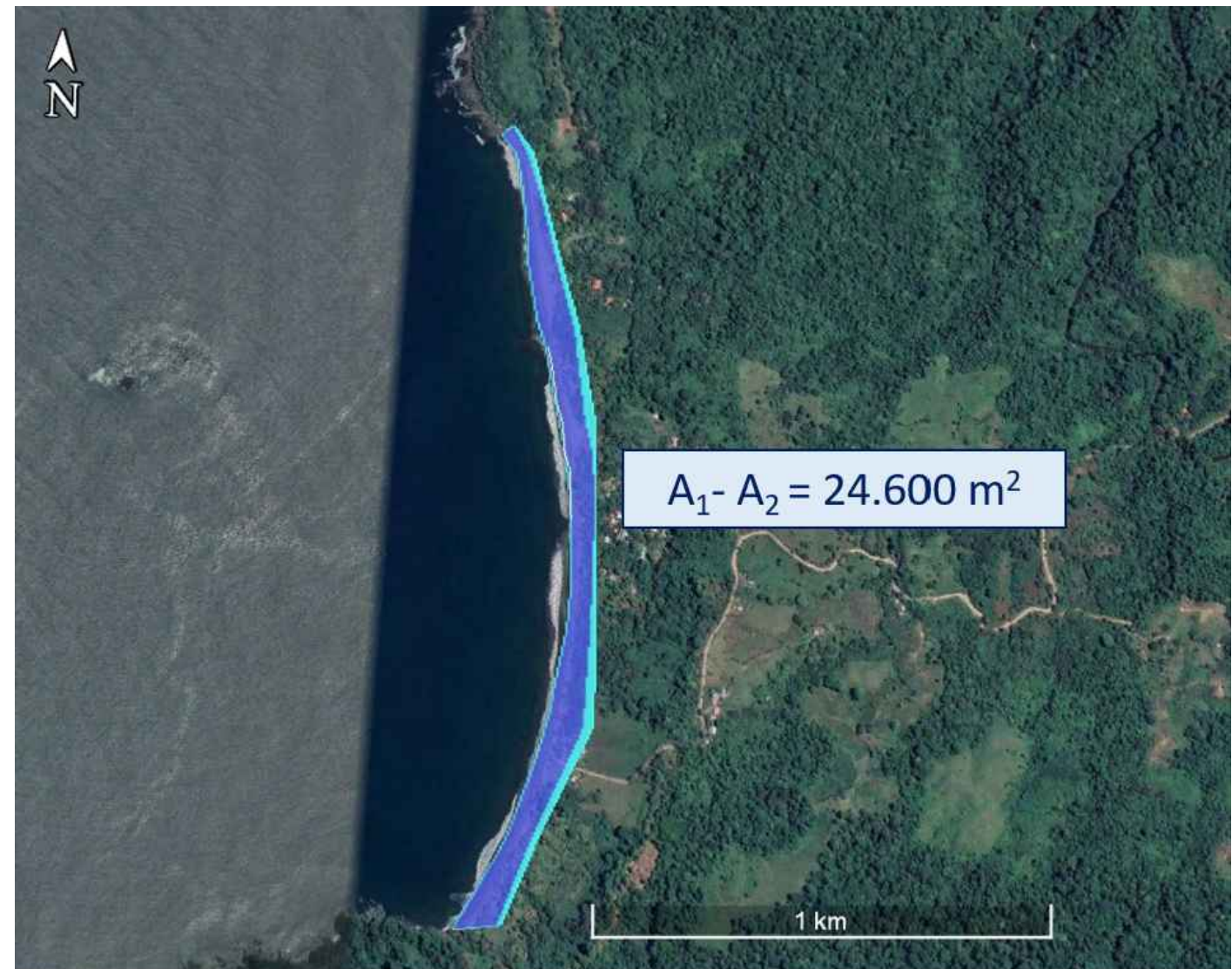
ESTUDIO DE TRANSMISIÓN DE OLEAJE PARA EL DISEÑO DE DIQUES ARRECIFE HOMOGÉNEOS DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN AL PARQUE NACIONAL CORCOVADO (COSTA RICA).	TÍTULO DEL PLANO SECCIÓN CONSTRUCTIVA		Nº DE PLANO 4
	ESCALA VARIAS	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR SERGIO LOZANO TOVAR	FECHA JULIO DE 2021	TITULACIÓN MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS	
TUTORES M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN PATRICIA MARES NASARRE JORGE MOLINES LLODRÁ	FIRMA 		



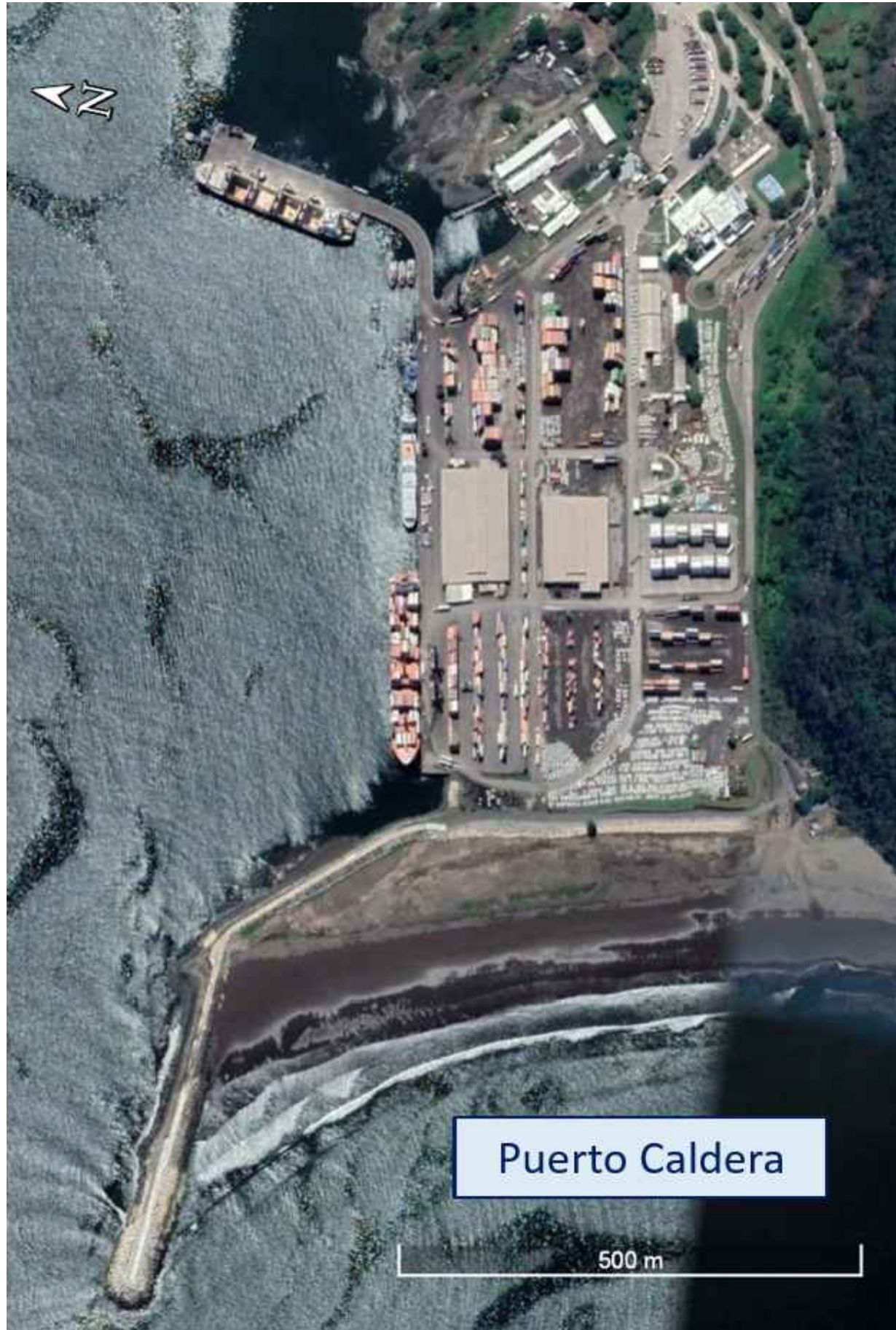
Reef



ESTUDIO DE TRANSMISIÓN DE OLEAJE PARA EL DISEÑO DE DIQUES ARRECIFE HOMOGÉNEOS DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN AL PARQUE NACIONAL CORCOVADO (COSTA RICA).	TÍTULO DEL PLANO SITUACIÓN FINAL EN PLANTA		Nº DE PLANO 5
	ESCALA 1/1000	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR SERGIO LOZANO TOVAR	FECHA JULIO DE 2021	TITULACIÓN MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS	
TUTORES M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN PATRICIA MARES NASARRE JORGE MOLINES LLODRÁ	FIRMA 	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	



ESTUDIO DE TRANSMISIÓN DE OLAJE PARA EL DISEÑO DE DIQUES ARRECIFE HOMOGÉNEOS DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN AL PARQUE NACIONAL CORCOVADO (COSTA RICA).	TÍTULO DEL PLANO ÁREAS DE INUNDABILIDAD		Nº DE PLANO 6
	ESCALA EN EL PLANO	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR SERGIO LOZANO TOVAR	FECHA JULIO DE 2021	TITULACIÓN MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS	
TUTORES M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN PATRICIA MARES NASARRE JORGE MOLINES LLODRÁ	FIRMA 	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	



Puerto Caldera



ESTUDIO DE TRANSMISIÓN DE OLEAJE PARA EL DISEÑO DE DIQUES ARRECIFE HOMOGÉNEOS DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN AL PARQUE NACIONAL CORCOVADO (COSTA RICA).	TÍTULO DEL PLANO PROCESO CONSTRUCTIVO		Nº DE PLANO 7
	ESCALA EN EL PLANO	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR SERGIO LOZANO TOVAR	FECHA JULIO DE 2021	TITULACIÓN MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS	
TUTORES M. ESTHER GÓMEZ MARTÍN PATRICIA MARES NASARRE JORGE MOLINES LLODRÁ	FIRMA 	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	