



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio experimental de la transmisión en diques
homogéneos de baja cota de cubípodos. Aplicación a la
protección costera de la playa de Puerto Morelos, Quintana
Roo, México.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Mazón García, Juan Miguel

Tutor/a: Molines Llodrá, Jorge

Cotutor/a: Medina Folgado, Josep Ramon

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Estudio experimental de la transmisión en diques
homogéneos de baja cota de Cubípodos. Aplicación a la
protección costera de la playa de Puerto Morelos, Quintana
Roo, México.

Presentado por

Mazón García, Juan Miguel

Para la obtención del

Grado en Ingeniería Civil.

Curso: 2021/2022

Fecha: 03/08/2022

Tutor: D. Jorge Molines Llodrà

Cotutor: D. Josep Ramon Molina Folgado

Índice

1. Objeto del proyecto.....	14
1.1 Introducción.....	14
1.2 Resumen	14
1.3 Objetivos	15
2. Antecedentes	17
2.1 Introducción.....	17
2.2 Conceptos previos.....	17
2.2.1 Oleaje	17
2.2.1.1 Estadísticos del oleaje.....	17
2.2.1.2 Propagación	18
2.2.1.3 Rotura	19
2.2.2 Diques exentos:	21
2.2.2.1 Funcionalidad:	21
2.2.2.2 Tipología en función de la cota de coronación:	22
2.2.2.3 Tipología en función de su composición estructural:.....	22
2.2.2.4 Respuesta frente a un dique aislado:	24
2.2.2.5 Respuesta frente a un sistema de diques:.....	26
2.2.3 El Cubípedo.....	27
2.2.3.1 Ventajas	28
2.2.3.2 Fabricación, transporte, almacenamiento y colocación.....	29
2.2.3.3 Costes de construcción de los Cubípedos	29
2.3.4 Estructuras de baja cota de coronación (LCS).....	30
2.3.4.1 Clasificación de los diques de baja cota de coronación en función de la estabilidad... 30	
2.3.4.2 Transmisión del oleaje:.....	32
2.3.4.3 Estabilidad.....	35
2.2.5 HLCS de Cubípedos:.....	37

2.2.5.1	Introducción:	37
2.2.5.2	Revisión histórica:	37
2.2.5.3	Funcionalidad:	39
2.2.5.4	Ventajas e inconvenientes:.....	39
2.2.5.5	Mallas de colocación y coeficientes de capa.....	41
2.2.5.7	Transmisión del oleaje:.....	44
3.	Metodología experimental	48
3.1	Introducción:.....	48
3.2	Descripción de instalaciones y equipos.....	48
3.2.1	Descripción del canal de oleaje	48
3.2.2	Sistema generador de oleaje.....	49
3.2.3	Sistema disipador de energía.....	49
3.3	Instrumentación.....	50
3.3.1	Sensores de nivel	50
3.4	Modelo físico.....	51
3.4.1	Material	53
3.4.2	Malla de colocación.....	54
3.4.3	Coefficiente de capa	55
3.5	Técnica experimental y proceso constructivo	56
3.6	Test Matrix	59
3.6.2	Nomenclatura de los ensayos	59
3.6.3	Datos ensayos	60
3.7	Análisis de datos experimentales	60
3.7.1	Análisis del oleaje	60
3.7.1.1	Método LASA-V.....	60
3.7.1.2	LPCLab	61
3.7.1.3	SwamOne.....	62
3.8.3	Estabilidad hidráulica ->Cuando lo acabe Mashadyan.....	65

3.8.4	Análisis de la transmisión.....	66
4.	Análisis de la transmisión	68
4.1	Introducción.....	68
4.2	Resumen de la transmisión del oleaje.....	68
4.3	Evaluación de la formulación existente.....	69
4.4	Estudio y obtención de una nueva formulación para la obtención de K_t en diques homogéneos de baja cota de coronación de Cubípodos	70
4.4.1	Influencia del S_{0p} en el coeficiente de transmisión	71
4.4.2	Influencia del francobordo adimensional en el coeficiente de transmisión.....	71
4.4.3	Influencia del ancho adimensional (B_{medio}/L) en el coeficiente de transmisión	73
4.4.4	Influencia de la altura relativa H_i/h	74
4.4.5	Formulación.....	74
5.	Conclusiones.....	78
6.	Aplicación práctica	81
6.1	Introducción.....	81
6.2	Protección costera de los Arrecifes en el caribe mexicano	81
6.2.1	Protección contra fenómenos climáticos extremos: los huracanes.....	83
6.3	Arrecifes artificiales	85
6.4	Localización.....	86
6.4.1	Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos.....	87
6.4.2	Zona de la actuación.....	87
6.4.2.1	Clasificación de la costa	89
6.5	Clima marítimo	90
6.6	Régimen de mareas.....	91
6.7	Influencia del cambio climático.....	92
6.8	Diseño de la estructura	94
6.8.1	Estimación de la transmisión.....	94
6.8.1.1	Definición de la sección transversal del arrecife	94

6.8.1.2 Cálculo del coeficiente de transmisión.....	95
6.8.2 Dimensionamiento de la estructura.....	97
6.8.3 Diseño en planta.....	98
6.8.4 Comportamiento frente a acciones extremas.....	99
6.9 Procedimiento constructivo.....	100
6.9.1 Fases.....	100
6.9.1.1 Fabricación de las piezas.....	100
6.9.1.2 Almacenamiento	101
6.9.1.3 Manipulación	102
6.9.1.4 Transporte.....	102
6.9.1.5 Colocación	103
6.9.2 Maquinaria y equipos.....	103
6.9.3 Espacios.....	104
6.10 Programa de trabajos	104
6.10.1 Trabajos previos	104
6.10.2 Fabricación y acopio de Cubípodos:.....	105
6.10.3 Construcción de los diques.....	105
6.10.4 Gestión de residuos, Seguridad y Salud y control ambiental.....	106
La gestión de residuos, la seguridad y salud y el control ambiental son de obligado cumplimiento en todo tipo de obras. A su vez, resulta fundamental que se extienda durante la duración de toda la obra.....	106
6.11 Diagrama de Gantt.....	107
6.12 Valoración económica	108
6.12.1 Trabajos previos.....	108
6.12.2 Fabricación y acopio de los Cubípodos.....	108
6.12.3 Transporte y construcción del dique.....	109
6.12.4 Gestión de residuos	109
6.12.5 Seguridad y salud.....	109

6.13 Presupuesto de ejecución material.....	110
7.Referencias:.....	111

Tabla de ilustraciones:

Fig. 1 Parámetros característicos del oleaje. Fuente: encvirtual.es.....	18
Fig. 2 Esquema de difracción en un dique semi-infinito. Fuente:Sañudo.....	19
Fig. 3 Refracción en el puerto de Bemicarló. Fuente: Google Maps	19
Fig. 4 Tipos de rotura del oleaje. Fuente: Argente-Garrido, 2019.....	20
Fig. 5 Tipo de rotura en función del número de Iribarren. Fuente: Elaboración propia.....	20
Fig. 6 Evolución del perfil de ola según el tipo de rotura. Fuente: Galvín 1968.....	21
Fig. 7 Piezas de hormigón para la construcción de diques. Fuente: Dupray y Roberts (2010).	23
Fig. 8 Sección de un dique exento convencional. Fuente: Argente (2019).....	23
Fig. 9 Dique homogéneo de escollera en El Monsau, Barcelona. Fuente: Google Maps.....	24
Fig. 10 Dique exento con nulo o casi nula interacción con la línea de costa en la costa almeriense. Fuente: Google Maps.....	24
Fig. 11 Tómbolo frente a la costa de Málaga. Fuente: Google Maps.....	25
Fig. 12 Imagen de dos hemitómbolos frente a la costa de Málaga. Fuente: Google Maps.....	25
Fig. 13 Croquis de las posibles respuestas de la costa ante la construcción de un dique exento. Fuente: De la Peña (2008).....	26
Fig. 14 Respuesta de la costa frente a una serie de diques aislados. Fuente: Rosati, 1992.....	27
Fig. 15 El Cubípedo. Fuente: Medina y Gómez-Martín (2016).....	27
Fig. 16 Adoquinamiento natural de los cubos frente a la aleatoriedad de los Cubípedos. Fuente: Corredor y Medina, 2011.....	28
Fig. 17 Colocación de Cubípedos con pinzas de presión.....	29
Fig. 18 Ejemplo de diques exentos tipo arrecife. Fuente: Van der Meer (1994).	31
Fig. 19 Estáticamente estables de baja cota de coronación. Fuente: Van der Meer (1994)	31
Fig. 20 Estáticamente estables sumergidos. Fuente: Van der Meer (1994).	32
Fig. 21 Parámetros fundamentales para definir la transmisión. Fuente: Van der Meer, 2005.	32
Fig. 22 Modos de fallo de un dique en talud. Fuente: Ciria, 2007.....	36
Fig. 23 Compactación heterogénea en un dique. Fuente: Gómez-Martín, 2014.....	37
Fig. 24 Comparación entre diques de baja cota tradicionales y diques de baja cota homogéneos de Cubípedos. Fuente: Medina, 2019.....	37
Fig. 25 Comparativa de la playa de Chilches de los años 2002 y 2022 donde se puede ver como la línea de costa ha retrocedido en un ejemplo de protección de costa “en raspa de sardina”. Produciéndose erosión en la zona más próxima al dique aguas abajo; y sedimentación, aguas arriba. Fuente: Google Earth.	40

Fig. 26 Comparación de la playa de Benalmádena entre los años 2005 y 2022, donde se puede observar como con diques exentos se ha conseguido mantener la playa estable en su conjunto sin interrumpir totalmente el transporte sólido-litoral. Fuente: Google Earth.	40
Fig. 27 Disposición de los Cubípodos en un dique homogéneo según Medina et al. 2020. Fuente: Medina, 2020.....	42
Fig. 28 Características geométricas de una disposición factible para un HLCS de Cubípodos. Fuente: Medina, 2020.....	42
Fig. 29 Influencia de la malla de colocación en la altura del dique. Feunte: Medina, 2020.....	42
Fig. 30 Valores de los coeficientes de capa. Fuente: Medina, 2020.....	43
Fig. 31 Representación de los coeficientes de capa en un dique y sus valores con una malla de colcoación de $b/D_n=1.27$ y $a/D_n=1.58$. Fuente: Medina, 2020.	43
Fig. 32 Resultados obtenidos por Centi (2020). Fuente: Medina, 2020.	43
Fig. 33 Evolución de los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación en función del francobordo adimensional. Fuente: Medina, 2020.....	45
Fig. 34 Imagen de canal del LPC-UPV donde se han llevado a cabo los ensayos. Fuente: elaboración propia.	48
Fig. 35 Croquis del canal del LPC-UPV en su configuración utilizada en el proyecto Holobreak. Fuente: elaboración propia.	48
Fig. 36 Pistón y pala generadora de oleaje del canal del LPC-UPV. Fuente: elaboración propia.	49
Fig. 37 Croquis de los sistemas disipadores de energía. Fuente: elaboración propia.	50
Fig. 38 Final del canal y talud (donde se observan los ladrillos huecos y los cubos de mortero. Fuente: elaboración propia.	50
Fig. 39 Sensor capacitivo DHI en canal del LPC-UPV. Fuente: elaboración propia.	51
Fig. 40 Sección del modelo 1. Fuente: LPC-UPV.....	52
Fig. 41 Sección del modelo 2. Fuente: LPC-UPV.....	52
Fig. 42 Sección del modelo 3. Fuente: LPC-UPV.....	52
Fig. 43 Características de los modelos estudiados. Fuente: elaboración propia.	53
Fig. 44 Dimensiones principales del cubípodoo. Fuente: Medina y Ester-Martín, 2016.	53
Fig. 45 Caracterización de los Cubípodos utilizados en los ensayos. Fuente: elaboración propia.....	53
Fig. 46 Características de los Cubípodos ensayados. Fuente: elaboración propia.....	54
Fig. 47 Malla equilátera utilizada para los ensayos, con $a=5.76$ y $b=6.63$. Fuente: LPC-UPV.....	54
Fig. 48 Cálculo de la porosidad según Gómez-Martín y Medina (2007). Fuente: elaboración propia.	55

Fig. 49 Resumen de los valores obtenidos en los ensayos en canal de los coeficientes de capa. Fuente: elaboración propia.	55
Fig. 50 Croquis de los coeficientes de capa de la estructura. Fuente: elaboración propia.....	55
Fig. 51 Colocación de la plantilla de la malla y dibujado de los puntos. Fuente: elaboración propia.	57
Fig. 52 Imagen de la primera capa colocada. Fuente: elaboración propia.....	57
Fig. 53 Medición del coeficiente de capa de la primera capa según el método de Keyser y Jacobs (2020). Fuente: elaboración propia.	57
Fig. 54 Construcción y medición del coeficiente de capa de la segunda capa. Fuente: elaboración propia.....	58
Fig. 55 Modelo 3 construido completamente, donde se observan las diferentes capas y las piedras que lo traban en las paredes. Fuente: elaboración propia.....	58
Fig. 56 Estadillo de los ensayos irregulares realizados con nivel 14.5 cm. Fuente: LPC-UPV.....	60
Fig. 57 Estadillo de los ensayos irregulares realizados con nivel 18 cm. Fuente: LPC-UPV.....	60
Fig. 58 Software LASA-V. Fuente: LPC-UPV.....	61
Fig. 59 Software LPCLab, donde se puede observar un registro de oleaje y la ventana temporal seleccionada (en amarillo). Fuente: LPC-UPV.	62
Fig. 60 Interfaz de SwamOne. Fuente: elaboración propia.	63
Fig. 61 Comparación entre la altura de ola registrada sin estructura y la obtenida con Swan One. Fuente: elaboración propia.	64
Fig. 62 Comparación entre el período pico registrado sin estructura y el obtenido con Swan One. Fuente: elaboración propia.	64
Fig. 63 Inicio de avería tipo 1 en la tercera capa. Fuente: Mashadyan, 2022.....	65
Fig. 64 Inicio de avería del tipo 2 en la tercera capa. Fuente: Mashadyan, 2022.	65
Fig. 65 Tabla resumen de las variables empleadas en el estudio de la transmisión según los diferentes autores. Fuente: elaboración propia.	69
Fig. 66 Rangos de aplicación de los métodos para estimar Kt. Fuente: elaboración propia.....	69
Fig. 67 Comparación de los valores de Kt obtenidos para las diferentes formulaciones frente a los valores de Kt obtenidos en los ensayos, teniendo en cuenta los límites de cada fórmula. Fuente: elaboración propia.	70
Fig. 68 Influencia del peralte en la transmisión. Fuente: elaboración propia.....	71
Fig. 69 Influencia del Rc/Hmi en el coeficiente de transmisión. Fuente: elaboración propia.	72
Fig. 70 Influencia del Bmedio/L en el coeficiente de transmisión. Fuente: elaboración propia.	73
Fig. 71 Anchos medios de los diferentes modelos (en m.). Fuente: elaboración propia.....	74

Fig. 72 Influencia de la altura/profundidad relativa en el coeficiente de transmisión. Fuente: elaboración propia.	74
Fig. 73 Coeficientes de la fórmula de transmisión. Fuente: elaboración propia.	75
Fig. 74 Comparación de Kt estimado con la nueva fórmula y el medido en el laboratorio, con la banda de confianza del 90%. Fuente: elaboración propia.	75
Fig. 75 Diferentes secciones ensayos en la realización del TFG. Fuente: LPC-UPV.	78
Fig. 76 Comparación de Kt estimado con la nueva fórmula y el medido en el laboratorio, con la banda de confianza del 90%. Fuente: elaboración propia.	79
Fig. 77 Extensión del arrecife mesoamericano (sombreado en rojo). Fuente: Healthy Reefs.	81
Fig. 78 Comparación del flujo de energía del oleaje entre 8 metros de profundidad y 2 metros de profundidad bajo escenarios de rugosidad diferentes. Fuente: Osorio-Cano et al., 2019.	82
Fig. 79 Diferencia entre los perfiles de la playa de Cancún y Puerto Morelos. Fuente: de Alegría-Arzaburu et al., 2013.	82
Fig. 80 Zona que comprende el estudio. Fuente: Mariño-Tapia et al., 2014.	83
Fig. 81 Corrientes de fondo generadas por las olas (a), corrientes de fondo generadas por las olas y el viento (b) y patrón de transporte de sedimentos (c). La imagen superior se corresponde con el inicio de la tormenta y la inferior con el pico de olas más altas registradas. Fuente: Mariño-Tapia et al., 2014.	84
Fig. 82 Comparación entre el antes y el después en las playas de Cancún (arriba) y Puerto Morelos (abajo). Fuente: Mariño-Tapia et al., 2014.	85
Fig. 83 (a) Abánico de Venus (<i>Gorgonia flabellum</i>), (b) y (c) (<i>Palythoa caribaeorum</i>), (d) (<i>Diploria labyrinthiformis</i>), (e) pólipos y, (f), (g), (h) and (i) el hábitat completo generado en el arrecife artificial. Fuente: Silva et al., 2016.	86
Fig. 84 Localización de Puerto Morelos. Fuente: Google Earth.	86
Fig. 85 Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (área formada por la línea punteada roja). Fuente: Navionics.	87
Fig. 86 En la imagen de la izquierda se puede ver: en el rectángulo azul, la zona de playa a proteger; y rodeado en rojo las zonas donde el coral ha desaparecido. En la imagen de la derecha, las zonas de arrecife de coral se encuentran pintadas de turquesa. Como se puede observar, se corresponde con las zonas donde se produce la rotura del oleaje. Fuente: Google Earth y Navionics.	88
Fig. 87 Comparación de la playa a proteger entre los años 2009 y 2016. En el punto de la línea amarilla, la zona de arena se ha reducido desde los 23.2 metros hasta los 13.62 metros. Fuente: Google Earth.	88

Fig. 88 Temporal en el año 2017, donde se puede ver como prácticamente desaparece la zona de arena. Fuente: Google Earth.....	89
Fig. 89 Clasificación genética de la costa según el perfil. Fuente: Chapapría et al., 2017.....	90
Fig. 90 Perfil medio de la playa de Puerto Morelos. Fuente: de Alegría-Arzaburu et al., 2013.....	90
Fig. 91 Rosas del oleaje de las dos situaciones definidas y registros brutos de la altura de ola, el período y la dirección. Fuente: Escudero et al., 2021.....	91
Fig. 92 Arriba, nivel del mar en Puerto Morelos; abajo, predicción de la marea astronómica (negro) y variación del nivel asociado a otros fenómenos, mayoritariamente la corriente del Yucatán (gris). Fuente: Coronado, 2007.....	92
Fig. 93 Tendencia del nivel del mar en el Caribe. Fuente: Ruiz-Ramírez, 2014.	93
Fig. 94 Sectores en los que se ha dividido el mundo en el estudio (izquierda) y tendencia de la altura de ola media en aguas profundas en la zona de estudio. Fuente: Lemos et al., 2019	93
Fig. 95 Zona y perfiles estudiados por Escudero et al. Fuede: Escudero et al., 2021.....	94
Fig. 96 Perfiles de las secciones transversales 8, 9 y 10. Fuente: Escudero et al., 2019.....	95
Fig. 97 Parámetros que definen una sección del arrecife. Fuente: elaboración propia.....	95
Fig. 98 Tabla resumen de las diferentes secciones del arrecife frente a la zona de la actuación. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Escudero et al., 2019.....	95
Fig. 99 Ábaco para la obtención del coeficiente de refracción y asomeramiento. Fuente: SPM (1984).	96
Fig. 100 Croquis de la estructura a disponer. Fuente: elaboración propia.	98
Fig. 101 Distancia de la playa al dique. Fuente: Navionics.	98
Fig. 102 Malla de colocación utilizada en la construcción del dique. Fuente: elaboración propia.....	99
Fig. 103 Situación en planta del dique construido, donde se puede ver su longitud. Fuente: Navionics y Google Earth.	99
Fig. 104 Encofrados verticales del Cubípedo. Fuente: El Manual del Cubípedo, 2015.	100
Fig. 105 Línea de fabricación de Cubípedos en el puerto de Málaga. Fuente: Web del Cubípedo..	101
Fig. 106 Dimesiones reales de un Cubípedo de 16 t. donde se puede apreciar la cierta conicidad. Fuente: Manual del Cubípedo, 2015.	101
Fig. 107 Acopio de Cubípedo en el laboratorio (izquierda) y en el puerto de Malaga (derecha). Fuente: web del Cubípedo.....	102
Fig. 108 Manipulación de Cubípedos en el parque de almacenamiento con pinzas de doble presión. Fuente: Web del Cubípedo.....	102
Fig. 109 Grúa Jack-up. Fuente: Google imágenes.	103
Fig. 110 Puerto y zona de fabricación y acopio (en negro). Fuente: Google Earth.....	104

Fig. 111 Porcentaje de los diferentes costes sobre el total en la construcción del Cubípedo. Fuente:
Manual del Cubípedo, 2015. 108

Capítulo 1: Objeto del estudio

1. Objeto del proyecto

1.1 Introducción

El presente trabajo titulado “Estudio experimental de la transmisión en diques homogéneos de baja cota de Cubípodos. Aplicación a la protección costera de la playa de Puerto Morelos, Quintana Roo, México” pretende servir como Trabajo Final de Grado para la titulación en Grado en Ingeniería Civil por Escuela Técnica Superior en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de València al autor, Juan Miguel Mazón García.

1.2 Resumen

Este tipo de estructuras, como se verá a lo largo del presente trabajo, constituye una forma sencilla y práctica de mitigar los problemas de erosión en la costa. Al mismo tiempo, pueden utilizarse como arrecifes artificiales para paliar o recuperar zonas coralinas degradadas.

En el Capítulo 2. Antecedentes; se describe la literatura existente relativa a los diques exentos de baja cota de coronación y los diques homogéneos de baja de coronación, prestando especial atención a la transmisión de los mismos y al uso de Cubípodos en ellos.

En el Capítulo 3. Metodología experimental; se recoge la forma, los instrumentos y los programas utilizados para realizar tanto los ensayos realizados en el canal del LPC-UPV como el tratamiento de datos de los mismos. La metodología, pese a tener diferencias con otros canales experimentales, presenta características diferentes a otros procesos realizados al tratarse de diques homogéneos.

En el Capítulo 4. Análisis de la transmisión; se realiza un análisis pormenorizado de las diferentes formulaciones descritas para estimar la transmisión del oleaje. Después de comprobar que ninguna de las descritas estima con gran precisión este tipo de estructuras, se propone un nuevo análisis de diferentes variables y su influencia en el coeficiente de transmisión. Posteriormente, se desarrolla una nueva fórmula con estas variables.

En el Capítulo 5. Conclusiones; donde se recogen las conclusiones de esta primera parte del trabajo final de grado.

En el Capítulo 6. Aplicación práctica; se desarrolla la protección costera de la playa de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. En este último apartado se diseñará un dique exento de baja cota de coronación de Cubípodos, tratando de imitar la transmisión de los arrecifes de la zona. A su vez, se explicará la forma de llevar a cabo la construcción por medios marítimos.

1.3 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo académico es estudiar la transmisión en diques homogéneos de baja cota de coronación de Cubípodos, uno de los factores clave en el diseño de este tipo de estructuras. Para ello, se tendrán en cuenta los condicionantes que presentan los ambientes en los que se emplazan este tipo de estructuras, generalmente la rotura del oleaje por fondo, así como las variables principales que describen este tipo de estructuras: francobordo adimensional, ancho de coronación,...

Finalmente, se pondrá en práctica en la protección costera de la playa de Puerto Morelos, Quintana Roo.

Capítulo 2: Antecedentes

2. Antecedentes

2.1 Introducción

En este apartado se pretende exponer la literatura o estado del arte relacionado con los diques exentos y diques arrecife, prestando especial atención tanto a las estructuras de baja cota de coronación como a la transmisión. Todo ello, útil para desarrollar la aplicación práctica.

Primero se describirán algunos conceptos previos, necesarios para poder entender el resto del trabajo. Posteriormente, se describirán los diques exentos, sus materiales y la relación con la costa. Finalmente, se expondrá todo lo relacionado con las estructuras homogéneas de baja cota de coronación de Cubípodos (HLCS).

2.2 Conceptos previos

Previo a exponer el estado del arte de los HLCS, es necesario definir una serie de conceptos clave.

2.2.1 Oleaje

El oleaje es la acción del clima marítimo más desfavorable, causante de la mayoría de los procesos costeros. Consiste en ondas aleatorias más o menos irregulares, fruto de la acción continua del viento sobre la superficie de una masa de agua, denominadas fetch, durante un período de tiempo. Su acción define la línea costera, tanto en planta como en perfil, con los procesos propios de transporte, erosión y sedimentación.

2.2.1.1 Estadísticos del oleaje

Los estadísticos del oleaje son los parámetros que nos permiten caracterizarlo. Por ello, vamos a definir los más importantes.

-Longitud de ola: longitud entre dos puntos iguales de dos olas, generalmente entre las crestas o los valles. Varía con la propagación del oleaje, reduciéndose al acercarse a la costa por efecto del asomeramiento. La más utilizada es la longitud de ola en aguas profundas (L_0).

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.1)$$

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

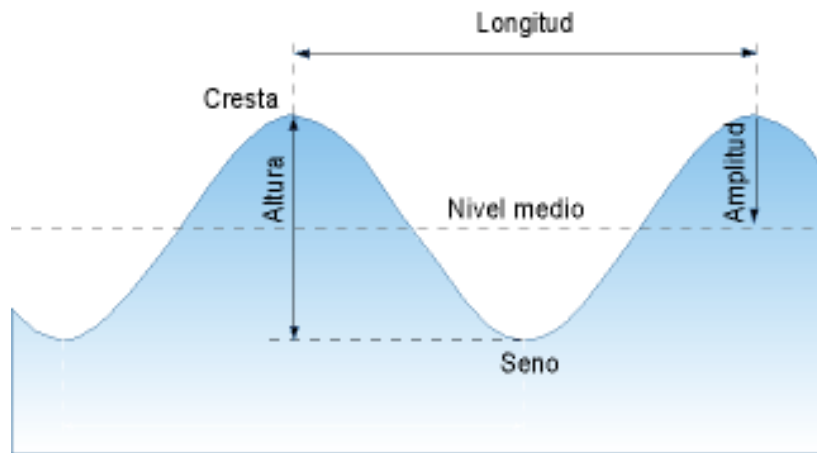


Fig. 1 Parámetros característicos del oleaje. Fuente: encvirtual.es.

-Peralte: cociente entre la altura y la longitud de la ola.

$$S = \frac{H}{L_0} \quad (2.2)$$

-Altura de ola significativa (H_{m0}): la altura de ola se define como la diferencia entre las crestas y los valles de las olas. En este caso, se refiere a la media de todas las olas.

-Período pico del oleaje (T_p): tiempo, en segundos, que transcurre entre dos puntos iguales de dos olas, generalmente entre las crestas o los valles. En este caso, se refiere al tiempo máximo que transcurre entre dos crestas o valles.

2.2.1.2 Propagación

El oleaje es generado en aguas profundas por acción del viento y transportado por este hacia la costa. En ese tiempo, el oleaje puede sufrir los fenómenos de asomeramiento, difracción, refracción y rotura. Todos estos procesos se producen mucho más próximos a la línea de costa que a la zona de generación del oleaje.

- El asomeramiento es un efecto producido por la disminución de las profundidades, reduciendo su velocidad de propagación y, en general, adquiriendo mayor peralte.

- La refracción hace referencia al cambio de dirección que sufre el oleaje inducido por el fondo marino de forma que tiende a volverse paralelo a las batimétricas de la playa.

- La difracción se produce cuando el oleaje se encuentra con un objeto, tendiendo a girar radiando energía desde los extremos.

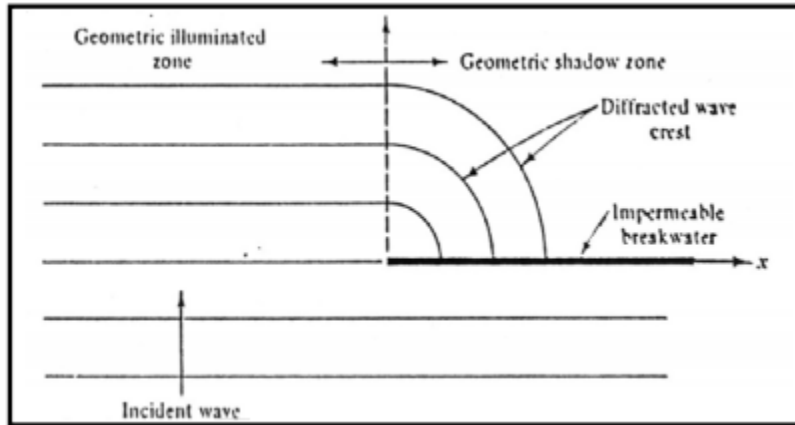


Fig. 2 Esquema de difracción en un dique semi-infinito. Fuente: Sañudo.

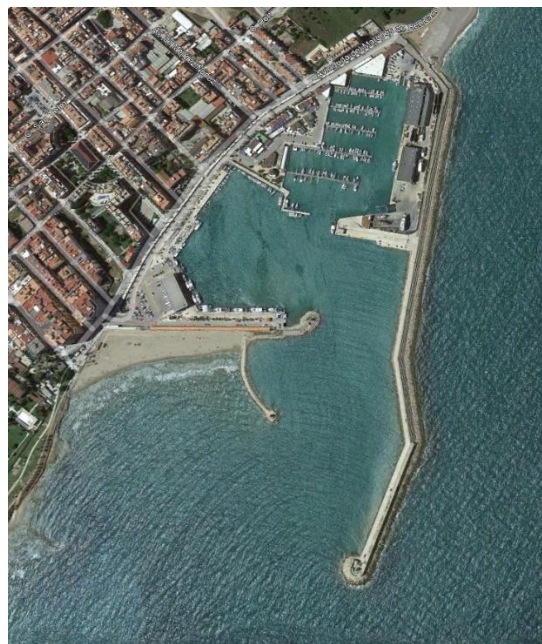


Fig. 3 Refracción en el puerto de Bemicalzó. Fuente: Google Maps

2.2.1.3 Rotura

En cuanto a la rotura del oleaje, existen dos fenómenos capaces de provocarlo:

- Rotura por decrestamiento: cuando se excede el peralte de la ola ($s=H/L$)
- Rotura por fondo: cuando se alcanza el límite de la profundidad relativa (H/h)

Donde; H es la altura de ola, h es la profundidad de agua y L la longitud de onda.

Es importante tener en cuenta la rotura del oleaje, puesto que es un proceso de disipación de energía.

Iribarren y Nogales (1950) definen uno de los parámetros a la hora de caracterizar el oleaje, el número de Iribarren, I_r^* , también conocido como *surf similarity parameter*.

$$I_r^* = \frac{m}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad (2.3)$$

Donde m es la pendiente del fondo, H la altura de ola y L_0 la longitud de onda, definida como:

$L_0 = gT^2 / 2\pi$, donde g es la aceleración de la gravedad y T el periodo del oleaje.

En función del número de Iribarren, se definen 4 tipos de oleaje:

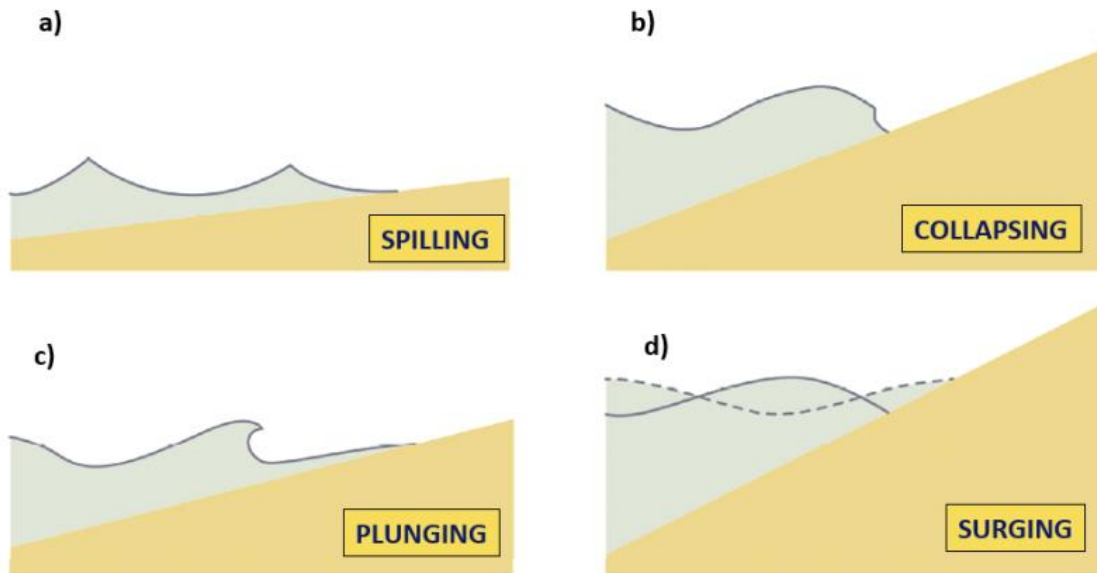


Fig. 4 Tipos de rotura del oleaje. Fuente: Argente-Garrido, 2019.

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

Fig. 5 Tipo de rotura en función del número de Iribarren. Fuente: Elaboración propia.

·Spilling: tipo de rotura que se produce con pendientes suaves y peralte alto. La cresta se vuelve inestable.

·Plunging: con mayores pendientes y peraltes medios. La cara frontal de la ola comienza a curvarse hasta que se precipita. Se caracteriza por una reducción drástica de la altura de ola, produciendo fenómenos de turbulencia y entradas de masas de aire.

·Surging: olas con un peralte relevante se propagan por pendientes muy pronunciadas. La cara frontal va ganando verticalidad, pero no llega a romper, sino que asciende y desciende por la pendiente, disipándose.

·Collapsing: se encuentra entre medias de la rotura plunging y la surging.

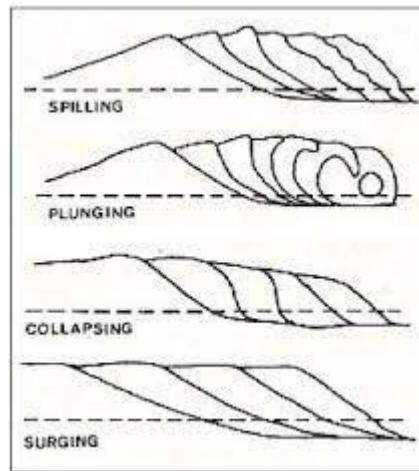


Fig. 6 Evolución del perfil de ola según el tipo de rotura. Fuente: Galvin 1968.

2.2.2 Diques exentos:

Existen diferentes tipos de estructuras de defensa de la línea de costa: espigones, diques longitudinales o los diques exentos. Además, con el fin de crear zonas de aguas abrigadas, se construyen diques en talud o diques verticales. Todo este tipo de actuaciones modifica el transporte sólido-litoral.

En el presente trabajo se van a desarrollar los diques exentos, los cuales además de proteger la línea de costa pueden concebirse como obras verdes, ya que en ciertas condiciones pueden servir como arrecifes artificiales y ser colonizados por corales.

2.2.2.1 Funcionalidad:

Los diques exentos pueden cumplir diversas funciones, donde destacan como principales:

- Reducir la energía incidente del oleaje, generando una zona a su trasdós más o menos abrigada.
- Evitar la regresión de la costa, ya que la altura de ola incidente se reduce y, por consiguiente, la erosión.
- Inducir la creación de un tómbolo o un hemitómbolo, generando una barrera al transporte sólido litoral. De esta forma, se pueden crear playas en zonas donde no las había tradicionalmente o proteger las actuales.
- Estabilizar las playas, evitando que los aportes artificiales sean transportados por la acción del oleaje hacia otros lugares, garantizando una anchura mínima entre las construcciones y el mar.

2.2.2.2 Tipología en función de la cota de coronación:

Los diques exentos se pueden clasificar en función de su altura de coronación en emergidos o sumergidos, según sea el francobordo positivo o negativo respectivamente. De la Peña y Sánchez (2008) proponen la siguiente clasificación de diques exentos en función de su cota de coronación:

- Diques exentos sumergidos: presentan un francobordo negativo, es decir, se encuentran siempre por debajo del nivel del mar. No producen impacto visual.
- Diques exentos bajos: presentan francobordos menores a 1.5 metros, suponiendo un impacto visual bajo permitiendo vislumbrar el horizonte desde la costa.
- Diques exentos medios: son los diques con francobordos comprendidos entre 1.5 metros y 1.5 metros más la altura de la berma.
- Diques exentos altos: se consideran a aquellos cuyo francobordo es superior a 1.5 metros más la altura de la berma.

Para la elección de un dique respecto de otro, es importante atender a una visión global. Los diques, cuanto menor francobordo, menor consumo de materiales necesitan y menos son los impactos que provocan en ellos el oleaje, ya que provocan la rotura del oleaje en vez de recibir el impacto directo. A su vez, influyen menos en la dinámica litoral y permiten la renovación del agua en el trasdós de la estructura. Sin embargo, cuanto menor francobordo mayor energía incide sobre la playa. Por tanto, la obra final es una solución de compromiso entre diferentes variables.

2.2.2.3 Tipología en función de su composición estructural:

Para realizar esta clasificación se atiende a los elementos utilizados para la construcción de los diques. Pese a que pueden ser de roca natural, generalmente son de piezas especiales de hormigón ya sea por la gran acción que han de soportar o por la dificultad de obtención, transporte y colocación de escollera natural del tamaño necesario.

Las piezas de hormigón se pueden clasificar en dos tipos:

- Las piezas masivas: el cubo, Cubípodo, etc, que resisten el oleaje generalmente gracias a su peso, con una alta resistencia. Sin embargo, presentan una baja estabilidad hidráulica.
- Las piezas especiales: además de por el peso, su geometría les confiere una gran trabazón entre ellas, aumentando la estabilidad hidráulica y reduciendo el remonte, permitiendo reducir los consumos de hormigón. El principal inconveniente de este tipo de piezas es su menor resistencia mecánica.

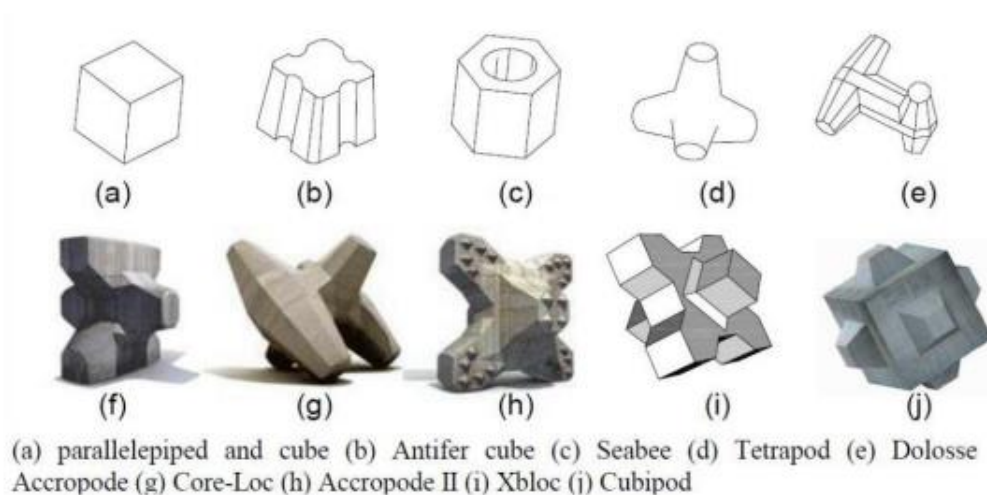


Fig. 7 Piezas de hormigón para la construcción de diques. Fuente: Dupray y Roberts (2010).

2.2.2.3.1 Diques multicapa o convencionales

Se trata, en esencia, de diques en talud construidos paralelos a la línea de costa. Cuentan pues, con un manto con una o dos capas de escollera o piezas especiales, filtro y núcleo (ambos de piedra natural). La presencia del núcleo los hace bastante poco porosos.

La capacidad de disipar, reflejar o transmitir el oleaje está muy ligada al francobordo relativo de la estructura.

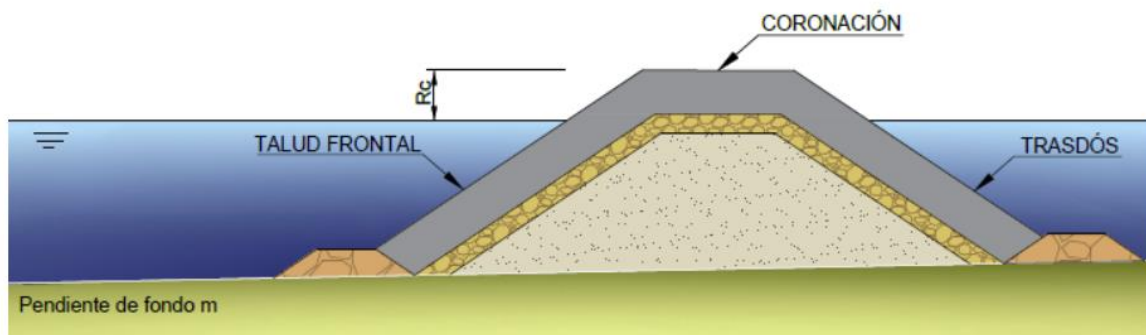


Fig. 8 Sección de un dique exento convencional. Fuente: Argente (2019).

2.2.2.3.2 Diques homogéneos

Los diques homogéneos están formados únicamente por piezas o escollera del manto. Presentan una gran porosidad y espacios heterogéneos que hacen que sirvan como reclamo para una gran cantidad de fauna. Además, constituyen una barrera parcial al transporte solido-litoral, facilitan la renovación del agua y presentan un fallo menos catastrófico que los convencionales, ya que en caso de que las piezas se desplacen se pueden volver a recolocar sencillamente.



Fig. 9 Dique homogéneo de escollera en El Monsau, Barcelona. Fuente: Google Maps.

2.2.2.4 Respuesta frente a un dique aislado:

·Respuesta nula o casi nula: se produce cuando la acumulación de sedimentos no sobrepasa los 4 metros desde la línea de costa previa a la actuación. No se producen casi alteraciones.

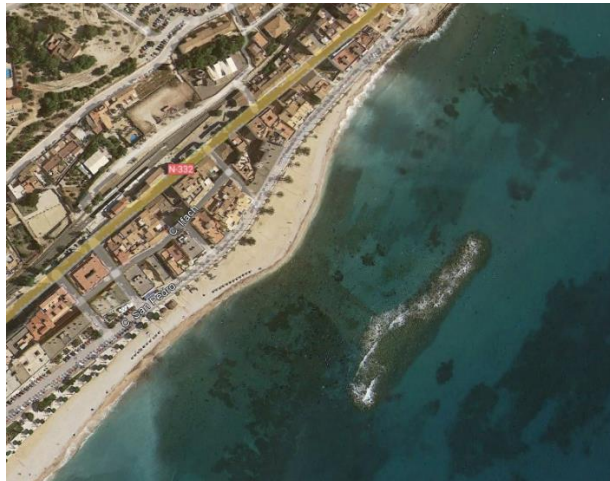


Fig. 10 Dique exento con nulo o casi nula interacción con la línea de costa en la costa almeriense. Fuente: Google Maps.

·Tómbolo: se forman por la acumulación de sedimentos en forma de flecha perpendiculares a la línea de costa. Para ser considerados tómbolos, la acumulación en el trasdós del dique debe alcanzar una longitud del 90% de la distancia entre el dique y la costa. El transporte de sedimentos queda completamente interrumpido.



Fig. 11 Tómbolo frente a la costa de Málaga. Fuente: Google Maps.

·Hemitómbolo o saliente: formación por acumulación de sedimentos comprendida entre los 4 metros y el 90% de la distancia entre el dique y la línea de costa. De esta forma, no queda completamente interrumpido el transporte longitudinal.

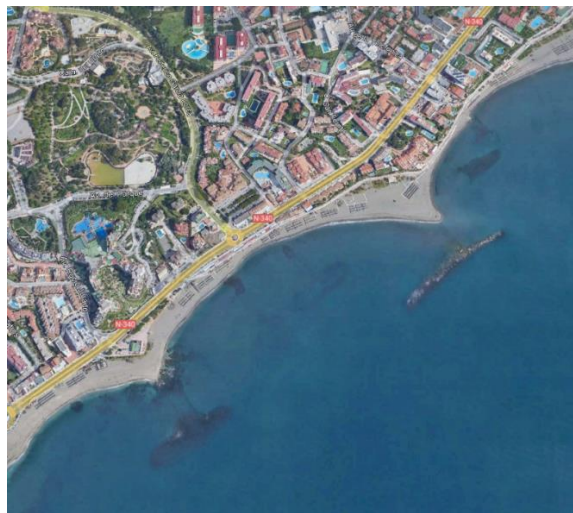


Fig. 12 Imagen de dos hemitómbolos frente a la costa de Málaga. Fuente: Google Maps.

Según Bricio et al. (2008), la respuesta que se produce al introducir un dique exento atiende a la relación entre el largo del dique exento (B) y la distancia hasta la línea de costa inicial (X):

-Tómbolo: $B/X \geq 1.3$

-Saliente o hemitómbolo: $1.3 > B/X > 0.5$

-Respuesta limitada: $0.5 \geq B/X$

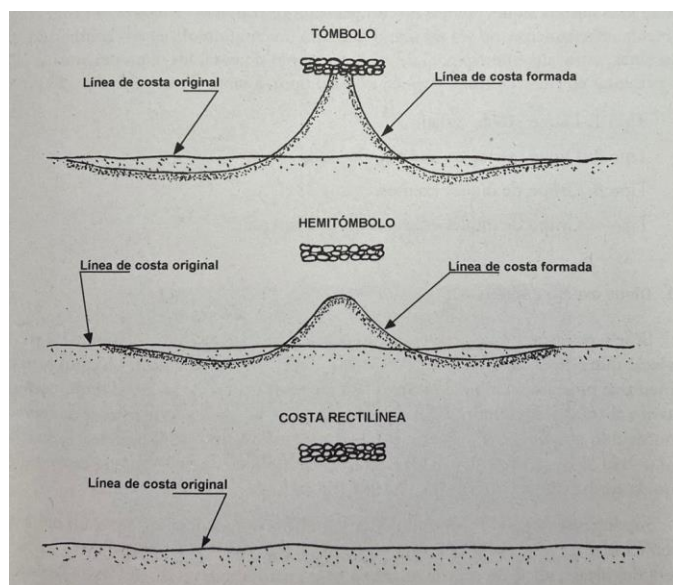


Fig. 13 Croquis de las posibles respuestas de la costa ante la construcción de un dique exento. Fuente: De la Peña (2008).

Cabe destacar que, según las investigaciones de (Ranashinghe y Turner, 2004), los cambios morfológicos producidos por diques exentos sumergidos no tendrían por qué ser siempre acumulativos (procesos descritos en este apartado), sino que podrían darse fenómenos de erosión en función de la distancia del dique exento a la orilla.

2.2.2.5 Respuesta frente a un sistema de diques:

En el caso de un sistema de diques exentos, el tipo de respuesta es mucho más variado. En función de las características de los diques y de la costa, la respuesta puede ser desde limitada a diferentes tómbolos continuos, pasando por la creación de un único saliente.

Cabe destacar que el tiempo necesario para que la costa alcance un equilibrio depende de la localización, jugando un factor clave el oleaje y la cantidad de sedimentos de la zona. Sin embargo, en 1982, Nir apuntó, basándose en una serie de observaciones sobre diques reales, que la mayoría de los tómbolos acumulan la mitad de su volumen en el período de uno a dos años, mientras que el equilibrio final se produce entre los 5 y 6 años. Por tanto, la acumulación de arena es mucho mayor en los primeros años que tras el paso de estos (Nir, 1982).

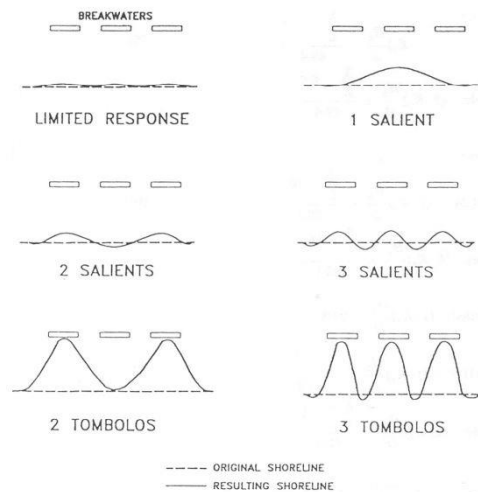


Fig. 14 Respuesta de la costa frente a una serie de diques aislados. Fuente: Rosati, 1992.

2.2.3 El Cubípodo

El Cubípodo es una pieza de hormigón prefabricado diseñado por Josep R. Medina y M. Esther Gómez-Martín en el LPC-UPV, de colocación aleatoria y porosidad uniforme, que permite la construcción de diques en talud en una o dos capas. Presenta una elevada estabilidad hidráulica, mayor que las piezas tradicionales, lo que la hace más resistente frente al oleaje y disminuye el rebase (ver Gómez-Martín, 2015).



Fig. 15 El Cubípodo. Fuente: Medina y Gómez-Martín (2016).

Los elementos de hormigón tradicionalmente utilizados, presentan una elevada resistencia estructural pero una baja estabilidad hidráulica. El Cubípodo surge como respuesta a la necesidad de encontrar un equilibrio entre ambos aspectos, incorporando protuberancias en todas las caras de un cubo, proporcionando un comportamiento flexible frente a la acción del oleaje manteniendo una resistencia estructural similar a la del cubo convencional.

Puede utilizarse en mantos bicapa o monocapa, como alternativa al cubo o paralelepípedo o a las piezas *bulky* tipo Acrópedo o Xbloc (Gómez Martín, 2015). Además, permite el desarrollo de HLCS como los estudiados en este trabajo.

2.2.3.1 Ventajas

·Impide el adoquinamiento del bloque cúbico convencional: impide el acoplamiento cara con cara propio de los cubos, aumentando tanto la aleatoriedad como la fricción entre capas.



Fig. 16 Adoquinamiento natural de los cubos frente a la aleatoriedad de los Cubípodos. Fuente: Corredor y Medina, 2011.

·Porosidad uniforme del manto: para resistir los temporales, es importante que la porosidad sea uniforme, ya que una porosidad variable crea zonas débiles donde es más probable el fallo del dique. Las caras lisas dificultan conseguir esa porosidad uniforme frente a las protuberancias de los Cubípodos, que lo facilitan.

·Gran robustez: presenta una gran robustez estructural individual debido a la poca esbeltez y a la forma troncopiramidal de las protuberancias. Destaca especialmente su resistencia en comparación con la de otras piezas como el Acrópedo, el Xbloc o el Core-loc.

·Gran estabilidad hidráulica y menor rebase: el coeficiente de estabilidad (K_d) es 4 veces superior al de un manto de cubos convencional. A su vez, las protuberancias dificultan el rebase.

·Facilidad de fabricación, manipulación, almacenamiento y colocación: la colocación es muy sencilla, pudiéndose hacer con pinzas de presión y con rendimientos de hasta 8 unidades/hora. La fabricación se puede hacer con encofrados tipo flanela, con grandes rendimientos, pudiendo ser apilados en varias alturas fácilmente por su carácter cúbico.



Fig. 17 Colocación de Cubípodos con pinzas de presión.

· Ahorro económico y de materiales: en conclusión, con los Cubípodos se pueden emplear piezas más pequeñas para resistir el mismo temporal, consiguiendo un ahorro en los materiales. Sumando los ahorros por la facilidad de construcción, colocación y acopio se pueden reducir los costes entre un 15% y un 40% y los consumos de hormigón entre un 35% y un 60% (Corredor y otros, 2008).

2.2.3.2 Fabricación, transporte, almacenamiento y colocación

La construcción de los Cubípodos se puede realizar con encofrados tipos flanela, patentados por SATO, de forma muy similar a como se realizan los cubos. Gracias a este tipo de encofrados y a su geometría, es posible alcanzar rendimientos de 3 Cubípodos*encofrado/día.

Generalmente, 24 horas después del vibrado de los bloques, los Cubípodos pueden ser transportados a las zonas de acopio donde, con la ayuda de pinzas de presión, serán apilados en diferentes alturas gracias a su forma cúbica. Anteriormente, se habrá homogeneizado el terreno con una capa de material granular dejando unos carriles libres donde se introducirán las protuberancias de la cara en contacto con el suelo. Por todo lo descrito, los rendimientos son ampliamente superiores a los de apilamiento de otro tipo de piezas especiales, más difíciles de transportar y con mayores tiempos de desencofrado.

El transporte y la colocación se harán con camiones góndola y grúas con pinzas de presión. Es importante tener en cuenta los diferentes rendimientos de cada máquina, con el objetivo de que ningún equipo se tenga que esperar. La colocación es relativamente rápida, pudiendo alcanzar rendimientos de 6-8 Cubípodos/grúa (Gómez-Martín y Medina, 2015).

2.2.3.3 Costes de construcción de los Cubípodos

Medina et al. (2010) presentan un método aproximado para el cálculo de los costes de construcción basado en las fórmulas de Molines (2009). Para el año 2008, eran los siguientes:

$$C_B \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = (205 + HOR) + 0.75 \left[10^5 \left(\frac{1}{l_n(V_B * W_B)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{l_n(V_B * W_B)} \right) \right] \quad (2.4)$$

$$C_c \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = (265 + HOR) + 1.00 \left[10^5 \left(\frac{1}{\ln(V_c * W_c)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(V_c * W_c)} \right) \right] \quad (2.5)$$

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

Comparando los costes entre los cubos y los Cubípodos, el ahorro económico puede ser del 20% al 60%. (Gómez-Martín y Medina, 2015).

2.3.4 Estructuras de baja cota de coronación (LCS)

Las estructuras de baja cota de coronación o Low-Crested Structures (LCS) son estructuras marítimas diseñadas con el fin de defender la costa de la acción del oleaje. Presentan cotas cercanas al nivel del mar, destacando por una gran transmisión y, como los diques exentos, pueden ser de diferentes materiales y tener diferentes francobordos.

La gran mayoría de las estructuras construidas de este tipo son derivaciones de diques en talud donde se ha reducido la altura, con secciones transversales trapezoidales, con taludes entre 1:1,33 y 1:2 y, mayoritariamente, con una berma en el pie que le aporta estabilidad.

2.3.4.1 Clasificación de los diques de baja cota de coronación en función de la estabilidad

Van der Meer et al (1994) describe tres tipos de diques exentos en función del francobordo adimensional:

- Tipo arrecife dinámicamente estables: se trata de diques homogéneos de baja cota de coronación sin filtro. Inicialmente la coronación se encuentra por encima del nivel de agua. Fueron descritos por primera vez por Ahrens (1987). Este tipo de estructuras, debido al carácter heterogéneo de la escollera que las forman, alcanzan una posición de equilibrio cuando sufren la acción de un temporal. Son similares a los diques berma, pero diferentes de los diques exentos tradicionales (estáticamente estables).

Su principal ventaja es que el fallo no es catastrófico. Al no tener núcleo, el dique se va adaptando al temporal (por ello se denominan dinámicamente estables). Su principal inconveniente es la movilidad de las piedras durante la fase de servicio, transporte, etc

Según Fulford (1985), constituyen una forma efectiva y económica de estabilizar las playas o proteger de la erosión al litoral. Además, por su elevada porosidad son muy estables frente al oleaje pese a disipar gran parte de la energía.

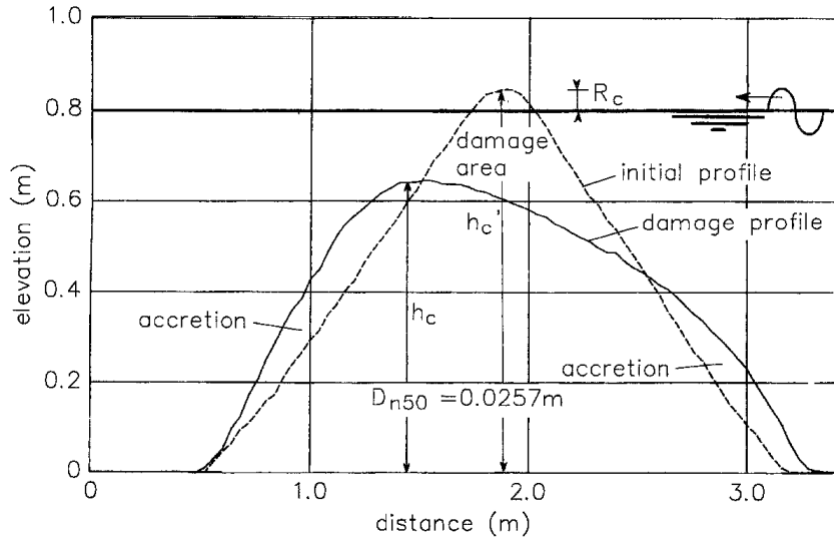


Fig. 18 Ejemplo de diques exentos tipo arrecife. Fuente: Van der Meer (1994).

·Estáticamente estables de baja cota de coronación: pueden sobresalir o no, pero una gran parte de la energía pasa a través de él. Son diques en talud convencionales donde las piezas permanecen estables ante los temporales.

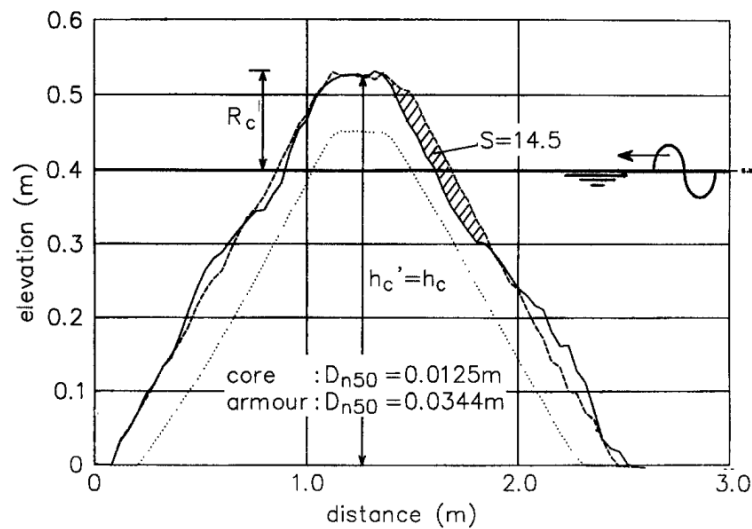


Fig. 19 Estáticamente estables de baja cota de coronación. Fuente: Van der Meer (1994)

·Diques sumergidos estáticamente estables: la transmisión es muy significativa en este tipo de estructuras, ya que por su francobordo negativo todas las olas rebasan la estructura. Cuanto más negativo sea el francobordo, mayor estabilidad presenta pero menos energía disipa.

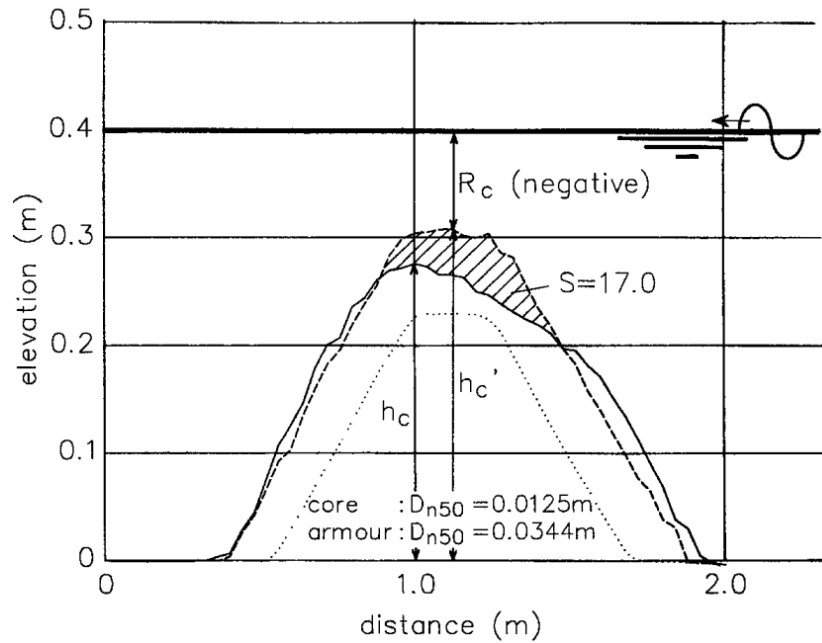


Fig. 20 Estáticamente estables sumergidos. Fuente: Van der Meer (1994).

2.3.4.2 Transmisión del oleaje:

En este apartado se relatarán los parámetros fundamentales que describen la transmisión del oleaje, así como los estudios y fórmulas que han sido expuestos en la literatura científica para describirla.

2.3.4.2.1 Parámetros fundamentales

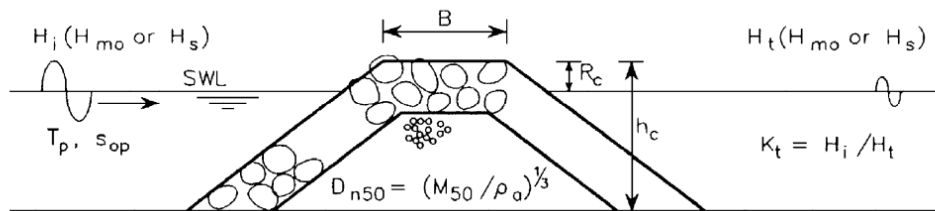


Fig. 21 Parámetros fundamentales para definir la transmisión. Fuente: Van der Meer, 2005.

Antes de definir los diferentes estudios y formulaciones sobre la transmisión del oleaje en diques exentos, cabe destacar aquellos parámetros que influyen en él: la altura de ola incidente (H_i); el francobordo adimensional (R_c) es decir, la diferencia de cota entre la coronación y el nivel de la lámina de agua; la anchura en coronación (B); el diámetro nominal de las piezas (D_{50}); el número de Iribarren (I_r) y la pendiente del fondo. En caso de que fuera un factor reseñable, habría que tener en cuenta la porosidad, como lo es en los diques homogéneos.

2.3.4.2.2 Estado del arte:

Seeling (1980) describe un modelo para la transmisión basándose en una gran serie de test de oleaje regular. Sin embargo, se observa un buen comportamiento con oleaje irregular. Utilizó los datos de

largas olas regulares de Madsen y White (1976) para describir la transmisión centrándose en la utilidad para el diseño.

Daemrich and Khale (1985) estudian la transmisión en estructuras de tetrápodos con la coronación bajo al nivel medio de la lámina de agua.

Takayama et al. (1985) realizaron ensayos irregulares con Tetrápodos, proponiendo la siguiente formulación:

$$K_t = -0.92 \left(\frac{B}{L_o} \right) + 0.42 \left(\frac{R_c}{H_o} \right) + 3.80 \left(\frac{H'_o}{L_o} \right) + 0.51 \quad (2.6)$$

Van der Meer (1990) trató de analizar la información existente partiendo de la base de que el francobordo adimensional era el parámetro clave para el estudio de la transmisión.

$$\begin{aligned} \text{Para } -2.0 < \frac{R_c}{H_{SI}} < -1.13 & \quad K_t = 0.8 \\ \text{Para } -1.13 < \frac{R_c}{H_{SI}} < 1.2 & \quad K_t = 0.46 - 0.3 \left(\frac{R_c}{H_{SI}} \right) \\ \text{Para } 1.2 < \frac{R_c}{H_{SI}} < 2.0 & \quad K_t = 0.1 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Van der Meer et al. (1994), tras el estudio de los datos existentes hasta la fecha, afirma que el parámetro principal para el estudio de la transmisión en diques de baja cota es el francobordo adimensional (R_c/H_i). Analizó los datos de Powell y Allsop (1985), quienes habían tomado como parámetro principal R_p^* , similar a R_c/H_i . Sin embargo, de esta forma no se tenía en cuenta el período pico sino el medio, obteniendo más error. Además, según los datos de Ahrens (1987), las olas aparentemente cortas tenían un alto coeficiente de transmisión. Combinando todos los test que habían hasta la fecha, propuso las siguiente formulas:

$$K_1 = a \cdot \left(\frac{R_c}{D_{50}} \right) + b \quad (2.8)$$

$$a = 0.031 \cdot \left(\frac{H_{si}}{D_{50}} \right) - 0.24$$

$$b = -5.42 \cdot S_{op} + 0.0323 \cdot \frac{H_{si}}{D_{50}} - 0.0017 \cdot \left(\frac{B}{D_{50}} \right)^{1.84} + 0.51$$

Quedando limitada superiormente a $K_t=0.75$ e inferiormente a $K_t=0.075$.

Posteriormente, analizó los estudios que tomaban como parámetros principales R_c , S_{0p} y $Dn50$. De los datos de Daemen (1991), obtuvo una relación directa entre la altura de ola y el tamaño de los elementos del manto principal, concluyendo que el diámetro nominal podía caracterizar el tipo de estructura, es decir, el oleaje que era capaz de resistir. Con estos ensayos y los realizados por él mismo (1990 b), obtuvo que a mayor periodo mayor transmisión se producía.

El resultado final del análisis fue una relación lineal entre el coeficiente de transmisión y la altura de ola relativa $R_c/Dn50$. Además, destacó que la porosidad del núcleo no presentaba una gran influencia en la transmisión.

Angremond et al. (1996) realizó un análisis similar a Van deer Meer (1994) con el fin de obtener una fórmula más ajustada. Siguiendo el método de este, pero incluyendo la altura de la ola, la longitud de la ola y el número de Iribarren. Para ello realizaron nuevos ensayos y volvieron a analizar la base de datos existentes sin considerar $s_{0p} > 0.06$, $H_{si}/h > 0.54$ y solo los francobordos adimensionales (R_c/H_{si}) dentro del rango (-2.5;2.5). Tras un ajuste, obtuvo:

$$K_t = -0.4 \frac{R_c}{H_{si}} + \left(\frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.31} * (1 - e^{-0.5 \epsilon}) * 0.64 \quad (2.9)$$

Quedando limitada superiormente a $K_t=0.75$ e inferiormente a $K_t=0.075$.

Posteriormente, Seabrook et al. (1998) realizaron el ensayo de diques exentos sumergidos con dos capas en el manto. Definieron el coeficiente de transmisión en función de francobordo adimensional, usando 800 test de oleaje irregular pero solo de diques sumergidos, presentando una alta fiabilidad en diques muy anchos.

$$K_t = 1 - \left(e^{-0.65 \left(\frac{d_s}{H_i} \right) - 1.09 \left(\frac{H_i}{B} \right)} + 0.047 \left(\frac{B d_s}{L D_{50a}} \right) - 0.067 \left(\frac{d_s H_i}{L D_{50a}} \right) \right) \quad (2.10)$$

Esta ecuación presenta buenos resultados dentro de los siguientes rangos

$$0 \leq \frac{BRc}{LDn50} \leq 7.08 ; 0 \leq \frac{RcHi}{BDn50} \leq 2.14$$

Gironella et al. (2002) realizaron numerosos ensayos enmarcados en el proyecto DELOS, financiado por la Unión Europea, para medir la estabilidad y el desempeño hidráulico de este tipo de estructuras.

Hirose (2002) explica la variación de la transmisión en diques sumergidos de piezas especiales (*Aquareef*), según el ancho de la coronación del dique y la longitud de la ola y la relación entre la profundidad al pie del dique y la altura de ola incidente.

Melito (2002) estudió los diques exentos de baja cota de coronación con núcleos de *coreloc* en un amplio rango de francobordos adimensionales.

Calabrese (2002) analizó el error de la formulación existente. Cuando obtuvo que la que menor error tenía era la de Angremond (1996) reajustó los coeficientes de los parámetros de la ecuación para obtener una más precisa.

Van der Meer y Daemen (2005) realizan una revisión de la literatura existente hasta la fecha. Tras realizar un profundo análisis de la formulación de Van der Meer y Daemen (1994) y Angremond (1996) observan que la eficacia de la segunda se reduce considerablemente para valores elevados del ancho de coronación. Por ello, limitan el rango de utilización a $B/H_i > 8$. Además, proponen una nueva actualización de la fórmula para valores de $B/H_i > 12$:

$$K_t = -0.35 \frac{R_c}{H_{si}} + \left(\frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.65} * (1 - e^{-0.41 \varepsilon}) * 0.51 \quad (2.11)$$

El valor límite superior queda definido por

$$K_{tu} = -0.006 * \frac{B}{H_i} + 0.93$$

El límite inferior es $K_{tl} = 0.05$.

De esta forma: para valores de $B/H_i < 8$, la ecuación óptima es 2.9; para valores $B/H_i > 12$, Eq. 6; y para valores $8 < B/H_i < 12$, se realiza una interpolación lineal.

Jeong et al. (2021), estudia la transmisión de diques sumergidos de Tetrápodos (TTP) muy porosos en Corea del Sur. Este tipo de estructuras en esta zona concreta, suele presentar las características de bajos francobordos y coronaciones anchas. Debido a estas marcadas características la formulación occidental no obtenía buenos resultados, desarrollando su propia formulación:

$$K_t = \frac{0.78 R_c \operatorname{erf} \left(\frac{H_i}{R_c} \right)}{H_i} \quad (2.12)$$

Donde 0.78 representa el parámetro de rotura.

2.3.4.3 Estabilidad

Bruun (1979) definió los once modos de fallos que podían sufrir los diques de baja cota de coronación. Se describen a continuación:

1. Extracción de piezas del manto principal durante el ascenso del oleaje por 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 desplazamiento 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 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 el levantamiento en el espaldón.
8. Socavación o erosión de 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.

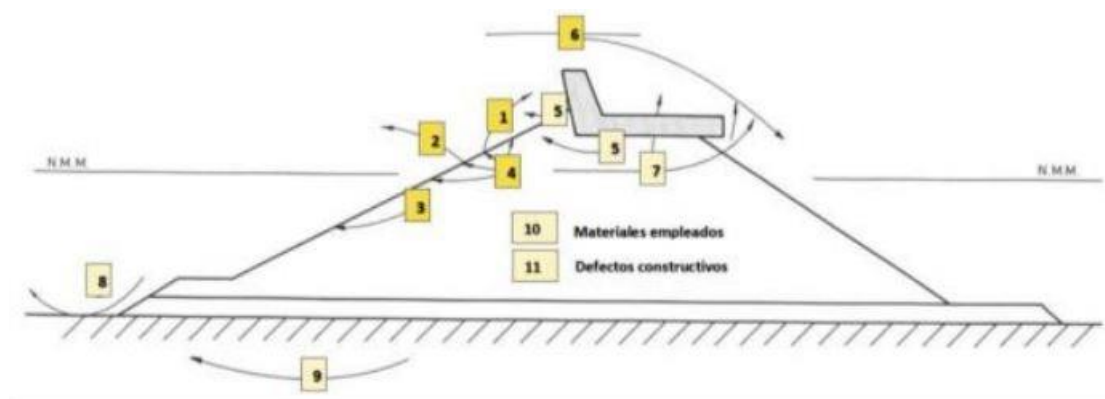


Fig. 22 Modos de fallo de un dique en talud. Fuente: Ciria, 2007.

Para finalizar, cabe destacar que este tipo de estructuras raramente presentan espaldón. Por tanto, estos modos de fallo no suelen ser significativos. A su vez, Gómez-Martín y Medina (2014) definen un nuevo modo de fallo en diques formados por cubos de hormigón prefabricado: la compactación heterogénea.

La compactación heterogénea se describe como la compactación de los elementos del manto por la dificultad de su colocación aleatoria. Pese a que se produce siempre, en todos los diques, es mucho más significativa en diques de cubos convencionales o bloques paralelepípedos (Gómez-Martín, 2014).

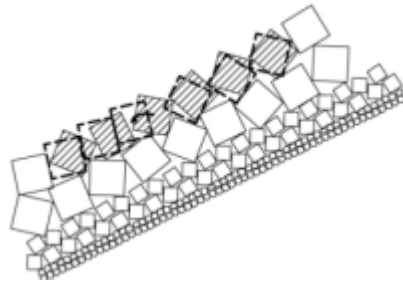


Fig. 23 Compactación heterogénea en un dique. Fuente: Gómez-Martín, 2014.

2.2.5 HLCS de Cubípodos:

2.2.5.1 Introducción:

Las estructuras homogéneas de baja cota de coronación son estructuras diseñadas para proteger a la costa de la erosión. Presentan una elevada porosidad al prescindir del núcleo impermeable y suelen localizarse cerca de la línea de costa, a profundidades no muy elevadas.

La principal característica es que están compuestas por solo elementos del manto, sin núcleo ni capas de filtro. Esto les confiere una gran porosidad, asemejándolos a los arrecifes.

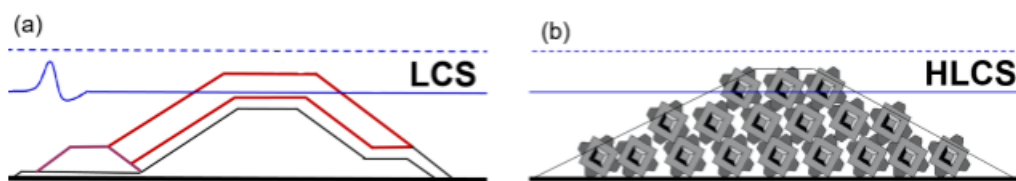


Fig. 24 Comparación entre diques de baja cota tradicionales y diques de baja cota homogéneos de Cubípodos. Fuente: Medina, 2019.

2.2.5.2 Revisión histórica:

El cambio climático está sometiendo a presiones extra a los ecosistemas costeros y no hay evidencia de que vaya a reducirse en el futuro, sino todo lo contrario. El aumento del nivel del mar junto con mayores temporales aumenta significativamente el riesgo de inundaciones en las zonas costeras (Lowe et al., 2011). A su vez, la generación de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂, se traduce en una acidificación de las aguas y una mayor dificultad para que los corales precipiten (Ferrairo et al., 2014). La desaparición de los corales deja las playas caribeñas sin su protección natural, a merced de la acción erosiva del oleaje (Silva et al., 2016).

A esto hay que sumar que, en la mayoría de países caribeños, el turismo supone una actividad económica esencial (Zappino, 2005), pero la enorme llegada de turistas no hace sino incrementar las presiones sobre unos ecosistemas cada vez más degradados.

De esta forma, los ingenieros de costas, en una búsqueda por solucionar los problemas, propusieron las estructuras de baja cota de coronación como una solución viable tanto técnica como económico y ambientalmente (Bucharth et al., 2015). (Airoidi et al., 2005) señala que el impacto que pueden producir este tipo de estructuras depende de la climatología y la distancia a los corales naturales, siendo necesario un estudio profundo para determinar si los impactos serán positivos o negativos.

Oderiz et al., (2018) proponen como solución HLCS, estudiando tanto la transmisión, reflexión y disipación como la variación del espectro y la estabilidad hidráulica, proponiendo una malla diferente a la descrita por Pardo et al. 2015 y Medina et al. 2016, donde cada Cubípodo se apoya en tres inferiores, uno en la cara que recibe el oleaje y dos en la que no. Estudiando diferentes configuraciones (1, 3 y 5 capas) en oleaje irregular, obtuvieron que la transmisión de la energía es uno de los parámetros fundamentales de este tipo de estructuras, que la reflexión decrece si la altura de coronación lo hace y que, cuando está emergido, presenta un claro carácter disipador. Además, en sus ensayos, no había grandes variaciones en el período pico del oleaje incidente, reflejado y transmitido, y el fenómeno de la transmisión quedaba definido por las olas largas, tanto en diques emergidos como sumergidos.

Medina et al. (2019) diseñan un HLCS capaz de resistir las condiciones del clima marítimo y estudian la transmisión, disipación y reflexión de un modelo a escala 2-D. Estudiando los datos de Oderiz (2018), aplicaron la formulación de Angremond (1996), obteniendo valores de K_t superiores, lo que resultaba predecible al no tener el núcleo impermeable que si presentaban los LCS. Por ello, desarrollaron una formulación sencilla para cada una de las estructuras desarrolladas en las que la única variable era el francobordo adimensional.

Keyse y Jacobs (2020) hacen una recopilación de la literatura relacionada con las estructuras de baja cota de coronación y sumergidas, y estudian las mallas de colocación rectangulares y triangulares. Además, realizan ensayos de colocación sobre fondos planos, proponiendo una metodología para estimar el espesor de capa y la altura global de la estructura.

Centi (2020) utiliza un motor de físicas de videojuegos para realizar simulaciones de la construcción de este tipo de estructuras, entendiendo el comportamiento de los bloques al ser posicionados, así como de la influencia de la altura y de los espesores de cada capa.

Medina (2020) explica la influencia de la malla de colocación en la porosidad y la altura de la estructura: cuanto más espaciada sea la malla, menor porosidad y altura de ola transmitida.

Molines et al. (2021), usando la metodología propuesta por Keyser y Jacobs (2020) y los resultados de Centi (2020), obtiene los coeficientes de capa y la influencia en la porosidad y la altura global de la estructura.

Lozano (2021) analiza 101 ensayos con redes neuronales con el fin de obtener una nueva formulación para estimar el coeficiente de transmisión. Propone usar como variables el peralte y la tangente hiperbólica del francobordo adimensional.

2.2.5.3 Funcionalidad:

Las funciones son muy similares a las de los diques exentos tradicionales. Sin embargo, presenta una serie de ventajas que los hacen, en líneas generales, una mejor opción. Serán expuestas en el siguiente apartado. A su vez, hay que destacar que permiten la recuperación pasiva de zonas coralinas degradadas, pudiéndose convertir en zonas de gran atracción turística.

2.2.5.4 Ventajas e inconvenientes:

-Ventajas:

·Fácil desmantelamiento: puesto que la estructura está compuesta por Cubípodos, retirar o recolocar las piezas que sean necesarias es sencillo y rápido, pudiendo operar con pinzas de presión obteniendo grandes rendimientos y precisiones.

·Retención de sedimentos: los aportes artificiales de arena son muy comunes en zonas turísticas o degradadas. Sin embargo, si no se cuenta con ningún tipo de medida que evite la erosión sobre la playa, la arena, tarde o temprano, acabará siendo transportada. En este sentido, los diques exentos cobran una doble función ya que limitan la altura de ola incidente reduciendo la capacidad de transporte del oleaje y además constituyen una barrera parcial al transporte.

·No forma una barrera completa al transporte sólido-litoral: pese a que si interrumpen el transporte de sedimentos, su funcionamiento difiere totalmente con un espigón transversal (tradicionalmente usado con fines similares), siendo mucho menos agresivo con el medio. La colocación de diques transversales, soluciona el problema de forma parcial y localizada, tendiendo a la colocación paralela de los mismos en lo que se conoce como playa “en raspa de sardina”.

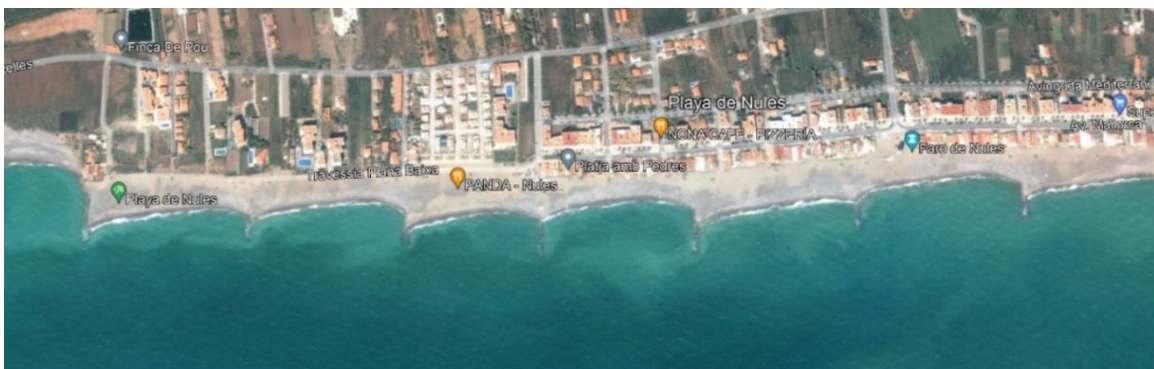




Fig. 25 Comparativa de la playa de Chiblehes de los años 2002 y 2022 donde se puede ver como la línea de costa ha retrocedido en un ejemplo de protección de costa “en raspa de sardina”. Produciéndose erosión en la zona más próxima al dique aguas abajo; y sedimentación, aguas arriba. Fuente: Google Earth.



Fig. 26 Comparación de la playa de Benalmádena entre los años 2005 y 2022, donde se puede observar como con diques exentos se ha conseguido mantener la playa estable en su conjunto sin interrumpir totalmente el transporte sólido-litoral. Fuente: Google Earth.

·Fallo dúctil: en cuanto a la rotura de este tipo de estructuras se puede decir que presenta un comportamiento “dúctil” debido a la ausencia de núcleo y a que “el salto” de diferentes piezas no provoca un fallo global del dique, sino que, una vez finalizado el temporal, las piezas pueden volver a recogerse y colocarse. Además, salvo que se hayan perdido una cantidad significativa de piezas, el dique seguirá manteniendo mayoritariamente su funcionalidad.

·Fácil reparación: la sencillez de mover las piezas de forma sencilla con unas pinzas de presión hace que las reparaciones sean fáciles y poco costosas.

·Escaso mantenimiento: gracias al carácter homogéneo, el mantenimiento se centra en una revisión de la posición de las piezas y de la altura que mantiene el dique, ya que puede asentarse. Ambas cuestiones ligadas directamente con el francobordo.

·No es necesario escolleras de gran tamaño: en la mayoría de lugares del mundo, conseguir escollera del tamaño necesario cuyos gastos de transporte no hagan inasumible las obras supone grandes complicaciones sino impedimentos. Los Cubípodos suponen una solución óptima, pues se pueden construir cerca de la obra con el tamaño deseado de forma rápida, sencilla y económica.

·Estructura porosa con zonas con diferente cantidad de luz solar: esto las convierte en grandes atracciones para una gran cantidad de especies marinas que a su vez se puede convertir en grandes atracciones turísticas para el buceo.

·Adecuados para la colonización de corales: este tipo de estructuras, construidas en la localización adecuada permite la colonización de corales como si de un arrecife se tratara (ver Silva et al., 2016).

·Bajo impacto ambiental: además, por lo descrito en los dos puntos anteriores, incluso se podría calificar de obra verde.

·No supone un obstáculo visual: gracias al pequeño o incluso negativo francobordo, constituyen un tipo de obras ideales para poder seguir disfrutando de las vistas hacia el horizonte.

·Estructuras estáticamente estables: la posición de equilibrio frente a los temporales es la inicial. La acción del oleaje provoca el “salto” de las piezas y no una posición de equilibrio diferente a la inicial.

-Inconvenientes:

·Consumo de hormigón: pese a que consumen menos que las formadas por otros tipos de piezas prefabricadas, generan una huella de carbono mucho mayor que los diques exentos de escollera.

·Escaso control de las especies colonizadoras: podrían convertirse en el hábitat ideal de especies colonizadoras que acabarían con la fauna autóctona, convirtiéndose en un drama medioambiental.

2.2.5.5 Mallas de colocación y coeficientes de capa

Medina y Gómez-Martín (2016) recomendaban una malla de colocación en diamante para mantos de Cubípodos en diques en talud. Sin embargo, Medina et al. (2019) debido a la diferencia que suponía la colocación de Cubípodos en horizontal en vez de en talud, estudia diferentes mallas triangulares y rectangulares en el LPC-UPV. Los mejores resultados fueron obtenidos con una malla donde: la primera capa se posicionaba siguiendo la malla tipo diamante de Medina y Gómez-Martín (2016) y las

siguientes lo hacían apoyando cada pieza en una por la parte donde se recibe el oleaje y en dos en la zona más cercana a la costa. En la figura 27, se pueden observar las características geométricas de una disposición factible de HLCS: la distancia entre filas está referida al diámetro nominal o del cubo equivalente, $Dn50$.

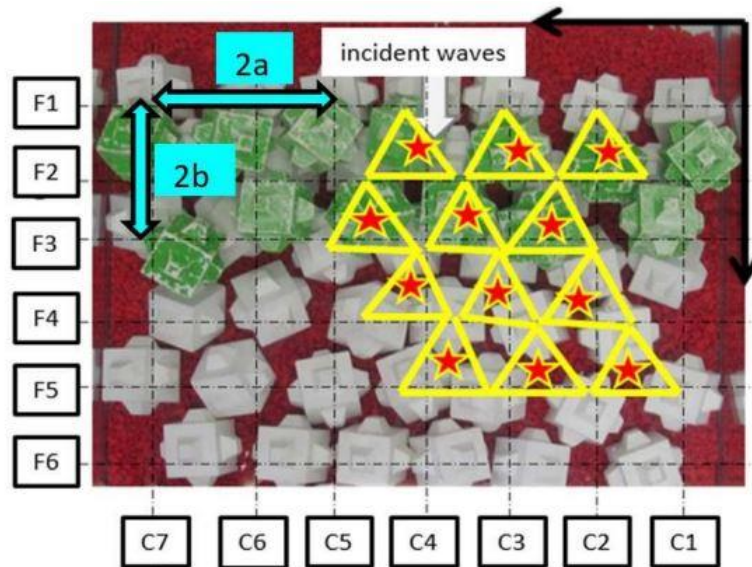


Fig. 27 Disposición de los Cubípodos en un dique homogéneo según Medina et al. 2020. Fuente: Medina, 2020.

Line	Distance	Minimum distance	Maximum distance	Mean distance
C	$a/Dn50$	1.31	1.84	1.58
F	$b/Dn50$	0.79	1.58	1.27

Fig. 28 Características geométricas de una disposición factible para un HLCS de Cubípodos. Fuente: Medina, 2020.

La malla de colocación define no solo el francobordo (Fig. 29), también el número de piezas que se utilizarán. De esta manera, la malla de colocación juega un papel fundamental en la economía de la obra.

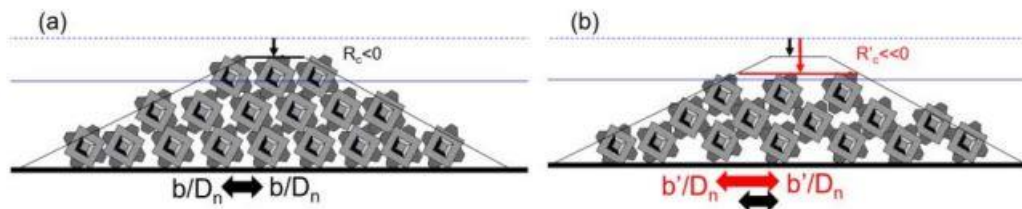


Fig. 29 Influencia de la malla de colocación en la altura del dique. Fuente: Medina, 2020.

A su vez, resulta imprescindible definir un criterio para estimar el coeficiente de capa. El coeficiente de capa se define como la relación del Dn con la altura que presenta dicha capa. Pese a que la primera capa es sencilla de medir analíticamente, el problema se complica con las capas superiores. Resulta imprescindible conocer esta variable pues permite saber el francobordo de la estructura.

El coeficiente de capa está directamente ligado con la malla de colocación. Cuanta más porosidad, y por tanto mayor separación entre piezas (b/D_n), el coeficiente de capa se reduce.

Medina et al. (2020), realizaron una serie de ensayos en un taludómetro con el fin de medir los coeficientes de capa. Siguiendo la metodología descrita por Keyser y Jacobs (2020) con la pendiente de fondo y la malla de colocación de Medina 2020, obtuvieron los siguientes resultados:

Capa	Coficiente	Varianza (%)
1	1.30	0.7
2	1.07	1.1
3	0.98	1.9
4	0.97	2.1
5	0.99	2.1

Fig. 30 Valores de los coeficientes de capa. Fuente: Medina, 2020.

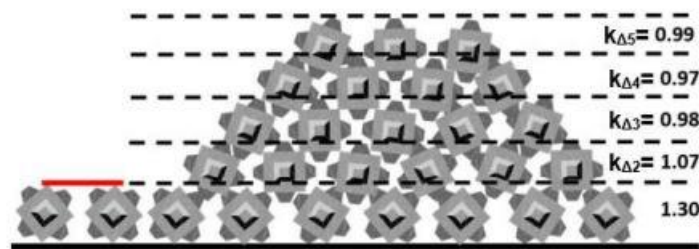


Fig. 31 Representación de los coeficientes de capa en un dique y sus valores con una malla de colocación de $b/D_n=1.27$ y $a/D_n=1.58$. Fuente: Medina, 2020.

Centi (2020) utilizó un motor gráfico para simular la medida de los coeficientes de capa. Utilizando el sistema descrito por Keyser y Jacobs (2020), lo implementó al motor para que se desarrollara de forma virtual utilizando métodos numéricos.

Capa	Coficiente	Varianza (%)
1	1.31	0.0
2	1.13	0.5
3	1	1.0
4	1.02	2.0
5	0.99	1.2

Fig. 32 Resultados obtenidos por Centi (2020). Fuente: Medina, 2020.

Se observa que los resultados son muy similares, con una menor varianza en los resultados obtenidos con métodos numéricos que en los ejecutados en el laboratorio. De esta forma resulta sencillo saber la altura que presentará cada estructura con tan solo saber el D_n y el número de capas.

Sin embargo, cabe destacar que en los ensayos realizados en el marco de este TFG se ha utilizado una malla triangular equilátera. Muy similar a la de Medina 20XX, pero más fácil de representar, definida por los parámetros $a/D_n=1.32$ y $b/D_n=1.52$.

2.2.5.6 Porosidad

La porosidad describe la proporción de huecos existentes en el sistema estructural. Como se ha comentado anteriormente, juega un papel fundamental en la transmisión puesto que, a mayor porcentaje de huecos, mayor será la transmisión.

En estructuras formadas con elementos aleatoriamente colocados, su medida resulta compleja. Por ello, la mayoría de manuales recomiendan porosidades relacionadas con la densidad de colocación. Como la propuesta por SPM (1984):

$$\varphi = n(k_{\Delta})(1 - P\%) \left(\frac{\gamma_r}{W}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.13)$$

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. La porosidad nominal está descrita en el apartado 3.4.2.

2.2.5.7 Transmisión del oleaje:

El factor más importante para conseguir proteger las playas es limitar el oleaje incidente en ellas, esto es: la transmisión. D'Angremond et al. 1996 relacionó el coeficiente de transmisión con el número de Iribarren, la anchura en coronación adimensional y el francobordo adimensional, de acuerdo a la ecuación 2.9.

El primero en estudiar la transmisión en este tipo de estructuras fue Medina (2020). Usando los datos de los ensayos de Odériz et al. (2018) y la formulación de d'Angremond et al. (1996), obtuvieron valores del coeficiente de transmisión mucho menores a los obtenidos en el laboratorio. Esto, resultó lógico en los autores, pues estas estructuras eran mucho más porosas. Con el fin de ser más precisos, obtuvieron fórmulas sencillas donde la única variable era el francobordo adimensional. Debido a la escasez de ensayos optaron por realizar fórmulas diferentes para cada estructura según su número de capas

$$K_t(1 \text{ capa}) = 0.45 - 0.30 \left(\frac{R_c}{H_{si}}\right) \quad (2.14)$$

$$K_t(3 \text{ capas}) = 0.60 - 0.35 \left(\frac{R_c}{H_{si}}\right) \quad (2.15)$$

$$K_t(5 \text{ capas}) = \left[0.54 ; 0.54 - 0.40 \left(\frac{R_c}{H_{s,i}} \right) \right] \quad (2.16)$$

Los rangos de aplicación válidos son diferentes para cada una de ellas: $-1.47 \leq R_c/H_{s,i} \leq 0.00$, para 1 capa; $-0.43 \leq R_c/H_{s,i} \leq 0.63$, para las estructuras de 3 capas; y $0.36 \leq R_c/H_{s,i} \leq 0.89$, para 5 capas.

Adicionalmente, estudiaron la reflexión y disipación que se producía en este tipo de estructuras. La ecuación 2.17 describe la energía disipada, en función de K_t (coeficiente de transmisión) y K_r (coeficiente de reflexión).

$$K_d^2 = 1 - K_t^2 - K_r^2 \quad (2.17)$$

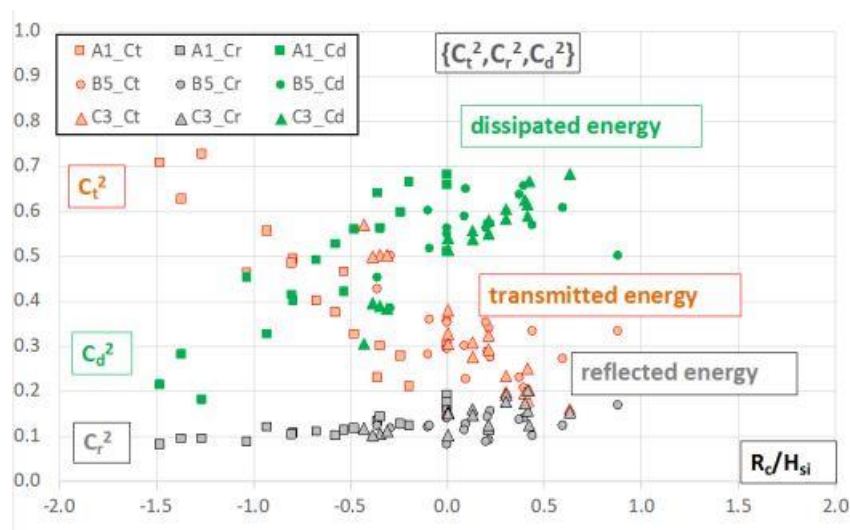


Fig. 33 Evolución de los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación en función del francobordo adimensional. Fuente: Medina, 2020.

Como se puede observar en la imagen anterior, la energía reflejada y disipada aumenta con el francobordo adimensional. Por tanto, la energía transmitida desciende. De esta forma, se demostraba que el francobordo adimensional es el principal parámetro para el estudio de estas estructuras.

Lozano (2021), tras estudiar el estado del arte y realizar un número limitado de ensayos en el LPC-UPV, propuso una nueva formulación para estimar el coeficiente de transmisión debido a los débiles resultados que obtuvo con formulaciones anteriores.

$$K_t = a * S_{Op} + b * \tanh\left(\frac{R_c}{H_{m0,i}}\right) + c \quad (2.19)$$

Para obtener la expresión anterior, utilizó redes neuronales. Estas, hay que calibrarlas con la información disponible de los ensayos realizados. En su caso, $a = -5$, $b = -0,3$ y $c = 0,7$, obteniendo finalmente:

$$K_t = -5 * S_{Op} + -0.3 * \tanh\left(\frac{R_c}{H_{m0,i}}\right) + 0.7$$

Capítulo 3: Metodología experimental

3. Metodología experimental

3.1 Introducción:

Para el estudio de la transmisión en este tipo de estructuras, se han realizado ensayos en el canal del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia (LPC-UPV).

En este capítulo se describe la metodología seguida en los ensayos.

En primer lugar, se describirán tanto el canal de ensayos como los elementos presentes en él, para la generación de oleaje y para la toma de datos. Además, se describen los modelos físicos ensayados, y la nomenclatura y características principales de cada tipo de ensayo.

Para finalizar, se explica el procesado de la información, así como las herramientas informáticas utilizadas en este proceso.



Fig. 34 Imagen de canal del LPC-UPV donde se han llevado a cabo los ensayos. Fuente: elaboración propia.

3.2 Descripción de instalaciones y equipos

3.2.1 Descripción del canal de oleaje

Los ensayos se han llevado a cabo con una única configuración del canal del LPC-UPV (30.0m*1.2m*1.2m). El canal cuenta con un sistema generador de oleaje; posteriormente dos tramos de rampa, 5 metros al 4% y el resto al 2%; hasta alcanzar, al final del canal, el sistema disipador de energía.

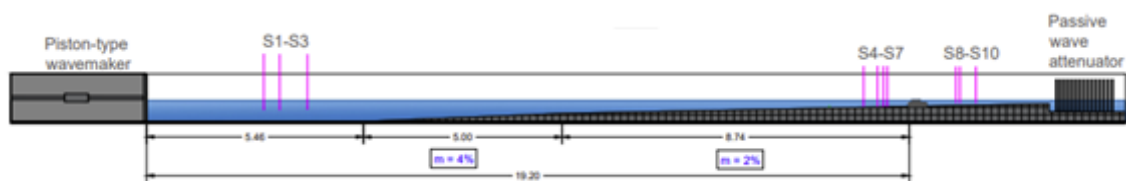


Fig. 35 Croquis del canal del LPC-UPV en su configuración utilizada en el proyecto Holobreak. Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Sistema generador de oleaje

En uno de los extremos del canal del LPC-UPV se encuentra un sistema generador de oleaje, formado por una pala y un pistón cuya carrera máxima es de 90 cm.

La pala, formada por una chapa metálica vertical y una estructura que le permite mantenerse fijada al chasis, pero permitiendo su desplazamiento horizontal, es la encargada de generar las olas. Cuenta con railes sobre los que se puede mover, de forma que se mantiene alineada (ver fig 36).

Además, está instalado un sistema de absorción activa DHI AWACS (Active Wave Absorption System) que previene la multireflexión en el canal. Este sistema mide el oleaje reflejado y así mueve la pala para que genere el oleaje demandado.



Fig. 36 Pistón y pala generadora de oleaje del canal del LPC-UPV. Fuente: elaboración propia.

3.2.3 Sistema disipador de energía

En el otro extremo del canal, se encuentran los sistemas de disipación de energía. La función de estos es absorber la energía que llega a este extremo, con el fin de que la reflexión sea prácticamente nula.

El principal sistema encargado de la disipación de energía son un conjunto de rejillas, formadas por perfiles metálicos ligeramente puntiagudos ordenados de mayor a menor porosidad, provocando la disipación del mismo.

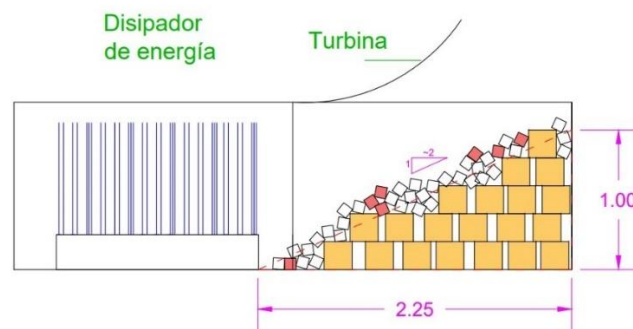


Fig. 37 Croquis de los sistemas disipadores de energía. Fuente: elaboración propia.

Además, para que el ligero oleaje que pasaba no se encontrara con una pared vertical, se decidió colocar un talud formado por ladrillos huecos de hormigón como base con cubos de mortero por encima.



Fig. 38 Final del canal y talud (donde se observan los ladrillos huecos y los cubos de mortero. Fuente: elaboración propia.

3.3 Instrumentación

3.3.1 Sensores de nivel

Para registrar el oleaje generado, se han empleado sensores capacitivos instalados en puntos estratégicos a lo largo del canal. Los sensores DHI, con diferentes longitudes (0.3, 0.6, 0.5 y 0.8 m.), miden la diferencia de capacidad entre los dos electrodos que los forman. Puesto que esta varía entre el agua y el aire, de forma indirecta se consigue medir la altura de ola. Esto quiere decir que la señal registrada en el *Wave Amplifier* DHI 102E, con una frecuencia de 20 Hz, se encuentra en voltios. Por tanto, antes de poder hacer uso de este registro para calcular la altura de ola, el período... hay que realizar la conversión de voltios a centímetros.

Los sensores se encuentran distribuidos en 3 grupos: generación, modelo y transmisión. Los primeros, muy próximos a la pala; el segundo grupo, frente al modelo; y el tercero, justo detrás del modelo, con el fin de poder medir la transmisión (factor clave en este tipo de estructuras).

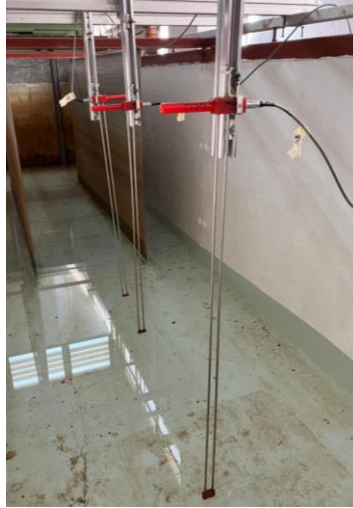


Fig. 39 Sensor capacitivo DHI en canal del LPC-UPV. Fuente: elaboración propia.

La distancia de los sensores de generación se ha seleccionado en función del criterio de Mansard y Funke (1980):

$$\left\{ \begin{array}{l} d_1 \approx L/10 \\ L/6 < d_1 + d_2 < L/3 \\ d_1 + d_2 \neq \frac{L}{5} \\ d_1 + d_2 \neq 3L/10 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Donde L es la longitud de onda, d_1 es la separación entre los dos primeros sensores y d_2 la separación entre el segundo y el tercer sensor. Con la configuración adoptada $d_1=40$ cm y $d_2=70$ cm.

3.4 Modelo físico

Estando enmarcados los ensayos en el proyecto Holobreak, las estructuras estudiadas se tratan de diques homogéneos de baja cota de coronación de Cubípodos. Todos los diques ensayados tienen la misma porosidad, puesto que la malla de la primera capa es la misma.

A lo largo del proyecto, se ensayaron diferentes configuraciones de alturas y diferentes números de capas. Sin embargo, lo que más útil resulta de cara a una implementación real son los diques de 3 alturas, ya que tienen mayor estabilidad (ver Mashadyan, 2022).

Una vez estudiado que los diques de 3 capas eran los más estables, se han estudiado 3 modelos diferentes. Las secciones de los diferentes modelos presentan dos tipos de taludes: los más tendidos, 2:1; y los menos tendidos, 1:2.

p = 0.50 SIMETRICA
 3 9-6-3
 Dn = 4.36 cm



Fig. 40 Sección del modelo 1. Fuente: LPC-UPV.

En el primero, se observó que un gran número de Cubipodos de la primera fila de la primera capa se desplazaban hacia aguas a dentro. Pese a que pueda resultar contraintuitivo, tras ensayar cubos, Cubipodos y escollera en una sola fila se observó que, debido a la gran corriente de vuelta (corriente de resaca o de retorno) que se genera, el Cubipodo se desplazaba mucho más por su capacidad de pivotar. De esta forma, poco a poco conseguía distanciarse del resto de la estructura.

p = 0.50 ASIMETRICA
 3 8-6-4
 Dn = 4.36 cm

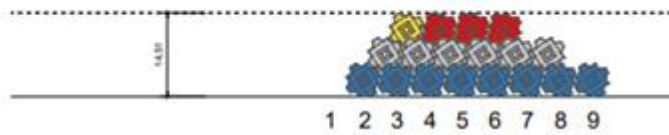


Fig. 41 Sección del modelo 2. Fuente: LPC-UPV.

p = 0.50 ASIMETRICA
 3 6-4-2
 Dn = 4.36 cm

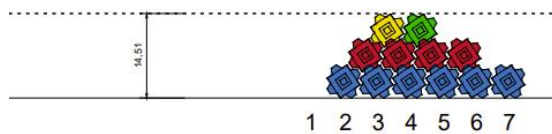


Fig. 42 Sección del modelo 3. Fuente: LPC-UPV.

De esta forma, como esta primera fila no estaba realizando ninguna función y se erosionaba muy fácilmente, se optó por subirla a la fila de coronación (en las imágenes posteriores: la fila amarilla). De esta forma, se aumentaba significativamente la estabilidad hidráulica y se reducía la transmisión.

Se ensayaron dos estructuras diferentes con diferentes números de filas, es decir, diferente ancho en coronación.

Para más detalles sobre el proceso de evolución de los diferentes modelos en función de su estabilidad ver (Mashadyan, 2022).

Modelo	Filas			B (cm)	Piezas totales
	Capa 1	Capa 2	Capa 2		
1	9	6	3	11.29	18
2	9	6	4	16.94	19
3	7	4	2	5.05	13

Fig. 43 Características de los modelos estudiados. Fuente: elaboración propia.

3.4.1 Material

Tanto las características como las ventajas del Cubípodo frente a otro tipo de piezas especiales o macizas de hormigón han sido descritas en el apartado 2.2.3.1. Para conseguir representar fielmente las características mecánicas y físicas a escala reducida se utilizan piezas de resina inyectada. Los Cubípodos ensayados tienen un diámetro nominal de 4.36 cm.

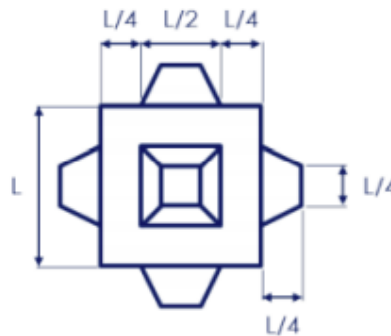


Fig. 44 Dimensiones principales del cubípodo. Fuente: Medina y Ester-Martín, 2016.

Para obtener la densidad, volumen y peso se caracterizaron una muestra de 53 Cubípodos.

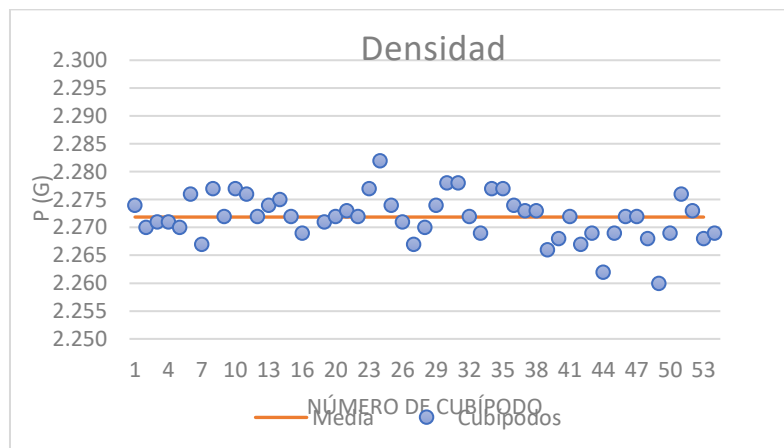


Fig. 45 Caracterización de los Cubípodos utilizados en los ensayos. Fuente: elaboración propia.

El valor medio de la densidad es de 2,27 g/cm³. Presentando una varianza del 0.0000167, se asume que todos los Cubípodos tienen las mismas características y, por tanto, el mismo comportamiento.

Características	Dn=4,36 cm
Peso (g)	187.95
Lado (cm)	4.08
Volumen (g/cm ³)	82.77
Densidad (cm ³)	2.27

Fig. 46 Características de los Cubípodos ensayados. Fuente: elaboración propia.

3.4.2 Malla de colocación

A la hora de realizar los ensayos en el proyecto HOLOBREAK, se observó que una malla formada por triángulos equiláteros presentaba la misma porosidad, pero era mucho más fácil de describir. Además, con esta disposición los Cubípodos quedan a la misma distancia unos de otros.

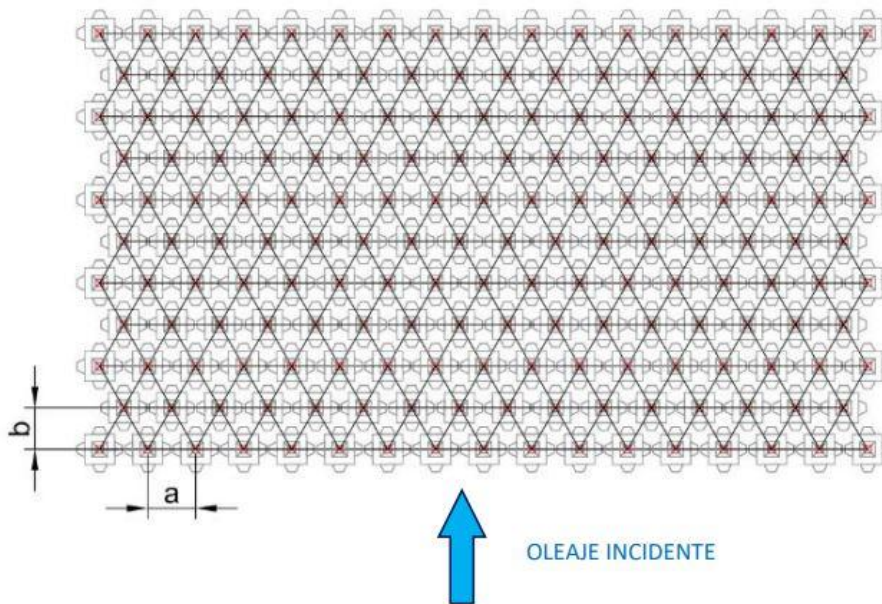


Fig. 47 Malla equilátera utilizada para los ensayos, con $a=5.76$ y $b=6.63$. Fuente: LPC-UPV.

La malla utilizada queda definida por $a/D_n=1.32$ y $b/D_n=1.52$. Siendo $D_n=4.36$, $a=5.76$ cm. y $b=6.63$ cm.

Como ha sido descrito en el apartado 2.2.5.5, esta malla es la utilizada para la primera capa. Posteriormente los Cubípodos se apoyan en uno de la fila de delante y dos de la fila trasera. Para calcular la porosidad de la estructura se ha utilizado el método de la malla virtual descrito por Gómez-Martín y Medina, 2007.

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

Introduciendo los valores de la malla, el diámetro nominal, el número de filas y columnas y los Cubípodos encerrados en el espacio definido por las filas y columnas en la fórmula 3.2, se obtiene una porosidad del 50%.

a/D_n	1.32
b/D_n	1.52
D_n	4.36
n_f	10
n_c	10
n	100
$p\%$	0.50

Fig. 48 Cálculo de la porosidad según Gómez-Martín y Medina (2007). Fuente: elaboración propia.

3.4.3 Coeficiente de capa

Siguiendo el método descrito por Keyser y Jacobs (2020) se ha obtenido el coeficiente de capa de las estructuras ensayadas en el canal y utilizadas para estudiar la transmisión y estabilidad de las mismas. Puesto que todas las estructuras tienen el mismo número de capas y se han utilizado Cubípodos con el mismo diámetro nominal, los coeficientes de capas obtenidos en un modelo sirven para el resto de modelos. A continuación, se detallan los coeficientes de capa del modelo 7, adoptados como generales en el resto de modelos:

	K_t	Varianza	CV (%)
	<i>promedio</i>		
$K_{\Delta 1}$	1.30	0.0006	1.95%
$K_{\Delta 2}$	1.05	0.0004	1.89%
$K_{\Delta 3}$	1.00	0.0016	3.95%

Fig. 49 Resumen de los valores obtenidos en los ensayos en canal de los coeficientes de capa. Fuente: elaboración propia.

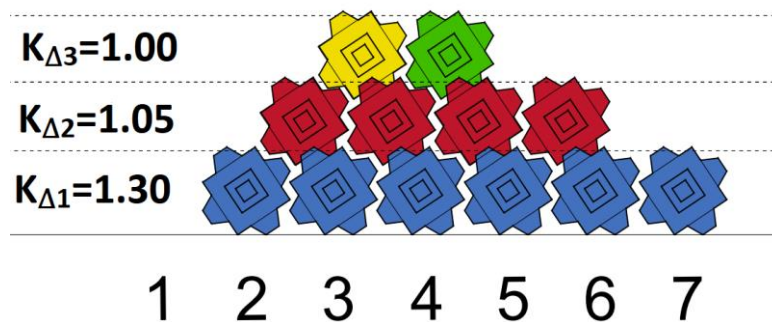


Fig. 50 Croquis de los coeficientes de capa de la estructura. Fuente: elaboración propia.

3.5 Técnica experimental y proceso constructivo

Antes de empezar a realizar los ensayos, hay que poner el canal a punto. Para ello, se realiza una limpieza del mismo y de los sensores que se vayan a utilizar, y se colocan las rejillas que disiparán la energía. A su vez, hay que añadir las rampas que darán la pendiente deseada al canal y añadir una fina capa de mortero que aporte cierta rugosidad al fondo.

Posteriormente, se distribuyen en los diferentes grupos según se ha descrito en el apartado 3.3.1, utilizando unas estructuras que les permiten regular la distancia que se sumergen. Después, se calibra la pala. Este proceso se realiza tan solo una vez, a diferencia de la calibración de los sensores de nivel, que se realiza manualmente antes de cada ensayo, ya que son sensibles a las variaciones de temperatura.

Para finalizar con lo que se podría denominar “operaciones previas”, se lanzan ensayos sin modelos físicos para poder medir los coeficientes de reflexión del canal. Además, al producirse la rotura del oleaje, no se puede separar el oleaje incidente del reflejado en el modelo, por lo que se utilizará como oleaje incidente el medido en vacío.

Estas “operaciones previas” son comunes a todos los ensayos realizados en un canal, independientemente del modelo o del proyecto en el que nos encontremos enmarcados. Lo que sigue, la construcción de los modelos físicos, es propia de los HLCS de Cubípodos.

Lo primero, consiste en dibujar la malla de la primera capa en el suelo del canal. Para ello, la malla se imprime en papel y, tras fijarla convenientemente en la longitud deseada del canal, se pinta la posición de los Cubípodos haciendo agujeros en el papel con permanente de forma que se quede marcado en el suelo del canal.

Para construir el modelo, se usarán Cubípodos de diferentes colores para cada capa, de forma que sea fácilmente visible el daño en cada una de ellas. En la primera capa, se colocarán los Cubípodos haciendo coincidir aproximadamente el centro del mismo con el punto. Tras medir, el coeficiente de capa según Keyser y Jacobs (2020), se realizan las siguientes capas. Todas estas capas sucesivas se construyen apoyando el Cubípodo de forma aleatoria en dos Cubípodos en la parte trasera y un Cubípodo en la zona donde proviene el oleaje. Es decir, en el centro del triángulo que formarían los Cubípodos de la capa inferior. A su vez, en cada capa se añaden piedras en las paredes en los huecos en los que no caben Cubípodos para trabar el modelo. Cabe destacar que, como solo se estudiará la zona central, esto no influirá en los resultados.

Una vez está el modelo construido, los ensayos se realizan con 2 diferentes niveles de agua. Con 14.5 cm., el nivel de la lámina de agua se encuentra en la coronación del dique; y 18 cm donde el dique se encuentra sumergido.



Fig. 51 Colocación de la plantilla de la malla y dibujado de los puntos. Fuente: elaboración propia.

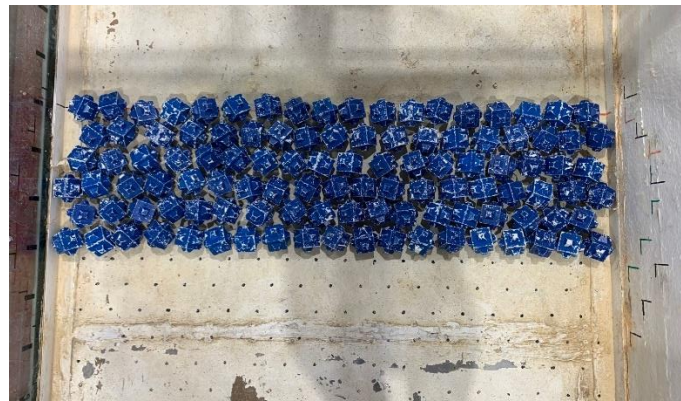


Fig. 52 Imagen de la primera capa colocada. Fuente: elaboración propia.



Fig. 53 Medición del coeficiente de capa de la primera capa según el método de Keyser y Jacobs (2020). Fuente: elaboración propia.



Fig. 54 Construcción y medición del coeficiente de capa de la segunda capa. Fuente: elaboración propia.

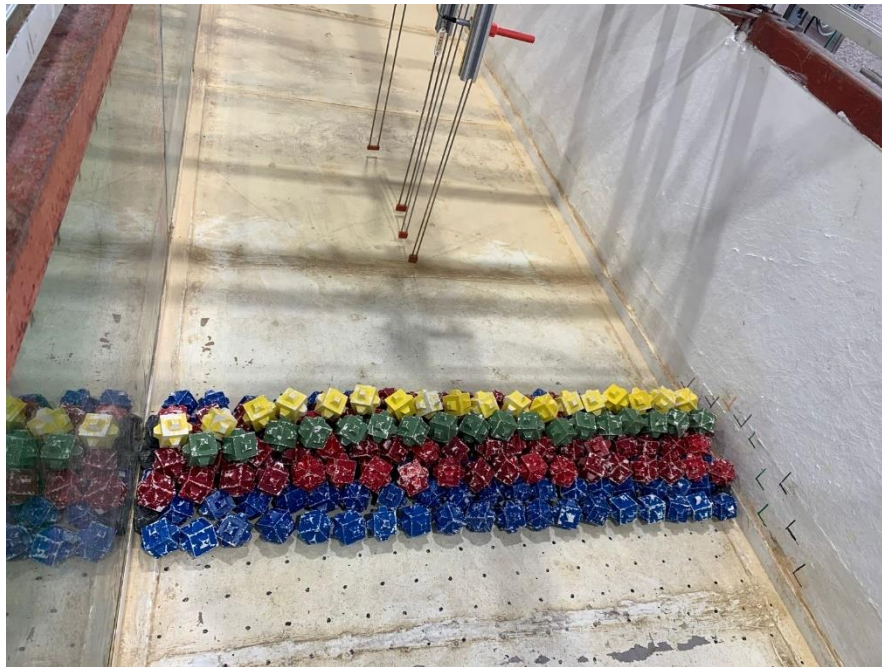


Fig. 55 Modelo 3 construido completamente, donde se observan las diferentes capas y las piedras que lo traban en las paredes. Fuente: elaboración propia.

3.6 Test Matrix

Los ensayos realizados se han utilizado para medir tanto la estabilidad como la transmisión de los diques homogéneos de baja cota de coronación.

Primero, como ya se ha comentado, se realizaron una serie de ensayos en vacío para poder calibrar los sistemas y comparar los datos obtenidos con SwamOne. Posteriormente, se ensayan los diferentes modelos.

Se han realizado ensayos irregulares, con diferentes profundidades a pie de dique (14.5 cm y 18 cm) y diferentes peraltes (0.01 y 0.02) para los diferentes modelos.

El oleaje generado es de un espectro JONSWAP de parámetro pico 3.3. Cada ensayo queda definido por la altura de ola y el peralte, de forma que el período se obtiene de forma indirecta. Se realizan ensayos incrementando la altura de ola hasta observar la destrucción del modelo.

Los ensayos se constituyen de mil olas, quedando su duración definida por el período pico de la siguiente forma:

$$\text{Duración (s)} = 1000 \text{ olas} * \frac{T_p}{1.23}$$

3.6.2 Nomenclatura de los ensayos

HLYN_SLWW

Donde:

HL: Se refiere al nombre del proyecto, Holobreak.

Y: Se refiere al tipo de oleaje. 0=Regular, 1=Irregular.

N: En relación al número de capas. 0=Ensayos en vacío, 1=1 capa, 2=2 capas, etc

S: Peralte. 1=0.01, 2=0.02, etc

L: Nivel del mar. 2=14.5 cm, 3= 18 cm.

WW: Hace referencia a la altura de ola (Hs) en cm.

3.6.3 Datos ensayos

	Nombre	Modelo				Prof. Pala	D.O	DATOS A INTRODUCIR											Duración a grabar (s)	Tm (s)	
		Hs (cm)	Tp (s)	Lp (cm)	h (cm)			hc (cm)	Escala	Profundidad (m)	Hs (m)	Lp (m)	Tp (s)	Tmin	Tmax	Profundidad (m)	Profundidad modelo (m)	Duración (s)			Duración (nummas)
hc=14.5cm	s0=0.01	HL13_0206	6	1.96	600	52.5	14.5	50	26.25	3	300	13.86	5.54	23.10	26.25	7.25	2411.22	0:40:11	2472	2.41	
		HL13_0208	8	2.26	800	52.5	14.5	50	26.25	4	400	16.01	6.40	26.68	26.25	7.25	2784.23	0:46:24	2845	2.78	
		HL13_0210	10	2.53	1000	52.5	14.5	50	26.25	5	500	17.90	7.16	29.83	26.25	7.25	3112.87	0:51:53	3173	3.11	
		HL13_0211	11	2.65	1100	52.5	14.5	50	26.25	5.5	550	18.77	7.51	31.28	26.25	7.25	3264.80	0:54:25	3325	3.26	
		HL13_0212	12	2.77	1200	52.5	14.5	50	26.25	6	600	19.60	7.84	32.67	26.25	7.25	3409.97	0:56:50	3470	3.41	
	s0=0.02	HL13_0213	13	2.89	1300	52.5	14.5	50	26.25	6.5	650	20.40	8.16	34.01	26.25	7.25	3549.21	0:59:09	3610	3.55	
		HL13_0214	14	2.99	1400	52.5	14.5	50	26.25	7	700	21.17	8.47	35.29	26.25	7.25	3683.19	1:01:23	3744	3.68	
		HL13_0215	15	3.10	1500	52.5	14.5	50	26.25	7.5	750	21.92	8.77	36.53	26.25	7.25	3812.47	1:03:32	3873	3.81	
		HL13_1206	6	1.99	500	52.5	14.5	50	26.25	3	150	9.80	3.92	16.34	26.25	7.25	1704.99	0:28:25	1765	1.70	
		HL13_1208	8	1.60	400	52.5	14.5	50	26.25	4	200	11.32	4.53	18.86	26.25	7.25	1968.75	0:32:49	2029	1.97	
	s0=0.05	HL13_1210	10	1.79	500	52.5	14.5	50	26.25	5	250	12.65	5.06	21.09	26.25	7.25	2201.13	0:36:41	2262	2.20	
		HL13_1211	11	1.88	550	52.5	14.5	50	26.25	5.5	275	13.27	5.31	22.12	26.25	7.25	2308.56	0:38:29	2369	2.31	
		HL13_1212	12	1.96	600	52.5	14.5	50	26.25	6	300	13.86	5.54	23.10	26.25	7.25	2411.22	0:40:11	2472	2.41	
		HL13_1213	13	2.04	650	52.5	14.5	50	26.25	6.5	325	14.43	5.77	24.05	26.25	7.25	2509.67	0:41:50	2570	2.51	
		HL13_1214	14	2.12	700	52.5	14.5	50	26.25	7	350	14.97	5.99	24.95	26.25	7.25	2604.41	0:43:24	2665	2.60	

Fig. 56 Estadillo de los ensayos irregulares realizados con nivel 14.5 cm. Fuente: LPC-UPV.

	Nombre	Modelo				Prof. Pala	D.O	DATOS A INTRODUCIR											Duración a grabar (s)	Tm (s)	
		Hs (cm)	Tp (s)	Lp (cm)	h (cm)			hc (cm)	Escala	Profundidad (m)	Hs (m)	Lp (m)	Tp (s)	Tmin	Tmax	Profundidad (m)	Profundidad modelo (m)	Duración (s)			Duración (nummas)
hc=18cm	s0=0.01	HL13_0306	6	1.96	600	56	18	50	28	3	300	13.86	5.54	23.10	28	9	2411.22	0:40:11	2472	2.41	
		HL13_0308	8	2.26	800	56	18	50	28	4	400	16.01	6.40	26.68	28	9	2784.23	0:46:24	2845	2.78	
		HL13_0310	10	2.53	1000	56	18	50	28	5	500	17.90	7.16	29.83	28	9	3112.87	0:51:53	3173	3.11	
		HL13_0311	11	2.65	1100	56	18	50	28	5.5	550	18.77	7.51	31.28	28	9	3264.80	0:54:25	3325	3.26	
		HL13_0312	12	2.77	1200	56	18	50	28	6	600	19.60	7.84	32.67	28	9	3409.97	0:56:50	3470	3.41	
	s0=0.02	HL13_0313	13	2.89	1300	56	18	50	28	6.5	650	20.40	8.16	34.01	28	9	3549.21	0:59:09	3610	3.55	
		HL13_0314	14	2.99	1400	56	18	50	28	7	700	21.17	8.47	35.29	28	9	3683.19	1:01:23	3744	3.68	
		HL13_0315	15	3.10	1500	56	18	50	28	7.5	750	21.92	8.77	36.53	28	9	3812.47	1:03:32	3873	3.81	
		HL13_3306	6	0.88	120	56	18	50	28	3	150	9.80	3.92	16.34	28	9	1704.99	0:28:25	1765	1.70	
		HL13_3308	8	1.01	160	56	18	50	28	4	200	11.32	4.53	18.86	28	9	1968.75	0:32:49	2029	1.97	
	s0=0.05	HL13_3310	10	1.13	200	56	18	50	28	5	250	12.65	5.06	21.09	28	9	2201.13	0:36:41	2262	2.20	
		HL13_3311	11	1.19	220	56	18	50	28	5.5	275	13.27	5.31	22.12	28	9	2308.56	0:38:29	2369	2.31	
		HL13_3312	12	1.24	240	56	18	50	28	6	300	13.86	5.54	23.10	28	9	2411.22	0:40:11	2472	2.41	
		HL13_3313	13	1.29	260	56	18	50	28	6.5	325	14.43	5.77	24.05	28	9	2509.67	0:41:50	2570	2.51	
		HL13_3314	14	1.34	280	56	18	50	28	7	350	14.97	5.99	24.95	28	9	2604.41	0:43:24	2665	2.60	

Fig. 57 Estadillo de los ensayos irregulares realizados con nivel 18 cm. Fuente: LPC-UPV.

3.7 Análisis de datos experimentales

3.7.1 Análisis del oleaje

3.7.1.1 Método LASA-V

Para separar el oleaje incidente del reflejado se ha utilizado el método LASA-V (Figueres y Medina, 2004) utilizando el grupo de sensores ubicado en la zona de generación S1, S2 y S3, modelando el oleaje con un modelo de ola Stoke-V. Este método queda emplazado en el software LASA-V.

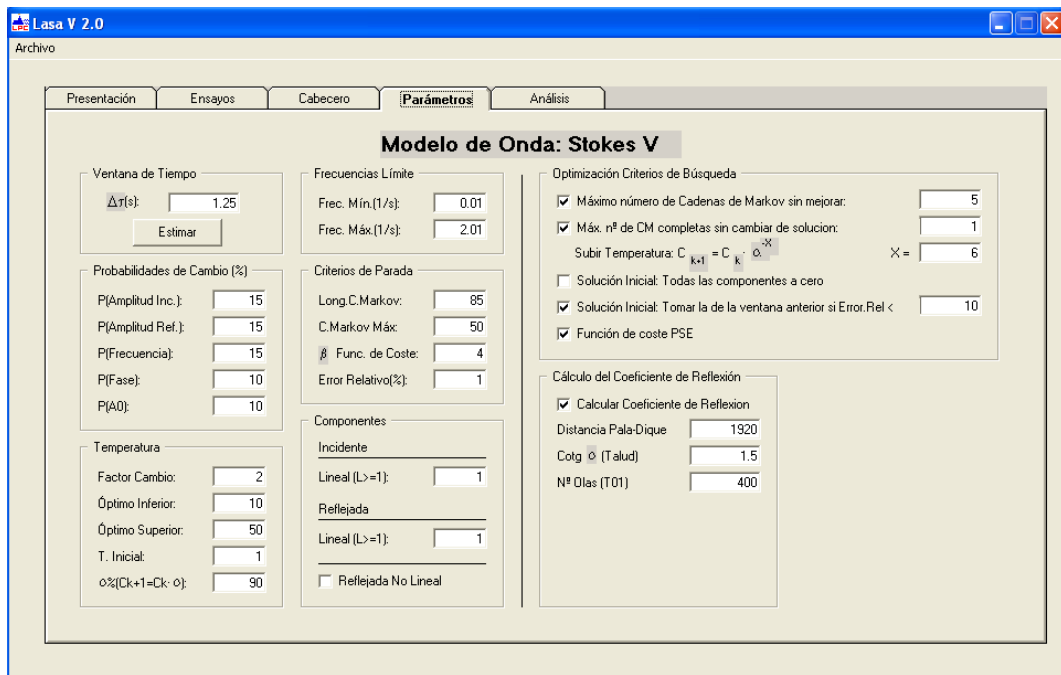


Fig. 58 Software L_{ASA}-V. Fuente: LPC-UPV.

3.7.1.2 LPCLab

Este software es el que permite representar los estadísticos de oleaje. Pese a que solo se pasará el software L_{ASA}-V en la zona de generación (aguas profundas), el LPCLab también se utilizará para generar los estadísticos de la zona anterior y posterior al modelo, con los que podremos medir la transmisión.

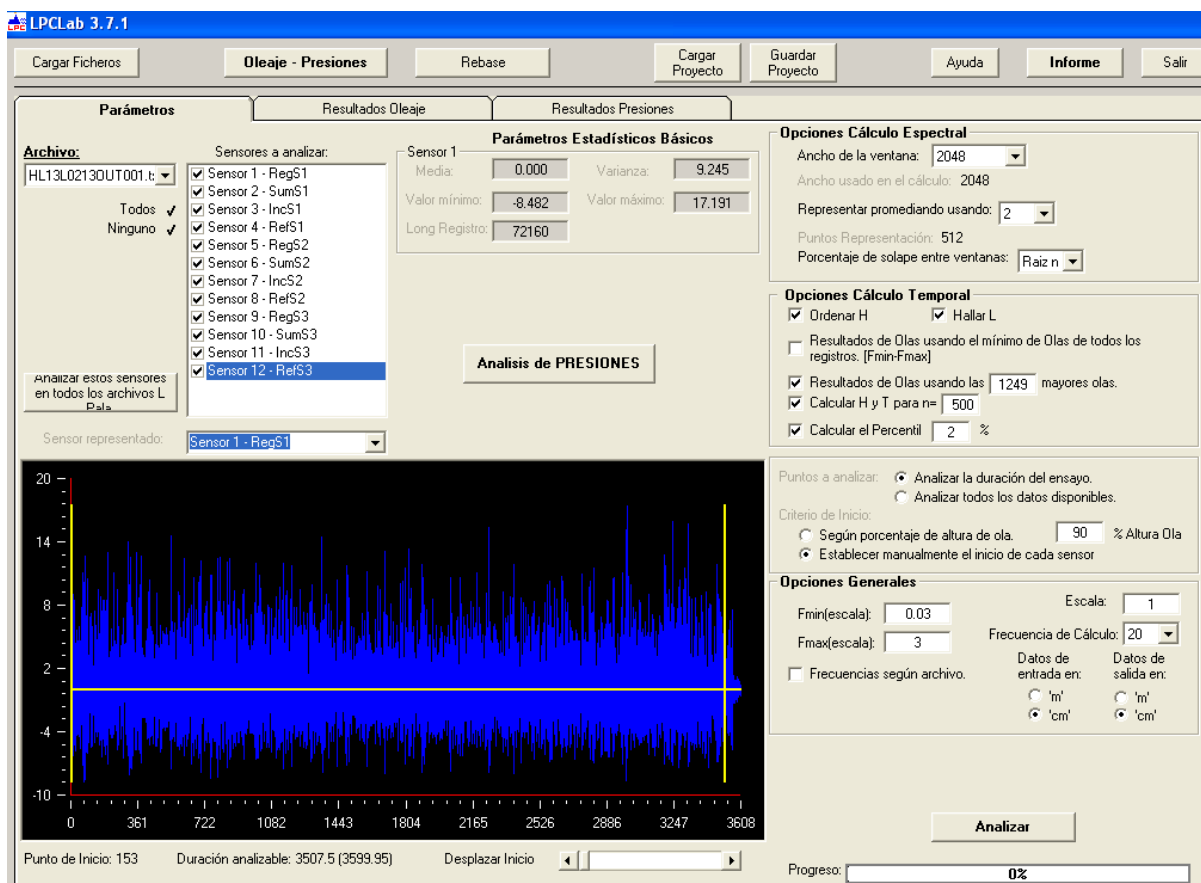


Fig. 59 Software LPCLab, donde se puede observar un registro de oleaje y la ventana temporal seleccionada (en amarillo). Fuente: LPC-UPV.

3.7.1.3 SwamOne

SwamOne es un software desarrollado por la *Delft University of Technology (TU Delft)* que permite propagar el oleaje en modelos en 2D, con la batimetría paralela. Está basado en el programa Swan, pero al tratarse de un modelo unidimensional resulta muy útil para canales de oleaje por su facilidad y velocidad de computación.

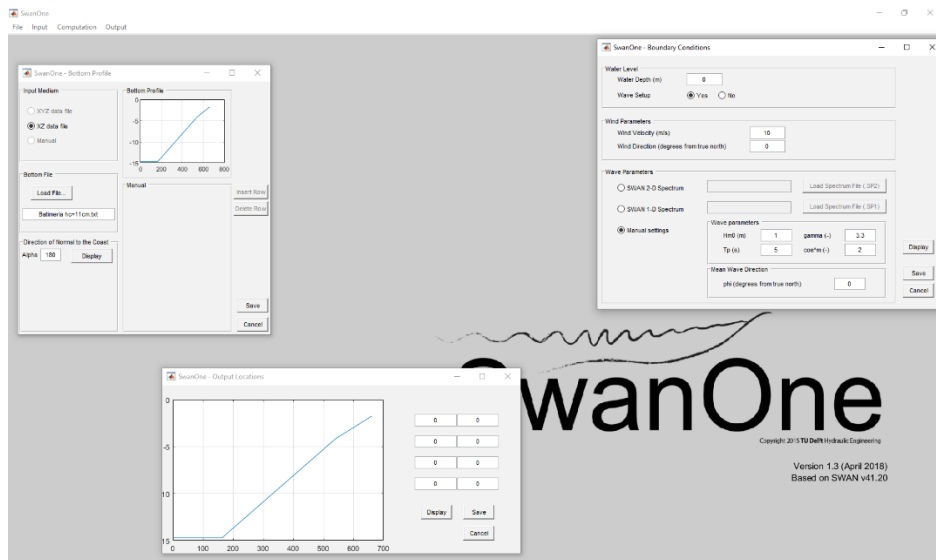


Fig. 60 Interfaz de SwamOne. Fuente: elaboración propia.

Permite:

- Propagar oleaje en tiempo y espacio, teniendo en cuenta el asomeramiento y la refracción.
- Generar oleaje por viento.
- Simular la rotura de oleaje por fondo.

Debido a la rotura del oleaje, los métodos para separar el oleaje incidente y reflejado no son precisos. De esta forma, se han llevado a cabo simulaciones con SwamOne para poder obtener el oleaje en la zona del modelo.

Para poder simular el oleaje, al programa se le han de introducir los datos de la batimetría, el oleaje (espectro JONSWAP con parámetro pico $\gamma=3.3$) y unas condiciones de contorno. Como resultados, se obtienen la altura de ola, el período pico, ...

En el apartado 3.5, se ha comentado que se llevaron a cabo ensayos sin estructura (en vacío). Esto permite tener registros de oleaje incidente únicamente, puesto que entre las rejas y el talud se absorbe toda la energía incidente, evitando la reflexión. De esa forma, es posible validar los resultados obtenidos con SwamOne. Siguiendo la metodología descrita por Herrera y Medina (2015), que compararon las mediciones en vacío con los resultados obtenidos con SwamOne, en este proyecto se ha realizado una comparación similar.

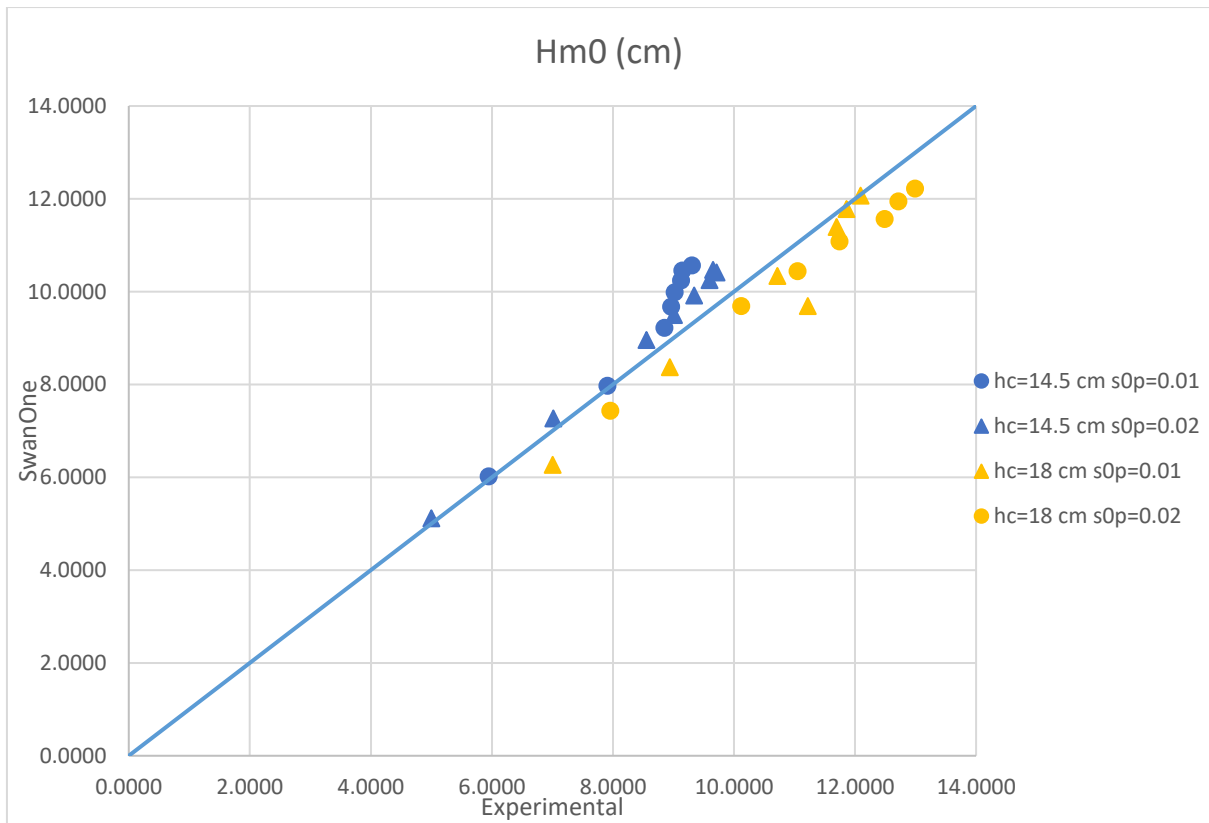


Fig. 61 Comparación entre la altura de ola registrada sin estructura y la obtenida con Swan One. Fuente: elaboración propia.

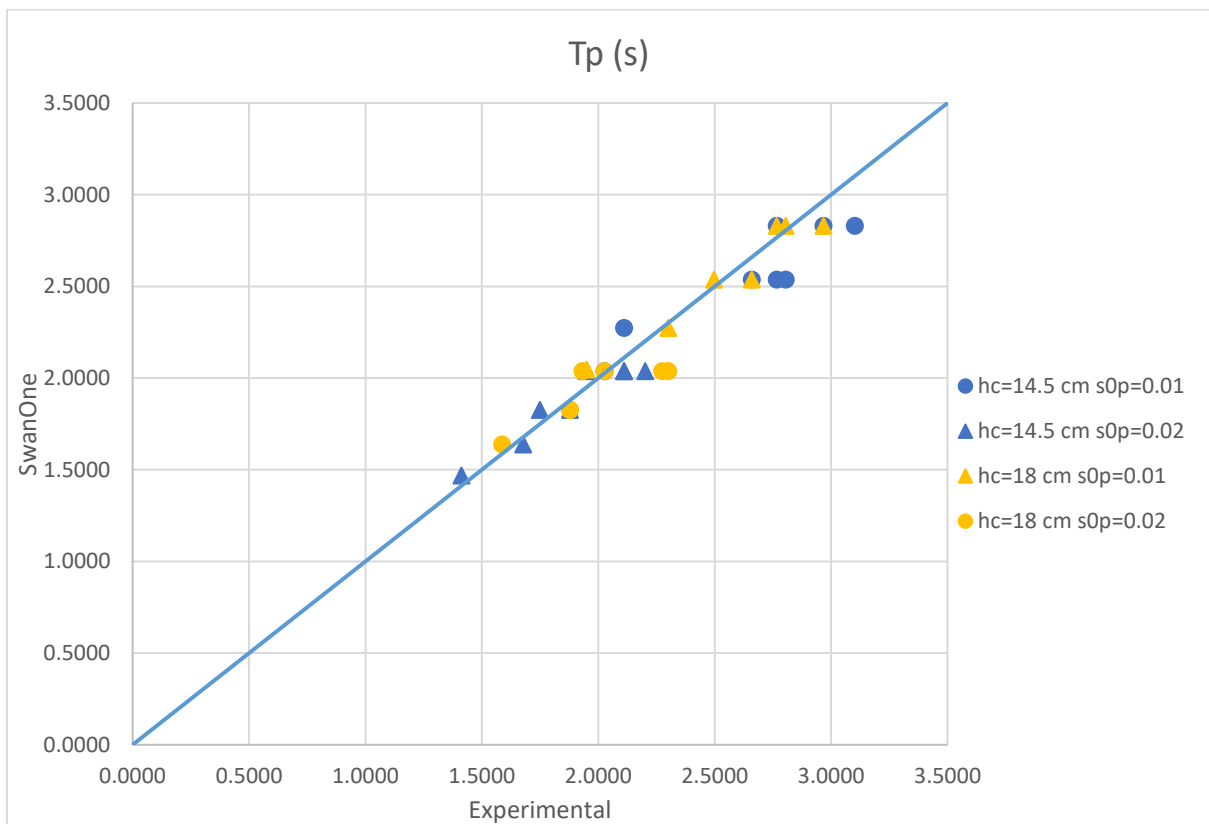


Fig. 62 Comparación entre el período pico registrado sin estructura y el obtenido con Swan One. Fuente: elaboración propia.

Como se ha podido observar en las figuras 61 y 62, la correlación es bastante elevada, obteniendo $R^2=0.925$ y $R^2=0.962$, respectivamente.

3.8.3 Estabilidad hidráulica

Mashadyan (2022) analiza diversos ensayos tanto regulares como irregulares de estabilidad hidráulica, proponiendo dos tipos de avería:

1. Avería de daño tipo 1: cuando algunas piezas han sido desplazadas en su capa. Este daño resulta poco relevante porque no afecta a la estabilidad de la estructura.

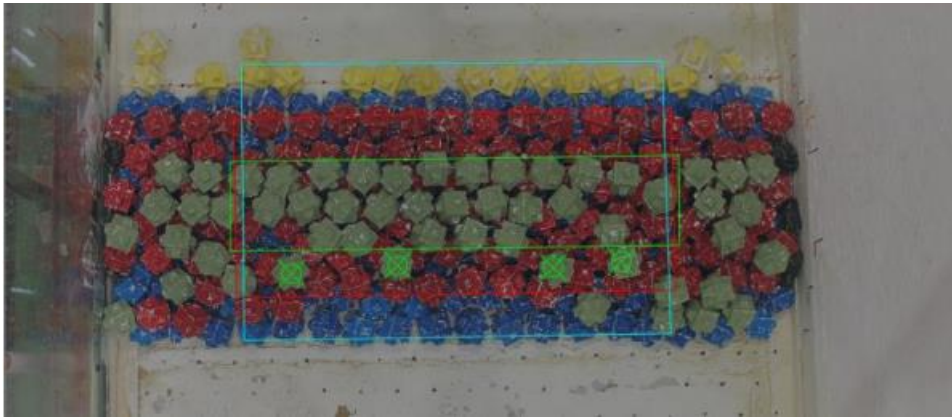


Fig. 63 Inicio de avería tipo 1 en la tercera capa. Fuente: Mashadyan, 2022.

2. Avería de daño tipo 2: cuando algunas piezas hayan sido desplazadas o extraídas de su capa. El daño 2, por tanto, engloba al daño tipo 1 más las piezas que se salgan de su capa.

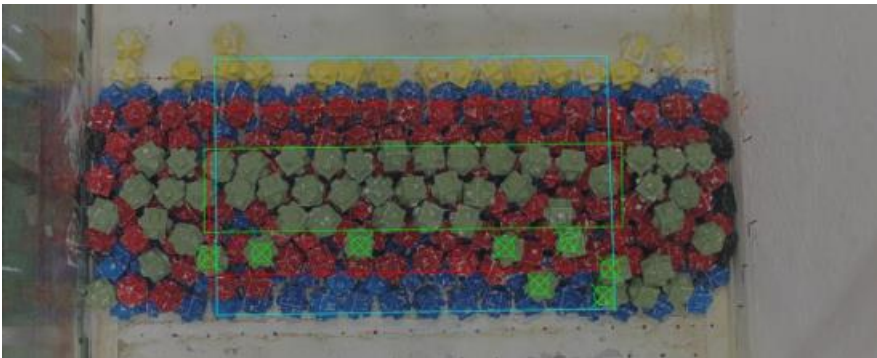


Fig. 64 Inicio de avería del tipo 2 en la tercera capa. Fuente: Mashadyan, 2022.

Para contabilizar el daño se utiliza el método de la malla virtual (ver Mashadyan, 2022 y Gómez-Martín, 2015). De forma resumida, se trata de una envolvente de la estructura en la que caben un número de piezas y comprende la zona central de la estructura, excluyendo las paredes donde el daño es menos representativo.

La malla virtual se corresponde con los rectángulos de colores de las dos figuras anteriores.

Para definir el daño se cuentan las piezas que se han movido o extraído en cada capa, según proceda, y se divide entre el número de piezas total de la envolvente:

$$N\% = \frac{n}{n_{TOTAL}}$$

Mashadyan (2022) concluye que en casi ningún ensayo de los realizados se observaron daños relevantes. Esto quiere decir que los tres tipos de estructuras son muy estables.

3.8.4 Análisis de la transmisión

Como se ha comentado en apartados anteriores, el análisis de la transmisión es uno de los objetivos de este trabajo. Para su obtención, es necesario conocer el oleaje incidente y el transmitido.

Para la altura de ola incidente, como se ha comentado en apartados anteriores, no se puede realizar la separación entre reflejado e incidente puesto que hay rotura. Por ello, como altura de ola incidente se ha utilizado la registrada a pie de dique en los ensayos en vacío. Mares-Nasarre et al. (2020) recomiendan la utilización de valores obtenidos con métodos numéricos como SwamOne, sin embargo, los valores son muy similares (ver apartado 3.7.1.3). Por tanto, se podría utilizar cualquiera de los dos.

Para la altura de ola transmitida, puesto que no hay reflexión, ya que el talud del final del canal disipa la mayoría de la energía, se ha tomado como altura de ola la media de las registradas por los sensores colocados tras el modelo. Para poder representar los estadísticos se ha utilizado el software LPC-Lab.

$$Kt = \frac{H_{m0,transmitida} (LPC - Lab)}{H_{m0,transmitida} (Vacío - SwamOne)}$$

Capítulo 4: Análisis de la transmisión

4. Análisis de la transmisión

4.1 Introducción

El presente trabajo se centra en la transmisión de los diques de baja cota de coronación de Cubípodos (HLCS), puesto que es una de las variables principales a considerar en su construcción como obras de defensa costera.

Este capítulo recoge la formulación existente hasta la fecha, estudiando su aplicación al tipo de estructuras concretas a las que se ciñe el trabajo. Además, se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con los proporcionados por las diferentes fórmulas existentes, teniendo en cuenta sus márgenes de aplicación.

A su vez, y tras comprobar que los resultados obtenidos distaban de lo medido en los ensayos, se ha optado por obtener una nueva fórmula cuyas variables han sido elegidas tras un análisis de la información obtenida en los ensayos.

4.2 Resumen de la transmisión del oleaje

En los apartados 2.3.4.2.2 y 2.2.5.7, se han recogido los principales estudios de la transmisión no solo de HLCS sino también de diques de baja cota de coronación (LCS), resumiendo de forma extendida la forma en que se estudió y las diferentes propuestas para estimar K_t . A continuación, se expone una tabla resumen de las diferentes variables empleadas por cada trabajo, con el fin de resumir de forma sencilla cuales deberían considerarse como fundamentales.

	$Hm0,i$	Rc	$Dn50$	B	Sop	$L0$	ξ
<i>Takayama (1985)</i>	X	X		X		X	
<i>Van der Meer (1990)</i>	X	X					
<i>Van der meer y Daemen (1994)</i>	X	X	X	X	X	X	
<i>d'Angremond et al. (1996)</i>	X	X		X	X		X
<i>Seabrook y Hall (1998)</i>	X	X	X	X		X	

Van der Meer (2005)	X	X		X			X
Medina et al. (2019)	X	X					
Jeong et al. (2021)	X	X					
Lozano (2021)	X	X			X		
TOTAL	9/9	9/9	2/9	5/9	3/9	3/9	2/9

Fig. 65 Tabla resumen de las variables empleadas en el estudio de la transmisión según los diferentes autores. Fuente: elaboración propia.

Puede observarse el claro predominio tanto de la altura de ola incidente y el francobordo como variables imprescindibles en el análisis histórico de la transmisión. El resto de variables han sido más o menos utilizadas en función, entre otras cosas, del tipo específico de dique. De esta forma, se observa que la relación entre la altura de la estructura y la del agua, es decir, si está o no sumergida, cobra un papel fundamental en la transmisión.

4.3 Evaluación de la formulación existente

A continuación, se analizarán los diferentes métodos para estimar el oleaje, para después compararlos con lo obtenido experimentalmente y poder determinar cuan buena es la correlación. Para llevarlo a cabo, se han tenido en cuenta las diferentes limitaciones que presenta cada método, quedando recogidas en la siguiente tabla:

	R_c/H_{si}	$H_{s,i}/Dn50$	$R_c/Dn50$	H_{si}/h	Sop	B/H_{si}	Kt
Daemen (1991) (Reef)		1,6	-3,5		0.01,0.05		0.075,0.75
Daemen (1991) (convencional)		1,6	-2,6		0.01,0.05		0.15,0.6
Angremond et al. (1991)	-2.5,2.5		-2,6	<0.54	<0.06	<8	0.075,0.8
Van der meer et al. (2005)	-8.7,8.9	<6		0.03,0.87	0.002,0.07	>10	0.05, Ktu
Medina et al. (2019)	-0.36,0.89						
Lozano (2021)	-2,3.6				0.008,0.035		

Fig. 66 Rangos de aplicación de los métodos para estimar Kt . Fuente: elaboración propia.

Una vez definidos todos los condicionantes de los diferentes métodos, se realizó la comparación entre lo estimado y lo medido de los ensayos que se enmarquen en esos condicionantes. Cabe destacar que, pese a que la de Daemen (1991) (Reef) esté pensada para diques arrecife como los estudiados en este trabajo, en el posterior estudio quedará fuera de análisis por encontrarse fuera de rango de todos los ensayos. También lo hará Van der Meer (2005) por la misma razón.

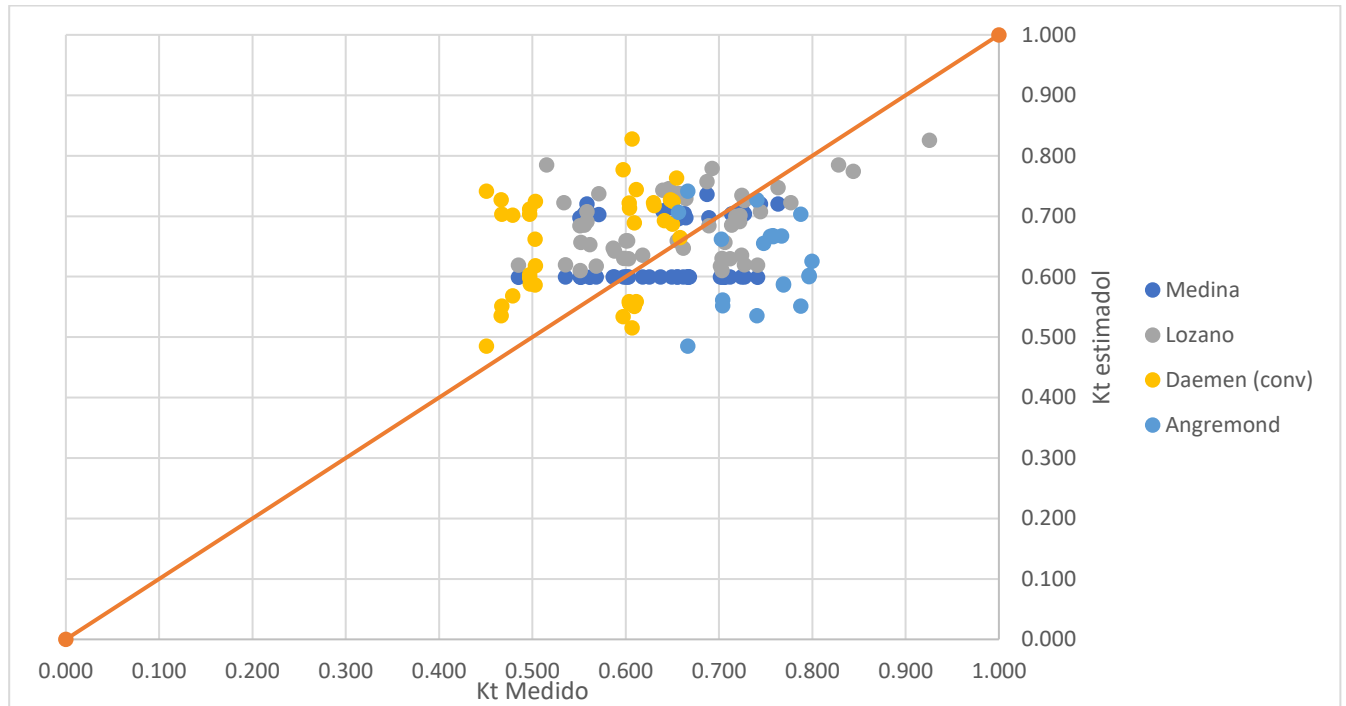


Fig. 67 Comparación de los valores de K_t obtenidos para las diferentes formulaciones frente a los valores de K_t obtenidos en los ensayos, teniendo en cuenta los límites de cada fórmula. Fuente: elaboración propia.

	Lozano	Medina	Daemen (conv)	Angremond
R2	0.044	0.155	0.074	0.002

Como se puede observar, se obtienen RMSE elevados y coeficientes R2 bajos. Por ello, se optó por buscar una nueva formulación. El proceso de obtención de la misma será descrito en el próximo apartado.

4.4 Estudio y obtención de una nueva formulación para la obtención de K_t en diques homogéneos de baja cota de coronación de Cubípodos

Para la nueva formulación se ha optado por analizar el franbordo adimensional ($H_{m0,i}/R_c$); el peralte (s_{0p}); el ancho adimensional (B_{medio}/L) y la profundidad relativa ($H_{m0,i}/h$). Se ha optado por analizar estas variables y no otras por diferentes razones: el peralte y el francobordo adimensional, por ser las dos variables más utilizadas para calcular la transmisión; el ancho adimensional, por estudiar 3 modelos

con diferentes anchos y poder ver la influencia del mismo; y la profundidad relativa, debido a que el oleaje rompía por fondo en muchos ensayos.

4.4.1 Influencia del (S0p) en el coeficiente de transmisión

Para poder estudiar la influencia que presentaba el peralte en la transmisión, se optó por dividir los ensayos en dos intervalos de R_c/H_{mi} , de forma que se pudiera ver de manera nítida la evolución del peralte en el coeficiente de transmisión. Como se puede ver en la figura 66, el coeficiente de transmisión disminuye con el peralte en líneas generales, lo cual resulta coherente puesto que las olas son menos energéticas.

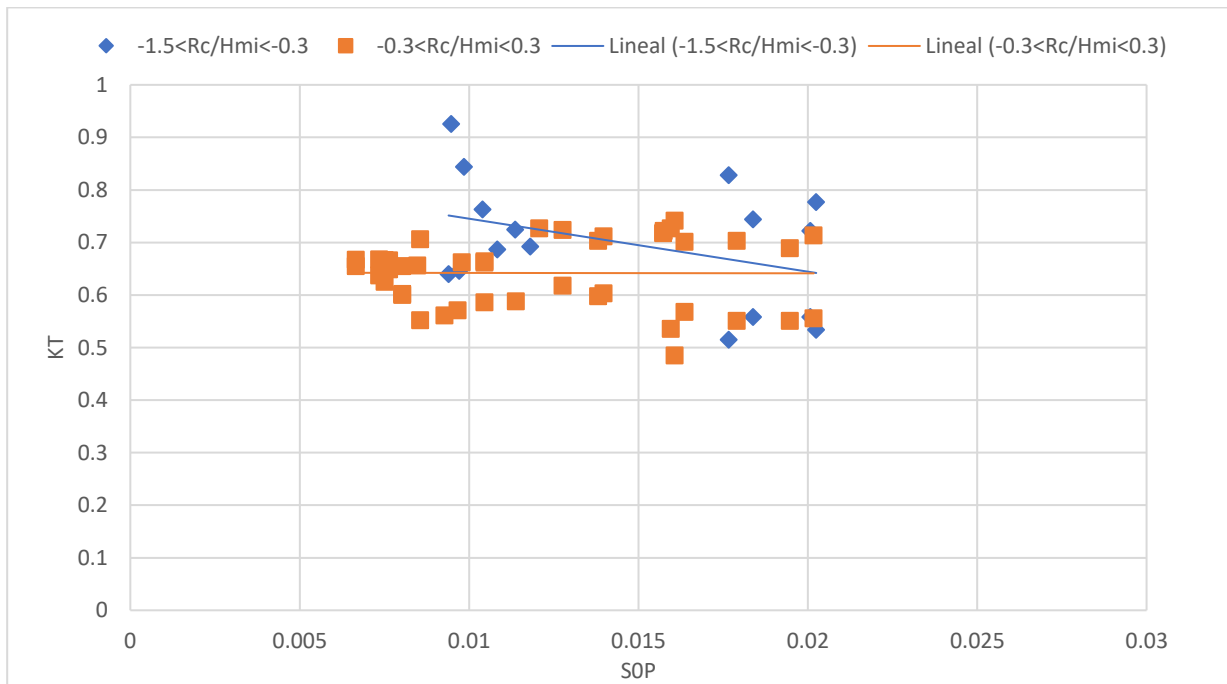
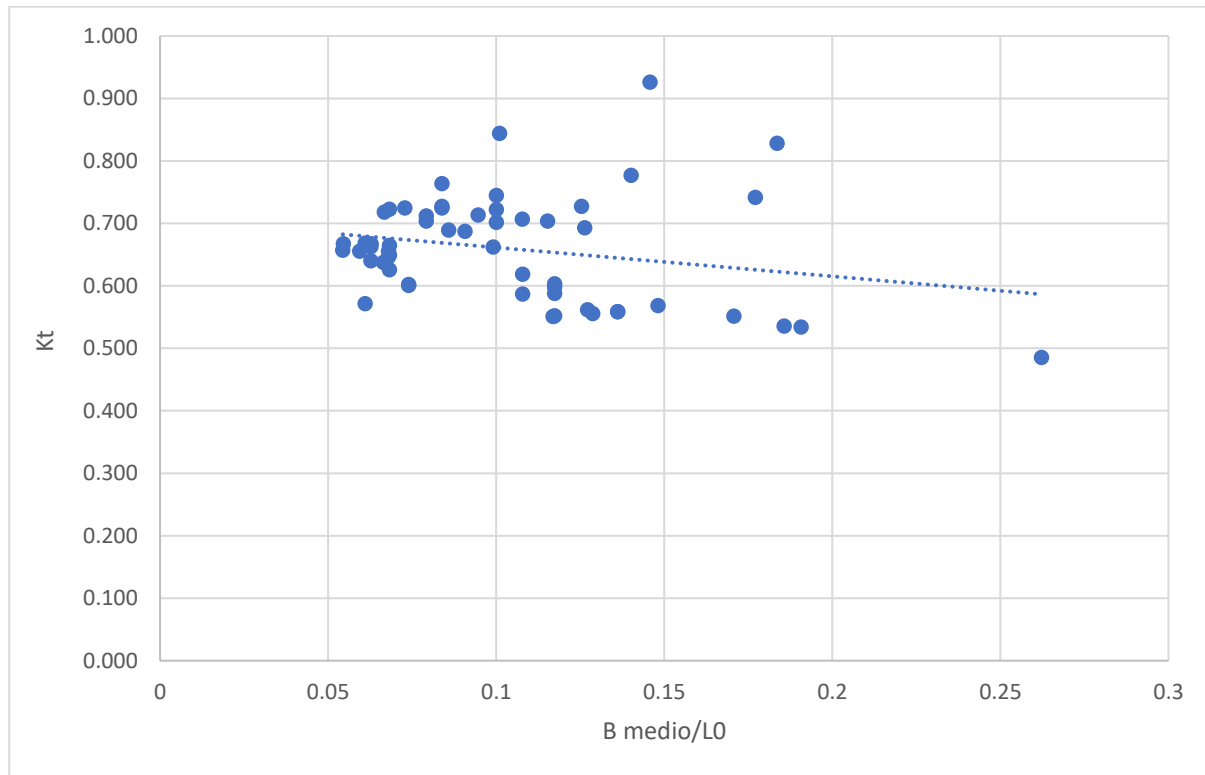


Fig. 68 Influencia del peralte en la transmisión. Fuente: elaboración propia.

4.4.2 Influencia del francobordo adimensional ($R_c/H_{s,i}$) en el coeficiente de transmisión

4.4.3 Influencia del ancho adimensional (B_{medio}/L) en el coeficiente de transmisión



Se suma un Dn puesto que, por las irregularidades que presenta el modelo, se entiende a la estructura como una envolvente compuesta por los extremos de cada fila más medio diámetro nominal. Es decir, el ancho que presenta más un Dn (0,5*Dn por cada talud).

Modelo 1	0.75
Modelo 2	0.82
Modelo 3	0.55

Fig. 71 Anchos medios de los diferentes modelos (en m.). Fuente: elaboración propia.

4.4.4 Influencia de la altura relativa (Hi/h) en el coeficiente de transmisión

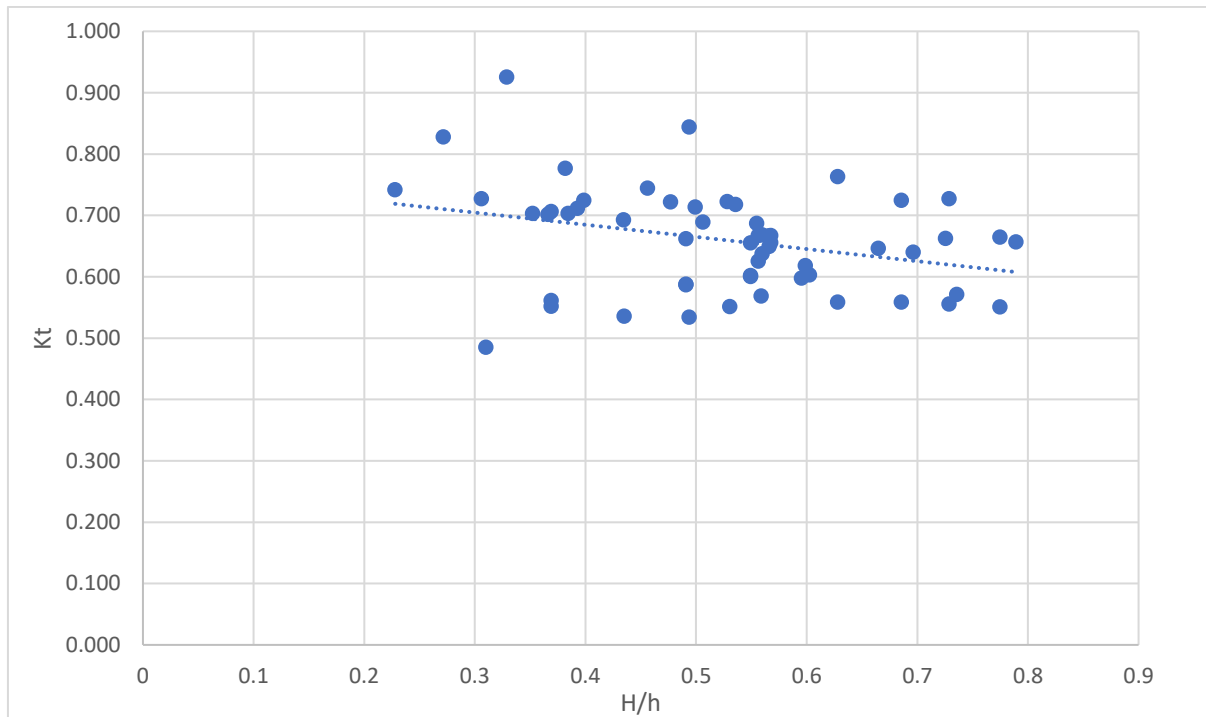


Fig. 72 Influencia de la altura/profundidad relativa en el coeficiente de transmisión. Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en la fig 73, el coeficiente de transmisión disminuye al aumentar H/h, lo cual tiene sentido puesto que el valor de la rotura por fondo queda limitado por la profundidad, de forma que aunque la altura de ola aumente en aguas profundas (la que genera la pala) gran parte de la energía será disipada por el efecto de la rotura.

4.4.5 Formulación

El objetivo, una vez analizado la influencia de cada variable en el coeficiente de transmisión, es plantear una fórmula que estime Kt. En este caso, para que fuera sencilla su utilización se ha optado por otorgar coeficientes lineales a cada una de las variables, obteniendo un polinomio de primer grado con todas las variables y una constante:

$$K_t = -0.001 * S_{op} - 0.25 * \frac{R_c}{H_{mi}} - 0.47 * \frac{H}{h} - 1.547 * \frac{B}{L0} + 1.023 \quad (4.2)$$

Para obtener el valor de los diferentes coeficientes, se ha utilizado Microsoft Excel y su función *Solver*. Con todos los datos, se ha minimizado el RMSE de todos los datos de los ensayos, obteniendo los siguientes coeficientes:

A	B	C	D	E
-0.001	-0.25	-0.47	-1.547	1.023

Fig. 73 Coeficientes de la fórmula de transmisión. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, todos los coeficientes son negativos. Esto indica que la relación existente entre las diferentes variables y el coeficiente de transmisión es negativa, esto es: que el coeficiente de transmisión decrece al aumentar las diferentes variables.

En la figura 74, puede verse una comparación del K_t estimado con la nueva fórmula y el medido en el laboratorio. El ajuste es bueno, obteniendo un $R^2=0.65$, lo que quiere decir que las tendencias descritas en los apartados anteriores son correctas. Además, se obtiene una varianza de 0.0059. En la misma figura, también se ha representado la banda del 90% de confianza, para ello se ha asumido una distribución de Gauss de medio 0 y varianza constante 0.0059, la obtenida de los errores. Por tanto, el intervalo de confianza 90% queda definido de la siguiente forma:

$$K_t \neq \frac{95\%}{5\%} = K_t \pm 1.645 \cdot \sqrt{\sigma^2(E)} = K_t + 0.1266 \quad (4.3)$$

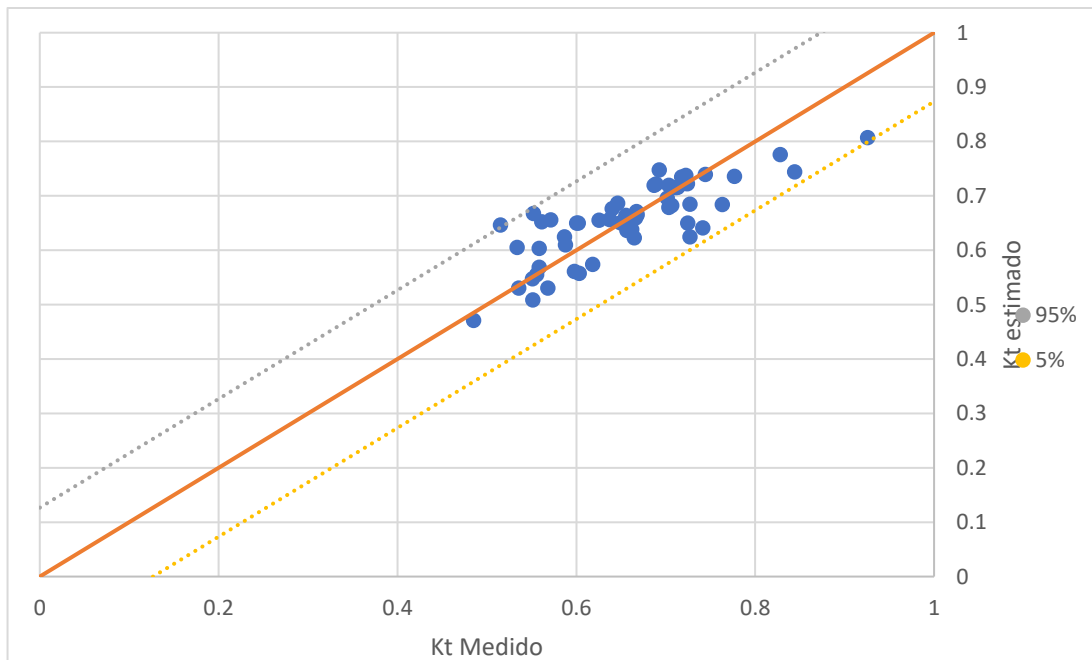


Fig. 74 Comparación de K_t estimado con la nueva fórmula y el medido en el laboratorio, con la banda de confianza del 90%. Fuente: elaboración propia.

Para finalizar, hay que destacar el rango de aplicación:

$$0.006 < \text{Sop} < 0.20$$

$$-0.65 < R_c / H_{\text{mi}} < 0$$

$$0.22 < H_{\text{mi}}/h < 0.789$$

$$0.05 < B_{\text{medio}} / L0 < 0.26$$

Capítulo 5: Conclusiones

5. Conclusiones

En el presente trabajo se han analizado tanto los diques exentos de baja de coronación (LCS) como los diques homogéneos de baja cota de coronación (HLCS). Estos últimos, cuando están compuestos por Cubípodos, presentan unas ventajas a la hora de realizar la defensa de la costa, a la que se reducen los impactos visuales y al medio ambiente.

Este tipo de estructuras, cada vez más comunes, presentan una alternativa a las formas tradicionales de defensa de la costa mientras que tratan de preservar e incluso generar espacios donde se desarrolle la biodiversidad. La implantación de diques arrecife donde puedan generarse corales resulta de gran interés, pues estos, con la acidificación de los océanos y el aumento de temperatura global, son muy susceptibles de ser dañados.

Con este contexto se desarrolla el proyecto HOLOBREAK, y en los ensayos del mismo queda enmarcado esta primera parte del TFG, sirviéndose de ellos para obtener una nueva formulación que estime la transmisión en los mismos.

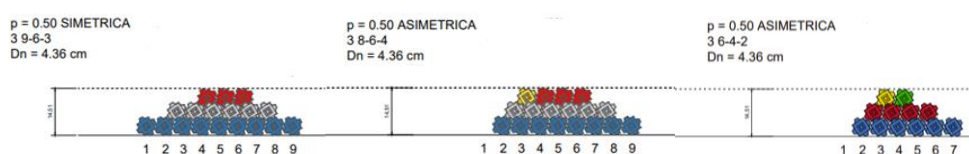


Fig. 75 Diferentes secciones ensayos en la realización del TFG. Fuente: LPC-UPV.

Puesto que se han ensayado 3 secciones diferentes, cabe destacar que las más estables son el modelo 2 y el 3, por la erosión sufrida por la primera fila de la primera capa del modelo 1 (el de la izquierda de la figura 75). Por tanto, las secciones más útiles son la 2 y 3. A su vez, habría que estudiar el coeficiente de transmisión de cada una para saber cuál elegir, teniendo claro que la tercera consume menos material para la misma altura (eso sí, con menos ancho).

En cuanto al daño, Mashadyan (2022) describe muy poco daño en HLCS de Cubípodos de tres capas, casi indestructibles.

La formulación descrita para estimar la transmisión (ec. 4.2), presenta resultados satisfactorios, aunque con margen de mejora. Podría, por ejemplo, utilizarse un polinomio que incorporara términos que no fueran lineales para tratar de conseguir una mayor precisión.

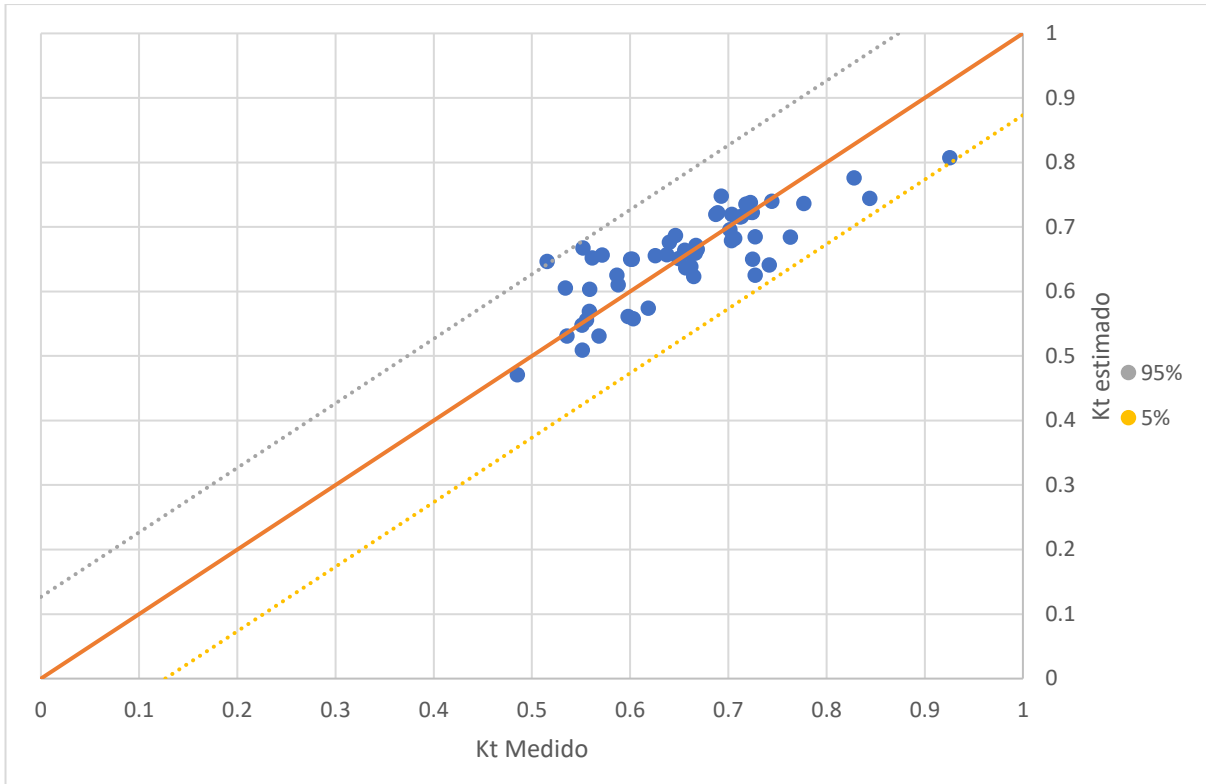


Fig. 76 Comparación de Kt estimado con la nueva fórmula y el medido en el laboratorio, con la banda de confianza del 90%. Fuente: elaboración propia.

Por último, cabe destacar que esta misma formulación podría utilizarse para estructuras similares, reproduciendo el proceso del cálculo de los coeficientes que multiplican a cada variable para que minimicen el error que se obtiene con esos ensayos.

Capítulo 6: Aplicación práctica

6. Aplicación práctica

6.1 Introducción

En este capítulo se va a desarrollar la aplicación práctica de una estructura homogénea de baja cota de coronación de Cubípodos. Esta pretende proteger el sur de la playa de Puerto Morelos de la acción del oleaje.

Los arrecifes del caribe mexicano se encuentran sometidos a muchas presiones. Por un lado, el aumento del turismo intensifica el uso de embarcaciones, de vertidos de aguas fecales... y por otro, el aumento de la temperatura del océano dificulta la formación de corales al disolver más CO₂ en el agua, reduciendo la capacidad de precipitación de los carbonatos.

A su vez, aquellas playas donde ha desaparecido el arrecife, están mucho más expuestas tanto a la acción normal del oleaje como a fenómenos extremos (huracanes).

Por ello, en este capítulo se desarrollará el diseño de una estructura que permita mitigar la ausencia de los arrecifes de forma que, con el paso del tiempo, puedan considerarse una parte más de los mismos al producirse una profunda colonización de las estructuras implantadas.

6.2 Protección costera de los Arrecifes en el caribe mexicano

La barrera de coral Mesoamericana se extiende a lo largo de la costa caribeña de México, Belice, Guatemala y Honduras. Ha protegido el litoral de estos países desde hace miles de años, permitiendo que se generaran grandes playas de arena y aguas turquesas. Sin embargo, el rol protector de los arrecifes ha ido disminuyendo como consecuencia de los huracanes y el pobre o nulo tratamiento de las aguas residuales, llevando a los ecosistemas a desarrollar algas en exceso y perder rugosidad (Osorio-Cano, 2019).

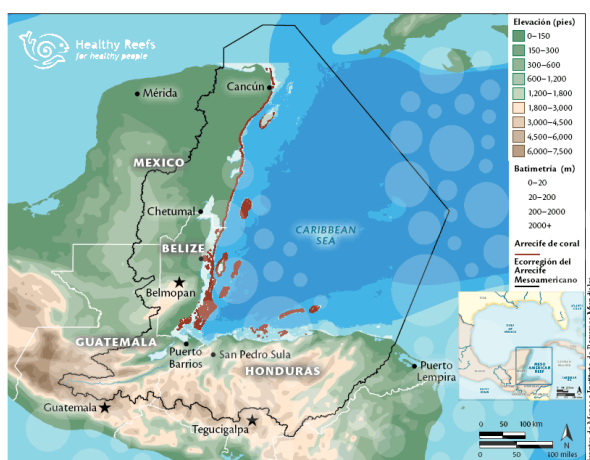


Fig. 77 Extensión del arrecife mesoamericano (sombreado en rojo). Fuente: Healthy Reefs.

Osorio-Cano et al.(2019) estudiaron la variación de la altura de ola significativa en función del coeficiente de rugosidad del arrecife simulando la zona de Puerto Morelos bajo su oleaje normal en Delph3DModel. Observaron que, para variaciones en k_r de tan solo 0.01, la altura de ola se reducía un 60%.

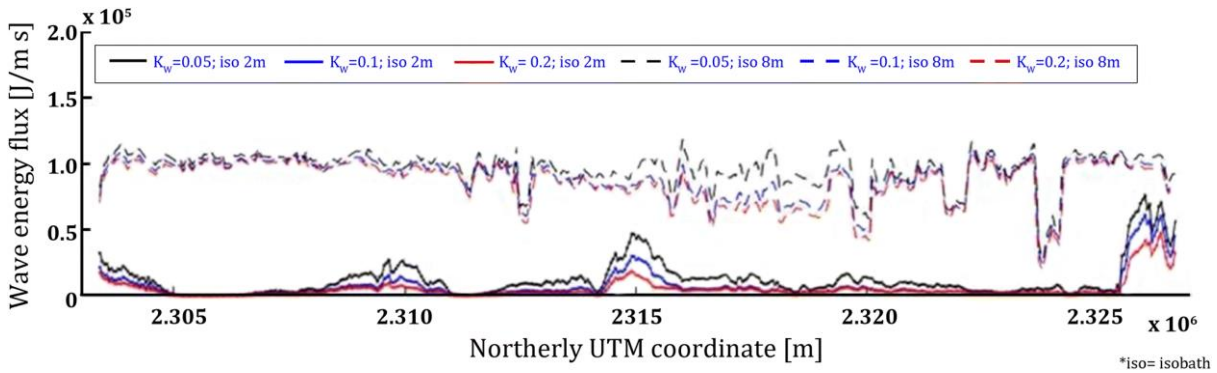


Fig. 78 Comparación del flujo de energía del oleaje entre 8 metros de profundidad y 2 metros de profundidad bajo escenarios de rugosidad diferentes. Fuente: Osorio-Cano et al., 2019.

Además, observaron que las zonas donde se había producido una mayor erosión en las playas coincidía con aquellas áreas donde el arrecife había desaparecido y había un mayor flujo de energía, es decir, una mayor capacidad de transporte.

De Alegría-Arzaburu et al. (2013) analizan las diferencias entre la playa de Puerto Morelos y Cancún (con y sin arrecife, respectivamente) situadas a tan solo 25 kilómetros de distancia. Tras simular mediante métodos numéricos la variación del perfil de la playa, obtienen que la playa de Puerto Morelos es bastante menos dinámica que la de Cancún, con variaciones de 0.5 y 2 metros respectivamente. Además, los flujos de energía calculados eran también menores (2.000 N/s contra 10.000-15.000 N/s), con el consecuente aumento de capacidad en el transporte de material.

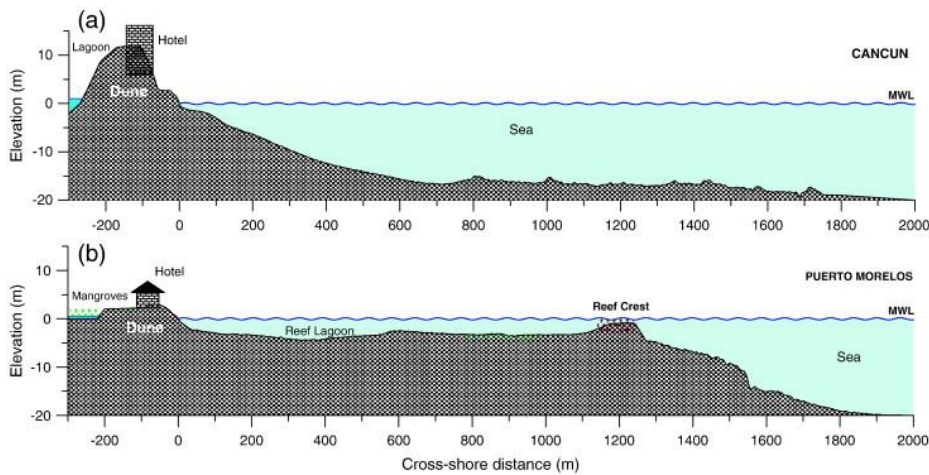


Fig. 79 Diferencia entre los perfiles de la playa de Cancún y Puerto Morelos. Fuente: de Alegría-Arzaburu et al., 2013.

6.2.1 Protección contra fenómenos climáticos extremos: los huracanes

Mariño-Tapia et al. (2014) analizan la influencia de los arrecifes de coral ante la llegada de huracanes a la costa del caribe mexicano. Para ello utilizan un modelo numérico, el DELFT 3D, recreando las condiciones climáticas que generó el huracán Wilma entre las playas de Cancún y de Puerto Morelos, separadas 25 Km.

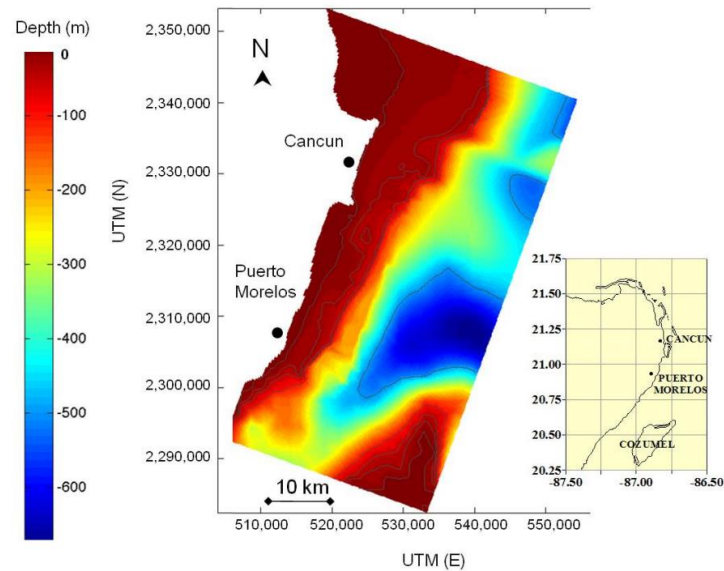


Fig. 80 Zona que comprende el estudio. Fuente: Mariño-Tapia et al., 2014.

Las imágenes de la figura 80, muestran los resultados de la simulación del modelo numérico: una corriente dominante a cierta distancia de la costa con dirección norte-sur (desde Cancún a Puerto Morelos). Esta, se mantuvo durante 3 días y medio, hasta que el huracán tocó suelo. Dentro de los lagos arrecifales, se puede ver claramente como el sedimento primero se transporta hacia la costa y después hacia el sur. Sin embargo, la característica principal de los lagos arrecifales es la disminución de las olas y de las corrientes.

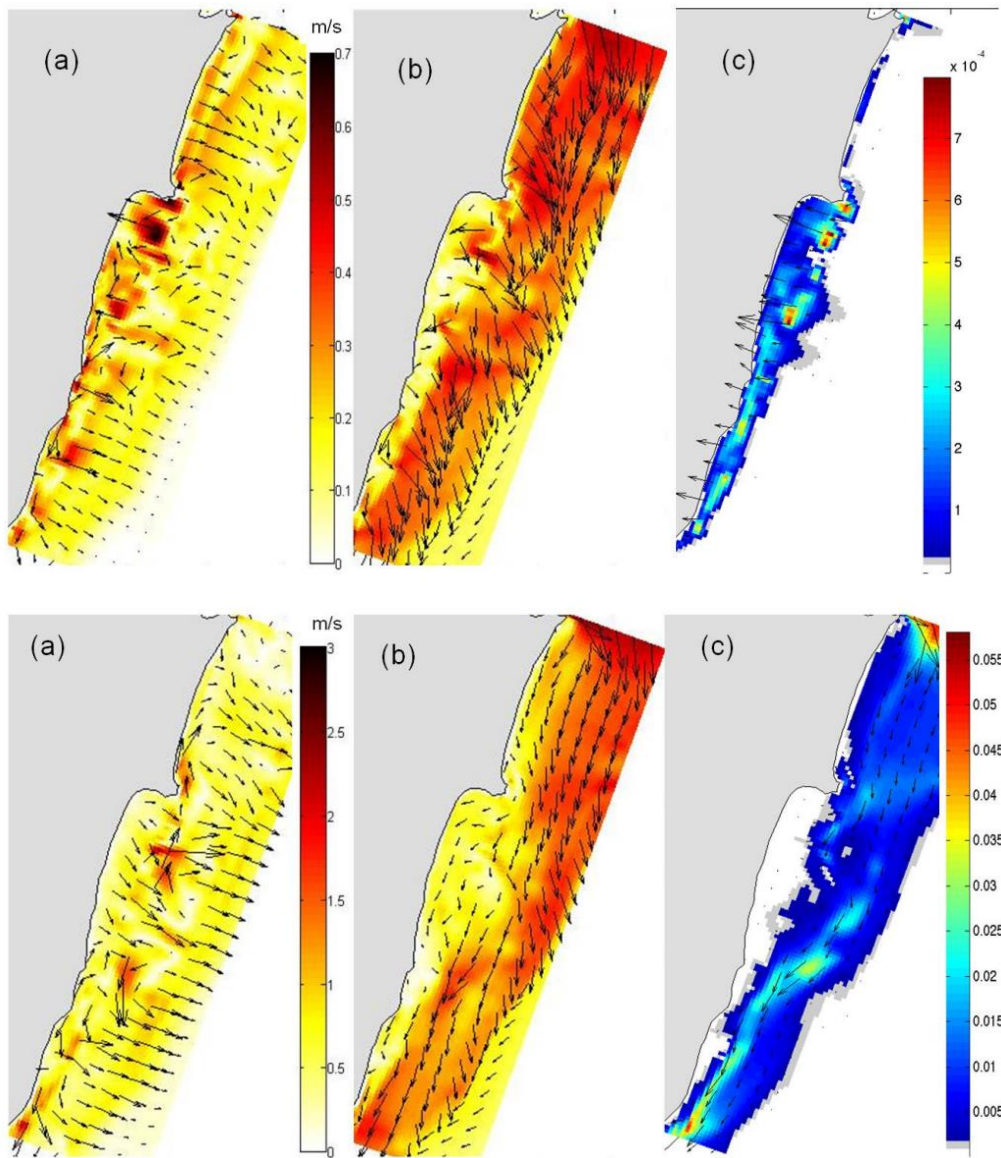


Fig. 81 Corrientes de fondo generadas por las olas (a), corrientes de fondo generadas por las olas y el viento (b) y patrón de transporte de sedimentos (c). La imagen superior se corresponde con el inicio de la tormenta y la inferior con el pico de olas más altas registradas. Fuente: Mariño-Tapia et al., 2014.

El paso del huracán y los efectos de los arrecifes y los lagos arrecifales de Puerto Morelos fueron tan extremos que, mientras la playa de Cancún sufría una extrema erosión, en Puerto Morelos se ganaron una gran cantidad de metros de playa. Para Mariño-Tapia et al. (2014) resulta sorprendente la acreción de grandes partes de playa en Puerto Morelos. Pese a no existir perfiles batimétricos de la zona antes y después, si se cuenta con fotografías que evidencian lo expuesto de forma clara (ver fig. 81).



Fig. 82 Comparación entre el antes y el después en las playas de Cancún (arriba) y Puerto Morelos (abajo). Fuente: Mariño-Tapia et al., 2014.

6.3 Arrecifes artificiales

En el año 2010, tras el paso del huracán Dean en el 2007 que ocasionó grandes daños en todo el Caribe mexicano, se construyeron dos arrecifes artificiales al sur de Puerto Morelos con el fin de controlar la erosión sufrida en esa playa. Las estructuras tenían 60 metros de largo y fueron colocados a la cota -2,5 m. con un francobordo de -0.5 m. Silva et al. (2016) estudiaron la estructura en el Coastal Engineering laboratory de la UNAM con una escala de 1:33.33 obteniendo coeficientes de reflexión del 20 al 35%, de transmisión del 50 al 75% y de disipación sobre el 40%.

La playa mostró un patrón normal de acreción y erosión, creciendo en los meses de mayo a octubre y decreciendo en el resto de meses, pero siempre con suficiente arena para que se puedan desarrollar las actividades turísticas (Silva et al, 2016).

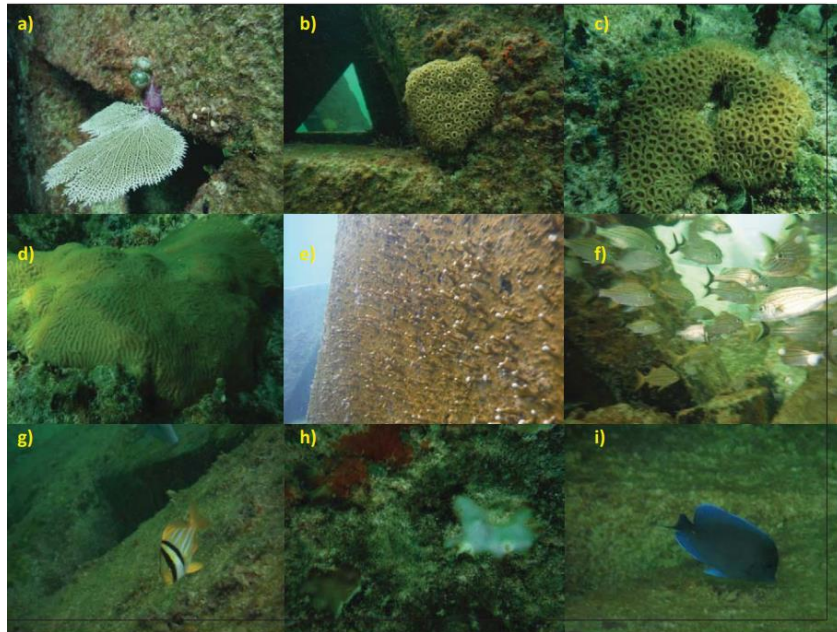


Fig. 83 (a) *Abánico de Venus (Gorgonia flabellum)*, (b) y (c) (*Palythoa caribaeorum*), (d) (*Diploria labyrinthiformis*), (e) *pólipos* y, (f), (g), (h) and (i) *el hábitat completo generado en el arrecife artificial*. Fuente: Silva et al., 2016.

El arrecife sirvió como base para la colonización de corales y otras especies propias del ecosistema caribeño mexicano. Pese a que puede considerarse un éxito el proceso de colonización del arrecife, hubieron diversos episodios de problemas con algas que el propio ecosistema se encargó de corregir y eliminar. En relación con esto, Silva et al. (2016) concluye que hay un gran número de variables que no pueden ser controladas y que la resiliencia de los ecosistemas se vuelve incierta ante variaciones radicales en las condiciones ambientales del entorno.

6.4 Localización

La aplicación práctica se localiza al sur de la playa de Puerto Morelos, en el estado de Quintana Roo, México.

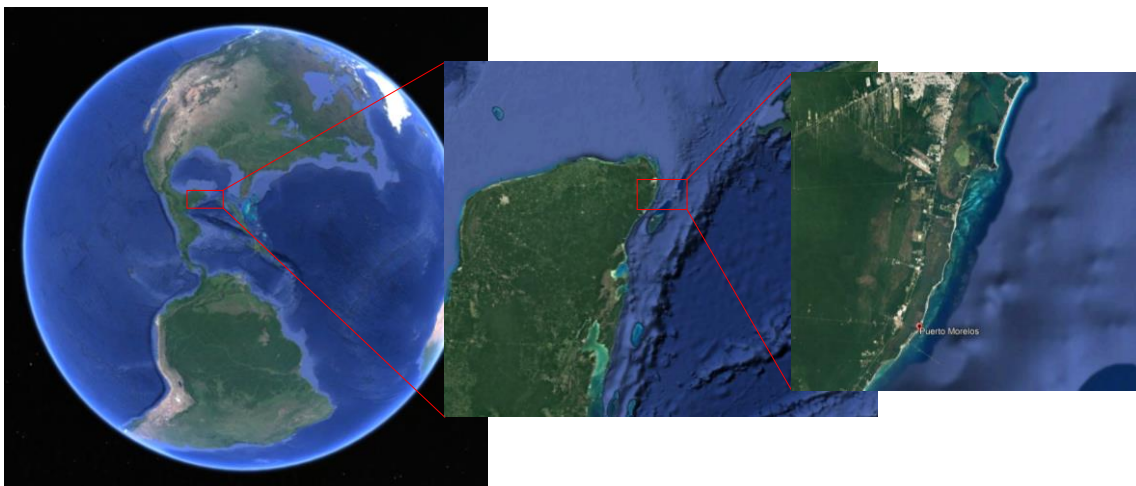


Fig. 84 *Localización de Puerto Morelos*. Fuente: Google Earth.

6.4.1 Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos

Es un polígono cuyas coordenadas geográficas extremas son 21°00'00" y 20°48'33" latitud norte y 86°53'14.40" y 86°46'38.94" longitud oeste, con el acceso principal en el poblado de Puerto Morelos.

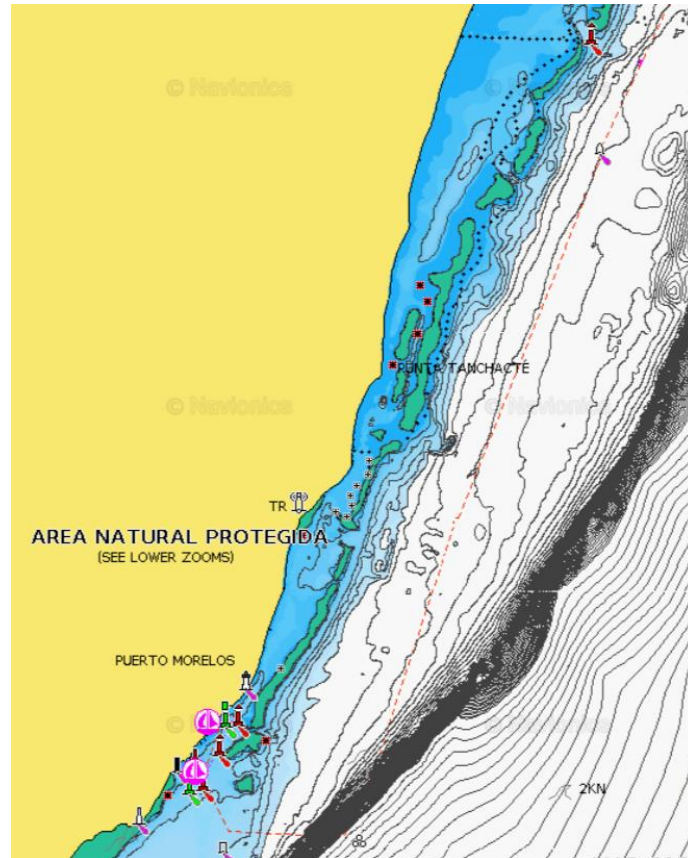


Fig. 85 Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (área formada por la línea punteada roja). Fuente: Navionics.

La barrera de coral frente a Puerto Morelos está declarada y protegida como Parque Nacional e integrada dentro de la segunda barrera de arrecifes más grande del mundo, sólo por detrás de la Gran Barrera de Coral de Australia. Al Caribe Mexicano le pertenecen más de 350 km de los 1000 Km a lo largo de los que se extiende por los países de Belice, Guatemala y Honduras.

6.4.2 Zona de la actuación

Como se ha explicado, el arrecife mantiene estable la playa y la protege frente a las condiciones extremas del oleaje. Sin embargo, el arrecife ha desaparecido de la zona más al sur de Puerto Morelos, dejando sin protección la playa que se encuentra justo al norte del puerto y que cuenta con una importante zona hotelera.

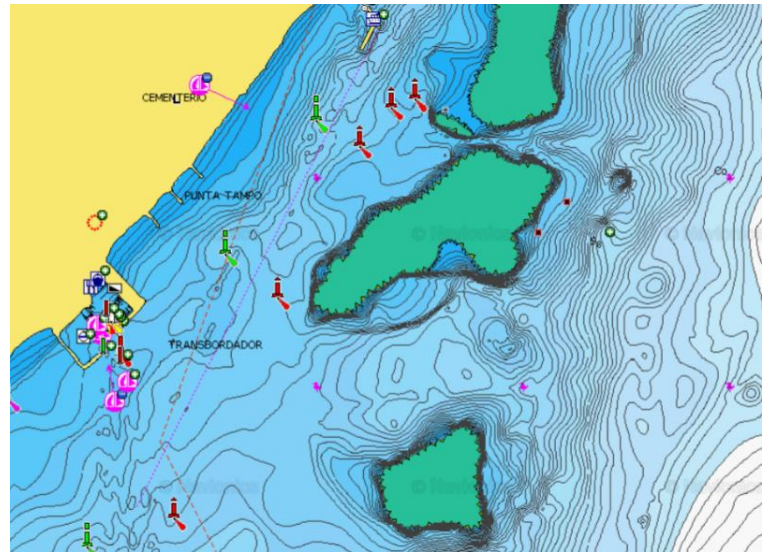


Fig. 86 En la imagen de la izquierda se puede ver: en el rectángulo azul, la zona de playa a proteger; y rodeado en rojo las zonas donde el coral ha desaparecido. En la imagen de la derecha, las zonas de arrecife de coral se encuentran pintadas de turquesa. Como se puede observar, se corresponde con las zonas donde se produce la rotura del oleaje. Fuente: Google Earth y Navionics.

Tanto es así, que incluso se han construido dos diques transversales, que no han conseguido eliminar el problema.

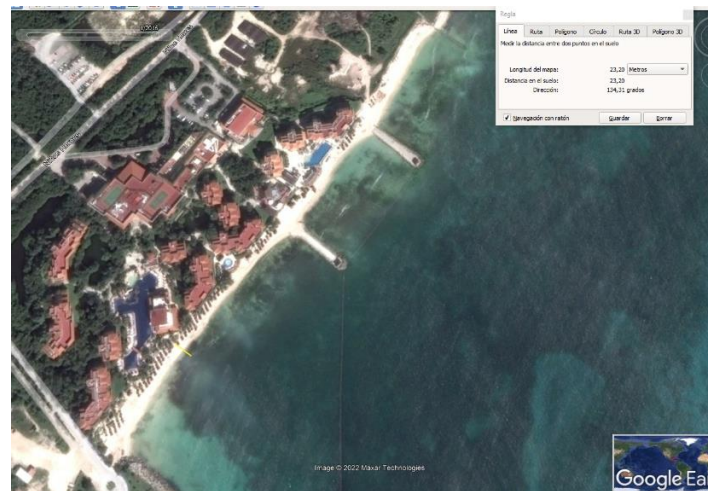
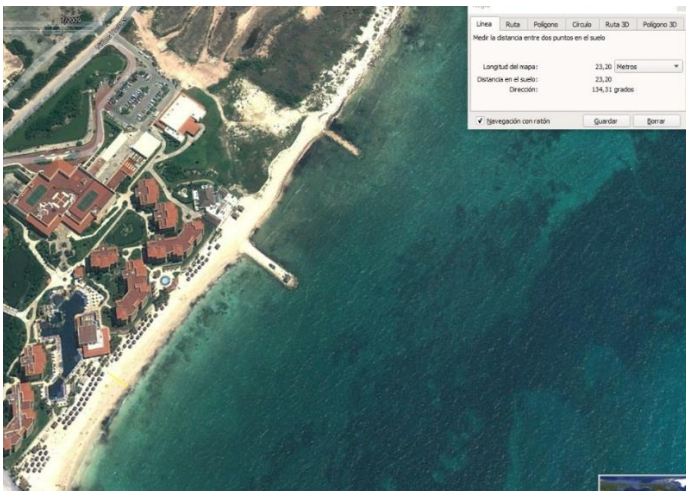


Fig. 87 Comparación de la playa a proteger entre los años 2009 y 2016. En el punto de la línea amarilla, la zona de arena se ha reducido desde los 23.2 metros hasta los 13.62 metros. Fuente: Google Earth.

Además, el problema se agrava cuando hay temporales (ver fig. 88).

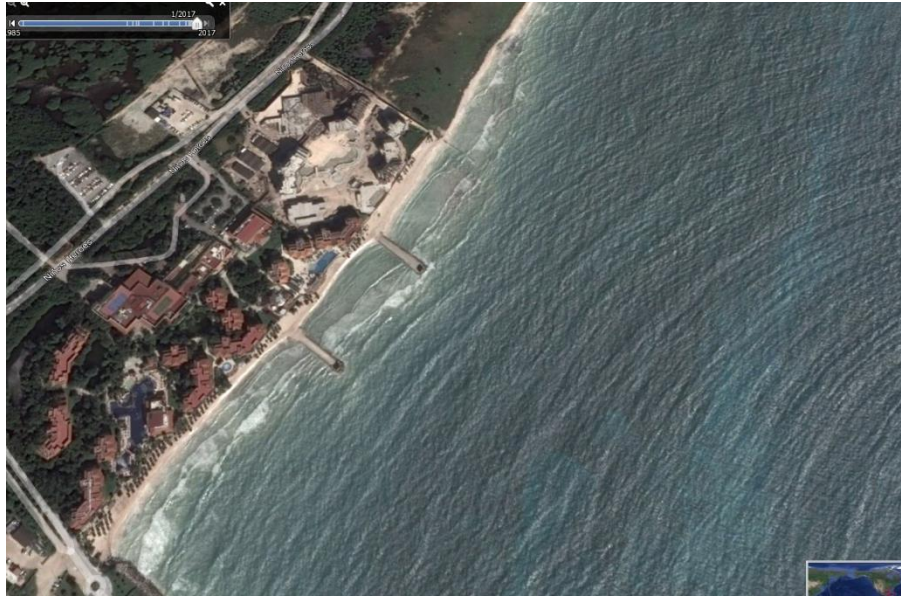


Fig. 88 Temporal en el año 2017, donde se puede ver como prácticamente desaparece la zona de arena. Fuente: Google Earth.

6.4.2.1 Clasificación de la costa

Según los diferentes procesos a los que la playa ha estado expuesta, esta se puede clasificar como costas bajas o altas.

En las costas altas, o de erosión, se ha producido una elevación del nivel medio del mar o un descenso de una zona de tierra cercana a la costa. Por el contrario, en las costas bajas o de depósito, ocurre lo contrario: o un descenso del nivel medio del mar o un ascenso de la zona de tierra. En el caso de esta playa, se trata de una costa baja.

Pedro Suarez Borges, clasifica las costas de una forma más compleja atendiendo a los siguientes factores:

- Naturaleza del fondo: existiendo playas de fondo móvil si se tratan de depósito o fondos fijos si se trata de costas erosionadas. En el caso de la playa de Puerto Morelos, el fondo es móvil con sedimentos finos.

- Estabilidad: se pueden diferenciar tramos hiperestables, si el tramo recibe más sedimentos de los que cede, de forma que la playa aumenta; estable, si recibe y cede la misma cantidad de sedimentos; e inestable, si la cantidad de sedimentos que cede es mayor que la que recibe. La zona de estudio se trata de un tramo inestable, aunque la zona más al norte se trata de un tramo estable.

- El perfil: la playa presenta un perfil completo cuando cuenta con todos los tramos característicos de ella: escarpe, playa seca, estrán y playa sumergida. Si alguno de los tramos no existe, el perfil se considera que está incompleto, lo que da lugar a playas submarinas o playas sustentadas.



Fig. 89 Clasificación genética de la costa según el perfil. Fuente: Chaparría et al., 2017.

Como puede observarse en la figura 86, se trata de un perfil incompleto puesto que presenta el lago arrecifal.

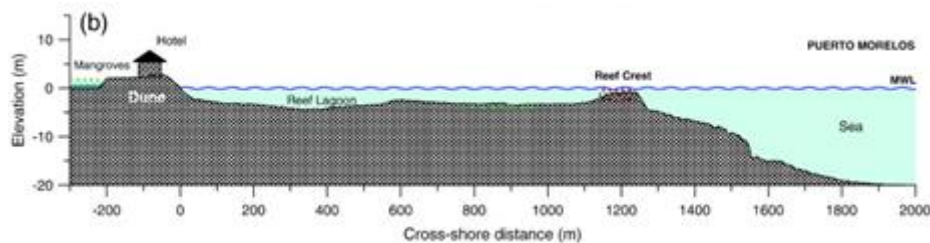


Fig. 90 Perfil medio de la playa de Puerto Morelos. Fuente: de Alegría-Arzáburu et al., 2013.

·Planta: para clasificar la costa en planta, hay que atender a 3 singularidades: másicas, geométricas y dinámicas.

Las singularidades másicas se refieren al aporte o pérdida de material debido a la desembocadura cercana de un río o cañón submarino. Las singularidades geométricas, se identifican con la disposición de la línea de costa, siendo positivas en caso de que el ángulo convexo hacia el mar o negativo si el ángulo formado es cóncavo. Por último, las singularidades dinámicas hacen referencia a si la playa se encuentra protegida por elementos como islas, arrecifes, espigones.... Siendo positivas en caso de que el abrigo sea a barlomar y negativo si el abrigo es a sotamar.

En el caso de la playa de estudio, no presenta singularidades másicas, pero si geométricas y dinámicas. Las geométricas y dinámicas, son positivas al tener un ángulo convexo y estar protegida por un arrecife de coral.

6.5 Clima marítimo

Escudero et al. (2021) estudian el clima marítimo de la zona utilizando los datos de la boya del NOAA 42056 en los años comprendidos entre el 2006 y el 2016. Definen dos situaciones distintas: el oleaje

anual, que es el registro total del oleaje incidente; y el de tormenta, donde solo se tienen en cuenta las olas con altura de ola incidente superiores a 2 metros.

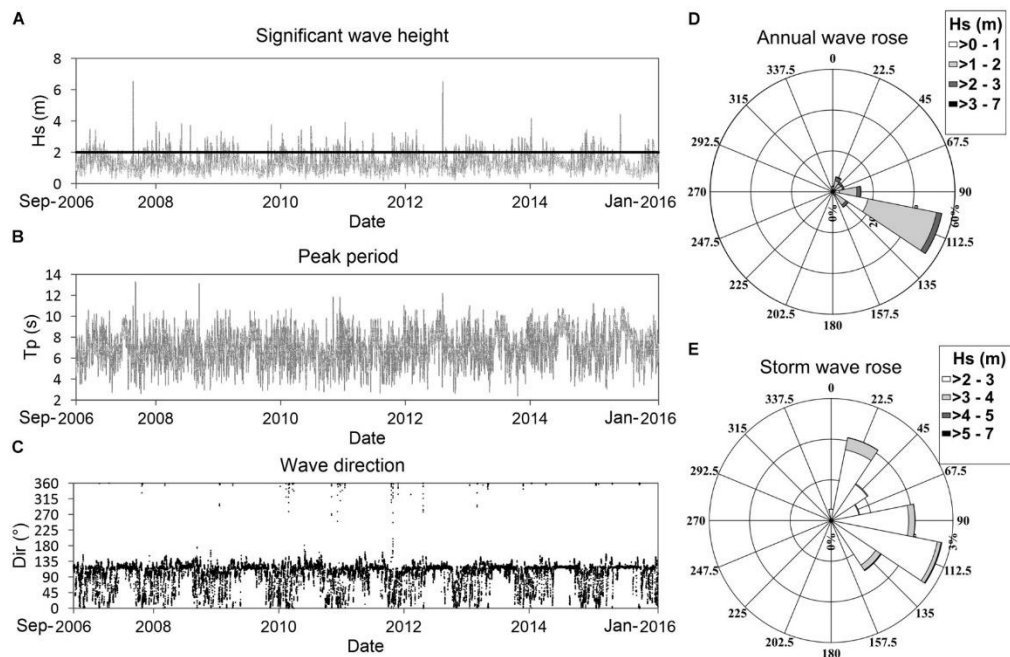


Fig. 91 Rosas del oleaje de las dos situaciones definidas y registros brutos de la altura de ola, el período y la dirección. Fuente: Escudero et al., 2021.

De esta forma, podemos asumir que el régimen medio será el del oleaje anual y para el régimen extremal utilizaremos el oleaje de tormenta. Escudero et al., 2021 establecen H_s de 1m y T_p de 6s con dirección Este-Sudeste como el régimen medio y H_s de 2m y T_p de 8s como una tormenta frecuente. Además, como régimen extremal estudiaremos la H_{max} de 7m con un T_p de 12 s.

6.6 Régimen de mareas

Las mareas se definen como oscilaciones del nivel del mar y pueden ser causadas por diferentes fenómenos. En el caribe mexicano, las mayores variaciones son producidas por la marea astronómica con amplitudes máximas de 30 cm y medias de 17 cm. Las mareas astronómicas son generadas por la acción de la atracción gravitatoria que ejercen la Luna y el Sol.

Además, hay diversos fenómenos meteorológicos que también producen variaciones en el nivel del mar. En la zona del caribe mexicano, el más influyente es el fenómeno de las corrientes del Yucatán. Esta corriente es parte de la corriente de la frontera oeste del Giro Subtropical del Atlántico Norte, fluyendo con dirección noreste a lo largo del Caribe Mexicano y cruzando hacia el golfo de México.

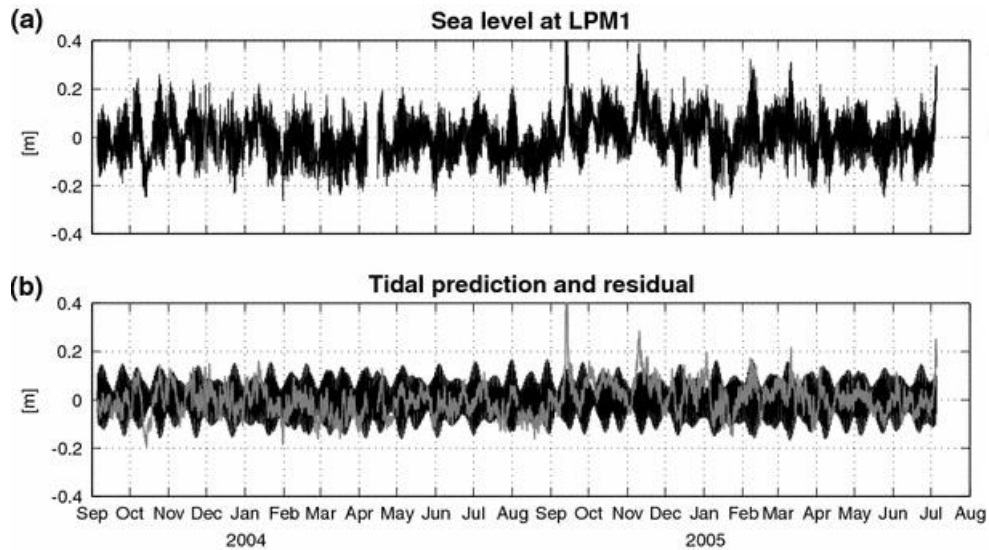


Fig. 92 Arriba, nivel del mar en Puerto Morelos; abajo, predicción de la marea astronómica (negro) y variación del nivel asociado a otros fenómenos, mayoritariamente la corriente del Yucatán (gris). Fuente: Coronado, 2007.

De esta forma, las variaciones de nivel son:

- Astronómicas máximas:

- Pleamar: +17 cm.

- Bajamar: -13 cm.

- Por las corrientes del Yucatán:

- Pleamar: +18 cm.

- Bajamar: -16 cm.

Sumando ambas, se obtiene:

- Pleamar máxima: 35 cm.

- Bajamar máxima: -29 cm.

A ello, habría que sumar las variaciones por mareas meteorológicas, que según la ROM 0.2 9.0 para mares sin marea es de 0.8 metros.

6.7 Influencia del cambio climático

El cambio climático está produciendo acciones climáticas cada vez más extremas. El aumento de la temperatura, de las lluvias y vientos extremos, o el aumento del nivel del mar son solo algunas de las consecuencias que está teniendo el aumento de CO₂ en la atmósfera por culpa del ser humano.

En el marco de este trabajo, los dos factores más relevantes son el aumento del nivel del mar y el aumento del oleaje incidente:

- Aumento del nivel del mar: en el Mar Caribe muestra un incremento positivo, con una tendencia de 2.0 mm/año, menor al promedio mundial de 3.2 mm/año (Ruiz-Ramírez, 2014). Este fenómeno resulta despreciable si tenemos en cuenta el aumento de la rugosidad que debería experimentar el dique al producirse la colonización.

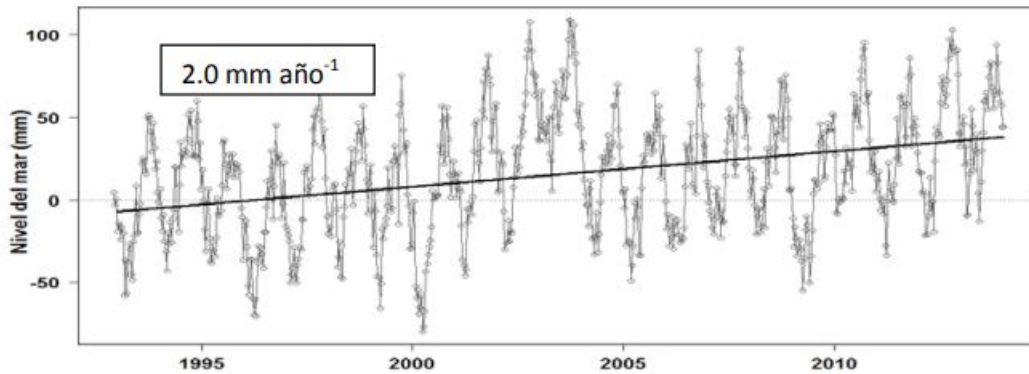


Fig. 93 Tendencia del nivel del mar en el Caribe. Fuente: Ruiz-Ramírez, 2014.

- Aumento del oleaje incidente: Lemos et al. (2019) estudian las variaciones que se producirán en el oleaje a lo largo del siglo XXI con métodos numéricos teniendo en cuenta los cambios en los regímenes de vientos. Para realizar el estudio, dividieron los océanos en sectores (ver fig. 94). La zona de estudio se encuentra dentro del sector TNAO, donde la previsión es una disminución de la altura de ola a lo largo del siglo XXI (ver fig. 94). Por ello, no se tendrá en cuenta, quedando del lado de la seguridad.

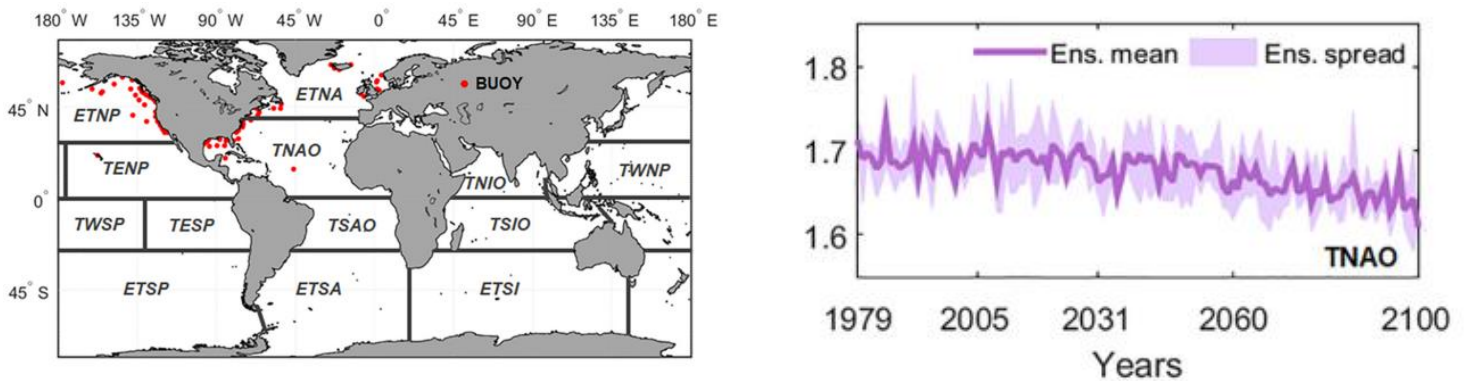


Fig. 94 Sectores en los que se ha dividido el mundo en el estudio (izquierda) y tendencia de la altura de ola media en aguas profundas en la zona de estudio. Fuente: Lemos et al., 2019

6.8 Diseño de la estructura

Para realizar el diseño de la estructura se ha tratado, como en todo momento, de imitar el arrecife de la zona. Por ello, el procedimiento de diseño será estimar el coeficiente de transmisión del arrecife como si fuese un LCS para después poder diseñar la estructura que mejor se adapte, utilizando la formulación descrita en el Capítulo 4. Análisis de la transmisión.

6.8.1 Estimación de la transmisión

Para estimar el coeficiente de transmisión, se va a estudiar al arrecife como si se tratara de un LCS, debido a su baja porosidad. Por ello, primero tenemos que definir una sección.

6.8.1.1 Definición de la sección transversal del arrecife

La sección del arrecife varía a lo largo del mismo. Por tanto, no se puede definir una sección exacta. Escudero et al. (2021) definen diferentes secciones del arrecife de Puerto Morelos para estudiar la influencia de estos en la erosión de la playa:

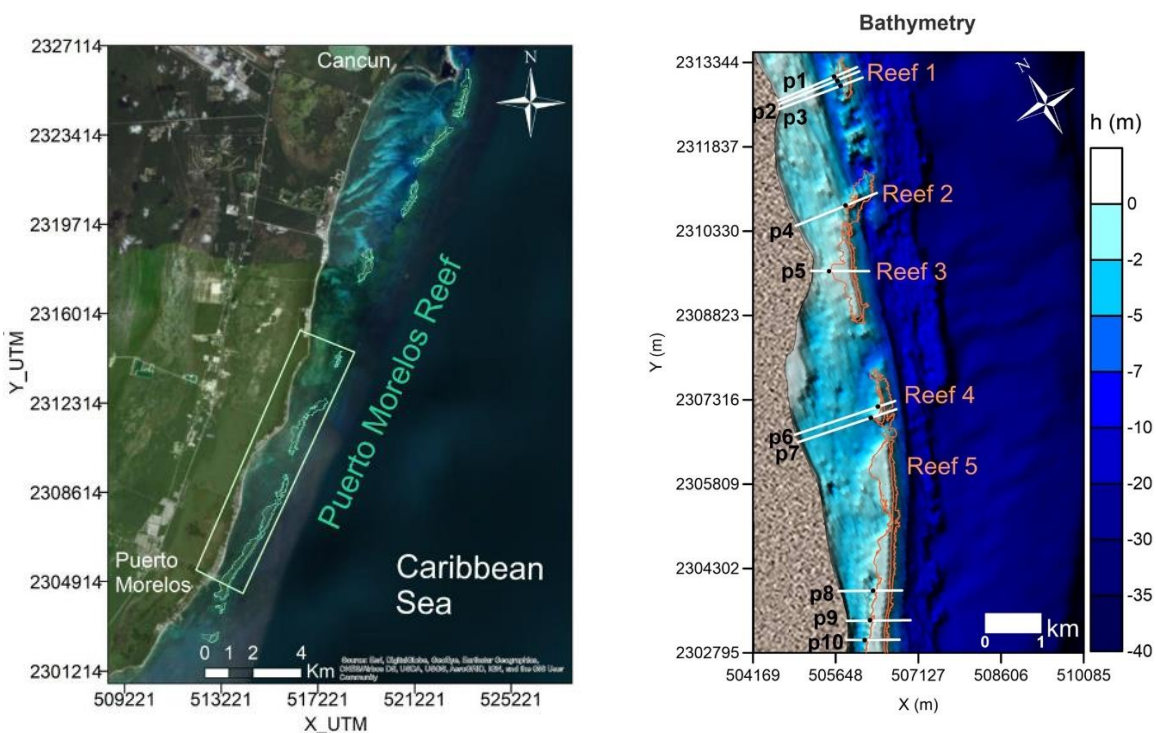


Fig. 95 Zona y perfiles estudiados por Escudero et al. Fuente: Escudero et al., 2021.

Como puede verse en la figura 95, los perfiles 8,9 y 10 se encuentran justo al norte de la zona en la que se quieren construir los arrecifes artificiales.

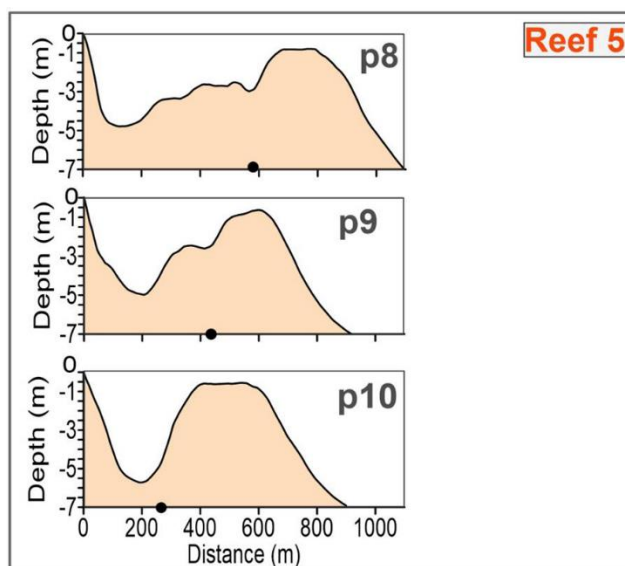


Fig. 96 Perfiles de las secciones transversales 8, 9 y 10. Fuente: Escudero et al., 2019.

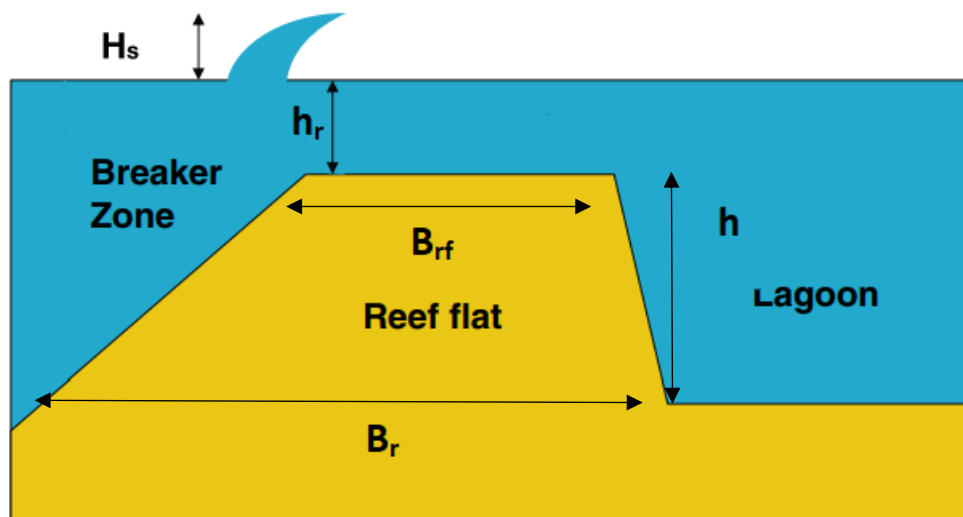


Fig. 97 Parámetros que definen una sección del arrecife. Fuente: elaboración propia.

Perfil	B_r	B_{rf}	h_r	h
8	400	120	0.8	2.2
9	400	105	0.6	1.9
10	400	200	0.6	1.9
Medio	400	142	0.667	2

Fig. 98 Tabla resumen de las diferentes secciones del arrecife frente a la zona de la actuación. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Escudero et al., 2019.

6.8.1.2 Cálculo del coeficiente de transmisión

El cálculo del coeficiente de transmisión se ha realizado con la ecuación Van der Meer (1990) para LCS. Por ser las situaciones más extremas se ha estimado en pleamar y bajamar máxima, y con la altura

de ola incidente máxima. Pese a que se trata de 7 metros en aguas profundas, por los procesos de asomeramiento y refracción (K_r y K_s) comentados en el apartado 2.2.1.2, la ola realmente incidente es mucho menor.

Para el cálculo de K_r y K_s , se ha utilizado un ábaco desarrollado por el cuerpo de militares de los EEUU (U.S Army Corps of Engineers) y recogido en el Shore Protección Manual (SPM). Introduciendo los valores de la dirección de incidencia del oleaje y el período, permite obtener el coeficiente $K_r \cdot K_s$.

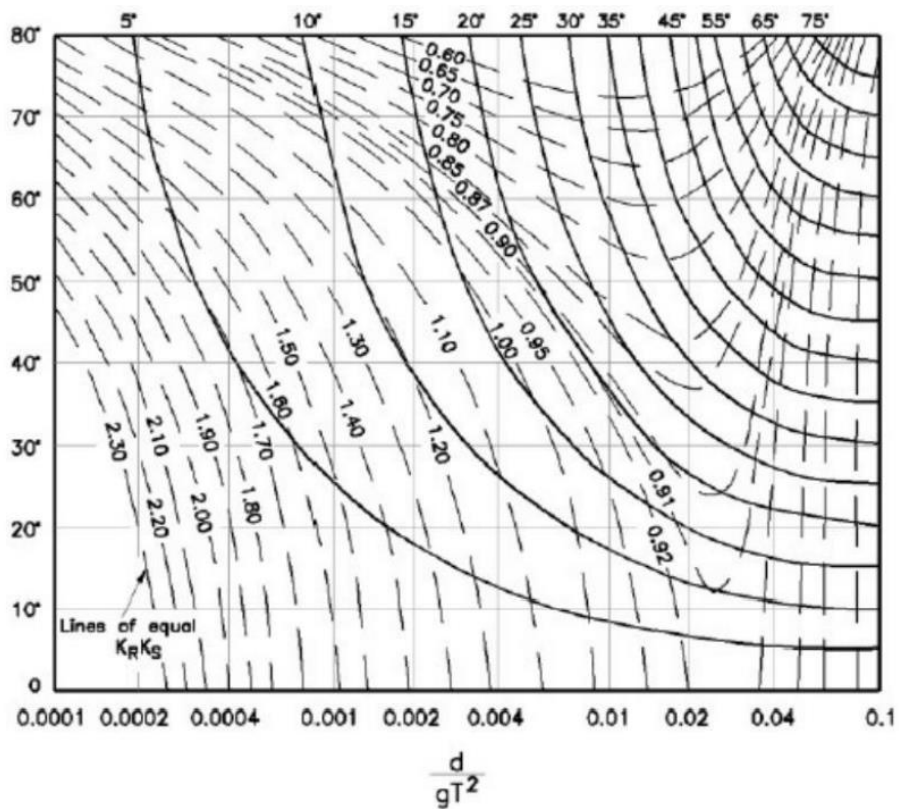


Fig. 99 Ábaco para la obtención del coeficiente de refracción y asomeramiento. Fuente: SPM (1984).

De esta forma, con un ángulo de incidencia de los frentes de oleaje con respecto a la batimetría en aguas de 12,5 N° y $\frac{d}{g \cdot T^2} = 0.0046$, donde:

d es la profundidad del pie del dique, fijada en -6.5 metros

g es la aceleración de la gravedad

T^2 el período del oleaje

Se obtiene un valor de $K_r \cdot K_s$ de 1,18. De esta forma, la altura de ola sería de 8.26 m. Sin embargo, además de la altura de ola propagada, cabe conocer la limitación por fondo (H_b), ya que supondrá el límite en la altura de ola capaz de propagarse debido a la rotura por fondo. Considerando:

$$H_b = 0.55 * h$$

Donde h es la altura del nivel del mar

De esta forma, el oleaje máximo que se puede recibir con los niveles del mar definidos anteriormente son (con la ecuación 2.7):

Hmax, pleamar: 4.21

Hmax, bajamar: 3.22

Así, se obtienen los siguientes Kt (que se intentarán replicar con la estructura):

Kt, pleamar: 0.589

Kt, bajamar: 0.492

6.8.2 Dimensionamiento de la estructura

Para el dimensionamiento de la estructura se ha seguido el proceso contrario al de la obtención de la fórmula. Sabiendo el oleaje incidente y los coeficientes de la misma, se ha tratado de minimizar el error entre el Kt de la estructura y el obtenido del arrecife. Para ello, las dos variables que tenían que ser resueltas eran la altura y el ancho de la estructura, siendo más restrictiva la primera por no querer entorpecer las vistas al tratarse de un sitio turístico.

De esta forma, usando *Solver* y la ecuación de 4.2, se obtiene que la altura de la estructura debería ser de 6.2 metros y de 39.78 metros de ancho. Sin embargo, como habíamos dicho, el factor limitante y que usaremos para dimensionar las piezas es la altura de la estructura.

Como sabemos los coeficientes de capa, que no es más que una relación entre el diámetro nominal y la altura de los Cubípodos, podemos calcular el tamaño de estos en función de su altura planteando la siguiente ecuación sencilla:

$$H_{total} = K_{A1} \cdot D_n + K_{A2} \cdot D_n + K_{A3} \cdot D_n = 1.30 \cdot D_n + 1.05 \cdot D_n + 1 \cdot D_n$$

$$6.2 = 3.35 \cdot D_n$$

$$D_n = 1.85 \text{ m}$$

Así, utilizando los coeficientes de capa y la altura total se obtiene un Dn=1.85 m, con un peso de 13.99 tn:

$$W = \gamma * Dn^3 = 2.21 * 1.85^3 = 13.99 \text{ tn}$$

En cuanto al ancho de la estructura, ningún modelo se acerca al que minimiza el error. Sin embargo, con una estructura como la del modelo 2 es como se maximiza el ancho. Así, la estructura queda definida con una altura total de 6.2 metros y un ancho de 17.31 metros (utilizando la ec. 4.1) de 17.31 metros. Los coeficientes de transmisión obtenidos son de 0.655 y 0.733. Pese a que los coeficientes de transmisión del arrecife natural sean más bajos, con el paso de los años y cuando se produzca la colonización del arrecife artificial, este disminuirá su K_t al producirse la colonización y el aumento de rugosidad, como se ha explicado en apartados anteriores.

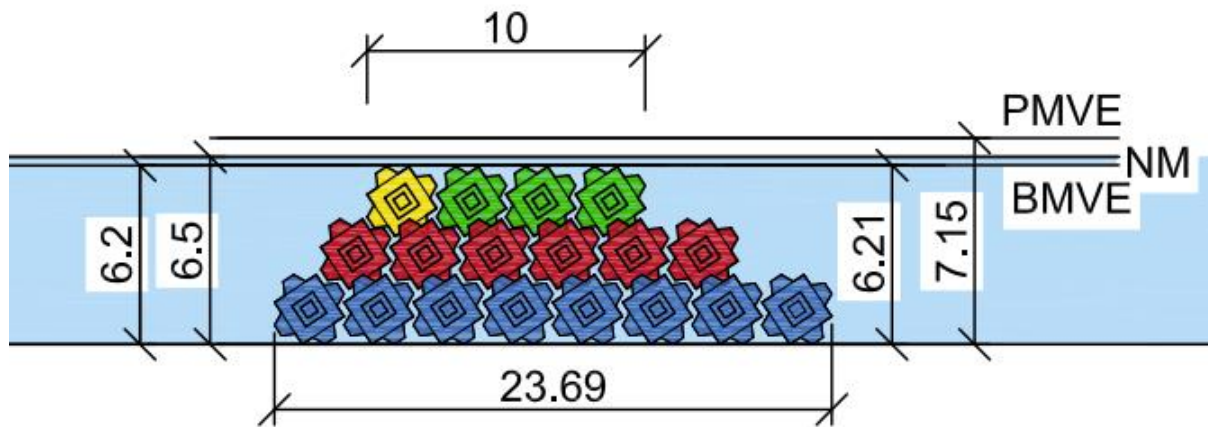


Fig. 100 Croquis de la estructura a disponer. Fuente: elaboración propia.

6.8.3 Diseño en planta

Como se ha visto a lo largo de los diferentes apartados, la estructura se dispone en la batimétrica -6.5 metros, a una distancia aproximada de 1100 metros.

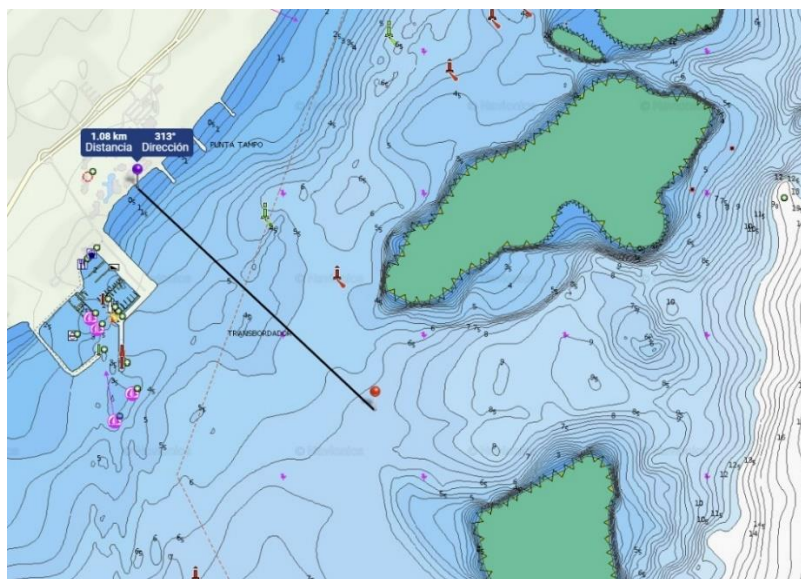


Fig. 101 Distancia de la playa al dique. Fuente: Navionics.

Para llevarlo a cabo, se utilizará la malla descrita en el apartado 3.4.2, pero con los valores adaptados al diámetro nominal dispuesto en la estructura. Es decir, con los siguiente valores:

$$\frac{a}{D_n} = 1.32 \rightarrow a = 2.44$$

$$\frac{b}{D_n} = 1.52 \rightarrow a = 2.82$$

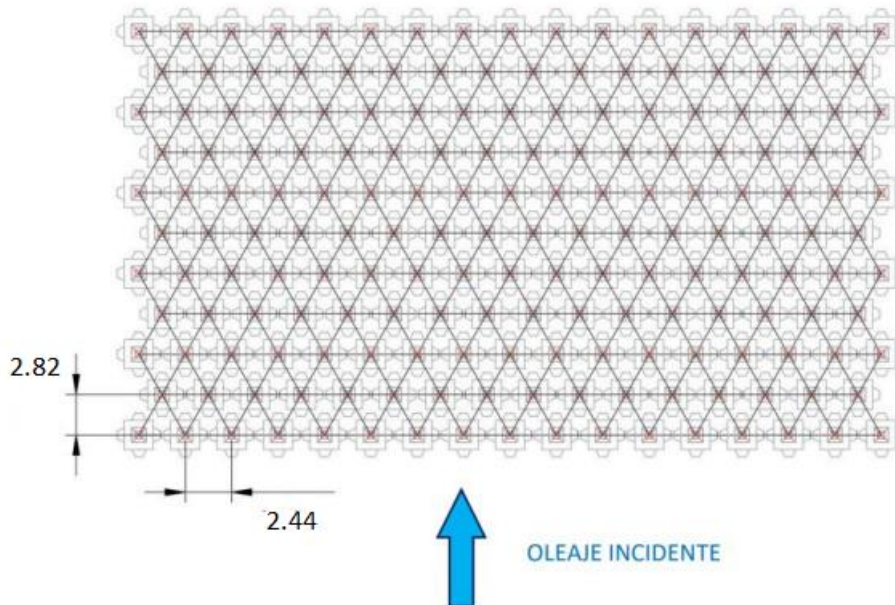


Fig. 102 Malla de colocación utilizada en la construcción del dique. Fuente: elaboración propia.

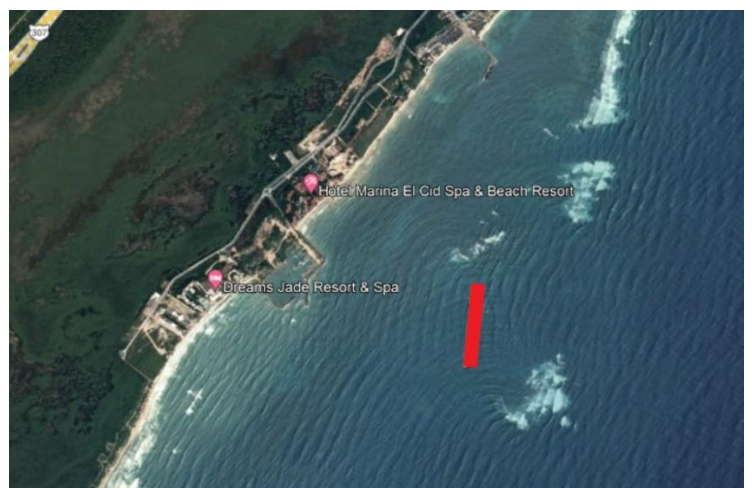
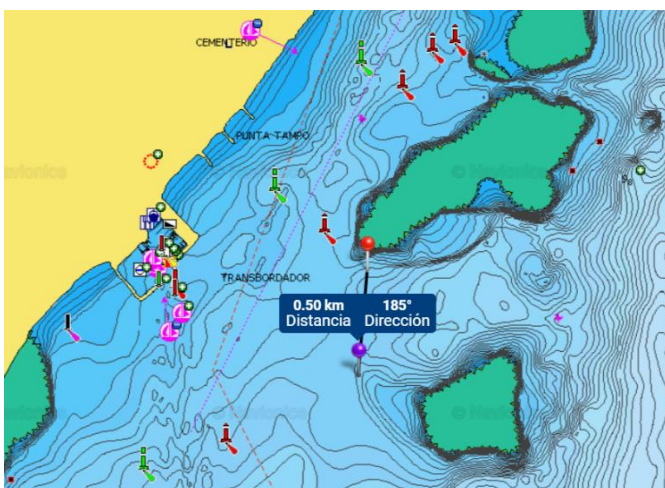


Fig. 103 Situación en planta del dique construido, donde se puede ver su longitud. Fuente: Navionics y Google Earth.

6.8.4 Comportamiento frente a acciones extremas

Como se ha ido comentando a lo largo del trabajo, existe la posibilidad de que se produzca el paso de un huracán justo en la zona de la obra. Esto, provocaría un incrementado del nivel del mar mucho mayor al considerado. Sin embargo, la estructura se espera que se siga comportando de forma estable

ya que al aumentar el francobordo la interacción con el oleaje será mucho menor. Además, también se ha comentado que son muy estables frente a prácticamente cualquier altura de ola. Sin embargo, su capacidad disipadora de energía resultaría también reducida, siendo muy posible que se produzca erosión en las playas que trata de proteger.

Cabría tener la tentación de dimensionar para intentar protegerse de este fenómeno, pero además de remoto resultaría carísimo y un sobredimensionamiento brutal para las condiciones normales de funcionamiento.

6.9 Procedimiento constructivo

En el siguiente apartado se describirá de manera pormenorizada, el procedimiento constructivo a seguir para llevar a cabo un dique homogéneo de baja cota de coronación de Cubípodos por medios marítimos. Cabe destacar que el procedimiento a seguir será muy similar al de cualquier obra que incorpore Cubípodos.

6.9.1 Fases

6.9.1.1 Fabricación de las piezas

Para la fabricación de las piezas se emplean encofrados verticales, específicamente diseñados para desencofrar verticalmente a las 6 horas de hormigonado, permitiendo reducir los tiempos y los costes, y alcanzar elevados rendimientos. El encofrado está compuesto por una base y 6 articulaciones que permiten su llenado y vibrado de forma homogénea.



Fig. 104 Encofrados verticales del Cubípedo. Fuente: El Manual del Cubípedo, 2015.

Debido a las grandes ventajas que presenta este tipo de encofrados, se pueden alcanzar hasta 4 puestas al día. Además, no se necesitan losas de nivelación, permitiendo trabajar en líneas compactas sin tener que transportar excesivamente los encofrados. Puesto que el hormigonado ha de realizarse

desde arriba, junto a la línea de encofrados deberá construirse un camino elevado que permita el paso de los camiones y el vertido del hormigón.



Fig. 105 Línea de fabricación de Cubípodos en el puerto de Málaga. Fuente: Web del Cubípodo.

Cabe destacar que la calidad del hormigón no resulta un asunto crítico en este tipo de piezas al ser masivas, lo que supone una reducción de costes y facilita la obtención de proveedores respecto a otras piezas. Además, los Cubípodos presentan cierta conicidad, lo que les permite un desencofrado más sencillo.

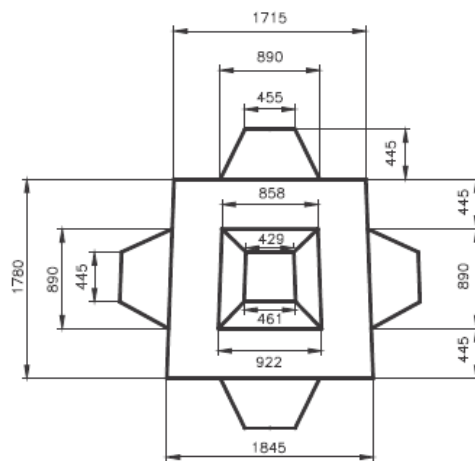


Fig. 106 Dimensiones reales de un Cubípodo de 16 t. donde se puede apreciar la cierta conicidad. Fuente: Manual del Cubípodo, 2015.

6.9.1.2 Almacenamiento

Gracias al carácter cúbico de la pieza, se pueden almacenar los Cubípodos en diferentes alturas, lo que reduce el tiempo, los costes y el espacio. Para poder acopiarlos, primero se ha de nivelar el terreno y después hay que excavar una serie de surcos que permitan introducir las protuberancias en ellos de

forma que la primera capa se mantenga estable. Los niveles superiores se van colocando apoyando un Cubípodo en los dos justamente inferiores (ver fig. 107).



Fig. 107 Acopio de Cubípodo en el laboratorio (izquierda) y en el puerto de Malaga (derecha). Fuente: web del Cubípodo.

6.9.1.3 Manipulación

La manipulación de las piezas se puede realizar mediante eslingas o pinzas de presión en el parque de almacenamiento, pero por razones de seguridad se suele optar por pinzas de presión dobles ya que no son necesarios operarios que muevan las eslingas. En la puesta en obra se utilizarán pinzas simples.



Fig. 108 Manipulación de Cubípodos en el parque de almacenamiento con pinzas de doble presión. Fuente: Web del Cubípodo.

6.9.1.4 Transporte

El transporte desde el parque de acopio hasta el emplazamiento de la obra se puede realizar por medios terrestres o marítimos. En este caso, se realizará en dos fases. Primero, los Cubípodos se cargarán en camiones góndola que transportarán los Cubípodos hasta un cargadero donde una grúa los cargará en una pontana. Posteriormente, la pontana se desplazará hasta la zona de la obra.

6.9.1.5 Colocación

En obra, los Cubípodos se colocarán con pinzas de presión simples y una grúa sobre una plataforma Jack-up. La plataforma Jack-up cuenta con unos spuds que le permiten anclarse al fondo marino y trabajar de manera estable. La pluma se dejará caer, posicionando el centro del Cubípedo en la posición exacta definida por la malla, gracias a la ayuda del posicionamiento GPS. Los rendimientos obtenidos se encuentran entre 8 y 12 Cubípodos/hora.



Fig. 109 Grúa Jack-up. Fuente: Google imágenes.

6.9.2 Maquinaria y equipos

A continuación, se expone la maquinaria y equipos necesarios para la realización el total de la obra:

- Encofrados con rendimientos de 3 Cub/día.
- Camiones hormigonera para realizar el vertido del hormigón en los diferentes encofrados.
- Grúas y pinzas para izar los encofrados una vez haya fraguado el hormigón.
- Grúas para acopiar los Cubípodos y cargarlos en los camiones góndola con pinzas de doble presión (Pueden ser las mismas que las del punto anterior).
- Camiones góndola para transportar los Cubípodos hasta el cargadero.
- Pontona para el transporte desde el puerto hasta el emplazamiento de la obra.
- Remolcadores para el transporte de las pontonas.
- Plataforma Jack-up con grúa para la colcoación de los Cubípodos en la obra. Debe contar con sistema GPS y pinzas de presión simple. Rendimientos entre 8 y 12 Cubípodos/hora.

6.9.3 Espacios

La fabricación y el acopio de Cubípodos se realizará en un espacio amplio y que permita el acceso a los camiones. Además, debe estar cerca del punto de embarque de los Cubípodos en las pontonas que los transporten desde la zona de carga hasta la obra. Por ello, se ha optado por elegir el embarcadero de Marina Cid.



Fig. 110 Puerto y zona de fabricación y acopio (en negro). Fuente: Google Earth.

6.10 Programa de trabajos

Es necesario realizar una estimación del tiempo de ejecución necesario para llevar a cabo la construcción del dique planteado. Además, hay que tratar de minimizar el coste y el plazo de ejecución.

La organización de las diferentes actividades se puede dividir en trabajos previos, fabricación y acopio de Cubípodos, construcción de diques, gestión de residuos y actividades relacionadas con la seguridad y salud. Tanto la gestión de los residuos como la seguridad y salud serán actividades continuas y que habrá que tener de forma integral a lo largo de toda la obra.

En los apartados siguientes se definen los tiempos necesarios para cada una de las actividades mencionadas. Hay que tener en cuenta que se va a trabajar 5 días a la semana, unos 20 días de trabajo mensual de 12 horas diarias

6.10.1 Trabajos previos

Como antes de realizar cada obra, se han de llevar a cabo una serie de trabajos previos, en este caso: preparación del parque y almacenamiento de Cubípodos, preparación y habilitación de la zona de

carga, la instalación de casetas de obra, de replanteo, de mantenimiento de equipos, el vallado y señalización...

Se estima una duración total de 3 semanas.

6.10.2 Fabricación y acopio de Cubípodos:

Por la forma que presenta la malla de colocación de la primera capa y la forma de disponer los Cubípodos en las siguientes, un dique de una longitud determinada, presentará filas con diferencia de 1 unidad alternativamente. Esto es, si una capa presenta 9 filas; 5 tendrán x Cubípodos y 4 x-1 Cubípodos de forma alterna. Así, para definir el número de piezas totales se sigue el proceso:

<i>Capa</i>	<i>Longitud/a</i>	<i>N filas</i>	<i>Nfilas, capa</i>	<i>Cubípodos</i>
1	206	5		1030
	205	4	9	820
2	206	3		618
	205	3	6	615
3	206	2		412
	205	2	4	410
Total				3905

Para construir los Cubípodos, se contará con un total de 40 encofrados, y se trabajará en turnos de 12 horas, de modo que se podrán producir 2 Cubípodos por encofrado y día.

De esta forma, el tiempo necesario para construirlos todos será:

$$3905 = 40 * 2 * x$$

$$x = \frac{3905}{80} = 48.81 = 49 \text{ días}$$

Se necesitarán 49 días para llevar a cabo la construcción de todos los Cubípodos. Puesto que entre la construcción de los Cubípodos y su colocación en obra han de transcurrir como mínimo 28 días, primero se construirán en su totalidad y se almacenarán y después se irán colocando. A su vez, de esta forma se evita que si hay retrasos en los suministros de hormigón por cualquier problema la obra quede paralizada una vez la Jack-Up esté en la zona, que como se ha dicho es la maquinaria más cara y, por tanto, la que condiciona.

6.10.3 Construcción de los diques

Para la construcción de los diques se utilizará una plataforma Jack-Up, esta tiene una capacidad de colocar 12 Cubípodos/hora. Como se trata de turnos de 12 horas (que terminan siendo 10 horas efectivas, pues se necesitan 1 para ir y acoplarse y otra para volver). De esta forma, en cada turno se colocarían 120 Cubípodos. Así:

$$3905 = 120x \rightarrow x = 32.54 \approx 33 \text{ días}$$

Por tanto, serán necesarios 33 días para realizar toda la colocación. Se va a considerar que no hay problemas con el clima, ya que la mayoría del tiempo las alturas de ola son muy reducidas permitiendo la ejecución de la obra. Sin embargo, en el caso de alguna tormenta con alturas de ola por encima de 1m, habría que suspender las operaciones y regresar a puerto.

A su vez, y como ya se ha comentado, como la plataforma Jack-Up es la maquinaria más cara, se va a tratar de maximizar su producción. Por ello, debemos de calcular el número de pontonas necesarias para que la plataforma nunca deje de trabajar. Así, teniendo en cuenta que la distancia del cargadero a la zona de la obra es de 1.76 millas náuticas y una velocidad de 10 nudos para los remolcadores, las pontonas tardarán en ir y en venir:

$$t_{transporte} = \frac{1.76 \text{ millas náuticas}}{10 \text{ nudos}} * 2 = 0.352 \text{ horas}$$

A su vez, como tienen una capacidad de carga de 260 tn:

$$N_{cubípodos} = \frac{260 \text{ tn}}{14 \frac{\text{tn}}{\text{cubípedo}}} = 18.57 \approx 18 \text{ Cubípodos}$$

Para cargarlos, con una grúa con rendimientos de 10 cub/h, necesitaremos 1.8 horas. Sumando ambos tiempos se obtienen 2.152 horas para 18 Cubípodos o 8.36 cub/h.

Si igualamos el rendimiento de la Jack-Up al de las pontonas, obtendremos el número de estas que necesitamos. Así:

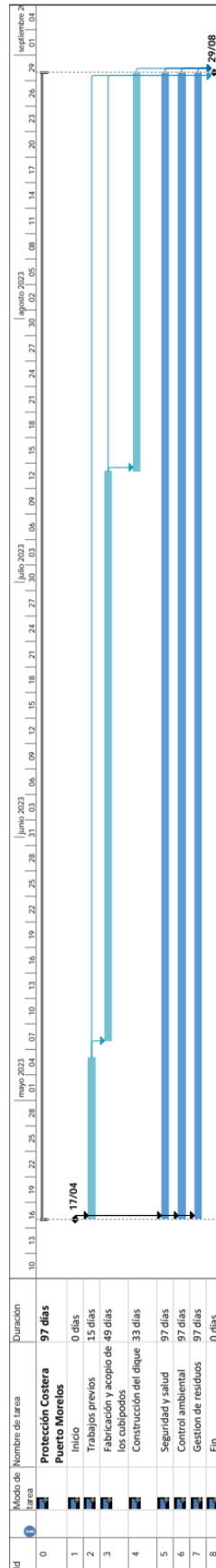
$$10 = 8.36x \rightarrow x = 1.195 \approx 2 \text{ pontonas}$$

Cabe destacar que, si se empieza a cargar la primera pontona a la vez que sale la grúa, el rendimiento de la misma sería menor al indicado. Por ello, del día anterior, se quedará una pontona cargada en puerto esperando ser transportada justo cuando comiencen las operaciones al día siguiente.

6.10.4 Gestión de residuos, seguridad y salud y control ambiental

La gestión de residuos, la seguridad y salud y el control ambiental son de obligado cumplimiento en todo tipo de obras. A su vez, resulta fundamental que se extienda durante la duración de toda la obra.

6.11 Diagrama de Gantt



6.12 Valoración económica

Para realizar una estimación económica de la obra propuesta para la protección costera, se van a tener en cuenta los precios descritos por Lozano (2021).

6.12.1 Trabajos previos

Lozano (2021) valora el total de trabajos previos en 17.500 €, repartidos de la siguiente forma: 15.000 € la unidad de delimitación y acondicionamiento del parque de fabricación y acopio, 2.000 € el establecimiento de la caseta de obra y resto del servicio del personal y 500 € la señalización y balizamiento de la zona.

6.12.2 Fabricación y acopio de los Cubípodos

Para el cálculo de los costes de construcción de diques formados por Cubípodos, el Manual del Cubípedo (2015), analiza los diferentes tipos de costes:

1. Suministros de hormigón.
2. Fabricación
3. Manipulación
4. Transporte y colocación
5. Almacenamiento
6. Encofrados

En la siguiente figura se puede observar el porcentaje que supone cada uno de los costes descritos en el apartado anterior sobre el total de construcción del cubípedo:

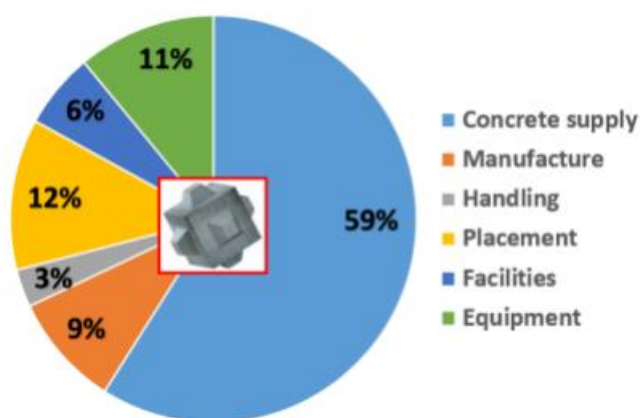


Fig. 111 Porcentaje de los diferentes costes sobre el total en la construcción del Cubípedo. Fuente: Manual del Cubípedo, 2015.

Medina et al. (2010) proponen la siguiente formulación para estimar el coste de los Cubípodos:

$$C_c \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = (265 + HOR) + 1.00 \left[10^5 \left(\frac{1}{l_n(V_c * W_c)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{l_n(V_c * W_c)} \right) \right] \quad (2.5)$$

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

Se considera un precio del hormigón de 70 €/m³, con un peso de 13.99 tn (aproximadamente 14 tn)

$$3905 \text{ cubípodos} * 1.85^3 \frac{\text{m}^3}{\text{cubípodo}} = 24724,99 \text{ m}^3$$

$$C_c \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = (265 + 70) + 1.00 \left[10^5 \left(\frac{1}{l_n(24724,99 * 14)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{l_n(24724,99 * 14)} \right) \right] \quad (2.5)$$

Así, se obtiene un precio total de 165.84 €/m³.

Ahora, multiplicando cada porcentaje por el precio total, podemos obtener los precios unitarios:

$$\text{-Suministro de hormigón } CH = 0,59 \cdot 165.84 = 97.85 \text{ €/m}^3$$

$$\text{-Encofrado } CE = 0,09 \cdot 165.84 = 14.93 \text{ €/m}^3$$

$$\text{-Manipulación } CM = 0,09 \cdot 165.84 = 14.93 \text{ €/m}^3$$

$$\text{-Transporte } CT = 0,11 \cdot 165.84 = 18.24 \text{ €/m}^3$$

$$\text{-Colocación } CCo = 0,12 \cdot 165.84 = 19.9 \text{ €/m}^3$$

6.12.3 Transporte y construcción del dique

Los precios unitarios de 18.24 €/m³ para el transporte y 19.9 €/m³ para la colocación. De esta forma, sumando ambos se obtiene un precio de 38.3 €/m³ de transporte y colocación. Así, multiplicando por el total de metros cúbicos se obtiene: 946.967,12 €.

6.12.4 Gestión de residuos

Lozano (2021) valora la gestión de residuos de la fabricación de piezas, incluidas el transporte y demás gastos típicos relacionados con los residuos en 1800 €.

6.12.5 Seguridad y salud

Lozano (2021) las valora en 11.000 €. 10.000 €, en el conjunto de sistemas de protección colectiva y equipos de protección individual (EPI) y 1.000 € para la medicina preventiva y primeros auxilios.

6.13 Presupuesto de ejecución material

Capítulo	Importe (€)
Trabajos previos	17.500
Fabricación y acopio de Cubípodos	3.153.425,25
Construcción del dique	946.967,12
Gestión de residuos	1.800
Seguridad y salud	11.000
Control ambiental	10.000
TOTAL	4.140.692,37

El presupuesto de ejecución material es de cuatro millones ciento cuarenta mil seiscientos noventa y dos euros y treinta y siete céntimos.

Capítulo 7: Referencias

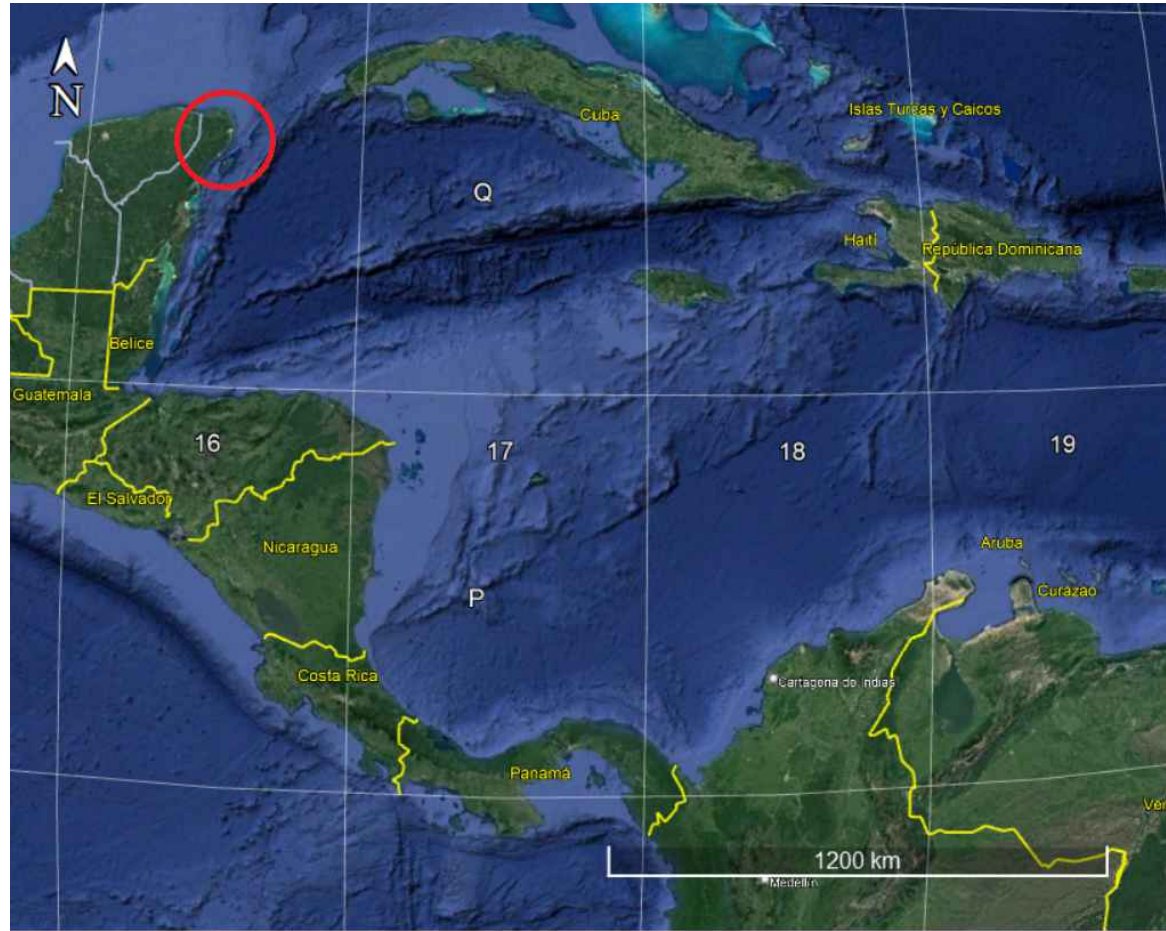
7.Referencias:

- Ahrens, J. P. (1989). Stability of reef breakwaters. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 115(2), 221-234.
- Ahrens, J.P. (1987). Characteristics of Reef Breakwaters.
- Argente Garrido, G. (2019). Estudio de Estabilidad Hidráulica de Diques en Talud Rebasables Protegidos con mantos de escollera, cubos y Cubípodos. Tesis Doctoral. València: Universitat Politècnica de València.
- Allsop, W., & Powell, K. (1985). Low-crest breakwaters, hydraulic performance and stability.
- Bricio Garberi, L. (2009). Comportamiento Funcional y Ambiental de los Diques Exentos de Baja Cota de Coronación y su Importancia en la Ingeniería de Costas. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- 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.
- CIRIA (2007). The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). Londres.
- Corredor, A. & Medina, J.R (2011). El Cubípodo: nuevo elemento para la reducción de costes en la construcción de diques en talud. *Media.obla-gropu.com* https://media.obla-group.com/wp-content/uploads/sites/5/2022/01/28082048/Corredor2012_VICNICivil_Cubípodo.pdf
- 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.
- de Alegria-Arzaburu, A. R., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., Silva, R., & González-Leija, M. (2013). The role of fringing coral reefs on beach morphodynamics. *Geomorphology*, 198, 69-83.
- De Keyser, K. y Jacobs, E. (2020). A literature review on low-crested and submerged structures. Trabajo Final de Máster. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- De la Peña Olivas, J.M. y Sánchez Palomar, F.J. (2008). *Directrices para el diseño de diques exentos en las costas españolas*. CEDEX.
- Escudero, M., Reguero, B. G., Mendoza, E., Secaira, F., & Silva, R. (2021). Coral Reef Geometry and Hydrodynamics in Beach Erosion Control in North Quintana Roo, Mexico. *Frontiers in Marine Science*.

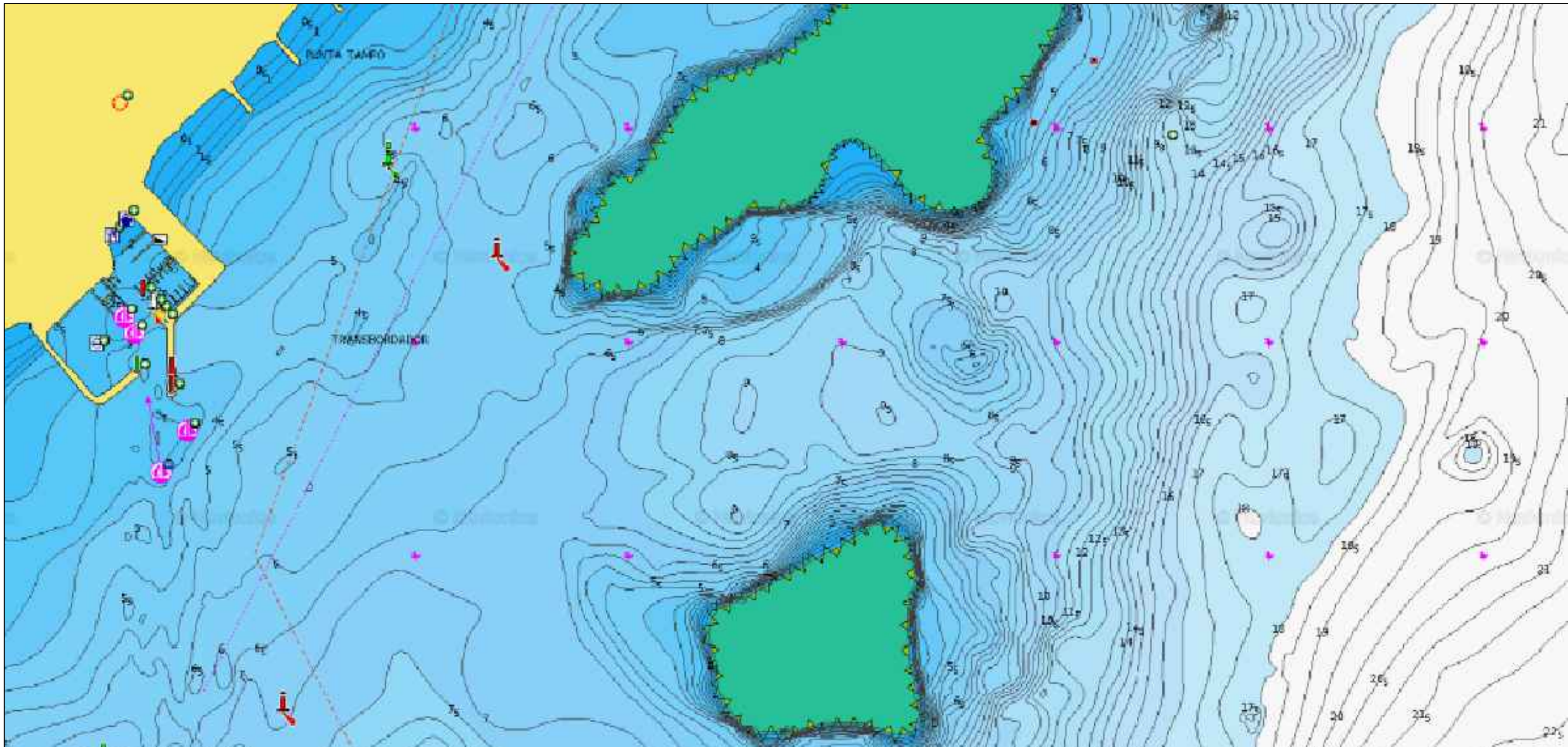
- FIGUERES, M., & MEDINA, J. R. (2005). Estimating incident and reflected waves using a fully nonlinear wave model. In *Coastal Engineering 2004: (In 4 Volumes)* (pp. 594-603).
- Folgado, J. R. M., Martín, M. E. G., Molguero, A. C., & Huertes, M. S. (2010). Diseño de diques en talud con el manto principal de Cubípodos. *Revista de Obras Públicas*, 157(3.515).
- Fulford, E. T. (1985, September). Reef type breakwaters for shoreline stabilization. In *Coastal Zone'85* (pp. 1776-1795). ASCE
- Gironella, X., Sánchez-Arcilla, A., Brigantti, R., Sierra, J. P., & Moreno, L. (2003, March). SUBMERGED DETACHED BREAKWATERS: TOWARDS A FUNCTIONAL DESIGN. *Coastal Engineering 2002*.
- 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).
- Lozano Tovar, S. (2021). Estudio de transmisión de oleaje para el diseño de diques arrecife homogéneos de Cubípodos. Aplicación a la protección del litoral del Parque Nacional de Corcovado (Costa Rica).
- Mashadyan, G. (2022). Estudio experimental de la estabilidad hidráulica de diques homogéneos de baja cota de Cubípodos. Aplicación a la protección costera de la playa San Luis en San Andrés.
- Mares Nasarre, P. (2021). Overtopping flow on mound breakwaters under depth-limited breaking wave conditions.
- Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., Silva, R., Mendoza-Baldwin, E., Escalante-Mancera, E., & Ruiz-Rentería, F. (2014). Comparative morphodynamics between exposed and reef protected beaches under hurricane conditions. *Coast. Eng. Proc. 1* (34).
- Medina, J. R. (2001). Estimation of Incident and Reflected Waves Using Simulated Annealing. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 127(4).

- 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
- Medina, J.R. y Gómez-Martín, M.E. (2016). *Manual del Cubípodo*, 2016. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E., Mares-Nasarre, P., Odériz, I., Mendoza, E., Silva, R. (2019). “Diques exentos contruidos solo con elementos prefabricados de hormigón”. Libro de las XV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Editorial Universitat Politècnica de València (en prensa)
- Medina, J., 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., & Vidal, C. (2014). Design and construction of mound breakwaters. *Ingeniería Del Agua*, 18(1)
- Melito, I., & Melby, J. A. (2002). Wave runup, transmission, and reflection for structures armored with CORE-LOC®. *Coastal Engineering*, 45(1), 33–52
- 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 test.
- Molines, J. (2010). *Estabilidad de los espaldones de diques en talud con mantos de cubos y Cubípodos*. Premio Modesto Vigueras 2010, Asociación Técnica de Puertos y Costas, Madrid 24/07/2010.
- Nir, Y. (1982). Offshore artificial structures and their influence on the Israel and Sinai Mediterranean beaches. In *Coastal Engineering 1982* (pp. 1837-1856).
- Odériz, I., Mendoza, E., Silva, R., & Medina, J. (2018). Stability and hydraulic performance of a homogeneous cubipod low-crested mound breakwater.
- Osorio-Cano, J. D., Alcérreca-Huerta, J. C., Mariño-Tapia, I., Osorio, A. F., Acevedo-Ramírez, C., Enriquez, C., ... & Oumeraci, H. (2019). Effects of roughness loss on reef hydrodynamics and coastal protection: approaches in Latin America. *Estuaries and Coasts*, 42(7), 1742-1760.
- Ranasinghe, R., & Turner, I. L. (2006). Shoreline response to submerged structures: A review. *Coastal Engineering*, 53(1), 65-79.

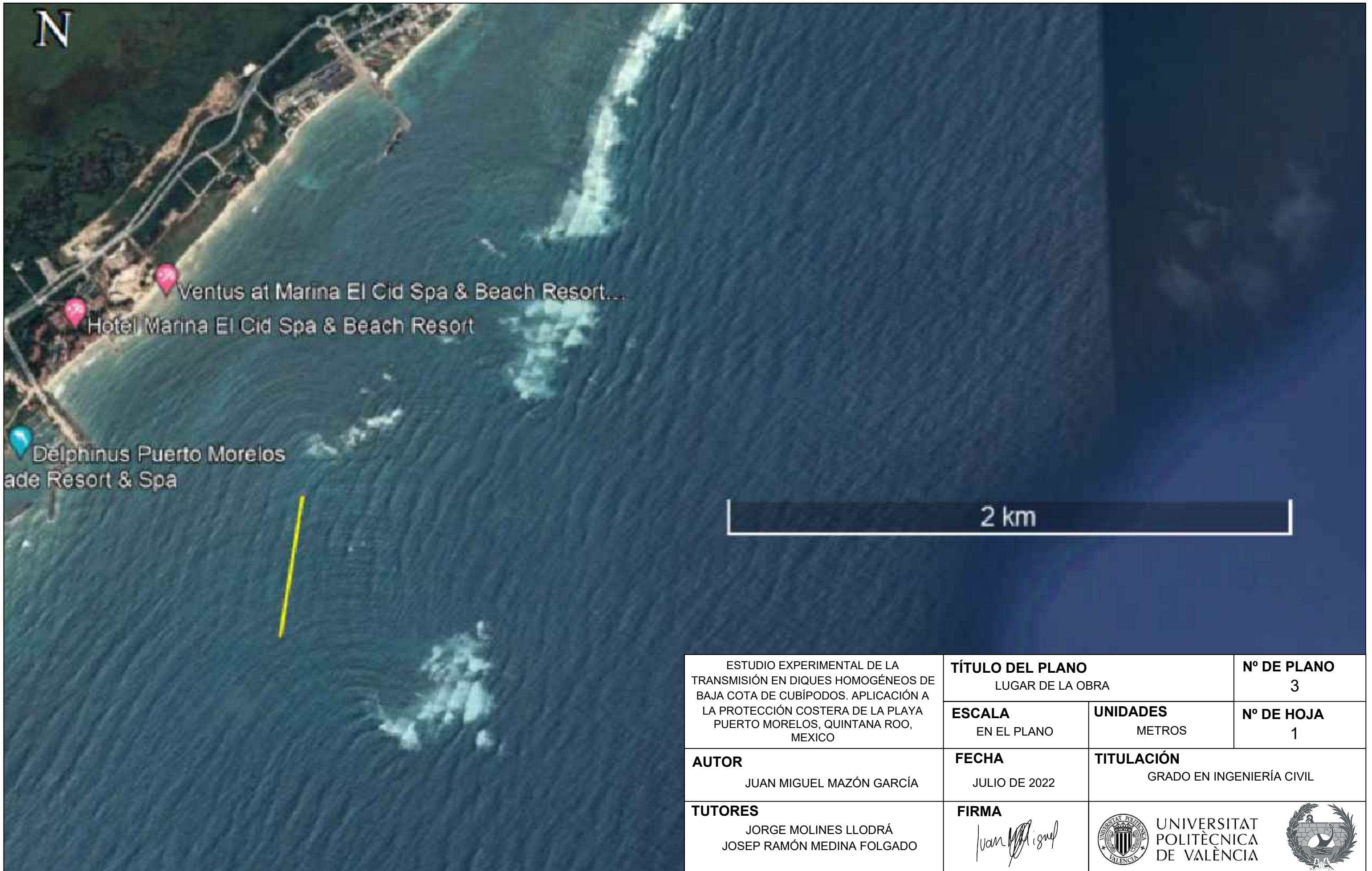
- ROM 1.0-09. (2009). ROM 1.0-09 Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo. (Parte 1a: Bases y factores para el proyecto. Agentes climáticos). Puertos del Estado. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- ROSATI, J.D., GRAVENS, M.B. y CHASTEN, M.A. (1992). “Development of detached breakwater design criteria using a shoreline response model”. Coastal Engineering Practice 92: Proceedings of a Specialty Conference on the Planning, Design, Construction, and Performance of Coastal Engineering, February 1992. ASCE.
- Ruiz-Ramírez, J. D., Euán-Ávila, J. I., & Torres-Irineo, E. (2014). Tendencias del nivel del mar en las costas del Caribe mexicano. *European Scientific Journal*, 10(20), 86-96.
- 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 (10075)), 467-471.
- 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.
- van der Meer, J.W. (1990). Data_on_Wave_Transmission_Due_to_Overtop. Delft Hydraulics Report, H 986(b).
- 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
- van der Meer, J. W., & Daemen, I. F. (1994). Stability and wave transmission at low-crested rubble-mound structures. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 120(1), 1-19.



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA TRANSMISIÓN EN DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO, MEXICO	TÍTULO DEL PLANO LOCALIZACIÓN		Nº DE PLANO 1
	ESCALA EN EL PLANO	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR JUAN MIGUEL MAZÓN GARCÍA	FECHA JULIO DE 2022	TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	
TUTORES JORGE MOLINES LLODRÁ JOSEP RAMÓN MEDINA FOLGADO	FIRMA <i>Juan Miguel Mazón García</i>	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	

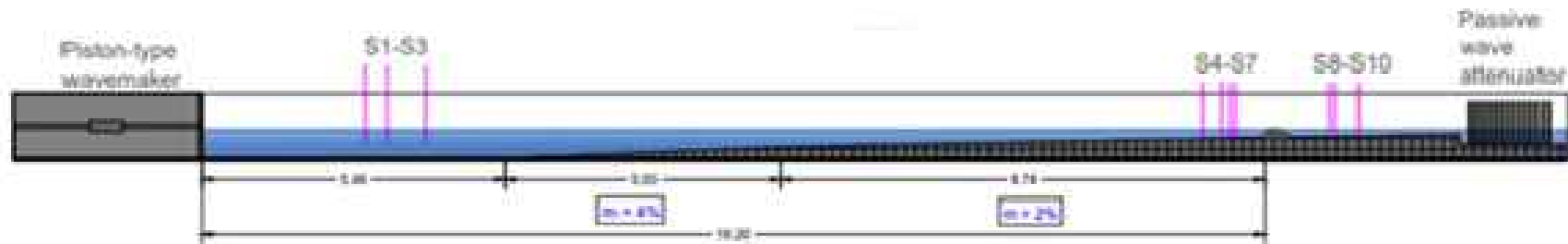


ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA TRANSMISIÓN EN DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO, MEXICO	TÍTULO DEL PLANO BATIMETRÍA		Nº DE PLANO 2
	ESCALA EN EL PLANO	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR JUAN MIGUEL MAZÓN GARCÍA	FECHA JULIO DE 2022	TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	
TUTORES JORGE MOLINES LLODRÁ JOSEP RAMÓN MEDINA FOLGADO	FIRMA <i>Juan Miguel</i>	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA TRANSMISIÓN EN DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO, MEXICO	TÍTULO DEL PLANO LUGAR DE LA OBRA		Nº DE PLANO 3
	ESCALA EN EL PLANO	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR JUAN MIGUEL MAZÓN GARCÍA	FECHA JULIO DE 2022	TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	
TUTORES JORGE MOLINES LLODRÁ JOSEP RAMÓN MEDINA FOLGADO	FIRMA 		

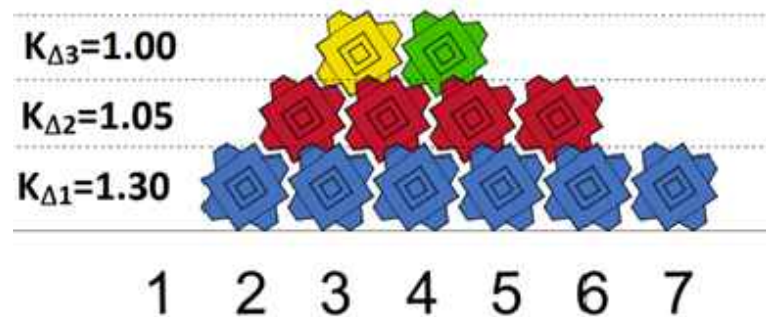
Sección en alzado del canal de oleaje



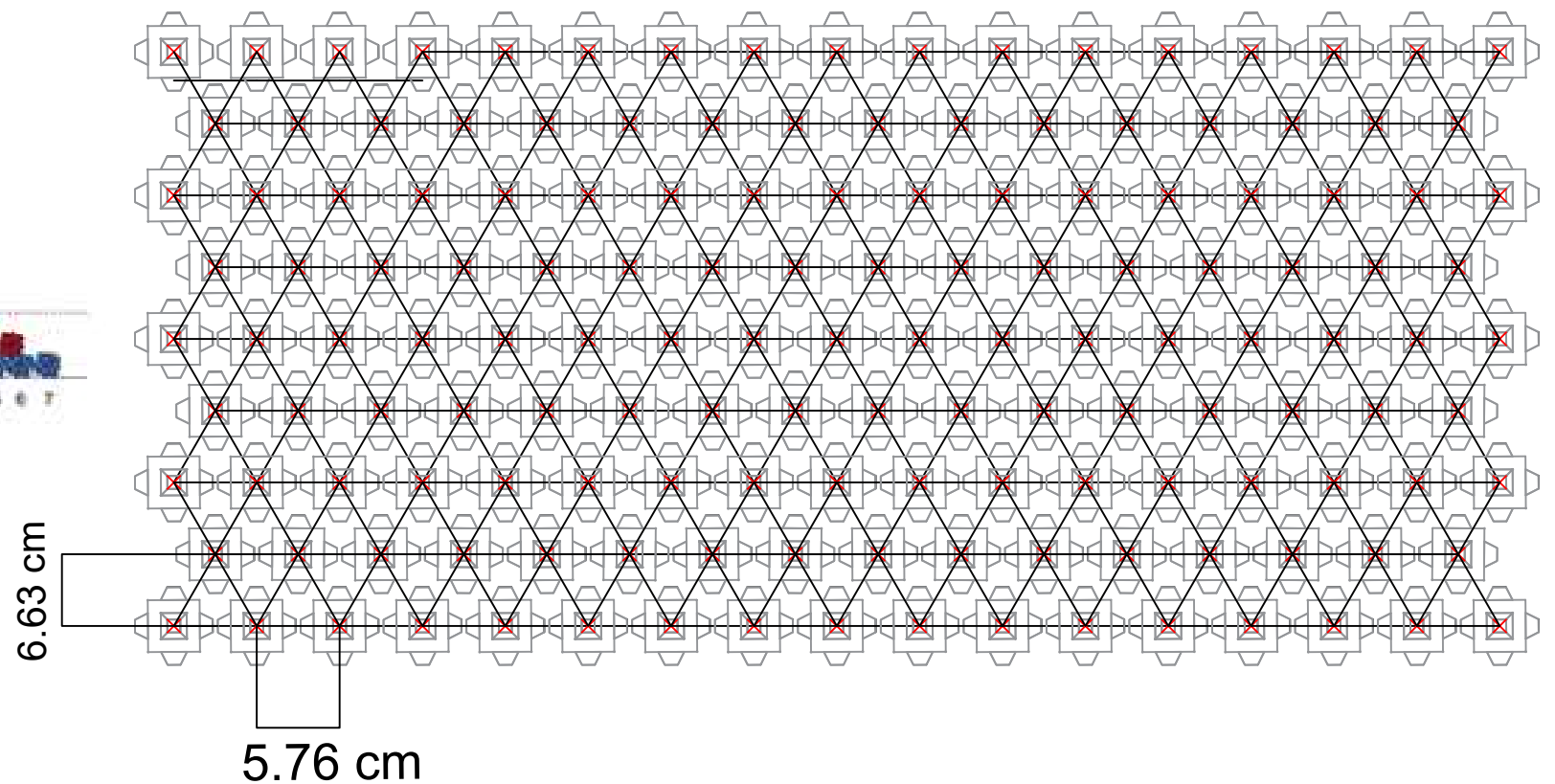
Modelos ensayados



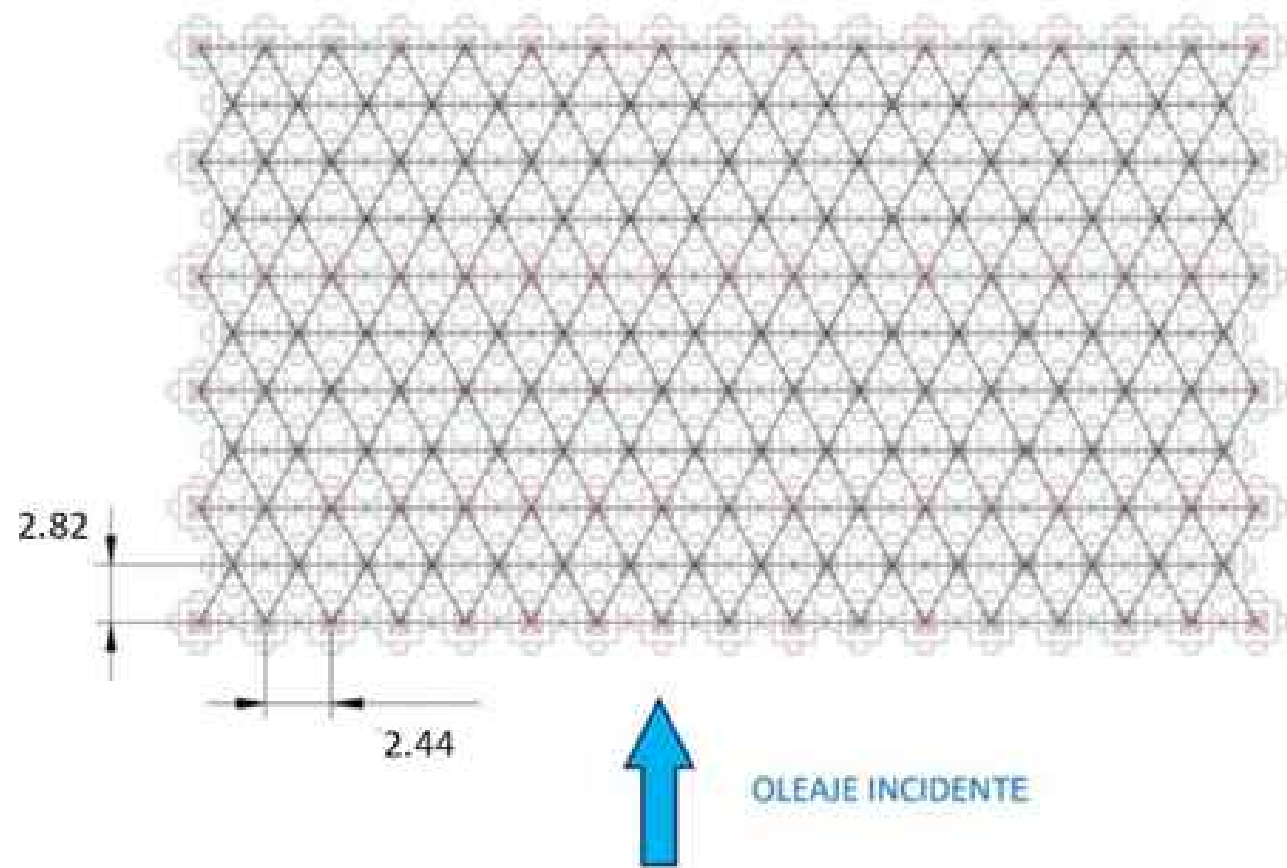
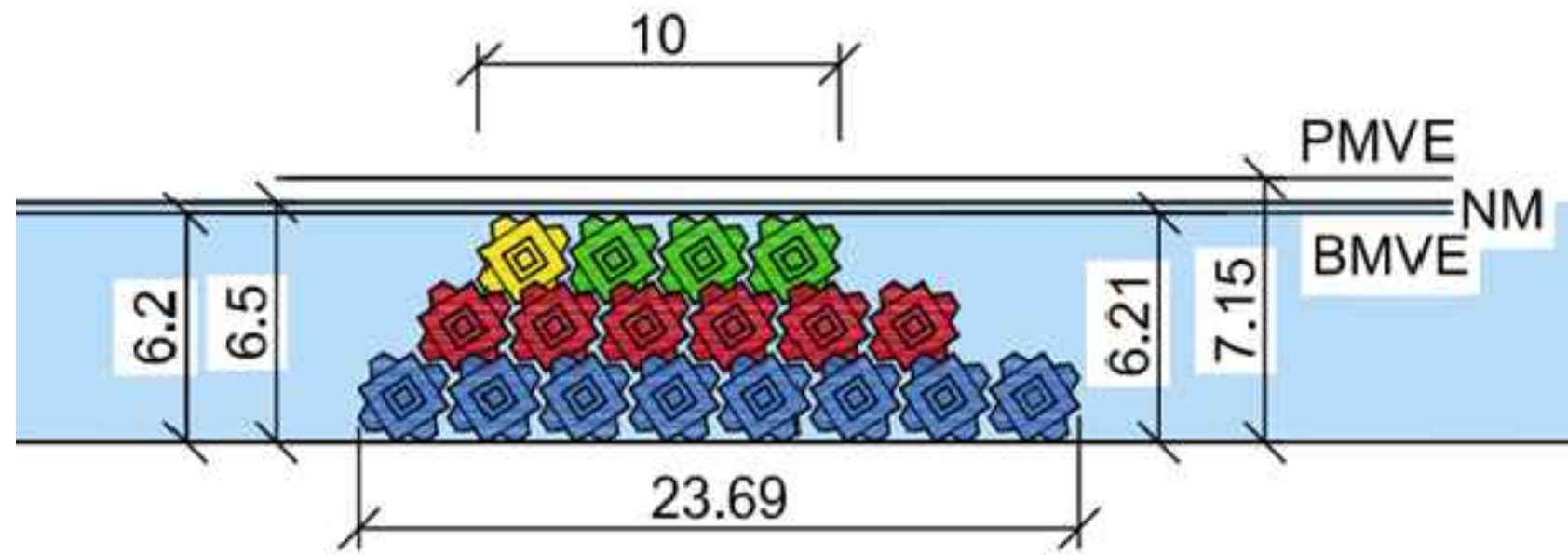
Coeficientes de capa



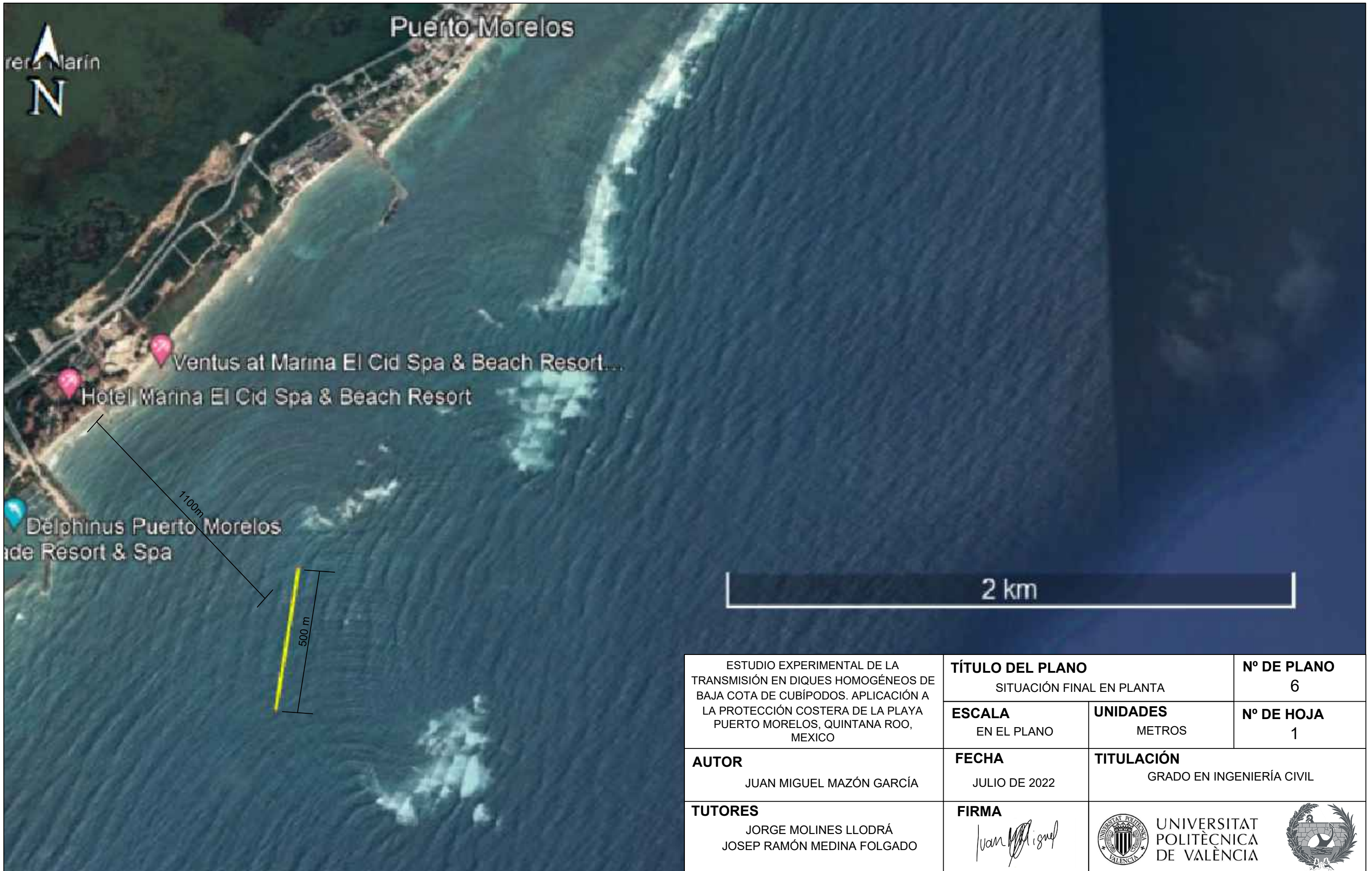
Malla de colocación



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA TRANSMISIÓN EN DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO, MEXICO	TÍTULO DEL PLANO ENSAYOS		Nº DE PLANO 4
	ESCALA VARIOS	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR JUAN MIGUEL MAZÓN GARCÍA	FECHA JULIO DE 2022	TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	
TUTORES JORGE MOLINES LLODRÁ JOSEP RAMÓN MEDINA FOLGADO	FIRMA 		



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA TRANSMISIÓN EN DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO, MEXICO	TÍTULO DEL PLANO DIMENSIONES OBRA		Nº DE PLANO 5
	ESCALA VARIOS	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR JUAN MIGUEL MAZÓN GARCÍA	FECHA JULIO DE 2022	TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	
TUTORES JORGE MOLINES LLODRÁ JOSEP RAMÓN MEDINA FOLGADO	FIRMA 		



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA TRANSMISIÓN EN DIQUES HOMOGÉNEOS DE BAJA COTA DE CUBÍPODOS. APLICACIÓN A LA PROTECCIÓN COSTERA DE LA PLAYA PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO, MEXICO	TÍTULO DEL PLANO SITUACIÓN FINAL EN PLANTA		Nº DE PLANO 6
	ESCALA EN EL PLANO	UNIDADES METROS	Nº DE HOJA 1
AUTOR JUAN MIGUEL MAZÓN GARCÍA	FECHA JULIO DE 2022	TITULACIÓN GRADO EN INGENIERÍA CIVIL	
TUTORES JORGE MOLINES LLODRÁ JOSEP RAMÓN MEDINA FOLGADO	FIRMA <i>Juan Miguel</i>	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	