UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estudio experimental de colocación de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota de coronación con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de la playa de Mayakobá (México)

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR/A: Barjola Martínez, Claudia

Tutor/a: Molines Llodrá, Jorge

CURSO ACADÉMICO: 2025/2026

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO Nº1 1

MEMORIA 2

ANEJOS 25

DOCUMENTO Nº2 208

DOCUMENTO Nº1

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1 INTRODUCCIÓN 5
2 LOCALIZACIÓN Y DATOS PREVIOS 7
3 ESTUDIO EXPERIMENTAL 9
4 BATIMETRÍA 15
5 CLIMA MARÍTIMO 16
6 ESTUDIO DE SOLUCIONES 18
7 DISEÑO FINAL 22
8 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO 23
9 VALORACIÓN ECONÓMICA 24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de la playa de Mayakobá en Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia 7
Figura 2 Ubicación de la playa de Mayakobá. Fuente: Elaboración propia. 7
Figura 3 Imagen de la cobertura de arrecifes de coral en la zona de estudio. Fuente: SIMAR/CONABIO 8
Figura 4 Identificación de arrecifes en la zona de la playa de Mayakobá. Fuente: Elaboración propia 8
Figura 5 Geotextiles en la zona de la playa de Mayakobá. Fuente: Google Earth 9
Figura 1 Malla de colocación cuadrada usada en los ensayos. Fuente: LPC, UPV 10
Figura 15 Simulación en C1 finalizada en perspectiva. Fuente: Elaboración propia. 13
Figura 15 Simulación en C1 finalizada en planta con error añadido. Fuente: Elaboración propia 14
Figura 6 Batimetría general. Fuente: Elaboración propia 15
Figura 12 Direcciones del oleaje en aguas profundas. Fuente: Elaboración propia 16
Figura 14 Probabilidad conjunta de Hs(m) con la dirección del oleaje. Fuente: Elaboración propia 17
Figura 4 Nivel del mar en Puerto Morelos. Fuente: Elaboración propia 17
Figura 9 Rosa del viento. Fuente: Elaboración propia 18
Figura 1 Esquema de la elección de la alternativa final. Fuente: Elaboración propia 18
Figura 12 Malla de colocación teóricas de las 3 alternativas. Fuente: Elaboración propia. 19
Figura 25 Planteamiento de la Alternativa 1 en planta. Fuente: Elaboración propia. 21
Figura 28 Planteamiento de la Alternativa 1 en planta más ampliada. Fuente: Elaboración propia 21
Figura 30 Dimensiones finales del Cubípodo. Fuente: Elaboración propia 23

Figura 23 Sección transversal. Fuente: Elaboración propia. 23
Figura 4 Ubicación de la zona de fabricación y acopio y distribución de las zonas de trabajo. Fuente: Elaboración propia..... 24

1. INTRODUCCIÓN

Con el objeto de servir como Trabajo Final de Máster para la obtención del título en el Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, otorgado por la Escuela Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de València, se presenta el siguiente proyecto titulado "Estudio experimental de colocación de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota de coronación con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de la playa de Mayakobá (México)" por la autora Claudia Barjola Martínez.

1.1 OBJETIVOS

Con este trabajo se busca conseguir una solución al problema de la degradación de los arrecifes de coral existentes en el mar Caribe, la cual afecta a la dinámica costera por deteriorarse la barrera natural frente al oleaje y aumentar la energía incidente en la costa.

Para ello se usarán diques homogéneos de baja cota de coronación hechos mediante Cubípodos, los cuales han sido ensayados en laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València.

Los objetivos establecidos para el desarrollo de este trabajo final de máster constan de

- Diseñar y entender de forma experimental los diques homogéneos de baja cota de coronación formados por Cubípodos.
- Uso de software específico profesional.
- Desarrollo de pensamiento crítico.
- Evaluación de la viabilidad de los resultados experimentales y aplicación aun problema de ingeniería civil existente.

1.2 ANTECEDENTES Y OBJETO DEL ESTUDIO

El objeto principal del presente estudio se centra en la Playa de Mayakobá, situada en Riviera Maya (México), considerada como un entorno litoral de alto valor ambiental y ecológico.

A partir de un análisis visual y contrastado con información procedente de fuentes oficiales, se afirma que el sistema arrecifal asociado a este tramo de costa presenta un estado de deterioro significativo.

Esta degradación ha supuesto una pérdida parcial o total de su función natural como elemento de protección costera, reduciendo su capacidad para atenuar el oleaje incidente y limitar los procesos de erosión litoral.

Los arrecifes coralinos desempeñan un papel fundamental en la estabilidad morfodinámica de la costa, actuando como barrera natural frente a la energía del oleaje, además de constituir hábitats esenciales para una elevada biodiversidad marina.

La degradación observada en determinados sectores del sistema arrecifal de Mayakobá, no solo compromete la dinámica litoral, sino que también afecta de manera directa a los ecosistemas marinos asociados, poniendo en riesgo a numerosas especies que dependen de estos hábitats para su desarrollo, alimentación y reproducción.

Asimismo, se identifica una creciente presión social y ambiental orientada a la conservación de la biodiversidad marina del Caribe, impulsada tanto por organismos oficiales como por la población local. La pérdida progresiva de los arrecifes supone un impacto negativo de gran relevancia sobre el equilibrio ecológico del entorno marino, así como sobre los servicios ecosistémicos que estos proporcionan, incluyendo la protección costera, la pesca y el valor paisajístico y turístico de la zona.

En este contexto, se pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo una actuación específica destinada a la recuperación y/o sustitución funcional de los tramos del litoral en los que el sistema arrecifal se encuentra degradado o ha desaparecido. Con el objetivo de restablecer, en la medida de lo posible, las condiciones naturales originales del entorno marino.

La infraestructura o infraestructuras a implantar constan de diques homogéneos de baja cota de coronación compuestos por Cubípodos. Estos se escogen por ser considerados infraestructuras verdes, pudiendo asemejarse bastante a como interacciona un sistema arrecifal con su entorno y los beneficios que aporta.

El estudio experimental consta principalmente de simulaciones realizadas en PLACSIM, un software desarrollado en el laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València, con el cual se simula la colocación de elementos como Cubípodos para reparar o construir infraestructuras marítimas.

Con él, se va a conseguir escoger el diseño de la infraestructura que asegure su correcto funcionamiento e implantación en obra, simulando la colocación de los Cubípodos con la malla de colocación cuadrada ensayada en el laboratorio y analizando el funcionamiento de ella y del propio software.

Este trabajo final de máster se compone de los siguientes documentos:

1. DOCUMENTO N.º 1: Memoria y anejos
2. DOCUMENTO N.º 2: Planos

2. LOCALIZACIÓN Y DATOS PREVIOS

La zona de actuación delimitada corresponde a la playa de Mayakobá, situada en Riviera Maya, dentro del municipio de Solidaridad, en el estado de Quintana Roo (México).

Este tramo litoral se localiza entre Puerto Morelos y Playa del Carmen, a unos 15 km del núcleo urbano de esta última presentando una línea de costa prácticamente rectilínea, con una orientación aproximada NE–SW y abierta al mar Caribe, formando parte de la Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT).

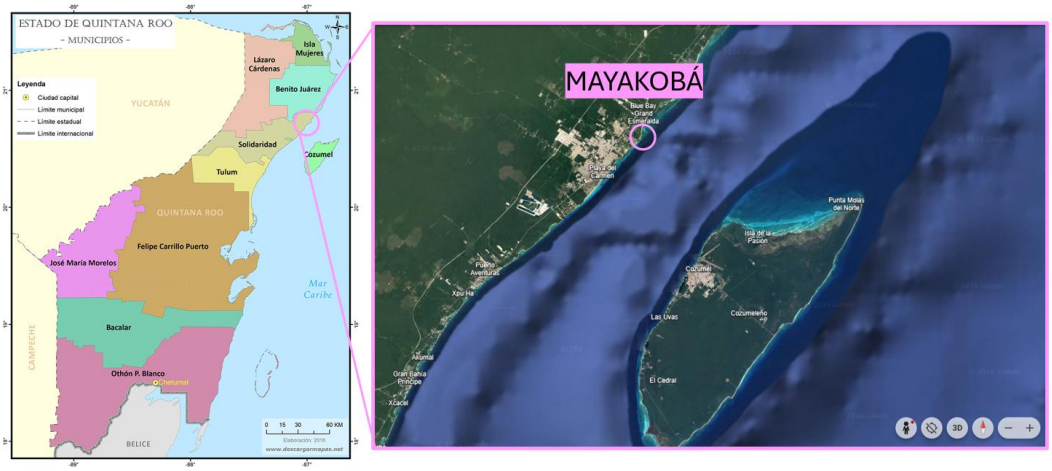


Figura 1 Ubicación de la playa de Mayakobá en Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Ubicación de la playa de Mayakobá. Fuente: Elaboración propia.

La costa presenta un tramo de arrrecife interrumpido, como se puede observar en la siguiente figura.

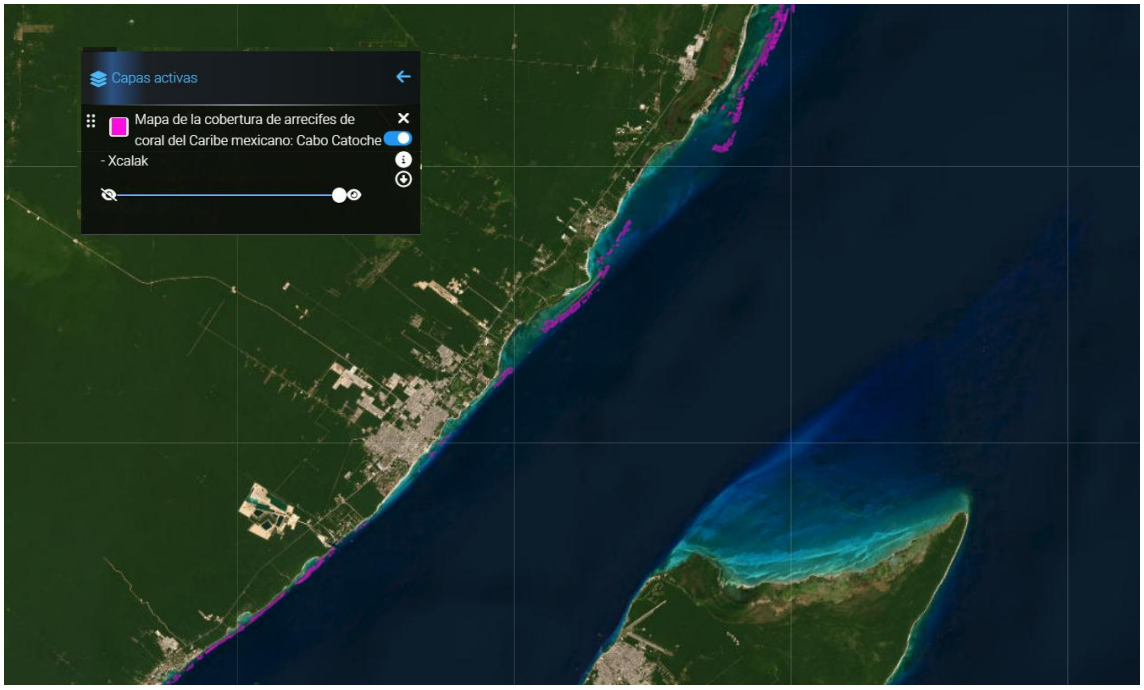


Figura 3 Imagen de la cobertura de arrecifes de coral en la zona de estudio. Fuente: SIMAR/CONABIO

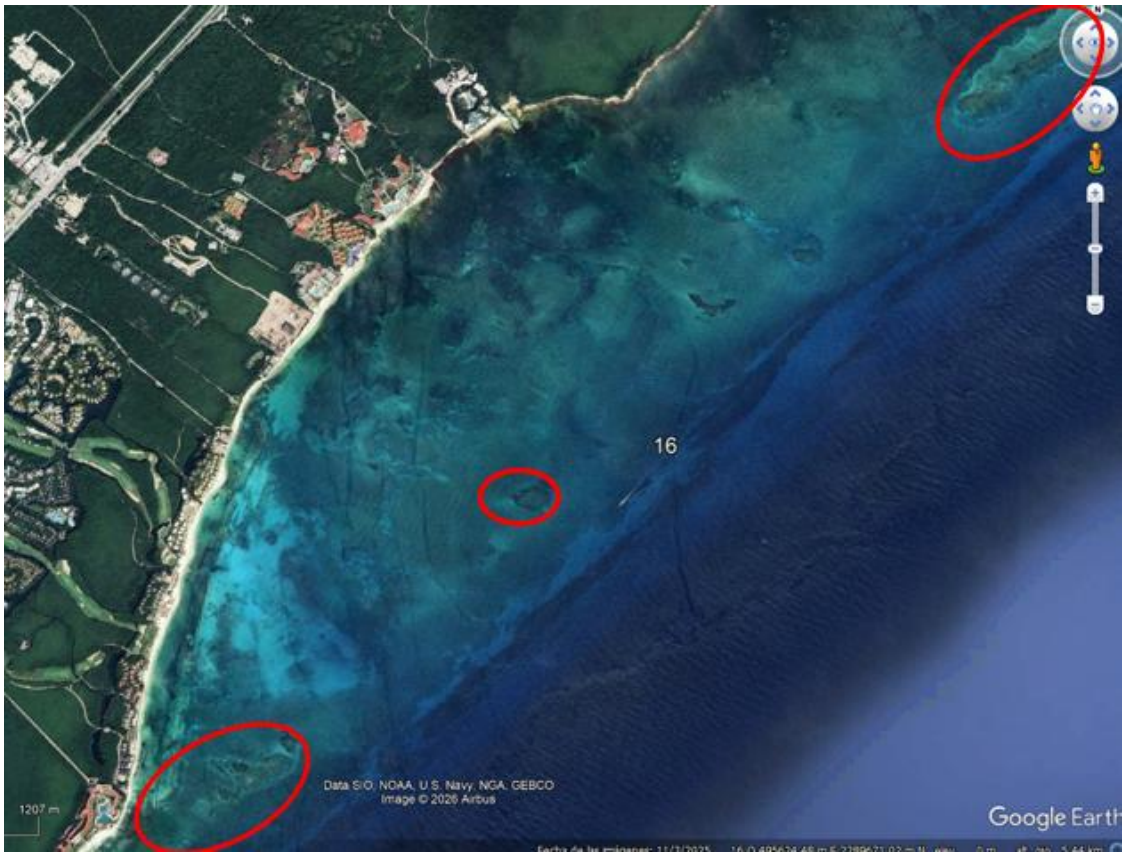


Figura 4 Identificación de arrecifes en la zona de la playa de Mayakobá. Fuente: Elaboración propia

Además, se ha identificado medidas de protección costera realizadas por geotextiles, los cuales van rellenos de arena u hormigón y se sitúan a lo largo de la línea de playa, estabilizando la costa y reduciendo la energía del oleaje incidente.

Se caracterizan como una medida temporal frente a la erosión. Además, no restauran el problema original del deterioro del sistema arrecifal, por lo que se propone la retirada de los mismos y sustitución por diques homogéneos de baja cota de coronación de Cubípodos.

Figura 5 Geotextiles en la zona de la playa de Mayakobá. Fuente: Google Earth

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

1.3 CARACTERIZACIÓN DE PLACSIM Y LA MALLA DE COLOCACIÓN

El estudio experimental realizado tiene como objetivo principal validar la malla cuadrada de colocación de Cubípodos propuesta en el laboratorio para el diseño de los diques a implantar como solución al problema detectado en Mayakobá.

Esta malla corresponde a una separación a y b entre piezas igual a 1,44*Dn, con una porosidad de 52%.

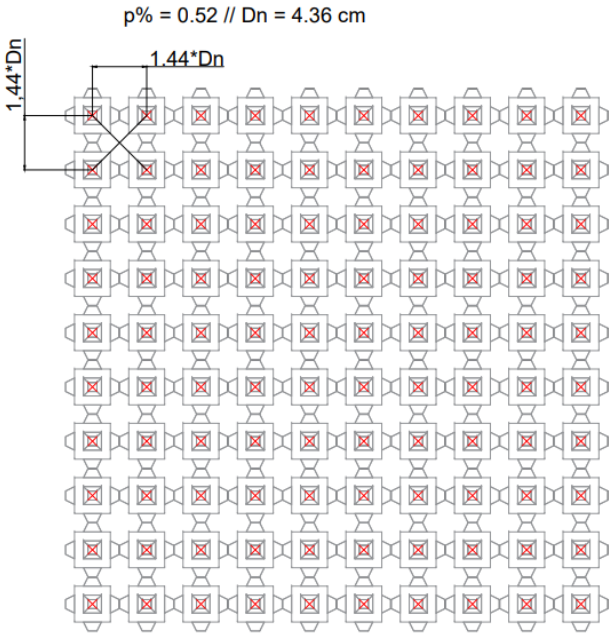


Figura 6 Malla de colocación cuadrada usada en los ensayos. Fuente: LPC, UPV

Para ello se hace uso del software PLACSIM, como simulador de construcción, haciendo varias simulaciones con características diferentes, variando la sensibilidad con la que las piezas colisionan con su entorno (en las simulaciones determinadas como C0, C1 y C2) y añadiendo una desviación en las coordenadas x,y de los Cubípodos, para simular lo que sería una variación de la posición en la puesta en obra, ya que en la vida real la colocación de las piezas en el mar está condicionada a factores externos como la climatología y la experiencia o calidad del gruista.

También, se caracteriza la deviación que puede tener el propio software, con el fin de tenerla en cuenta en las simulaciones, ya que la posición final de cada pieza, en la posición x,y (en planta) se describe como:

$$X_1 = X_0 + \gamma \cdot D_n \quad (1)$$

$$Y_1 = Y_0 + \gamma \cdot D_n \quad (2)$$

Donde:

- X_0, Y_0 son las posiciones deseadas, las que corresponden con la malla de colocación.
- $\gamma \cdot D_n$ es la alteración de la posición de la pieza, donde $\gamma \sim N(0, \frac{\Delta}{Dn})$,

Esta alteración en las simulaciones se decide componerla por tres tipos de "errores":

$$\gamma \cdot D_n = \varepsilon_{T,i} = \varepsilon_{PLACSIM,i} + \varepsilon_{Malla,i} + \varepsilon_{Gruísta,i} \quad (3)$$

Por tanto, si se sabe cuánto contribuye PLACSIM a esa desviación se puede valorar mejor la calidad de esta malla u otras a simular.

Para ello se realizan dos tipos de simulaciones, una enfocada a la colisión y otra a la precisión de la colocación, para detectar que condiciona más a la hora de variar la posición final de cada pieza.

Este proceso se encuentra redactado con mayor detalle en el Anejo nº 2, correspondiente a la metodología experimental.

Como conclusión se obtiene que la alteración que puede producir PLACSIM es muy pequeña, siendo igual a $\gamma_{i,PLACSIM} \sim \mathrm{N}(0, 0.00053)$, la cual solo se ve afectada por la colisión.

Por otro lado, la malla de 1,44*Dn se simula en C1, C2 y C3, obteniendo el error cuadrático medio de las posiciones finales comparadas con las correspondientes a la malla, el porcentaje de piezas que se desvían más de un diámetro de su posición deseada (N%) y probando su ajuste a una distribución normal en los errores:

$$\varepsilon_{i,j} = i_{j,final\ coordinate} - i_{j,INPUT} \qquad (4)$$

Siendo

- i = (x,y)
- j = Cubípodo1, Cubípodo2, …

o una distribución tipo Rayleigh en

$$E_j = \sqrt{{\varepsilon_{x,j}}^2 + {\varepsilon_{y,j}}^2} \qquad (5)$$

Ya que, por definición, si los errores en las direcciones en los ejes XY siguen una normal, los totales se ajustan a una distribución Rayleigh.

Estos ajustes se validan mediante el test de bondad Kolmogorov-Smirnoff con un nivel de significación del 5%.

Simulación	C0		C1		C2	
	ε_{rms}/D_n	N%	ε_{rms}/D_n	N%	ε_{rms}/D_n	N%
1	0,12	0%	0,13	0%	0,14	0%
2	0,1	0%	0,13	0%	0,14	0%
3	0,11	0%	0,14	0%	0,64	14%
4	0,17	0%	0,14	0%	0,14	0%
5	0,13	0%	0,14	0%	0,14	0%
6	0,16	0%	0,13	0%	0,63	12%
7	0,1	0%	0,14	0%	0,65	15%
8	0,19	1%	0,13	0%	0,47	7%
9	0,16	0%	0,13	0%	0,14	0%
10	0,14	0%	0,14	0%	3,37	53%
promedios	**0,138**	**0%**	**0,136**	**0%**	**0,647**	**10%**

Tabla 1 Resultados de error cuadrático medio y N de las simulaciones realizadas. Fuente: Elaboración propia.

S	C0			C1			C2		
	X	y	E	x	y	E	x	y	E
1	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
2	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
3	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
4	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
5	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
6	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
7	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
8	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
9	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
10	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh

Tabla 2 Resultados del test de bondad Kolmogorov – Smirnov, en rojo los que no lo superan y en verde los que sí. Fuente: Elaboración propia.

- Colisión 2 da un error global muy alto en comparación con las dos colisiones restantes, descartándose como opción por ser demasiado sensible a las interacciones de las piezas que caen con las ya colocadas.
- Se recomiendo el uso de colisión 1 para simular la construcción de las alternativas, cuyo error del modelo, en el cual entre el error de PLACSIM ya caracterizado y el de la malla corresponde a:

$$\gamma_{i,Modelo} \sim \mathrm{N}\left(\mu_{i,modelo}, \sigma^2_{i,modelo}\right) \qquad (6)$$

$$\gamma_{x,modelo} \sim \mathrm{N}(0.031, 0.007)$$

$$\gamma_{y,modelo} \sim \mathrm{N}(0.064, 0.006)$$

Finalmente, se simula la colocación de lo Cubípodos añadiendo una desviación en la malla de colocación de tipo:

$$\gamma_{i,Gruísta} \sim \mathrm{N}(0, 0.22) \quad (7)$$

Se simula la construcción del dique en C1 y se calcula el error producido del modelo a partir de las simulaciones que siguen una distribución normal, tanto en x como en y.

$$\gamma_{x,total} \sim \mathrm{N}(0.277, 0.27)$$

$$\gamma_{y,total} \sim \mathrm{N}(0.166, 0.24)$$

Los resultados no son positivos, ya que, si se suma la desviación añadida al error caracterizado del modelo correspondiente solo a la malla y PLACSIM, debería dar el siguiente resultado:

$$\gamma_x \sim \mathrm{N}(0.031, 0.007 + 0.22 + 0.00053) \approx \gamma_x \sim \mathrm{N}(0.031, 0.23)$$

$$\gamma_y \sim \mathrm{N}(0.064, 0.006 + 0.22 + 0.00053) \approx \gamma_y \sim \mathrm{N}(0.064, 0.23)$$

Además, el error cuadrático medio y el N% promedios son muy elevados (0,824 y 21% respectivamente)

Por tanto, se concluye que la malla ensayada no es adecuada para la construcción de diques homogéneos y se propone aumentar la separación entre Cubípodos para poder disminuir el error total final.

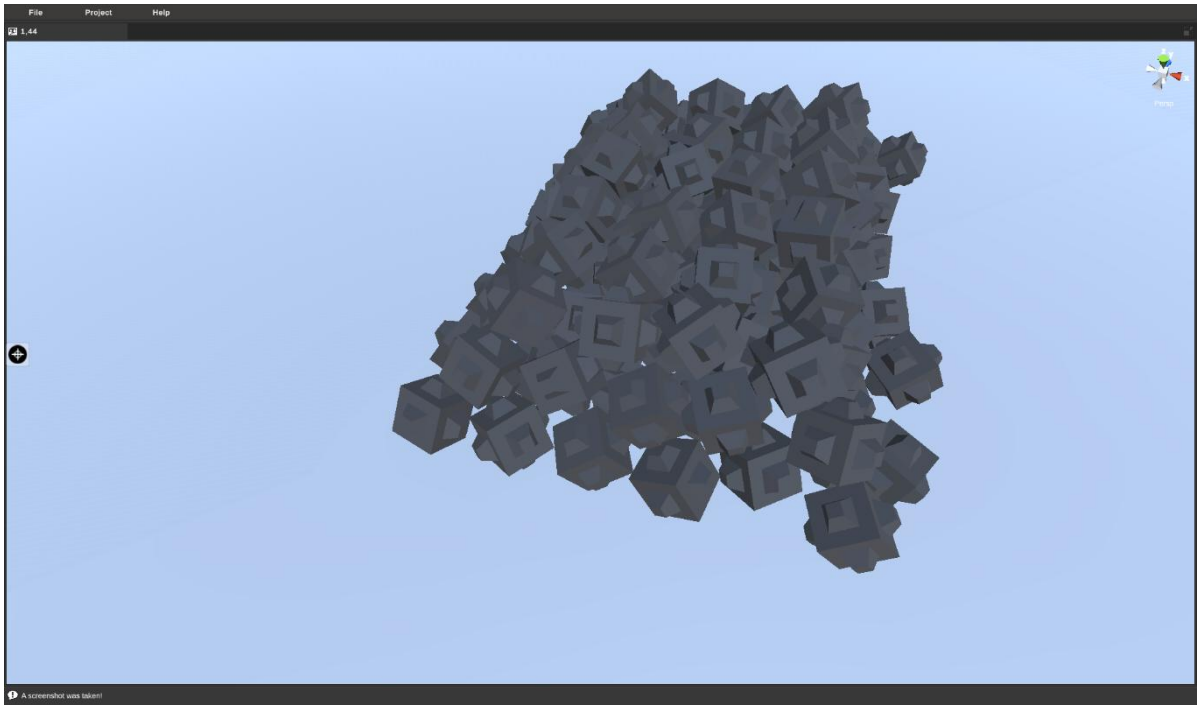


Figura 7 Simulación en C1 finalizada en perspectiva. Fuente: Elaboración propia.

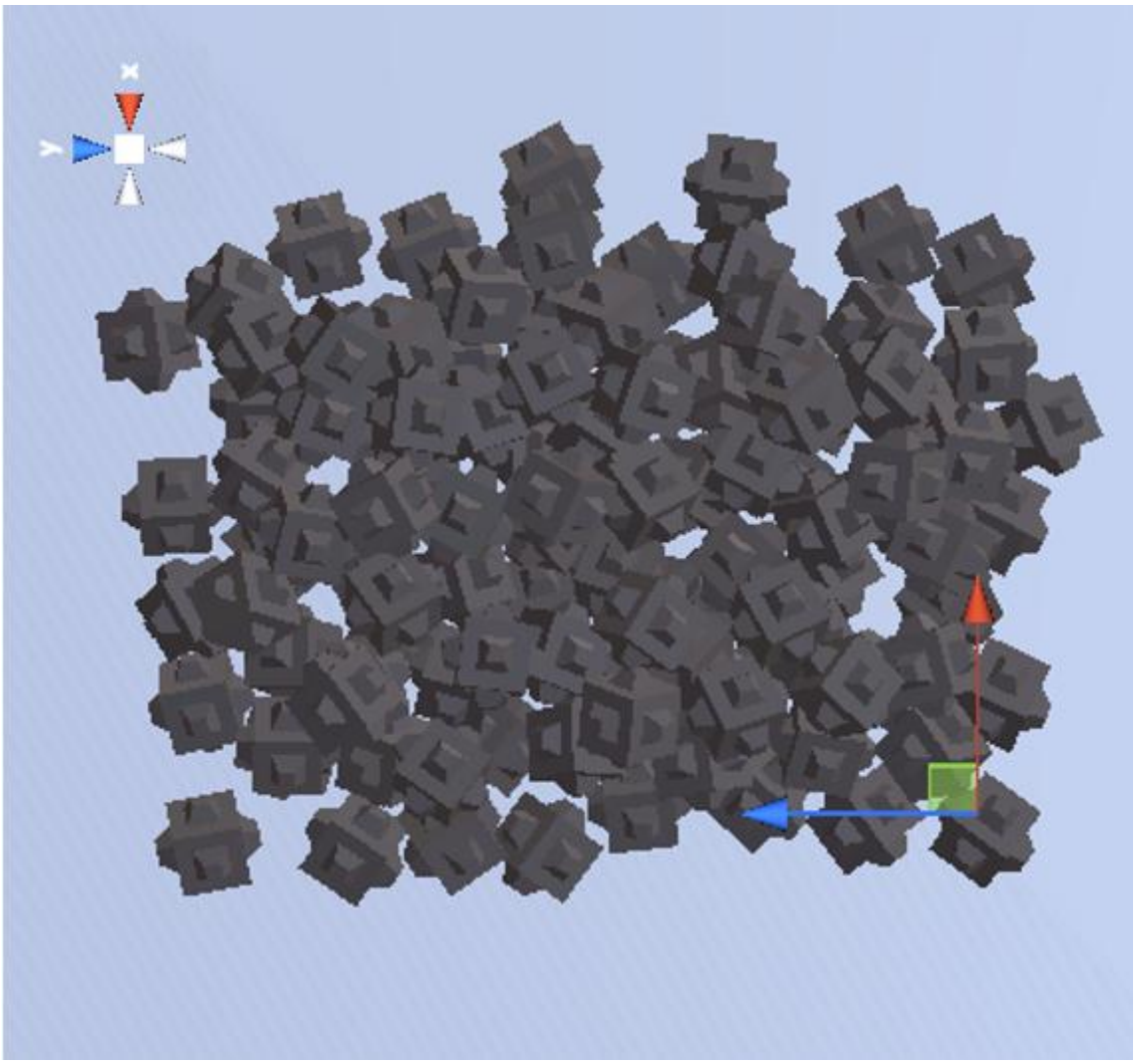


Figura 8 Simulación en C1 finalizada en planta con error añadido. Fuente: Elaboración propia.

1.4 CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE CAPA

Paralelamente, se han calculado los coeficientes de capa mediante los datos exportados de PLACSIM y las medias obtenidas en el laboratorio, correspondientes a los diques construidos con malla cuadrada y separación entre piezas igual a 1,44*Dn.

Estos coeficientes se necesitan para diseñar la sección de diques homogéneos de baja cota de coronación, ya que con ellos se marca la altura de la estructura.

Tanto el proceso de obtención de las medidas necesarias en el modelo físico y en PLACSIM se encuentran desarrollados en el anejo correspondiente.

Los coeficientes obtenidos en el modelo físico son:

Coef. Capa 1	Coef. Capa 2	Coef. Capa 3
1,28	0,92	0,86

Tabla 3 Coeficientes de capa finales de los ensayos físicos. Fuente: LPC.

Y los calculados con los datos de PLACSIM, en C1:

Coef. Capa 1	Coef. Capa 2	Coef. Capa 3
1,31	0,97	0,93

Tabla 4 Coeficientes de capa finales de las simulaciones en PLACSIM para C1. Fuente: LPC.

Como se puede observar, ambos resultados no coinciden, siendo los valores correspondientes a los obtenidos en PLACSIM los que se asemejan más a lo expuesto en la literatura, por lo que se decide repetir los ensayos físicos en el laboratorio láser bajo la hipótesis de que la diferencia entre ambos resultados pueda deberse a un error del propio instrumento de medición, un metro láser, por estar demasiado próximo al modelo.

4. BATIMETRÍA

La batimetría principal se ha obtenido de la capa ráster disponible en la web de GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*), a partir de la cual se ha programado un código en MATLAB el cual devuelve las líneas batimétricas para poder cargarlas en en el software QGIS.

Con ella se podrá realizar el prediseño de las alternativas y el diseño final de la escogida, ya que marca la profundidad en la que se implantarán.

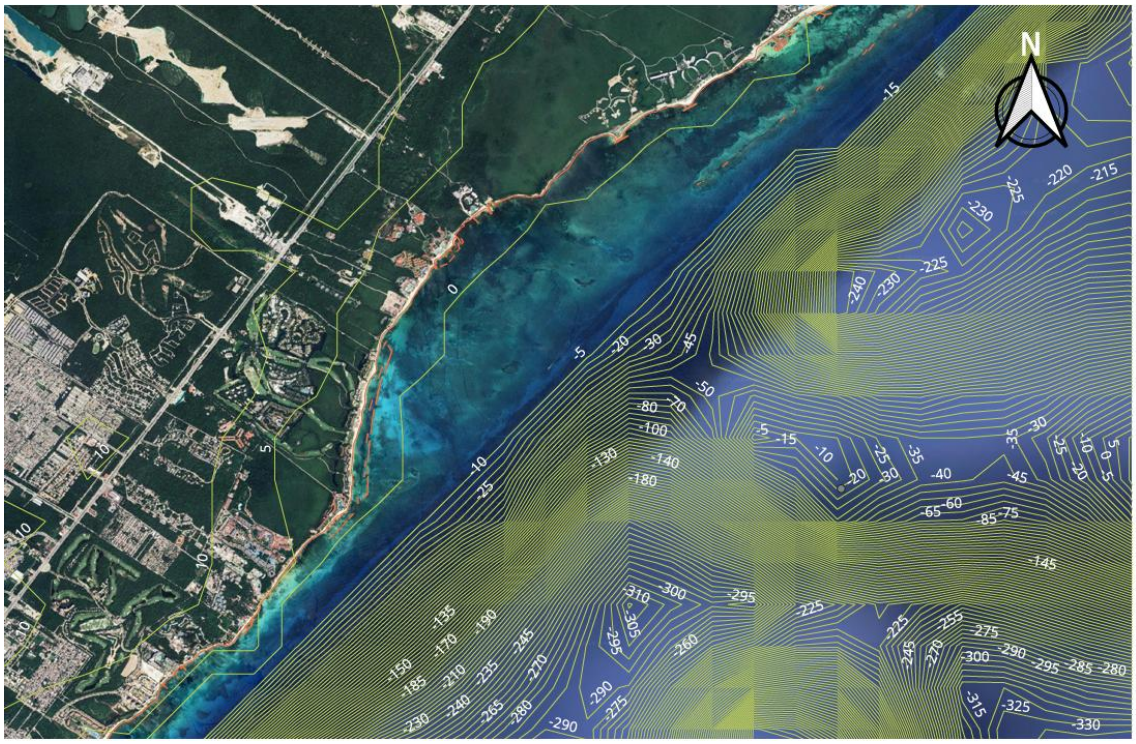


Figura 9 Batimetría general. Fuente: Elaboración propia

5. CLIMA MARÍTIMO

A continuación, se busca caracterizar el clima marítimo correspondiente a la costa de estudio de la playa de Mayakobá, con la información más desarrollada en el anejo número 6.

Para ello se hace un análisis de los datos en obtenidos tanto en aguas profundas como en la costa mediante el mareógrafo de Puerto Morelos, implicando también los datos disponibles sobre la evolución del cambio climático en los factores climatológicos que pueden afectar a los arrecifes.

1.5 CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE

El oleaje predominante procede mayoritariamente desde la dirección ESE y E, con una de altura de ola ($Hs(m)_{50\%}$) igual a 0,68 metros en la dirección ESE y 0,85 metros en la dirección E.

El periodo de pico tiene un valor de 7,72 s para la dirección ESE y 6,35 s para la E.

A continuación, se muestra una representación de la dirección del oleaje en el punto de obtención de datos y un gráfico en el gráfico de probabilidad conjunta de la altura de ola y periodo de pico.

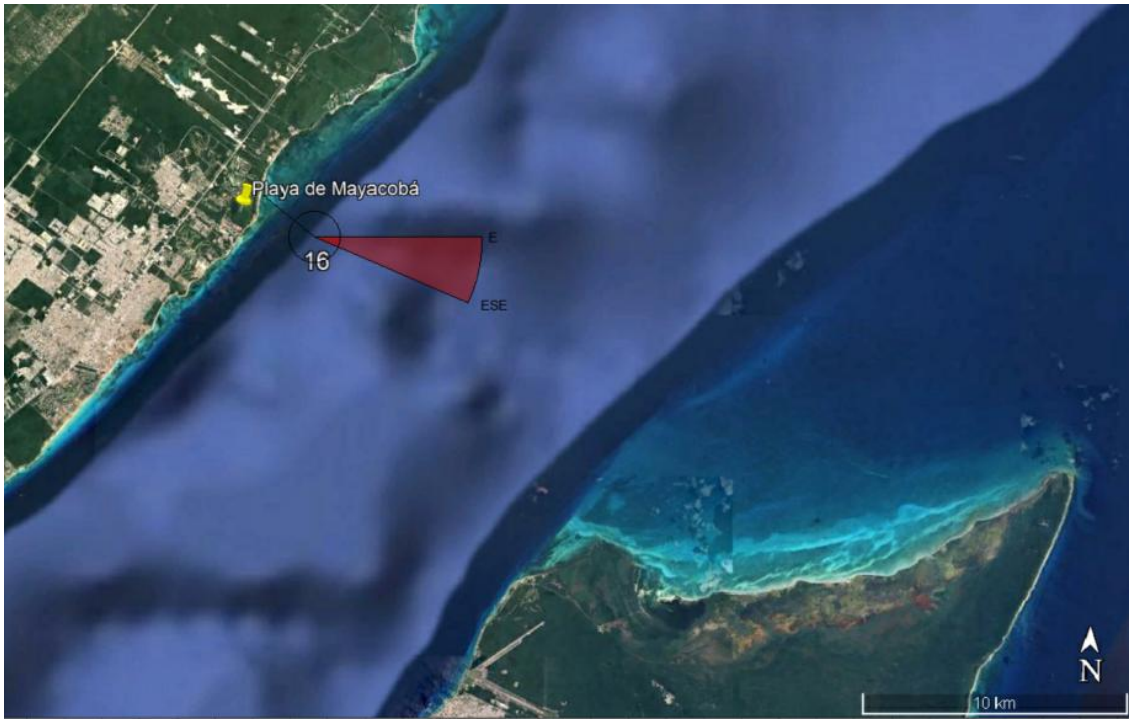


Figura 10 Direcciones del oleaje en aguas profundas. Fuente: Elaboración propia

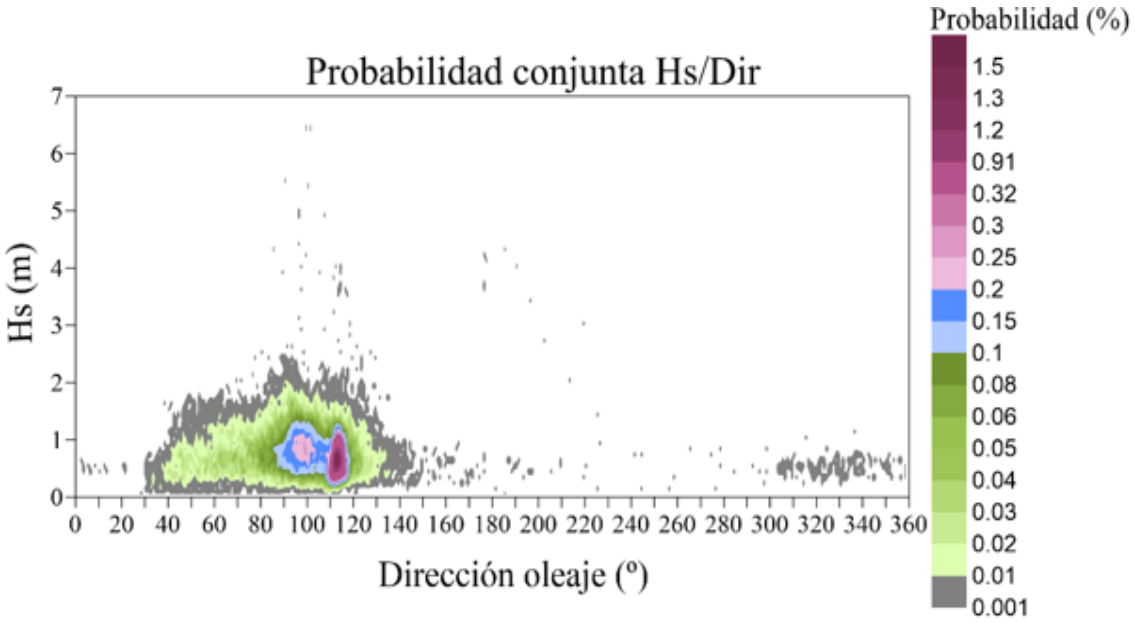


Figura 11 Probabilidad conjunta de Hs(m) con la dirección del oleaje. Fuente: Elaboración propia

1.6 NIVEL DEL MAR

El nivel del mar analizado corresponde al periodo del año 2025, en el cual destaca que entre agosto y octubre hay un aumento del nivel del mar en comparación con el resto del año.

Esto puede deberse a la sensibilidad de la zona a sufrir ciclones tropicales, lo que produce un aumento de las lluvias, vientos y posibles huracanes.

El resto del año, como máximo hay oscilaciones de unos 30 cm desde el nivel medio del mar obtenido.

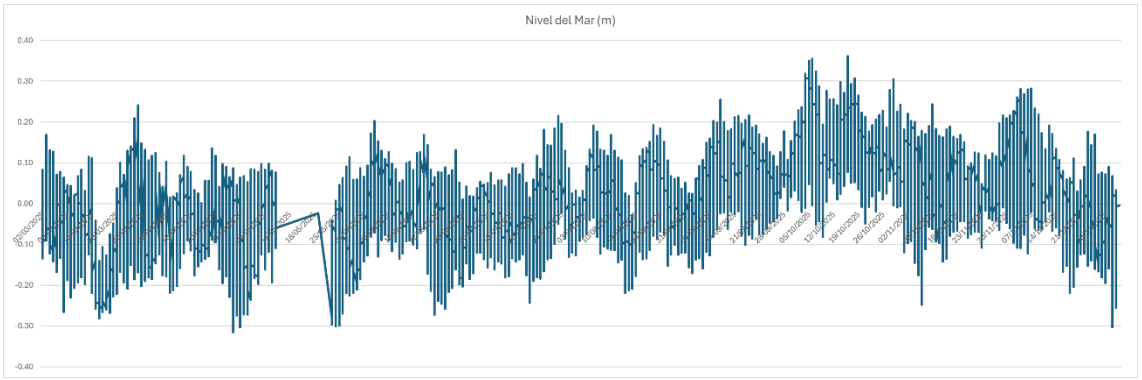


Figura 12 Nivel del mar en Puerto Morelos. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se obtiene que el nivel medio del mar en el punto de registro más próximo a la zona de estudio, según el escenario SSP5-8.5, habrá aumentado un total de 0,24 metros en 2040.

1.7 VIENTO

En lo que respecta al viento, se caracterizan como direcciones más predominantes las de dirección N-W y N-E, cuyas velocidades oscilas entre 2 y 7 m/s.

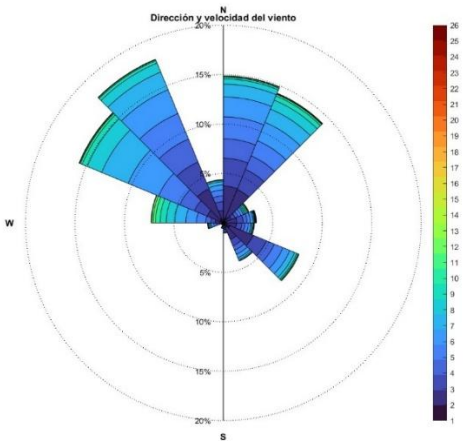


Figura 13 Rosa del viento. Fuente: Elaboración propia

6. ESTUDIO DE SOLUCIONES

En este apartado se va exponer con líneas generales el proceso de elección de la alternativa final escogida, detallado con más detalle en el anejo 7.

Para la alternativa final y en vista de los resultados del estudio experimental de simulación de la colocación de Cubípodos, se realizan dos análisis multicriterio, uno para definir la malla de colocación y otro para distribuir la posición de los diques en planta.

El método escogido de análisis multicriterio es el *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

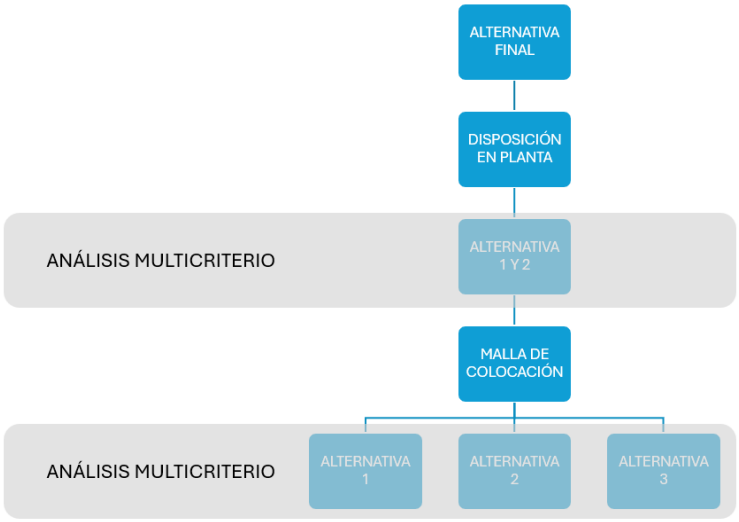


Figura 14 Esquema de la elección de la alternativa final. Fuente: Elaboración propia

1.8 ELECCIÓN DE LA MALLA DE COLOCACIÓN

El primer análisis multicriterio constará 3 alternativas diferenciadas entre ellas por el valor de la separación entre piezas en la malla cuadrada.

- ALTERNATIVA 1: 1,5*Dn
- ALTERNATIVA 2: 1,55*Dn
- ALTERNATIVA 3: 1,60*Dn

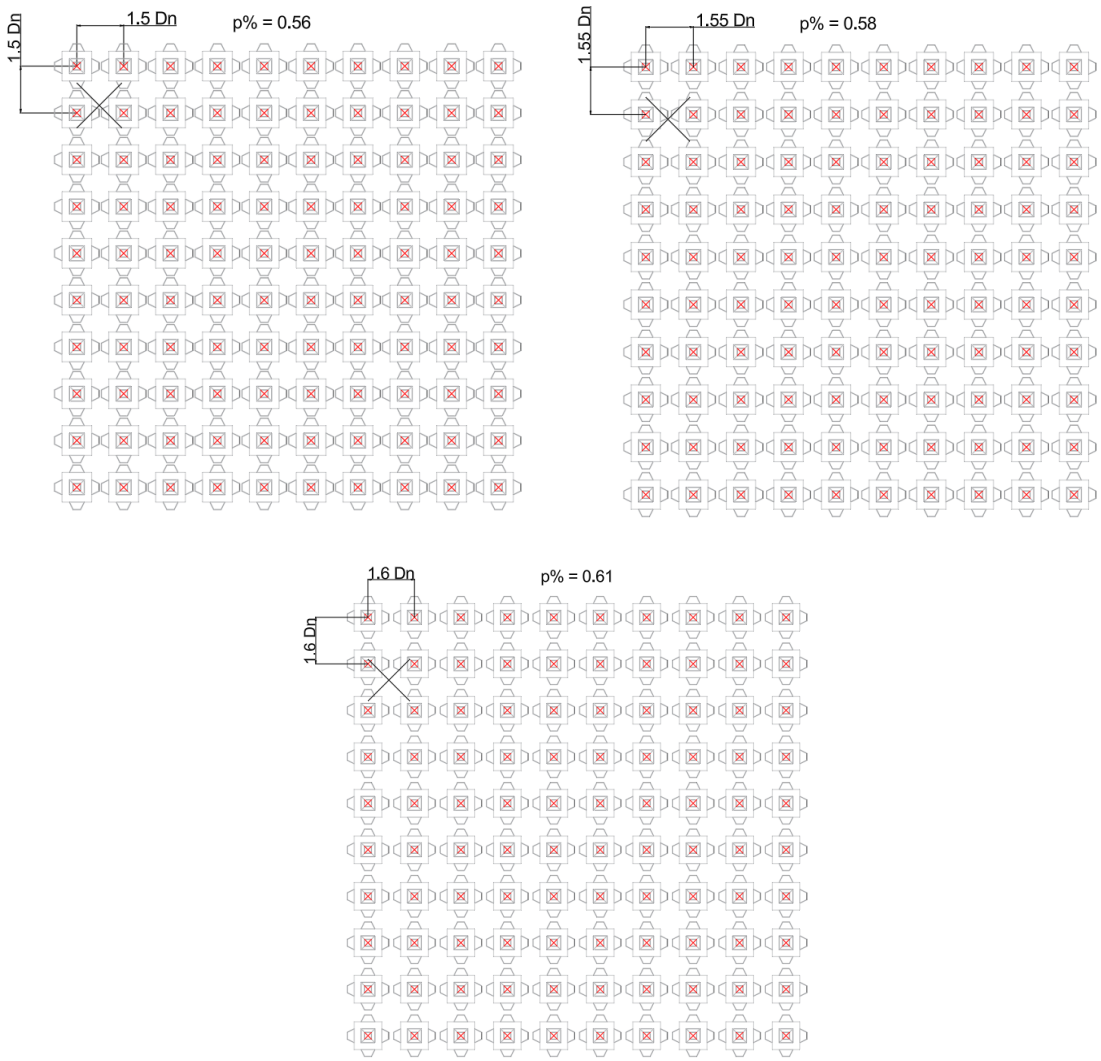


Figura 15 Malla de colocación teóricas de las 3 alternativas. Fuente: Elaboración propia.

Se simularán en PLACSIM sin ningún error añadido primero y después añadiendo un error asociado a la calidad del gruista. Con las simulaciones hechas se analizará la posición final de las piezas con el error cuadrático medio y el N% para poder compararlas y ver cual da un mejor resultado.

Los criterios usados para realizar el análisis multicriterio y sus pesos son los siguientes:

- CRITERIO ECONÓMICO: 25%

El criterio económico se emplea con los coeficientes de capa, de los cuales se puede sacar en conclusión que para obtener una misma altura se necesitarán diámetros de Cubípodos más grandes en mallas cuya separación es mayor, por tanto, el consumo de hormigón para implantar una misma infraestructura será mayor.

- RESULTADO SIMULACIONES: 75%

	SIN ERROR		CON ERROR	
	ε_{rms}/D_n	N%	ε_{rms}/D_n	N%
ALTERNATIVA 1	0,127	0%	0,508	7%
ALTERNATIVA 2	0,100	0%	0,138	0%
ALTERNATIVA 3	0,110	0%	0,185	0%

Tabla 5 Resumen de las simulaciones de las alternativas. Fuente: Elaboración propia.

En vista de los resultados y siguiendo el criterio económico se realizan las matrices pareadas, se comprueba que sean consistentes y se obtiene el siguiente resultado:

- ALTERNATIVA 1: 22%
- ALTERNATIVA 2: 48%
- ALTERNATIVA 3: 30%

Finalmente, la Alternativa 2 es la mejor valorada en el método AHP, por lo que se escoge la malla de colocación cuadrada con separación de 1,55*Dn.

1.9 ELECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

Para esta elección se comparan dos alternativas, las cuales constan de sistemas de diques homogéneos que no altera la línea de costa, siendo:

- ALTERNATIVA 1: 3 Diques de 200 metros de longitud separados 200 metros
- ALTERNATIVA 2: 2 Diques de 200 metros de longitud separados 300 metros

Las cuales se muestran en las siguientes figuras en planta:

Figura 16 Planteamiento de la Alternativa 1 en planta. Fuente: Elaboración propia.

Figura 17 Planteamiento de la Alternativa 2 en planta más ampliada. Fuente: Elaboración propia.

Los criterios y sus pesos son los siguientes:

- ECONÓMICO 33%

Con la malla de 1,55*Dn se obtiene el número de Cubípodos a colocar en cada una y se hace una estimación del precio de ejecución de cada una.

- EFICIENCIA 14%

Para valorar la eficiencia de cada alternativa, se cuantifica la transmisión del oleaje que puede haber en cada una, sabiendo que de por sí, un dique homogéneo de baja cota de coronación tiene un coeficiente de transmisión de la energía del oleaje de 60% aproximadamente, se calcula lo que se transmite por los huecos que quedan entre diques en ambas alternativas, para después superponerlas y ver cuál de las dos, de forma global, transmite menos energía a la costa.

- SOCIAL Y AMBIENTAL 53%

Con este criterio se tiene en cuenta la contaminación que puede suponer cada una de las alternativas y las afecciones sociales y ambientales que puede haber durante la construcción.

Se realizan las matrices de comparación por pares y se obtiene lo siguiente:

ALTERNATIVA 1: 52%

ALTERNATIVA 2: 48%

Por lo que el diseño final se compondrá de 3 diques de baja cota de coronación formados por Cubípodos, de longitud y separación entre ellos 200 metros, construidos en base de una malla cuadrada de separación a y b igual a 1,5*Dn.

7. DISEÑO FINAL

El diseño final de la alternativa corresponde a la alternativa 1 de la elección de la disposición en planta de los diques, además del desmantelamiento de los geotextiles que acompañan a la línea de costa en la playa de Mayakobá.

Los diques tendrán diámetros de 1,2 metros y un peso de 4,15 toneladas.

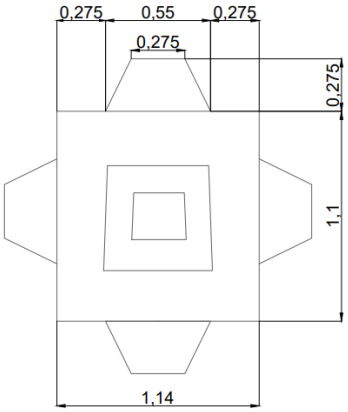


Figura 18 Dimensiones finales del Cubípodo (en metros). Fuente: Elaboración propia.

La sección constructiva será la siguiente

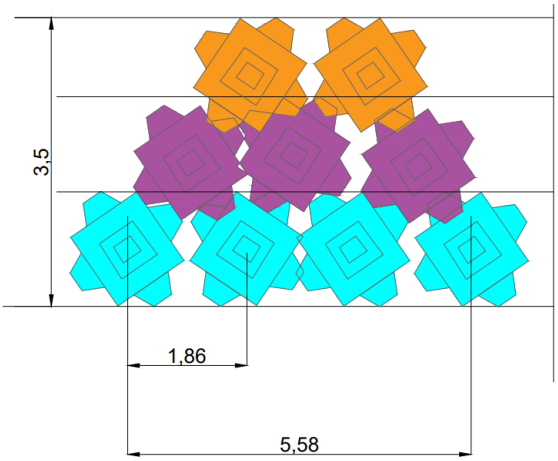


Figura 19 Sección transversal (en metros). Fuente: Elaboración propia.

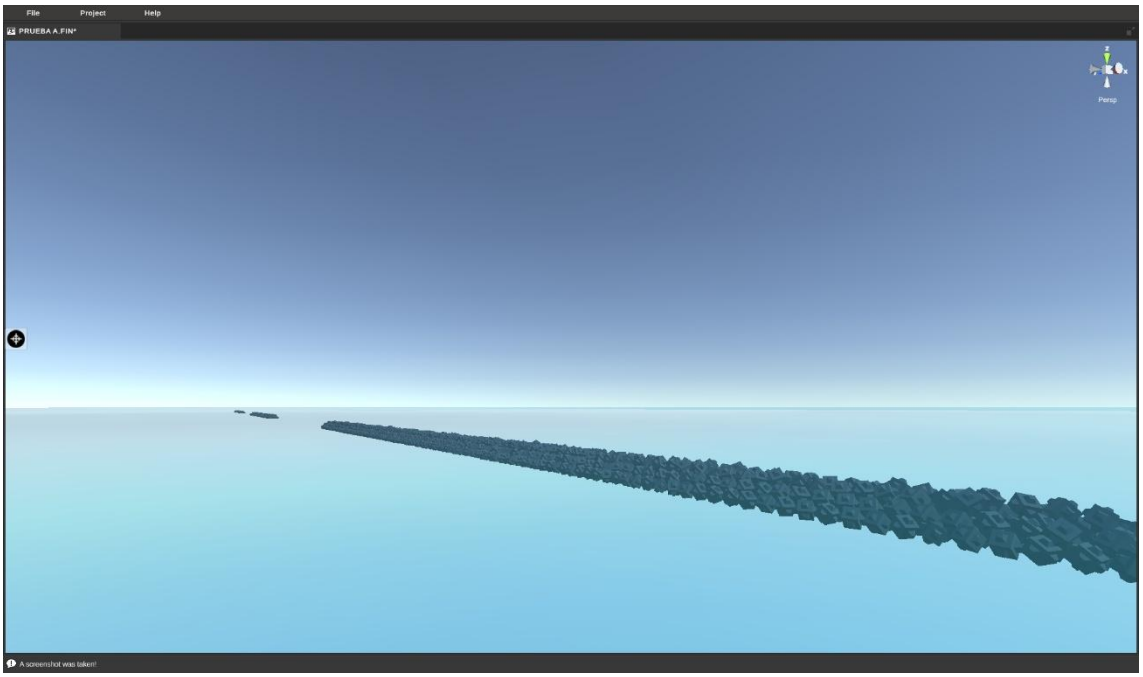


Figura 20 Simulación finalizada en perspectiva. Fuente: Elaboración propia.

8. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Para la construcción de los diques y desmantelamiento de los geotextiles se empieza con la identificación de la zona de acopio y construcción de Cubípodos y el puerto desde donde se cargarán las piezas para ser colocadas en obra.

Se escoge una explanada cercana a la playa de Mayakoba y el puerto de Puerto de Morelos para la carga de los Cubípodos en las barcazas.

Figura 21 Ubicación de la zona de fabricación y acopio y distribución de las zonas de trabajo. Fuente: Elaboración propia

Con el fin de minimizar el tiempo de construcción, se decide solapar los trabajos, empezando el transporte y colocación una vez esté lista la primera tanda de Cubípodos para transportar a puerto y colocar en el mar.

Por otro lado, la retirada de los geotextiles se propone que se realice al inicio de la obra, con el fin de poder que la obra finaliza antes de la época con mayor presión turística (diciembre-abril)

Finalmente, la duración de la obra, en la que se incluyen los trabajos previos, construcción de Cubípodos, puesta en obra y desmantelamiento de los geotextiles se estima que será de 4 meses y medio.

9. VALORACIÓN ECONÓMICA

Se realiza una valoración económica teniendo en cuenta actuaciones previas, la construcción, acopio, transporte y puesta en obra de Cubípodos, el desmantelamiento de los geotextiles y actuaciones complementarias como seguridad y salud, gestión de residuos y control ambiental.

Finalmente, junto con las mediciones estimadas y los tiempos de construcción, se obtiene una estimación total de **1.937.063,62 euros**.

ANEJOS

ÍNDICE DE LOS ANEJOS

ANEJOS 25
ANEJO 1: ANTECEDENTES Y OBJETO DEL ESTUDIO 27
ANEJO 2: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL 46
ANEJO 3: LOCALIZACIÓN Y DATOS PREVIOS 90
ANEJO 4: BATIMETRÍA 102
ANEJO 5: ESTUDIO GEOTÉCNICO, GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO 113
ANEJO 6: CLIMA MARÍTIMO 122
ANEJO 7: ESTUDIO DE SOLUCIONES 143
ANEJO 8: PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO 184
ANEJO 9: VALORACIÓN ECONÓMICA 201

ANEJO 1: ANTECEDENTES Y OBJETO DEL ESTUDIO

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 30
2. RESUMEN 30
3. ANTECEDENTES 31
3.1. DIQUES DE BAJA COTA DE CORONACIÓN (LCS) 31
3.1.1. TIPOS DE LCS 32
3.1.2. VENTAJAS Y DIFERENCIAS ENTRE HLCS DE CUBÍPODOS Y LCS CONVENCIONALES 35
3.2. EL CUBÍPODO 36
3.2.1. PIEZAS ESPECIALES PARA MANTOS DE DIQUES EN TALUD 36
3.2.2. VENTAJAS DEL USO DE CUBÍPODOS 38
3.3. MALLAS DE COLOCACIÓN 41
3.4. COEFICIENTE DE CAPA 42
4. REFERENCIAS 44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipología más adecuada en función de los requerimientos. Fuente: ROM 1.0 - 09 31
Figura 2 Comparación entre dique convencional y dique de baja cota de coronación. Fuente: Kramer, 2002 31
Figura 3 Sección típica de un dique de baja cota de coronación (LCS). Fuente: CIRIA (2007) 33
Figura 4 Sección de dique Ahrens. Fuente: Ahrens, 1989 33
Figura 5 Ejemplo de dique de tipología Ahrens en el Puerto de Santa María el Mar, Cádiz. Fuente: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. 34
Figura 6 Parámetros de las mallas de colocación. Fuente: J Molines et al, 2021 34
Figura 7 Efectos de la malla en la porosidad y la altura del dique. Fuente: Muñoz (2024) 35
Figura 8 Piezas especiales para construcción de diques. Fuente: Dupray y Roberts, 2010 36
Figura 9 Ejemplo de compactación heterogénea en el dique de Punta Langosteira. Fuente: Elaboración propia 37
Figura 10 Vista 3D (Izquierda) y dimensiones principales (Derecha) del Cubípodo. Fuente: Gómez, 2015. 38
Figura 11 Comparación del comportamiento en cuanto a compactación heterogénea de los cubos frente del Cubípodo. Fuente: Gómez, 2015. 38

Figura 12 Manipulación del Cubípodo con pinzas de presión. Fuente: Gómez, 2015. .. 39
Figura 13 Encofrado SATO de Cubípodo. Fuente: Manual del Cubípodo, 2015 40
Figura 14 Disposición abierta y cerrada de almacenamiento de Cubípodos. Fuente: Gómez, 2015. 40
Figura 15 Carga sobre góndola para su transporte a la zona de colocación. Fuente: Manual del Cubípodo. 40
Figura 16 Diques actuales con Cubípodos. Fuente: Web del Cubípodo 2026 41
Figura 17 Malla de colocación triangular. Fuente: Odériz et al (2018) 42
Figura 18 Ensayos de mallas de colocación SPG Y TPG en el canal de oleaje 2D del LPC. Fuente: E. Ripoll, 2024 42
Figura 19 Medida del espesor de capa. Fuente: Molines et al (2021) 43

1. INTRODUCCIÓN

Con el objeto de servir como Trabajo Final de Máster para la obtención del título en el Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, otorgado por la Escuela Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de València, se presenta el siguiente proyecto titulado "*Estudio experimental de colocación de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota de coronación con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de la playa de Mayakobá (México)*" por la autora Claudia Barjola Martínez.

2. RESUMEN

Ante la amenaza del deterioro del Sistema Arrecifal Mesoamericano, a causa de la presión antrópica y el aumento de fenómenos climáticos extremos por el cambio climático, se propone una solución para reparar la barrera arrecifal situada frente la costa de la playa de Mayakobá, mediante la implantación de un sistema de diques homogéneos de baja cota de coronación formados por Cubípodos.

Para el diseño de la solución propuesta se hace uso de los resultados obtenidos en el estudio experimental de colocación de Cubípodos con malla cuadrada, a través del software PLACSIM, desde el cual se ha evaluado la calidad de la malla usada en el laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politécnica de València y se ha conseguido cuantificar la posible desviación que puede provocar el programa al simular la colocación de los Cubípodos.

También se han calculado los coeficientes de capa correspondientes, los cuales se usan para el diseño final del dique, ya que marcan la altura del mismo.

Finalmente, se obtiene que la desviación propia del programa es muy pequeña y que la malla estudiada produce fallos en el proceso constructivo, a causa de la poca separación entre piezas que indica.

Se propone pues, un estudio de alternativas formado por 3 posibles mallas nuevas y dos diseños en planta para la distribución de los diques, obteniendo también los coeficientes de capa de esta nueva malla.

3. ANTECEDENTES

3.1. DIQUES DE BAJA COTA DE CORONACIÓN (LCS)

Se dice que un dique es de tipología LCS cuando la cresta de la estructura se encuentra cerca del nivel medio del mar.

Su comportamiento es similar a los diques convencionales, reflejando parte de la energía recibida y la otra parte disipándola a través de los poros que presenta su estructura. También transmite parte de esta energía cuando la ola llega al dique, ya que al estar la cresta tan cerca del nivel del mar se produce lo que se entiende como *overtopping*.

Esto es justamente la principal diferencia entre un dique sumergido y uno convencional en términos de los requerimientos climáticos en el uso y la explotación:

TIPOLOGÍA	PARTICIÓN DE LA ENERGÍA
Convencional talud	Disipación y reflexión
Sumergido	Disipación, reflexión y transmisión

Figura 1 Tipología más adecuada en función de los requerimientos. Fuente: ROM 1.0 - 09

De todas formas, la transmisión depende de la cota a la que se encuentre la cresta del dique, pudiendo ser de una transmisión relevante o grande, dependiendo de si dicha cresta se encuentra alrededor del SWL o por debajo. (Van der Meer and Daemen, 1994)

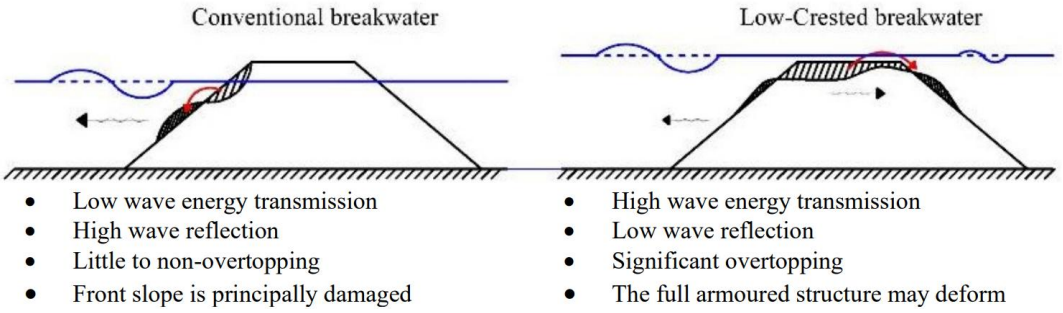


Figura 2 Comparación entre dique convencional y dique de baja cota de coronación. Fuente: Kramer (2002)

La principal aplicación de estos diques es la de protección ante la erosión de la costa, favoreciendo a la estabilización del frente litoral de las mismas, ya que actúan como un obstáculo que produce que las olas rompan antes de llegar a la orilla, alcanzándola con una energía mucho menor.

Por ello, son una opción muy rentable, ya que requieren de menor cantidad de material y se pueden construir a una menor profundidad. Además, son estructuras más estables gracias a que son más porosas y que, al poder estar cerca de la costa, las condiciones de oleaje son menos perjudiciales. (Ahrens, 1985)

Se suelen construir paralelos a la costa y también previenen inundaciones y mejoran ecosistema que la acompaña (Muñoz - Palou, 2024).

3.1.1. TIPOS DE LCS

En este apartado se van a exponer las distintas tipologías de diques de baja cota de coronación, las cuales se pueden clasificar según: (Muñoz - Palou, 2024).

- La estabilidad hidráulica
  - Estables estáticamente: Hay daños mínimos o nulos en condiciones de oleaje de diseño. Como estas estructuras son más porosas, por lo general son más estables, ya que hay mayor transmisión de la energía del oleaje, como se ha indicado antes.
  - Estables dinámicamente: Existe la posibilidad de que la estructura pueda deformarse y alcanzar un estado de equilibrio según las condiciones de diseño.

    Como parámetros de diseño principales se tiene la transmisión de la energía y la altura de la cresta de equilibrio.
- Altura relativa de la cresta
  - Emergidos ($R_c > 0$): Solo permite el *overtopping* de algunas olas, por lo que parte de la energía se mitiga. La estabilidad hidráulica y el coeficiente de transmisión aumentan según lo hace la permeabilidad.

    Parte de la energía atraviesa la estructura, evitando de esa forma movimientos indeseados del manto.
  - Sumergidos ($R_c < 0$): En este caso, el *overtopping* es de todas las olas que alcanzan al dique, lo que reduce la energía transmitida por las olas, ya que, como se ha indicado antes, actúa como un obstáculo que produce la rotura de las olas.

    La estabilidad y la transmisión hidráulica aumenta cuanto menor es la altura de la cresta del dique.

Convencional LCS

La sección de estructura es la de un dique en talud habitual, solo que la altura de la cresta se encuentra sumergida o ligeramente emergida.

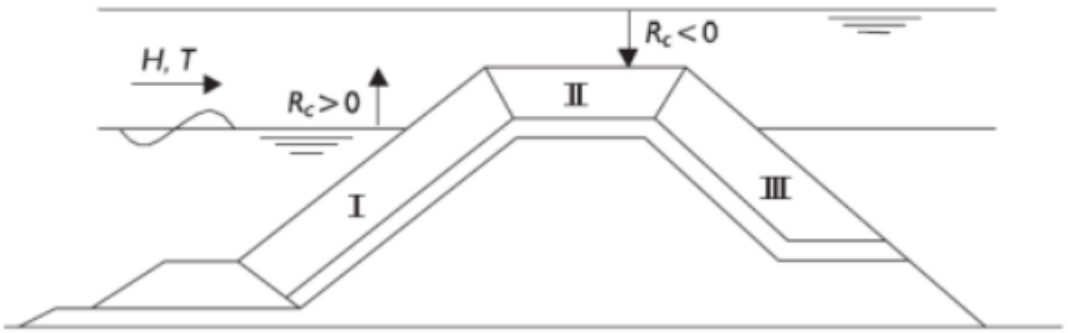


Figura 3 Sección típica de un dique de baja cota de coronación (LCS). Fuente: CIRIA (2007)

Esta tipología de dique de baja cota de coronación, se caracteriza por ser multicapa, presentando núcleo, manto y en algunos casos puede que incluso filtro y berma de pie.

Gracias al núcleo, los diques no se deforman en exceso ante los oleajes intensos, lo que hace que se clasifique como una estructura estable estáticamente.

Diques homogéneos

Estas estructuras se caracterizan por no poseer la tradicional sección transversal multicapa, sino por ser una estructura homogénea, lo que produce que su diseño sea más sencillo.

Dique Ahrens

El dique Ahrens es una estructura marítima que se conoce de forma común como dique arrecife heterogéneo

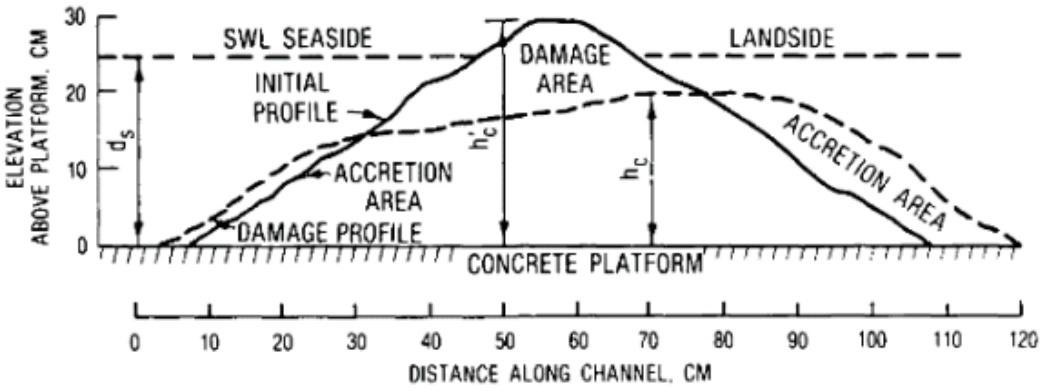


Figura 4 Sección de dique Ahrens. Fuente: Ahrens (1989)

Se clasifican como dinámicamente estables, ya que bajo la acción de tormentas puede sufrir deformaciones al estar formado por escollera heterogénea, sin presencia de núcleo. Así mismo, presenta un tamaño relativo máximo de roca inferior a $D_{n,50}/h_c < 0.1$

Este daño es acumulativo, por lo que es el menos recomendable de todos. Se recomienda diseñar para un umbral de daño bajo o nulo en condiciones de olas de diseño (Burcharth et al., 2006).

Figura 5 Ejemplo de dique de tipología Ahrens en el Puerto de Santa María del Mar, Cádiz. Fuente: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.

Dique homogéneo de baja cota de coronación (HLCS)

Los diques homogéneos también pueden estar formados por elementos prefabricados de hormigón. En este sentido, Odériz et al. (2018) y Medina et al. (2019) propusieron este tipo de estructura constituida únicamente por Cubípodos.

Por su parte, Muñoz y Palou (2024) describen estos diques como estructuras multicapa formadas exclusivamente por unidades de Cubípodos, en las cuales es necesaria únicamente una malla de colocación para su posicionamiento y para definir su configuración geométrica.

Dichas mallas de colocación siguen patrones geométricos descritos por parámetros de cuadrícula (a y b), como se puede apreciar en la siguiente figura, siendo de tipología cuadrada (a) o triangular (b):

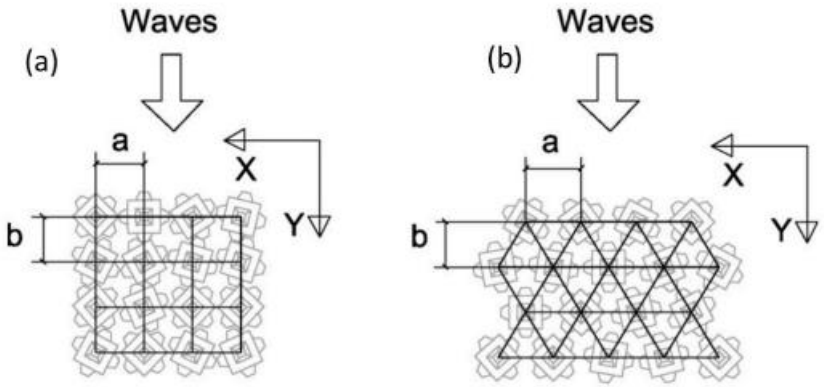


Figura 6 Parámetros de las mallas de colocación. Fuente: J Molines et al (2021)

Dichas mallas afectan directamente a la porosidad y a la altura de la estructura, ya que cuanto más espaciados son los huecos entre los Cubípodos, más porosidad presenta el dique y menor altura.

En el caso de estas estructuras, al contrario de los diques Ahrens, el tamaño relativo de pieza unidad es igual a $D_{n,50}/h_c > 0.2$ (Odériz et al., 2018; Medina et al., 2019), lo que los hace clasificarse como diques de estabilidad estática, ya que dicho tamaño relativo se aproxima más al recomendado en los diques convencionales $D_{n,50}/h_c > 0,29$ (Muñoz - Palou, 2024)

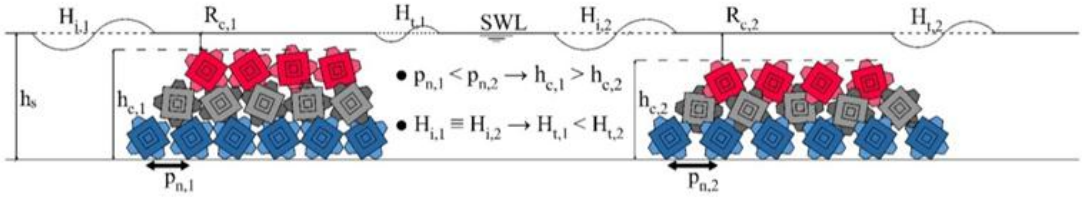


Figura 7 Efectos de la malla en la porosidad y la altura del dique. Fuente: Muñoz – Palou (2024)

3.1.2. VENTAJAS Y DIFERENCIAS ENTRE HLCS DE CUBÍPODOS Y LCS CONVENCIONALES

Beneficios medioambientales

Las estructuras LCS se comportan muy bien como arrecifes artificiales, atenuando la energía de las olas entrantes y protegiendo las playas cercanas, por lo que son muy beneficiosas en zonas con arrecifes degradados.

También promueven la colonización marina (Muñoz-Palou, 2024) y son usadas mundialmente para las siguientes aplicaciones:

- Promover la biodiversidad (Pickering et al., 1999)
- Conservar la naturaleza (Smith et al., 1999)
- Proteger y rehabilitar los hábitats marinos naturales (Airoldi y Bulleri, 2011; Clark y Edwards, 1994)
- Reducir y proteger frente a la erosión costera

Además, al permitir el rebase, se favorece a la recirculación del agua, permitiendo la oxigenación de esta y mejorando su calidad en el trasdós de la estructura.

Visualmente también son mejor opción, ya que poseen un impacto visual bajo, dotando de un valor socioecológico a la zona en la que actúan (Silva et al., 2017).

Ventajas e inconvenientes de los HLCS de Cubípodos frente a los LCS convencionales

Los HLCS son considerados como infraestructura verde (Silva et al., 2017) más beneficiosos a la hora de fomentar la fauna marina, ya que pueden imitar la porosidad

de los arrecifes naturales, por lo que son mejores para la colonización y regeneración de hábitats marinos (Silva et al. 2017).

Dicha porosidad también afecta a que el paso de luz a través de la estructura sea mayor, por lo que favorece a la colonización de especies marinas.

Por otro lado, la construcción y reparación de los HLCS de Cubípodos, aparte de ser más sencilla, causa una turbidez en el agua menor y reduciendo la afección al lecho marino. (Medina et al., 2022)

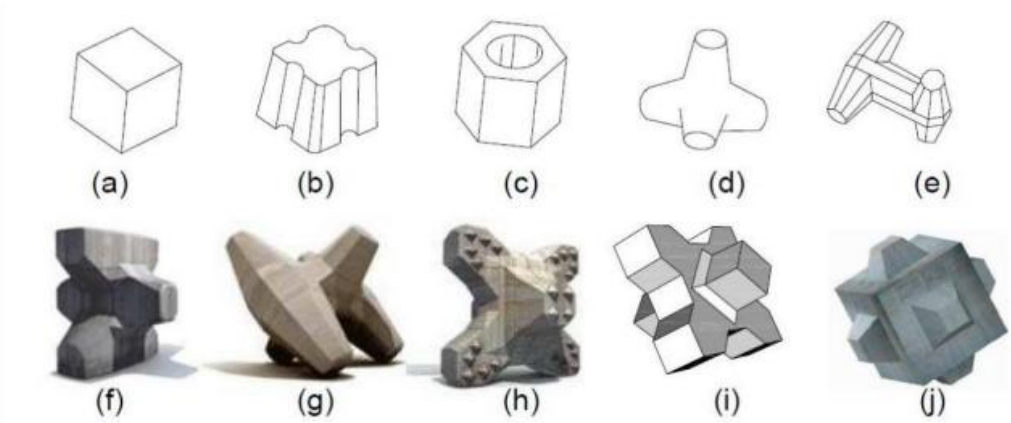
A largo plazo, estas estructuras ofrecen un comportamiento hidráulico más estable de forma estática. Según la permeabilidad y el tamaño de las piezas esta característica se ve afectada. Aun así, en caso de tormentas extremas, se pueden recuperar las piezas que puedan haber sido perdidas con el mismo proceso de su colocación o incluso, reutilizarlas en otra estructura como una segunda vida. (Medina et al., 2022)

Estas estructuras también presentan dos inconvenientes a destacar:

- Tienen un consumo de hormigón mayor que las estructuras formadas por escollera, por lo que, durante la fabricación de los Cubípodos se generan emisiones que hacen que la huella de carbono de estos diques sea mayor que la de los LCS convencionales.
- Favorecen a la posibilidad de colonización de especies invasoras. Para ello se propone una monitorización que posibilite su control, aunque esto conlleva un sobrecoste.

3.2. EL CUBÍPODO

3.2.1. PIEZAS ESPECIALES PARA MANTOS DE DIQUES EN TALUD



(a) parallelepiped and cube (b) Antifer cube (c) Seabee (d) Tetrapod (e) Dolosse Accropode (g) Core-Loc (h) Accropode II (i) Xbloc (j) Cubipod

Figura 8 Piezas especiales para construcción de diques. Fuente: Dupray y Roberts (2010)

La compactación heterogénea es un modo de fallo que sufren las piezas de hormigón prefabricadas, colocadas en los mantos de los diques en talud como escollera artificial que, con la acción del oleaje, son golpeadas y poco a poco se van deslizando, haciendo que se acoplen cara a cara con el tiempo, perdiendo la colocación aleatoria con las que habían sido posicionadas y afectando directamente a la porosidad de la estructura. Como consecuencia, también se pueden producir afecciones a la permeabilidad, ya que se compactan las piezas de las zonas inferiores, dejando huecos en la parte superior que se pueden asemejar a daño por avería del manto a causa de pérdida de piezas.

Figura 9 Ejemplo de compactación heterogénea en el dique de Punta Langosteira. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se enumeran los problemas asociados a la reorganización de las piezas prefabricadas de hormigón usadas como escollera artificial en mantos de diques en talud, que afectan a la estabilidad hidráulica, diseño y operativa portuaria. (Gómez, 2015)

- Baja estabilidad hidráulica y elevado consumo de hormigón
- Compactación heterogénea, que produce cambios en la permeabilidad del manto y disminuye su porosidad.
- Al compactarse la parte inferior, aumenta la densidad de empaquetamiento, lo que puede producir que la capa se levante a causa del aumento de subpresión dentro del dique.
- Pérdidas de fricción, lo que facilita el deslizamiento global del manto.
- Al haber una superficie lisa, puede aumentar el remonte, caudales de rebase y fuerzas sobre el espaldón al facilitar el ascenso del oleaje sobre el talud.

Sin embargo, el Cubípodo es una pieza prefabricada de hormigón en masa, de forma principal cúbica, pero con protuberancias en todas sus caras que evitan el problema descrito de compactación heterogénea.

Gómez indica que, la forma óptima del Cubípodo es cuando las protuberancias son pirámides truncadas de sección cuadrada idénticas y centradas en todas sus caras.

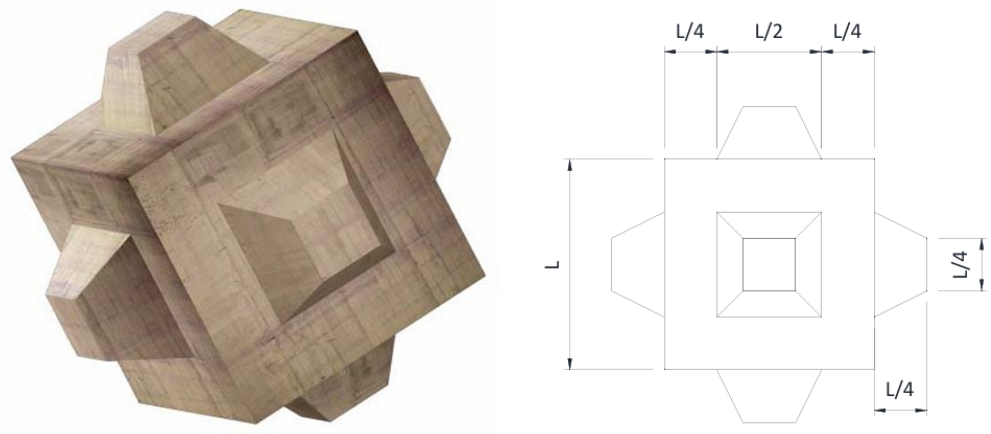


Figura 10 Vista 3D (Izquierda) y dimensiones principales (Derecha) del Cubípodo. Fuente: Gómez, 2015.

3.2.2. VENTAJAS DEL USO DE CUBÍPODOS

Gómez (2015) indica las siguientes ventajas y aspectos innovadores:

- Evita la compactación heterogénea

La Figura 10 muestra la ventaja ya descrita del comportamiento de los Cubípodos ante la compactación heterogénea, comparando con los cubos prefabricados tradicionales.

Figura 11 Comparación del comportamiento en cuanto a compactación heterogénea de los cubos frente del Cubípodo. Fuente: Gómez (2015)

- Mantiene la porosidad del manto homogénea
- Elevada estabilidad hidráulica y menor remonte y rebase
- Ahorro económico y de materiales

Esto es debido a que, para resistir a las mismas acciones, se pueden usar Cubípodos más pequeños del tamaño que se requeriría para los cubos tradicionales.

Al haber una disminución del hormigón, también lo hace la huella de carbono causada por la fabricación de estos.

- Gran robustez

Como el Cubípodo presenta partes poco esbelticas, tiene una elevada resistencia estructural a la rotura.

Por ello, también favorece a que no es necesario un uso de hormigón de elevada calidad, siendo uno de 25 MPa más que suficiente. En cambio, en uso de piezas como la tipología *bulky* sí requieren de un hormigón de mayor calidad para evitar roturas frágiles.

- Facilidad de manipulación colocación aleatoria

Su colocación es muy similar a la de las piezas de cubos tradicionales (ambos se colocan de forma aleatoria), siendo una ejecución más sencilla que con el uso de piezas de colocación orientada (Acrópodos, Core–loc … etc).

Se efectúa con pinzas de doble presión y llegan a tener un rendimiento aproximado de 8 uds/h

Figura 12 Manipulación del Cubípodo con pinzas de presión. Fuente: Gómez (2015).

- Elevados rendimientos de fabricación, manipulación y acopio de piezas

Su encofrado es sencillo, con un rendimiento de aproximadamente 3 uds/día/encofrado.

Figura 13 Encofrado SATO de Cubípodo. Fuente: Manual del Cubípodo, 2015

También, esta tipología permite el acopio de Cubípodos en altura, pudiendo hacer parques de fabricación de tamaño menor.

Estos acopios se pueden disponer de posición abierta o cerrada, según la porosidad (50% o 30% respectivamente).

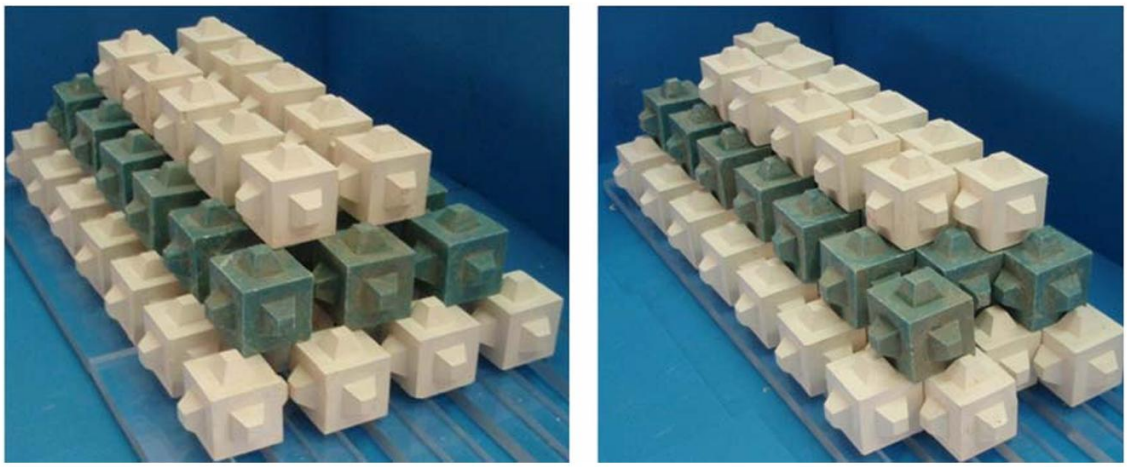


Figura 14 Disposición abierta y cerrada de almacenamiento de Cubípodos. Fuente: Gómez (2015).

Figura 15 Carga sobre góndola para su transporte a la zona de colocación. Fuente: Manual del Cubípodo (2015).

En la actualidad, existen los siguientes diques con manto hecho de Cubípodos:

Figura 16 Diques actuales con Cubípodos. Fuente: Cubipod International. (s. f.). Cubípodo. https://www.cubipod.com/es/

3.3. MALLAS DE COLOCACIÓN

Las mallas de colocación son una pieza clave y fundamental en la fase de diseño de una infraestructura marítima HLCS, ya que afectan al comportamiento hidráulico con factores como el francobordo, la porosidad y la cota de coronación final.

Medina et al (2020) indican que lo único que se puede alterar en el diseño de un dique homogéneo para conseguir el francobordo deseado (Variable que afecta directamente a la transmisión del oleaje) es variar la capas (en número) y la colocación de los Cubípodos (la malla), al contrario que con un dique convencional que se puede cambiar simplemente alterando la altura del núcleo.

Las tipologías de mallas de colocación principales estudiadas se dividen en dos tipos:

- Triangulares (TPG)
- Rectangulares (SPG)

Para diques HLCS, Medina y Gómez Martín, (2016) concluyen que la malla que mejor se comporta es la de tipo triangular, orientada hacia el oleaje, con la primera capa colocada de forma convencional.

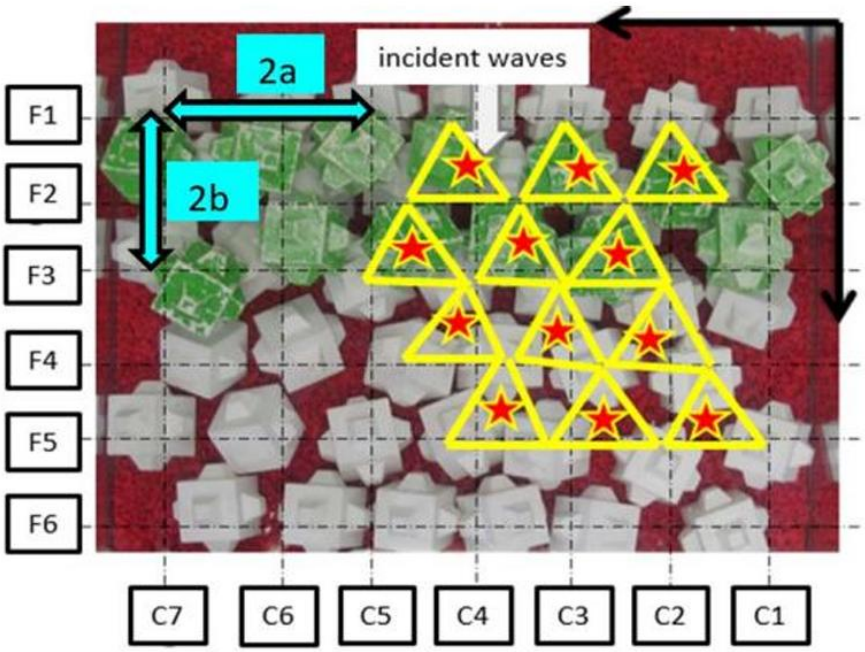


Figura 17 Malla de colocación triangular. Fuente: Odériz et al (2018)

Aunque la malla de colocación rectangular presenta beneficios como un menor daño estructural y facilidad constructiva (E. Ripoll, 2024)

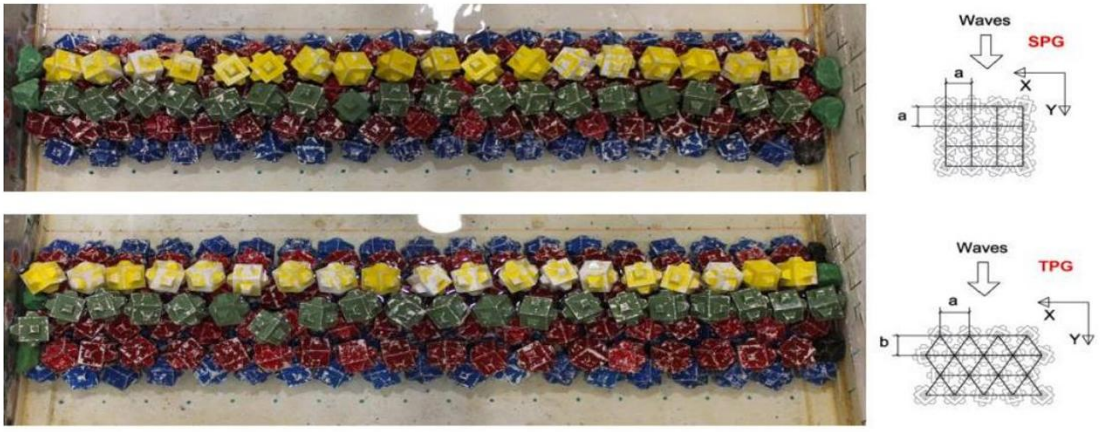


Figura 18 Ensayos de mallas de colocación SPG Y TPG en el canal de oleaje 2D del LPC. Fuente: E. Ripoll (2024)

3.4. COEFICIENTE DE CAPA

Se entiende como coeficiente de capa a un parámetro adimensional (k_Δ), con el que se puede estimar la altura total y por capas de una infraestructura.

Este parámetro relaciona el espesor medio de una capa con el diámetro nominal de las piezas que lo componen, definido por Molines et al (2021) por la siguiente ecuación.

$$k_{\Delta j} = \frac{h_{j-1} - h_j}{D_n} \quad (1)$$

En la cual $h_{j1} - h_j$, y como se muestra en la Figura 19, es la altura relativa de la capa, siendo j el número de la misma.

D_n corresponde con el diámetro nominal de la pieza (En el caso de este estudio, Cubípodos de Dn = 1).

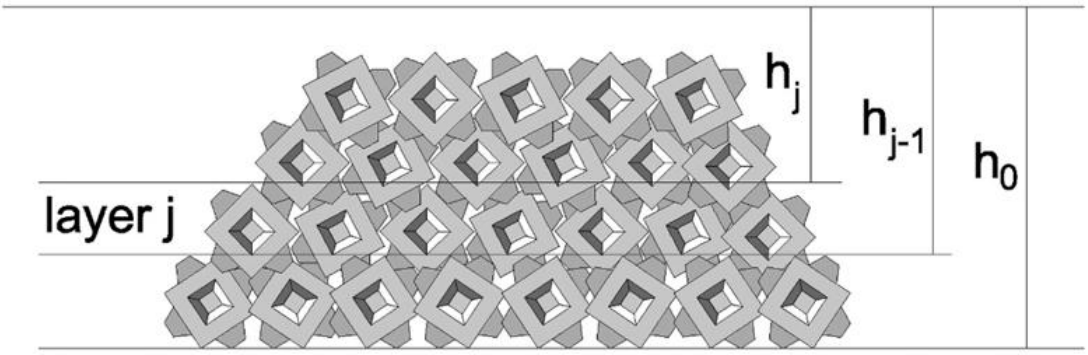


Figura 19 Medida del espesor de capa. Fuente: Molines et al (2021)

4. REFERENCIAS

- Ahrens, J. P. (1985). *Reef type breakwaters*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 111(2), 282–301.
- Ahrens, J. P. (1989). *Stability of reef breakwaters*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 115(2), 221–234.
- Airoldi, L., & Bulleri, F. (2011). Artificial reefs in ecological research: A review. *Marine Ecology*, 32(1), 1–17. https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2010.00421.x
- Burcharth, H. F., Hughes, S. A., Van der Meer, J. W., & Andersen, O. H. (2006). *Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering*. CIRIA, CUR & CETMEF.
- CIRIA. (2007). *The rock manual: The use of rock in hydraulic engineering* (2nd ed.). CIRIA.
- Clark, S., & Edwards, A. J. (1994). Use of artificial reef structures to rehabilitate reef flats degraded by coral mining in the Maldives. *Bulletin of Marine Science*, 55(2–3), 724–744.
- Dupray, S., & Roberts, J. (2010). *Concrete armour units for breakwaters*. ICE Publishing.
- Gómez, J. L. (2015). Análisis de la evolución de averías en el manto principal de diques en talud formado por escolleras, cubos y cubípodos. Universitat Politècnica de València.
- Kramer, M. (2002). *Low-crested breakwaters: Hydraulic performance*. Delft University of Technology.
- Medina, J. R., Gómez-Martín, M. E., & Odériz, I. (2016). Hydraulic stability of concrete armor units placed in double-layer random placement. *Coastal Engineering*, 117, 97–107. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.07.007
- Medina, J. R., Molines, J., & Odériz, I. (2019). Homogeneous low-crested structures made of Cubipods. *Coastal Engineering*, 150, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.03.005
- Medina, J. R., Molines, J., & Muñoz-Palou, J. (2020). Design of homogeneous low-crested breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, 36, 1–15.
- Medina, J. R., Molines, J., & Muñoz-Palou, J. (2022). Sustainability assessment of concrete armor units in coastal structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 1–18. https://doi.org/10.3390/jmse10030345
- Molines, J., Medina, J. R., & Odériz, I. (2021). Layer thickness coefficients for concrete armour units. *Coastal Engineering*, 164, 103812. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103812

- Muñoz-Palou, J. (2024). *Diques de baja cota de coronación y estructuras homogéneas*. Universitat Politècnica de València.
- Odériz, I., Medina, J. R., & Molines, J. (2018). Placement grids for Cubipod armor layers. *Coastal Engineering*, 140, 213–227. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.07.003
- Pickering, H., Whitmarsh, D., & Jensen, A. (1999). Artificial reefs as a tool to aid rehabilitation of coastal ecosystems. *ICES Journal of Marine Science*, 56(5), 902–910.
- Ripoll, E. (2024). *Ensayos experimentales de mallas de colocación en diques HLCS*. Universitat Politècnica de València.
- Silva, R., Martínez, M. L., & Odériz, I. (2017). Green infrastructure in coastal engineering. *Sustainability*, 9(10), 1–18. https://doi.org/10.3390/su9101802
- Smith, S. D. A., Simpson, R. D., & Cairns, S. C. (1999). The ecological role of artificial reefs. *Marine Ecology Progress Series*, 178, 1–11.
- Van der Meer, J. W., & Daemen, I. F. R. (1994). Stability and transmission at low-crested rubble mound structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 120(1), 1–19.
- Cubipod International, S. L. (s. f.). *Cubípodo*. https://www.cubipod.com/es/
- Puertos del Estado. (2009). *Recomendaciones para obras marítimas ROM 1.0-09. Criterios de proyecto de obras marítimas y portuarias*. Ministerio de Fomento. https://www.puertos.es/
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. https://www.miteco.gob.es/

ANEJO 2: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

INDICE

1. INTRODUCCIÓN 51
2. MODELO FÍSICO E INSTRUMENTACIÓN 51
2.1. TALUDÓMETRO 52
2.2. METRO LÁSER 53
3. SIMULACIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE DIQUES HOMOGÉNEOS CON MALLA CUADRADA 53
3.1. VARIABLES EN LAS SIMULACIONES A REALIZAR 54
3.2. CARACTERIZACIÓN DE DESVIACIÓN INTRÍNSECA DE PLACSIM 56
3.2.1. CUANTIFICACIÓN DEL ERROR 57
3.2.2. ERROR TOTAL DEL MODELO FÍSICO 58
3.2.3. ERROR TIPO UNO: COLOCACIÓN 64
3.2.4. ERROR TIPO DOS: COLISIÓN 66
3.2.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS 69
3.2.6. ERROR TOTAL DEL MODELO CON ERROR ADICIONAL 73
4. CÁLCULO DE COEFICIENTES DE CAPA 75
4.1. MODELO FÍSICO 76
4.1.1. MÉTODO EXPERIMENTAL Y POCESO DE CONSTRUCCIÓN 76
4.2. MODELO PLACISM 81
4.3. RESULTADOS 86
5. REFERENCIAS 90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2 Esquema de diseño de dique homogéneo con malla cuadrada. Fuente: Molines et al (2021) ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 1 Malla de colocación cuadrada usada en los ensayos. Fuente: LPC, UPV 51
Figura 3 Colocación de los Cubípodos en la malla. Fuente: Mashadyan (2023) 52
Figura 4 Taludómetro e inclinómetro digital con el que se controla la inclinación. Fuente: Elaboración propia 53
Figura 5 Comprobación de la correcta posición del metro láser. Fuente: Elaboración propia 53
Figura 6 Página principal de la página web de PLACSIM. Fuente: PLACISM, 2026 54
Figura 7 Inserción de los inputs descritos. Fuente: Elaboración propia 55

Figura 8 Panel de preferencias desde donde se cambia la colisión. Fuente: Elaboración propia 55
Figura 9 Forma de exportar las coordenadas finales de la simulación. Fuente: Elaboración propia.....57
Figura 10 Plano horizontal cargado en PLACSIM. Fuente: Elaboración propia.....58
Figura 11 Extracto del input Crane position a cargar en PLACSIM. Fuente: Elaboración propia 59
Figura 12 Crane position en PLACSIM. Fuente: Elaboración propia 59
Figura 13 Error cuadrático medio para una malla rectangular. Fuente: Muñoz-Paolu, 2024 61
Figura 14 Error cuadrático medio junto con su N% correspondiente. Fuente: Muñoz-Palou (2024).....62
Figura 15 Histograma y ajuste a una normal en la simulación 10 de colisión 1 (Izquierda) y prueba de bondad visual de Kolmogorov-Smirnoff. Fuente: Elaboración propia.....62
Figura 16 Piezas con las rotaciones correspondientes a cada simulación. Fuente: Elaboración propia.....65
Figura 17 Captura de la simulación 1desde el eje y finalizada. Fuente: Elaboración propia .65
Figura 18 Captura de la simulación 4 en perspectiva finalizada. Fuente: Elaboración propia 65
Figura 19 Captura de la simulación 4 en planta finalizada. Fuente: Elaboración propia 66
Figura 20 INPUT 2.1. Fuente: Elaboración propia 67
Figura 21 INPUT 2.2. Fuente: Elaboración propia 67
Figura 22 Captura de la simulación 1 en colisión 0 desde el eje y finalizada. Fuente: Elaboración propia.....68
Figura 23 Captura de la simulación 1 en colisión 1 en planta finalizada. Fuente: Elaboración propia.....69
Figura 24 Vista en perspectiva de la simulación 2, para colisión 1 finalizada. Fuente: Elaboración propia.....69
Figura 25 Histogramas de las 4 simulaciones realizadas para caracterizar el error de PLACSIM por colisión. Fuente: Elaboración propia. 72
Figura 26 Resultado del dique tras la simulación en planta. Fuente: Elaboración propia. 75
Figura 27 Resultado del dique tras la simulación desde el eje y. Fuente: Elaboración propia. 75
Figura 28 Medida del espesor de capa. Fuente: Molines et al (2021) 76
Figura 29 Malla de colocación en el taludómetro. Fuente: Elaboración propia. 77
Figura 30 Chapa para medir la distancia con metro láser. Fuente: Elaboración propia. 77
Figura 31 Medición de la distancia del láser hasta la base del taludómetro. Fuente: Elaboración propia.....78
Figura 32 Colocación de la primera capa de Cubípodos. Fuente: Elaboración propia. 79

Figura 33 Medición de la distancia del láser hasta la primera capa. Fuente: Elaboración propia.....79
Figura 34 Medición del láser a un punto de la primera capa. Fuente: Elaboración propia. ..80
Figura 35 Medición de la tercera y última capa. Fuente: Elaboración propia. 80
Figura 36 Input crane position general de las simulaciones. Fuente: Elaboración propia 81
Figura 37 Input crane position con las chapas de medición 2*Dn. Fuente: Elaboración propia 82
Figura 38 Imagen en planta de la simulación de la primera capa finalizada. Fuente: Elaboración propia.....82
Figura 39 Imagen lateral desde eje x de la simulación de la primera capa finalizada. Fuente: Elaboración propia.....83
Figura 40 Proceso de exportación de coordenadas finales. Fuente: Elaboración propia.....83
Figura 41 Proceso de desactivación de las chapas. Fuente: Elaboración propia 84
Figura 42 Imagen lateral desde eje x de la simulación finalizada. Fuente: Elaboración propia 85
Figura 43 Imagen en plantade la simulación finalizada. Fuente: Elaboración propia.....85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de los Cubípodos usados para los ensayos físicos. Fuente: Elaboración propia.....52
Tabla 2 Resultados de error cuadrático medio y N de las simulaciones realizadas. Fuente: Elaboración propia.....60
Tabla 3 Resultados del test de bondad Kolmogorov - Smirnov. Fuente: Elaboración propia. 61
Tabla 4 Tabla resumen de las simulaciones realizadas para los ensayos de caracterización del error tipo 1. Fuente: Elaboración propia.....64
Tabla 5 Tabla resumen de las simulaciones realizadas para los ensayos de caracterización del error tipo 2. Fuente: Elaboración propia. 68
Tabla 6 Tabla resumen de las características de los INPUTS para los ensayos de caracterización del error tipo 2. Fuente: Elaboración propia. 68
Tabla 7 Resultados del error cuadrático medio de las simulaciones para caracterizar el error de PLACSIM por colocación. Fuente: Elaboración propia 70
Tabla 8 Desviación estándar de las cuatro simulaciones realizadas para caracterizar el error de PLACSIM por colisión. Fuente: Elaboración propia 72
Tabla 9 Resultados de error cuadrático medio y N de las simulaciones realizadas. Fuente: Elaboración propia.....74
Tabla 10 Resultados del test de bondad Kolmogorov - Smirnov. Fuente: Elaboración propia. 74
Tabla 11 Mediciones realizadas en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia.....76

Tabla 12 Mediciones realizadas en PLACSIM. Fuente: Elaboración propia 85
Tabla 13 Cálculo en Excel de las alturas de cada capa desde el plano con los datos de las simulaciones de colisión 0. Fuente: Elaboración propia 87
Tabla 14 Cálculo en Excel de los coeficientes de capa de cada chapa con los datos de las simulaciones de colisión 0. Fuente: Elaboración propia 88
Tabla 15 Cálculo en Excel de los coeficientes de capa totales por colisiones. Fuente: Elaboración propia.....88

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este anejo se va a centrar en simular la construcción del dique homogéneo de baja cota de coronación formado por Cubípodos, ensayado en el propio laboratorio de puertos y costas de la Universitat Politècnica de València, cuya malla se caracteriza por ser cuadrada y los parámetros geométricos a y b igual a 1,44*Dn.

Estas simulaciones se realizarán mediante el software PLACSIM y se caracterizaran para obtener el error de colocación de las piezas, debido a los factores que lo componen, llegando a distinguir los errores debidos al software, independientes la calidad de la malla y posibles errores adicionales.

Además, también se obtendrán los coeficientes de capa para poder diseñar la estructura y se determinará si la malla ensayada es adecuada o no para el diseño del dique.

2. MODELO FÍSICO E INSTRUMENTACIÓN

El modelo físico ensayado en el laboratorio consta de un dique homogéneo formado por Cubípodos colocados siguiendo la malla de colocación cuadrada representada en la siguiente figura.

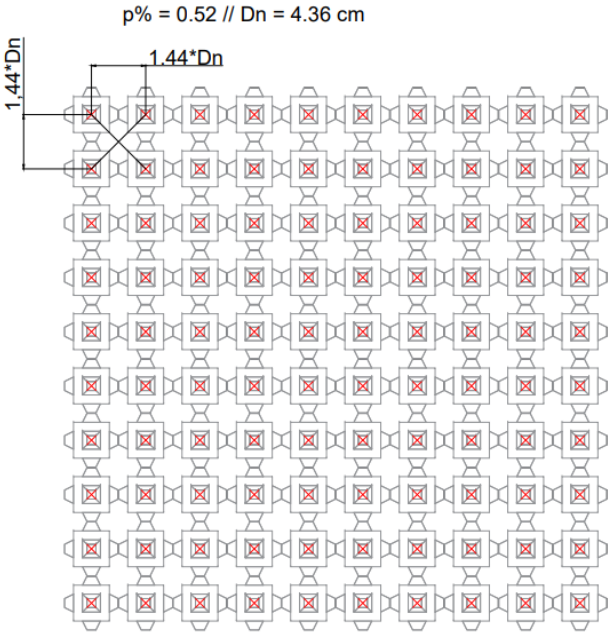


Figura 1 Malla de colocación cuadrada usada en los ensayos físicos. Fuente: LPC

La cual tiene las siguientes características:

- Tipología: Rectangular
- Porosidad: 52%
- a/Dn=b/Dn=1,44, siendo a y b la distancia entre los centros de los Cubípodos

Además, los Cubípodos usados como material presentan un Dn = 4,36 cm y se colocan en 3 capas distinguidas por 3 colores: azul para la capa inferior, rojo para la capa del medio y verde para la superior.

Dn (cm)	4,36
Longitud (cm)	4,08
Densidad (g/cm3)	2,27
Peso (g)	187,95

Tabla 1 Características de los Cubípodos usados para los ensayos físicos. Fuente: Elaboración propia

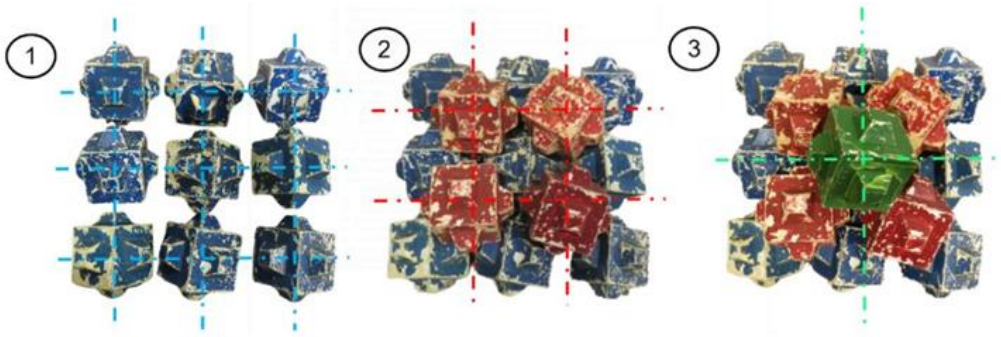


Figura 2 Colocación de los Cubípodos en la malla. Fuente: Mashadyan (2023)

Para poder realizar los ensayos de medición de coeficientes de capa en el laboratorio, se hizo uso de los siguientes equipos:

2.1. TALUDÓMETRO

El taludómetro es un banco experimental que permite introducir una pendiente de forma controlada mediante un sistema hidráulico accionado manualmente. Al accionar la palanca, se genera presión en el circuito hidráulico, elevándose uno de los laterales del banco y produciendo la inclinación del plano.

Se emplea para representar taludes y realizar ensayos con modelos físicos a escala.

Figura 3 Taludómetro e inclinómetro digital con el que se controla la inclinación. Fuente: Elaboración propia

2.2. METRO LÁSER

Apoyado sobre el taludómetro, se coloca un travesaño en el cual hay un metro láser fijo y perfectamente equilibrado, para poder obtener las distancias hasta el modelo siempre desde el mismo punto de referencia en altura.

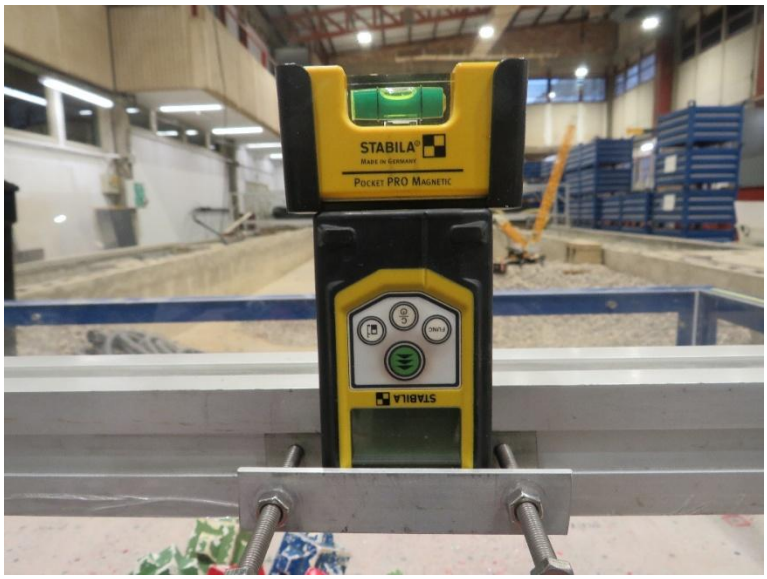


Figura 4 Comprobación de la correcta posición del metro láser. Fuente: Elaboración propia

3.SIMULACIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE DIQUES HOMOGÉNEOS CON MALLA CUADRADA

En este apartado se busca analizar el comportamiento del programa PLACSIM como simulador de la construcción para diques homogéneos.

PLACSIM es un software de simulación realista de colocación de elementos para obra marítima, desarrollado en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València.

En él se puede ver el efecto de la gravedad y cómo interaccionan las piezas entre ellas y demás elementos del entorno al ser colocadas.

Este software es útil ya que sirve como prueba para comprobar que la malla de colocación diseñada aporta el resultado deseado, pudiendo detectar fallos y permitiendo su posterior modificación en la fase de diseño. Así como también se puede simular la puesta en obra de infraestructuras nuevas y reparaciones.

Por otro lado, se indica también en su propia web que está programado en Unity, con PhysX como Game Engine (Desarrollado por NVIDIA) y que es un software no es determinista, ya que al colisionar las piezas se activa el cálculo multihilo, el cual tiene diferentes procesadores y no se controla el orden en el que realizan las operaciones, además de la acumulación de errores por el redondeo de los números de decimales.

Figura 5 Página principal de la página web de PLACSIM. Fuente: PLACSIM, (s. f.), https://placsim.com/

3.1. VARIABLES EN LAS SIMULACIONES A REALIZAR

PLACSIM funciona principalmente a través de 2 inputs:

- Un modelo 3D en formato ".obj" que simula el entorno donde se colocan las piezas, el cual se carga desde la opción *Add layer > layer*.
- La malla de colocación, en formato ".csv", denominada en el software como *Crane position,* la cual se carga desde la función que tiene ese mismo nombre.
  En este input también se indica el orden de colocación de las piezas y su nombre, así como la rotación en la que se quiere que caigan.

Además, se pueden añadir capas fijas de piezas con la opción de *Add layer > Armor unit,* como se requerirá en el apartado en el apartado 3.2.4.

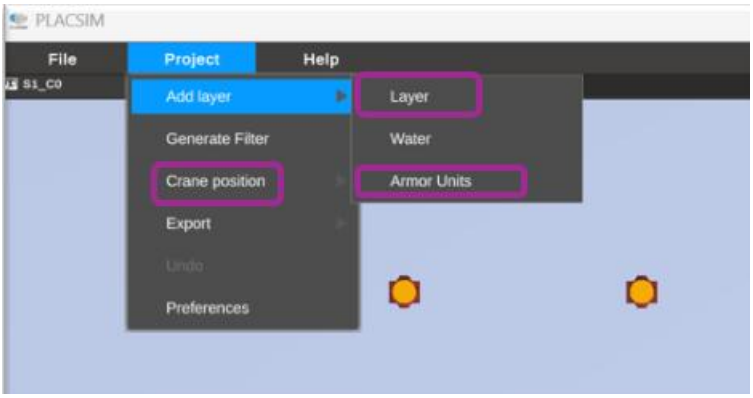


Figura 6 Inserción de los inputs descritos. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, PLACSIM permite variar el nivel de interacción que las piezas pueden tener unas con otras variando la colisión mediante la configuración del proyecto, en la opción de *Collision interation.*

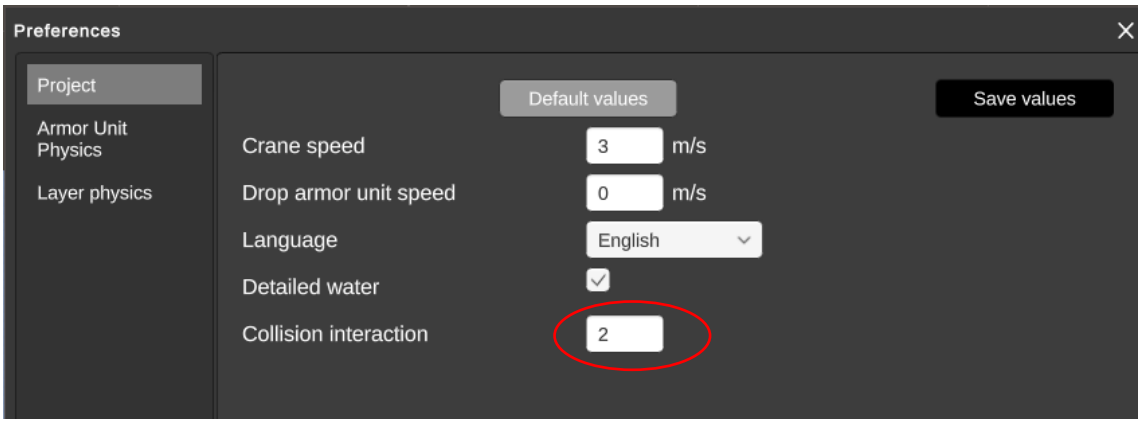


Figura 7 Panel de preferencias desde donde se cambia la colisión. Fuente: Elaboración propia

Esta función lo que hace es aumentar o reducir la sensibilidad con la que la pieza puede cambiar su posición al caer, ya que lo que genera es un radio a través del centro del Cubípodo, generando un círculo teórico, el cual indica el umbral en el que la pieza caída puede verse afectada por su alrededor.

En las simulaciones a realizar se va a trabajar con:

- Collision interation = 0
- Collision interation = 1
- Collision interation = 2

El 0, 1 y 2 indican que el radio del círculo mencionado es igual a 0*Dn, 1*Dn y 2*Dn y

Para indicar que tipología es en cada simulación, se seguirá la siguiente nomenclatura:

- C0 (Collision interation = 0)
- C1 (Collision interation = 1)
- C2 (Collision interation = 2)

3.2. CARACTERIZACIÓN DE DESVIACIÓN INTRÍNSECA DE PLACSIM

Al diseñar la malla de colocación, se diseña la posición final que se desea que tengan los Cubípodos puestos en servicio.

Esto no es realista, ya que el proceso de colocación se puede ver afectado por factores como el clima, las corrientes o incluso la calidad del gruista que las coloca.

Esto se traduce en errores de colocación que se pueden simular en PLACSIM, añadiéndolos como input en el ".csv" *Crane position* para crear una simulación lo más realista posible.

Muñoz – Palao, 2024 expresa la posición final de una pieza como:

$$X_1 = X_0 + \gamma \cdot D_n \quad (1)$$

$$Y_1 = Y_0 + \gamma \cdot D_n \quad (2)$$

Donde $\gamma \sim N(0, \frac{\Delta}{Dn})$, indicando que sigue una distribución normal con media cero y varianza igual a Δ/D_n.

El objeto de este estudio es analizar el comportamiento de la malla ensayada en el laboratorio de puertos durante la puesta en obra de los Cubípodos, además de caracterizar el error intrínseco que puede tener el propio programa, que al final afecta a los resultados finales obtenidos. De esta forma, se categoriza estadísticamente permitiendo así añadir otros errores teniendo ya en cuenta el propio de PLACSIM.

Este estudio experimental se va a centrar únicamente en los errores de los gruistas como error añadido a las simulaciones.

Es por ello por lo que el error total de colocación de una pieza/Cubípodo cualquiera, que se correspondería a la segunda parte de las ecuaciones 1 y 2 se puede definir como:

$$\gamma \cdot D_n = \varepsilon_{T,i} = \varepsilon_{PLACSIM,i} + \varepsilon_{Malla,i} + \varepsilon_{Gruísta,i} \qquad (3)$$

Siendo i la dirección en planta (x,y)

Se decide separar el error de PLACSIM en dos tipos para poder determinar cuál de los dos siguientes factores es más determinante y tener el orden de magnitud del error que añade PLACSIM a las simulaciones sin error adicional y sin depender de la malla diseñada:

$$\varepsilon_{PLACSIM,i} = \varepsilon_{PL_COLOCACIÓN,i} + \varepsilon_{PL_COLISIÓN,i} \qquad (4)$$

1. Error tipo 1: Colocación

Con este error se busca obtener cuánto difiere la posición final de la proyectada, sin que la pieza se vea afectada por ningún elemento externo.

2. Error tipo 2: Colisión

Aquí lo que se busca es saber también cuánto se desplaza una pieza de su posición deseada al colisionar con otras piezas o elementos, variando la tipología de colisión (ya descritas en el apartado 3.1)

Por tanto, la ecuación $\gamma \cdot D_n = \varepsilon_{T,i} = \varepsilon_{PLACSIM,i} + \varepsilon_{Malla,i} + \varepsilon_{Gruísta,i}$ (3 queda de la siguiente forma:

$$\gamma \cdot D_n = \varepsilon_{T,i} = \varepsilon_{PL_COLOCACIÓN,i} + \varepsilon_{PL_COLISIÓN,i} + \varepsilon_{Gruísta,i} + \varepsilon_{Malla,i} \quad (5)$$

3.2.1. CUANTIFICACIÓN DEL ERROR

En este apartado se va a indicar el procedimiento seguido de forma general para cuantificar el error de las simulaciones realizadas.

Para el cálculo del error se exporta el ".csv" que genera el propio PLACSIM con las coordenadas finales de las piezas tras las simulaciones.

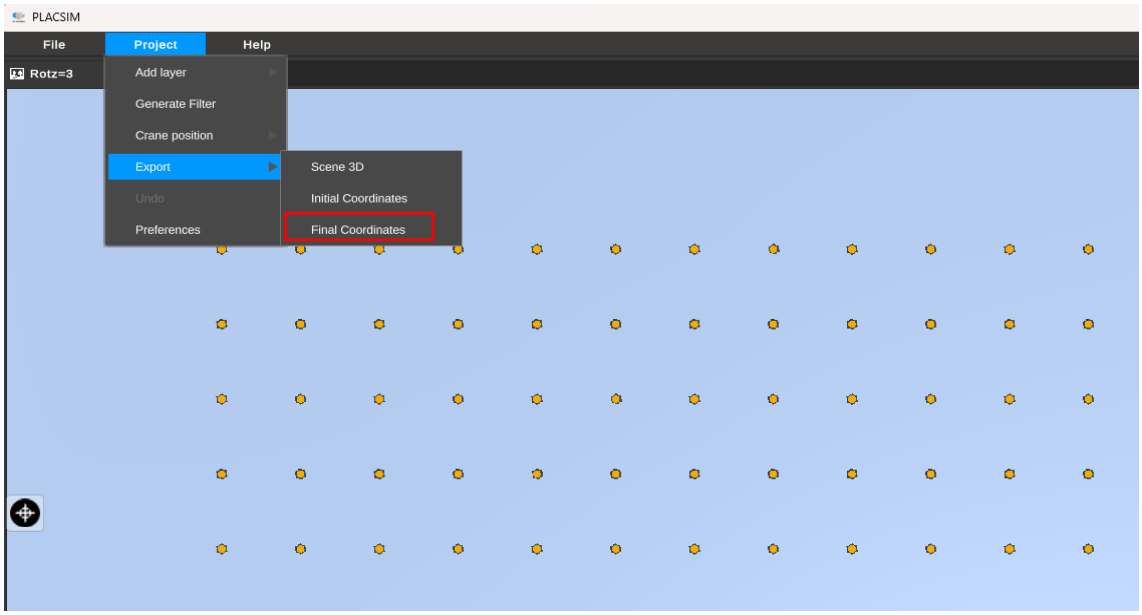


Figura 8 Forma de exportar las coordenadas finales de la simulación. Fuente: Elaboración propia.

Con estas coordenadas se prepara un Excel específico para el análisis de los errores, en el que se programa que reste las posiciones finales (x,y) a las iniciales, para saber cuánto se ha llegado a desplazar de la posición predefinida en los inputs y así obtener los errores en cada coordenada.

$$\varepsilon_{i,j} = i_{j,final\ coordinate} - i_{j,INPUT} \quad (6)$$

Siendo

- i = (x,y)
- j = Cubípodo1, Cubípodo2, …

Una vez se tiene $\varepsilon_{x,j}$, y $\varepsilon_{y,j}$, se calcula el error total de posición en el plano (x, y) de la siguiente manera:

$$E_j = \sqrt{{\varepsilon_{x,j}}^2 + {\varepsilon_{y,j}}^2} \qquad (7)$$

Con el cual se obtiene el error cuadrático medio para obtener de forma global, cuanto se desvían de las posiciones originales las piezas simuladas. Cuanto más bajo sea, menor variación habrá y, por tanto, menor error.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} {E_j}^2} \qquad (8)$$

Siendo n el número de errores E_j calculados.

Además, Muñoz-Palou (2024) caracterizó, tras una secuencia de ensayos de colocación en *Blender*, (un programa informático de código abierto usado especialmente para el modelado y renderizado de elementos 3D) que los errores de posición $\varepsilon_{x,j}$, y $\varepsilon_{y,j}$ se ajustan a una distribución normal (Como se ha indicado antes) y que los errores E_j totales siguen una distribución tipo Rayleigh, por lo que se van a contrastar los resultados obtenidos con esta teoría para analizar la afinidad de ambas simulaciones.

3.2.2. ERROR TOTAL DEL MODELO FÍSICO

El error total del modelo físico ensayado en el laboratorio se obtiene simulando 10 veces en cada uno de los 3 tipos de colisión la construcción del dique realizado en el propio laboratorio, con la malla descrita anteriormente y simulando los Cubípodos con un D_n de 1 metro, quedando las piezas separadas 1,44 metros de distancia.

Esta caracterización de error es exclusiva para el dique descrito, ya que, en él, a parte de la posible desviación propia por PLACSIM que se caracterizará en el punto 3.2.5, también se incluye la calidad de la malla, sin añadir ningún error adicional.

INPUT 1: ".obj" Plano horizontal

Es un plano 3D realizado en *Blender,* con formato ".obj"

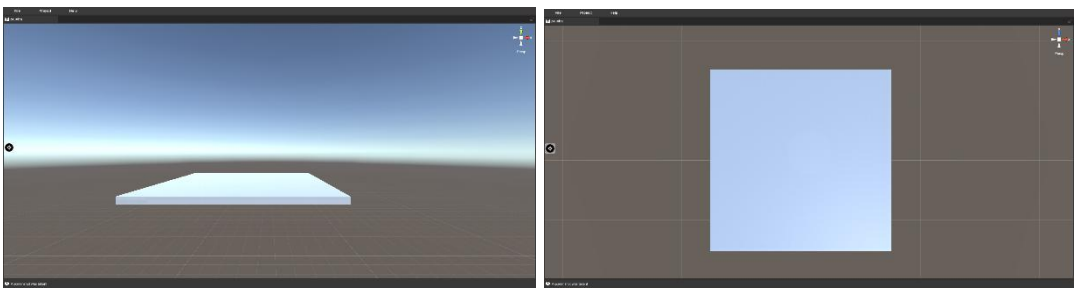


Figura 9 Plano horizontal cargado en PLACSIM. Fuente: Elaboración propia

INPUT 2: ".csv" *Crane position*

Como se ha indicado, se busca reproducir los ensayos ya realizados en el laboratorio, por lo que el archivo correspondiente a este input simulará la malla de colocación, sin ningún error añadido, y determinando como diámetro un metro de longitud.

Además, se ha indicado que la rotación en el eje z sea aleatoria, en y que sea de 45 grados y en x cero, para aproximarlo lo máximo posible a lo que sería la colocación en puesta en obra con una grúa de pinza de doble presión.

x (meters)	y (meters)	z (meters)	rotx (rad)	roty (rad)	rotz (rad)	Constructive sequence	Placement order	Name	Armor Unit	Nominal diameter x (meters)	Nominal diameter y (meters)	ıl diameter z
0	0	5	0	0,785	4,951	1	1	Cubipod1	Cubipod	1	1	1
0	1,44	5	0	0,785	3,246	1	2	Cubipod2	Cubipod	1	1	1
0	2,88	5	0	0,785	3,231	1	3	Cubipod3	Cubipod	1	1	1
0	4,32	5	0	0,785	3,729	1	4	Cubipod4	Cubipod	1	1	1
0	5,76	5	0	0,785	4,889	1	5	Cubipod5	Cubipod	1	1	1
0	7,2	5	0	0,785	4,274	1	6	Cubipod6	Cubipod	1	1	1
0	8,64	5	0	0,785	5,263	1	7	Cubipod7	Cubipod	1	1	1
0	10,08	5	0	0,785	0,717	1	8	Cubipod8	Cubipod	1	1	1
1,44	0	5	0	0,785	3,722	1	9	Cubipod9	Cubipod	1	1	1
1,44	1,44	5	0	0,785	2,97	1	10	Cubipod10	Cubipod	1	1	1
1,44	2,88	5	0	0,785	1,902	1	11	Cubipod11	Cubipod	1	1	1
1,44	4,32	5	0	0,785	3,416	1	12	Cubipod12	Cubipod	1	1	1
1,44	5,76	5	0	0,785	4,554	1	13	Cubipod13	Cubipod	1	1	1
1,44	7,2	5	0	0,785	0,778	1	14	Cubipod14	Cubipod	1	1	1
1,44	8,64	5	0	0,785	3,335	1	15	Cubipod15	Cubipod	1	1	1
1,44	10,08	5	0	0,785	2,797	1	16	Cubipod16	Cubipod	1	1	1
2,88	0	5	0	0,785	2,655	1	17	Cubipod17	Cubipod	1	1	1
2,88	1,44	5	0	0,785	1,717	1	18	Cubipod18	Cubipod	1	1	1
2,88	2,88	5	0	0,785	4,338	1	19	Cubipod19	Cubipod	1	1	1
2,88	4,32	5	0	0,785	5,67	1	20	Cubipod20	Cubipod	1	1	1
2,88	5,76	5	0	0,785	1,66	1	21	Cubipod21	Cubipod	1	1	1
2,88	7,2	5	0	0,785	3,134	1	22	Cubipod22	Cubipod	1	1	1
2,88	8,64	5	0	0,785	2,926	1	23	Cubipod23	Cubipod	1	1	1
2,88	10,08	5	0	0,785	5,827	1	24	Cubipod24	Cubipod	1	1	1
4,32	0	5	0	0,785	0,168	1	25	Cubipod25	Cubipod	1	1	1
4,32	1,44	5	0	0,785	2,167	1	26	Cubipod26	Cubipod	1	1	1
4,32	2,88	5	0	0,785	1,95	1	27	Cubipod27	Cubipod	1	1	1
4,32	4,32	5	0	0,785	4,646	1	28	Cubipod28	Cubipod	1	1	1
4,32	5,76	5	0	0,785	5,286	1	29	Cubipod29	Cubipod	1	1	1
4,32	7,2	5	0	0,785	4,767	1	30	Cubipod30	Cubipod	1	1	1
4,32	8,64	5	0	0,785	4,034	1	31	Cubipod31	Cubipod	1	1	1
4,32	10,08	5	0	0,785	1,215	1	32	Cubipod32	Cubipod	1	1	1
5,76	0	5	0	0,785	5,595	1	33	Cubipod33	Cubipod	1	1	1
5,76	1,44	5	0	0,785	2,124	1	34	Cubipod34	Cubipod	1	1	1
5,76	2,88	5	0	0,785	3,187	1	35	Cubipod35	Cubipod	1	1	1
5,76	4,32	5	0	0,785	4,967	1	36	Cubipod36	Cubipod	1	1	1
5,76	5,76	5	0	0,785	5,6	1	37	Cubipod37	Cubipod	1	1	1

Figura 10 Extracto del input Crane position a cargar en PLACSIM. Fuente: Elaboración propia

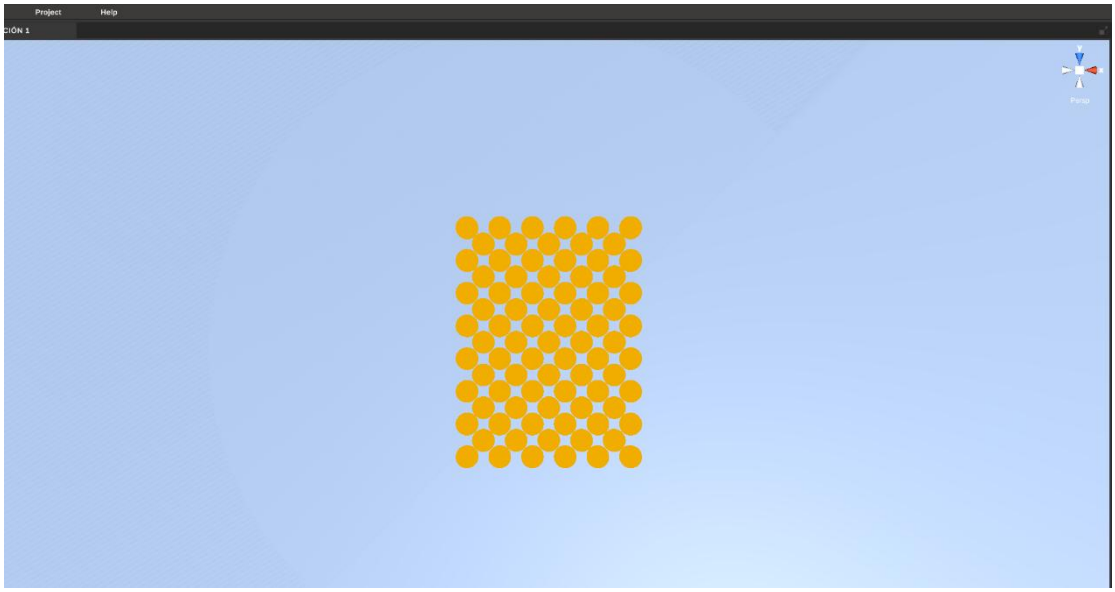


Figura 11 Crane position en PLACSIM. Fuente: Elaboración propia

Se realizan las 30 simulaciones y se obtienen los histogramas de los errores ($\varepsilon_{x,j}$, ε_y y E_j) mediante un código programado en MATLAB, en el cual se incluye también el ajuste de los errores por eje a una distribución normal y los totales a una distribución tipo Rayleigh, comprobando a posteriori que pasen el test de bondad Kolmogorov-Smirnoff con un nivel de significación del 5%, para tener la certeza que el ajuste es válido de forma tanto teórica como visual.

Además de la comprobación del ajuste a las distribuciones en las simulaciones hechas, se calcula el error medio cuadrático y el N%, el cual Muñoz-Palou (2024) lo describe como un mejor indicador sobre la calidad de la construcción, asociando el RMSE a un estimador de desplazamientos en las simulaciones.

El N% se obtiene como el porcentaje de desviaciones significantes respecto de la final deseada de forma teórica.

$$N_{\%} = \frac{N_d}{N_{total}} = \frac{1}{N_{total}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{total}} 1 \; if \;\; \varepsilon_i / D_n \geq 1 \cdot D_n \; else \; 0 \qquad (9)$$

En el cual:

- N_{total} = Total de Cubípodos
- N_d = Total de desviaciones superiores a 1*D_n
- ε_i = Error absoluto total descrito en la $E_j = \sqrt{{\varepsilon_{x,j}}^2 + {\varepsilon_{y,j}}^2}$ (7)

Finalmente, para cada colisión se obtienen los siguientes valores de RMSE y N%

Simulación	**C0**		**C1**		**C2**	
	ε_{rms}/D_n	**N%**	**ε_{rms}/D_n**	**N%**	**ε_{rms}/D_n**	**N%**
1	0,12	0%	0,13	0%	0,14	0%
2	0,1	0%	0,13	0%	0,14	0%
3	0,11	0%	0,14	0%	0,64	14%
4	0,17	0%	0,14	0%	0,14	0%
5	0,13	0%	0,14	0%	0,14	0%
6	0,16	0%	0,13	0%	0,63	12%
7	0,1	0%	0,14	0%	0,65	15%
8	0,19	1%	0,13	0%	0,47	7%
9	0,16	0%	0,13	0%	0,14	0%
10	0,14	0%	0,14	0%	3,37	53%
promedios	**0,138**	**0%**	**0,136**	**0%**	**0,647**	**10%**

Tabla 2 Resultados de error cuadrático medio y N de las simulaciones realizadas. Fuente: Elaboración propia.

Y en la siguiente tabla se puede ver un resumen del test de bondad de Kolmogorov – Smirnov, donde se indica color verde que se afirma que la distribución se ajusta a una normal o tipo Rayleigh, según corresponda y en rojo que no pasa el test.

S	C0			C1			C2		
	X	y	E	x	y	E	x	y	E
1	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
2	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
3	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
4	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
5	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
6	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
7	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
8	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
9	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh
10	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh	Normal	Normal	Rayleigh

Tabla 3 Resultados del test de bondad Kolmogorov - Smirnov. Fuente: Elaboración propia.

Analizando las dos tablas anteriores, se llega a las siguientes conclusiones:

- Colisión 2 da un error global muy alto en comparación con las dos colisiones restantes, descartándose como opción por ser demasiado sensible a las interacciones de las piezas que caen con las ya colocadas.
- Entre colisión 0 y 1, la colisión 1 es la que más se aproxima a lo que expone Muñoz-Palou (2024), ya que los errores de todas las simulaciones se ajustan a las distribuciones descritas de forma correcta.
- Las colisiones 1 y 2 se aproximan bastante a lo indicado por Muñoz - Palou (2024) en lo que respecta a la cuantificación del error con el error cuadrático medio, el cual lo expresa con la siguiente ecuación específica para malla cuadrada.

RPG $$\varepsilon_{rms}/D_n = 0.17 - 0.09m + (3.13 - 3.61p_n)kp + 0.65((3.16 - 1.06p_n)\Delta/D_n - 0.01)^2$$

Figura 12 Error cuadrático medio para una malla rectangular. Fuente: Muñoz-Palou, 2024

Donde solo cuenta el primer término 0,17, ya que en el caso de las simulaciones hechas en PLACSIM, m que es la pendiente es igual a cero, k_p, que es la energía cinética también y el último término se puede despreciar por ser mucho más pequeño que 0,17.

Además, Muñoz-Palou (2024) también muestra la siguiente figura en la que se indica el valor de RMSE obtenido con N% nulo, dando un resultado un poco más alto que el obtenido en PLACSIM

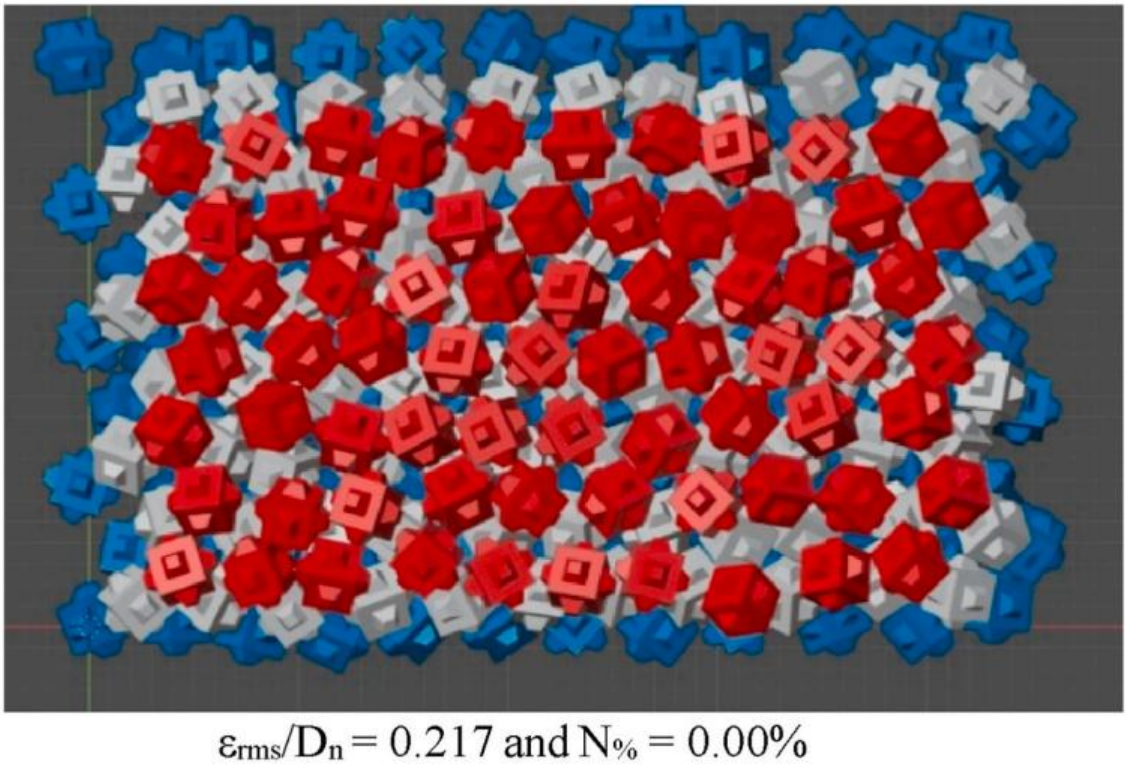


Figura 13 Error cuadrático medio junto con su N% correspondiente. Fuente: Muñoz-Palou (2024)

Se concluye que para simular la construcción de las alternativas sería recomendable el uso de colisión 1 y 2, siendo, entre las dos, mejor la 1.

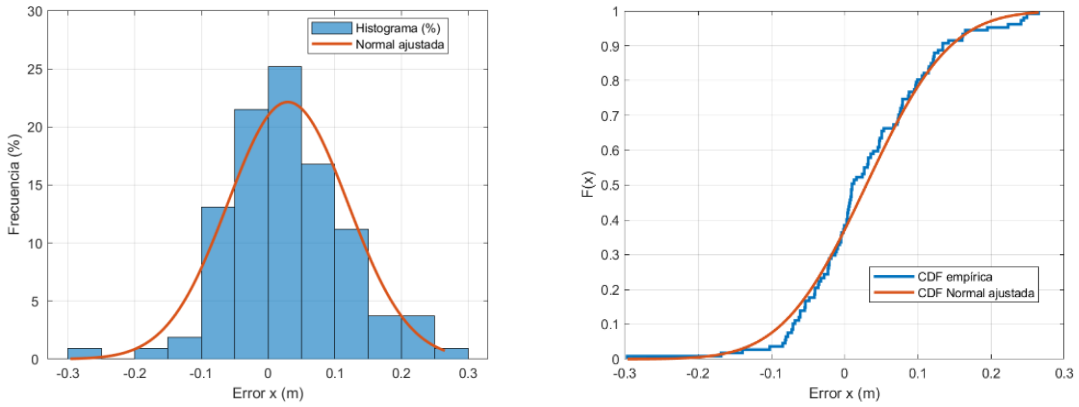


Figura 14 Histograma y ajuste a una normal en la simulación 10 de colisión 1 (Izquierda) y prueba de bondad visual de Kolmogorov-Smirnoff. Fuente: Elaboración propia.

FOTOS

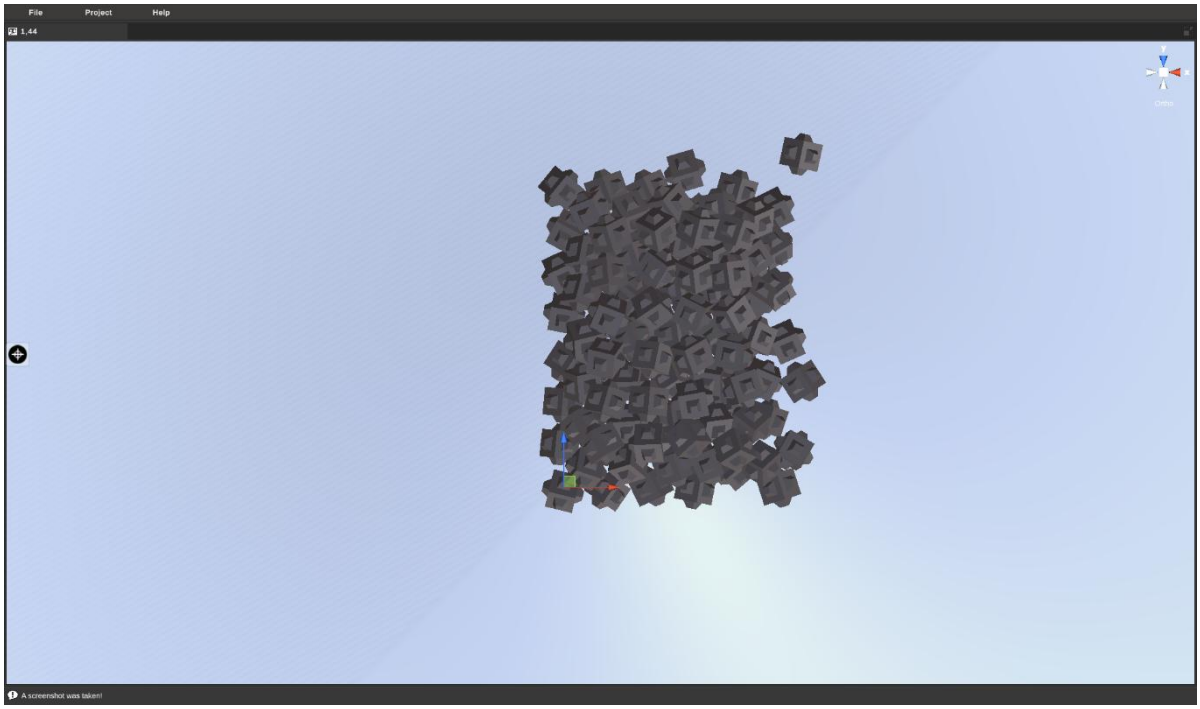


Figura 15 Simulación finalizada en planta. Fuente: Elaboración propia.

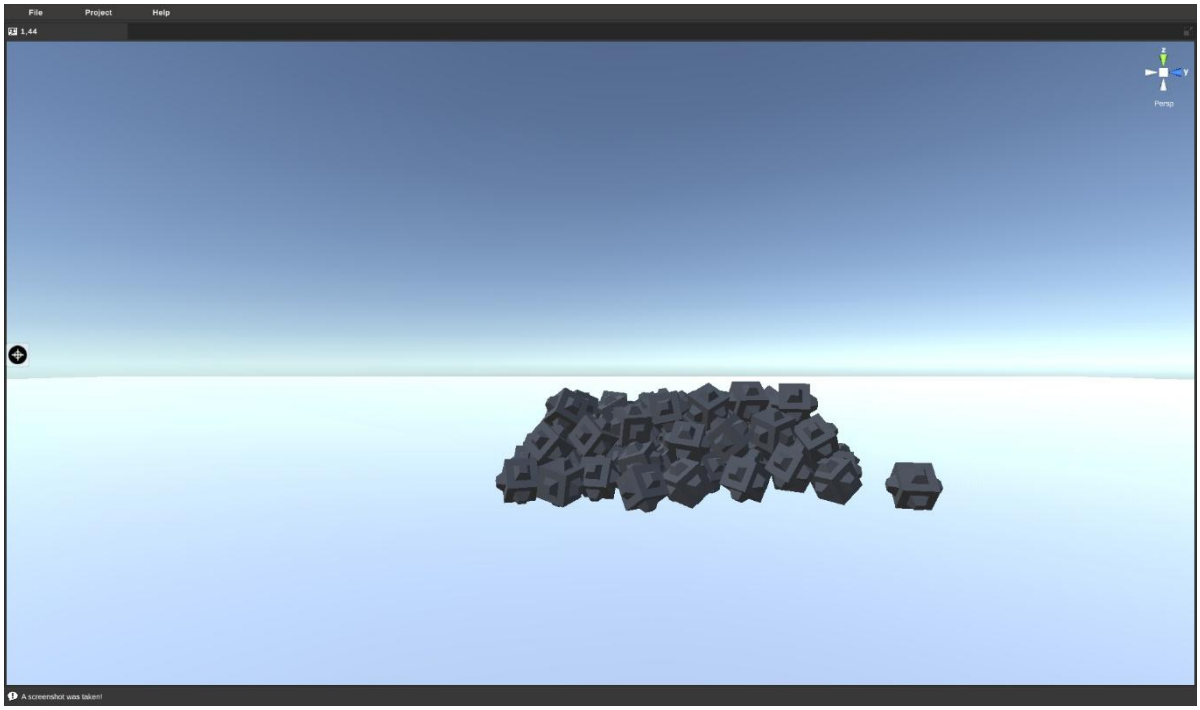


Figura 16 Simulación finalizada en vista desde eje x. Fuente: Elaboración propia.

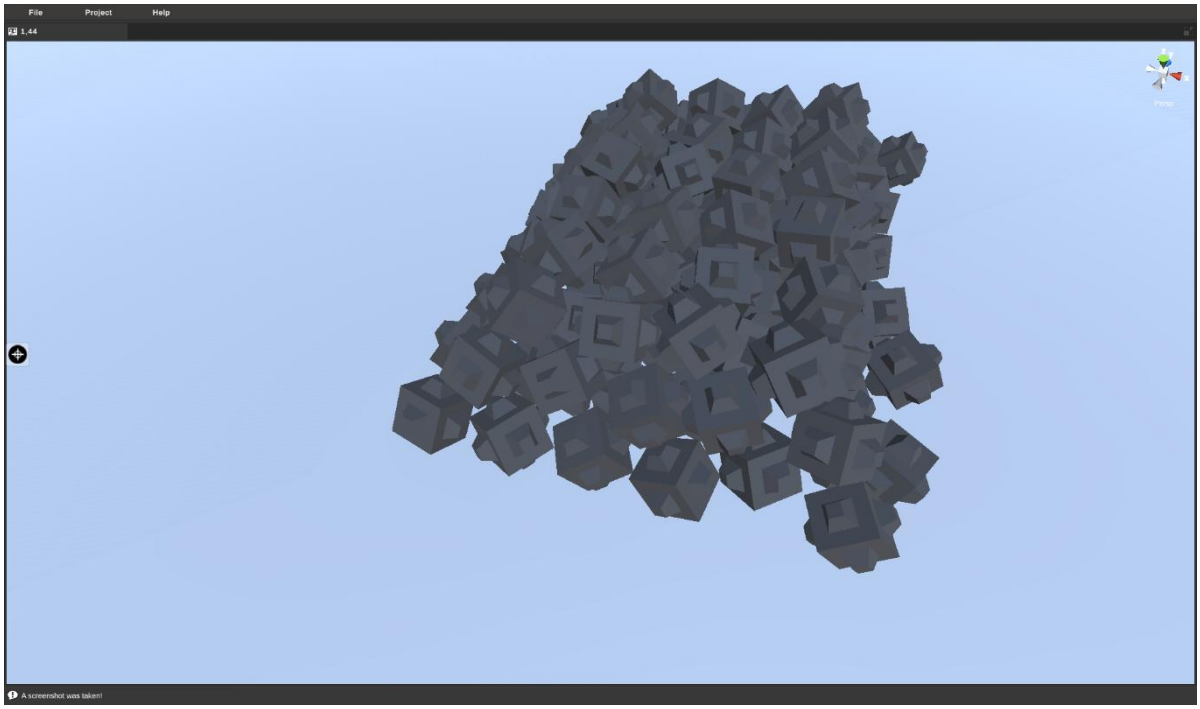


Figura 17 Simulación finalizada en perspectiva. Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. ERROR TIPO UNO: COLOCACIÓN

Se realizan 4 simulaciones con las siguientes características:

INPUT 1: ".obj" Plano horizontal

Mismo plano 3D descrito anteriormente, solo que escalado para tener una mayor superficie.

INPUT 2: ".csv" *Crane position*

- Se cargan un total de 500 piezas para que la muestra sea representativa.
- Se sitúan a una separación a y b igual a 10 m, con la finalidad de asegurar que no colisionen entre ellas.
- Se fijan las rotaciones en los ejes x, y z a las siguientes:
  - Rotx = 0, 0
  - Roty =0, 45 grados= 0.785 radianes
  - Rotz =0, 2, 3, 6 radianes

Simulación	nº Cubípodos	a, b (m)	Rotx (rad)	Roty (rad)	Rotz (rad)
1	500	10	0	0,785	2
2	500	10	0	0,785	3
3	500	10	0	0,785	6
4	500	10	0	0	0

Tabla 4 Tabla resumen de las simulaciones realizadas para los ensayos de caracterización del error tipo 1. Fuente: Elaboración propia

Figura 18 Piezas con las rotaciones correspondientes a cada simulación. Fuente: Elaboración propia

FOTOS

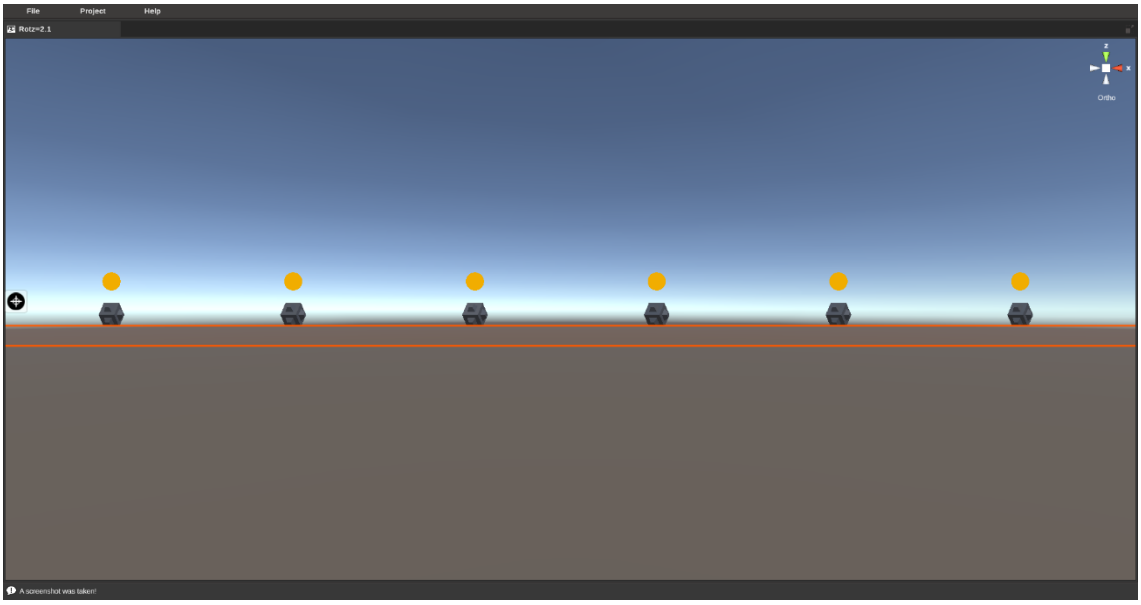


Figura 19 Captura de la simulación 1desde el eje y finalizada. Fuente: Elaboración propia

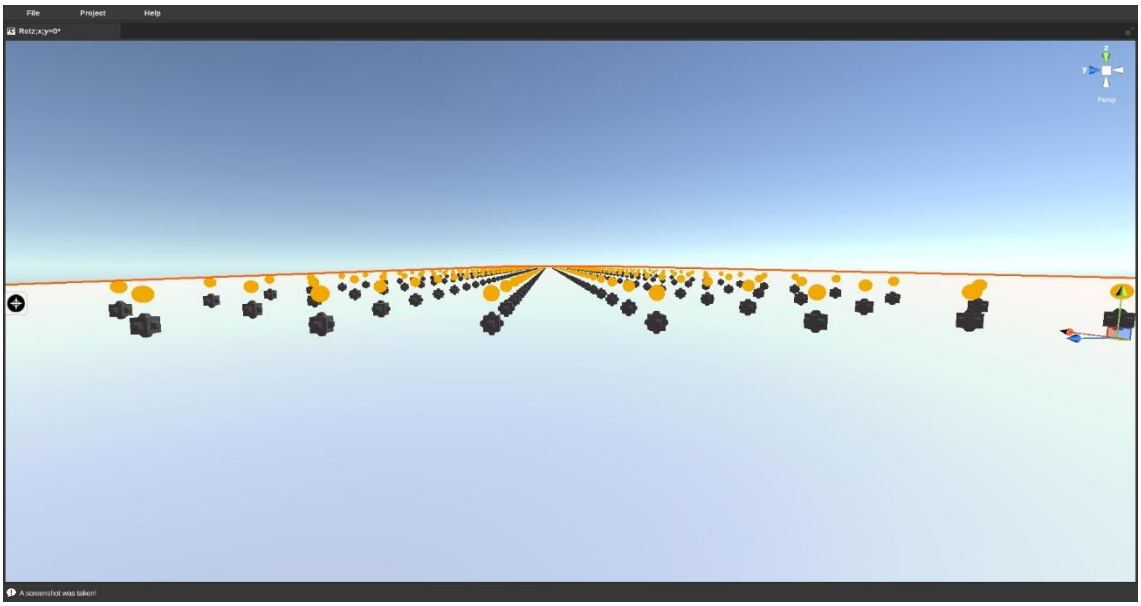


Figura 20 Captura de la simulación 4 en perspectiva finalizada. Fuente: Elaboración propia

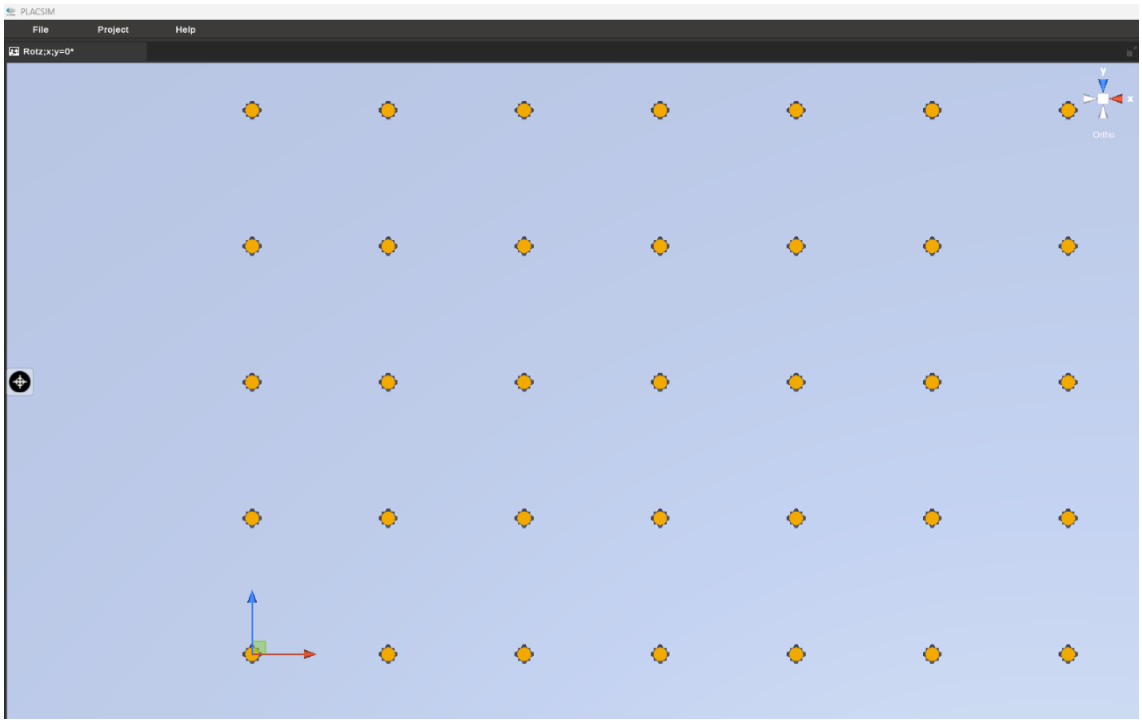


Figura 21 Captura de la simulación 4 en planta finalizada. Fuente: Elaboración propia

3.2.4. ERROR TIPO DOS: COLISIÓN

INPUT 1: ".obj" Plano horizontal

Se continúa con el mismo plano descrito anteriormente.

INPUT 2: ".csv" *Crane Armor Unit*

- Se cargan un total de 500 piezas en la misma posición (x,y) que en los ensayos de posición. La coordenada en z varía, ya que los Cubípodos no caen desde 5 metros de altura hasta el plano, sino que se encuentran apoyados en él.
  La coordenada en z se ha obtenido como el promedio de las coordenadas z finales de las simulaciones del error tipo 1 (z=1.16 m aproximadamente).
- Se fijan las rotaciones en los ejes x, y z a las siguientes, generando dos ".csv" distintos denominados INPUT 2 e INPUT 2.2:
  - Rotx (grad) = 0, 0
  - Roty (grad) = 33 (Posición estable, al estar el Cubípodo inclinado, apoyando en el plano con el tetón), 45 (Posición inestable al apoyar sobre la arista)
  - Rotz (grad) = 0, 0

x (meters)	y (meters)	z (meters)	rotx (rad)	roty (rad)	rotz (rad)	Constructive s	Placement or	Name	Armor Unit	Nominal diam	Nominal diam	Nominal diameter z (mete
0	0	1.162	0	0.576	0	1	1	Cubipod1	Cubipod	1	1	1
0	10	1.162	0	0.576	0	1	2	Cubipod2	Cubipod	1	1	1
0	20	1.162	0	0.576	0	1	3	Cubipod3	Cubipod	1	1	1
0	30	1.162	0	0.576	0	1	4	Cubipod4	Cubipod	1	1	1
0	40	1.162	0	0.576	0	1	5	Cubipod5	Cubipod	1	1	1
0	50	1.162	0	0.576	0	1	6	Cubipod6	Cubipod	1	1	1
0	60	1.162	0	0.576	0	1	7	Cubipod7	Cubipod	1	1	1
0	70	1.162	0	0.576	0	1	8	Cubipod8	Cubipod	1	1	1
10	0	1.162	0	0.576	0	1	9	Cubipod9	Cubipod	1	1	1
10	10	1.162	0	0.576	0	1	10	Cubipod10	Cubipod	1	1	1
10	20	1.162	0	0.576	0	1	11	Cubipod11	Cubipod	1	1	1
10	30	1.162	0	0.576	0	1	12	Cubipod12	Cubipod	1	1	1
10	40	1.162	0	0.576	0	1	13	Cubipod13	Cubipod	1	1	1
10	50	1.162	0	0.576	0	1	14	Cubipod14	Cubipod	1	1	1
10	60	1.162	0	0.576	0	1	15	Cubipod15	Cubipod	1	1	1
10	70	1.162	0	0.576	0	1	16	Cubipod16	Cubipod	1	1	1
20	0	1.162	0	0.576	0	1	17	Cubipod17	Cubipod	1	1	1
20	10	1.162	0	0.576	0	1	18	Cubipod18	Cubipod	1	1	1
20	20	1.162	0	0.576	0	1	19	Cubipod19	Cubipod	1	1	1
20	30	1.162	0	0.576	0	1	20	Cubipod20	Cubipod	1	1	1
20	40	1.162	0	0.576	0	1	21	Cubipod21	Cubipod	1	1	1
20	50	1.162	0	0.576	0	1	22	Cubipod22	Cubipod	1	1	1
20	60	1.162	0	0.576	0	1	23	Cubipod23	Cubipod	1	1	1
20	70	1.162	0	0.576	0	1	24	Cubipod24	Cubipod	1	1	1
30	0	1.162	0	0.576	0	1	25	Cubipod25	Cubipod	1	1	1

Figura 22 INPUT 2.1. Fuente: Elaboración propia

x (meters)	y (meters)	z (meters)	rotx (rad)	roty (rad)	rotz (rad)	Constructive s	Placement or	Name	Armor Unit	Nominal diam	Nominal diam	Nominal diameter z (meters)	Capa
0	0	1.162	0	0.785	0	1	1	Cubipod1	Cubipod	1	1	1	
0	10	1.162	0	0.785	0	1	2	Cubipod2	Cubipod	1	1	1	
0	20	1.162	0	0.785	0	1	3	Cubipod3	Cubipod	1	1	1	
0	30	1.162	0	0.785	0	1	4	Cubipod4	Cubipod	1	1	1	
0	40	1.162	0	0.785	0	1	5	Cubipod5	Cubipod	1	1	1	
0	50	1.162	0	0.785	0	1	6	Cubipod6	Cubipod	1	1	1	
0	60	1.162	0	0.785	0	1	7	Cubipod7	Cubipod	1	1	1	
0	70	1.162	0	0.785	0	1	8	Cubipod8	Cubipod	1	1	1	
10	0	1.162	0	0.785	0	1	9	Cubipod9	Cubipod	1	1	1	
10	10	1.162	0	0.785	0	1	10	Cubipod10	Cubipod	1	1	1	
10	20	1.162	0	0.785	0	1	11	Cubipod11	Cubipod	1	1	1	
10	30	1.162	0	0.785	0	1	12	Cubipod12	Cubipod	1	1	1	
10	40	1.162	0	0.785	0	1	13	Cubipod13	Cubipod	1	1	1	
10	50	1.162	0	0.785	0	1	14	Cubipod14	Cubipod	1	1	1	
10	60	1.162	0	0.785	0	1	15	Cubipod15	Cubipod	1	1	1	
10	70	1.162	0	0.785	0	1	16	Cubipod16	Cubipod	1	1	1	
20	0	1.162	0	0.785	0	1	17	Cubipod17	Cubipod	1	1	1	
20	10	1.162	0	0.785	0	1	18	Cubipod18	Cubipod	1	1	1	
20	20	1.162	0	0.785	0	1	19	Cubipod19	Cubipod	1	1	1	
20	30	1.162	0	0.785	0	1	20	Cubipod20	Cubipod	1	1	1	
20	40	1.162	0	0.785	0	1	21	Cubipod21	Cubipod	1	1	1	
20	50	1.162	0	0.785	0	1	22	Cubipod22	Cubipod	1	1	1	
20	60	1.162	0	0.785	0	1	23	Cubipod23	Cubipod	1	1	1	
20	70	1.162	0	0.785	0	1	24	Cubipod24	Cubipod	1	1	1	
30	0	1.162	0	0.785	0	1	25	Cubipod25	Cubipod	1	1	1	

Figura 23 INPUT 2.2. Fuente: Elaboración propia

INPUT 3: ".csv" *Crane position*

- Se colocan las mismas coordenadas x, y, z que en las simulaciones para identificar el error tipo 1, solo que se desplaza la coordenada x 0.25*Dn, para evitar que caiga en el centro del Cubípodo situado debajo.

  Esto se debe a que, al caer justo en el centro, el movimiento que realiza la pieza que cae tiene muy poca velocidad, por lo que se corre el riesgo de que PLACSIM lo detenga y no llegue a caer al plano, produciendo una situación no representativa.
- Se genera 1 ".csv" con las siguientes rotaciones
  - Rotx (grad) = 45
  - Roty(grad) = 0
  - Rotz (grad)= 0

Se realiza una simulación para cada uno de los 2 ".csv" generados como INPUT 2, repitiendo este proceso en colisión 0 y 1, primero con un ".csv" de INPUT 2 y luego se repite el proceso

para el otro ".csv" restante ya, quedando el esquema de las simulaciones de la siguiente forma:

	Base estable	Base inestable
C0	INPUT 2.1	INPUT 2.2
	INPUT 3	INPUT 3
C1	INPUT 2.1	INPUT 2.2
	INPUT 3	INPUT 3

Tabla 5 Tabla resumen de las simulaciones realizadas para los ensayos de caracterización del error tipo 2. Fuente: Elaboración propia.

	INPUT 2.1 (Base estable)	INPUT 2.2 (Base inestable)	INPUT 3
Rotx (rad)	0	0	0.576
Roty (rad)	0.576	0.785	0
Rotz (rad)	0	0	0

Tabla 6 Tabla resumen de las características de los INPUTS para los ensayos de caracterización del error tipo 2. Fuente: Elaboración propia.

FOTOS

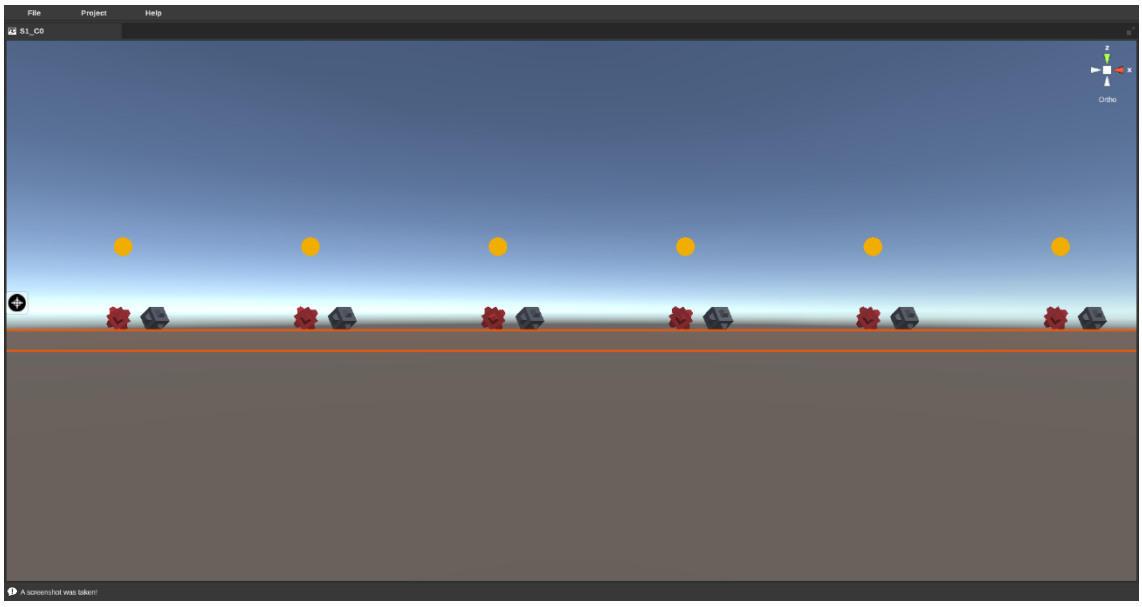


Figura 24 Captura de la simulación 1 en colisión 0 desde el eje y finalizada. Fuente: Elaboración propia

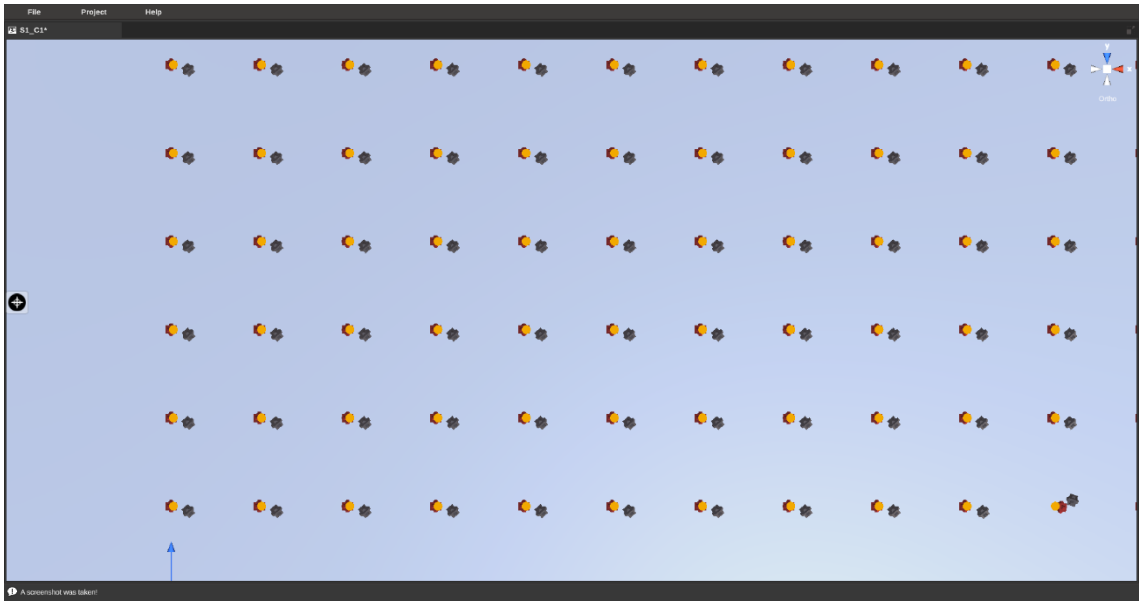


Figura 25 Captura de la simulación 1 en colisión 1 en planta finalizada. Fuente: Elaboración propia

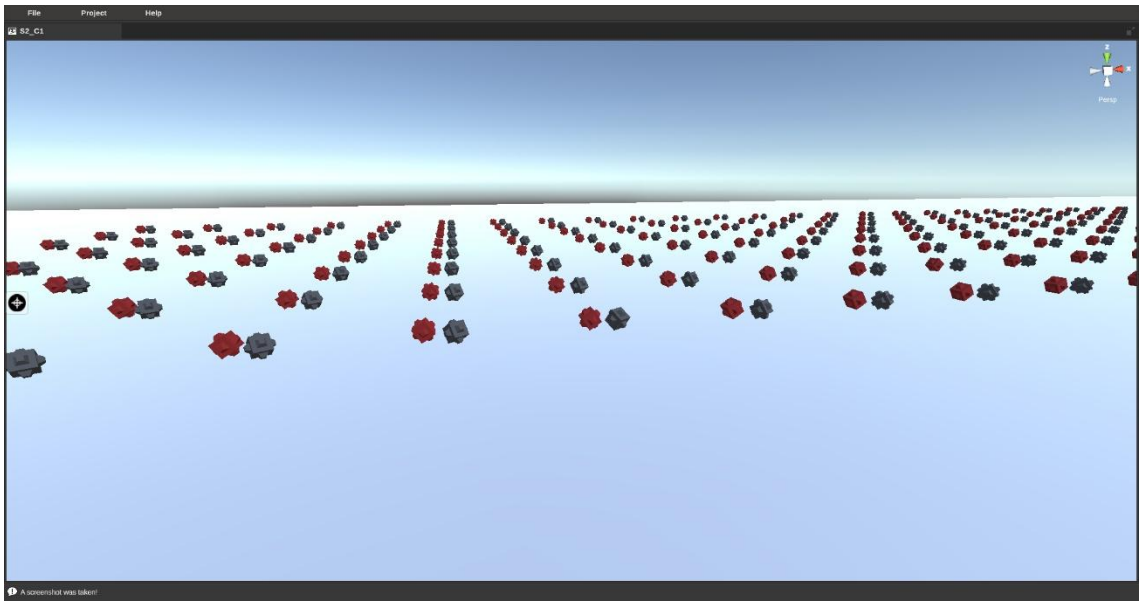


Figura 26 Vista en perspectiva de la simulación 2, para colisión 1 finalizada. Fuente: Elaboración propia.

3.2.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

VALOR DEL ERROR TOTAL DEL MODELO FÍSICO:

Como se ha mostrado en la ecuación $\gamma \cdot D_n = \varepsilon_{T,i} = \varepsilon_{PLACSIM,i} + \varepsilon_{Malla,i} + \varepsilon_{Gruísta,i}$ (3), $\gamma \cdot \mathrm{Dn}$ es el error de PLACSIM junto con el del propio de la malla y el adicional si se quiere introducir. Teniendo en cuenta que $\gamma \sim \mathrm{N}(0, \frac{\Delta}{\mathrm{Dn}})$, si todos errores siguen una distribución normal, este error queda representado de la siguiente forma:

$$\gamma_i \sim \mathrm{N}\left(\mu_{i,PLACSIM} + \mu_{i,Malla} + \mu_{i,Gruísta}, \sigma^2_{i,PLACSIM} + \sigma^2_{i,Malla} + \sigma^2_{i,Gruísta}\right) \qquad (10)$$

Siendo i el valor del eje (x,y)

Por tanto, se obtiene el valor de la media y la varianza de las simulaciones realizadas en colisión 1, para cuantificar la desviación propia del modelo ensayado en el laboratorio.

$$\gamma_{i,Modelo} \sim \mathrm{N}\left(\mu_{i,modelo}, \sigma^2_{i,modelo}\right) \qquad (11)$$

$$\gamma_{x,modelo} \sim \mathrm{N}(0.031, 0.007)$$

$$\gamma_{y,modelo} \sim \mathrm{N}(0.064, 0.006)$$

Estos errores abarcan tanto el error a caracterizar de PLACSIM como el de la malla de colocación, quedando la ecuación $\gamma_{i,Modelo} \sim \mathrm{N}\left(\mu_{i,modelo}, \sigma^2_{i,modelo}\right)$ (11), para la dirección x e y de la siguiente manera:

$$\gamma_x \sim \mathrm{N}\left(0.031 + \mu_{i,Gruísta}, 0.007 + \sigma^2_{i,Gruísta}\right)$$

$$\gamma_y \sim \mathrm{N}\left(0.064 + \mu_{i,Gruísta}, 0.006 + \sigma^2_{i,Gruísta}\right)$$

VALOR DE LA DESVIACIÓN PROPIA DE PLACSIM

VALOR ERROR TIPO UNO: COLOCACIÓN

Una vez realizado el análisis de los resultados de las 4 simulaciones, y haber calculado su error, se llega a la conclusión que la desviación intrínseca de PLACSIM, que pueda ser producida por un error de colocación propio del software, es prácticamente nula.

PROMEDIO SIMULACIONES	**S. 1**	**S. 2**	**S. 3**	**S. 4**
ε_{rms}/D_n	ε_{rms}/D_n	ε_{rms}/D_n	ε_{rms}/D_n	ε_{rms}/D_n
0,006	0,004	0,009	0,010	0

Tabla 7 Resultados del error cuadrático medio de las simulaciones para caracterizar el error de PLACSIM por colocación. Fuente: Elaboración propia

Es destacable que, cuando el Cubípodo cae de forma totalmente vertical, como se ha simulado en la simulación cuatro, el error es 100% nulo.

VALOR ERROR TIPO DOS: COLISIÓN

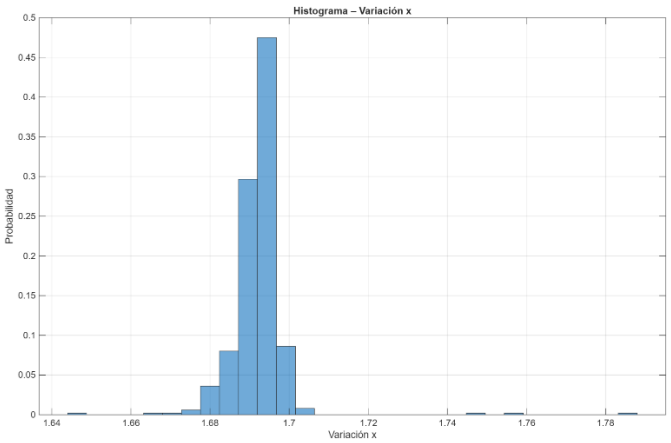
El error que produce PLACSIM causado por la colisión es mucho mayor al causado por la colocación, por lo que se concluye que la desviación propia del programa es debida a las acciones de colisión al caer las piezas e interactuar los elementos ya existentes.

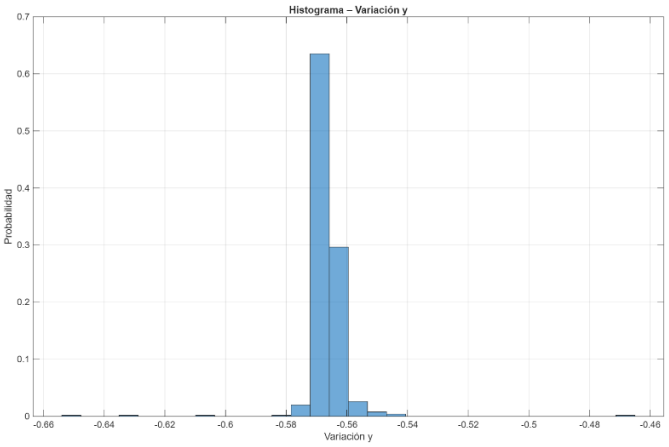
También se evidencia que los errores, al solo colisionar con una pieza debajo, son más altos en colisión 1 que en cero. Además, cuando cae sobre una pieza estable, que es el caso de la simulación uno, el error es mayor que si cae sobre una pieza inestable.

Esto se debe a que, al estar la pieza en una posición inestable, cuando hay colisión, la pieza de abajo es propensa a moverse en la trayectoria en la que va a caer la pieza recién tirada, produciendo que la pieza base “acompañe” a la que se acaba de colocar, frenando así su desplazamiento.

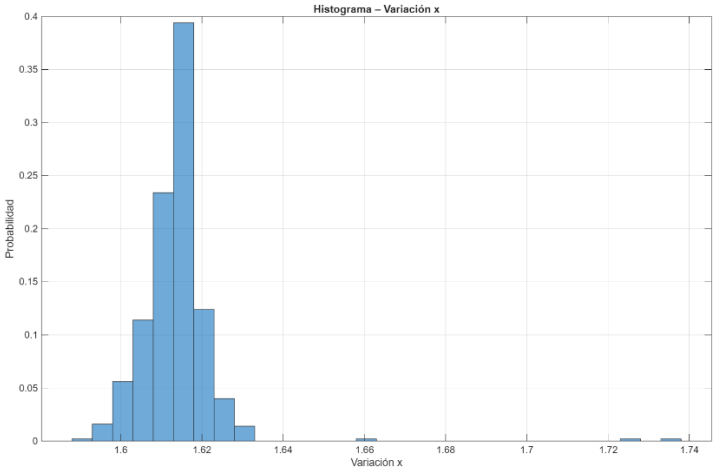
Es por ello que en la simulación uno, la diferencia entre colisiones es menor que en colisión 2. Cuando las piezas caen sobre una pieza estable, es más probable que suceda una especia de rebote, por lo que el desplazamiento es mayor que si no lo hay y asemejándose a cuando la colisión es cero.

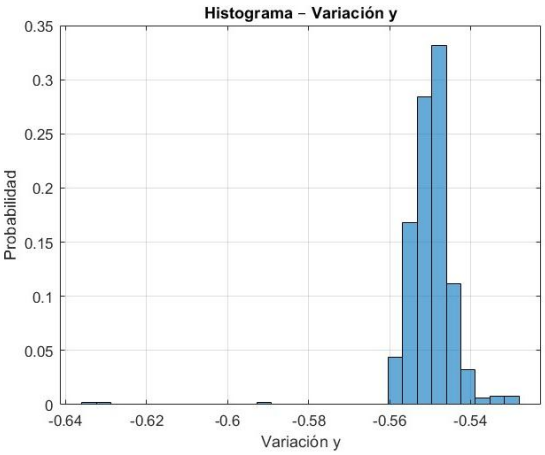
BASE ESTABLE C0



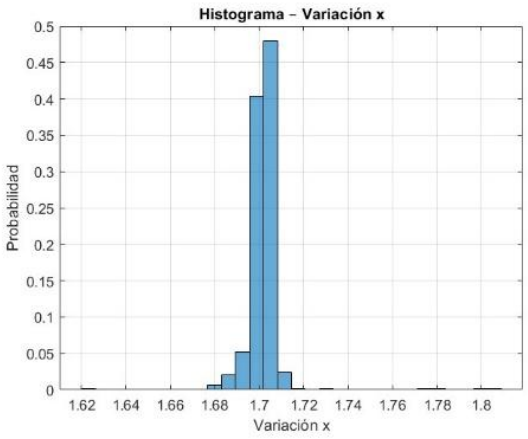


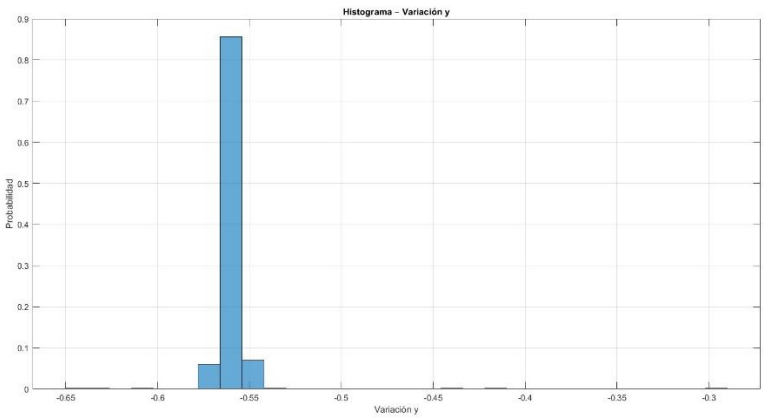
BASE INESTABLE C0





BASE ESTABLE C1





BASE INESTABLE C1

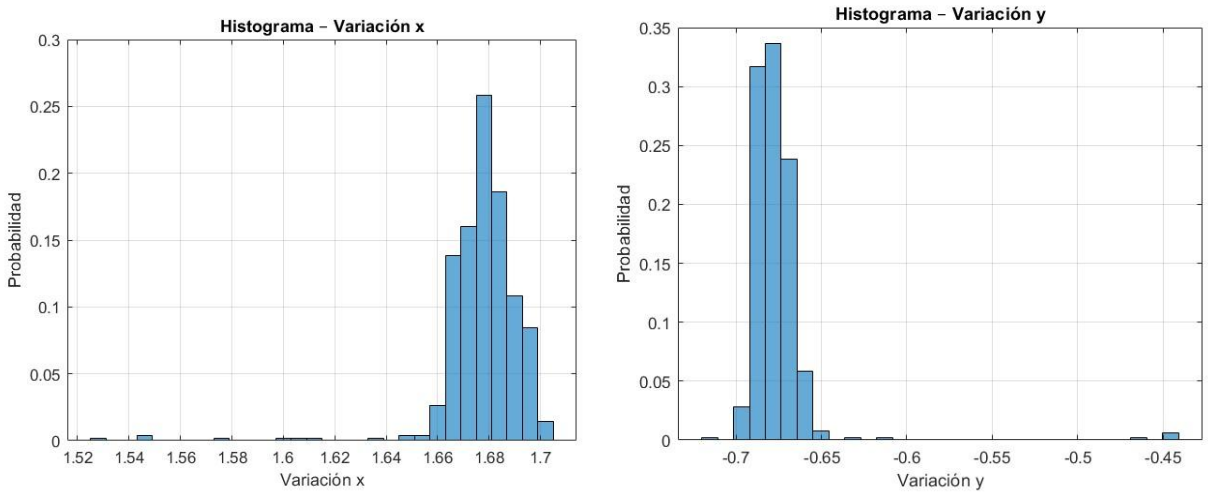


Figura 27 Histogramas de las 4 simulaciones realizadas para caracterizar el error de PLACSIM por colisión. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, con los histogramas mostrados en la figura anterior y la

Tabla 8 se demuestra que PLACSIM no es un software determinista, ya que se ha repetido el mismo lanzamiento 500 veces en cada simulación y hay variabilidad en la posición final de las piezas

	BASE ESTABLE		**BASE INESTABLE**	
	σ_X	σ_Y	σ_X	σ_Y
C0	0.008	0.008	0.010	0.007
C1	0.010	0.016	**0.016**	**0.023**

Tabla 8 Desviación estándar de las cuatro simulaciones realizadas para caracterizar el error de PLACSIM por colisión. Fuente: Elaboración propia

También, se puede observar que, aunque el error de colisión cero es mayor, hay menos variabilidad en las posiciones finales, por tanto, se puede concluir que la tipología de colisión 1 hace que haya más aleatoriedad en los resultados finales, aunque el error sea más pequeño.

CONCLUSIÓN DE LA DESVIACIÓN PROPIA DE PLACSIM

Finalmente, se concluye que la alteración de la posición final que las piezas pueden tener debido al propio software es únicamente debido a los efectos de las colisiones, las cuales se ve que siguen una distribución normal, cuya media se ha forzado a que sea cero al realizar simulaciones en las que se espera que la pieza caiga todas las veces, y la desviación típica se aproxima a 0,023, ya que se escoge la simulación con colisión y base inestable como la más representativa de la realidad.

De todas formas, se podría estimar el error de la capa base de un dique homogéneo a cuando hay colisión, pero la base es estable, ya que es lo que pasa al caer las piezas al fondo marino, en cambio, las capas superiores dependen de la posición de las piezas que ya han sido colocadas y es posible que no se encuentren estables.

Finalmente, la fórmula 10quedaría de la siguiente manera:

$$\gamma_i \sim \mathrm{N}\left(0 + \mu_{i,Malla} + \mu_{i,Gruísta},\ 0.023^2 + \sigma^2_{i,Malla} + \sigma^2_{i,Gruísta}\right) \qquad (12)$$

Ya que

$$\gamma_{i,PLACSIM} \sim \mathrm{N}(0, 0.00053) \quad (13)$$

3.2.6. ERROR TOTAL DEL MODELO CON ERROR ADICIONAL

Ahora se va a simular el modelo físico ensayado en el laboratorio añadiendo un error adicional debido al gruista.

Para ello se repiten 10 simulaciones de tipo C1 con los mismos inputs que para caracterizar el error total del modelo, solo que, en este caso, el input 2 *Crane position* tendrá las coordenadas x, y alteradas, de forma que se sume a las originales un número aleatorio que siga una distribución normal, con media cero y varianza igual al error que se le quiera añadir.

En el caso de esta simulación, se opta por un error de gruista igual a:

$$\gamma_{i,Gruísta} \sim \mathrm{N}(0, 0.22) \quad (14)$$

Por lo que, en teoría, el error total del modelo debería de quedar de la siguiente forma:

$$\gamma_x \sim \mathrm{N}(0.031, 0.007 + 0.22 + 0.00053) \approx \gamma_x \sim \mathrm{N}(0.031, 0.23)$$

$$\gamma_y \sim \mathrm{N}(0.064, 0.006 + 0.22 + 0.00053) \approx \gamma_y \sim \mathrm{N}(0.064, 0.23)$$

RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados de los ajustes a la distribución normal para los errores en las direcciones (x,y) y la distribución tipo Rayleigh y los valores del error cuadrático medio y el N%.

Simulación	C1	
	εrms/Dn	N%
1	0,89	25%
2	0,70	7%
3	0,57	7%
4	0,97	32%
5	0,95	26%
6	0,82	24%
7	0,84	25%
8	0,93	21%
9	0,77	18%
10	0,80	21%
promedios	**0,824**	**21%**

Tabla 9 Resultados de error cuadrático medio y N de las simulaciones realizadas. Fuente: Elaboración propia.

S	C1		
	X	**y**	**E**
1	Normal	Normal	Rayleigh
2	Normal	Normal	Rayleigh
3	Normal	Normal	Rayleigh
4	Normal	Normal	Rayleigh
5	Normal	Normal	Rayleigh
6	Normal	Normal	Rayleigh
7	Normal	Normal	Rayleigh
8	Normal	Normal	Rayleigh
9	Normal	Normal	Rayleigh
10	Normal	Normal	Rayleigh

Tabla 10 Resultados del test de bondad Kolmogorov - Smirnov. Fuente: Elaboración propia.

Teóricamente los errores en la tipología de simulación realizada se pueden ajustar de forma correcta a una distribución normal, pero el error cuadrático medio y el N% es muy elevado, obteniendo de las simulaciones en las que el error en x e y siguen una distribución normal:

$$\gamma_{x,total} \sim \mathrm{N}(0.277, 0.27)$$

$$\gamma_{y,total} \sim \mathrm{N}(0.166, 0.24)$$

La media da una diferencia mucho más alta del que debería de dar si se suma el error de gruista impuesta al del modelo calculado en el punto 3.2.2, por lo que se concluye que la malla ensayada no es adecuada para la construcción del dique homogéneo y se propone aumentar la separación entre Cubípodos para poder disminuir el error total final.

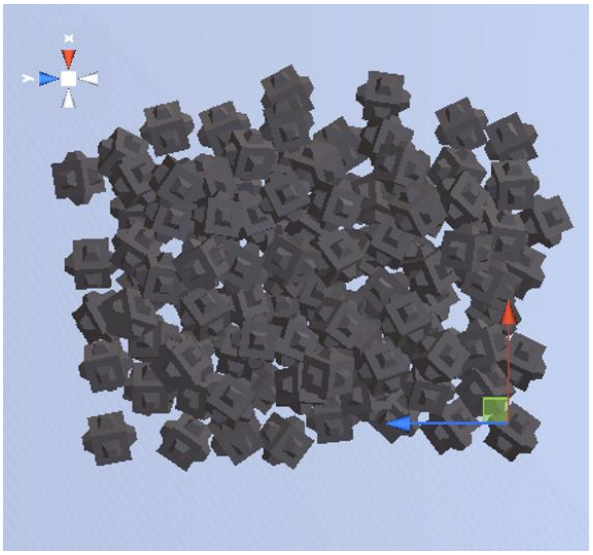


Figura 28 Resultado del dique tras la simulación en planta. Fuente: Elaboración propia.

Figura 29 Resultado del dique tras la simulación desde el eje y. Fuente: Elaboración propia.

4. CÁLCULO DE COEFICIENTES DE CAPA

Se entiende como coeficiente de capa a un parámetro adimensional (k_Δ), con el que se puede estimar la altura total y por capas de una infraestructura.

Este parámetro relaciona el espesor medio de una capa con el diámetro nominal de las piezas que lo componen, definido por Molines et al (2021) por la siguiente ecuación.

$$k_{\Delta j} = \frac{h_{j-1} - h_j}{D_n} \quad (15)$$

En la cual $h_{j1} – h_j$, y como se muestra en la Figura 30, es la altura relativa de la capa, siendo j el número de la misma.

D_n corresponde con el diámetro nominal de la pieza (En el caso de este estudio, Cubípodos de Dn = 1).

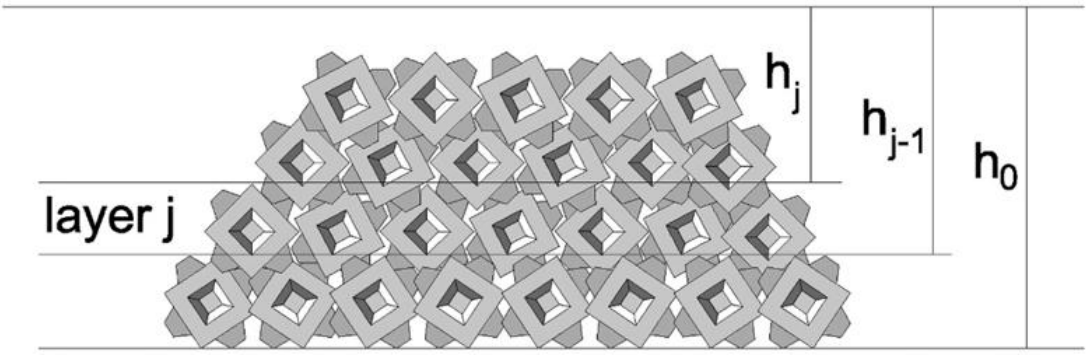


Figura 30 Medida del espesor de capa. Fuente: Molines et al (2021)

4.1. MODELO FÍSICO

Se realizaron 12 ensayos para obtener los coeficientes de capa a través de medidas obtenidas del laboratorio.

Esos doce ensayos se dividen en grupos de 5, diferenciándose entre ellos por la inclinación del taludómetro, siendo las siguientes pendientes ensayadas:

	Nº de modelos	Capas de cada modelo	Mediciones tomadas por capa	Mediciones totales
0%	5	3	5	75
2%	5	3	5	75
4%	5	3	5	75
6%	5	3	5	75
8%	5	3	5	75
10%	5	3	5	75

Tabla 11 Mediciones realizadas en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia

4.1.1. MÉTODO EXPERIMENTAL Y POCESO DE CONSTRUCCIÓN

Las mediciones se hicieron colocando en la base del taludómetro el plano con la malla cuadrada ya descrita anteriormente, para poder tenerlo de referencia a la hora de colocar los Cubípodos.

Figura 31 Malla de colocación en el taludómetro. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se colocó el medidor láser apoyado en la estructura del taludómetro, para tomar las medidas desde el mismo punto todo el rato y de forma perpendicular a la superficie.

Para poder medir la superficie deseada, se emplea una chapa cuadrada de aristas iguales a 2Dn de longitud, para que se quede de la forma más horizontal posible al ser colocada entre dos puntos irregulares.

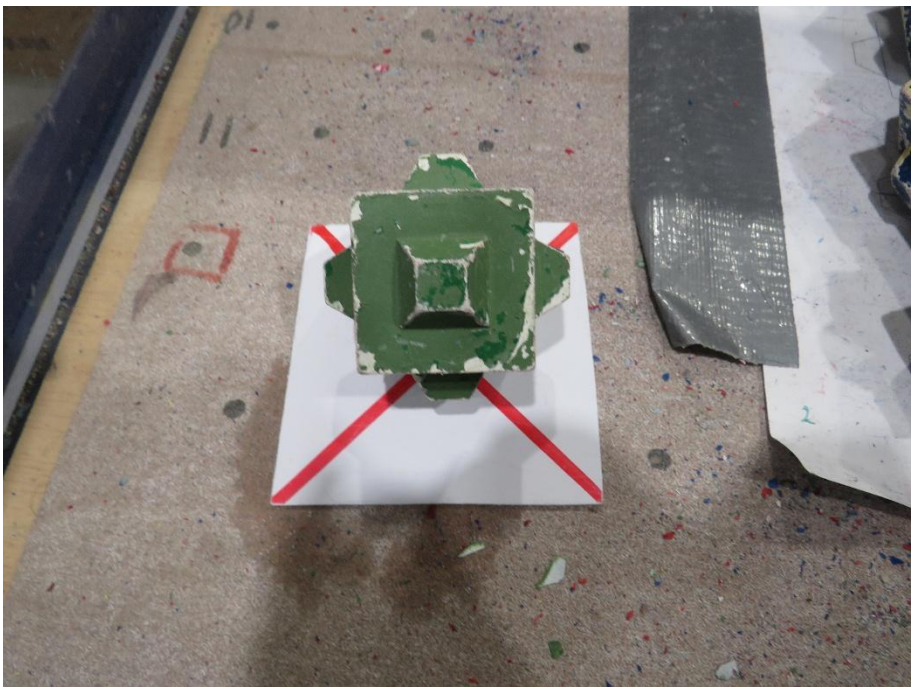


Figura 32 Chapa para medir la distancia con metro láser. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de asegurar la repetibilidad de las mediciones, se marca el centro de la chapa en rojo, como punto de referencia. Las mediciones se realizan siempre en posiciones fijas, concretamente en las cuatro esquinas y en el centro de la capa sobre la que se efectúan las mediciones.

Antes de empezar a colocar los Cubípodos, se toman las medidas de los 5 puntos en el plano del taludómetro con las chapas mencionadas anteriormente, para poder tener una referencia de la altura total hasta el medidor láser, midiendo el centro marcado de cada chapa de dimensión 2Dn por lado.

Figura 33 Medición de la distancia del láser hasta la base del taludómetro. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizados los pasos anteriores, se procede a construir el modelo, colocando cada Cubípodo en la posición marcada por la malla.

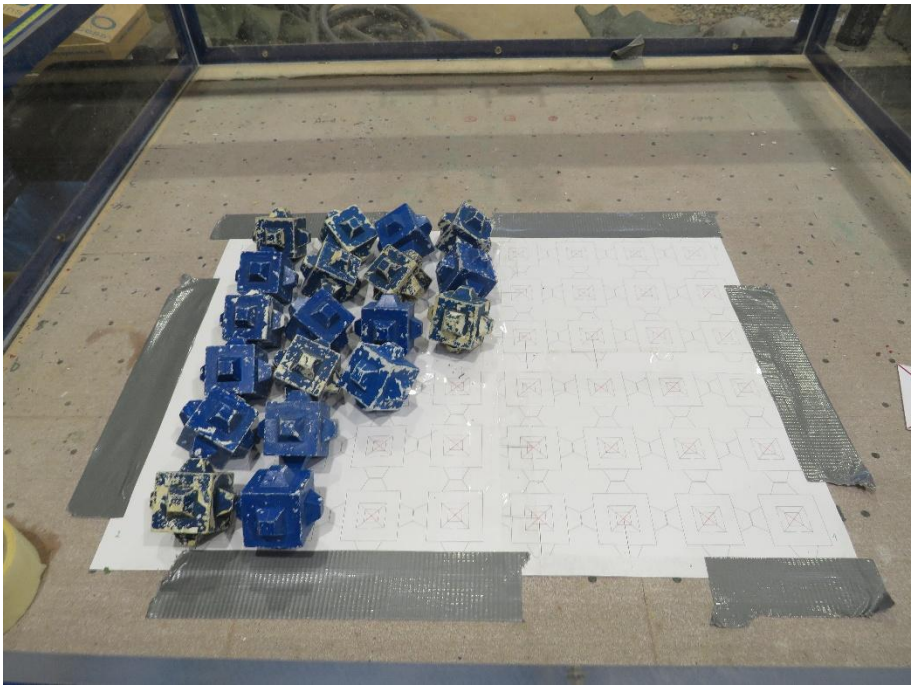


Figura 34 Colocación de la primera capa de Cubípodos. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se termina de colocar la primera capa del dique homogéneo, se sitúa la chapa cuadrada y se realizan las 5 medidas en los puntos descritos.

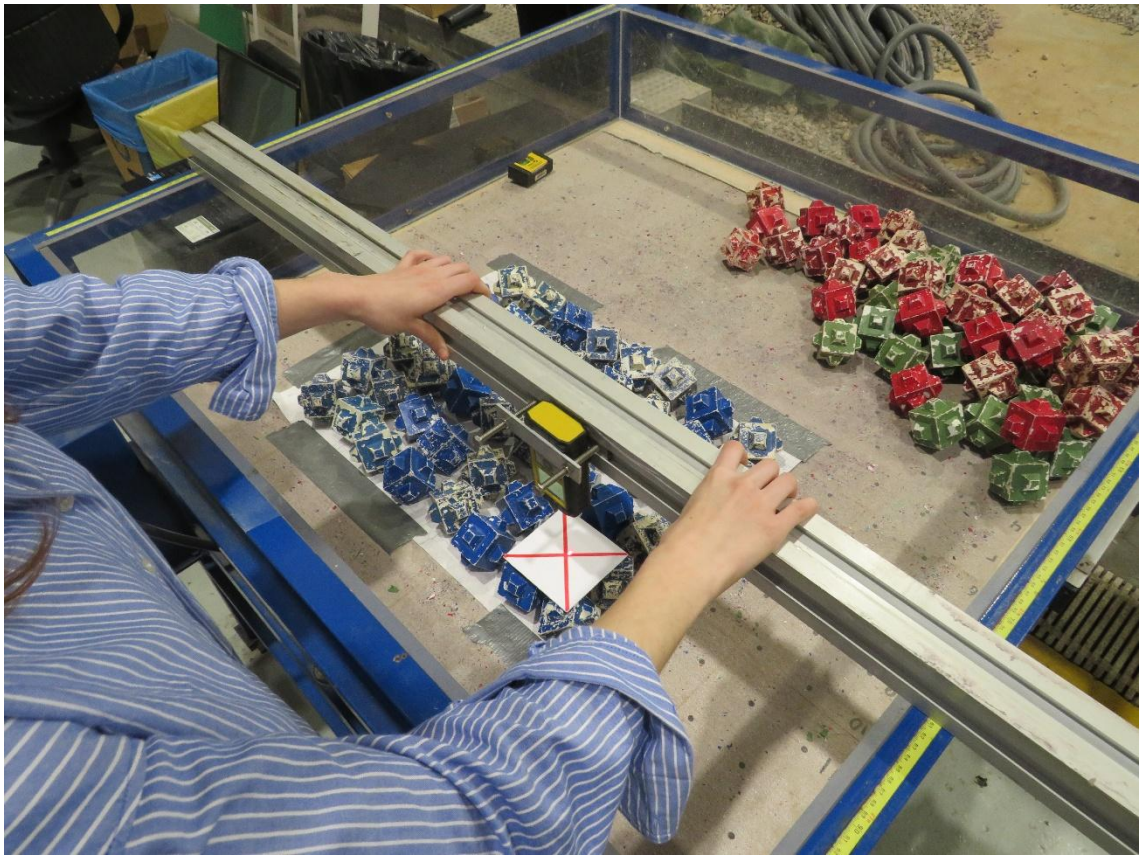


Figura 35 Medición de la distancia del láser hasta la primera capa. Fuente: Elaboración propia.

Figura 36 Medición del láser a un punto de la primera capa. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se toman las medidas de la primera capa, se retira la chapa y se continúa con la construcción de la segunda capa, repitiendo el mismo proceso al finalizarla.

Estos pasos se repiten para las 3 capas en todos los modelos ensayados.

Figura 37 Medición de la tercera y última capa. Fuente: Elaboración propia.

4.2. MODELO PLACISM

Análogamente, se repitieron los ensayos de la pendiente del 0% en el programa PLACSIM.

Para ello, se repiten las mismas simulaciones descritas para la obtención del error propio del modelo.

Los inputs también son los mismos solo con una diferencia en el ".csv" *Crane position,* ya que, para simular las chapas de medición, se introduce en la secuencia constructiva, al finalizar cada capa, 5 piezas de tipología "Cube", con un diámetro nominal en z igual a 0.01 metros y en x,e igual a 1 metro.

x (meters)	y (meters)	z (meters)	rotx (rad)	roty (rad)	rotz (rad)	Constructive	Placement o	Name	Armor Unit	Nominal dia	Nominal dia	Nominal diameter z
0	0	5	0	0,785	4,951	1	1	Cubipod1	Cubipod	1	1	1
0	1,44	5	0	0,785	3,246	1	2	Cubipod2	Cubipod	1	1	1
0	2,88	5	0	0,785	3,231	1	3	Cubipod3	Cubipod	1	1	1
0	4,32	5	0	0,785	3,729	1	4	Cubipod4	Cubipod	1	1	1
0	5,76	5	0	0,785	4,889	1	5	Cubipod5	Cubipod	1	1	1
0	7,2	5	0	0,785	4,274	1	6	Cubipod6	Cubipod	1	1	1
0	8,64	5	0	0,785	5,263	1	7	Cubipod7	Cubipod	1	1	1
0	10,08	5	0	0,785	0,717	1	8	Cubipod8	Cubipod	1	1	1
1,44	0	5	0	0,785	3,722	1	9	Cubipod9	Cubipod	1	1	1
1,44	1,44	5	0	0,785	2,97	1	10	Cubipod10	Cubipod	1	1	1
1,44	2,88	5	0	0,785	1,902	1	11	Cubipod11	Cubipod	1	1	1
1,44	4,32	5	0	0,785	3,416	1	12	Cubipod12	Cubipod	1	1	1
1,44	5,76	5	0	0,785	4,554	1	13	Cubipod13	Cubipod	1	1	1
1,44	7,2	5	0	0,785	0,778	1	14	Cubipod14	Cubipod	1	1	1
1,44	8,64	5	0	0,785	3,335	1	15	Cubipod15	Cubipod	1	1	1
1,44	10,08	5	0	0,785	2,797	1	16	Cubipod16	Cubipod	1	1	1
2,88	0	5	0	0,785	2,655	1	17	Cubipod17	Cubipod	1	1	1
2,88	1,44	5	0	0,785	1,717	1	18	Cubipod18	Cubipod	1	1	1
2,88	2,88	5	0	0,785	4,338	1	19	Cubipod19	Cubipod	1	1	1
2,88	4,32	5	0	0,785	5,67	1	20	Cubipod20	Cubipod	1	1	1
2,88	5,76	5	0	0,785	1,66	1	21	Cubipod21	Cubipod	1	1	1
2,88	7,2	5	0	0,785	3,134	1	22	Cubipod22	Cubipod	1	1	1
2,88	8,64	5	0	0,785	2,926	1	23	Cubipod23	Cubipod	1	1	1
2,88	10,08	5	0	0,785	5,827	1	24	Cubipod24	Cubipod	1	1	1
4,32	0	5	0	0,785	0,168	1	25	Cubipod25	Cubipod	1	1	1
4,32	1,44	5	0	0,785	2,167	1	26	Cubipod26	Cubipod	1	1	1
4,32	2,88	5	0	0,785	1,95	1	27	Cubipod27	Cubipod	1	1	1
4,32	4,32	5	0	0,785	4,646	1	28	Cubipod28	Cubipod	1	1	1
4,32	5,76	5	0	0,785	5,286	1	29	Cubipod29	Cubipod	1	1	1
4,32	7,2	5	0	0,785	4,767	1	30	Cubipod30	Cubipod	1	1	1
4,32	8,64	5	0	0,785	4,034	1	31	Cubipod31	Cubipod	1	1	1
4,32	10,08	5	0	0,785	1,215	1	32	Cubipod32	Cubipod	1	1	1
5,76	0	5	0	0,785	5,595	1	33	Cubipod33	Cubipod	1	1	1
5,76	1,44	5	0	0,785	2,124	1	34	Cubipod34	Cubipod	1	1	1
5,76	2,88	5	0	0,785	3,187	1	35	Cubipod35	Cubipod	1	1	1
5,76	4,32	5	0	0,785	4,967	1	36	Cubipod36	Cubipod	1	1	1
5,76	5,76	5	0	0,785	5,6	1	37	Cubipod37	Cubipod	1	1	1

Inputs_base_HLCS_TFM

Figura 38 Input crane position general de las simulaciones. Fuente: Elaboración propia

x (meters)	y (meters)	z (meters)	rotx (rad)	roty (rad)	rotz (rad)	Constructive	Placement o	Name	Armor Unit	Nominal dia	Nominal dia	Nominal diameter z (met	Capa
0,000	0,000	3,000	0,000	0,785	2,444	1	1	Cubipod1	Cubipod	1	1	1	1
0,000	1,440	3,000	0,000	0,785	0,575	1	2	Cubipod2	Cubipod	1	1	1	1
0,000	2,880	3,000	0,000	0,785	5,542	1	3	Cubipod3	Cubipod	1	1	1	1
0,000	4,320	3,000	0,000	0,785	6,140	1	4	Cubipod4	Cubipod	1	1	1	1
0,000	5,760	3,000	0,000	0,785	4,138	1	5	Cubipod5	Cubipod	1	1	1	1
0,000	7,200	3,000	0,000	0,785	0,560	1	6	Cubipod6	Cubipod	1	1	1	1
0,000	8,640	3,000	0,000	0,785	3,903	1	7	Cubipod7	Cubipod	1	1	1	1
0,000	10,080	3,000	0,000	0,785	0,357	1	8	Cubipod8	Cubipod	1	1	1	1
0,000	11,520	3,000	0,000	0,785	0,918	1	9	Cubipod9	Cubipod	1	1	1	1
0,000	12,960	3,000	0,000	0,785	0,050	1	10	Cubipod10	Cubipod	1	1	1	1
0,000	14,400	3,000	0,000	0,785	2,928	1	11	Cubipod11	Cubipod	1	1	1	1
0,000	15,840	3,000	0,000	0,785	0,847	1	12	Cubipod12	Cubipod	1	1	1	1
0,000	17,280	3,000	0,000	0,785	4,601	1	13	Cubipod13	Cubipod	1	1	1	1
0,000	18,720	3,000	0,000	0,785	0,705	1	14	Cubipod14	Cubipod	1	1	1	1
0,000	20,160	3,000	0,000	0,785	2,514	1	15	Cubipod15	Cubipod	1	1	1	1
0,000	21,600	3,000	0,000	0,785	0,571	1	16	Cubipod16	Cubipod	1	1	1	1
0,000	23,040	3,000	0,000	0,785	4,286	1	17	Cubipod17	Cubipod	1	1	1	1
0,000	24,480	3,000	0,000	0,785	3,281	1	18	Cubipod18	Cubipod	1	1	1	1
4,320	1,440	3,000	0,000	0,785	3,294	1	79	Cubipod79	Cubipod	1	1	1	1
4,320	0,000	3,000	0,000	0,785	0,866	1	80	Cubipod80	Cubipod	1	1	1	1
2,160	5,000	3,000	3,142	0,000	1,563	2	81	Cube1	Cube	2	2	0,01	
2,160	10,000	3,000	3,142	0,000	0,067	2	82	Cube2	Cube	2	2	0,01	
2,160	15,000	3,000	3,142	0,000	0,955	2	83	Cube3	Cube	2	2	0,01	
2,160	20,000	3,000	3,142	0,000	4,539	2	84	Cube4	Cube	2	2	0,01	
0,720	0,720	3,000	0,000	0,785	0,004	3	85	Cubipod81	Cubipod	1	1	1	2
0,720	2,160	3,000	0,000	0,785	1,072	3	86	Cubipod82	Cubipod	1	1	1	2
0,720	3,600	3,000	0,000	0,785	5,317	3	87	Cubipod83	Cubipod	1	1	1	2
0,720	5,040	3,000	0,000	0,785	2,361	3	88	Cubipod84	Cubipod	1	1	1	2
0,720	6,480	3,000	0,000	0,785	2,616	3	89	Cubipod85	Cubipod	1	1	1	2
0,720	7,920	3,000	0,000	0,785	3,027	3	90	Cubipod86	Cubipod	1	1	1	2
0,720	9,360	3,000	0,000	0,785	0,379	3	91	Cubipod87	Cubipod	1	1	1	2
0,720	10,800	3,000	0,000	0,785	2,954	3	92	Cubipod88	Cubipod	1	1	1	2
0,720	12,240	3,000	0,000	0,785	0,299	3	93	Cubipod89	Cubipod	1	1	1	2
0,720	13,680	3,000	0,000	0,785	4,309	3	94	Cubipod90	Cubipod	1	1	1	2

*Figura 39 Input crane position con las chapas de medición 2*Dn. Fuente: Elaboración propia*

Para poder tener las medidas, durante el proceso de simulación se deja caer las piezas hasta que terminan de caer las 5 primeras chapas, después, se pausa y se exporta el ".csv" generado con las posiciones finales y se desactivan las chapas desde el menú con la secuencia constructiva. Una vez se retiran las chapas se vuelve a dar al *play* y se continúa con la simulación, repitiendo este proceso cuando caen las chapas de la segunda capa y exportando las posiciones finales de cada capa.

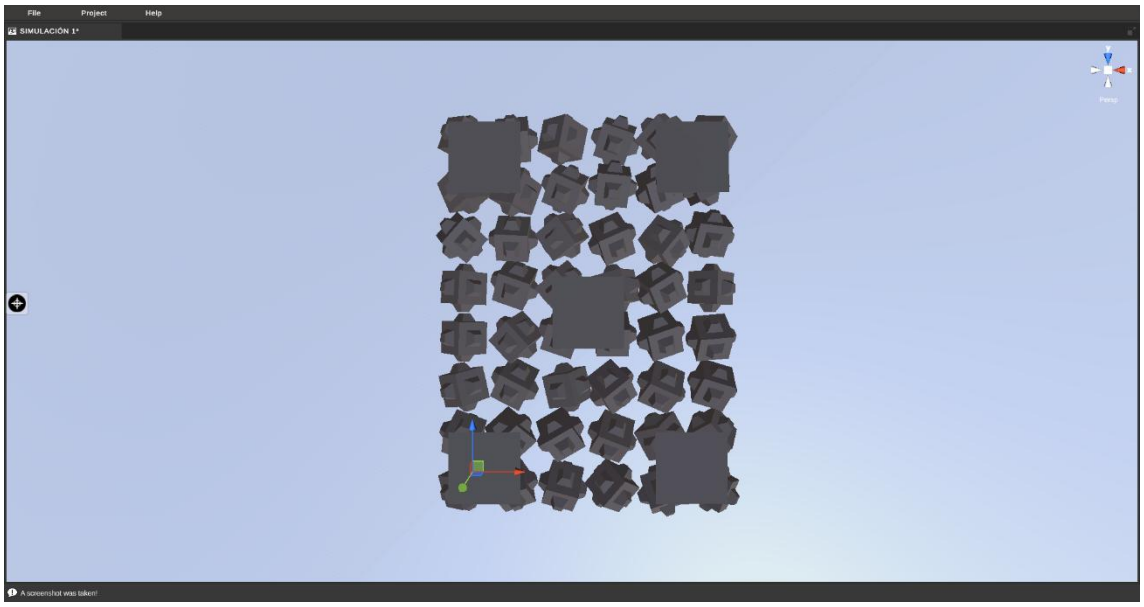


Figura 40 Imagen en planta de la simulación de la primera capa finalizada. Fuente: Elaboración propia

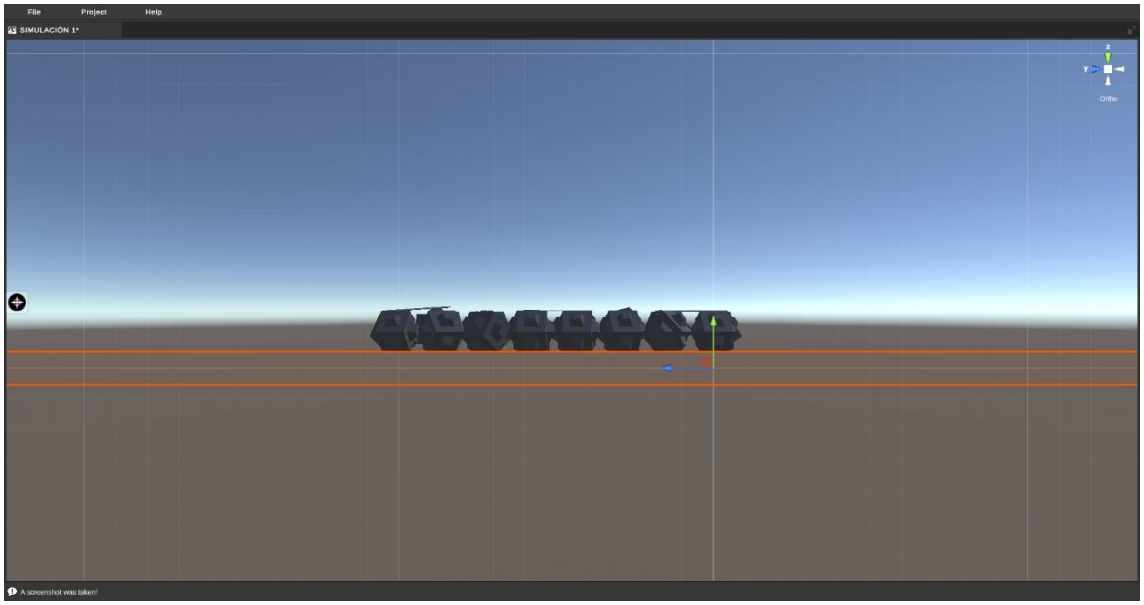


Figura 41 Imagen lateral desde eje x de la simulación de la primera capa finalizada. Fuente: Elaboración propia

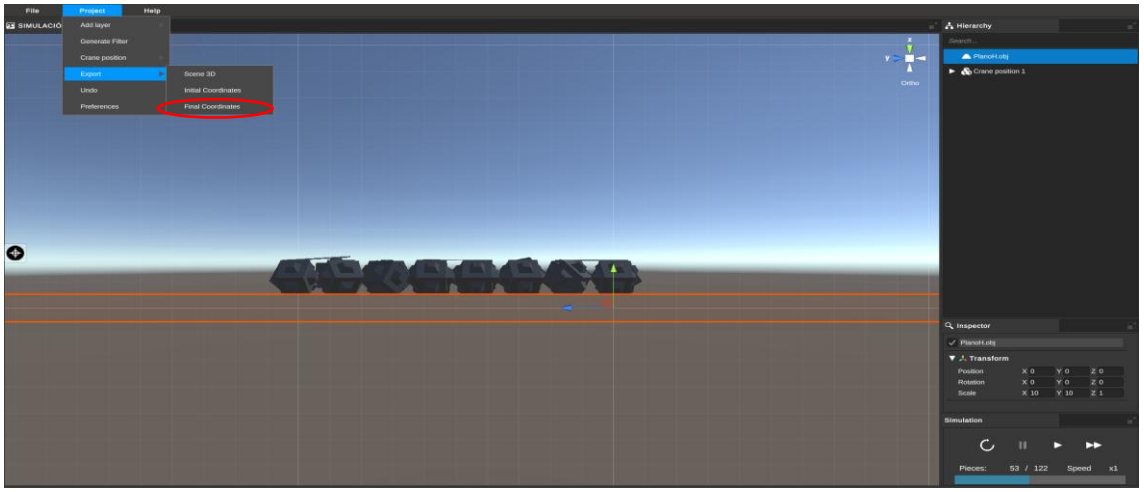


Figura 42 Proceso de exportación de coordenadas finales. Fuente: Elaboración propia

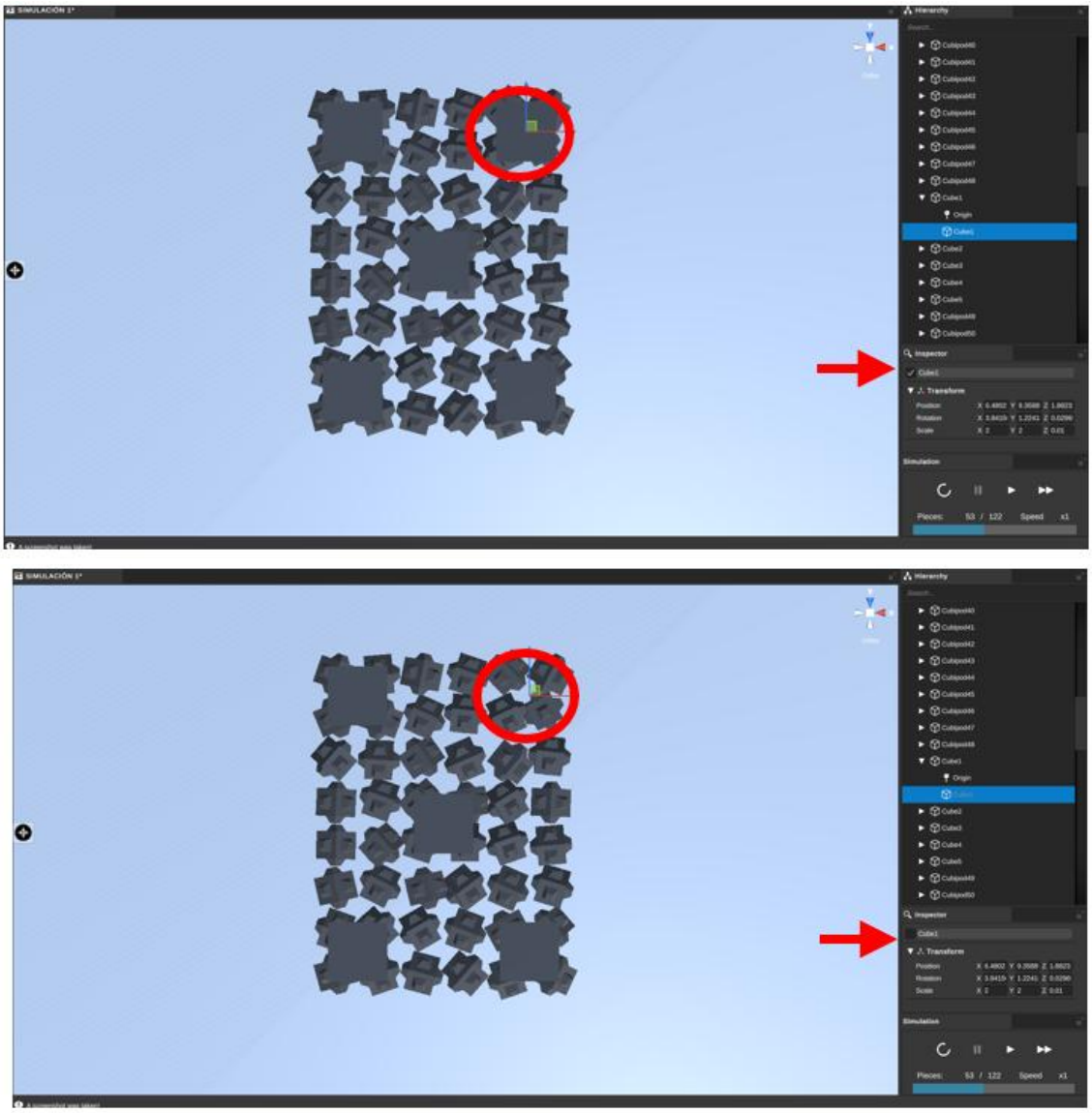


Figura 43 Proceso de desactivación de las chapas. Fuente: Elaboración propia

Al terminar la simulación lo que se tiene es un total de 3 archivos ".csv", en los que con la coordenada z final se sabe la altura a la que se encuentra la chapa, medida de centro de plano a centro de chapa.

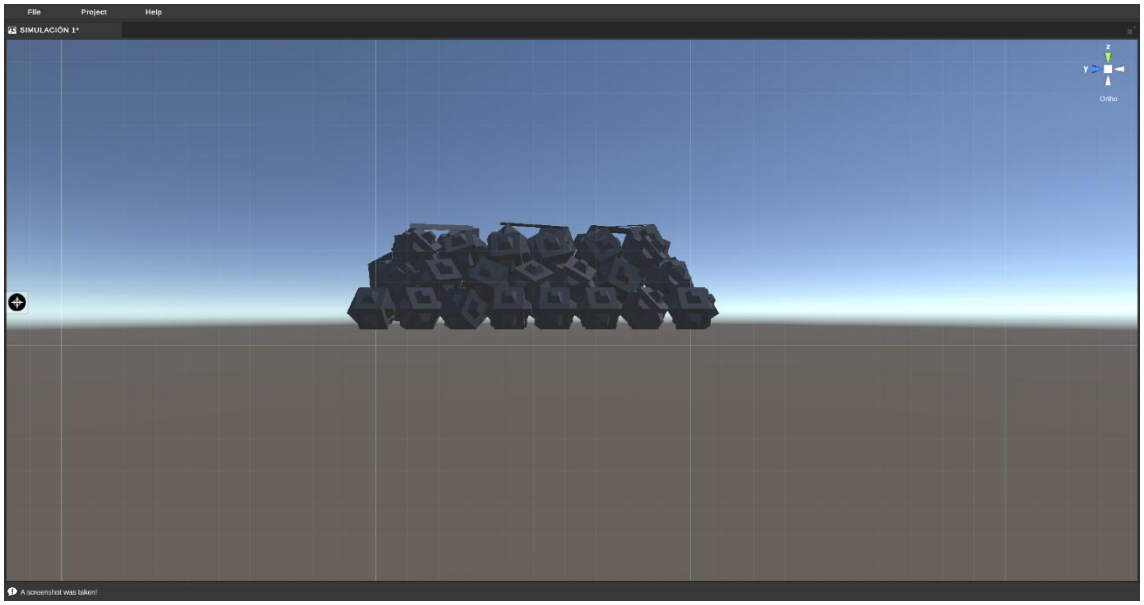


Figura 44 Imagen lateral desde eje x de la simulación finalizada. Fuente: Elaboración propia

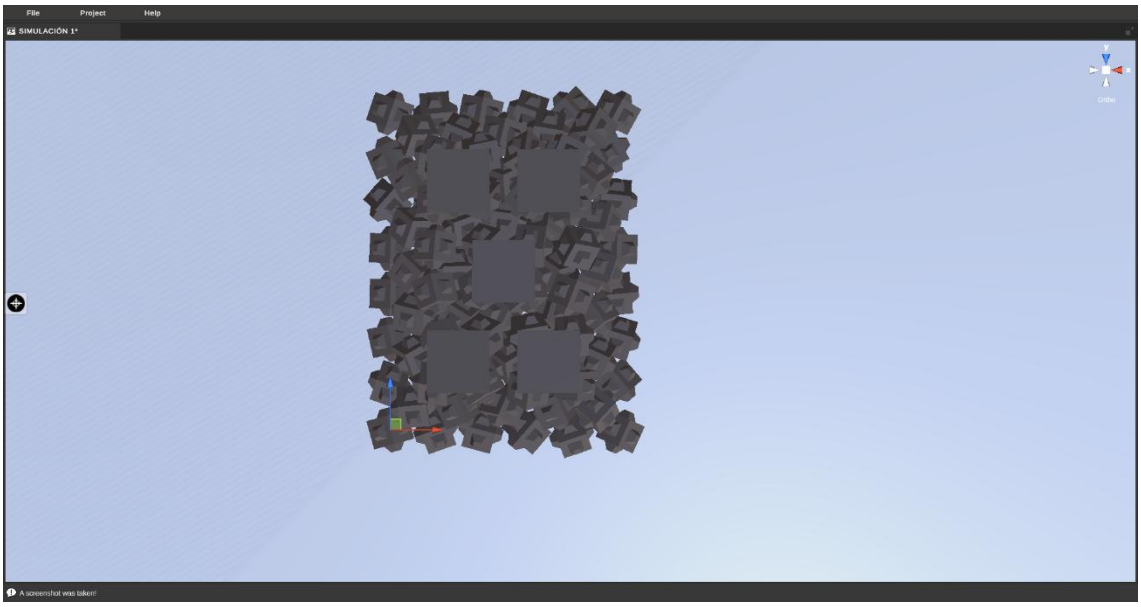


Figura 45 Imagen en plantade la simulación finalizada. Fuente: Elaboración propia

En total se realizan 10 simulaciones en cada tipo de colisión, quedando el siguiente esquema de modelos simulados.

	Collision interation	**Número total de simulaciones**	**Capas de cada modelo**	**Mediciones por capa**	**Mediciones totales**
0%	C0	10	3	5	150
	C1	10	3	5	150
	C2	10	3	5	150

Tabla 12 Mediciones realizadas en PLACSIM. Fuente: Elaboración propia

4.3. RESULTADOS

Este estudio se va a centrar solamente en analizar los datos obtenidos con pendiente igual a 0%.

- Modelo físico
- Simulación con PLACSIM.

4.3.1. MODELO FÍSICO

Con las medidas obtenidas y registradas se calculan los coeficientes de capa de la siguiente forma para poder aplicar la fórmula 15

Primero se obtienen los coeficientes de capa de cada medición de forma individual:

Para la capa 1

$$k_{\Delta 1,i} = \frac{(Promedio\ medida\ a\ base\ taludómetro - Medida\ Cube_i)}{Dn}$$

Siendo:

- Dn = 0,0436 m
- $i = 1, 2, 3, 4\ y\ 5$

Para la capa 2:

$$k_{\Delta 2,i} = \frac{(Promedio\ medida\ a\ capa\ 1 - Medida\ Cube_i)}{Dn}$$

Siendo:

- Dn = 0,0436 m
- $i = 6, 7, 8, 9\ y\ 10$

Para la capa 3:

$$k_{\Delta 3,i} = \frac{(Promedio\ medida\ a\ capa\ 2 - Medida\ Cube_i)}{Dn}$$

Siendo:

- Dn = 0,0436 m
- $i = 10, 11, 12, 13, 14\ y\ 15$

Finalmente, con los coeficientes de capa individuales de cada posición de la chapa, se hace el promedio de toda la capa, de las cinco tandas de medición, de las cuales se vuelve a hacer el promedio global para obtener los coeficientes finales de cada capa.

Coef. Capa 1	Coef. Capa 2	Coef. Capa 3	Coef. Capa 1 (promedio)	Coef. Capa 2 (promedio)	Coef. Capa 3 (promedio)
1,266	0,899	0,885	1,276	0,920	0,860
1,289	0,927	0,862			
1,284	0,917	0,872			
1,266	0,931	0,862			
1,275	0,927	0,817			

Tabla 13 Coeficientes de capa finales de los ensayos físicos. Fuente: LPC.

4.3.2. MODELO PLACSIM

Para obtener los coeficientes de capa en PLACSIM se ha ido obteniendo la altura de cada capa (Coordenada final z) desde el plano horizontal, restando 0.505 metros para descontar el plano y la anchura de la chapa.

Simultáneamente, se obtenía el promedio de esos resultados para poder restárselo a las alturas de las capas superiores y así poder obtener el coeficiente de capa con la altura relativa de cada una.

	ALTURA CAPA 1 DESDE PLANO (c=1m)					C1	ALTURA CAPA 2 DESDE PLANO (c=1m)					C2	ALTURA CAPA 3 DESDE PLANO (c=1m)				
Simulación	Cube1	Cube2	Cube3	Cube4	Cube5	Promedio altura	Cube6	Cube7	Cube8	Cube9	Cube10	Promedio altura	Cube11	Cube12	Cube13	Cube14	Cube15
S1.csv	1,37	1,31	1,32	1,32	1,32	1,33	2,34	2,22	2,27	2,24	2,28	2,27	3,28	3,14	3,20	3,19	3,27
S2.csv	1,32	1,32	1,32	1,33	1,32	1,32	2,33	2,31	2,26	2,35	2,28	2,30	3,26	3,18	3,14	3,19	3,26
S3.csv	1,44	1,32	1,32	1,33	1,32	1,35	2,39	2,31	2,26	2,34	2,23	2,31	3,28	3,19	3,15	3,18	3,27
S4.csv	1,41	1,31	1,32	1,32	1,35	1,34	2,42	2,20	2,26	2,33	2,30	2,30	3,38	3,10	3,27	3,22	3,23
S5.csv	1,38	1,32	1,32	1,32	1,32	1,33	2,37	2,33	2,26	2,32	2,27	2,31	3,23	3,19	3,13	3,21	3,33
S6.csv	1,30	1,31	1,32	1,32	1,32	1,32	2,30	2,23	2,26	2,33	2,20	2,26	3,25	3,14	3,26	3,21	3,24
S7.csv	1,44	1,32	1,32	1,32	1,33	1,35	2,38	2,31	2,26	2,35	2,26	2,31	3,24	3,17	3,15	3,22	3,23
S8.csv	1,38	1,31	1,32	1,32	1,35	1,34	2,41	2,21	2,26	2,25	2,31	2,29	3,31	3,18	3,27	3,22	3,20
S9.csv	1,30	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	2,23	2,32	2,26	2,35	2,22	2,28	3,26	3,19	3,15	3,21	3,29
S10.csv	1,30	1,31	1,32	1,32	1,33	1,32	2,29	2,25	2,26	2,28	2,26	2,27	3,18	3,17	3,21	3,19	3,28

Tabla 14 Cálculo en Excel de las alturas de cada capa desde el plano con los datos de las simulaciones de colisión 0. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se obtienen los coeficientes de capa para cada chapa de cada simulación

Para la capa 1:

$$k_{\Delta 1,i} = \frac{Altura\ Capa\ 1\ desde\ plano\ Cube_i}{Dn}$$

Siendo:

- Dn = 1 m
- $i = 1, 2, 3, 4\ y\ 5$

Para la capa 2:

$$k_{\Delta 2,i} = \frac{(Altura\ Capa\ 2\ desde\ plano\ Cube_i - Promedio\ altura\ capa\ 1)}{Dn}$$

Siendo:

- Dn = 1 m
- $i = 6, 7, 8, 9\ y\ 10$

Para la capa 3:

$$k_{\Delta 3,i} = \frac{(Altura\ Capa\ 3\ desde\ plano\ Cube_i - Promedio\ altura\ capa\ 2)}{Dn}$$

Siendo:

- Dn = 1 m
- $i = 10, 11, 12, 13, 14\ y\ 15$

COEFICIENTES DE CAPA 1 INDIVIDUALES					COEFICIENTES DE CAPA 2 INDIVIDUALES					COEFICIENTES DE CAPA 3 INDIVIDUALES				
Cube1	Cube2	Cube3	Cube4	Cube5	Cube6	Cube7	Cube8	Cube9	Cube10	Cube11	Cube12	Cube13	Cube14	Cube15
1,37	1,31	1,32	1,32	1,32	1,01	0,89	0,94	0,91	0,95	1,01	0,87	0,93	0,93	1,01
1,32	1,32	1,32	1,33	1,32	1,00	0,99	0,94	1,02	0,96	0,96	0,88	0,84	0,88	0,96
1,44	1,32	1,32	1,33	1,32	1,04	0,96	0,91	1,00	0,88	0,97	0,89	0,84	0,88	0,96
1,41	1,31	1,32	1,32	1,35	1,08	0,86	0,92	0,99	0,96	1,07	0,80	0,97	0,92	0,93
1,38	1,32	1,32	1,32	1,32	1,04	0,99	0,93	0,99	0,94	0,92	0,88	0,82	0,90	1,02
1,30	1,31	1,32	1,32	1,32	0,98	0,91	0,94	1,02	0,89	0,99	0,87	0,99	0,95	0,98
1,44	1,32	1,32	1,32	1,33	1,03	0,97	0,91	1,00	0,91	0,93	0,85	0,84	0,90	0,92
1,38	1,31	1,32	1,32	1,35	1,08	0,87	0,92	0,91	0,97	1,02	0,89	0,98	0,94	0,91
1,30	1,32	1,32	1,32	1,32	0,91	1,01	0,94	1,03	0,90	0,98	0,92	0,88	0,93	1,01
1,30	1,31	1,32	1,32	1,33	0,97	0,93	0,94	0,96	0,94	0,91	0,90	0,95	0,93	1,02

Tabla 15 Cálculo en Excel de los coeficientes de capa de cada chapa con los datos de las simulaciones de colisión 0. Fuente: Elaboración propia

Para obtener el valor total de los coeficientes de capa se hace el promedio por capa de cada simulación y después, con esos valores, se vuelve a hacer otro promedio por capa de todas las simulaciones juntas, dando los siguientes resultados para los 3 tipos de colisión:

COEFICIENTES DE CAPAS C0			**COEFICIENTE DE CAPAS C1**			**COEFICIENTES DE CAPAS C2**		
Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 1	Capa 2	Capa 3
1,33	0,94	0,95	1,31	0,98	0,89	1,31	0,94	0,94
1,32	0,98	0,90	1,31	0,97	0,94	1,31	0,95	0,96
1,35	0,96	0,91	1,31	0,96	0,95	1,31	0,93	0,94
1,34	0,96	0,94	1,31	0,98	0,93	1,46	0,99	0,89
1,33	0,98	0,91	1,31	0,97	0,95	1,31	0,95	0,92
1,32	0,95	0,96	1,31	0,97	0,93	1,31	0,94	0,94
1,35	0,96	0,89	1,31	0,97	0,91	1,36	1,06	0,82
1,34	0,95	0,95	1,31	0,97	0,92	1,37	0,91	0,81
1,32	0,96	0,94	1,31	0,98	0,94	1,41	0,99	0,83
1,32	0,95	0,94	1,31	0,98	0,95	1,31	0,94	0,98
COEFICIENTE DE CAPA TOTAL C0			**COEFICIENTE DE CAPA TOTAL C1**			**COEFICIENTE DE CAPA TOTAL C2**		
1,33	**0,96**	**0,93**	**1,31**	**0,97**	**0,93**	**1,35**	**0,96**	**0,90**

Tabla 16 Cálculo en Excel de los coeficientes de capa totales por colisiones. Fuente: Elaboración propia

4.3.3. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para poder comparar ambos resultados se decide hacer uso de los coeficientes de capa del modelo de PLCASIM obtenidos por colisión 1(C1).

Ambos resultados no coinciden, siendo el valor de los coeficientes de capa obtenidos por los ensayos físicos menores a los de PLACSIM.

Cabría esperar, a la vista de lo mostrado por Medina et al, 2020, que los resultados se asemejaran más a los obtenidos por PLACSIM, siendo la primera capa siempre igual a 1,30*Dn, sin importar la geometría de la malla

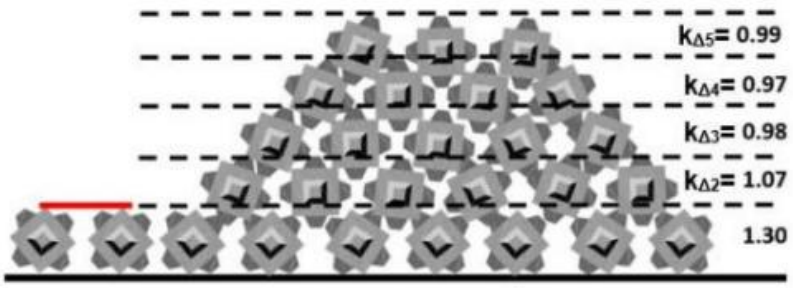


Figura 46 Coeficientes de capa de un dique homogéneo de Cubípodos de malla triangular con a/Dn=1,58 and b/Dn=1,27. Fuente: Elaboración propia

Es por ello por lo que se decide repetir los ensayos físicos, aumentando la altura de colocación del metro láser bajo la hipótesis de que la diferencia entre ambos resultados pueda deberse a un error del propio metro por estar demasiado próximo al modelo.

5. REFERENCIAS

- Muñoz-Palao, S., Díaz-Carrasco, P., Molines, J., Gómez-Martín, M. E., & Medina, J. R. (2024). Numerical construction tests to assess the feasibility of placement grids for Cubipod homogeneous low-crested structures. *Coastal Engineering, 188*, 104455. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104455
- Molines, J., Centi, R., Di Risio, M., & Medina, J. R. (2021). Estimation of layer coefficients of Cubipod homogeneous low-crested structures using physical and numerical model placement tests. *Coastal Engineering, 168*, 103901. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103901
- Muñoz-Palao, S. (2024). *Hydraulic stability and placement grids for homogeneous low-crested structures (HLCS)*. Universitat Politècnica de València. Muñoz-Palao, S., Díaz-Carrasco, P., Molines, J., Gómez-Martín, M. E., & Medina, J. R. (2024). Numerical construction tests to assess the feasibility of placement grids for Cubipod homogeneous low-crested structures. *Coastal Engineering, 188*, 104455. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104455
- PLACSIM. (s.f). Simulador de colocación para obras marítimas. https://placsim.com/
- Blender Foundation. (s.f). Blender [Software]. https://www.blender.org/
- Medina, J. R., Gómez-Martín, M. E., Mares-Nasarre, P., Escudero, M., Odériz, I., Mendoza, E., & Silva, R. (2020). *Homogeneous low-crested structures for beach protection in coral reef areas*. En Coastal Engineering Proceedings (Vol. 1, No. 36). https://doi.org/10.9753/icce.v36.structures.45
- Mashadyan, G. (2023). *Estudio experimental de la estabilidad hidráulica de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de las playas del T.M. de Tavernes de la Valldigna (Valencia)* [Trabajo Fin de Máster, Universitat Politècnica de València].

ANEJO 3: LOCALIZACIÓN Y DATOS PREVIOS

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 92
2. LOCALIZACIÓN 93
3. ANTECEDENTES..... 94
4. FUENTE DE DATOS..... 100
5. REFERENCIAS 101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de Quintana Roo en México. Fuente: Internet. 93
Figura 2 Ubicación de la playa de Mayakobá en Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia..... 93
Figura 3 Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia. 94
Figura 4 Sistema Arrecifal Mesoamericano. Fuente: MAR Fund (2026). Sistema Arrecifal Mesoamericano. https://marfund.org/es/arrecife-mesoamericano/ 95
Figura 5 Imagen del Sistema Arrecifal Mesoamericano. Fuente: MAR Fund (2026). Sistema Arrecifal Mesoamericano. https://marfund.org/es/arrecife-mesoamericano/95
Figura 6 Imagen de la cobertura de arrecifes de coral en la zona de estudio. Fuente: SIMAR/CONABIO 96
Figura 7 Caracterización de los niveles de estrés Fuente: SIMAR/CONABIO..... 97
Figura 8 Niveles de estrés de los corales en la zona de estudio del mes de noviembre de 2025. Fuente: SIMAR/CONABIO 97
Figura 9 Niveles de estrés de los corales en la zona de estudio del mes de noviembre de 2024. Fuente: SIMAR/CONABIO 98
Figura 10 Denuncia global del estado de los arrecifes de coral. Fuente: Internet 98
Figura 11 Geotextiles en la zona de la playa de Mayakobá. Fuente: Google Earth 99

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras constituyen sistemas dinámicos de gran complejidad, en los que interactúan procesos físicos, biológicos y antrópicos. En las últimas décadas, muchas regiones litorales del mundo han experimentado una creciente presión derivada del desarrollo turístico, la urbanización y la alteración de los ecosistemas naturales, lo que ha generado desequilibrios significativos en la dinámica costera y un aumento de los procesos de erosión.

En el litoral del mar Caribe, y en particular en la Riviera Maya (México), esta problemática se ve intensificada por la estrecha relación existente entre la estabilidad de la línea de costa y la presencia de arrecifes coralinos someros. Estos arrecifes actúan como barreras naturales frente al oleaje incidente, reduciendo la energía que alcanza la costa y desempeñando un papel fundamental tanto en la protección litoral como en el mantenimiento de los ecosistemas marinos. Sin embargo, el incremento de la presión antrópica, unido a los efectos del cambio climático (como el aumento de la temperatura del agua y la mayor frecuencia de eventos extremos), está provocando un progresivo deterioro de estos sistemas arrecifales.

La degradación de los arrecifes de coral no solo supone una pérdida ecológica de gran relevancia, sino que también conlleva una alteración de la dinámica litoral, al disminuir la capacidad natural de disipación del oleaje. Como consecuencia, numerosos tramos de costa del Caribe muestran signos evidentes de regresión, con pérdidas recurrentes de sedimento y una elevada vulnerabilidad frente a temporales y ciclones tropicales. En este contexto, se han implantado soluciones de carácter provisional, como la instalación de geotextiles paralelos a la línea de costa, destinadas a mitigar los efectos de la erosión. No obstante, este tipo de actuaciones presentan limitaciones importantes en cuanto a durabilidad, eficacia a largo plazo y capacidad para abordar el origen del problema.

El presente estudio se centra en la playa de Mayakobá, situada en la Riviera Maya, dentro del municipio de Solidaridad, en el estado de Quintana Roo (México).

Este tramo litoral se caracteriza por la presencia de playas de arena fina carbonatada, la influencia directa del Sistema Arrecifal Mesoamericano y un entorno turístico de alta relevancia económica. A partir del análisis de la localización, los antecedentes y el estado actual del sistema costero, se plantea la necesidad de evaluar alternativas de protección más sostenibles y duraderas.

2. LOCALIZACIÓN

La zona de actuación delimitada corresponde a la playa de Mayakobá, situada en la Riviera Maya, dentro del municipio de Solidaridad, en el estado de Quintana Roo (México). Este tramo litoral se localiza entre Puerto Morelos y Playa del Carmen, a unos 15 km del núcleo urbano de esta última presentando una línea de costa prácticamente rectilínea, con una orientación aproximada NE–SW y abierta al mar Caribe, formando parte de la Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT).

Figura 1 Ubicación de Quintana Roo en México. Fuente: Internet.

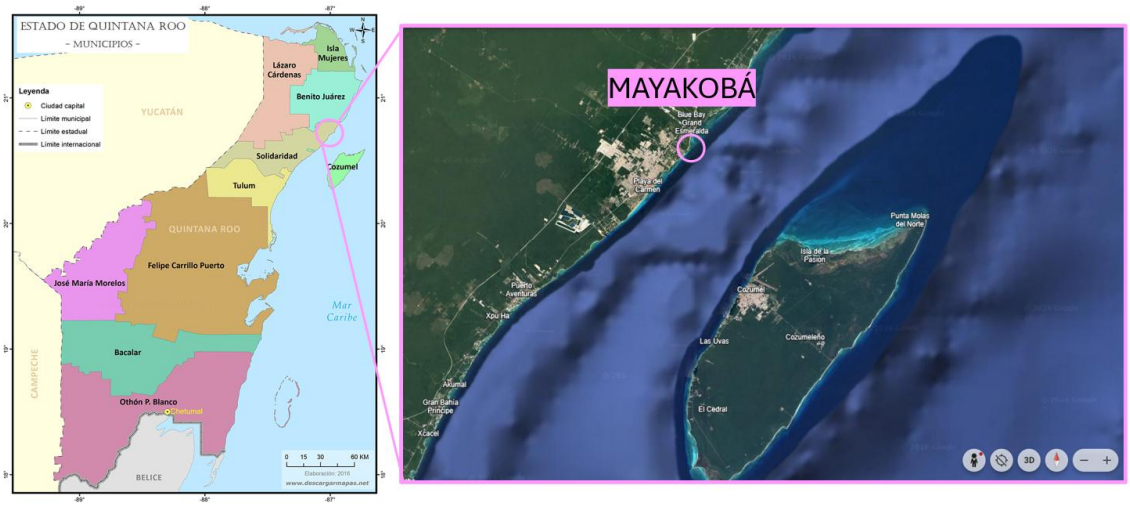


Figura 2 Ubicación de la playa de Mayakobá en Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.

Figura 3 Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

El tramo de costa considerado se caracteriza por la presencia de playas de arena fina y clara, de origen predominantemente carbonatado. La playa se desarrolla frente a un entorno turístico–residencial de baja altura, integrado en el complejo Mayakobá, con accesos controlados y sin un paseo marítimo continuo.

No se ha observado un cordón dunar desarrollado, habiendo únicamente acumulaciones arenosas bajas y discontinuas.

La dinámica litoral de la playa de Mayakobá está fuertemente condicionada por la presencia de arrecifes coralinos someros situados frente a la costa, los cuales actúan como barrera natural, atenuando el oleaje incidente y modulando los procesos de transporte sedimentario. No obstante, durante episodios de temporal asociados a frentes fríos o ciclones tropicales, se producen procesos de erosión significativos y variaciones apreciables en la anchura de la playa ya que la arena es muy fina, lo que la hace sensible a eventos extremos o pérdida de protección frente al oleaje.

3. ANTECEDENTES

El mar Caribe situado en la costa mejicana presenta lo que se denomina el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), con una extensión de más de 1000 km, contiene la segunda barrera de arrecife más larga del mundo y es el arrecife transfronterizo más grande también a nivel mundial.

Figura 4 Sistema Arrecifal Mesoamericano. Fuente: MAR Fund (2026). Sistema Arrecifal Mesoamericano. https://marfund.org/es/arrecife-mesoamericano/

El Sistema Arrecifal Mesoamericano es esencial gracias a sus funciones ecosistémicas, entre ellas:

- Protección de la costa frente a las acciones del oleaje
- Captación del carbono
- Favorece la economía de los locales gracias a la sustentación de la pesca e impulso del turismo
- Contiene más de 65 especiales de coral y más de 500 de peces, añadiendo a parte sus beneficios para los manatíes, tiburones y tortugas marinas.

Figura 5 Imagen del Sistema Arrecifal Mesoamericano. Fuente: MAR Fund (2026). Sistema Arrecifal Mesoamericano. https://marfund.org/es/arrecife-mesoamericano/

En la siguiente figura se puede ver la cobertura de arrecifes de coral en aguas someras (18 metros de profundidad máximos) próximas al área de estudio.

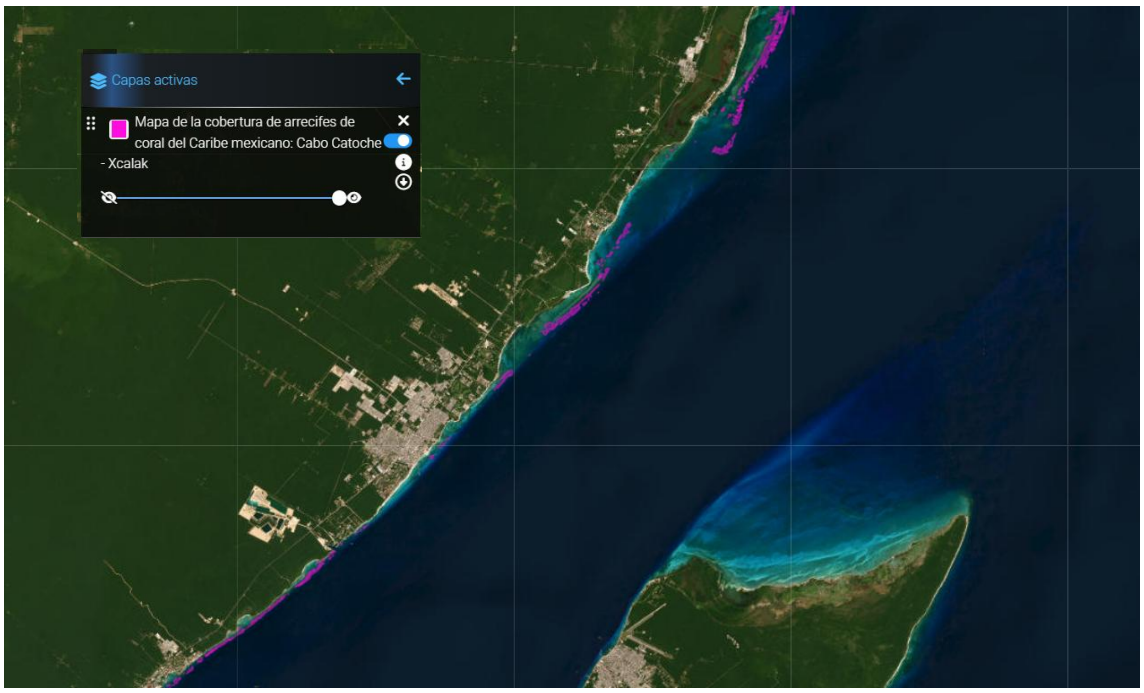


Figura 6 Imagen de la cobertura de arrecifes de coral en la zona de estudio. Fuente: SIMAR/CONABIO

Este arrecife se está viendo sometido a amenazas gracias al agravamiento de la presión antrópica por el incremento del turismo en los últimos años. Además del cambio climático, que entre sus consecuencias se encuentra el aumento de la temperatura del agua y la alteración de las acciones del oleaje e incremento de eventos extremos, algo que altera las condiciones del arrecife y contribuye a su deterioro.

La web de SIMAR, también posee un monitoreo diario de los arrecifes en los que se muestra el estrés en el que se encuentran/alerta de peligrosidad por su blanqueamiento.

Nivel de Estrés en Corales *Coral Stress Level*	**Intensidad Potencial del Blanqueamiento y de Mortalidad de los Corales** *Potential Coral Bleaching Intensity and Mortality*
(1) **Sin Estrés** *Without Stress*	**Sin Blanqueamiento** *No Bleaching*
(2) **Vigilancia de Blanqueamiento** *Bleaching Monitoring*	**Baja Probabilidad de Blanqueamiento** *Low Probability of Bleaching*
(3) **Posible Blanqueamiento** *Possible Bleaching*	**Posible Blanqueamiento** *Possible Bleaching*
(4) **Probable Blanqueamiento** *Probable Bleaching*	**Probable Blanqueamiento Significativo** *Probable Significant Bleaching*
(5) **Blanqueamiento y Mortalidad Probable** *Bleaching and Probable Mortality*	**Blanqueamiento y Probable Mortalidad de Corales sensibles al calor** *Bleaching and Probable Mortality of Heat-Sensitive Corals*
(6) **Blanqueamiento y Mortalidad Moderada** *Bleaching and Moderate Mortality*	**Blanqueamiento y Probable Mortalidad Moderada de múltiples especies** *Bleaching and Probable Moderate Mortality of Multi-Species*
(7) **Blanqueamiento y Mortalidad Severa** *Bleaching and Severe Mortality*	**Blanqueamiento y Probable Mortalidad Severa del Arrecife (> 50% de los Corales)** *Bleaching and Probable Mortality Severe in the Reef (> 50% of Corals)*
(8) **Blanqueamiento y Mortalidad casi completa** *Bleaching and Near Complete Mortality*	**Blanqueamiento y Probable Mortalidad casi completa del Arrecife (> 80% de los Corales)** *Bleaching and Probable Near Complete Mortality in the Reef (> 80% of Corals)*

Figura 7 Caracterización de los niveles de estrés Fuente: SIMAR/CONABIO

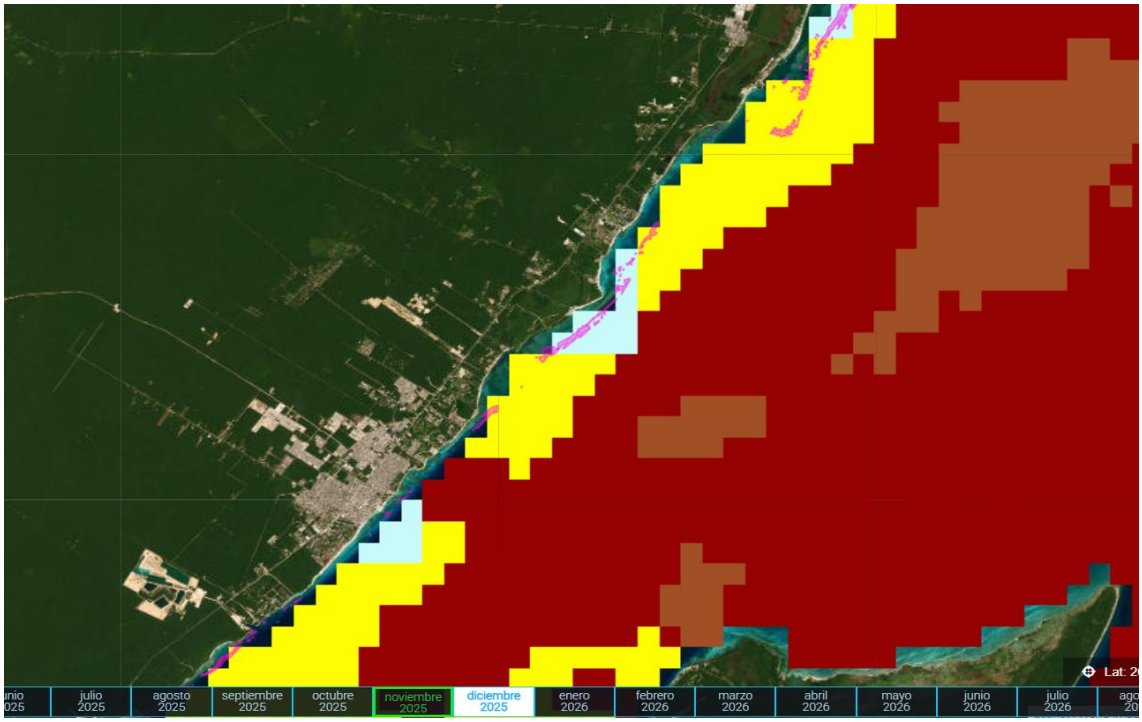


Figura 8 Niveles de estrés de los corales en la zona de estudio del mes de noviembre de 2025. Fuente: SIMAR/CONABIO

Como se puede observar en la figura anterior, la costa correspondiente a la playa de Mayakobá se encuentra rondando el nivel 1 y 2, con zonas más alejadas en las que hay blanqueamiento y probabilidad de muerte frente el aumento de temperatura, acción

que favorece a este fenómeno, habiendo aumentado su riesgo desde el año pasado varios niveles.

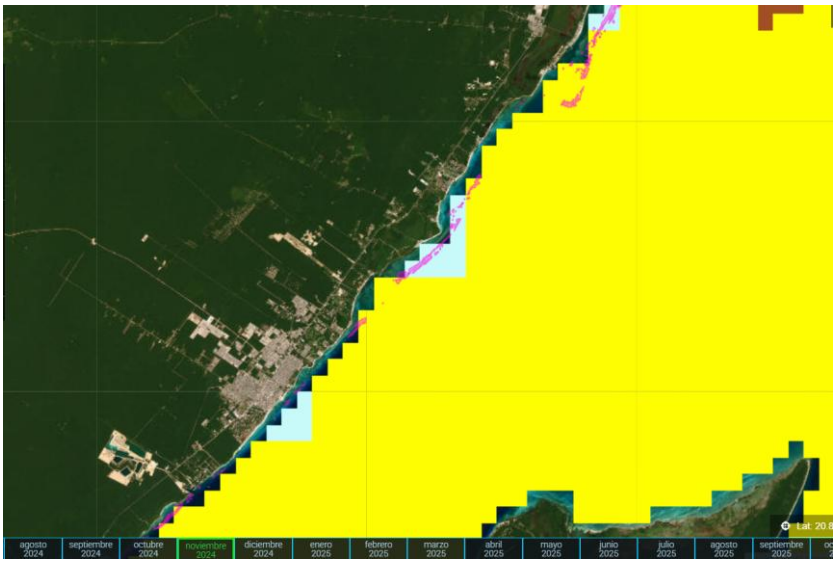


Figura 9 Niveles de estrés de los corales en la zona de estudio del mes de noviembre de 2024. Fuente: SIMAR/CONABIO

Esto afecta también a la dinámica costera, ya que los arrecifes actúan como una barrera contra la energía del oleaje natural, por lo que su deterioro y pérdida hace que llegue más energía y, por tanto, se puede producir recesión en la playa.

Por otro lado, hay una denuncia global del estado del arrecife, exigiendo que se implante alguna medida correctora para frenar y regenerar lo perdido.

Figura 10 Denuncia global del estado de los arrecifes de coral. Fuente: Internet

Por tanto, ante el aumento de la temperatura y su afección a los arrecifes de coral, se evidencia la necesidad de una actuación costera que promueva su regeneración, además de proteger la línea de costa que también se ve afectada, ya que al disminuir los corales se aumenta el riesgo de regresión de la línea de playa al perder barreras naturales que la estabilicen.

A través de un estudio previo realizado por imágenes satelitales de Google Earth, se ha podido observar que se han tomado medidas de protección únicamente para frenar la erosión que la degradación de los corales puede producir al disminuir la protección que estos aportan a la costa. Estas medidas constan de la colocación de geotextiles rellenos (de hormigón o arena) a lo largo de la línea de playa, los cuales hacen de barrera reduciendo la energía del oleaje que llega a la playa.

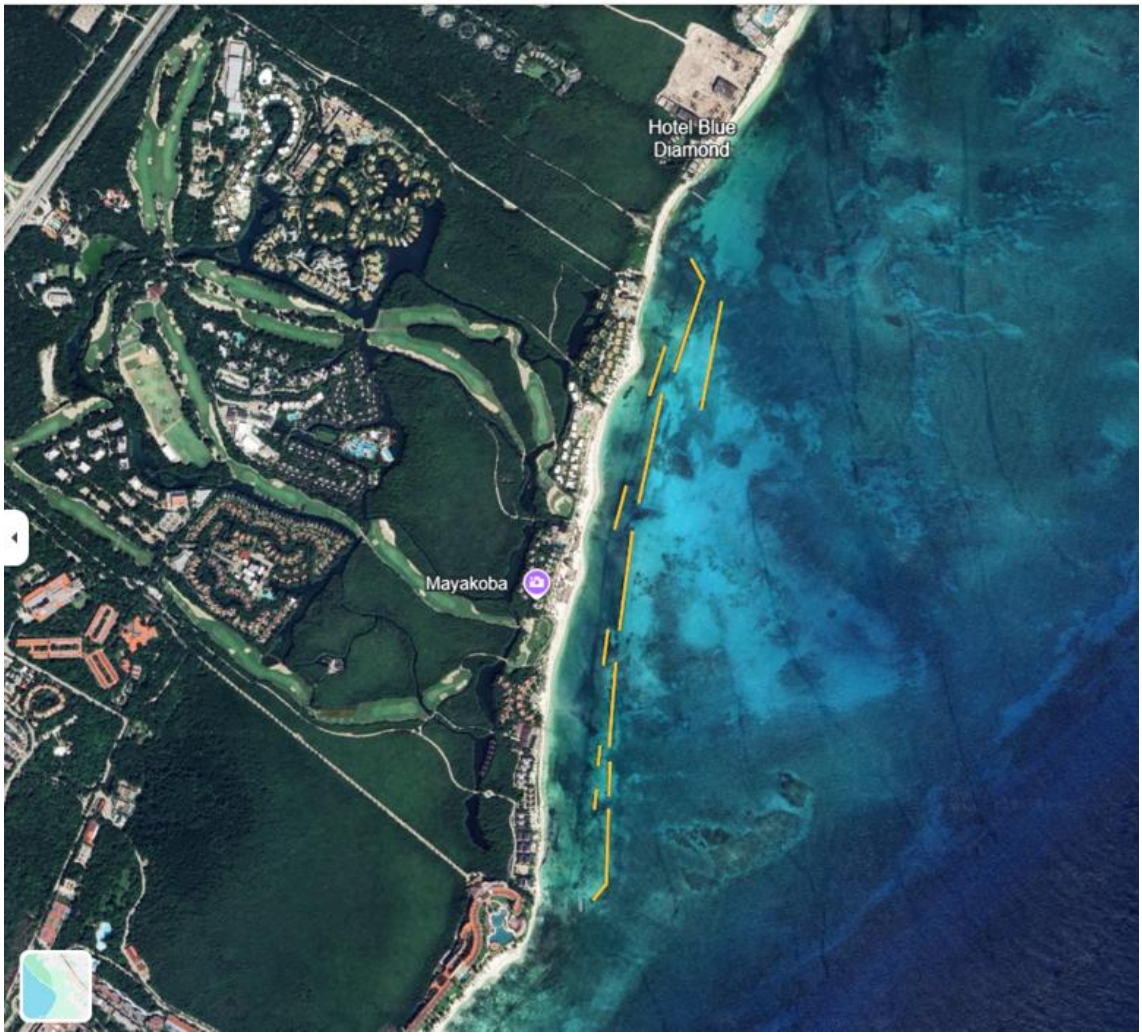


Figura 11 Geotextiles en la zona de la playa de Mayakobá. Fuente: Google Earth

Estas estructuras son geotextiles permeables de alta resistencia rellenos, por lo general y siendo que es una zona con bastantes canteras de roca caliza, por arena, los cuales se colocan en el fondo marino y hacen de estructura costera.

Aunque son baratos y fáciles de implantar, es una opción temporal, ya que el geotextil se degrada y es muy sensible a la radiación UV e inclusa actos de vandalismo, ya que es fácil de cortar y perder toda la arena de su interior, dejando de realizar su función protectora.

Por ello y porque es una medida protectora que actúa en la consecuencia (Pérdida de sedimentos en la playa) en vez de en el problema (Degradación del arrecife) se evidencia la necesidad de una actuación duradera que restaure de la máxima forma posible las condiciones de dinámica costera en las que se encontraba antes la playa de Mayakobá.

4. FUENTE DE DATOS

Para poder realizar la caracterización de la costa y las condiciones a las que se van a someter las alternativas, se debe definir las fuentes de obtención de datos, sobre todo para el clima marítimo, oleaje, batimetría y características geotécnicas y geológicas del suelo.

Para el clima marítimo y el oleaje se hace uso de dos fuentes principales:

- Datos de la Administración Nacional y Atmosférica de EE-UU (NOAA), del modelo *Wavewatch III model* (WW3) en aguas profundas.
- Servicio Mareográfico Nacional de México, del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para los datos del nivel del mar y viento en un mareógrafo cercano a la zona de estudio (https://www.geofisica.unam.mx/)
- Se hace uso también de los datos publicados por el IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/) para tener una estimación del cambio climático y sus efectos en el clima marítimo y oleaje.
- La batimetría final se obtiene de la web GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans: https://www.gebco.net/) de la cual se obtiene una capa ráster de la cual mediante la programación de un código se consiguen las líneas batimétricas de la zona de la playa de Mayakobá.
- La geología se ha conseguido del servicio Geológico Méxicano, con datos actualizados de día 28 de agosto de 2025

También se hace uso de herramientas generales como Google Earth https://www.google.es/intl/es/earth/index.html y el software QGIS y MATLAB para programar histogramas estadísticos y la representación de datos obtenidos en bruto para el clima marítimo y la batimetría.

5. REFERENCIAS

- CONABIO. (2025). *Sistema de Información y Análisis Marino Costero (SIMAR)*. https://simar.conabio.gob.mx/
- Infobae. (2025, 10 de diciembre). *El Caribe enfrenta la mayor degradación de arrecifes de su historia: causas, consecuencias y las claves de la recuperación*.https://www.infobae.com/america/medio-ambiente/2025/12/10/el-caribe-enfrenta-la-mayor-degradacion-de-arrecifes-de-su-historia-causas-consecuencias-y-las-claves-de-la-recuperacion/
- MAR Fund. (2025). *Sistema Arrecifal Mesoamericano*. https://marfund.org/es/arrecife-mesoamericano/

ANEJO 4: BATIMETRÍA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 104
2. BATIMETRÍA 104
3. SISTEMA ARRECIFAL MESOAMERICANO 110
4. REFERENCIAS 112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Carta batimétrica número 6. Fuente: INEGI 105
Figura 2 Carta batimétrica número 6 ampliada en la zona de estudio. Fuente: INEGI 105
Figura 3 Ubicación de los cortes de terreno hecho en Google Earth. Fuente: Elaboración propia 106
Figura 4 Cortes de terreno. Fuente: Google Earth 107
Figura 5 Delimitación del área para obtener la batimetría en GEBCO. Fuente: Elaboración propia 107
Figura 6 Batimetría general. Fuente: Elaboración propia 108
Figura 7 Batimetría de la zona en QGIS. Fuente: Elaboración propia 108
Figura 8 Batimetría de la zona en QGIS. Fuente: Elaboración propia 109
Figura 9 Canal de Cozumel. Fuente: Chávez, G et al (2003) 110
Figura 10 Sistema Arrecifal Mesoamericano. Fuente: SIMAR 110
Figura 11 Identificación de arrecifes en la zona de la playa de Mayakobá. Fuente: Elaboración propia 111

1. INTRODUCCIÓN

El presente anejo tiene como objetivo caracterizar la batimetría de la zona de estudio correspondiente a la playa de Mayakobá, en la Riviera Maya (México), a partir de diferentes fuentes de información disponibles. Para ello, se realiza un análisis combinado de cartografía batimétrica oficial, perfiles de terreno obtenidos mediante herramientas de visualización geoespacial y modelos digitales del fondo marino procedentes de bases de datos globales.

A través de este análisis se pretende identificar las principales características morfológicas del fondo marino, tales como pendientes dominantes, plataformas someras asociadas al sistema arrecifal y zonas de mayor profundidad, con el fin de disponer de una base sólida que permita evaluar las alternativas de protección costera propuestas y sus implicaciones constructivas. De este modo, la batimetría se integra como un elemento clave en la toma de decisiones para el diseño y la correcta implantación de las soluciones planteadas en el presente estudio.

2. BATIMETRÍA

Con la batimetría se permite conocer el relieve, la forma y la profundidad del fondo marino, es por ello por lo que es fundamental para diseñar una infraestructura marítima, siendo la forma de caracterizar el fondo en el cual se sustentará la infraestructura construida.

Para obtener una primera valoración de la batimetría que presenta la zona de estudio, se hace uso del Instituto Nacional de Estadística y Geografía e México, (INEGI), el cual tiene a libre disposición cartas batimétricas de toda la costa que rodea a México.

La carta correspondiente a la costa de la playa de Mayakobá es la hoja número 6:

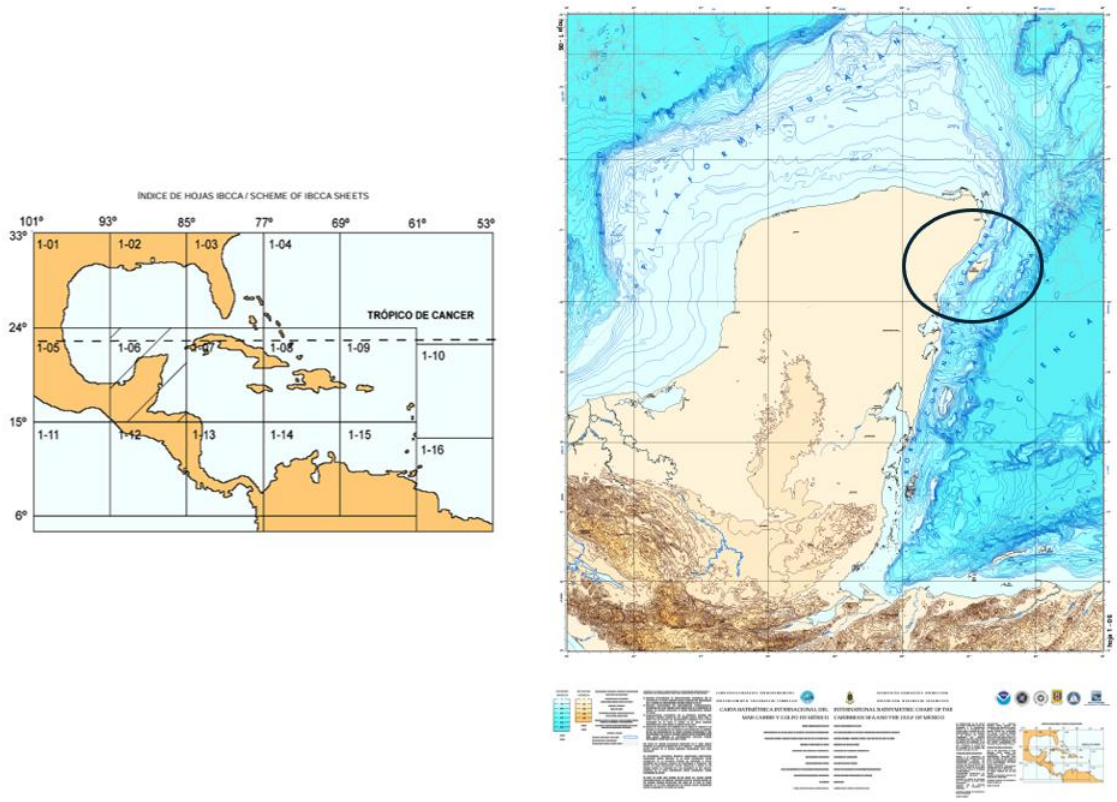


Figura 1 Carta batimétrica número 6. Fuente: INEGI

Y aumentando a la zona de estudio se muestra la información correspondiente a la siguiente figura:

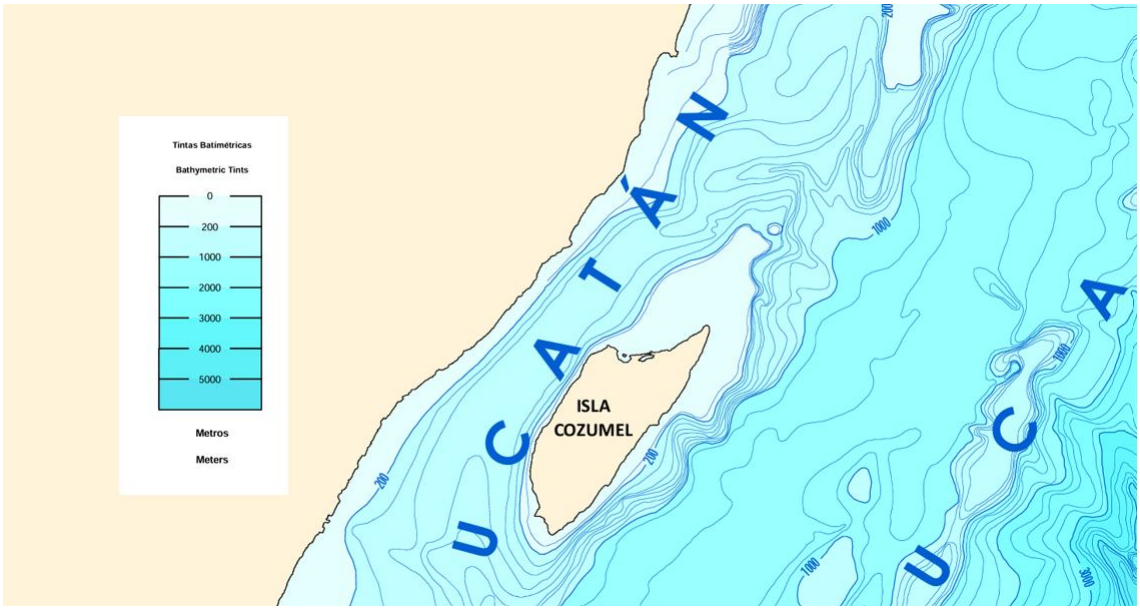


Figura 2 Carta batimétrica número 6 ampliada en la zona de estudio. Fuente: INEGI

Ya que la carta batimétrica empieza con líneas de 200 metros de profundidad, para tener una representación del perfil del terreno más cercana a la costa, se hacen 5 cortes de terreno en la zona de la playa de Mayakobá, con la herramienta de Google Earth:

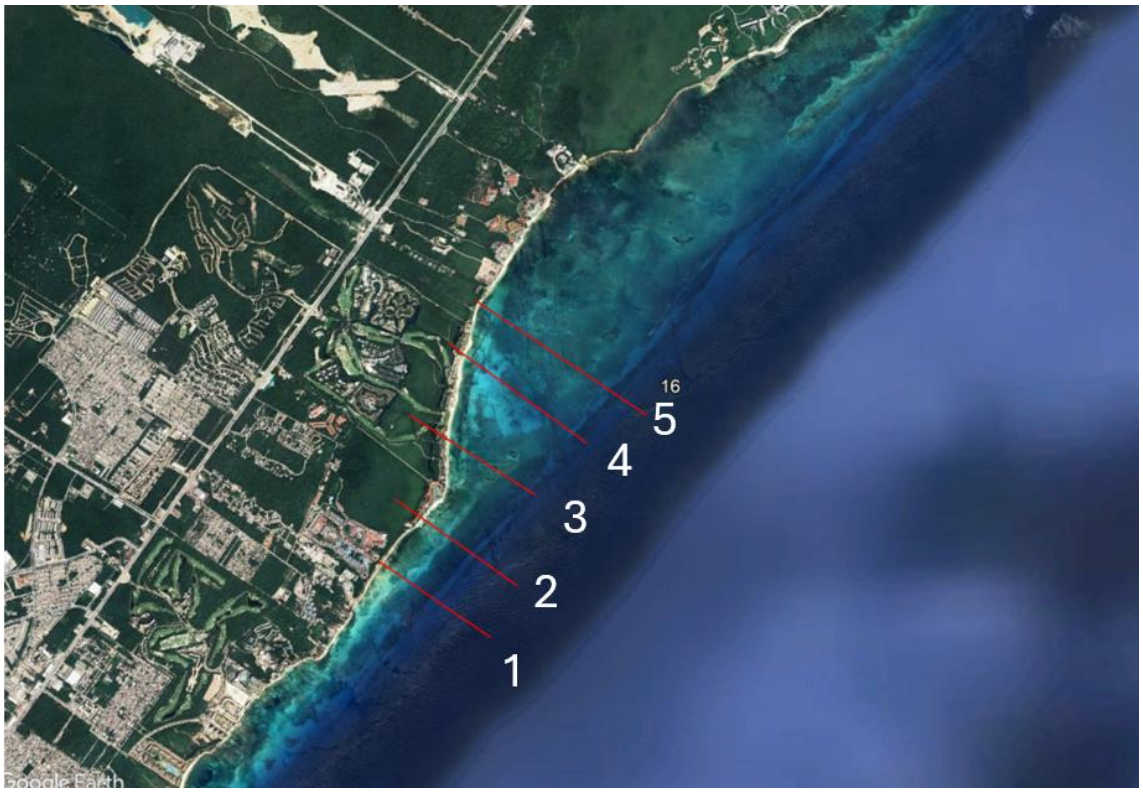


Figura 3 Ubicación de los cortes de terreno hecho en Google Earth. Fuente: Elaboración propia

Los perfiles obtenidos son los siguientes:

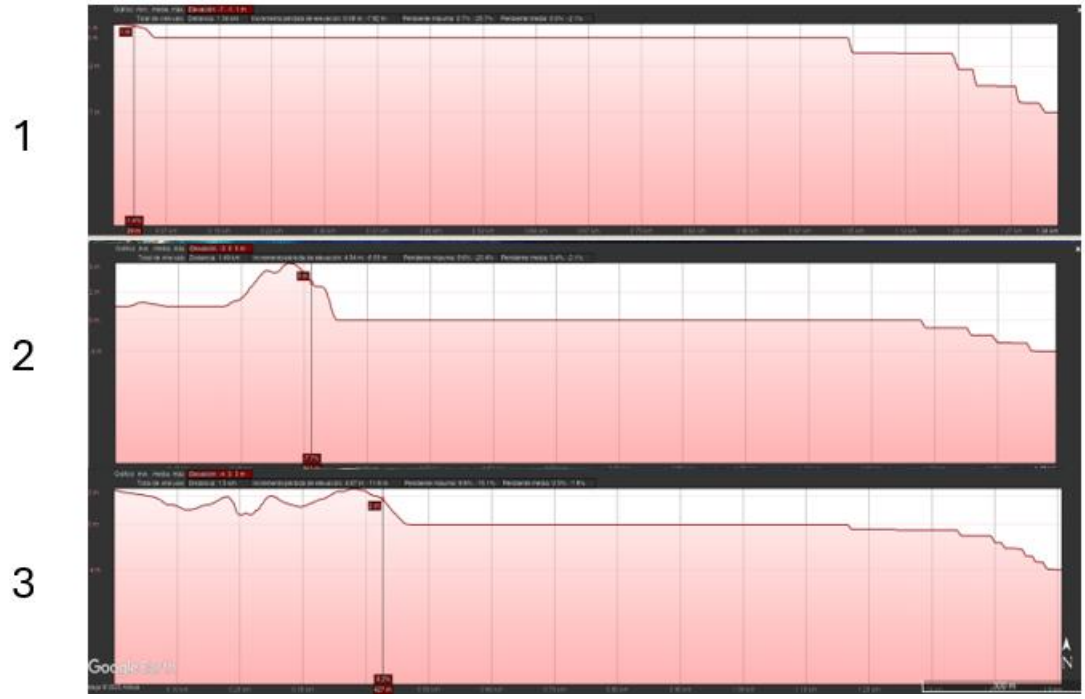


Figura 4 Cortes de terreno. Fuente: Google Earth

Como se puede observar en la Figura 4, la costa que rodea a la playa de Mayakobá presenta un perfil de playa emergida empinado, aunque luego se mantiene con una pendiente próxima a cero en la zona con arrecifes de coral, hasta un kilómetro aproximado mar adentro. A partir de ahí, la pendiente aumenta considerablemente.

Por otro lado, para obtener una batimetría más detallada en la zona próxima a la costa, se hace uso de la web de GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans), la cual da una capa ráster en la que se plasma la profundidad de la zona deseada.

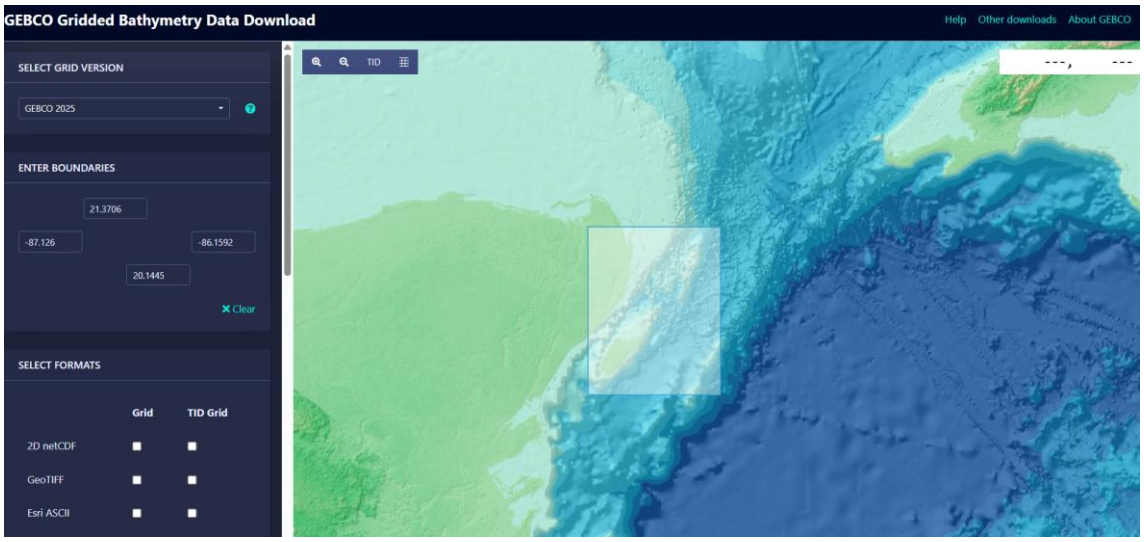


Figura 5 Delimitación del área para obtener la batimetría en GEBCO. Fuente: Elaboración propia

Una vez se delimita el área, se exporta en formato ".tif" y se obtiene mediante un código en Matlab un archivo ".dxf" con líneas batimétricas cada 5 metros de profundidad obtenidas de la capa ráster, quedando el siguiente mapa batimétrico:

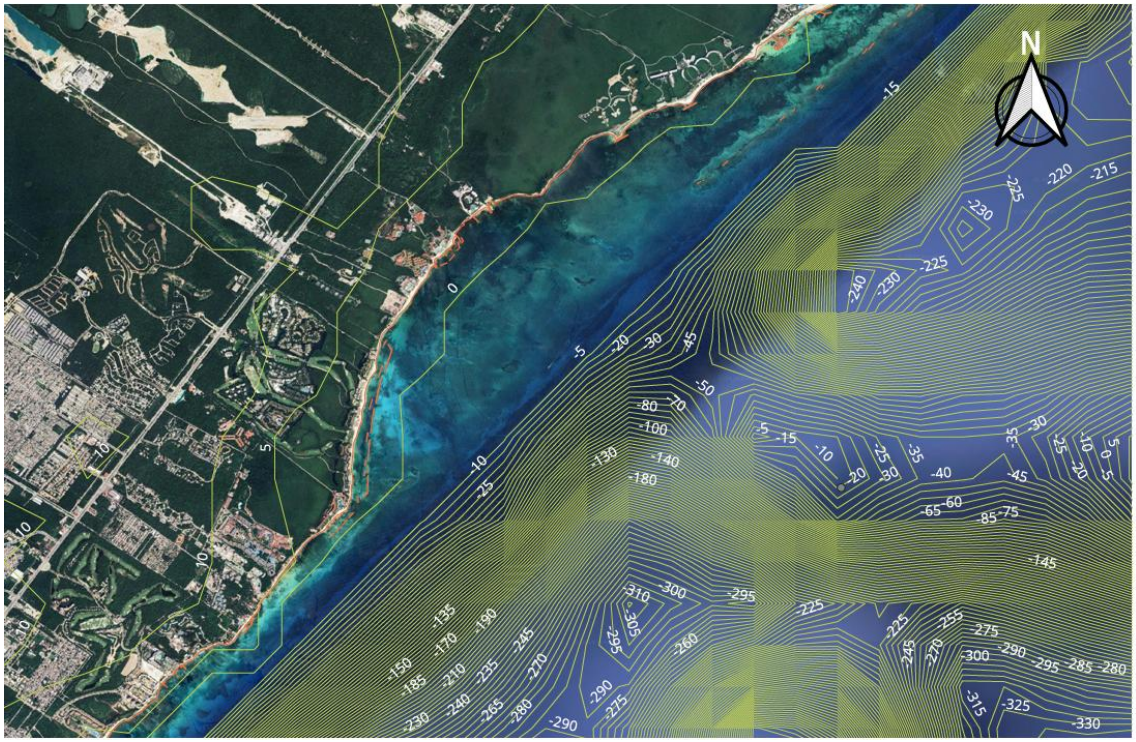


Figura 6 Batimetría general. Fuente: Elaboración propia

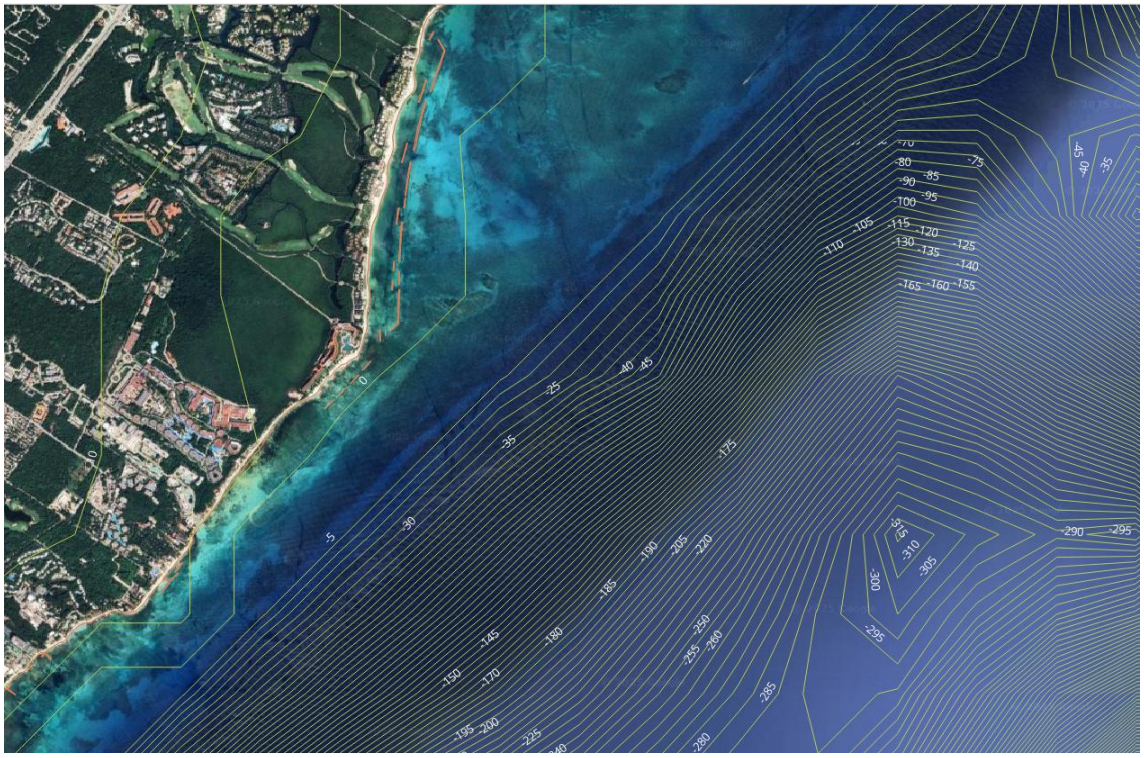


Figura 7 Batimetría de la zona en QGIS. Fuente: Elaboración propia

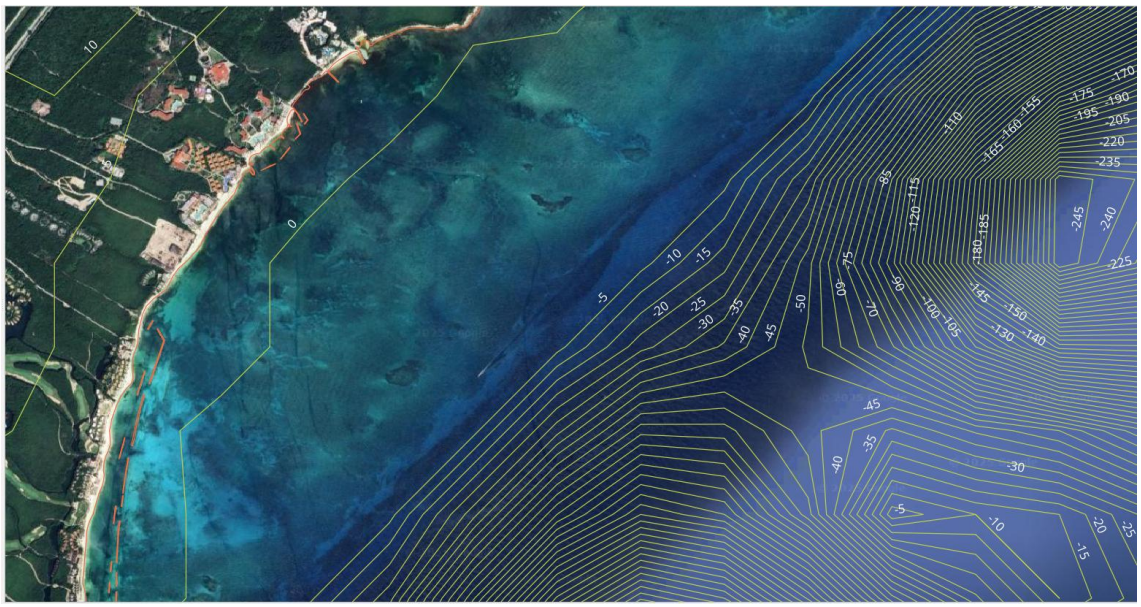


Figura 8 Batimetría de la zona en QGIS. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 7, la batimetría cuadra con lo detallado en los perfiles obtenidos en Google Earth y la carta batimétrica de INEGI, teniendo el perfil del fondo marino una pendiente próxima a cero cerca de la playa y al sobrepasar el kilómetro en horizontal en la playa sumergida se produce un cambio busco de pendiente, alcanzando los 200 metros de profundidad a 2 km mar adentro desde la orilla de la playa aproximadamente.

Por otro lado, se puede apreciar de la existencia de cañones submarinos en la zona de estudio, ya que hay dos focos en los que las líneas batimétricas descienden con mayor pendiente.

Esto es muy importante a la hora de definir las alternativas, ya que puede afectar a la hora de puesta en obra del dique debido a que si se encuentra demasiado cerca puede ser que las piezas no se coloquen en su posición predefinida por desplazarse rodando a causa de la diferencia de pendiente.

Aunque cerca de la zona de actuación hay puntos en los que las líneas batimétricas caen de forma pronunciada, el desnivel general y la alta profundidad se debe al canal de Cozumel, el cual es un estrecho marino profundo ubicado entre la isla de Cozumel y la península de Yucatán por el cual circula una parte de la corriente de Yucatán.

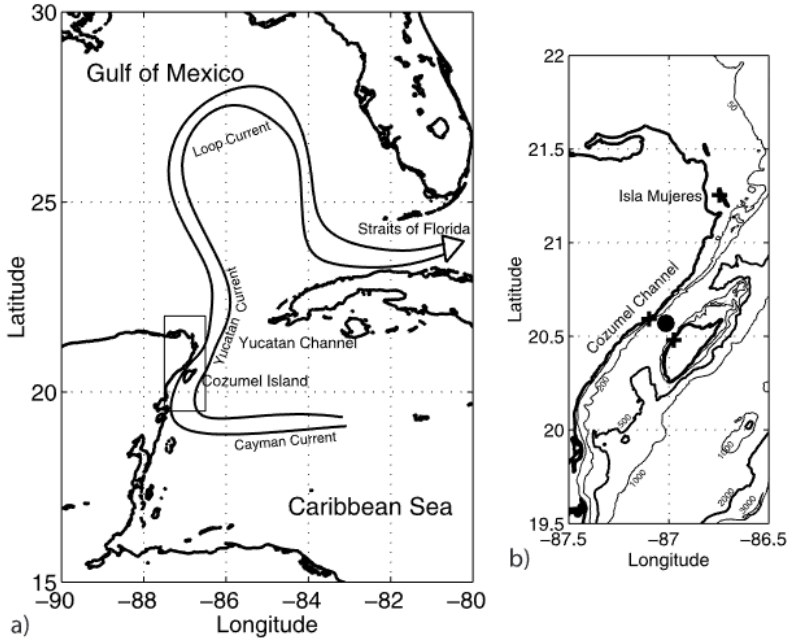


Figure 1. Maps of the study area indicating the location of places and currents discussed in the text. (a) The sketch of two streamlines that give a characteristic path of the flow through the region. (b) Details of the Cozumel Channel area. Depth contours at 50, 200, 500, 1000, 2000, and 3000 are indicated. Also shown are the locations of the ADCP (large dot) and bottom mounted pressure sensors (large +) used in this study.

Figura 9 Canal de Cozumel. Fuente: Chávez, G et al (2003)

3. SISTEMA ARRECIFAL MESOAMERICANO

El fondo marino se encuentra caracterizado por la presencia del Sistema Arrecifal Mesoamericano, el cual se ha lcalizado de forma aproximada en la zona de la playa de Mayakobá mediante la información disponible en la web de SIMAR y también mediante una inspección visual de la zona con la herramienta de Google Earth.

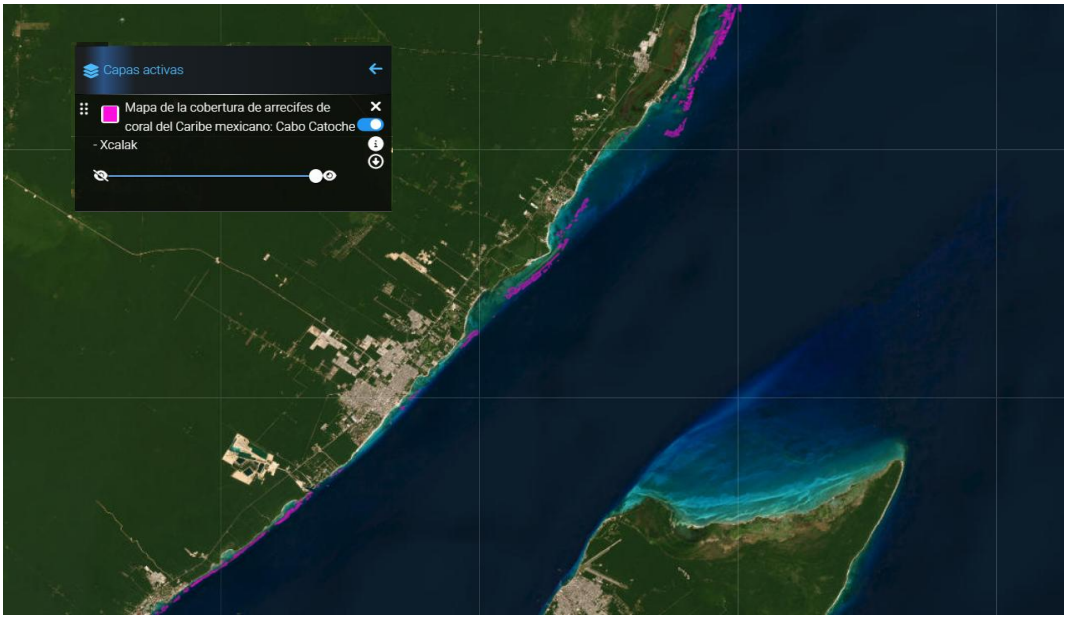


Figura 10 Sistema Arrecifal Mesoamericano. Fuente: SIMAR

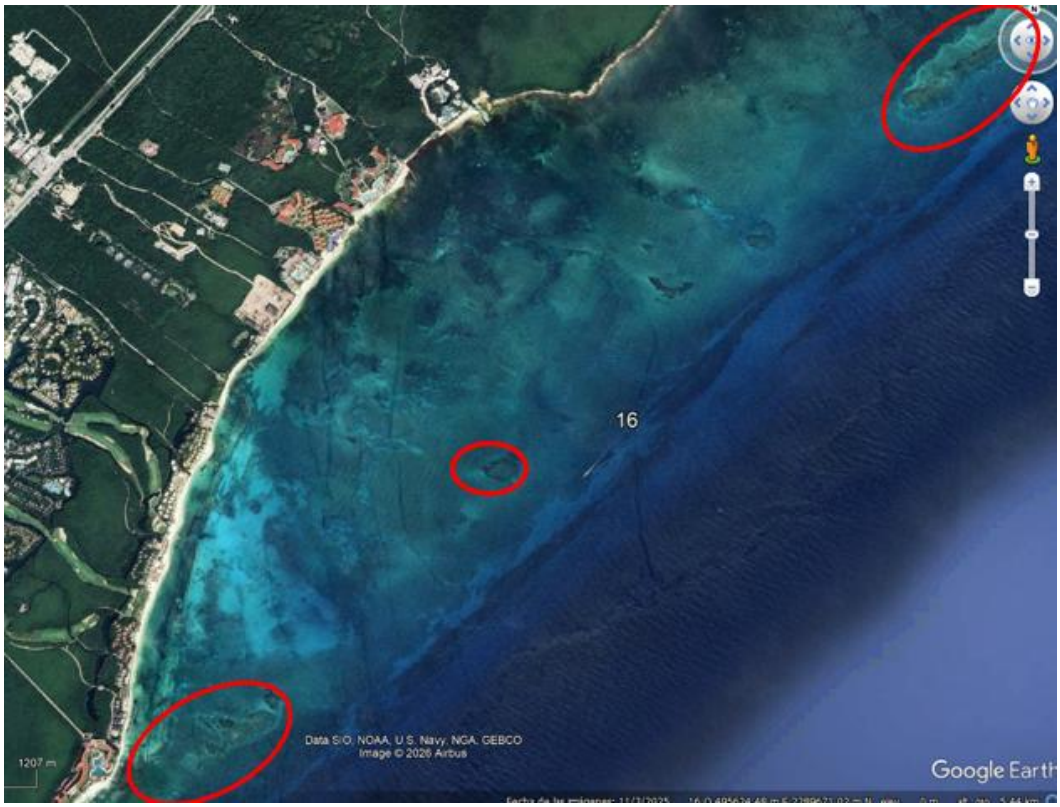


Figura 11 Identificación de arrecifes en la zona de la playa de Mayakobá. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura anterior, y viendo la trayectoria del arrecife de forma global, la zona de la playa de Mayakobá el arrecife se encuentra interrumpido a causa de la deterioración de este, por lo que se evidencia la necesidad de repararlo para que vuelva a tener una forma continua.

4. REFERENCIAS

- Chávez, G., Candela, J., & Ochoa, J. (2003). *Subinertial flows and transports in Cozumel Channel*. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 108*(C3), 3037. https://doi.org/10.1029/2002JC001456
- CONABIO. (2025.). *Sistema de Información y Análisis Marino Costero (SIMAR)*. https://simar.conabio.gob.mx/
- GEBCO Compilation Group. (2025). *General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)*. https://www.gebco.net/
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2025). *Cartas batimétricas de México*. https://www.inegi.org.mx/

ANEJO 5: ESTUDIO GEOTÉCNICO, GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 115
2. GEOLOGÍA 115
3. GEOTÉCNIA 119
4. GEOMORFOLOGÍA 119
5. REFERENCIAS 121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa geológico correspondiente a la era. Fuente: Servicio Geológico Méxicano,2025 116
Figura 2 Mapa geológico correspondiente al periodo. Fuente: Servicio Geológico Méxicano,2025 116
Figura 3 Mapa geológico correspondiente a la litología. Fuente: Servicio Geológico Méxicano,2025 117
Figura 4 Mapa geológico correspondiente al tipo de roca. Fuente: Servicio Geológico Méxicano,2025 117
Figura 5 Carta geológico-minera F16-11, en verde la zona a estudio. Fuente: Oniver,2005 118
Figura 6 Columna estratigráfica. Fuente: Oniver,2005 118

1. INTRODUCCIÓN

El presente Anejo de Estudio Geotécnico, Geológico y Morfodinámico tiene por objeto caracterizar las condiciones del medio físico en el ámbito de actuación situado en la zona costera de Mayakobá, en el municipio de Solidaridad (Quintana Roo, México).

El estudio integra el análisis de la geología regional y local, la geomorfología del entorno costero, las condiciones geotécnicas del

Asimismo, el estudio morfodinámico permite comprender la evolución y el comportamiento actual de la línea de costa, los mecanismos de transporte sedimentario.

En conjunto, el presente anejo constituye un documento de referencia para la correcta comprensión del medio físico, sirviendo de soporte técnico para la toma de decisiones y para el desarrollo seguro y sostenible de las actuaciones previstas en la zona de Mayakobá.

2. GEOLOGÍA

Desde la Web del Gobierno de México, se accede al Servicio Geológico Mexicano, de donde se descarga una carpeta zip para abrir en QGIS con los datos geológicos correspondientes al país actualizados el 28 de agosto de 2025.

Se obtienen 4 mapas distintos con la siguiente información.

1. La era correspondiente
2. El período
3. La litología
4. El tipo de roca

La playa de Mayakobá se encuentra en una zona formada por materiales geológicos relativamente recientes, ya que toda el área pertenece al Cenozoico, lo que indica que se trata de una región joven desde el punto de vista geológico.

La de playa actual está compuesta por depósitos del Cuaternario y rocas sedimentarias, es decir, sedimentos muy recientes que dan a suponer que todos los sedimentos se obtienen por el mar, ya que no hay afluentes cerca del área de estudio.

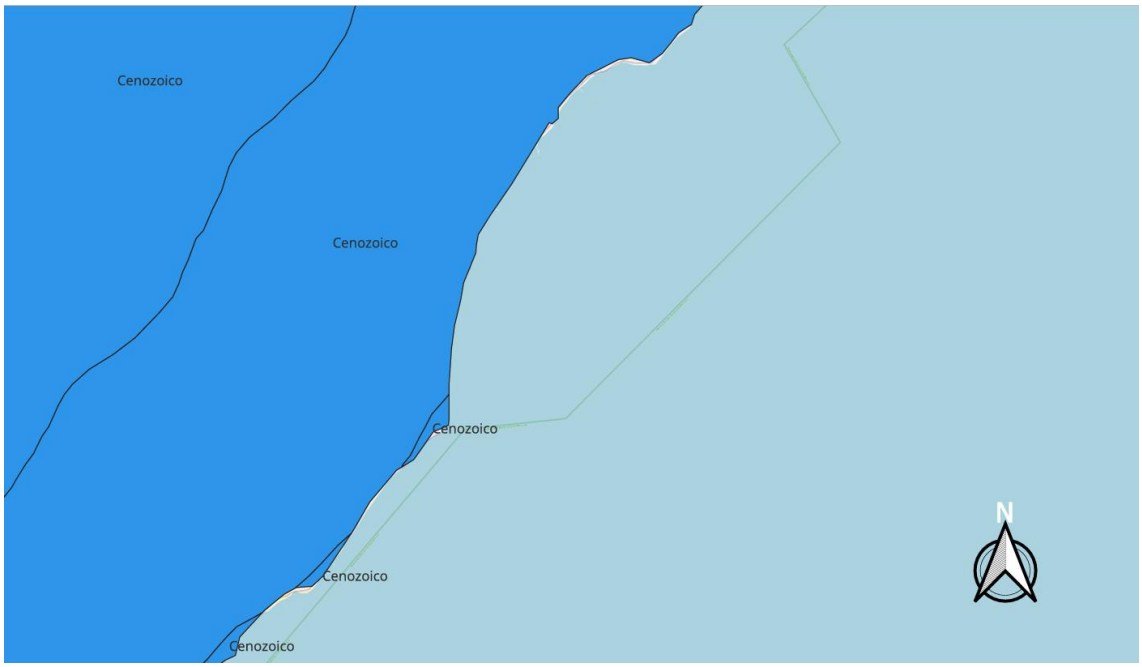


Figura 1 Mapa geológico correspondiente a la era. Fuente: Servicio Geológico Méxicano,2025

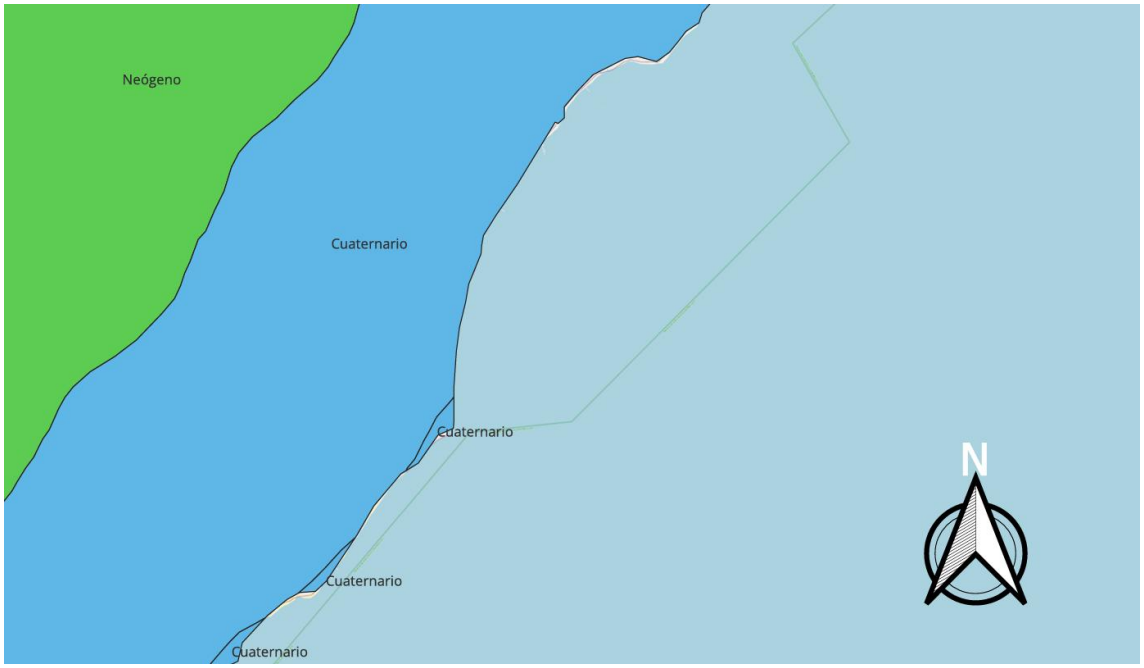


Figura 2 Mapa geológico correspondiente al periodo. Fuente: Servicio Geológico Méxicano,2025

Figura 3 Mapa geológico correspondiente a la litología. Fuente: Servicio Geológico Méxicano,2025

Por otro lado, la litología de la zona de la playa de Mayakobá es de tipo arenisca, lo que indica que las rocas sedimentarias se encuentran mayoritariamente formadas por granos de arena. Esto es muy habitual en ambientes costeros, dada a la influencia del oleaje y viento.

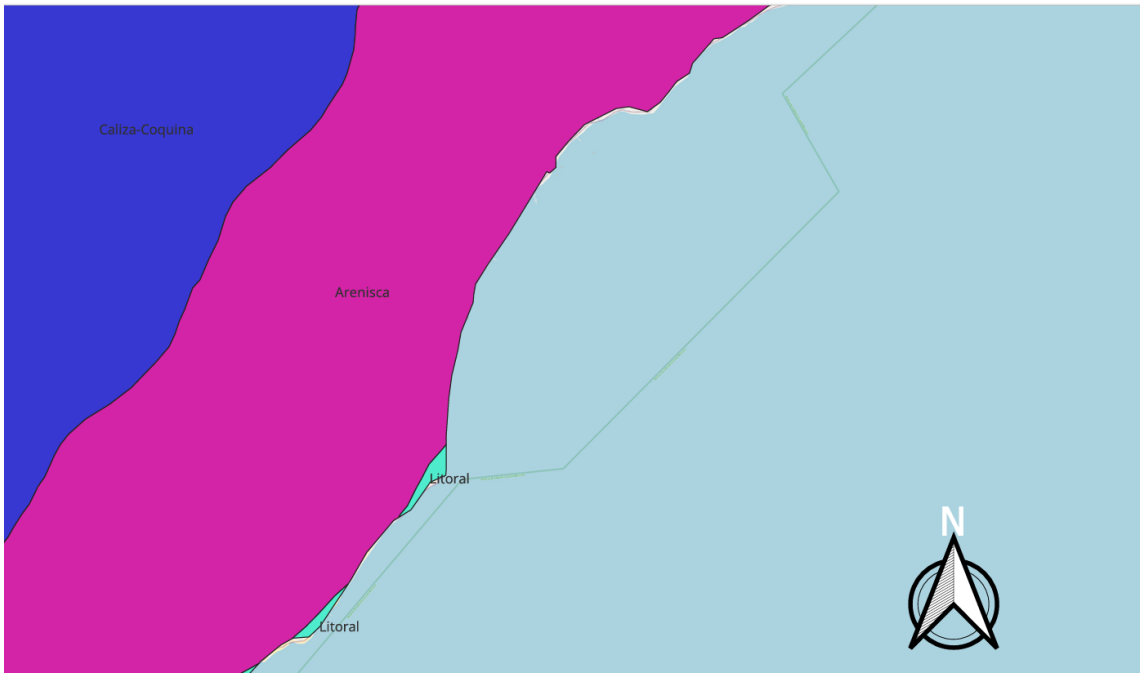


Figura 4 Mapa geológico correspondiente al tipo de roca. Fuente: Servicio Geológico Méxicano,2025

A continuación, se muestra la carta geológico-minera F16-11 y la columna estratigráfica obtenida:

Figura 5 Carta geológico-minera F16-11, en verde la zona a estudio. Fuente: Oniver,2005

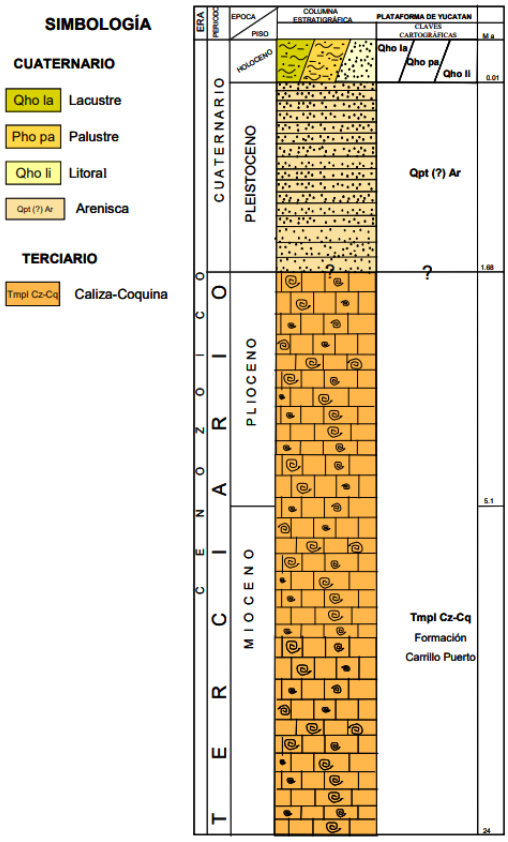


Figura 6 Columna estratigráfica. Fuente: Oniver,2005

3. GEOTÉCNIA

La geotécnia es la rama de la geología que se encarga de la interacción del terreno entre las construcciones, estudiando las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los mismos.

A partir de Augusto, 2010 se obtiene información sobre la caracterización geotécnica de la zona de estudio, ya que no se han encontrado mapas disponibles ni cartas que muestren específicamente la geotécnia.

Las conclusiones que se han obtenido son las siguientes: el terreno presenta una gran heterogeneidad vertical y lateral, típica de medios carbonatados kársticos.

La roca caliza puede mostrar buenos valores de resistencia cuando está sana y masiva, pero alterna con zonas muy alteradas, fracturadas o cavitadas, lo que implica riesgos de asientos diferenciales y pérdida de capacidad portante local.

El terreno presenta un nivel freático es somero, con circulación predominantemente subterránea, condicionada por la elevada permeabilidad de las calizas y la presencia de conductos kársticos. Esta situación favorece la interacción directa entre el agua marina y el acuífero, especialmente en zonas cercanas a la costa, lo que debe tenerse en cuenta en el diseño de excavaciones, cimentaciones y estructuras costeras.

En conjunto, la geotecnia de la zona de Mayakobá está dominada por un sustrato calizo competente pero muy kárstico, cubierto localmente por suelos blandos cuaternarios de escasa capacidad portante.

4. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es la rama que combina la geografía física con la geología, la cual estudia las formas del relieve de la superficie terrestre.

De forma general, la península de Yucatán pertenece a una planicie kárstica costera, desarrollada sobre rocas calizas terciarias y cuaternarias, con altitudes generalmente inferiores a 10–15 m sobre el nivel medio del mar**,** y pendientes muy suaves hacia el mar Caribe.

De acuerdo con el estudio morfodinámico y geomorfológico de la costa noreste de Quintana Roo, el tramo comprendido entre Playa del Carmen y Punta Maromas (donde se sitúa Mayakobá) presenta una línea de costa predominantemente rectilínea, con playas abiertas y algunos sectores de playas encajadas o de bolsillo

Con los siguientes rasgos geomorfológicas principales:

- Playas arenosas de origen carbonatado, compuestas por calcarenitas bioclásticas

- Ausencia de aporte fluvial, debido a la inexistencia de drenaje superficial
- Desarrollo de barras submarinas paralelas a la costa
- Presencia de lagunas arrecifales y arrecifes coralinos discontinuos frente a la línea de playa, que influyen en la dinámica litoral

También, se define como sistema kárstico, lo cual explica la alta permeabilidad del terreno, la escasa escorrentía superficial y la conexión directa entre la zona terrestre y el medio marino, con un equilibrio dinámico alternando los procesos de erosión con una recuperación sedimentaria.

5. REFERENCIAS

- Aguayo, J. E., Nolasco, M. M., & colaboradores. (1980). *Procesos sedimentológicos del área Tulum–Cancún–Isla Mujeres*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Butterlin, J., Bonet, F., & colaboradores. (1959). *Estudios paleontológicos y estratigráficos de la Península de Yucatán*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chávez, G., Candela, J., & Ochoa, J. (2003). Subinertial flows and transports in Cozumel Channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 108*(C2), 3037. https://doi.org/10.1029/2002JC001456
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1984). *Carta geológica Cozumel F16-11, escala 1:250 000*. INEGI.
- López, R. E. (1973). *Geología de la Península de Yucatán*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ruiz-Martínez, G., Silva-Casarín, R., & Posada-Vanegas, G. (2013). Comparación morfodinámica de la costa noroeste del estado de Quintana Roo, México. *Tecnología y Ciencias del Agua, 4*(3), 47–65.
- Servicio Geológico Mexicano. (2026). *Información geológica y cartográfica de la Península de Yucatán*. Secretaría de Economía. https://www.gob.mx/sgm
- Silva, R., Ruiz-Martínez, G., & Posada-Vanegas, G. (2008). Reanálisis del clima marítimo para las costas mexicanas. *Ingeniería Hidráulica en México, 23*(4), 5–20.

ANEJO 6: CLIMA MARÍTIMO

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 125
2. OBTENCIÓN DE DATOS 125
3. NIVEL DEL MAR 126
   3.1. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO 127
4. VIENTO 130
5. CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE 132
   5.1. ESTADÍSTICOS DEL OLEAJE 132
      5.1.1. ALTURA DE OLA 132
      5.1.1. PERIODO 133
      5.1.1. INTERACCIÓN ALTURA DE OLA Y PERIODO 134
   5.2. RÉGIMEN MEDIO ESCALAR 135
   5.3. RÉGIMEN EXTREMAL DEL OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS 137
6. CONCLUSIÓN DE ESCENARIOS REPRESENTATIVOS DE OLEAJE PARA EL ESTUDIO 139
7. CLIMATOLOGÍA 139
   7.1. TEMPERATURA 139
   7.2. LLUVIA 140
   7.3. CONCLUSIÓN 141
8. REFERENCIAS 142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Localización del punto de toma de datos de oleaje en el área de estudio. Fuente: Escudero (2026). 125
Figura 2 Esquema de una estación meteorológica. Fuente: Trujillo 2022 126
Figura 3 Esquema datum del mareógrafo de Puerto Morelos. Fuente: Elaboración propia 126
Figura 4 Nivel del mar en Puerto Morelos. Fuente: Elaboración propia 127
Figura 5 Predicción del nivel del mar. Fuente: IPCC 128
Figura 6 Incremento del nivel del mar desde 1999 hasta 2024. Fuente: Copernicus Marine Service 128
Figura 7 Punto de obtención de los datos del escenario SSP2-4.5 (en rojo) y ubicación del tramo de estudio (en rosa). Fuente: IPCC Sea Level Projection Tool. 129
Figura 8 Gráfica del escenario SSP5-8.5 más próxima al tramo de estudio. Fuente: Fuente: IPCC Sea Level Projection Tool. 130

Figura 9 Rosa del viento. Fuente: Elaboración propia 131
Figura 10 Viento en la costa de la playa de Mayakobá. Fuente: Elaboración propia .. 131
Figura 11 Rosa del oleaje y estadísticos de Hs direccionales 132
Figura 12 Direcciones del oleaje en la zona de obtención de datos. 132
Figura 13 Función de distribución e Histograma de Hs(m). 133
Figura 14 Probabilidad conjunta de Hs(m) con la dirección del oleaje. 133
Figura 15 Rosa del periodo de pico y estadísticos de Tp direccionales 134
Figura 16 Función de distribución e Histograma de Tp (s). 134
Figura 17 Función de distribución e Histograma de Tp (s). 135
Figura 18 Distribución Gumbel de máximos para Hs 136
Figura 19 Distribución Weibull de mínimos para Tp (s) 137
Figura 20 Distribución Gumbel de máximos para Hs (m) 138
Figura 21 Rosa del oleaje de tormenta 138
Figura 22 Área escogida para ver la predicción del aumento de la temperatura por el cambio climático. Fuente: IPCC 140
Figura 23 Evolución de la temperatura de la superficie del mar. Fuente: IPCC 140
Figura 24 Evolución de los días seguidos sin lluvia. Fuente: IPCC 141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Velocidad - Dirección media del viento en probabilidad. Fuente: Elaboración propia 130
Tabla 2 Escenarios de clima marítimo 139

1. INTRODUCCIÓN

En este anejo se busca caracterizar los parámetros de diseño que se asocian a la marea, viento y oleaje.

Estas variables son importantes ya que son las principales acciones a las que se va a ver sometida la infraestructura marítima definida, además de suponer las condiciones de operación y construcción de la misma.

Como clima marítimo se entiende las condiciones atmosféricas y oceanográficas que predominan en las costas, siendo definida por la ROM 0.3-91 como la descripción estadística de la variación en el dominio del tiempo de los Estados del Mar, en un emplazamiento dado (ROM 0.3-91).

Mediante el análisis de los datos obtenidos en la zona de estudio, se caracterizará la costa correspondiente a la playa de Mayakobá, empezando por una descripción y justificación de las fuentes de datos y la posterior descripción del nivel del mar, viento y oleaje en aguas profundas.

2. OBTENCIÓN DE DATOS

Los datos analizados en aguas profundas se obtuvieron a partir de la Administración Nacional y Atmosférica de EE-UU, denominada como *NOAA*, concretamente del *Wavewatch III model* (WW3), el cual es un modelo numérico espectral de oleaje usado para predecir y simular el estado del mar desarrollado por dicha administración.

El punto del que proceden dichos datos se sitúa en las coordenadas: 87°W 20.6667°N, a 2.5 km de la línea de costa y a una profundidad que supera los 50 metros.

Figura 1 Localización del punto de toma de datos de oleaje en el área de estudio. Fuente: Escudero (2026).

Por otro lado, para caracterizar el oleaje en aguas profundas se ha hecho uso del programa CAROL V1.0, el cual proporciona una estadística descriptiva de los datos y caracteriza el régimen medio y extremal de una variable. Todo ello a partir de la serie temporal proporcionada en el punto base descrito.

Además, para poder caracterizar la variación durante el año del nivel del mar y el viento se solicitan los datos de registro al servicio Mareográfico Nacional de México, de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), concretamente el Instituto de Geofísica.

Para ello hay que rellenar un documento y firmarlo, en el cual se indica el mareógrafo que se quiere y el periodo de tiempo deseado.

El punto más cercano a la playa de Mayakobá que se puede solicitar es el mareógrafo ubicado en Puerto Morelos.

3. NIVEL DEL MAR

Para caracterizar el nivel del mar se ha solicitado los datos del último año al servicio Mareográfico Nacional de México, el cual envía un fichero ".dat" con los valores de la medición por sensor tipo radar de la estación ubicada en Puerto Morelos.

El nivel de referencia es intrínseco a la estación e independiente del resto de estaciones, por lo que para poder analizar la variación del nivel del mar durante el año se hace la media y se resta a los datos registrados.

El valor medio que se considera como el nivel de referencia es 0.84 m sobre el cero local de la estación.

Figura 2 Esquema de una estación meteorológica. Fuente: Trujillo 2022

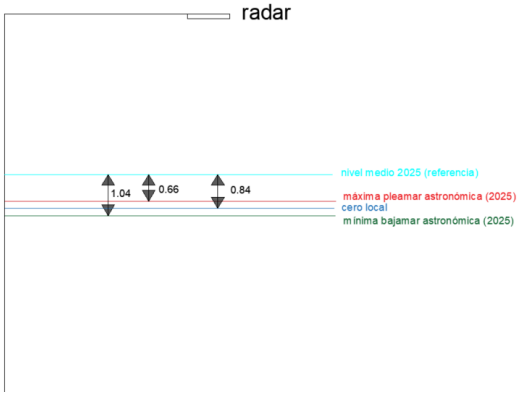


Figura 3 Esquema datum del mareógrafo de Puerto Morelos. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la serie temporal con la variación del nivel del mar respecto del nivel de referencia concretado durante el año 2025.

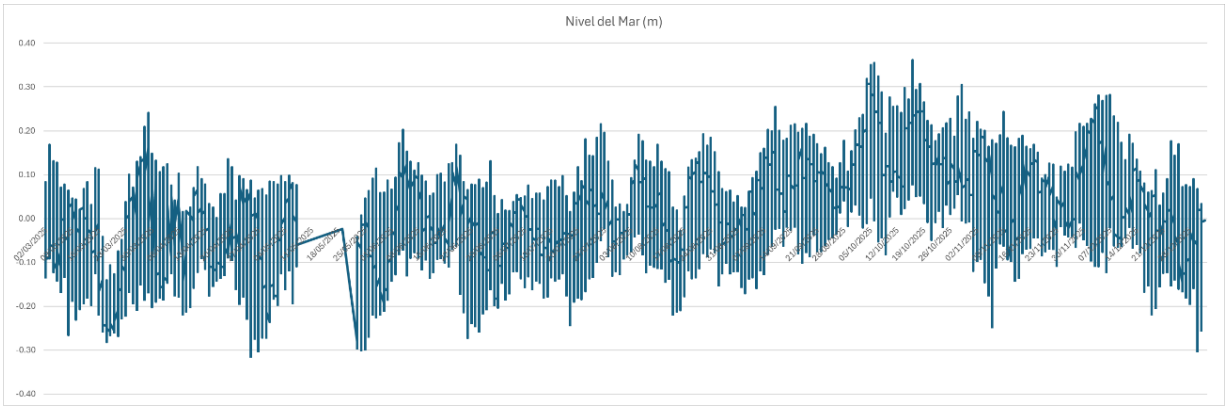


Figura 4 Nivel del mar en Puerto Morelos. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura anterior, el mes en el que menos oscilación hay es en mayo de 2025. Por otro lado, las máximas oscilaciones del nivel del mar se encuentran en saltos de 30 centímetros aproximadamente, tanto por encima como por debajo del nivel medio, siendo estas variaciones no muy elevadas.

Por otro lado, en el período de tiempo entre agosto y octubre hay un aumento del nivel del mar en comparación con el resto del año. Esto puede deberse a la sensibilidad de la zona a sufrir ciclones tropicales, lo que produce un aumento de las lluvias, vientos y posibles huracanes.

3.1. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Ante el efecto del cambio climático, se decide hacer una valoración de las predicciones a futuro para poder diseñar una infraestructura resiliente y duradera con los años.

El IPCC (*The Intergovernmental Panel on Climate Change*) tiene a libre disposición datos con mapas interactivos basados en el sexto informe de evaluación (AR6), en los cuales se representan los escenarios de trayectorias socioeconómicas compartidas.

Particularizando al área de estudio, se visualiza que se encuentra en una zona determinada como “high confidence of increase”, lo cual indica que hay bastante seguridad de que el nivel medio del mar aumente.

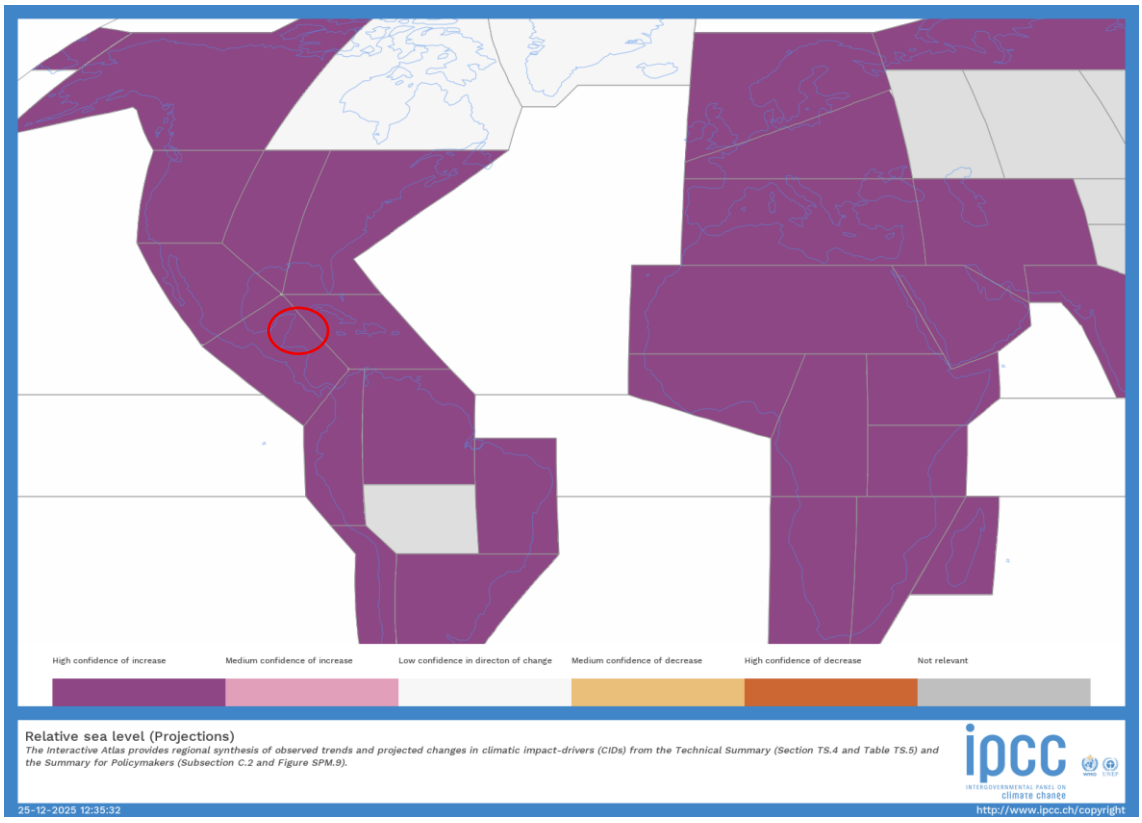
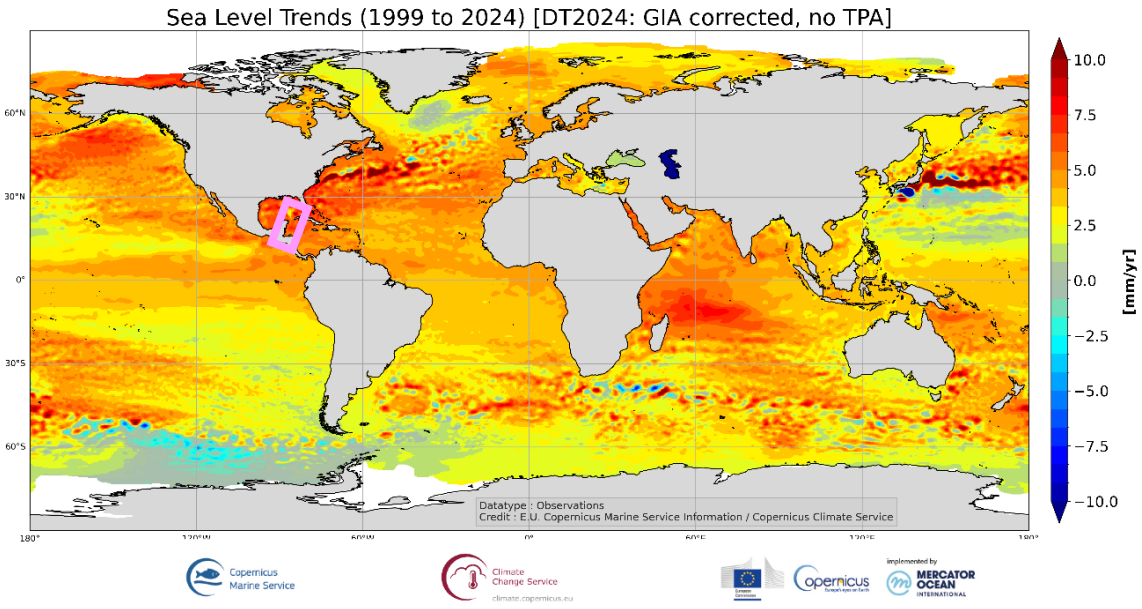


Figura 5 Predicción del nivel del mar. Fuente: IPCC

Por otro lado, *El Copernicus Marine Service* muestra un registro de cómo ha ido aumentando el nivel del mar durante los años.



Global ocean sea level trends from satellite altimeter observations (in mm/yr) over the period 1999/02/20 to 2024/11/19. The ocean monitoring indicator is derived from the DUACS delayed-time reprocessed dataset for climate applications (DT-2024).

Figura 6 Incremento del nivel del mar desde 1999 hasta 2024. Fuente: Copernicus Marine Service

Como se observa en la Figura 6 Incremento del nivel del mar desde 1999 hasta 2024. Fuente: Copernicus Marine Service en el área de estudio el nivel del mar ha llegado a aumentar entre 5 y 7 milímetros al año.

Finalmente, con el visor IPCC se ha valorado que escenario escoger para simular la crecida del nivel del mar durante los años.

Los escenarios disponibles son los siguientes:

- SSP1-1.9
- SSP1-2.6
- SSP2-4.5
- SSP3-7
- SSP5-8.5
- SSP1-2.6 Low Confidence
- SSP5-8.5Low Confidence

Estos escenarios describen trayectorias y emisiones futuras, junto con desarrollos socioeconómicos. Conforme aumentan, más altas son las emisiones.

Se escoge el escenario SSP5-8.5 como el más representativo, ya que se encuentra en un nivel intermedio de entre las posibles opciones.

Los datos se obtienen del punto más próximo a la costa de la playa de Mayakobá, siendo el representado en la siguiente figura:

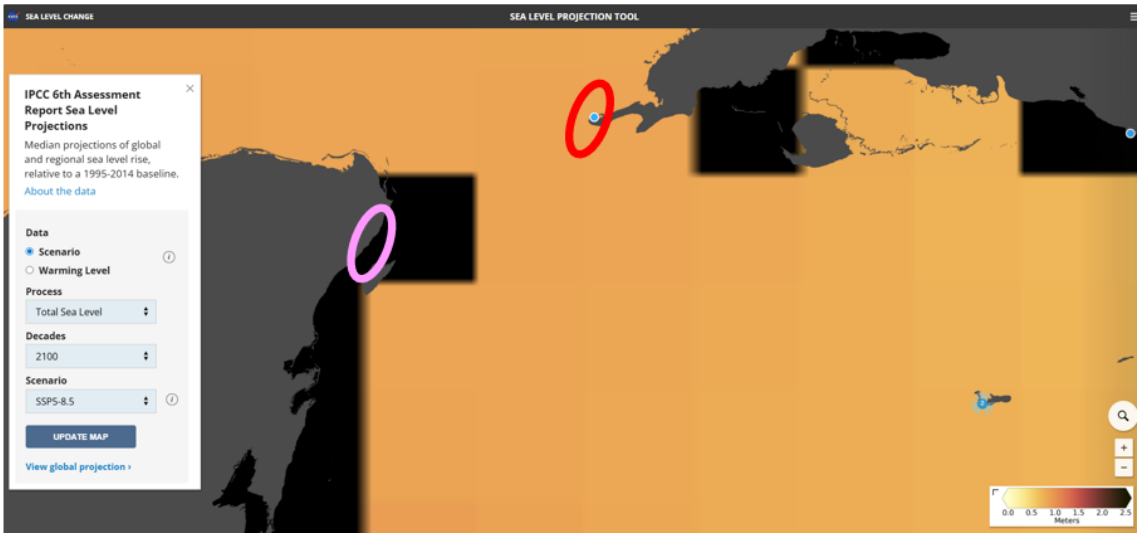


Figura 7 Punto de obtención de los datos del escenario SSP2-4.5 (en rojo) y ubicación del tramo de estudio (en rosa). Fuente: IPCC Sea Level Projection Tool.

Finalmente, se obtiene el siguiente gráfico con el aumento del nivel del mar predicho para los años futuros.

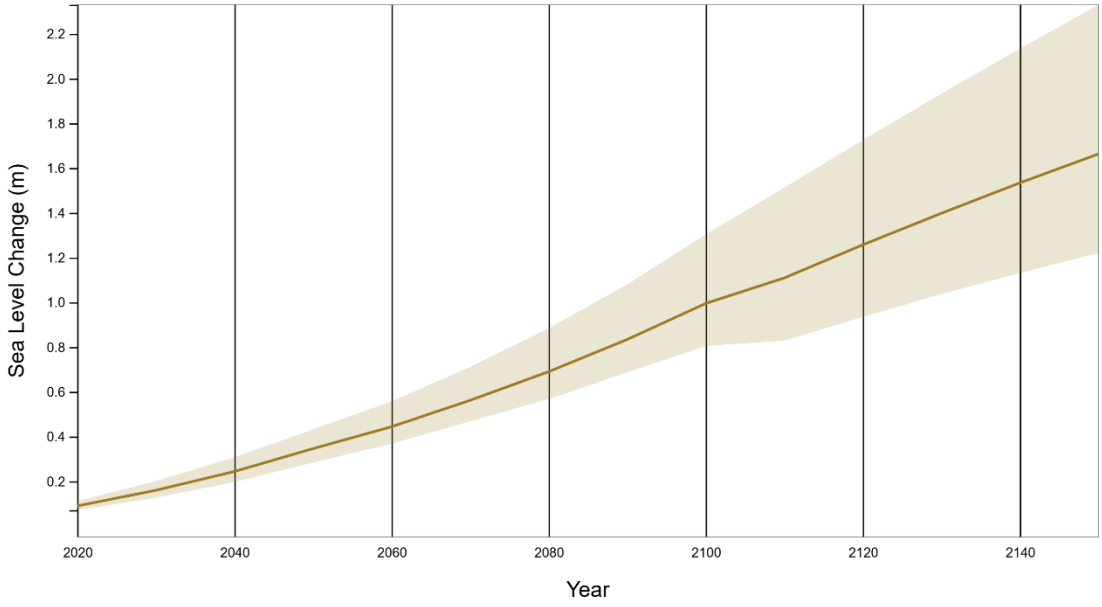


Figura 8 Gráfica del escenario SSP5-8.5 más próxima al tramo de estudio. Fuente: Fuente: IPCC Sea Level Projection Tool.

En la que se puede concretar que, para el escenario escogido, en 2040 el nivel del mar habrá aumentado un total de **0,24 metros.**

4. VIENTO

Con los datos solicitados a el Servicio Mareográfico Nacional (Universidad Nacional Autonómica de México), se ha hecho la estimación de la afección del viento en la zona de la playa de Mayakobá a partir de los datos de Puerto Morelos.

Para ello se ha programado en Excel la siguiente tabla de probabilidades conjunta

Sector Dirección(°)	Dir	<1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	14<	Total dir
0-22.5	0.0	0.3%	1.0%	0.6%	0.4%	0.3%	0.3%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**3.4%**
22.5-45	22.5	0.1%	0.7%	0.4%	0.3%	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**2.8%**
45-67.5	45.0	0.6%	3.1%	2.2%	1.5%	1.7%	2.0%	1.5%	1.0%	0.5%	0.2%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	**14.2%**
67.5-90	67.5	0.4%	3.3%	2.8%	2.0%	2.2%	2.0%	1.3%	0.5%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**14.9%**
90-112.5	90.0	0.1%	1.1%	0.9%	0.6%	0.6%	0.5%	0.3%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**4.4%**
112.5-135	112.5	0.5%	3.3%	2.9%	2.5%	2.8%	2.6%	1.9%	1.0%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**17.9%**
135-157.5	135.0	0.3%	1.4%	1.4%	1.6%	2.3%	3.3%	2.9%	1.6%	0.5%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**15.8%**
157.5-180	157.5	0.1%	0.7%	0.4%	0.5%	0.9%	1.1%	1.1%	0.9%	0.6%	0.5%	0.3%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	**7.3%**
180-202.5	180.0	0.1%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**1.6%**
202.5-225	202.5	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**0.3%**
225-247.5	225.0	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**0.2%**
247.5-270	247.5	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**0.6%**
270-292.5	270.0	0.2%	0.3%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**1.1%**
292.5-315	292.5	0.5%	1.3%	0.7%	0.5%	0.4%	0.4%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**4.2%**
315-337.5	315.0	0.7%	2.5%	1.5%	0.9%	1.0%	0.7%	0.5%	0.3%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**8.3%**
337.5-360	337.5	0.3%	1.0%	0.6%	0.3%	0.4%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**3.1%**
TOTAL Ve		**4.4%**	**20.4%**	**15.0%**	**11.5%**	**13.3%**	**13.9%**	**10.4%**	**5.9%**	**2.6%**	**1.4%**	**0.7%**	**0.4%**	**0.1%**	**0.0%**	**0.0%**	**100.0%**

Tabla 1 Velocidad - Dirección media del viento en probabilidad. Fuente: Elaboración propia

A partir de ella, se ha programado también un código en Matlab del cual se ha obtenido la rosa de los vientos, en la que se puede observar de forma conjunta la dirección y la velocidad más frecuente.

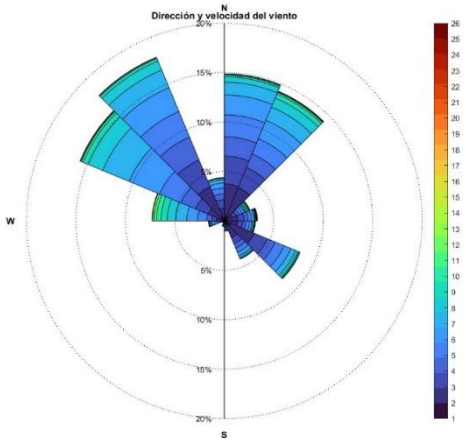


Figura 9 Rosa del viento. Fuente: Elaboración propia

Como conclusión destacar que las velocidades de viento más frecuentes son las que oscilan entre los 2 y 7 m/s con direcciones provenientes desde el N-W y N-E mayoritariamente.

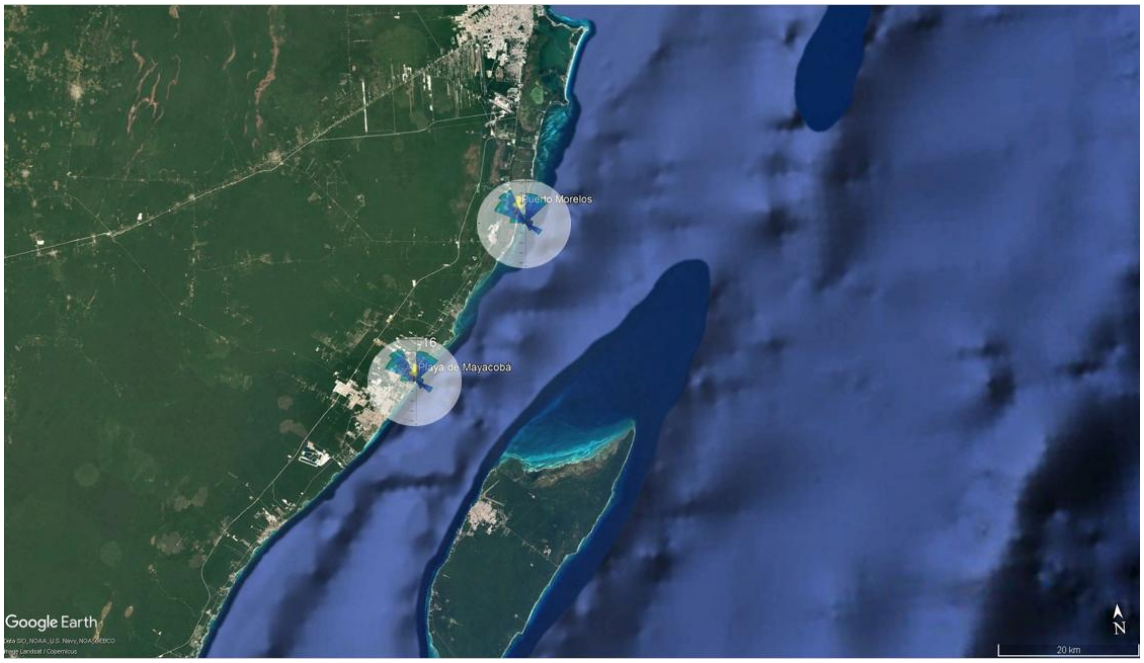


Figura 10 Viento en la costa de la playa de Mayakobá. Fuente: Elaboración propia

5. CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE

5.1. ESTADÍSTICOS DEL OLEAJE

5.1.1. ALTURA DE OLA

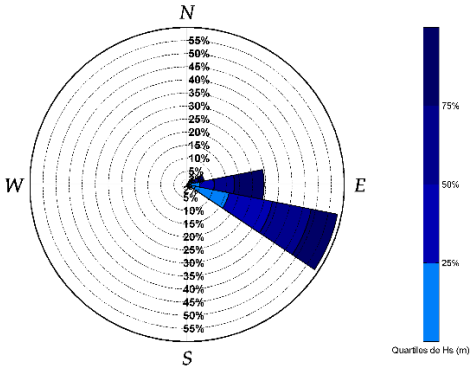


TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida:Hs (m)

direcciones(º)	prob.direccion	$Hs\ (m)_{50\%}$	$Hs\ (m)_{90\%}$	$Hs\ (m)_{99\%}$	$Hs\ (m)_{12}$
N	0.0007	0.5300	0.6900	0.7400	0.7400
NNE	0.0015	0.3500	0.5800	0.7000	0.7000
NE	0.0300	0.6000	1.1180	1.6453	1.7086
ENE	0.0666	0.7400	1.2600	1.6400	2.0119
E	0.2933	0.8500	1.3500	1.9200	2.5449
ESE	0.5840	0.6800	1.0800	1.5900	2.1625
SE	0.0177	0.6600	1.1600	1.9346	2.4821
SSE	0.0010	0.5500	0.8080	0.9300	0.9300
S	0.0007	0.5750	4.1040	4.3100	4.3100
SSW	0.0002	0.4800	3.1680	3.4200	3.4200
SW	0.0002	0.9800	2.8060	3.0000	3.0000
WSW	0.0001	0.3900	0.7800	0.7800	0.7800
W	0.0001	0.7200	0.8400	0.8400	0.8400
WNW	0.0002	0.4350	0.7340	0.8000	0.8000
NW	0.0018	0.5000	0.6340	1.0196	1.0700
NNW	0.0018	0.5200	0.7200	1.0902	1.1700

Figura 11 Rosa del oleaje y estadísticos de Hs direccionales

Como se puede observar en la Figura 11, las direcciones del oleaje susceptibles a incidir en la zona de estudio, las cuales representan el 90% de las direcciones registradas, proceden mayoritariamente del ESE y E, con una probabilidad del 60 y 30 por ciento respectivamente.

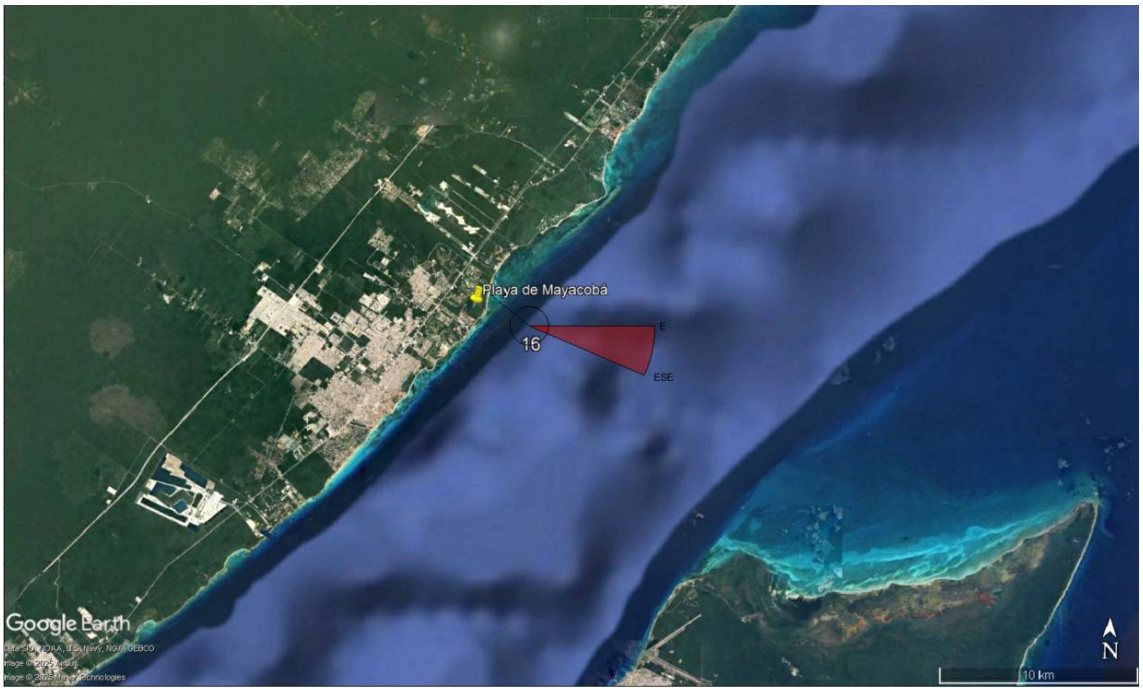


Figura 12 Direcciones del oleaje en la zona de obtención de datos. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, también se indica que la altura de ola que no se supera la mitad del tiempo ($Hs(m)_{50\%}$) es igual a 0.68 metros en la dirección ESE y 0.85 metros en la dirección E.

A continuación, se muestra la función de distribución de Hs (m) y el Histograma obtenidos también con la aplicación CAROL V1.0.

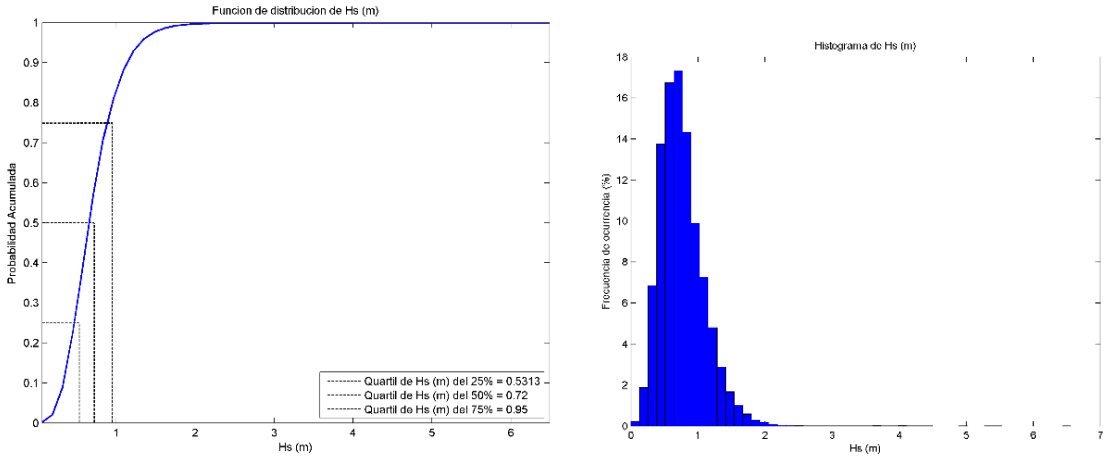


Figura 13 Función de distribución e Histograma de Hs(m). Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, también se muestra en la siguiente figura la probabilidad conjunta de la altura de ola Hs(m) y la dirección del oleaje.

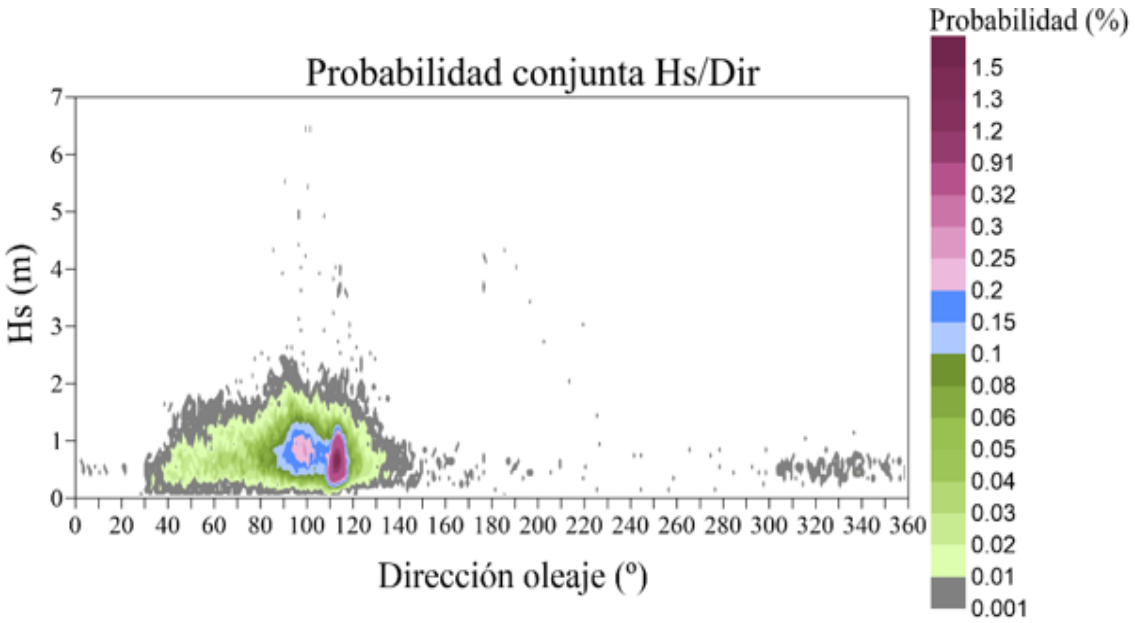


Figura 14 Probabilidad conjunta de Hs(m) con la dirección del oleaje. Fuente: Elaboración propia

5.1.1. PERIODO

Paralelamente, se obtienen los descriptores básicos de la variable del periodo de pico (s).

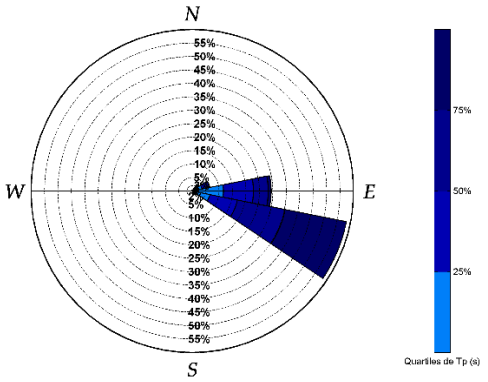


TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida:Tp (s)

direcciones(°)	prob.direccion	$Tp(s)_{25\%}$	$Tp(s)_{50\%}$	$Tp(s)_{75\%}$	$Tp(s)_{1/3}$
N	0.0007	2.8100	3.2100	3.3900	3.3900
NNE	0.0015	7.8350	10.7500	11.2470	11.2500
NE	0.0300	6.0900	7.8900	11.6853	12.7154
ENE	0.0666	5.9800	7.2800	8.2097	8.7239
E	0.2933	6.3500	7.5672	8.6962	10.6493
ESE	0.5840	7.7219	9.0800	10.1100	12.2461
SE	0.0177	5.9900	7.1100	9.4176	11.4907
SSE	0.0010	4.8500	6.1300	8.0400	8.0400
S	0.0007	3.7000	8.9590	9.1300	9.1300
SSW	0.0002	3.1600	7.2360	7.5000	7.5000
SW	0.0002	4.6700	6.4040	6.4100	6.4100
WSW	0.0001	2.5200	3.5200	3.5200	3.5200
W	0.0001	2.6800	3.1900	3.1900	3.1900
WNW	0.0002	2.5600	3.1420	3.2500	3.2500
NW	0.0018	2.6200	2.8960	3.3727	3.4000
NNW	0.0018	2.7100	3.0780	3.2337	3.2400

Figura 15 Rosa del periodo de pico y estadísticos de Tp direccionales Fuente: Elaboración propia

Coincidiendo con las direcciones predominantes de Hs, y como se puede observar en la Figura 15, la mitad del tiempo los oleajes presentan un periodo de pico de 7.72 s para la dirección ESE y 6.35 para la E.

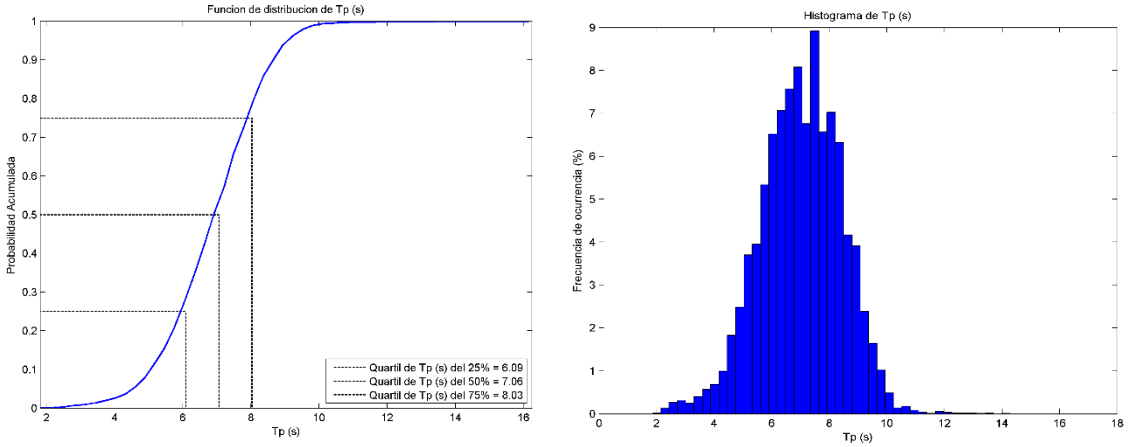


Figura 16 Función de distribución e Histograma de Tp (s). Fuente: Elaboración propia

5.1.1. INTERACCIÓN ALTURA DE OLA Y PERIODO

En este apartado se muestra el comportamiento conjunto y la relación entre la altura de ola significante y el periodo de pico.

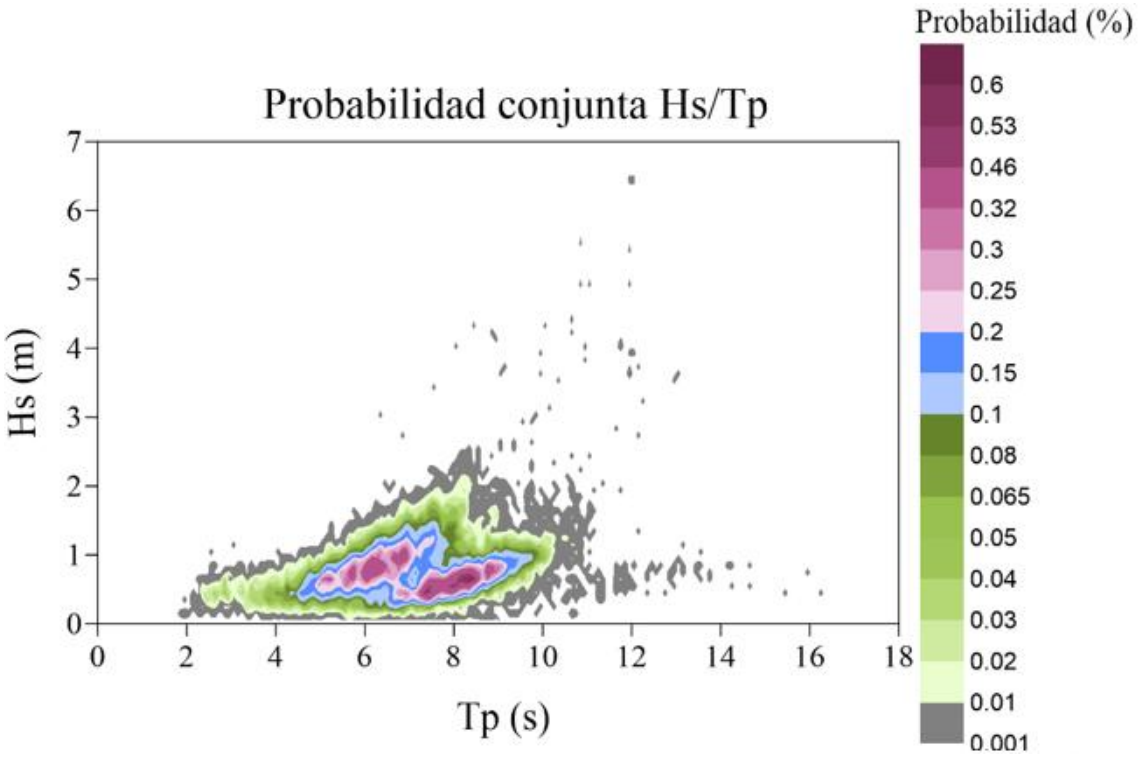


Figura 17 Función de distribución e Histograma de Tp (s).

En la Figura 17, se muestra como a medida que aumenta el periodo de pico, también lo hace ligeramente la altura de ola significante, sin llegar a ser una relación lineal.

Las relaciones más probables son las que rondan la altura de ola de 0.5 metros y el periodo de pico de 8 segundos aproximadamente.

5.2. RÉGIMEN MEDIO ESCALAR

Con el régimen medio se intenta obtener el comportamiento más frecuente del oleaje, sin asociarlo a eventos extremos ni períodos de retorno elevados.

Con los datos de la zona de estudio, se ha hecho un ajuste estadístico con la aplicación CAROL V1.0 para obtener la distribución que mejor representa las variables de Hs (m) y Tp(s) mediante una evaluación visual.

Para la variable de **altura de ola**, se decide que la distribución que mejor ajusta es la distribución **Gumbel de máximos**, la cual para una variable aleatoria x, sigue la siguiente función:

$$y = F(x) = exp\left[-\exp\left(\frac{-(x-\lambda)}{\delta}\right)\right]; -\infty < x < \infty$$

Siendo:

- λ = El parámetro de localización (la moda de la distribución)
- δ = El parámetro de escala

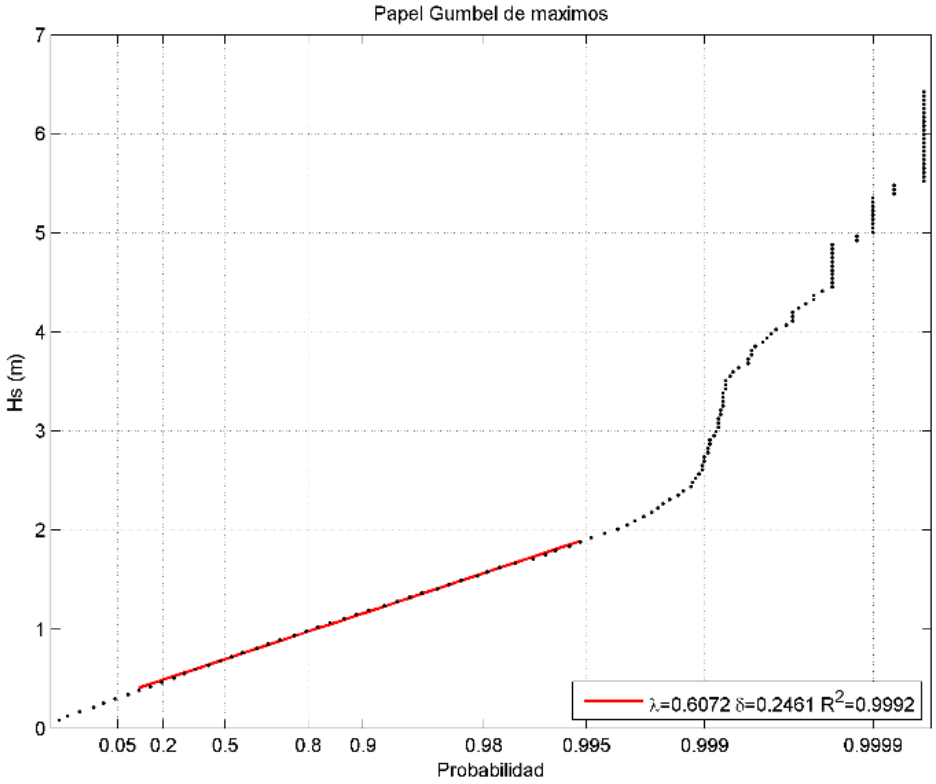


Figura 18 Distribución Gumbel de máximos para Hs

Al ser el coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.99, indica que la alineación es prácticamente lineal, para alturas de ola menores a 2 m, que son las que se tienen en cuenta en el régimen medio, ya que superiores se consideran tormenta y por lo tanto no entrarían en esta clasificación.

En cuanto al **periodo de pico**, se concluye que la mejor distribución es la **Weibull de mínimos.**

$$y = F(x) = 1 - exp\left[-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)^{\beta}\right]; -\infty < x < \lambda$$

Siendo:

- λ = El parámetro de localización (El menor valor posible de x)
- δ = El parámetro de escala
- β = El parámetro de forma

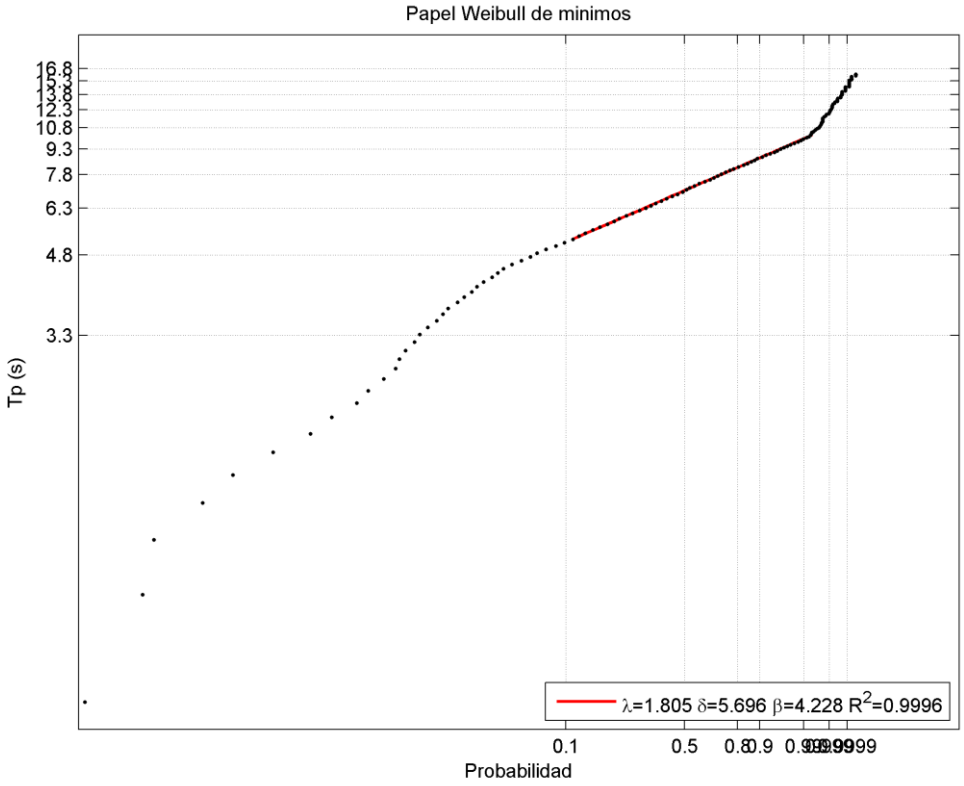


Figura 19 Distribución Weibull de mínimos para Tp (s)

La distribución muestra como el tramo central se presenta una baja dispersión de datos, ($\beta \approx 4$) y un buen ajuste lineal. Aunque hay desviaciones en los extremos, en la cola izquierda tienen escasa relevancia por su poca probabilidad, mientras que las de la cola derecha se relacionan con regímenes extremales.

5.3. RÉGIMEN EXTREMAL DEL OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS

En cuanto al régimen extremal, se sigue el mismo proceso usado para el régimen medio, solo que se filtran los datos para alturas de ola mayores a dos metros, ya que si Hs > 2 m se considera tormenta.

Para la variable de **altura de ola significante**, se considera que la distribución que mejor se ajusta es la distribución **Gumbel de máximos**, la cual presenta la siguiente función:

$$H(x, \mu, \Psi) = exp\left[-exp\left(\frac{x-\mu}{\Psi}\right)\right]$$

Siendo:

- μ= El parámetro de localización
- Ψ = El parámetro de escala

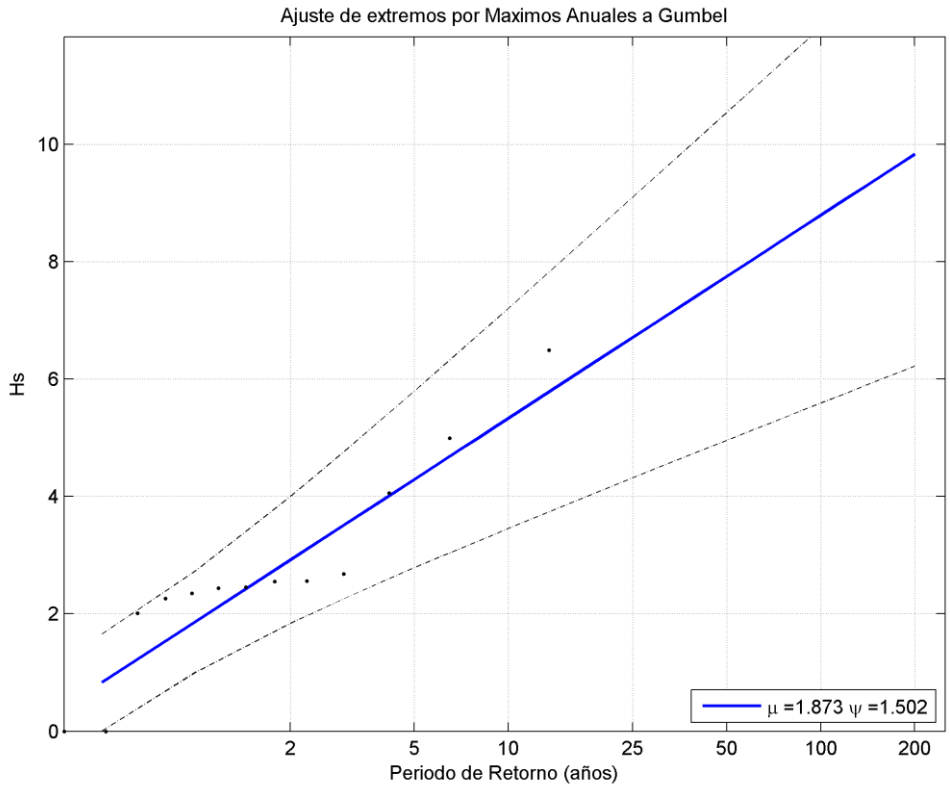


Figura 20 Distribución Gumbel de máximos para Hs (m)

De forma adicional, en la tormenta se muestra la rosa del oleaje relativa a los temporales de tormentas (Hs(m) >2), donde se puede observar que la mayor frecuencia de tormentas se produce desde la dirección este con alturas de olas entre 2 y 3 metros.

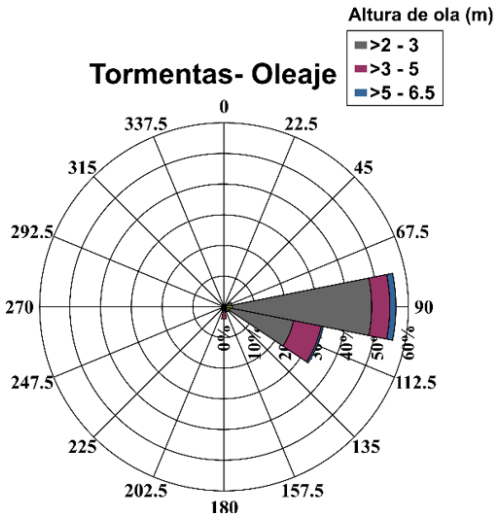


Figura 21 Rosa del oleaje de tormenta

6. CONCLUSIÓN DE ESCENARIOS REPRESENTATIVOS DE OLEAJE PARA EL ESTUDIO

Como conclusión, se propone una lista de escenarios representativos que de la costa de la playa de Mayakobá.

ESCENARIO	H (m)	T(s)	Dir
1	1	6	ESE
2	1	8	ESE
3	2	8	E
4	1	6	E
5	1	8	E
6	2	7	SE
7	2	8	ENE

Tabla 2 Escenarios de clima marítimo

7. CLIMATOLOGÍA

En este apartado se busca caracterizar otros aspectos meteorológicos que puedan afectar al bienestar del arrecife mesoamericano y se evolución durante el tiempo.

7.1. TEMPERATURA

El arrecife de coral es muy sensible a las variaciones de temperatura, siendo esta una causa muy importante del blanqueamiento de coral.

Es por ello que es esencial estudiar su evolución mediante las predicciones del cambio climático en materia de incremento de temperatura durante los futuros años.

El IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) indica que, a causa del cambio climático, la temperatura superficial del agua va a seguir aumentando con los años.

Cogiendo el escenario SSP5-8.5 y el área correspondiente a la zona de estudio se obtiene la siguiente Figura 23 en la que se muestra dicho aumento para un periodo medio (2040 -2060).

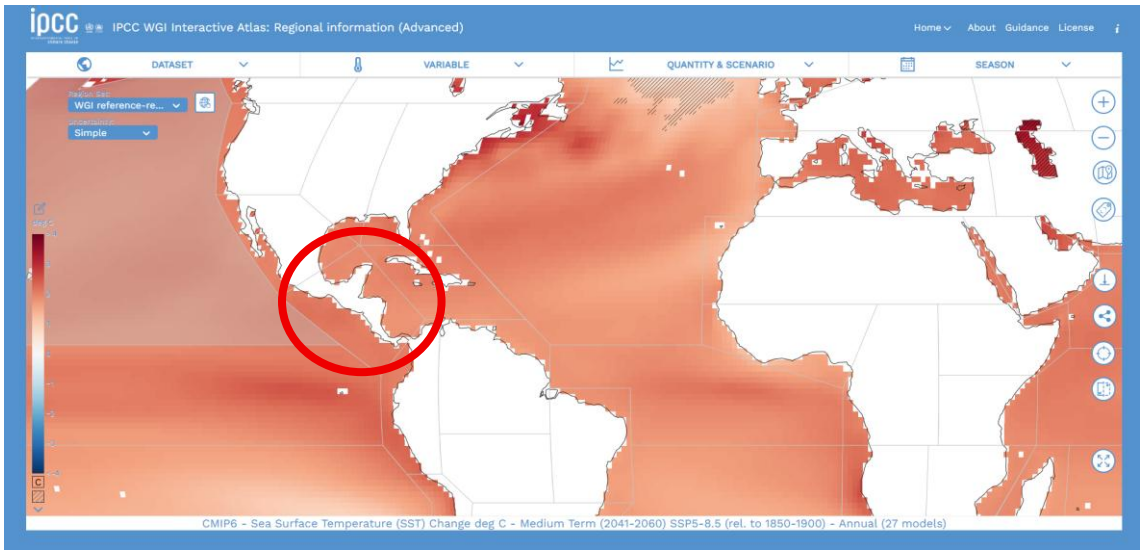


Figura 22 Área escogida para ver la predicción del aumento de la temperatura por el cambio climático. Fuente: IPCC

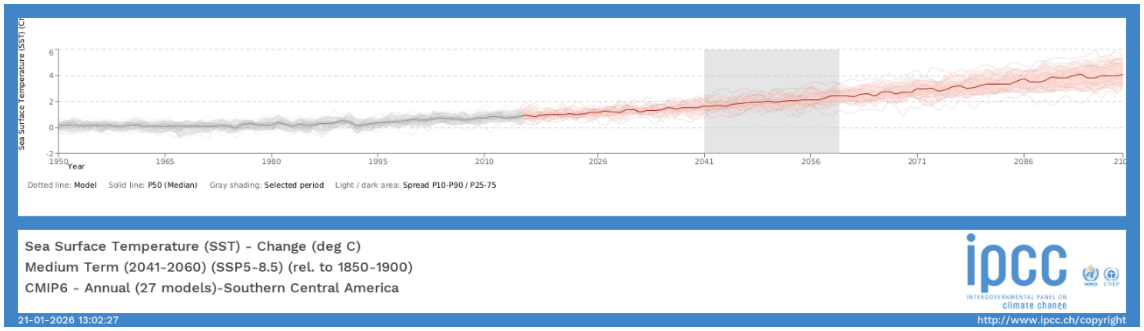


Figura 23 Evolución de la temperatura de la superficie del mar. Fuente: IPCC

7.2. LLUVIA

Por otro lado, la lluvia es un factor importante que puede afectar a los arrecifes de coral, ya que promueve la renovación del agua, ayudando a mantener la calidad de la misma y la salinidad adecuada para estos ecosistemas.

También, evita que la superficie del agua se caliente en exceso y, por tanto, aumente la temperatura que como se ha indicado en la página 139 es clave para la amenaza del blanqueamiento de coral.

Por lo que una disminución de la frecuencia de ella puede agravar su deterioro.

Se vuelve a escoger la misma ubicación, periodo y escenario que en la caracterización de la temperatura y se observa la evolución de los días sin lluvia seguidos a causa del cambio climático.

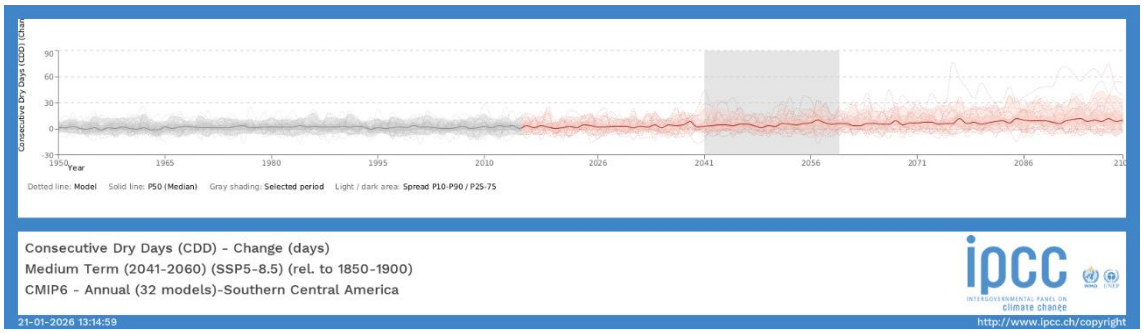


Figura 24 Evolución de los días seguidos sin lluvia. Fuente: IPCC

Según la figura anterior, también hay un aumento de estos días, aunque menos creciente que en el caso de la temperatura.

7.3. CONCLUSIÓN

Durante los años, la tendencia va a ser que las condiciones ambientales en las que se encuentra el arrecife mesoamericano serán más desfavorables, por lo que se evidencia la necesidad de crear una o varias infraestructuras que simulen su protección frente a la costa y promuevan su regeneración.

8. REFERENCIAS

- Copernicus Marine Service. (2025). *Sea level indicators*. https://marine.copernicus.eu/
- Escudero, A. (2025). *Datos de la Administración Nacional* y Atmosférica de EE-UU
- Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2025). *Servicio Mareográfico Nacional de México*. https://www.geofisica.unam.mx/
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2025). *IPCC AR6 Sea Level Projection Tool*. https://sealevelprojection.ipcc.ch/
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2025). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/
- ROM. (1991). *ROM 0.3-91. Clima marítimo*. Puertos del Estado, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- Trujillo, K. (2022). Caracterización de la respuesta de las costas mexicanas a los tsunamis ocurridos en el periodo 2009–2018 (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Ciencias de la Tierra.

ANEJO 7: ESTUDIO DE SOLUCIONES

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 148
2. PLANO DE FONDO 148
3. ELECCIÓN DE LA MALLA DE COLOCACIÓN 150
3.1. ALTERNATIVA 1: MALLA DE COLOCACIÓN 1,5*Dn 151
3.1.1. SIN ERROR AÑADIDO 151
3.1.2. CON ERROR AÑADIDO 153
3.2. ALTERNATIVA 2: MALLA DE COLOCACIÓN 1,55*Dn 155
3.2.1. SIN ERROR AÑADIDO 155
3.2.2. CON ERROR AÑADIDO 156
3.3. ALTERNATIVA 3: MALLA DE COLOCACIÓN 1,6*Dn 158
3.3.1. SIN ERROR AÑADIDO 158
3.3.2. CON ERROR AÑADIDO 160
3.4. ELECCIÓN DE LA MALLA DE COLOCACIÓN 161
3.4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CRITERIOS 162
3.4.2. ANÁLISIS MULTICRITERIO Y RESULTADO 162
4. ELECCIÓN DE LA DISTIBUCIÓN EN PLANTA 166
4.1. CONSIDERACIONES COMUNES EN LAS ALTERNATIVAS 166
4.2. DEFINICIÓN DE LOS CUBÍPODOS Y LA SECCIÓN 169
4.2.1. DEFINICIÓN DE LOS CUBÍPODOS A EMPLEAR 169
4.2.2. DEFINICIÓN DE LA SECCIÓN 169
4.3. ALTERNATIVA 1: 3 Diques de 200 metros de longitud separados 200 metros 171
4.3.1. ESTIMACIÓN COSTE EJECUCIÓN 172
4.4. ALTERNATIVA 2: 2 Diques de 200 metros de longitud separados 300 metros 173
4.4.1. ESTIMACIÓN COSTE EJECUCIÓN 175
4.5. ELECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA 175
4.5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CRITERIOS 175
4.5.2. ANÁLISIS MULTICRITERIO Y RESULTADO 177
5. DISEÑO FINAL 179
5.1. DIMENSIÓN DE LOS CUBÍPODOS 179

5.2. FOTOS SIMULACIÓN EN PLACSIM ALTERNATIVA FINAL 180

6. REFERENCIAS 183

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de la elección de la alternativa final. Fuente: Elaboración propia . 148
Figura 2 Zonas de obtención de pendientes. Fuente: Elaboración propia 149
Figura 3 Distancias entre líneas batimétricas zona 1. Fuente: Elaboración propia 149
Figura 4 Perfiles batimétricos de las 3 zonas determinadas para las posibles alternativas. Fuente: Elaboración propia 149
Figura 5 Inputs para estudiar las alternativas en PLACSIM. Fuente: Elaboración propia 150
Figura 6 Malla de colocación teórica 1,5*Dn. Fuente: Elaboración propia 151
Figura 7 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia 152
Figura 8 Simulación finalizada en perspectiva del dique. Fuente: Elaboración propia 152
Figura 9 Simulación finalizada del dique en vista desde el eje x. Fuente: Elaboración propia..... 153
Figura 10 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia 154
Figura 11 Simulación finalizada del dique en vista desde el eje y. Fuente: Elaboración propia..... 154
Figura 12 Malla de colocación teórica 1,55*Dn. Fuente: Elaboración propia 155
Figura 13 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia 155
Figura 14 Simulación finalizada en planta del dique en vista desde el eje y. Fuente: Elaboración propia..... 156
Figura 15 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia 157
Figura 16 Simulación finalizada del dique en vista desde el eje x. Fuente: Elaboración propia..... 157
Figura 17 Malla de colocación teórica 1,6*Dn. Fuente: Elaboración propia 158
Figura 18 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia 159
Figura 19 Simulación finalizada del dique en vista desde el eje x. Fuente: Elaboración propia..... 159
Figura 20 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia 160
Figura 21 Simulación finalizada del dique en vista desde el eje x. Fuente: Elaboración propia..... 161
Figura 22 Escala fundamental de comparación por pares (Saaty, 1980): Fuente: Yepes (2018/2022) 163
Figura 23 Índice aleatorio RI según el tamaño de la matriz. Fuente: Yepes (2018/2022) 164
Figura 24 Máximos valores de CR. Fuente: Yepes (2018/2022)..... 165

Figura 25 Esquema de la variación en planta de la línea de playa según la disposición del dique. Fuente: Hsu y Silvester, 1990. 167
Figura 26 Mínima distancia aproximada a la que se debería de implantar las alternativas. Fuente: Google Earth..... 167
Figura 27 Coeficientes de capa para el diseño de la estructura. Fuente: Elaboración propia..... 169
Figura 28 Mallas de colocación según el diámetro del Cubípodo. Fuente: Elaboración propia..... 170
Figura 29 Sección transversal según la profundidad de la estructura. Fuente: Elaboración propia..... 170
Figura 30 Planteamiento de la Alternativa 1 en planta. Fuente: Elaboración propia.. 171
Figura 31 Planteamiento de la Alternativa 1 en planta más ampliada. Fuente: Elaboración propia..... 172
Figura 32 Factores del coste total de un Cubípodo con sus pesos. Fuente: Cubipod Manual. 172
Figura 33 Planteamiento de la Alternativa 2 en planta. Fuente: Elaboración propia.. 174
Figura 34 Planteamiento de la Alternativa 1 en planta más ampliada. Fuente: Elaboración propia..... 174
Figura 35 Esquema en planta de los porcentajes de transmisión del oleaje. Fuente: Elaboración propia..... 177
Figura 36 Dimensiones relativas del Cubípodo. Fuente: Cubipod Manual, 2016. 179
Figura 37 Dimensiones finales del Cubípodo. Fuente: Elaboración propia..... 180
Figura 38 Simulación finalizada en perspectiva. Fuente: Elaboración propia..... 180
Figura 39 Simulación finalizada en planta. Fuente: Elaboración propia. 181
Figura 40 Imagen de uno de los tres diques en vista desde el eje x. Fuente: Elaboración propia..... 181
Figura 41 Sección transversal de los diques. Fuente: Elaboración propia. 182
Figura 41 Tramo de dique en perspectiva. Fuente: Elaboración propia. 182

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Profundidad y pendiente según la zona escogida. Fuente: Elaboración propia. 149
Tabla 2 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la malla original con un error añadido de desviación típica igual a 0,1. Fuente: Elaboración propia. 151
Tabla 3 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 1 sin error añadido. Fuente: Elaboración propia. 153
Tabla 4 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 1 con error añadido. Fuente: Elaboración propia. 154
Tabla 5 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 2 sin error añadido. Fuente: Elaboración propia. 156

Tabla 6 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 1 con error añadido. Fuente: Elaboración propia. 157
Tabla 7 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 3 sin error añadido. Fuente: Elaboración propia. 159
Tabla 8 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 3 con error añadido. Fuente: Elaboración propia. 161
Tabla 9 Resumen de las simulaciones de las alternativas. Fuente: Elaboración propia. 161
Tabla 10 Matriz de comparación por pares de ambos criterios. Fuente: Elaboración propia..... 163
Tabla 11 Matriz de comparación por pares de las alternativas para el criterio de resultados de las simulaciones. Fuente: Elaboración propia. 164
Tabla 12 Matriz de comparación por pares de las alternativas para el criterio económico. Fuente: Elaboración propia. 164
Tabla 13 Matriz de normalizada del criterio de resultados de simulaciones. Fuente: Elaboración propia..... 164
Tabla 14 Matriz de normalizada del criterio económico. Fuente: Elaboración propia.164
Tabla 15 Relaciones S/B para alteraciones en el frente litoral. Fuente: Hsu y Silvester (1990)..... 166
Tabla 16 Número de Cubípodos totales en la Alternativa 1. Fuente: Elaboración propia. 173
Tabla 17 Número de Cubípodos totales en la Alternativa 2. Fuente: Elaboración propia. 175
Tabla 18 Matriz de comparación por pares de los criterios para escoger la distribución en planta. Fuente: Elaboración propia 177
Tabla 19 Matriz normalizada de comparación por pares de los criterios para escoger la distribución en planta. Fuente: Elaboración propia 177
Tabla 20 Matriz de comparación por pares de las alternativas para el criterio económico. Fuente: Elaboración propia. 178
Tabla 21 Matriz normalizada de comparación por pares de las alternativas para el criterio económico. Fuente: Elaboración propia. 178
Tabla 22 Matriz de comparación por pares de las alternativas para el criterio de afección social. Fuente: Elaboración propia. 178
Tabla 23 Matriz normalizada de comparación por pares de las alternativas para el criterio de afección social. Fuente: Elaboración propia..... 178
Tabla 24 Matriz de comparación por pares de las alternativas para el criterio de funcionalidad. Fuente: Elaboración propia. 178
Tabla 25 Matriz normalizada de comparación por pares de las alternativas para el criterio de funcionalidad. Fuente: Elaboración propia. 178

1. INTRODUCCIÓN

En este anejo se va a exponer las alternativas propuestas, las cuales se van a diseñar en base a los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en PLACSIM y las necesidades de actuación de la zona de estudio.

La elección de la alternativa final se va a componer de dos análisis multicriterio de tipo *Analytic Hierarchy Process* (AHP). En el primero se escogerá la malla de colocación y en el segundo la disposición de los diques frente a la costa.

Habrá por tanto un total de 5 alternativas, las cuales se compararán 3 a 2 y las dos escogidas en cada análisis conformarán la alternativa final:

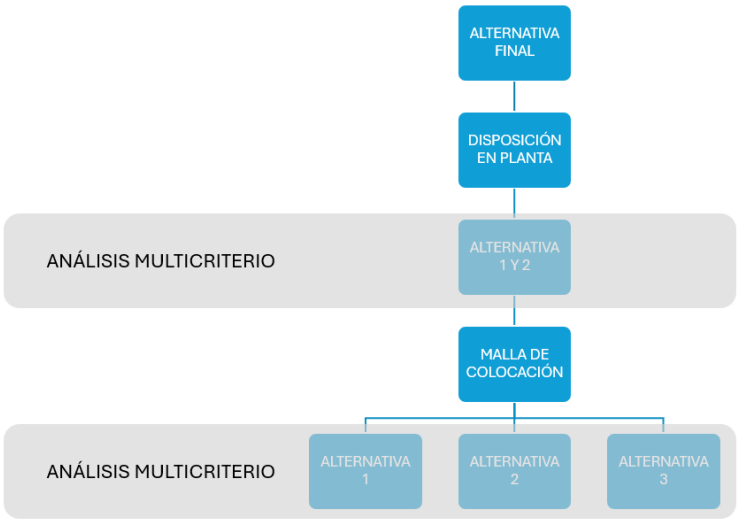


Figura 1 Esquema de la elección de la alternativa final. Fuente: Elaboración propia

2. PLANO DE FONDO

Aunque no se ha estudiado el comportamiento de PLACSIM en planos con pendientes, para que las simulaciones sean lo más realistas posibles, se decide inclinar el plano base con la pendiente que indica la batimetría aproximada obtenida.

Para ello, se obtiene en QGIS las distancias entre las líneas batimétricas más próximas a la zona de implantación de las alternativas a estudio en las 2 zonas marcadas en la siguiente figura:

Figura 2 Zonas de obtención de pendientes. Fuente: Elaboración propia

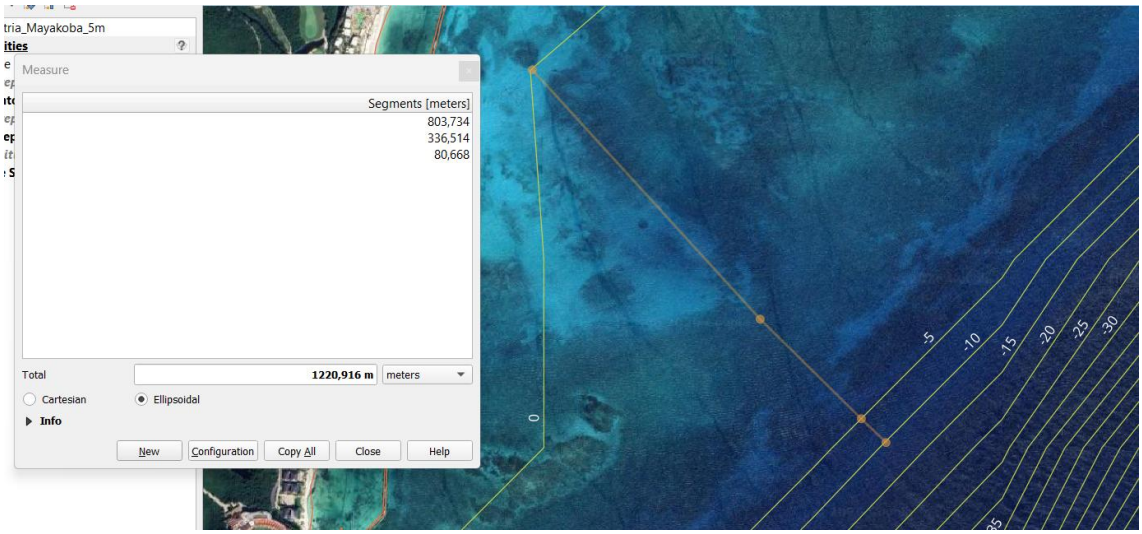


Figura 3 Distancias entre líneas batimétricas zona 1. Fuente: Elaboración propia

Con estos datos, se dibuja el perfil de cada línea en el programa AutoCAD y se obtienen las 2 pendientes y la profundidad sobre la cual se implantarán las alternativas.

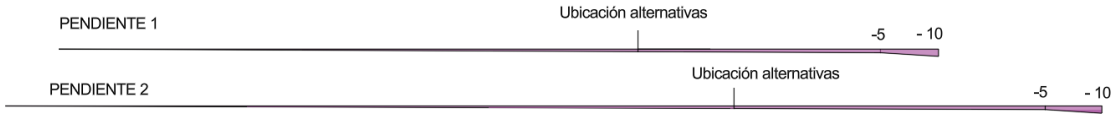


Figura 4 Perfiles batimétricos de las 3 zonas determinadas para las posibles alternativas. Fuente: Elaboración propia

ZONA	PENDIENTE	PROFUNDIDAD
1	0,25%	3,5 m
2	0,20%	3,5 m

Tabla 1 Profundidad y pendiente según la zona escogida. Fuente: Elaboración propia.

Por ello, aunque las pendientes son muy próximas a cero, se decide inclinar el plano a una pendiente de 0,25% para obtener el comportamiento de las piezas durante la construcción y los coeficientes de capa de la forma más realista posible.

Finalmente, la interfaz de PLACSIM queda de la siguiente manera, con los inputs correspondientes al plano inclinado y una de las mallas de colocación posibles.

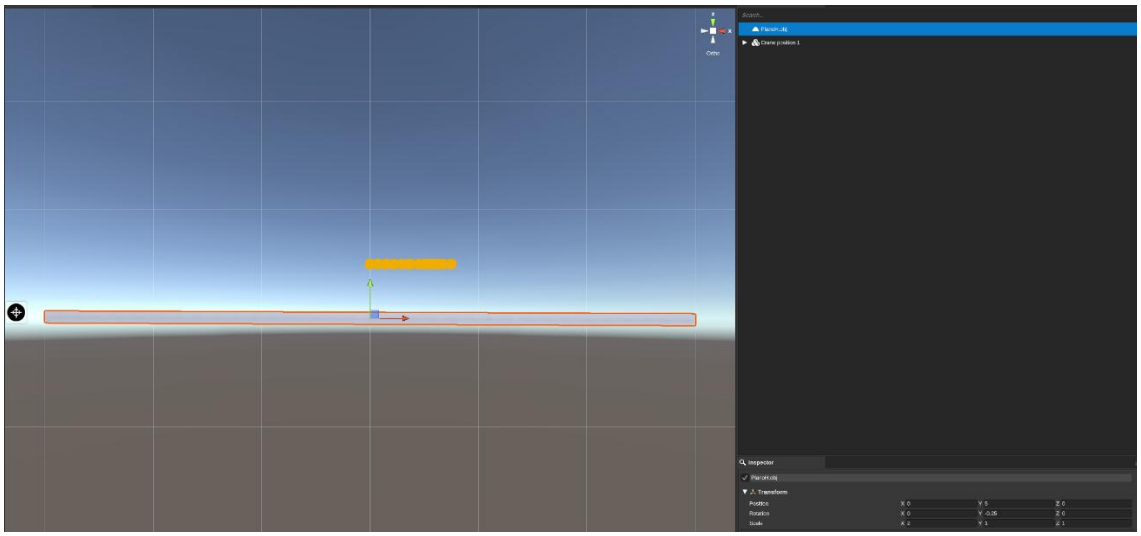


Figura 5 Inputs para estudiar las alternativas en PLACSIM. Fuente: Elaboración propia

3. ELECCIÓN DE LA MALLA DE COLOCACIÓN

Se va a estudiar un total de 3 mallas de colocación, las cuales se van a simular en C1 y se va a analizar los errores cuadráticos medios y el valor del N%, ambos ya explicados en el Anejo 2, además de un análisis visual durante la simulación para ver cuál de las 3 es la mejor opción.

También, se va a introducir un error adicional asociado a la experiencia o calidad del gruista, igual en todas para ver cómo se comportan ante factores que alteran la posición final de las piezas sin depender de la geometría de la malla.

Se decide que el error sea menor que el simulado en la malla de colocación 1,44*Dn, siguiendo una distribución normal, con media cero, pero desviación típica igual a 0,1 en vez de 0,22.

$$\gamma_{i,Gruísta} \sim \mathrm{N}(0, 0.1) \quad (1)$$

Sin embargo, se obtiene el error cuadrático medio y el N% de la malla original para poder comparar de una forma más sencilla cómo de mejor se comportan las alternativas ante el error descrito.

C1 (1,44*Dn) con error gruísta	
ε_{rms}/D_n	N%
0,580	12%

Tabla 2 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la malla original con un error añadido de desviación típica igual a 0,1. Fuente: Elaboración propia.

3.1. ALTERNATIVA 1: MALLA DE COLOCACIÓN 1,5*Dn

3.1.1. SIN ERROR AÑADIDO

La malla simulada corresponde a la siguiente figura:

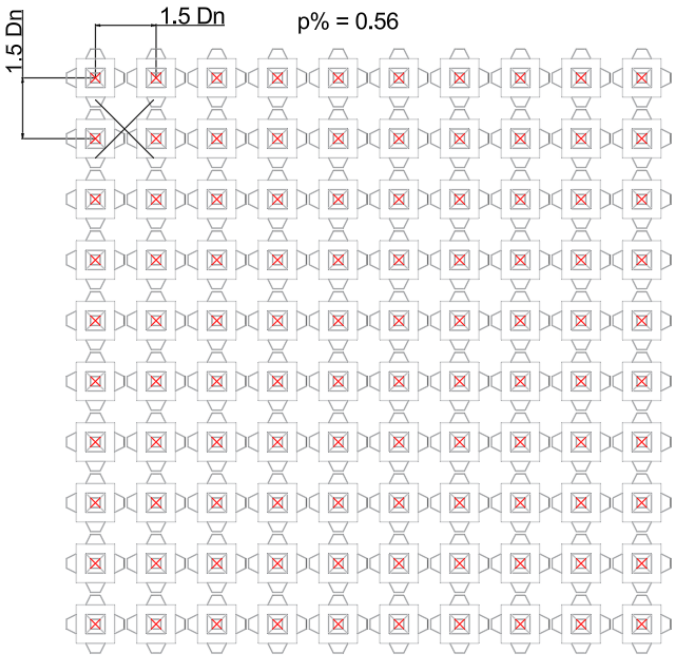


*Figura 6 Malla de colocación teórica 1,5*Dn. Fuente: Elaboración propia*

La porosidad se ha calculado mediante la siguiente ecuación: (Muñoz-Palou, 2024)

$$p_n = 1 - \frac{1}{a \cdot b} = 1 - \frac{1}{1.5 \cdot 1.5} = 56\% \quad (2)$$

Una vez se cargan los inputs *Crane position* y el plano ".obj" con la pendiente predeterminada, se indica la tipología de colisión C1 y se da paso a la simulación, obteniendo los siguientes resultados.

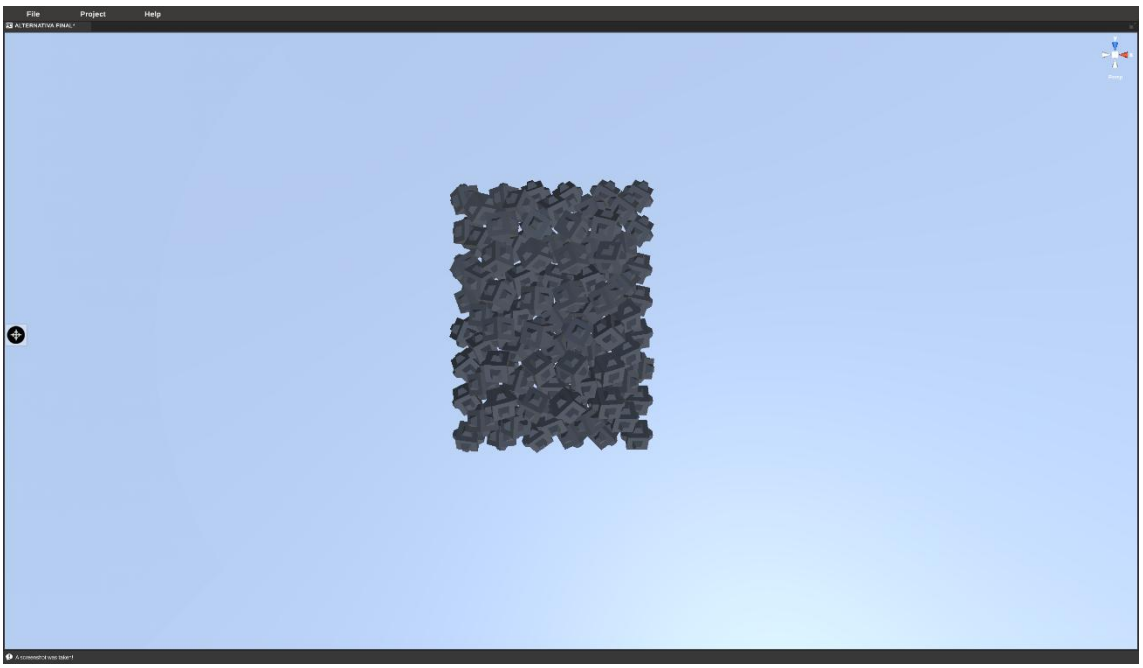


Figura 7 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia

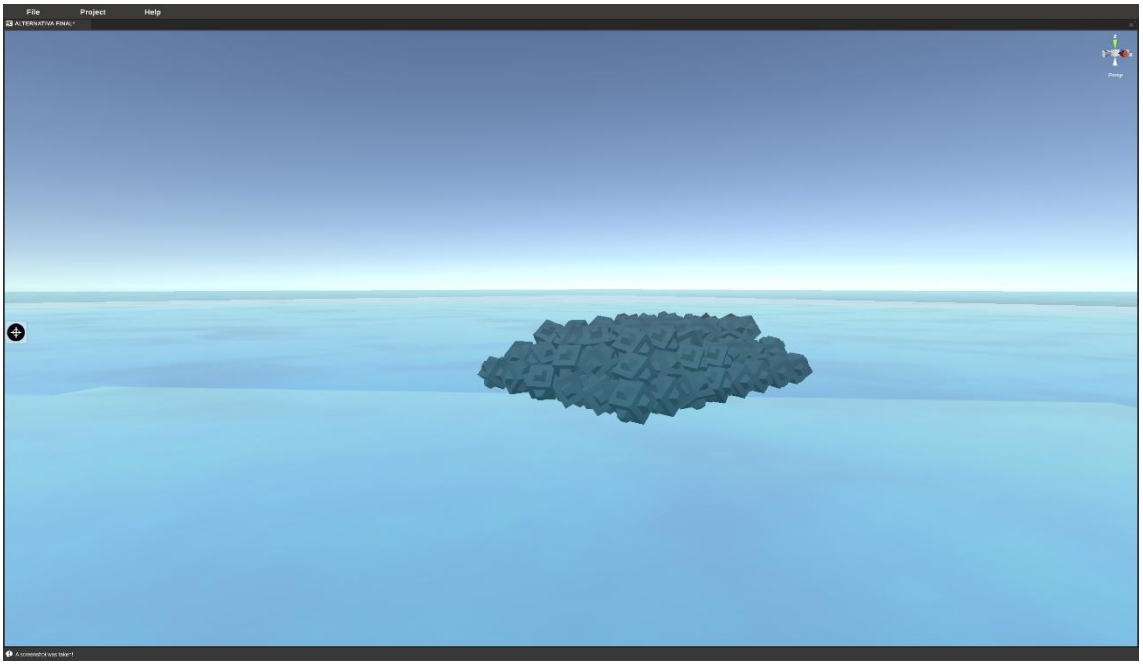


Figura 8 Simulación finalizada en perspectiva del dique. Fuente: Elaboración propia

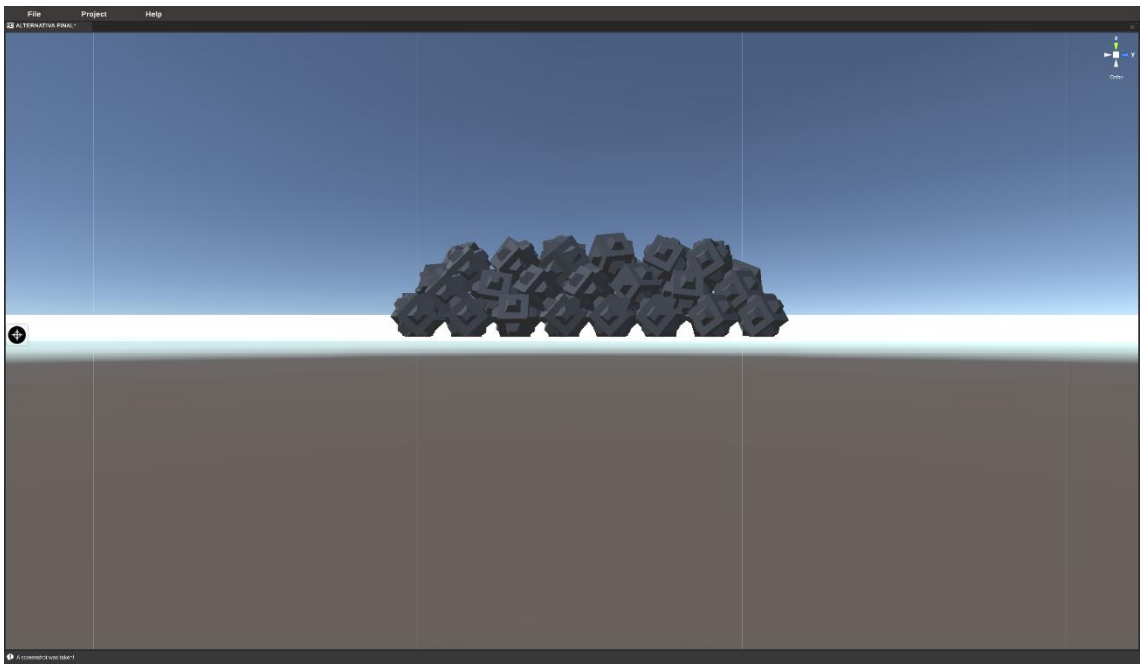


Figura 9 Simulación finalizada del dique en vista desde el eje x. Fuente: Elaboración propia

Visualmente, se puede afirmar que, en ausencia de errores añadidos, la malla es adecuada.

A continuación, se muestra el error cuadrático medio total y el N%

C1 (1,5*Dn) sin error gruísta	
ε_{rms}/D_n	N%
0,127	0%

Tabla 3 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 1 sin error añadido. Fuente: Elaboración propia.

El valor de ε_{rms}/D_n ha disminuido 0,01 en comparación con la malla original, lo que quiere decir que esta malla es más adecuada para ser construida, aunque la diferencia no sea excesiva.

3.1.2. CON ERROR AÑADIDO

Se vuelve a realizar la simulación de tipo C1 para la malla 1,5*Dn pero añadiendo el error de gruista descrito antes.

Los resultados, tanto visuales como el error cuadrático medio y el N% son los siguientes:

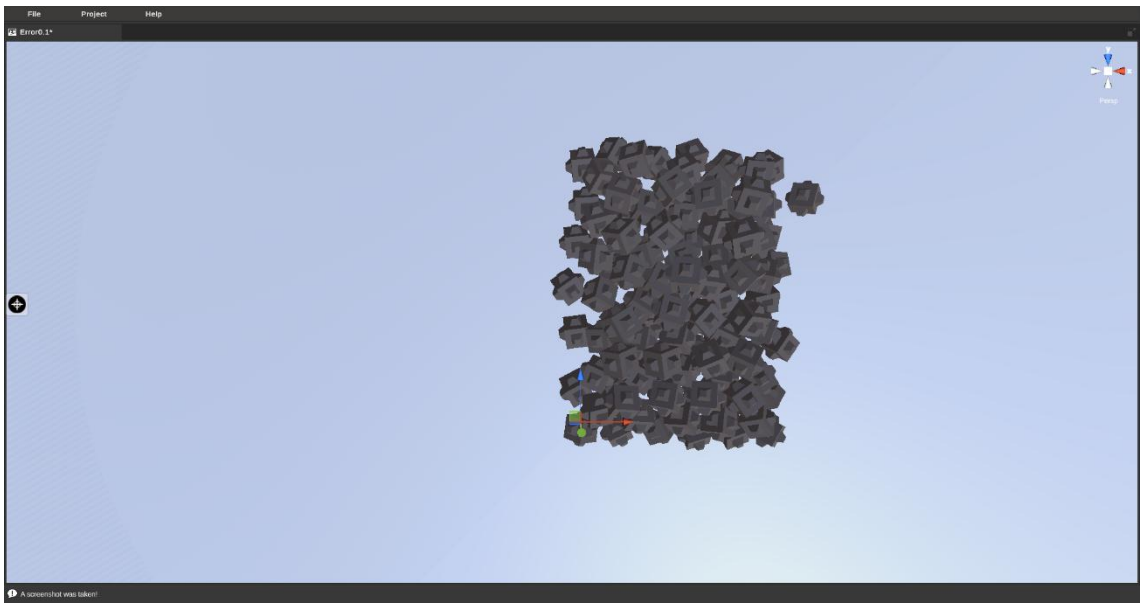


Figura 10 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia

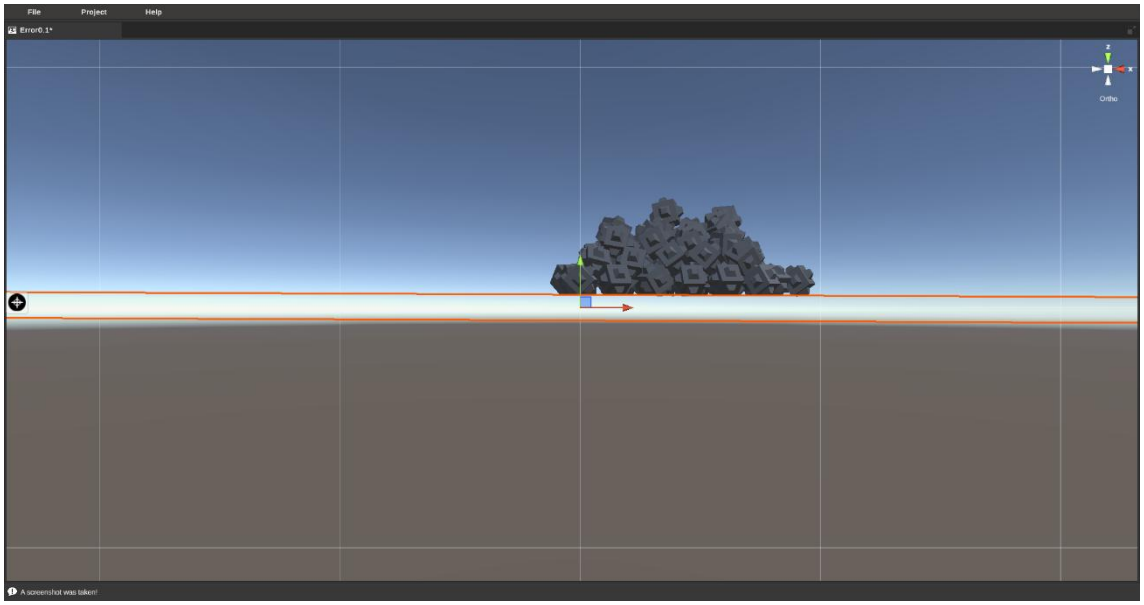


Figura 11 Simulación finalizada del dique en vista desde el eje y. Fuente: Elaboración propia

C1 (1,5*Dn) con error gruísta	
ε_{rms}/D_n	N%
0,508	7%

Tabla 4 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 1 con error añadido. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las figuras y en la tabla anterior, el error cuadrático medio y el N% han mejorado respecto a l amalla original. Pero, aun así, la posición final de las piezas en su conjunto no respeta la malla de colocación cuando se le añade un error $\gamma_{i,Gruísta} \sim \mathrm{N}(0, 0.1)$.

3.2. ALTERNATIVA 2: MALLA DE COLOCACIÓN 1,55*Dn

3.2.1. SIN ERROR AÑADIDO

En este caso, la porosidad es igual a 58% y la malla se puede observar en la Figura 12 Malla de colocación teórica 1,55*Dn. Fuente: Elaboración propia

$$p_n = 1 - \frac{1}{a \cdot b} = 1 - \frac{1}{1.55 \cdot 1.55} = 58\% \quad (3)$$

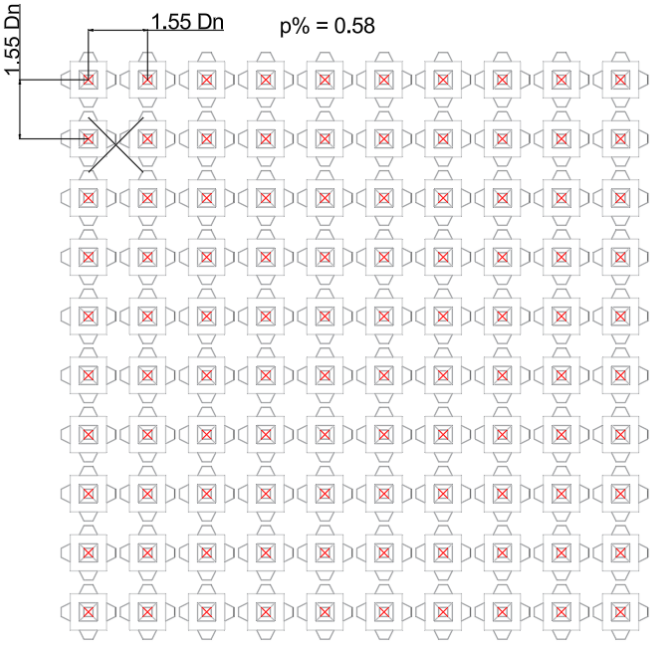


*Figura 12 Malla de colocación teórica 1,55*Dn. Fuente: Elaboración propia*

Se realiza la simulación y se obtienen los siguientes resultados.

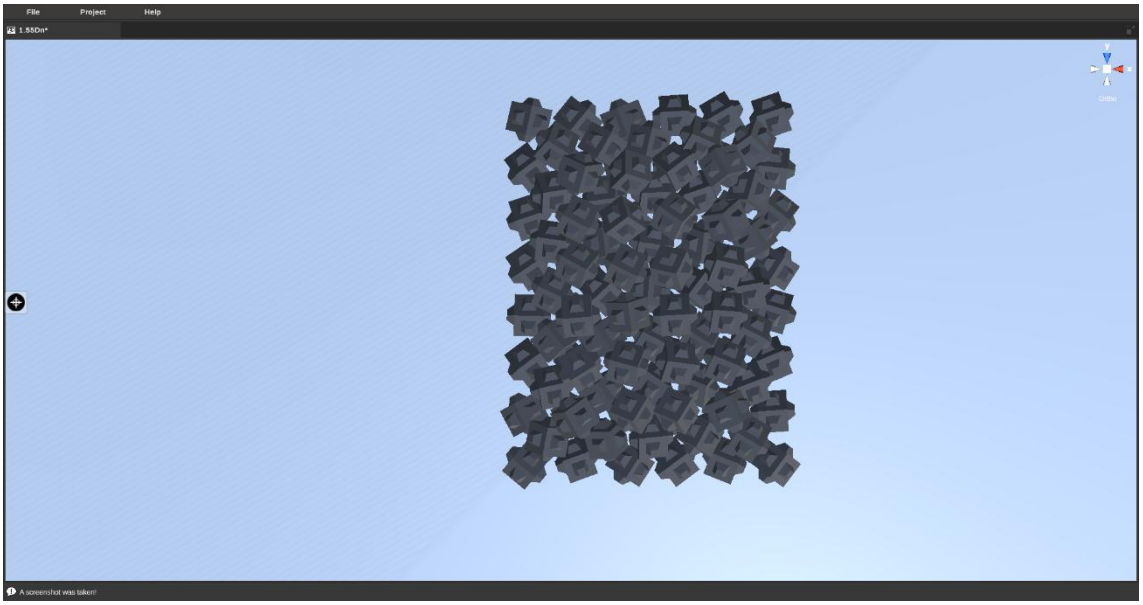


Figura 13 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia

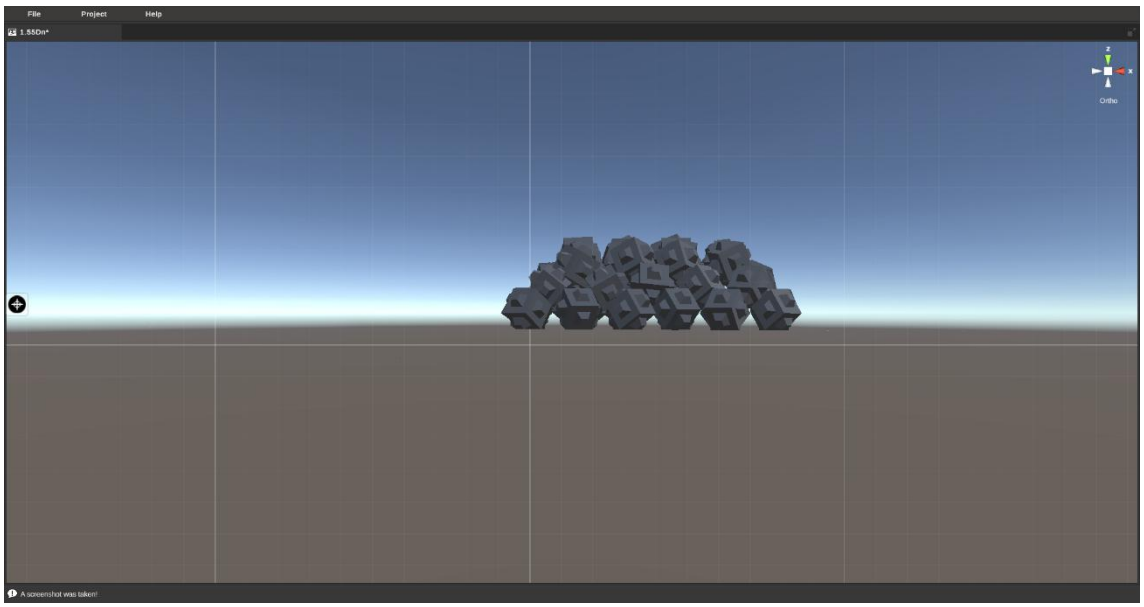


Figura 14 Simulación finalizada en planta del dique en vista desde el eje y. Fuente: Elaboración propia

C1 (1,55*Dn) sin error gruísta	
ε_{rms}/D_n	N%
0,1	0%

Tabla 5 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 2 sin error añadido. Fuente: Elaboración propia.

Para esta separación, los resultados sin ningún error añadido son más favorables que en la alternativa 1, habiendo disminuido, otra vez 0,01 en comparación con la separación a y b de 1,5*Dn, igual que pasaba entre la malla de 1,44*Dn y 1,5 Dn aproximadamente.

3.2.2. CON ERROR AÑADIDO

Ahora se va a analizar el resultado de la malla correspondiente a esta alternativa con el error de gruista añadido, comparándolo con la alternativa anterior y la malla original.

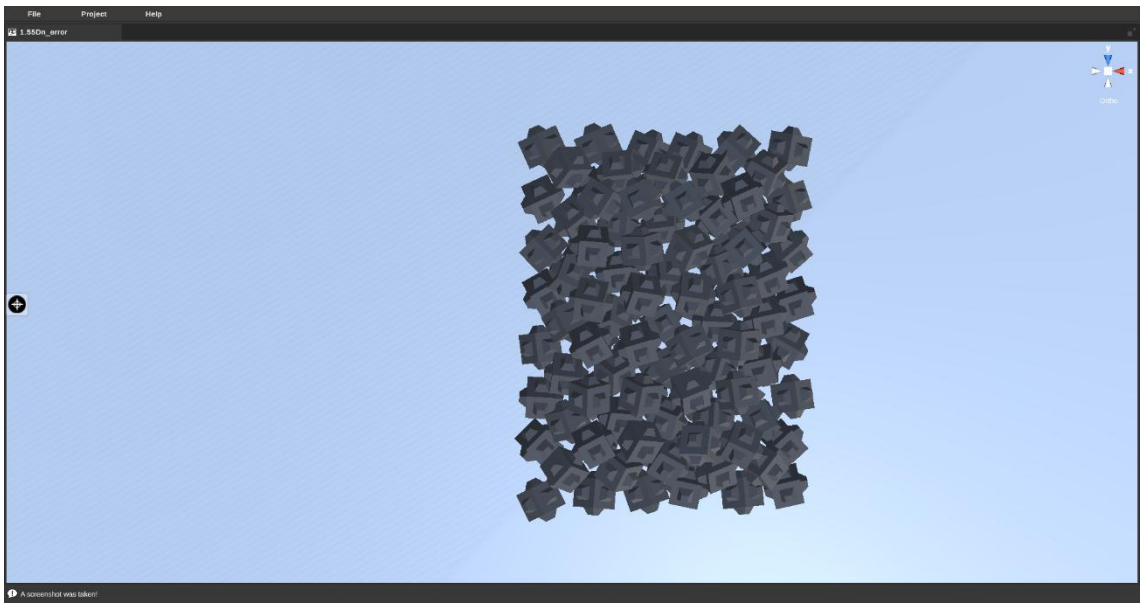


Figura 15 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia

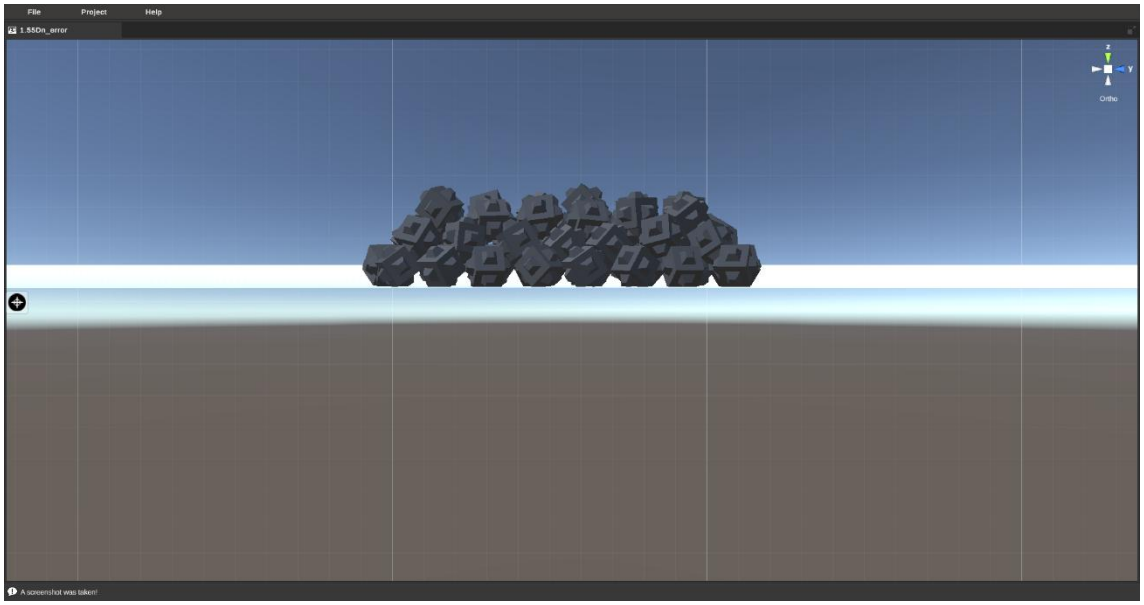


Figura 16 Simulación finalizada del dique en vista desde el eje x. Fuente: Elaboración propia

C1 (1,55*Dn) con error gruísta	
ε_{rms}/D_n	N%
0,138	0%

Tabla 6 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 1 con error añadido. Fuente: Elaboración propia.

En esta opción, el error ha disminuido considerablemente, dando un valor de N% nulo y un error cuadrático medio similar al que se obtiene sin ningún error añadido.

Esto se debe a que la distancia entre Cubípodos ya se encuentra lo suficientemente separada para que al colocar las piezas y colisionar con las existentes, haya un espacio suficiente que permita a los Cubípodos existentes moverse sin condicionar en exceso la posición final de la siguiente pieza a colocar, por tanto, el error acumulado es menor.

3.3. ALTERNATIVA 3: MALLA DE COLOCACIÓN 1,6*Dn

3.3.1. SIN ERROR AÑADIDO

Al igual que en las alternativas anteriores, se muestra la malla de colocación correspondiente, el valor de la porosidad y el resultado de la simulación:

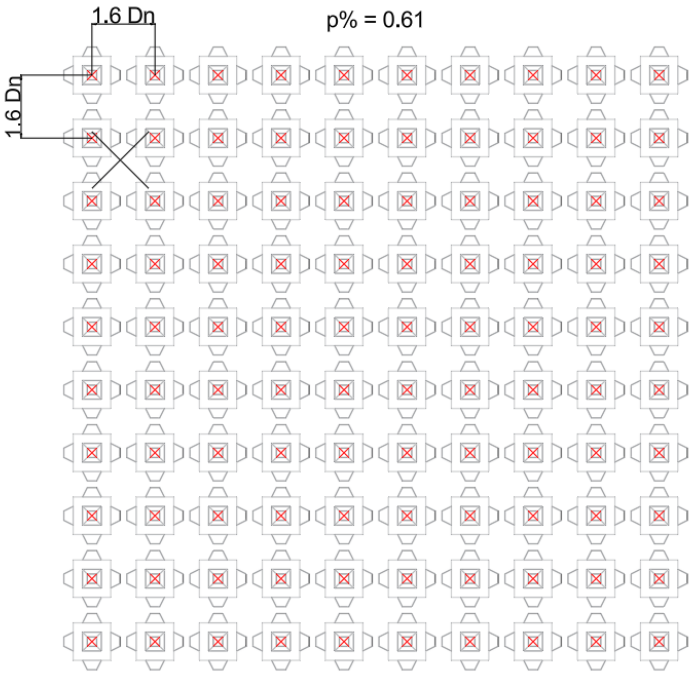


*Figura 17 Malla de colocación teórica 1,6*Dn. Fuente: Elaboración propia*

$$p_n = 1 - \frac{1}{a \cdot b} = 1 - \frac{1}{1.6 \cdot 1.6} = 61\% \quad (4)$$

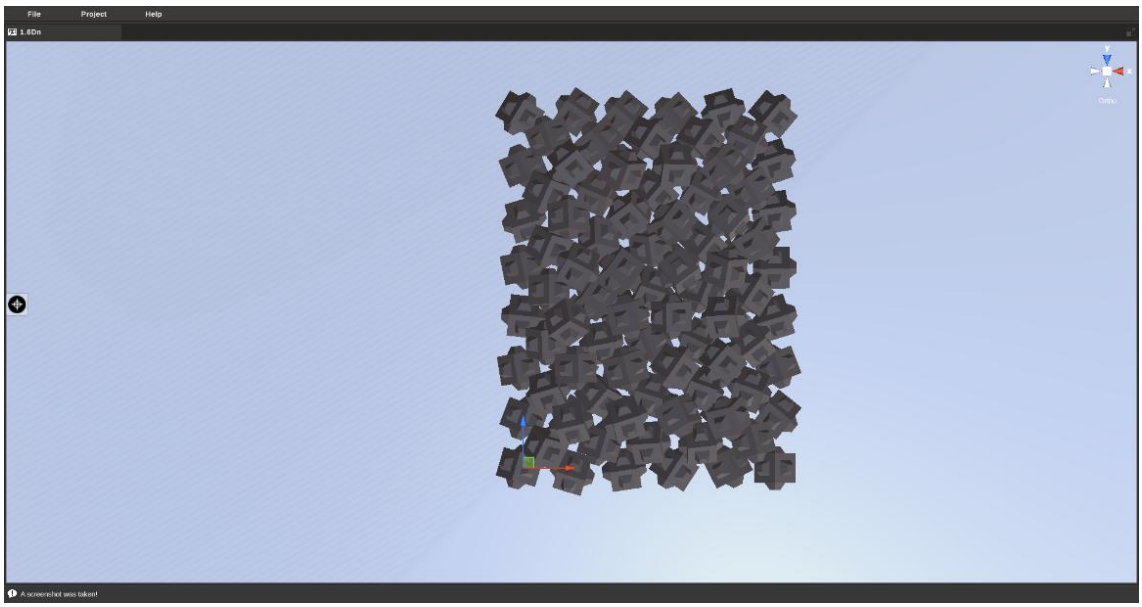


Figura 18 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia

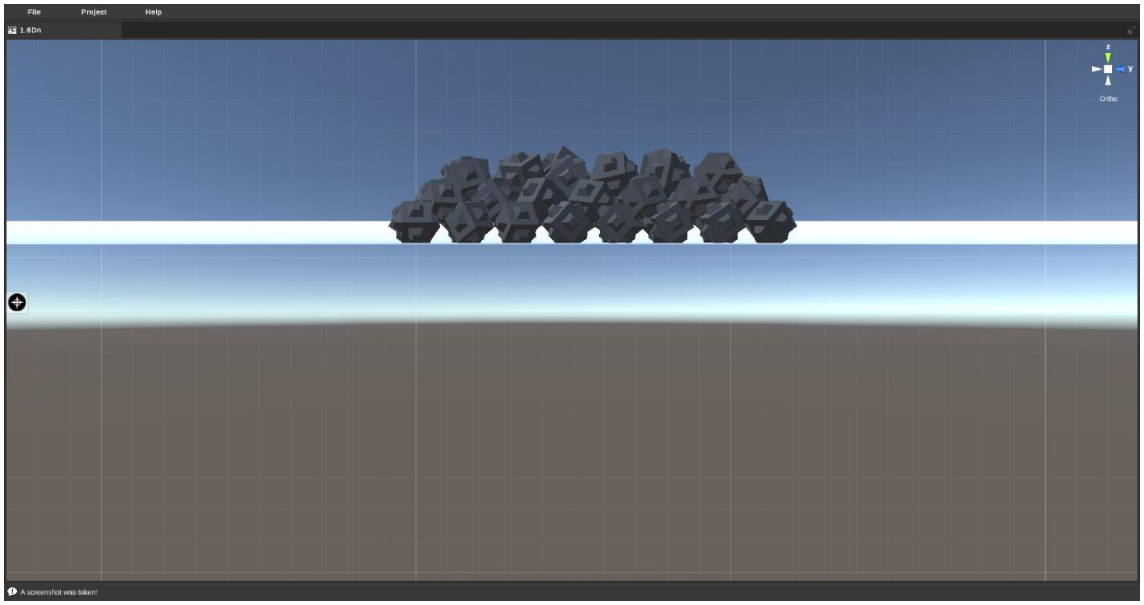


Figura 19 Simulación finalizada del dique en vista desde el eje x. Fuente: Elaboración propia

C1 (1,6*Dn) sin error gruísta	
ε_{rms}/D_n	N%
0,110	0%

Tabla 7 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 3 sin error añadido. Fuente: Elaboración propia.

Esta malla presenta unos errores muy similares a los de la alternativa anterior, visualmente parece que funciona bien y el error cuadrático medio tiene el mismo orden de magnitud que la alternativa 2, solo que 0,01 más alto.

Este aumento en el error cuadrático medio puede deberse a que, al estar las piezas más separadas y por tanto haber más hueco entre las mismas, cuando caen los Cubípodos de la segunda capa sobre la capa base, se introduce más parte del Cubípodo en dichos huecos, entrando en contacto con los ya colocados con una parte más central de la pieza que cuando la separación es 1,55*Dn.

Esto lo que puede ocasionar es que las piezas ya colocadas se vean empujadas con más fuerza, provocando la pieza que ha caído una especie de expansión superior a la que se podría producir si la separación fuera un poco menor.

Aun así, el error que diferencia las dos últimas alternativas es muy pequeño, por lo que se puede asumir que ambas presentan la misma mejora aproximadamente.

3.3.2. CON ERROR AÑADIDO

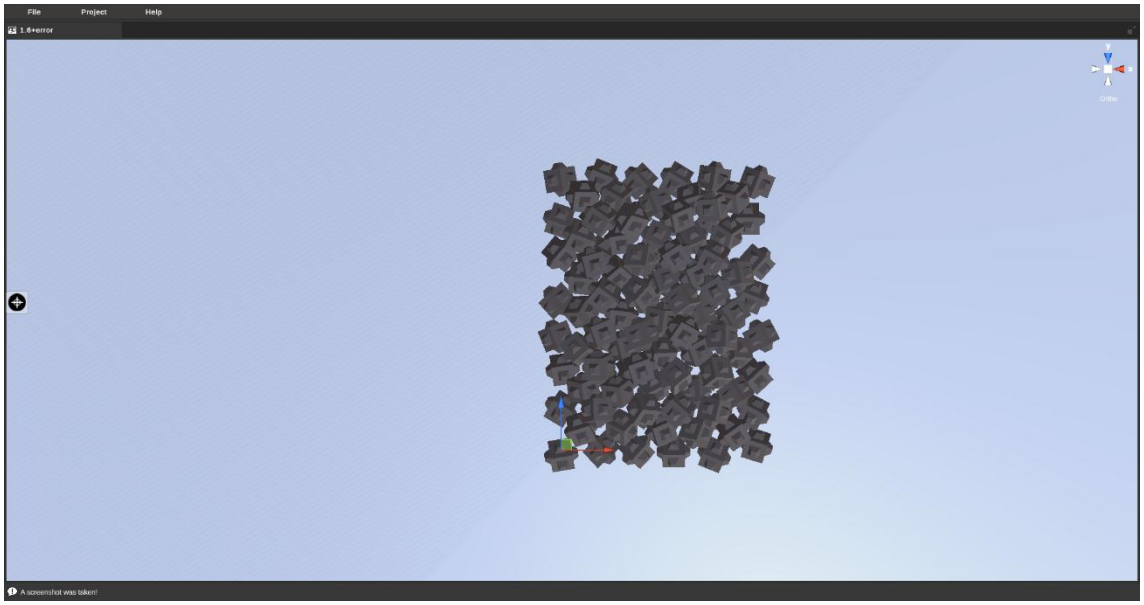


Figura 20 Simulación finalizada en planta del dique. Fuente: Elaboración propia

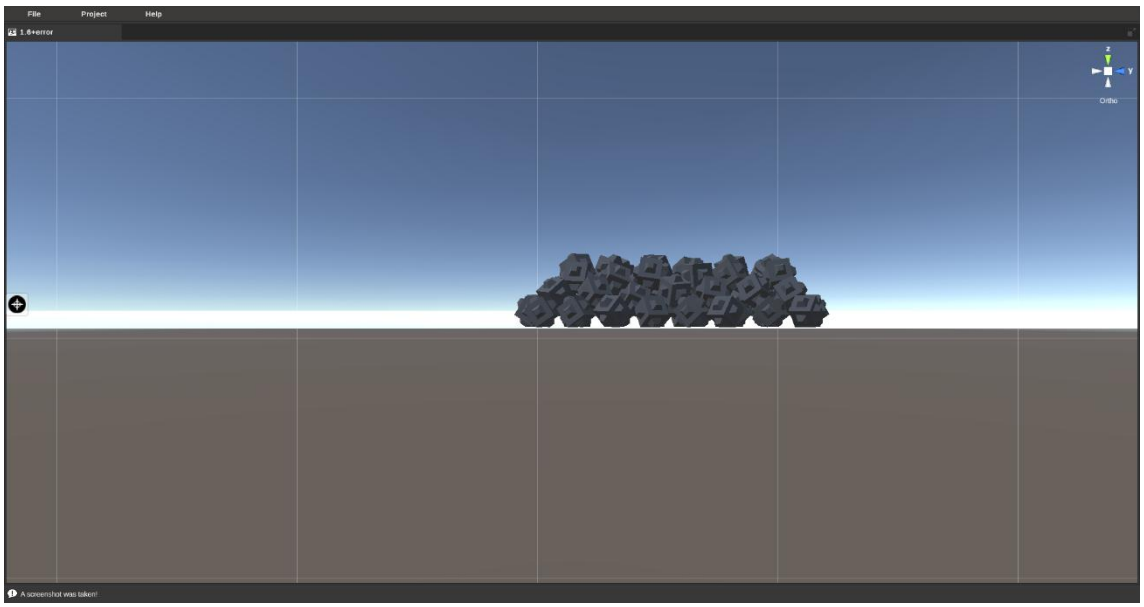


Figura 21 Simulación finalizada del dique en vista desde el eje x. Fuente: Elaboración propia

C1 (1,6*Dn) con error gruísta	
ε_{rms}/D_n	N%
0,185	0%

Tabla 8 Resultado del error cuadrático medio y el N% de la alternativa 3 con error añadido. Fuente: Elaboración propia.

De nuevo, el resultado es visiblemente positivo y el error cuadrático medio es más bajo que el de la malla original y la alternativa 1. Pero se vuelve a producir un aumento en el error comparando con la segunda alternativa debido al "efecto de expansión" que producen las piezas de la segunda capa sobre las de la primera.

3.4. ELECCIÓN DE LA MALLA DE COLOCACIÓN

A continuación, se muestra un resumen de los resultados obtenidos de todas las mallas simuladas:

	SIN ERROR		CON ERROR	
	ε_{rms}/D_n	N%	ε_{rms}/D_n	N%
ORIGINAL	0,136	0%	0,580	12%
ALTERNATIVA 1	0,127	0%	0,508	7%
ALTERNATIVA 2	0,100	0%	0,138	0%
ALTERNATIVA 3	0,110	0%	0,185	0%

Tabla 9 Resumen de las simulaciones de las alternativas. Fuente: Elaboración propia.

Para escoger la alternativa final, además de los resultados obtenidos con las simulaciones, se va a tener en cuenta el factor económico.

También haría falta valorar la estabilidad hidráulica de cada malla, pero no hay información disponible por no estar ensayadas en el laboratorio, por lo que se omite este condicionante.

3.4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CRITERIOS

RESULTADO SIMULACIONES: Con este criterio se va a valorar el resultado del error cuadrático medio y el N% de las 6 simulaciones realizadas, valorando positivamente las que tengan menos error.

ECONÓMICO: Con este criterio se busca obtener un orden de magnitud, (suponiendo que todas las mallas corresponderían al mismo diseño y ubicación) qué malla de colocación proporciona la opción más económica en base a lo siguiente:

Para cubrir la profundidad marcada de 3,5 m, se obtendrá el diámetro de los Cubípodos junto con los coeficientes de capa de la malla escogida de la siguiente manera (J. Molines et al. (2021))

$$H = \sum_{J=1}^{j=N} k_{\Delta j} D_n \quad (5)$$

Siendo

- H la altura total de la estructura
- $k_{\Delta j}$ el coeficiente de capa correspondiente a la capa j
- D_n el diámetro del Cubípodo

Los coeficientes de capa serán menores en los casos con mayor separación de malla**,** ya que la altura total de la estructura disminuye debido a la introducción de los Cubípodos de las capas superiores en los huecos de las capas ya colocadas. Estos huecos aumentan a medida que lo hacen las separaciones a y b, favoreciendo un mayor encaje entre piezas y reduciendo la altura final del conjunto.

Por tanto, para cubrir una misma profundidad, los casos en los que los coeficientes de capa sean menores, se necesitarán diámetros más grandes, lo que se traduce en opciones más caras, principalmente, por la diferencia en el consumo de hormigón para su construcción.

3.4.2. ANÁLISIS MULTICRITERIO Y RESULTADO

A continuación, se muestra la matriz de comparación por pares para obtener los pesos de los criterios, haciendo uso de la escala fundamental de Saaty, para poder realizar las comparaciones de forma cualitativa:

Juicio Verbal / Juicio de Valor	Comentarios	Juicio Numérico
Igual importancia/preferencia	EL Criterio A es igual de importante que el B Ambos criterios contribuyen igualmente al objetivo	1
Importancia/preferencia igual a moderada		2
Importancia/preferencia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente el criterio A sobre el B	3
Importancia/preferencia moderada a grande		4
Importancia/preferencia grande o esencial	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B	5
Importancia/preferencia grande a muy grande		6
Importancia/preferencia muy grande	EL criterio A es mucho mas importante que el B, tal y como se demuestra en la practica (importancia demostrada)	7
Importancia/preferencia muy grande a extremada		8
Importancia/preferencia extremada	La importancia del criterio A sobre el B es irrefutable	9
La escala 1.1,1.2…1.9; 2.1,…2.9, etc. (x.y) o incluso mas fina, puede ser utilizada para la comparación de elementos cuya importancia/preferencia está muy proxima.		x.y; x.yz
Si el criterio A al se comparado con el B tiene un valor numérico *j* , entonces el criterio B comparado con el A tiene el valor recíproco *1/j.*		Valores Inversos
Cuando los parámetros son cuantitativos, la comparación se realiza calculando la relación numérica entre ambos.		

Figura 22 Escala fundamental de comparación por pares (Saaty, 1980): Fuente: Yepes (2018/2022)

Con esto en cuenta, se obtiene la siguiente tabla:

	RESULTADOS SIMULACIONES	ECONÓMICO
RESULTADOS SIMULACIONES	1,00	3,00
ECONÓMICO	0,33	1,00

Tabla 10 Matriz de comparación por pares de ambos criterios. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se hace la comparación, se obtienen los pesos, los cuales salen de la siguiente forma:

$$\%\ peso\ de\ resultado\ simulaciones = \frac{3}{3+1} \times 100 = 75\%$$

$$\%\ peso\ valor\ económico = \frac{1}{3+1} \times 100 = 25\%$$

Como solo se decide un valor en la matriz de comparación por pares de los criterios, no hace falta comprobar la consistencia.

Con los pesos de cada criterio definidos, se da paso a la comparación de las alternativas en función de cada uno de ellos.

RESULTADOS SIMULACIONES	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
ALTERNATIVA 1	1,00	0,25	0,25
ALTERNATIVA 2	4,00	1,00	2,00
ALTERNATIVA 3	4,00	0,50	1,00

Tabla 11 Matriz de comparación por pares de las alternativas para el criterio de resultados de las simulaciones. Fuente: Elaboración propia.

ECONÓMICO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
ALTERNATIVA 1	1,00	2,00	3
ALTERNATIVA 2	0,50	1,00	2,00
ALTERNATIVA 3	0,33	0,50	1,00

Tabla 12 Matriz de comparación por pares de las alternativas para el criterio económico. Fuente: Elaboración propia.

Una vez completadas ambas matrices, se normalizan para conseguir el valor del vector de porcentajes de cada alternativa en cada criterio:

RESULTADOS SIMULACIONES	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	
ALTERNATIVA 1	0,11	0,14	0,08	**11%**
ALTERNATIVA 2	0,44	0,57	0,62	**54%**
ALTERNATIVA 3	0,44	0,29	0,31	**35%**
	1,00	1,00	1,00	100%

Tabla 13 Matriz de normalizada del criterio de resultados de simulaciones. Fuente: Elaboración propia.

ECONÓMICO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	
ALTERNATIVA 1	0,55	0,57	0,50	**54%**
ALTERNATIVA 2	0,27	0,29	0,33	**30%**
ALTERNATIVA 3	0,18	0,14	0,17	**16%**
	1,00	1,00	1,00	100%

Tabla 14 Matriz de normalizada del criterio económico. Fuente: Elaboración propia.

Se comprueba que sean consistentes comparando el ratio de consistencia (2) con los límites de porcentaje máximo según el tamaño de la matriz.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (6)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Figura 23 Índice aleatorio RI según el tamaño de la matriz. Fuente: Yepes (2018/2022)

Tamaño de la matriz (n)	Ratio de consistencia
3	5%
4	9%
5 o mayor	10%

Figura 24 Máximos valores de CR. Fuente: Yepes (2018/2022)

Para ambas matrices, el valor de λ_{max} se obtiene como el promedio de los cocientes resultantes de dividir cada componente del producto de la matriz de comparación por pares entre el correspondiente componente del vector de pesos, siendo este último el vector de porcentajes obtenido tras la normalización de las matrices.

$$Resultados\ simulaciones\ \lambda_{max} = 3{,}05$$

$$Económico\ \lambda_{max} = 3{,}01$$

Por tanto:

$$Resultados\ simulaciones\ CI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1} = \frac{3{,}05-3}{3-1} = 0{,}03 \quad (8)$$

$$Económico\ CI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1} = \frac{3{,}01-3}{3-1} = 0{,}005 \quad (9)$$

$$Resultados\ simulaciones\ CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0{,}03}{0{,}58} = 5\% \quad (10)$$

$$Económico\ CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0{,}005}{0{,}58} = 1\% \quad (11)$$

Como ambos criterios cumplen con la condición de CR<5%, las matrices son consistentes.

Por tanto, se finaliza el método con la multiplicación de cada alternativa ponderada en cada criterio por el peso del criterio total. La alternativa que tenga un resultado mayor será la escogida.

$$\begin{bmatrix} 11\% & 54\% \\ 54\% & 30\% \\ 35\% & 16\% \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 75\% \\ 25\% \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 22\% \\ 48\% \\ 30\% \end{Bmatrix}$$

El porcentaje más alto obtenido es 48%, el cual corresponde a la **Alternativa 2**, por tanto, se dispondrá de una malla cuadrada de separación entre Cubípodos igual a 1,55*Dn.

4. ELECCIÓN DE LA DISTIBUCIÓN EN PLANTA

4.1. CONSIDERACIONES COMUNES EN LAS ALTERNATIVAS

Todas las alternativas se van a ubicar suponiendo que el arrecife que se encontraría en el lugar de su implantación está totalmente deteriorado, ya que no se ha encontrado información exacta de la ubicación de este, solo aproximaciones.

Por otro lado, aunque tampoco se tiene información precisa sobre la batimetría de la zona, se puede confirmar la existencia de irregularidades en la misa y que la profundidad en algunos puntos aumenta rápidamente mar adentro. Es por ello por lo que se comprueba, con la información que se tiene, que las alternativas no coincidan con estos descensos, con el fin de evitar problemas a la hora de implantar los diques.

Con la obtención del perfil de la zona donde se ubican las alternativas y el comportamiento de las piezas en PLACSIM, se comprueba que estas irregularidades no afectan a la construcción de las alternativas. Aún así, habría que realizar una campaña batimétrica e inspeccionar con buzos que la zona es adecuada.

Destacar también que la alternativa final se compondrá no solo de la implantación de un sistema de diques, sino también tendrá una parte de desmantelamiento de los geotextiles situados en la costa. Este factor se omite en el análisis multicriterio por ser común a las dos.

ALTERACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Se van a diseñar las alternativas con la idea principal de simplemente reponer la barrera arrecifal deteriorada, por lo que no se busca regenerar y alternar la línea de costa. Por tanto, los diques no generarán tómbolo ni Hemitómbolo. Para ello, según Hsu y Silvester (1990), se tiene que cumplir que la relación S/B sea mayor a 5:

	Relación S/B (Hsu y Silvester)
Tómbolo	0,192
Hemitómbolo	0,75 < 5
No alteración	5 <

Tabla 15 Relaciones S/B para alteraciones en el frente litoral. Fuente: Hsu y Silvester (1990)

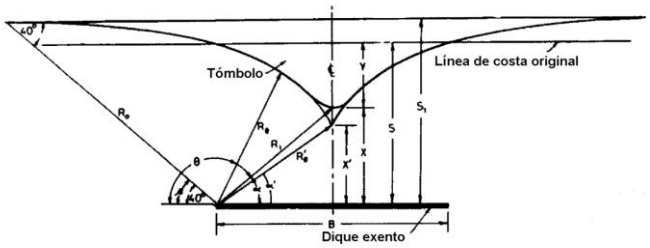


Figura 25 Esquema de la variación en planta de la línea de playa según la disposición del dique. Fuente: Hsu y Silvester, 1990.

Por ello, predimensionando con una longitud de diques B = 200 metros y haciendo caso a las indicaciones mostradas en la

Tabla 15, se escoge la relación S/B = 5, obteniendo que el dique debe estar situado como mínimo a una distancia de S = 1.000 metros de la línea de costa.

Se comprueba la distancia a la que se encuentra el sistema arrecifal de la costa de forma aproximada.

Figura 26 Mínima distancia aproximada a la que se debería de implantar las alternativas. Fuente: Google Earth

Según lo indicado en la

Tabla 15, la ubicación planteada para la colocación de las alternativas cumple con la relación estimada de Hsu y Silvester, 1990, para no producir ni tómbolo ni hemitómbolo.

TRANSMISIÓN DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE

La construcción de una infraestructura marítima tiene un efecto positivo en cuanto a la reducción de la energía del oleaje al pasar por ella, ya que las olas impactan antes en la infraestructura y la energía que pasa en su trasdós es menor.

Para tener un orden de magnitud en cuanto a este fenómeno con las alternativas propuestas, se hace uso de la siguiente fórmula, correspondiente a diques homogéneos de baja cota de coronación de 3 capas, obtenida del artículo *Hydraulic Performance of Homogeneous Low-Crested Structures* (Medina et al, 2019)

$$C_t(C3) = 0{,}60 - 0{,}35(\frac{R_c}{H_{si}}) \quad (12)$$

Al ser diques de baja coronación, el término que va multiplicando a R_c/Hsi es nulo, ya que R_c, que es el valor del francobordo, se define como la distancia entre la cota de la estructura y la lámina de agua. Por tanto, al ser diques de baja cota de coronación, la altura coincide con el nivel del agua, por lo que no presenta valor de francobordo.

Por tanto, con esta ecuación se llega a la conclusión de que la energía del oleaje que pasa por el dique se reduce un 40%.

Además, Lozano (2021) propone otra estimación del coeficiente de transmisión, que corresponde a la siguiente ecuación.

$$K_t = -5 \cdot s_{0p} - 0{,}3 \cdot tanh\left(\frac{R_c}{H_{m0,i}}\right) + 0{,}7 \quad (13)$$

Al igual que antes, el francobordo es nulo, por lo que la ecuación queda de la siguiente forma:

$$K_t = -5 \cdot s_{0p} + 0{,}7 \quad (14)$$

S_{0p} es el valor del peralte, el cual se define como la relación entre la altura de ola y su propia longitud, en este caso, en aguas profundas

$$s_{0p} = \frac{hs}{L_0} \quad (15)$$

Siendo:

$$L_0 = \frac{g*T^2}{2\pi} = \frac{9.8*\left(12*hs^{0,21}\right)^2}{2\pi} = \frac{9.8*(18{,}57)^2}{2\pi} = 538 \quad (16)$$

$$s_{0p} = \frac{8}{538} = 0.015 \quad (17)$$

Por tanto, el coeficiente de transmisión da el siguiente valor:

$$K_t = -5 \cdot 0{,}015 + 0{,}7 = \ 63\% \quad (18)$$

Por lo que se concluye que la energía de transmisión a la costa se reduciría un 40% en cada dique implantando.

También hay que destacar que puede haber fenómenos extremales como los ciclones, en los que la marea aumente y la estructura quede más sumergida, por lo que el francobordo sí que estaría presente y el coeficiente de transmisión aumentaría en ese momento de forma puntual.

4.2. DEFINICIÓN DE LOS CUBÍPODOS Y LA SECCIÓN

4.2.1. DEFINICIÓN DE LOS CUBÍPODOS A EMPLEAR

Se han obtenido los coeficientes de capa correspondientes a la nueva malla para poder concretar los diámetros de los Cubípodos, quedando el siguiente esquema de los coeficientes de capa.

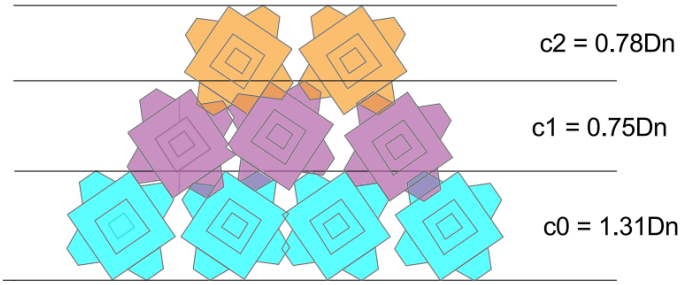


Figura 27 Coeficientes de capa para el diseño de la estructura. Fuente: Elaboración propia

Por tanto, imponiendo que la altura del dique coincida con la profundidad (3,5 metros), y haciendo uso de la ecuación $H = \sum_{J=1}^{j=N} k_{\Delta j} D_n$ (5), ya expuesta en el apartado 3.4.1, se obtiene el diámetro de los Cubípodos a emplear:

$$(1{,}31 + 0{,}75 + 0{,}78) \cdot Dn = 3{,}5 \rightarrow Dn = \frac{3{,}5}{1{,}31 + 0{,}75 + 0{,}78} \approx 1{,}2\ m$$

Además, se calcula el peso de cada Cubípodo usando de referencia la densidad de las piezas con las que se han hecho los ensayos físicos en el laboratorio, la cual es igual a γ=2,4g/cm^3

$$W = \gamma \cdot Dn^3 = (2{,}4 \cdot 120^3) \times 10^{-6} = 4{,}15\ toneladas$$

4.2.2. DEFINICIÓN DE LA SECCIÓN

El diseño seguirá la malla ensayada en PLACSIM y escogida mediante el análisis multicriterio, la cual sabiendo las dimensiones de las piezas queda de la siguiente forma:

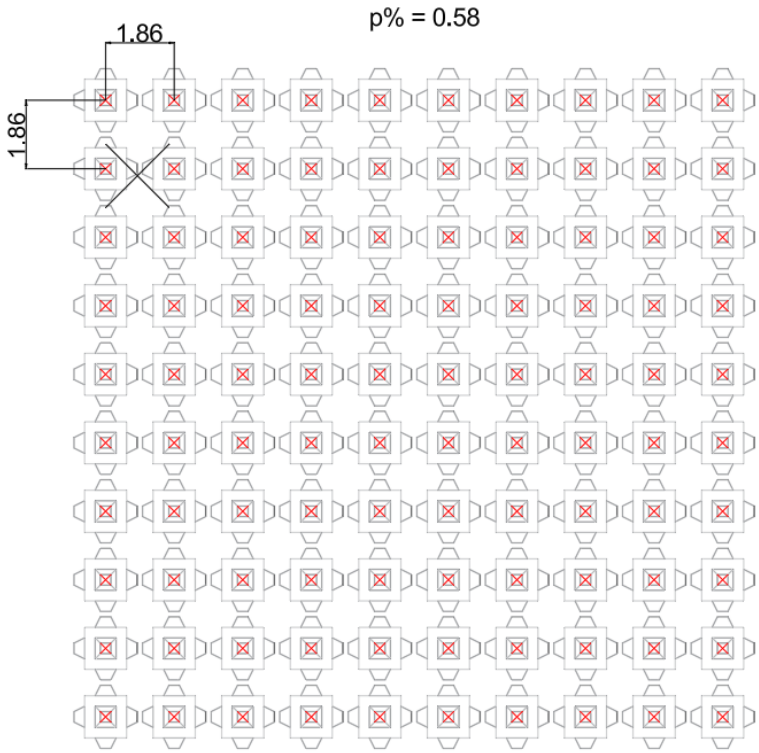


Figura 28 Mallas de colocación según el diámetro del Cubípodo. Fuente: Elaboración propia

Y las secciones transversales de los diques seguirán los valores que se muestran en la siguiente figura:

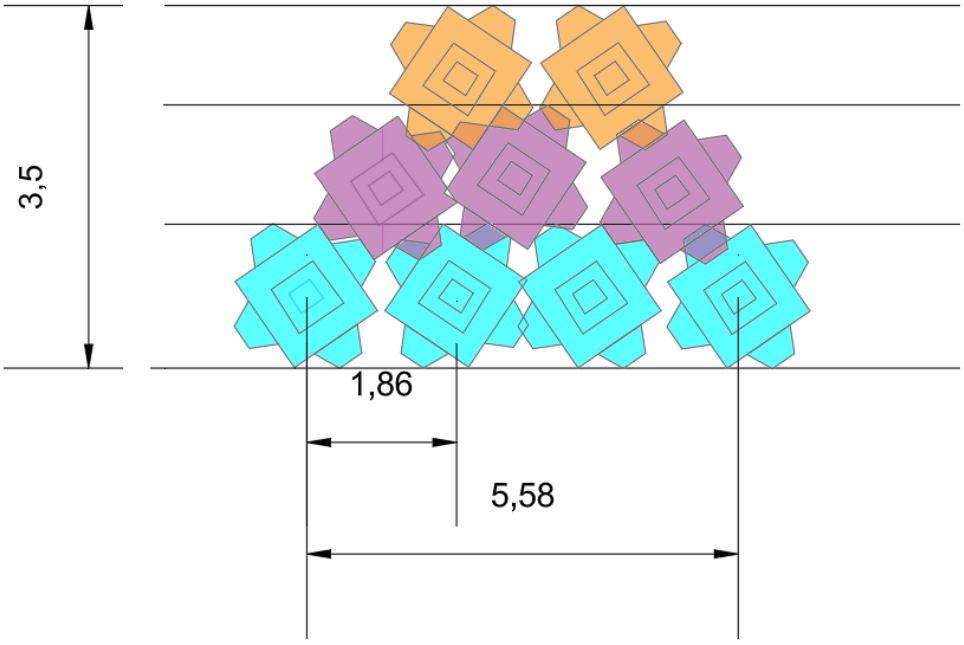


Figura 29 Sección transversal según la profundidad de la estructura. Fuente: Elaboración propia.

4.3. ALTERNATIVA 1: 3 Diques de 200 metros de longitud separados 200 metros

En esta alternativa se propone la colocación de 3 diques homogéneos de baja cota de coronación, en frente de la playa de Mayakobá, de longitud 200 metros, como se había indicado antes, y separados entre si la misma longitud.

Figura 30 Planteamiento de la Alternativa 1 en planta. Fuente: Elaboración propia.

Figura 31 Planteamiento de la Alternativa 1 en planta más ampliada. Fuente: Elaboración propia.

4.3.1. ESTIMACIÓN COSTE EJECUCIÓN

Para poder tener una estimación del coste de ejecución de los diques se hace uso del Manual del Cubípodo, el cual estima el coste por unidad de Cubípodo, siguiendo la siguiente gráfica con los pesos repartidos para obtener el coste final.

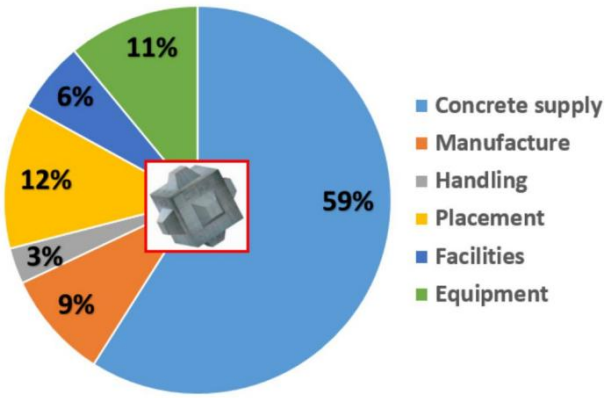


Figura 32 Factores del coste total de un Cubípodo con sus pesos. Fuente: Cubipod Manual (2015).

La fórmula que se usa para obtener el valor total es la siguiente, propuesta por Corredor et al (2008) y Medina et al (2010):

$$C_C\left[\frac{€}{m^3}\right] = (265 + HOR) + 1\left[10^5\left(\frac{1}{\ln(V_C W_C)}\right)^2 - 10^4\left(\frac{1}{\ln(V_C W_C)}\right)\right] \quad (19)$$

Siendo:

- HOR = Coste del suministro de hormigón unitario (€/m^3).
- Vc = Volumen total (m^3) y
- Wc = Peso (t) por unidad de Cubípodo.

Para determinar el valor del volumen total y poder tener también luego el coste total de la alternativa, se calcula el número de Cubípodos necesarios para la alternativa propuesta.

Cada dique de 200 metros de largo, con la sección ya descrita para profundidad de 3,5 metros, presentará el siguiente número de piezas por capa y total:

	1 dique de 200 metros	**Total alternativa 1 (3 diques)**
Capa 1	432	1.296
Capa 2	321	963
Capa 3	212	636
Total	965	2.895

Tabla 16 Número de Cubípodos totales en la Alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

Con el número de piezas, se calcula el volumen necesario de hormigón:

$$Vtotal = 2.895(Cubípodos) \times 1{,}2^3 \left(\frac{m^3}{Cubípodo}\right) = 5.002{,}56\, m^3 \quad (20)$$

Por tanto, imponiendo un coste de suministro de hormigón igual a 65 €/m^3, la ecuación $C_C\left[\frac{€}{m^3}\right] = (265 + HOR) + 1\left[10^5\left(\frac{1}{\ln(V_C W_C)}\right)^2 - 10^4\left(\frac{1}{\ln(V_C W_C)}\right)\right]$ (19) queda de la siguiente manera:

$$C_C\left[\frac{€}{m^3}\right] = (265 + 65) + 1\left[10^5\left(\frac{1}{\ln(5.002{,}56 \cdot 4{,}15)}\right)^2 - 10^4\left(\frac{1}{\ln(5.002{,}56 \cdot 4{,}15)}\right)\right] = 335{,}06\ €/m^3 \quad (21)$$

Por lo que el precio total aproximado de la alternativa 1 es:

$$Precio\ total\ (€) = 335{,}06 \times 5.002{,}56 = \mathbf{1.681.152{,}66}\ € \quad (22)$$

4.4. ALTERNATIVA 2: 2 Diques de 200 metros de longitud separados 300 metros

En esta alternativa se propone disminuir el número de diques a 2, pero con el fin de abarcar la misma longitud de costa, la separación entre ellos aumenta 300 metros.

Figura 33 Planteamiento de la Alternativa 2 en planta. Fuente: Elaboración propia.

Figura 34 Planteamiento de la Alternativa 1 en planta más ampliada. Fuente: Elaboración propia.

4.4.1. ESTIMACIÓN COSTE EJECUCIÓN

Se realiza el mismo procedimiento que en la alternativa 1, pero para 2 diques en vez de 3, dando el siguiente resultado de coste estimado:

	1 dique de 200 metros	Total alternativa 2 (2 diques)
Capa 1	432	864
Capa 2	321	642
Capa 3	212	424
Total	965	1.930

Tabla 17 Número de Cubípodos totales en la Alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

$$Vtotal = 1.930(Cubípodos) \times 1{,}2^3 \left(\frac{m^3}{Cubípodo}\right) = 3.335{,}04\ m^3 \quad (23)$$

$$C_C \left[\frac{€}{m^3}\right] = (265 + 65) + 1\left[10^5 \left(\frac{1}{\ln(3.335{,}04 \cdot 4{,}15)}\right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(3.335{,}04 \cdot 4{,}15)}\right)\right] = 423{,}97\ €/m^3 \quad (24)$$

Finalmente, precio total aproximado de la alternativa 2 es:

$$Precio\ total\ (€) = 423{,}97 \times 3.335{,}04 = \mathbf{1.413.946{,}39}\ € \quad (25)$$

4.5. ELECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

4.5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CRITERIOS

En este apartado se busca exponer y justificar los criterios con los que se evaluarán las alternativas propuestas en el posterior análisis multicriterio.

ECONÓMICO: Se compara de forma estimada únicamente el coste de ejecución de los diques, valorando positivamente la alternativa más barata de las dos.

El coste total de forma profundizada se calculará solo para la alternativa final.

EFICIENCIA: En este criterio se mide la calidad con la que cada alternativa resuelve el problema del blanqueamiento de los arrecifes de coral del mar Caribe y, por tanto, el grado de mejora respecto a la situación actual.

Esto se realizará con el beneficio aportado a los mismos gracias a la estimación de la reducción de la energía del oleaje tras su implantación.

Para ello, se sabe que la implantación de un dique homogéneo de baja cota de coronación en las condiciones climáticas descritas reduce la energía del oleaje un 40% aproximadamente. Aún así, las alternativas constan de sistemas de diques, por lo que se analiza si actúan como una barrera total o parcial ante esta protección a la costa.

En la literatura se puede encontrar que, cuanto mayor es el ratio entre la distancia entre extremos de dique y la longitud de onda de la ola, G/L, mayor es la energía que se transmite (Bricio, 2009).

Para saber si las alternativas disipan la misma energía o cuál de las dos funciona mejor, se hace uso del ratio de exposición (Hanson y Raus (1990)):

$$Re = \sum \frac{G_i}{Gi+Li} \in [0{,}25 < Re < 0{,}66] \quad (26)$$

El cual indica la fracción de energía capaz de llegar a la costa a través de los huecos entre los diques.

Se realiza esta operación para ambas alternativas, y se obtiene el siguiente resultado:

$$Alternativa\ 1\ Re = \frac{200}{200+200} = 0{,}5 \in [0{,}25 < Re < 0{,}66] \quad (27)$$

$$Alternativa\ 2\ Re = \frac{300}{300+200} = 0{,}6 \in [0{,}25 < Re < 0{,}66] \quad (28)$$

Se superponen en planta ambas alternativas para ver la diferencia de forma visual en cuanto a la disipación de energía.

Con la primera alternativa, se disipa en una longitud mayor que en la alternativa 2.

Por otro lado, la alternativa 2 disipa el 40% de la energía en la zona en la que coincide con el dique central de la primera, por tanto, en ese tramo disminuye la energía del oleaje lo mismo aproximadamente.

También, las zonas del 60% de energía transmitida por coincidir con los diques de la segunda alternativa, coinciden con los huevos entre los extremos de la primera, por tanto, en esa zona, la protección con la primera alternativa es mayor al haber una disipación del 50% frente al 40% del número 2.

Se concluye entonces que la alternativa 1 es más favorable en términos de transmisión del oleaje.

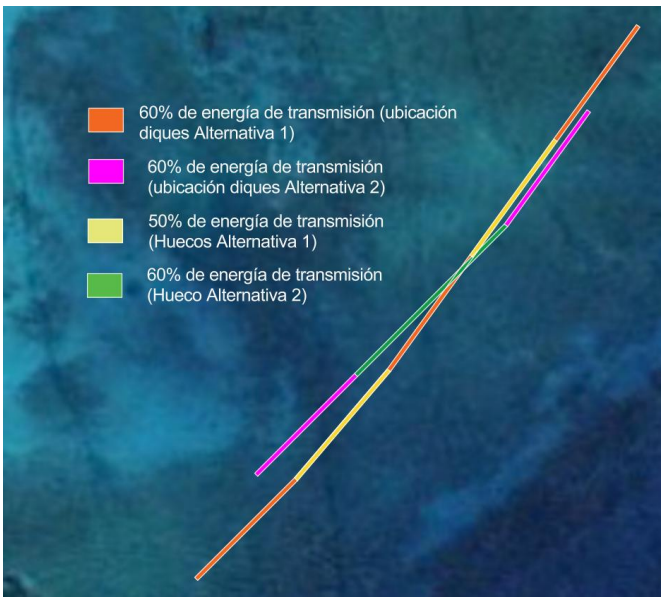


Figura 35 Esquema en planta de los porcentajes de transmisión del oleaje. Fuente: Elaboración propia.

AMBIENTAL Y SOCIAL: En este criterio se evaluará el grado de satisfacción de la población, en el cual se tendrá en cuenta el impacto visual, que no interfiera en posibles actividades realizadas en la zona de actuación ni en la seguridad de las personas.

Por otro lado, también se tendrá en cuenta el nivel de afección/impacto ambiental a la zona que puede suponer la construcción de cada alternativa, así como su facilidad para desmantelarla en caso de que fuera necesario.

La alternativa 2, al ser la que menos piezas requiere es la más beneficiosa, ya que es la más rápida de desmantelar y construir y la huella de carbono al producir los Cubípodos también es menor.

4.5.2. ANÁLISIS MULTICRITERIO Y RESULTADO

Se realiza de nuevo el método AHP para las dos alternativas y los criterios descritos en el punto anterior:

	ECONÓMICO	**SOCIAL**	**FUNCIONAL**
ECONÓMICO	1,00	3,00	0,5
SOCIAL	0,33	1,00	0,33
FUNCIONAL	2,00	3,00	1,00

Tabla 18 Matriz de comparación por pares de los criterios para escoger la distribución en planta. Fuente: Elaboración propia

CRITERIOS	ECONÓMICO	SOCIAL	FUNCIONAL	
ECONÓMICO	0.30	0.43	0.27	**33%**
SOCIAL	0.10	0.14	0.18	**14%**
FUNCIONAL	0.60	0.43	0.55	**53%**
	1.00	1.00	1.00	100%

Tabla 19 Matriz normalizada de comparación por pares de los criterios para escoger la distribución en planta. Fuente: Elaboración propia

Se comprueba la consistencia, la cual sale favorable con:

- $\lambda_{max} = 3,05$
- CI = 0,03
- CR = 4,5% < 5%

A continuación, se realizan las matrices de comparación por pares de cada criterio según las dos alternativas y sus normalizadas para obtener los pesos de cada una según los criterios.

ECONÓMICO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2
ALTERNATIVA 1	1.00	0.25
ALTERNATIVA 2	4.00	1.00

Tabla 20 Matriz de comparación por pares de las alternativas para el criterio económico. Fuente: Elaboración propia.

ECONÓMICO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	**pesos**
ALTERNATIVA 1	0.20	0.20	**20%**
ALTERNATIVA 2	0.80	0.80	**80%**
	1.00	1.00	100%

Tabla 21 Matriz normalizada de comparación por pares de las alternativas para el criterio económico. Fuente: Elaboración propia.

SOCIAL	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2
ALTERNATIVA 1	1.00	0.33
ALTERNATIVA 2	3.00	1.00

Tabla 22 Matriz de comparación por pares de las alternativas para el criterio de afección social. Fuente: Elaboración propia.

SOCIAL	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	**pesos**
ALTERNATIVA 1	0.25	0.25	**25%**
ALTERNATIVA 2	0.75	0.75	**75%**
	1.00	1.00	100%

Tabla 23 Matriz normalizada de comparación por pares de las alternativas para el criterio de afección social. Fuente: Elaboración propia.

FUNCIONAL	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2
ALTERNATIVA 1	1.00	4.00
ALTERNATIVA 2	0.25	1.00

Tabla 24 Matriz de comparación por pares de las alternativas para el criterio de funcionalidad. Fuente: Elaboración propia.

FUNCIONAL	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	**pesos**
ALTERNATIVA 1	0.80	0.80	**80%**
ALTERNATIVA 2	0.20	0.20	**20%**

Tabla 25 Matriz normalizada de comparación por pares de las alternativas para el criterio de funcionalidad. Fuente: Elaboración propia.

$$\begin{bmatrix} 20\% & 25\% & 80\% \\ 80\% & 75\% & 20\% \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 33\% \\ 14\% \\ 53\% \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{52}\% \\ 48\% \end{Bmatrix}$$

Finalmente, el mayor porcentaje tiene el valor de 52%, el cual corresponde a la **Alternativa 1.**

5. DISEÑO FINAL

La alternativa final se compondrá de la construcción de 3 diques homogéneos de baja cota de coronación formados por Cubípodos, de longitud igual a 200 metros y separados 200 metros también.

Además, se desmantelará el sistema de geotextiles ubicado en frente de la línea de costa de la playa de Mayakobá.

5.1. DIMENSIÓN DE LOS CUBÍPODOS

El Cubípodo responde a las siguientes dimensiones, en la cual L no es el diámetro nominal equivalente que se ha indicado anteriormente para el prediseño de las alternativas.

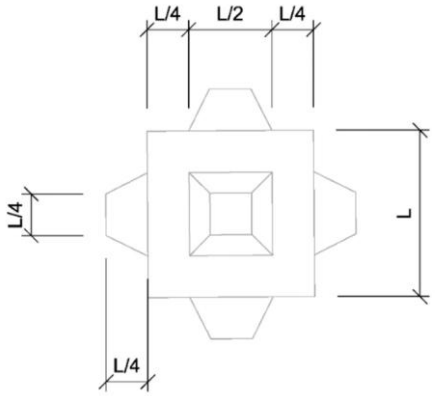


Figura 36 Dimensiones relativas del Cubípodo. Fuente: Cubipod Manual, 2016.

L y D_n responden la siguiente relación geométrica específica de esta pieza:

$$L = \frac{Dn}{1{,}068} = \frac{1{,}2}{1{,}068} = 1{,}1\ metros$$

Por otro lado, se impone una forma cónica para que el desencofrado de las piezas sea más sencillo, con una inclinación de 3,5 % en las caras (Medina y Gómez Martín (2015)), dando lugar a las siguientes dimensiones

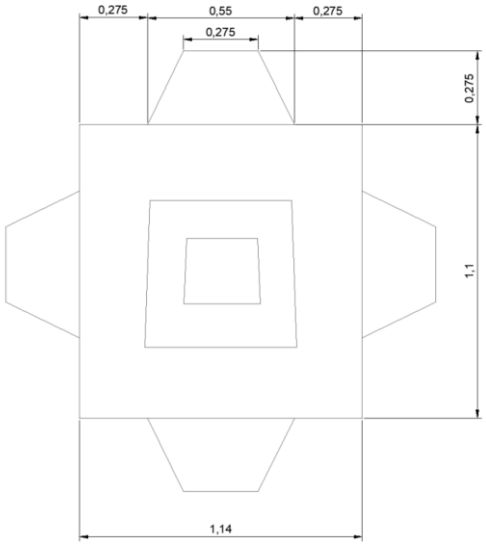


Figura 37 Dimensiones finales del Cubípodo. Fuente: Elaboración propia.

5.2. FOTOS SIMULACIÓN EN PLACSIM ALTERNATIVA FINAL

A continuación, se muestran las figuras correspondientes a las capturas sacadas de la simulación en C1 correspondiente a la construcción de la alternativa final.

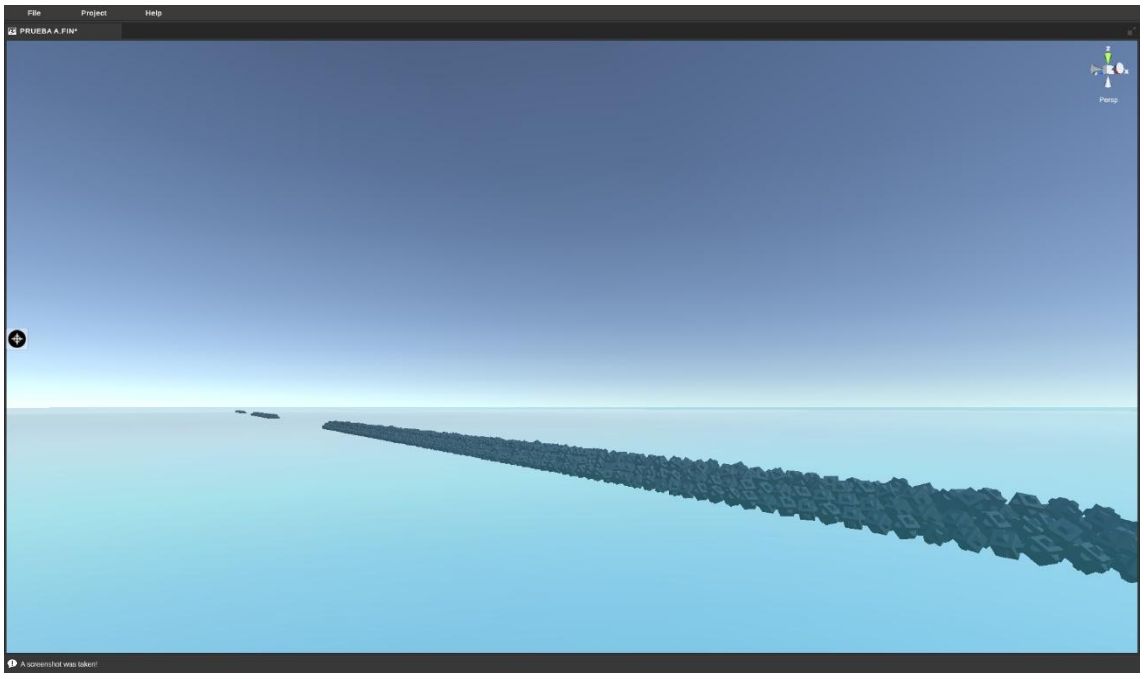


Figura 38 Simulación finalizada en perspectiva. Fuente: Elaboración propia.

Figura 39 Simulación finalizada en planta. Fuente: Elaboración propia.

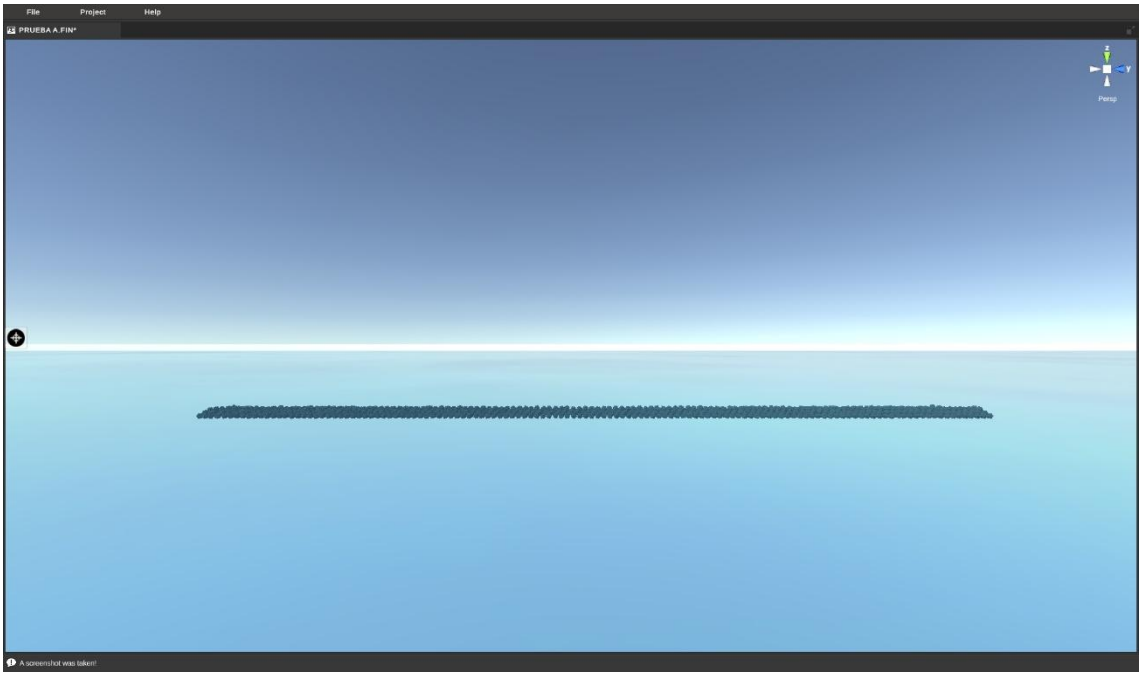


Figura 40 Imagen de uno de los tres diques en vista desde el eje x. Fuente: Elaboración propia.

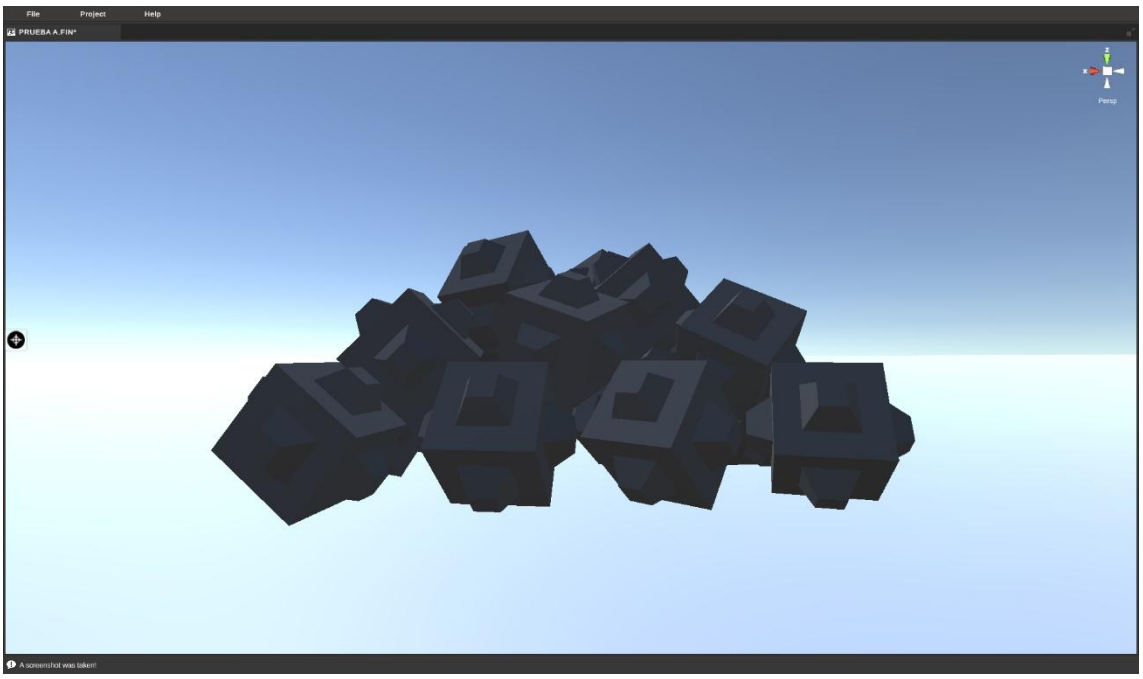


Figura 41 Sección transversal de los diques. Fuente: Elaboración propia.

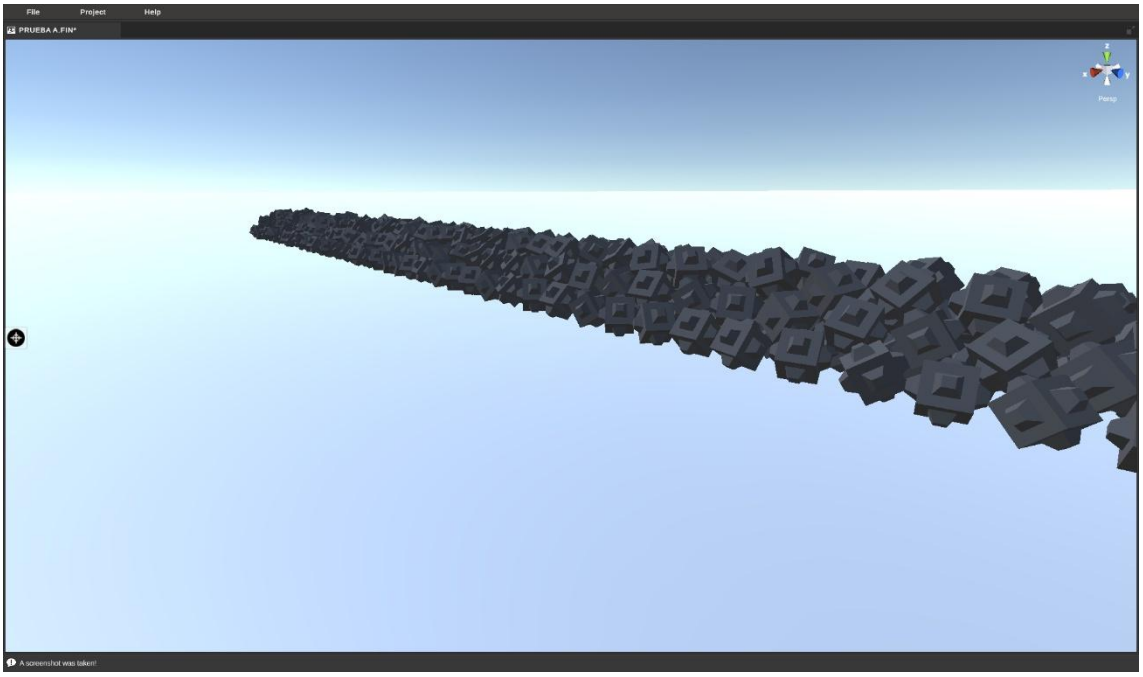


Figura 42 Tramo de dique en perspectiva. Fuente: Elaboración propia.

6. REFERENCIAS

- Bricio Garberí, 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). Universidad Politécnica de Madrid.
- Kraus, N. C. (1990). *Shoreline change and storm-induced beach erosion modeling: A collection of seven papers*. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
- Lozano, L. (2021). *Estudio de transmisión de oleaje para el diseño de diques arrecife homogéneos de Cubípodo*.
- Medina, J. R., Gómez-Martín, M. E., Mares-Nasarre, P., Odériz, I., Mendoza, E., & Silva, R. (2019). Hydraulic performance of homogeneous low-crested structures. En N. Goseberg & T. Schlurmann (Eds.), *Coastal Structures 2019* (pp. 60–68). Bundesanstalt für Wasserbau. https://doi.org/10.18451/978-3-939230-64-9_007
- Molines, J., Centi, R., Di Risio, M., & Medina, J. R. (2021). Estimation of layer coefficients of Cubipod homogeneous low-crested structures using physical and numerical model placement tests. *Coastal Engineering, 168*, 103901. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103901
- Muñoz Palao, S. (2024). *Hydraulic stability and placement grids for homogeneous low-crested structures (HLCS)* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de València.
- Sato, O., Gómez-Martín, M. E., Medina, J. R., & Esteban, M. D. (s. f.). *Manual del Cubípodo*.
- Yepes, V. (2026). *Blog de Víctor Yepes Piqueras*. Universitat Politècnica de València. https://victoryepes.blogs.upv.es/

ANEJO 8: PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 186
2. FABRICACIÓN DE LOS CUBÍPODOS 186
3. TRANSPORTE Y PUESTA EN OBRA 190
4. PLAN DE OBRA 193
5. TRABAJOS PREVIOS: 193
6. PROCESO DE FABRICACIÓN, TRANSPORTE Y COLOCACIÓN DE CUBÍPODOS: 193
7. MAQUINARIA Y EQUIPOS NECESARIOS: 194
8. DESMANTELAMIENTO DE LOS GEOTEXTILES 194
9. OTROS TRABAJOS 196
10. DIAGRAMA DE GANTT 196
11. REFERENCIAS 200

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Base y encofrado. Fuente: Corredor y Medina (2012). 187
Figura 2 Proceso de acopio de Cubípodos. Fuente: Web del Cubipod. 187
Figura 3 Línea de fabricación de Cubípodos en serie. Fuente: Web del Cubipod. 188
Figura 4 Ubicación de la zona de fabricación y acopio. Fuente: Google Earth. 188
Figura 5 Evolución de la zona de fabricación y acopio propuesta. Fuente: Google Earth. 189
Figura 6 Distribución de la zona de acopio y línea de fabricación. Fuente: Elaboración propia. 189
Figura 7 Explanada de acopio y fabricación de Cubípodos. Fuente: Elaboración propia. 190
Figura 8 Transporte de los Cubípodos de la zona de acopio. Fuente: Web del Cubipod 190
Figura 9 Manipulación de carga en Puerto Morelos. Fuente: Administración Portuaria Integral de Quintana Roo. 191
Figura 10 Manipulación de carga en Puerto Morelos. Fuente: Administración Portuaria Integral de Quintana Roo. 191
Figura 11 Manipulación de carga en Puerto Morelos. Fuente: Administración Portuaria Integral de Quintana Roo. 192
Figura 12 Plataforma Spud Barge. Fuente: Internet. 193
Figura 13 Ubicación de los geotextiles (en amarillo) y ubicación de la implantación de la alternativa (en rosa). Fuente: Google Earth. 195
Figura 14 Pontona con maquinaria. Fuente: Internet. 195

1 INTRODUCCIÓN

En este anejo se muestra el procedimiento de construcción de la alternativa escogida, enfocado a la construcción de los Cubípodos y su puesta en obra. Así como una estimación de lo que podría ser el plan de obra de la actuación y los equipos necesarios para llevarla a cabo.

En este anejo se va a explicar el procedimiento constructivo asociado a la alternativa seleccionada. Para ello, se detallan las distintas fases que componen la actuación, desde la fabricación de las piezas en hormigón y su acopio en parque, hasta su transporte terrestre y marítimo y su colocación final en la zona de implantación mediante medios auxiliares adecuados.

Asimismo, se analizan los rendimientos de fabricación y colocación, la maquinaria y los equipos necesarios, junto con la organización general de los trabajos y la planificación temporal de la obra.

De forma complementaria, se abordan los trabajos previos requeridos para la adecuación de las zonas de fabricación y acopio, y se incluye el desmantelamiento de las estructuras de geotextil existentes, considerando criterios de seguridad, control ambiental y minimización de afecciones al medio marino.

2 FABRICACIÓN DE LOS CUBÍPODOS

Los Cubípodos son piezas de hormigón en masa cuyo proceso constructivo es relativamente sencillo. Su fabricación requiere únicamente un encofrado que garantice las dimensiones específicas de la pieza, sin necesidad de emplear hormigones de altas prestaciones. Al tratarse de elementos macizos que, durante su vida útil, no están sometidos a esfuerzos significativos de tracción, la calidad del hormigón no resulta un factor determinante desde el punto de vista estructural.

El encofrado a usar es de tipo vertical, con una base estática y un total de 6 elementos articulados articulaciones para poder llenar y vibrar el hormigón de forma homogénea, en dos fases y permite el desencofrado cada 6 horas (Corredor y Medina (2012))

El rendimiento del hormigonado de estas piezas suele sobre 2 puestas al día

Figura 1 Base y encofrado. Fuente: Corredor y Medina (2012).

Por otro lado, se necesita determinar dos zonas claramente diferenciadas: La zona de fabricación y la zona de acopio, siendo lo ideal que coincidan es un mismo espacio y que se encuentren lo más próximas a la zona implantación o carga de los Cubípodos para transportarlos en barcazas a su posición final.

Al tener un total de 2.895 Cubípodos, se hace un cálculo del área que se tendría que destinar al acopio, imponiendo que sea de 5 alturas, se obtiene que en cada capa caben 579 Cubípodos, completando un área en planta igual a 1.703 m^2

Figura 2 Proceso de acopio de Cubípodos. Fuente: Fuente: Web del Cubípodo 2025. https://www.cubipod.com/es/.

Además, habría que añadir la ubicación de la zona de fabricación de las piezas en serie, que cuenta con la línea de encofrados y una mota auxiliar elevada desde donde se sitúa el camión hormigonera para poder verter el hormigón.

Figura 3 Línea de fabricación de Cubípodos en serie. Fuente: Web del Cubípodo 2025. https://www.cubipod.com/es/.

Mediante una valoración con Google Earth, se ha observado una explanada que podría utilizarse para desarrollar estas actividades.

Figura 4 Ubicación de la zona de fabricación y acopio. Fuente: Google Earth.

Esta explanada, localizada cerca de la playa de Mayakobá y por la información que se puede saber con la vista satelital de Google Earth, es una plataforma creada en sobre 2023 destinada a desarrollo industrial, puede que por alguna obra cercana para la que se necesitara la zona de acopio. Actualmente no parece tener ningún uso, ya que todos los elementos que tenía en 2024 no se encuentran en la vista satelital, por lo que es una buena opción de zona para fabricar los Cubípodos y acopiarlos, ya que también tiene caminos que permiten el acceso y salida de la explanada.

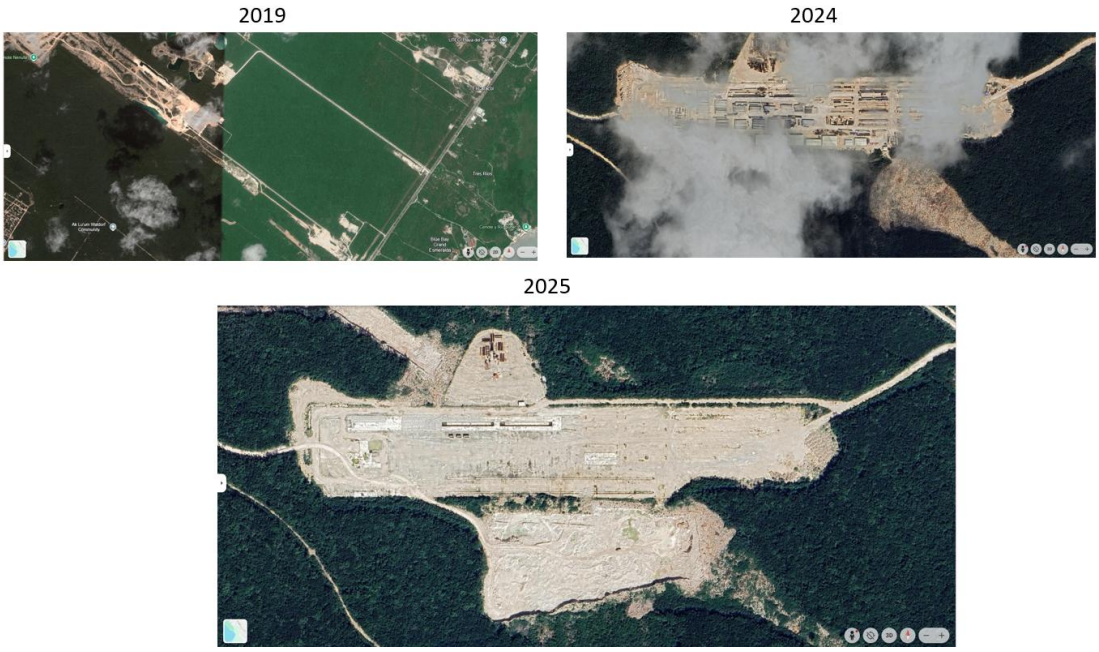


Figura 5 Evolución de la zona de fabricación y acopio propuesta. Fuente: Google Earth.

Habría que realizar labores de adecuación del suelo, como desbroce y asegurar la capacidad portante con un estudio geotécnico, en especial en el área que se destine a acopio. En el caso de que no lo esté, se pueden realizar acciones como añadir suelo seleccionado y luego realizar una precarga para aumentar la resistencia o también se puede valorar disminuir el número de capas del acopio.

En todo caso, el suelo deberá de estar nivelado y con huecos que permitan la introducción de las protuberancias al colocar los Cubípodos de la primera capa de almacenamiento, con la finalidad de que las filas superiores se encuentren acopiadas sobre una capa estable.

A continuación, se propone una distribución de las zonas descritas.

Figura 6 Distribución de la zona de acopio y línea de fabricación. Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Explanada de acopio y fabricación de Cubípodos. Fuente: Web del Cubípodo (2025). https://www.cubipod.com/es/.

3 TRANSPORTE Y PUESTA EN OBRA

Una vez fabricados los Cubípodos, se deben de transportar por carretera a un puerto o muelle para poder colocarlos mediante grúa sobre un barco tipo pontona que los llevará a la ubicación de puesta en obra.

El transporte por carretera se puede hacer mediante camiones plataforma, o barcazas que garanticen su estabilidad durante el transporte, ya sea usando las bases de su hormigonado o haciendo uso de estructuras que doten de esta estabilidad, salvando la distancia entre la base del Cubípodo y la protuberancia al apoyar de forma vertical.

Figura 8 Transporte de los Cubípodos de la zona de acopio. Fuente: Web del Cubípodo (2025). https://www.cubipod.com/es/.

Se propone que el cambio a medio marítimo se haga desde el Puerto de Abrigo de Puerto Morelos, ubicado en Puerto Morelos y cuya Autoridad Portuaria es la Administración Portuaria Integral de Quintana Roo.

Este puerto tiene actividades tanto turísticas, de pesca y carga y descarga de carga suelta y mediante contenedores y, aunque no presenta una terminar expresa dedicada a la carga y descarga de mercancía, poseen tarifas para ello, por lo que se puede solicitar de forma ocasional.

Figura 9 Manipulación de carga en Puerto Morelos. Fuente: Administración Portuaria Integral de Quintana Roo.

La distancia a la que se encuentra de la zona de fabricación y acopio es de unos 30 Km por carretera, en su mayoría por la carretera Federal 307 que conecta Cancún con Tulum, por lo que se espera que el tiempo de transporte con los camiones cargados sea de unos 40 minutos.

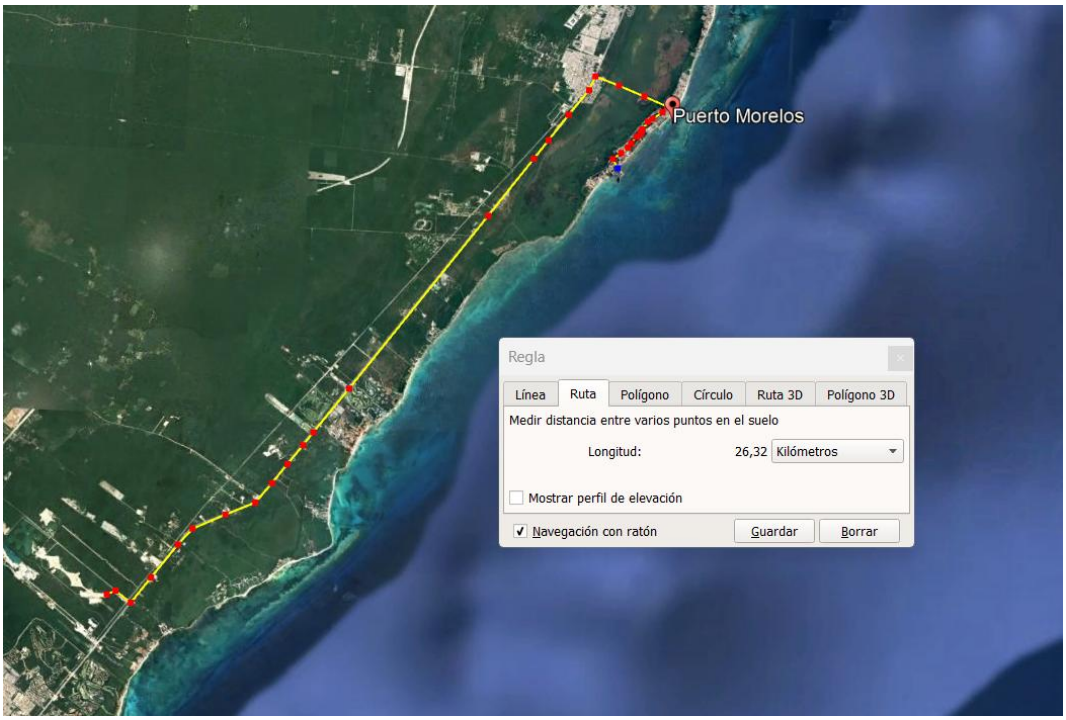


Figura 10 Manipulación de carga en Puerto Morelos. Fuente: Administración Portuaria Integral de Quintana Roo.

Figura 11 Manipulación de carga en Puerto Morelos. Fuente: Administración Portuaria Integral de Quintana Roo.

Finalmente, una vez se han colocado los Cubípodos en la barcaza, se transportan a la zona de implantación, en la cual se colocan mediante una grúa de pinzas simples, con posicionamiento GPS en su pluma para cumplir con la malla de colocación. Se puede estimar que el rendimiento de la colocación de los Cubípodos en condiciones climáticas favorables suele ser de entre 8 y 12 Cubípodos por hora.

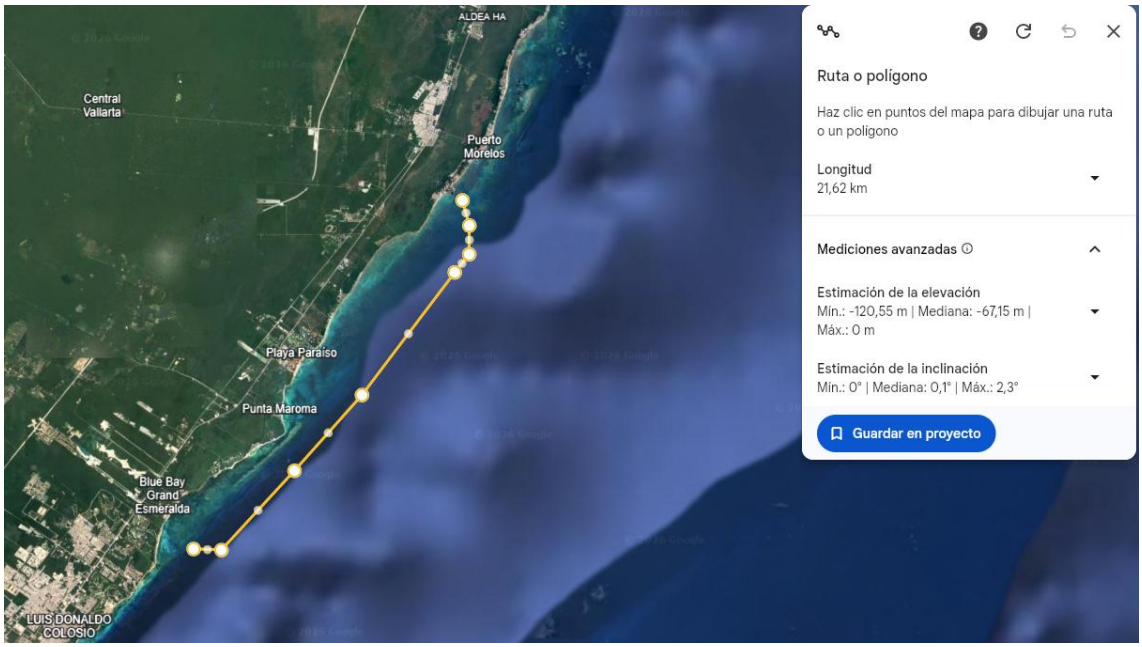


Figura 12 Distancia desde el puerto a ubicación final. Fuente: Elaboración propia

Será necesario usar una barcaza *Spud Barge* en la que se encuentra colocada la grúa, la cual, aparte de permitir el posicionamiento de la grúa en la zona de actuación, permite su uso de forma estable.

Figura 13 Plataforma Spud Barge. Fuente: Internet.

4 PLAN DE OBRA

En este apartado se describe la planificación temporal de los trabajos asociados a la fabricación, transporte y colocación de los Cubípodos, así como las actuaciones previas y complementarias necesarias para la correcta ejecución de la obra. Se consideran los rendimientos estimados de los distintos procesos, la disponibilidad de maquinaria y equipos, y la posibilidad de solapar determinadas fases con el fin de optimizar la duración total de la actuación.

4.1 TRABAJOS PREVIOS:

Como trabajos previos se incluye la adecuación de la explanada de fabricación y acopio de Cubípodos.

Se realizan labores de instalación de casetas de obra y delimitación de la zona de obra mediante vallas y señalización. También se realizan las actuaciones necesarias para adecuar la capacidad portante si la campaña geotécnica lo ha indicado, preparando también el suelo nivelando y realizando los huecos para las protuberancias de los Cubípodos, así como la implantación de la mota auxiliar para la línea de fabricación.

Se estima que estos trabajos tengan una duración de 2 semanas.

4.2 PROCESO DE FABRICACIÓN, TRANSPORTE Y COLOCACIÓN DE CUBÍPODOS:

Se calcula la duración del proceso de fabricación de los Cubípodos con los rendimientos especificados y contando con una jornada laboral de 8 horas diarias durante 20 días al mes de trabajo.

Cada encofrado puede fabricar 1 Cubípodo por jornada, ya que el tiempo de espera para desencofrar suele ser de 6 horas.

Se propone el uso de 20 encofrados en la línea de fabricación, por lo que al día se fabrican ese número de piezas, por tanto, será necesario un total de:

$$\frac{2.895\ Cubípodos}{20\ Cubípodos/día} \approx 145\ días \approx 7{,}5\ meses$$

Por otro lado, al ser 3 diques, lo más optimo sería que la fase de colocación se solapara con la de construcción.

El transporte terrestre se realiza con camiones tipo góndola, con los que se pueden llevar hasta 8 Cubípodos por viaje, por lo que se necesitarán 361,88 viajes de ida y los mismos de vuelta, en total 723,75 viajes, lo que equivale a 3 meses para transportar todas las piezas.

Para la colocación en el mar, contando con un solo equipo compuesto por una barcaza, una grúa y una plataforma *Spud Barge* se pueden colocar hasta 12 Cubípodos por hora en su posición final, por lo que cada camión que llega cargado se pasa directamente a la barcaza con una grúa de pinzas de doble presión, desde donde sale, calculando unas dos horas entre que llega a la plataforma, se colocan los Cubípodos y vuelve al puerto, tiempo en el cual el camión ha vuelto a la zona de acopio, ha cargado 8 Cubípodos más y los transporta a puerto para volver a repetir el proceso.

4.3 MAQUINARIA Y EQUIPOS NECESARIOS:

- Se requerirá de camiones hormigonera.
- Grúa y pinza de desencofrado.
- 2 grúas de doble presión, una para manipular los Cubípodos en la zona de acopio y otra en el puerto para colocarlos sobre la barcaza.
- Una grúa de pinza simple con posicionamiento GPS para la colocación de las piezas de forma precisa según la malla en el mar.

4.4 DESMANTELAMIENTO DE LOS GEOTEXTILES

Se propone el desmantelamiento de los geotextiles existentes cerca de la playa al inicio de la obra, ya que se va a programar todo para que no coincida con la época con más turismo (Diciembre – Abril) por lo que es una forma de asegurar que la afección social será lo más pequeña posible.

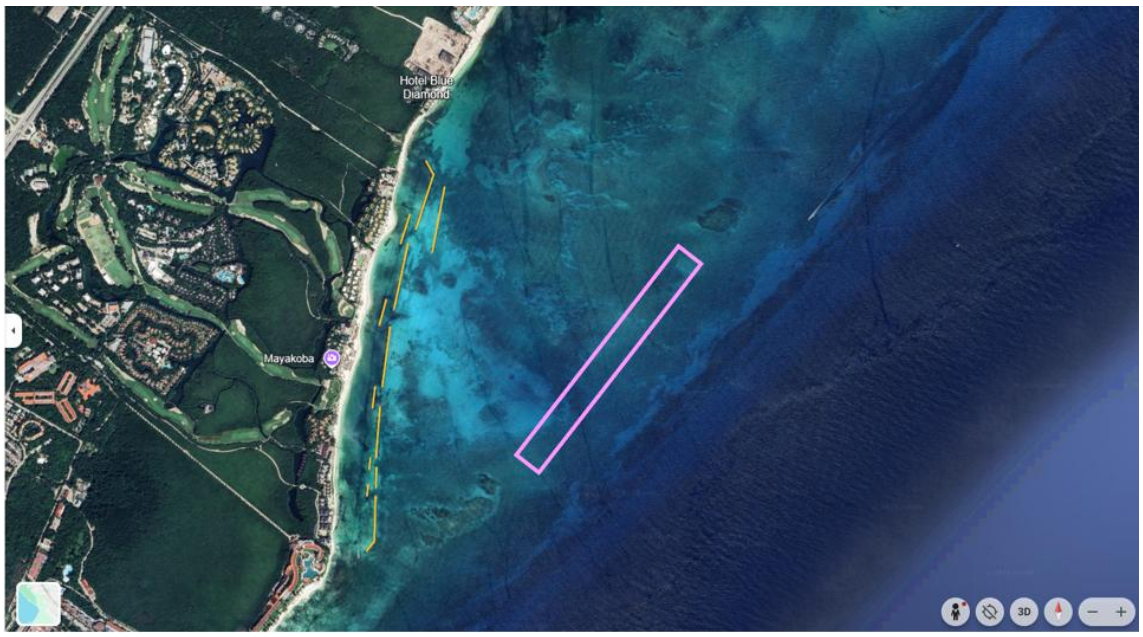


Figura 14 Ubicación de los geotextiles (en amarillo) y ubicación de la implantación de la alternativa (en rosa). Fuente: Google Earth.

Se han sumado las longitudes de todos los geotextiles existentes y hay un total de 2,21 km.

Para su retirada, se debe de balizar y preparar la zona, colocando barreras antiturbidez para que los finos no se dispersen y puedan afectar al arrecife.

También se debe preparar un acceso. Se propone el uso de pontona de calado reducido, para poder ir desplazándola a lo largo de los kilómetros.

Figura 15 Pontona con maquinaria. Fuente: Internet.

Heerten (2000) describe los geotextiles como estructuras flexibles cuyo funcionamiento depende íntegramente del confinamiento proporcionado por el geotextil. Una vez degradada la envolvente, el material de relleno pierde su función estructural y tiende a integrarse con el fondo marino.

En este contexto, el desmantelamiento de los geotextiles se realiza mediante la apertura longitudinal controlada del contenedor, realizada por un operario especializado o un buzo, la liberación del material de relleno y la retirada del geotextil remanente.

Una vez realizado el desmantelamiento de los geotextiles, habría que hacer una inspección visual y tomar medidas batimétricas, para valorar la necesidad o no de perfilar el fondo marino o dejar que el propio oleaje lo estabilice.

Se estima un rendimiento para realizar los cortes de 120 m/día, contando día como una jornada laboral de 8 horas. Con esto en cuenta, se calcula que se necesitan 18 días y medio para cortar los geotextiles, con cuidado y controlando la turbidez del agua.

Una vez se realiza el corte, se deja que la arena salga sola por gravedad para evitar la mayor cantidad de turbidez posible.

Una vez se ha vaciado el geotextil, se dobla con el apoyo de buzos y se sube a la pontona con la retroexcavadora, para dejarlo ahí acopiado hasta que se finalice la tarea.

Con ello, se programa que en una jornada de 8 horas se retire completamente 60 metros de geotextil, para tener tiempo de que se vacíe por completo con calma para no afectar en exceso al medio marino. Por tanto, se necesita un total 19 días para completar la retirada de todos.

4.5 OTROS TRABAJOS

Durante el tiempo que dura la obra, se necesita un seguimiento de seguridad y salud, gestión de residuos y control ambiental.

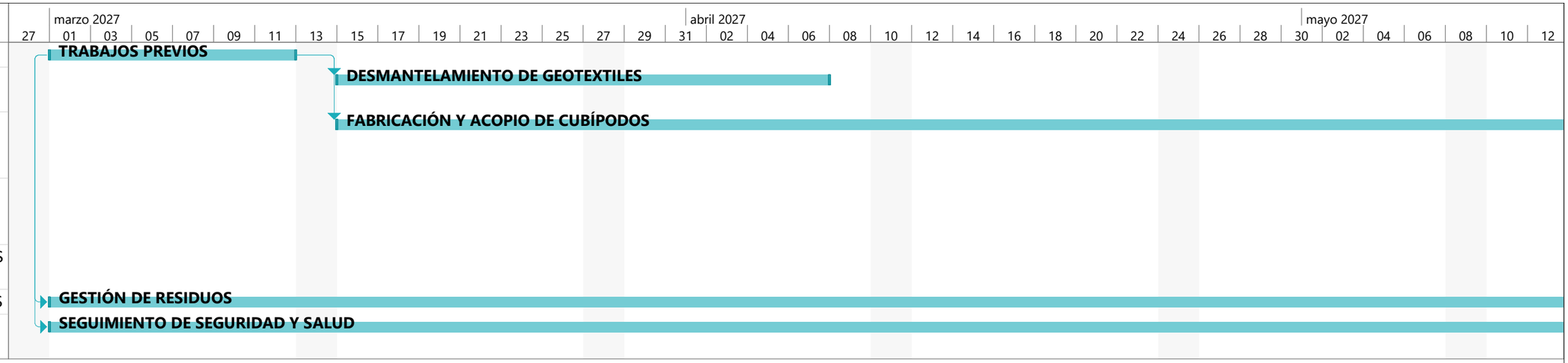
Se necesita que se realicen durante toda la obra y de forma continua hasta que se entregue el proyecto.

Se tendrá que designar otra área en la zona de acopio y fabricación para poder clasificar los residuos y poder verterlos en un sitio controlado que luego permita su transporte y reciclado de la forma más sencilla posible.

4.6 DIAGRAMA DE GANTT

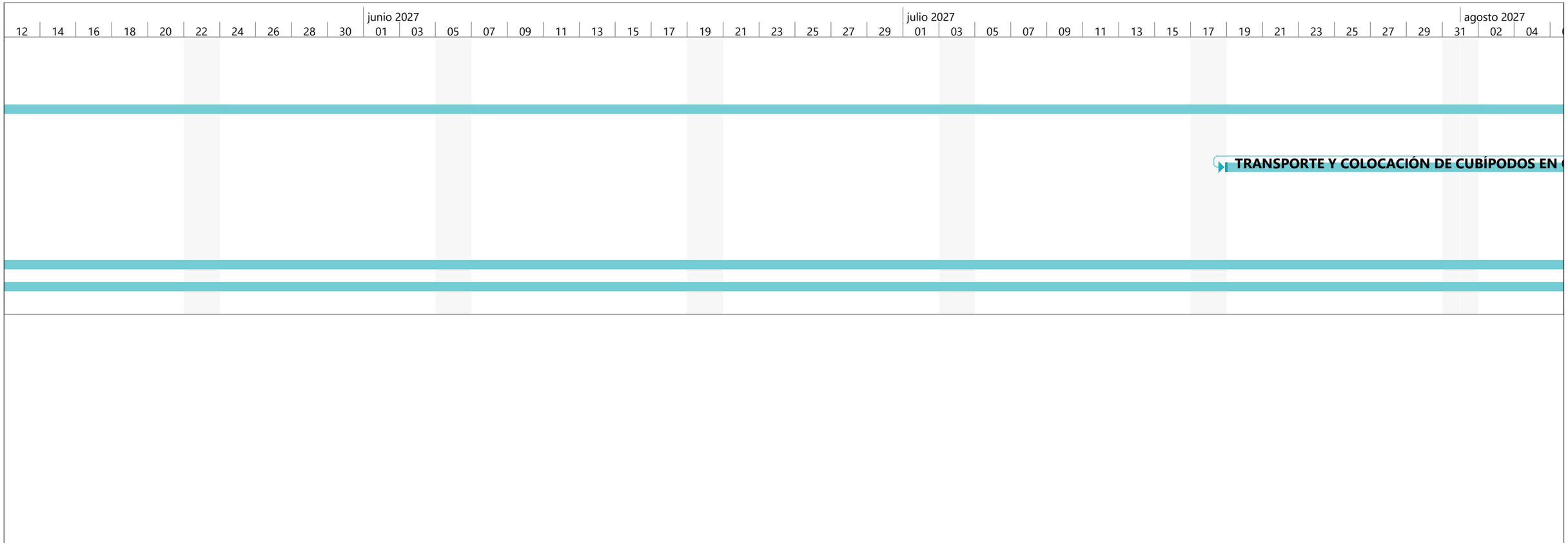
A continuación, se muestra el diagrama de Gantt, en el que se plasman los trabajos realizar, la duración de estos y los solapes entre actividades.

Id	Nombre de tarea
1	TRABAJOS PREVIOS
2	DESMANTELAMIENTO DE GEOTEXTILES
3	FABRICACIÓN Y ACOPIO DE CUBÍPODOS
4	TRANSPORTE Y COLOCACIÓN DE CUBÍPODOS EN OBRA
5	RETIRADA DE EQUIPOS Y FIN DE OBRA
6	GESTIÓN DE RESIDUOS
7	SEGUIMIENTO DE SEGURIDAD Y SALUD



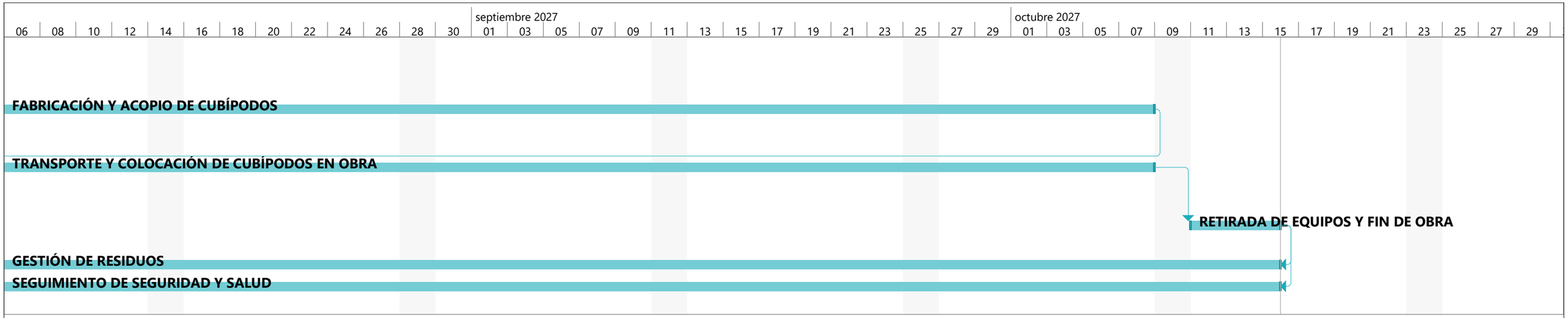
Proyecto: Proyecto1
Fecha: jue 12/02/26

Tarea	Resumen del proyecto	Tarea manual	solo el comienzo	Fecha límite
División	Tarea inactiva	solo duración	solo fin	Progreso
Hito	Hito inactivo	Informe de resumen manual	Tareas externas	Progreso manual
Resumen	Resumen inactivo	Resumen manual	Hito externo	



Proyecto: Proyecto1
Fecha: jue 12/02/26

Tarea	Resumen del proyecto	Tarea manual	solo el comienzo	Fecha límite
División	Tarea inactiva	solo duración	solo fin	Progreso
Hito	Hito inactivo	Informe de resumen manual	Tareas externas	Progreso manual
Resumen	Resumen inactivo	Resumen manual	Hito externo	



Proyecto: Proyecto1
Fecha: jue 12/02/26

Tarea	Resumen del proyecto	Tarea manual	solo el comienzo	Fecha límite
División	Tarea inactiva	solo duración	solo fin	Progreso
Hito	Hito inactivo	Informe de resumen manual	Tareas externas	Progreso manual
Resumen	Resumen inactivo	Resumen manual	Hito externo	

5 REFERENCIAS

- Corredor, A., & Medina, J. R. (2012). El Cubípodo: Nuevo elemento para la reducción de costes en la construcción de diques en talud. *IMHE–VICN Ingeniería Civil, (83), 25–52. Cubipod International, S. L. (2025). *Web del Cubípodo*. https://www.cubipod.com/es/
- Heerten, G. (2000). *Geotextile tubes and containers in coastal engineering*. Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering.
- Administración Portuaria Integral de Quintana Roo. (2025). *Puerto de Abrigo de Puerto Morelos*.
- Cubipod International, S. L. (2015). Manual del Cubípodo [Manual técnico]. Cubipod International, S. L.

ANEJO 9: VALORACIÓN ECONÓMICA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 203
2. PRECIOS UNITARIOS 204
   2.1. CONSTRUCCIÓN DE DIQUES: 204
3. VALORACIÓN ECONÓMICA FINAL 205
   3.1. CAPÍTULO 1: ACTUACIONES PREVIAS 205
   3.2. CAPÍTULO 2: CONSTRUCCIÓN Y ACOPIO DE CUBÍPODOS 205
   3.3. CAPÍTULO 3: TRANSPORTE Y CONSTRUCCIÓN DE LOS DIQUES 206
   3.4. CAPÍTULO 4: DESMANTELAMIENTO DE GEOTEXTILES 206
   3.5. CAPÍTULO 5: GESTIÓN DE RESIDUOS 206
   3.1. CAPÍTULO 6: SEGURIDAD Y SALUD 206
   3.2. CAPÍTULO 7: CONTROL AMBIENTAL 207

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Porcentajes del coste por metro cúbico para la construcción de diques que contienen Cubípodos. Fuente 204

1. INTRODUCCIÓN

A continuación, se va a mostrar la valoración económica de la alternativa final, teniendo en cuenta los precios unitarios y mediciones de lo descrito en el Anejo 8, correspondiente al procedimiento de construcción y al Anejo 7 de estudio de soluciones.

Aunque se busca realizar una valoración económica y no un presupuesto, se decide realizar cuadros de precios para dividir las actuaciones que se quieren estimar económicamente, organizándolos en capítulos.

Los precios de cada unidad de obra se han estimado en base a los publicados por el Instituto valenciano de la edificación, en su página web: https://www.five.es/costes-de-construccion/

Se van a dividir los costes en capítulos diferenciados de la siguiente forma:

- CAPÍTULO 1: Actuaciones previas

Este capítulo incluye los trabajos necesarios para la preparación inicial de las zonas de obra y acopio. Comprende las labores de desbroce, limpieza, compactación del terreno natural y formación de terraplenes, así como las prospecciones subacuáticas previas que garantizan la viabilidad y seguridad de las actuaciones posteriores.

- CAPÍTULO 2: Construcción y acopio de Cubípodos

Recoge los costes asociados a la fabricación de los Cubípodos en la explanada habilitada, incluyendo el suministro de hormigón, encofrado, hormigonado y curado y acopio temporal.

- CAPÍTULO 3: Transporte y puesta en obra

Este capítulo engloba las operaciones de transporte terrestre y marítimo de los Cubípodos desde la zona de fabricación hasta su emplazamiento final. Incluye la colocación en obra mediante grúa con sistemas de posicionamiento GPS, garantizando la correcta geometría y estabilidad del dique proyectado.

- CAPÍTULO 4: Desmantelamiento de geotextiles

Incluye los trabajos necesarios para la retirada controlada de las estructuras de geotextil existentes. Contempla la instalación de medios auxiliares marítimos, la intervención de buzos especializados, el empleo de barreras antiturbidez.

- CAPÍTULO 5: Gestión de residuos

Este capítulo recoge las operaciones de carga, recogida, transporte y tratamiento de los residuos generados durante las distintas fases de la obra. Incluye el alquiler de

contenedores, la gestión selectiva de materiales y su reciclaje o eliminación conforme a la normativa vigente.

- CAPÍTULO 6: Seguridad y salud.

Comprende los costes derivados de la implantación y seguimiento del Plan de Seguridad y Salud durante la ejecución de las obras. Incluye la dotación de equipos de protección individual, la formación del personal, así como la señalización y balizamiento de las zonas de trabajo.

- CAPÍTULO 7: Control ambiental

Este capítulo agrupa las medidas destinadas a garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental aplicable. Incluye el seguimiento de las directivas de impacto ambiental y la realización de mediciones periódicas de turbidez, con el objetivo de minimizar las afecciones al medio marino durante las obras.

2. PRECIOS UNITARIOS

2.1. CONSTRUCCIÓN DE DIQUES:

Haciendo uso de los porcentajes mostrados por el manual del Cubípodo sobre el coste para construir un Cubípodo, se obtienen los precios unitarios del proceso de construcción de los diques homogéneos de baja cota de coronación:

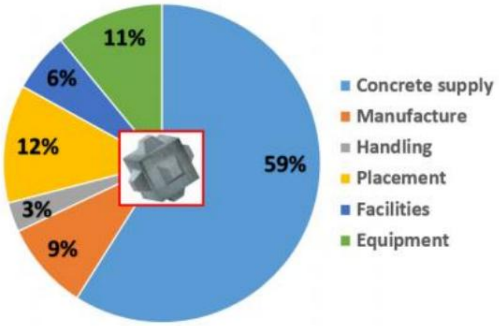


Figura 1 Porcentajes del coste por metro cúbico para la construcción de diques que contienen Cubípodos. Fuente

Por tanto, para con el coste obtenido en la alternativa uno (C_c (€/m^3) = 335,06 €/m^3) se calculan los porcentajes:

	€/ m^3	m^3	€
Suministro hormigón (59%)	197,69 €	5002,56	988.933,07 €
Fabricación (9%)	30,16 €	5002,56	150.854,20 €
Manipulación (3%)	10,05 €	5002,56	50.284,73 €
Colocación (12%)	40,21 €	5002,56	201.138,93 €
Instalación (6%)	20,10 €	5002,56	100.569,47 €
Equipo fijo (11%)	36,86 €	5002,56	184.377,35 €

3. VALORACIÓN ECONÓMICA FINAL

3.1. CAPÍTULO 1: ACTUACIONES PREVIAS

SUBCAPITULO 1.1

CÓDIGO	Ud	RESUMEN	Uds	€/Uds	TOTAL
U1011	m2	Despeje, desbroce y refinado de explanada destinada a la construcción y acopio de Cubípodos.	19.000	0,85	16.150,00 €
U1012	m2	Compactación terreno natural por medios mecánicos, hasta conseguir densidad del 95% del Proctor normal en área de acopio	1.713	0,99	1.695,87 €
U1013	m3	Formación de terraplén para poder hormigonar los Cubípodos en la explanada de construcción con suelo tolerable de aportación	1.000	6,79	6.790,00 €

SUBCAPITULO 1.2

CÓDIGO	Ud	RESUMEN	Uds	€/Uds	TOTAL
CODIGO	UNIDAD	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
U1021	PA	Prospección de buzos en la zona	1	1.500,00	1.500,00 €
				TOTAL CAPÍTULO 1	26.135,87€

3.2. CAPÍTULO 2: CONSTRUCCIÓN Y ACOPIO DE CUBÍPODOS

CÓDIGO	Ud	RESUMEN	Uds	€/Uds	TOTAL
U2001	m3	Suministro encofrado y hormigonado en línea de los Cubípodos en la explanada correspondiente	5.002,56	227,84	1.139.787,27 €
				TOTAL CAPÍTULO 2	1.139.787,27 €

3.3. CAPÍTULO 3: TRANSPORTE Y CONSTRUCCIÓN DE LOS DIQUES

CÓDIGO	Ud	RESUMEN	Uds	€/Uds	TOTAL
U2002	m3	Transporte en camión tipo góndola a la terminal y puesta en obra desde barcaza como medio marítimo de transporte a su emplazamiento final	5.002,56	10,05	50.284,73 €
U2003	m3	Colocación de Cubípodos en obra con grúa dotada de posicionamiento GPS	5.002,56	97,17	486.085,75 €
				TOTAL CAPÍTULO 3	536.370,48 €

3.4. CAPÍTULO 4: DESMANTELAMIENTO DE GEOTEXTILES

CÓDIGO	Ud	RESUMEN	Uds	€/Uds	TOTAL
U4001	h	Instalación de pontona de poco calado	152	222,37	33.800,24 €
U4002	h	Peón ordinario construcción	152	3,16	480,32 €
U4003	h	Embarcación auxiliar	152	52,10	7.919,20 €
U4004	m	Barrera antiturbidez	2.300	50,18 €	115.414,00 €
U4005	h	Servicio de buzos para realizar los cortes y soporte para la retirada del textil	152	114,12	17.346,24 €
				TOTAL CAPÍTULO 4	174.960,00 €

3.5. CAPÍTULO 5: GESTIÓN DE RESIDUOS

CÓDIGO	Ud	RESUMEN	Uds	€/Uds	TOTAL
U5001	m3	Carga de material procedente de desbroce realizado por medios mecánicos	19.000	0,83	15.770,00 €
U5002	PA	Alquiler de contenedores	1	2.000,00	2.000,00 €
U5003	PA	Reciclaje de materiales	1	1.000,00	1.000,00 €
U5004	PA	Recolección y transporte de residuos	1	3.000,00	3.000,00 €
				TOTAL CAPÍTULO 5	21.770,00 €

3.1. CAPÍTULO 6: SEGURIDAD Y SALUD

CÓDIGO	Ud	RESUMEN	Uds	€/Uds	TOTAL
U4001	PA	Seguimiento y control	1	10.000,00	10.000,00 €
U4002	PA	Equipos de protección personal	1	5.000,00	5.000,00 €
U4003	PA	Formación	1	3.000,00	3.000,00 €
U4004	PA	Señalización y balizamiento	1	7.000,00	7.000,00 €
				TOTAL CAPÍTULO 6	25.000,00 €

3.2. CAPÍTULO 7: CONTROL AMBIENTAL

CÓDIGO	Ud	RESUMEN	Uds	€/Uds	TOTAL
U7001	PA	Control del cumplimiento y seguimiento de las directivas en materia de impacto ambiental	1	10. 000.00	10.000,00 €
U7002	PA	Medición de turbidez al acabar cada jornada	19	160,00	3.040,00 €
				TOTAL CAPÍTULO 7	13.040,00 €

4. TOTAL VALORACIÓN ECONÓMICA

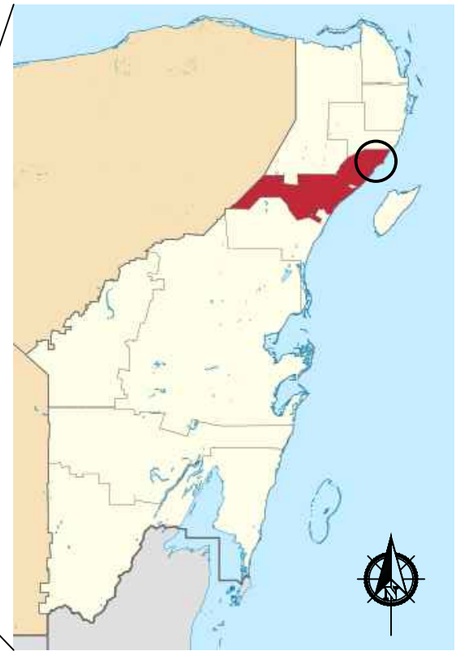
Por tanto, si se suman los valores de cada propuesta de capítulos, se obtiene la valoración económica final relacionada con la ejecución, la cual da un resultado de 1.937.063,62 euros.

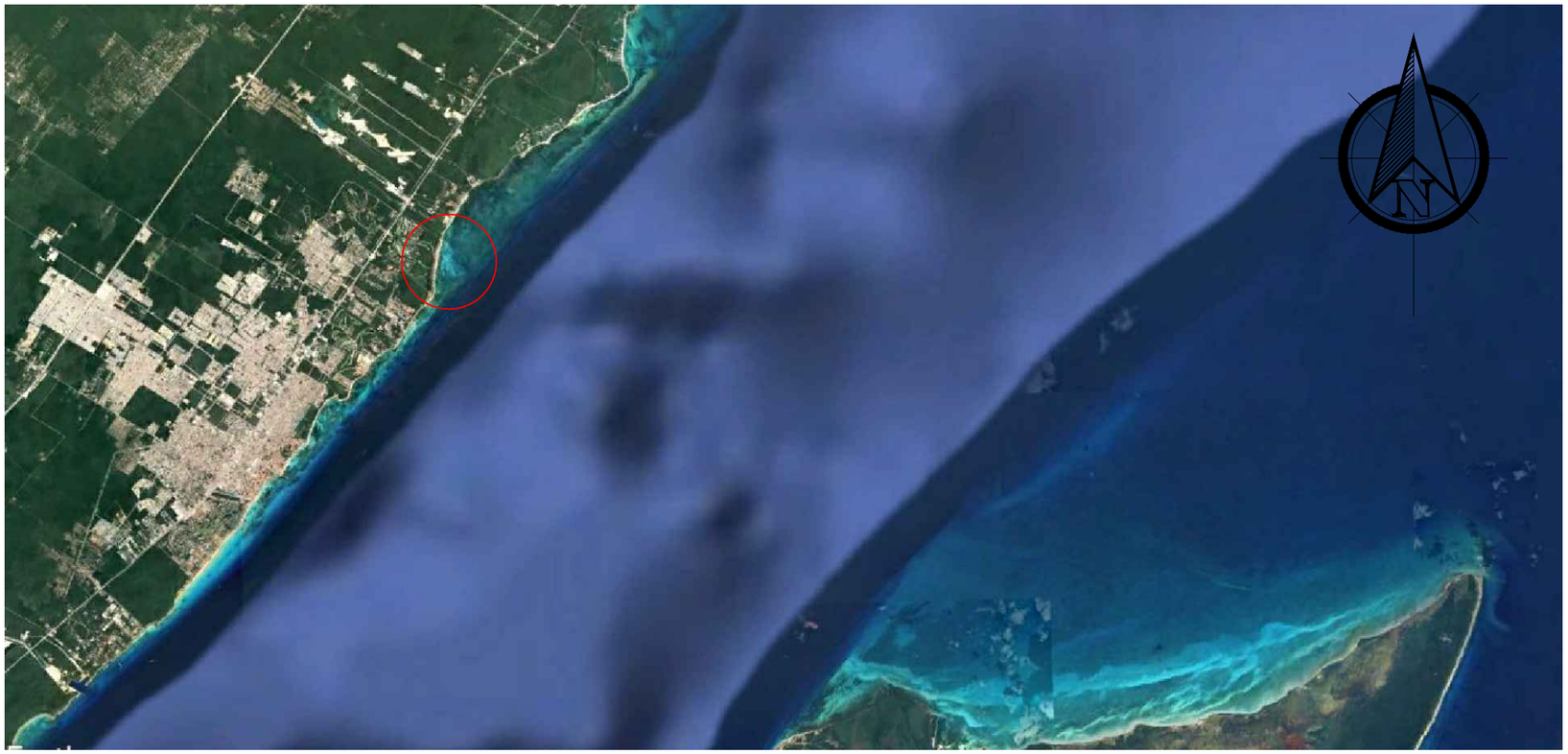
CAPÍTULO	RESUMEN	COSTE
1	ACTUACIONES PREVIAS	26.135,87 €
2	CONSTRUCCIÓN Y ACOPIO DE CUBÍPODOS	1.139.787,27 €
3	TRANSPORTE Y CONSTRUCCIÓN DE LOS DIQUES	536.370,48 €
4	DESMANTELAMIENTO DE GEOTEXTILES	174.960,00 €
5	GESTIÓN DE RESIDUOS	21.770,00 €
6	SEGURIDAD Y SALUD	25.000,00 €
7	CONTROL AMBIENTAL	13.040,00 €
	VALORACIÓN ECONÓMICA TOTAL DE EJECUCIÓN	**1.937.063,62 €**

DOCUMENTO Nº2

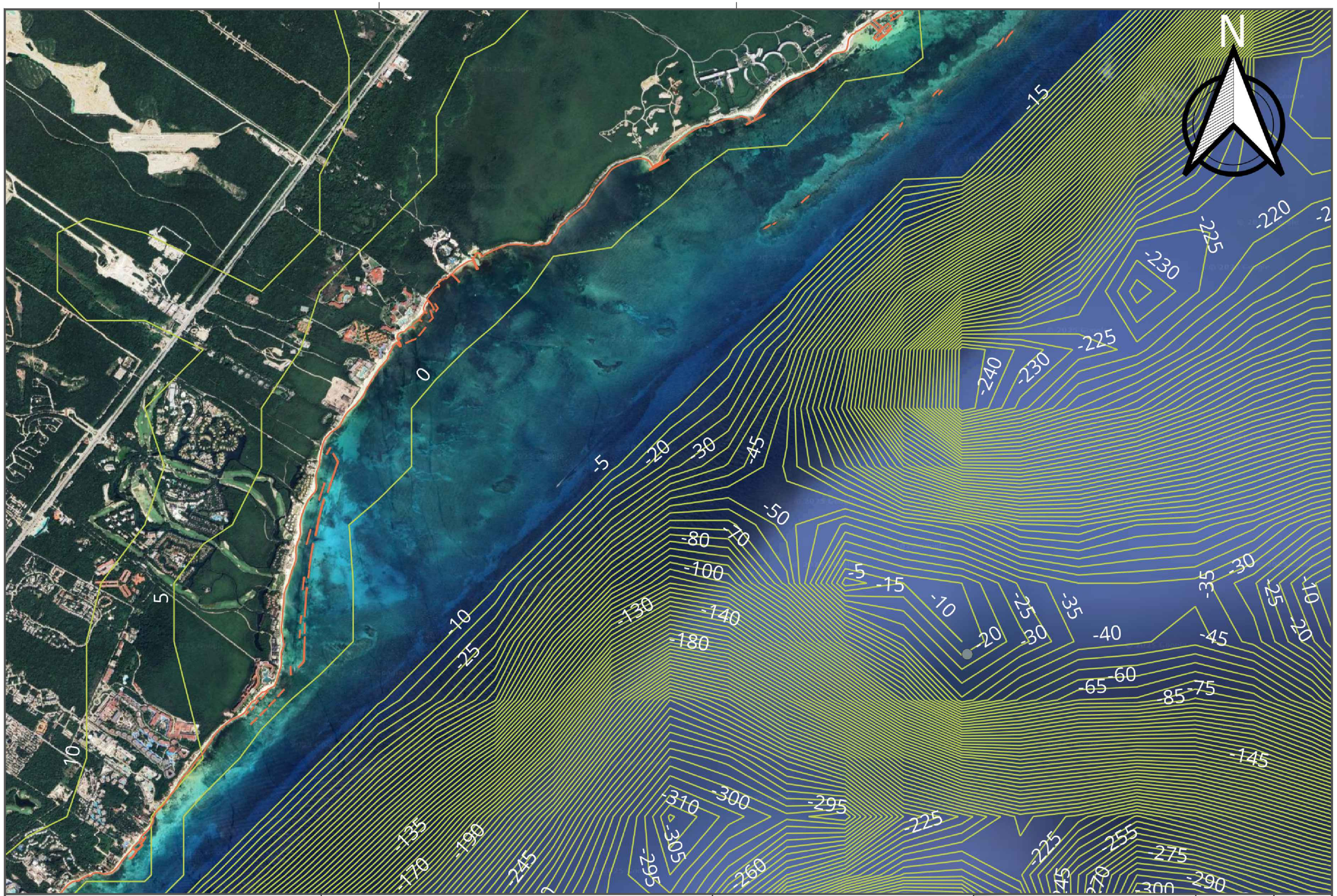
PLANOS

- **PLANO Nº 1 LOCALIZACIÓN**
- **PLANO Nº 2 BATIMETRÍA**
- **PLANO Nº 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL: MALLA DE COLOCACIÓN**
- **PLANO Nº 4 ALTERNATIVAS DE MALLA DE COLOCACIÓN**
- **PLANO Nº 5.1 ALTERNATIVA 1 DE UBICACIÓN EN PLANTA: 3 DIQUES DE 200 METROS**
- **PLANO Nº 5.2 ALTERNATIVA 2 DE UBICACIÓN EN PLANTA: 2 DIQUES DE 200 METROS**
- **PLANO Nº 6.1 DISEÑO FINAL: DIMENSIONES DE CUBÍPODO Y SECCIÓN TRANSVERSAL**
- **PLANO Nº 6.2 DISEÑO FINAL: MALLA DE COLOCACIÓN**





UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA · CAMINOS upv	Estudio experimental de colocación de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota de coronación con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de la playa de Mayakobá (México)	PLANO: LOCALIZACIÓN	AUTOR: CLAUDIA BARJOLA MARTÍNEZ CBarjola	FECHA FEBRERO 2026 · PLANO Nº1 1	ESCALA: Varias



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

CAMINOS upv

Estudio experimental de colocación de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota de coronación con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de la playa de Mayakobá (México)

PLANO: BATIMETRÍA ZONA DE ESTUDIO

AUTOR: CLAUDIA BARJOLA MARTÍNEZ

CBarjola

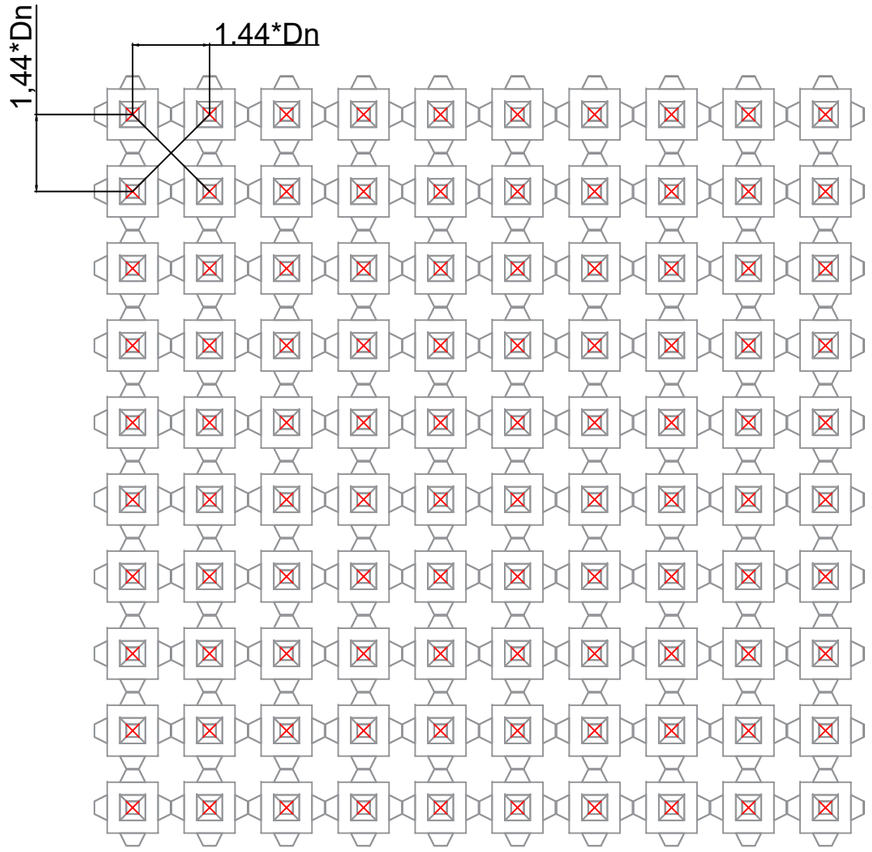
FECHA FEBRERO 2026

PLANO Nº1 2

ESCALA: 1:700

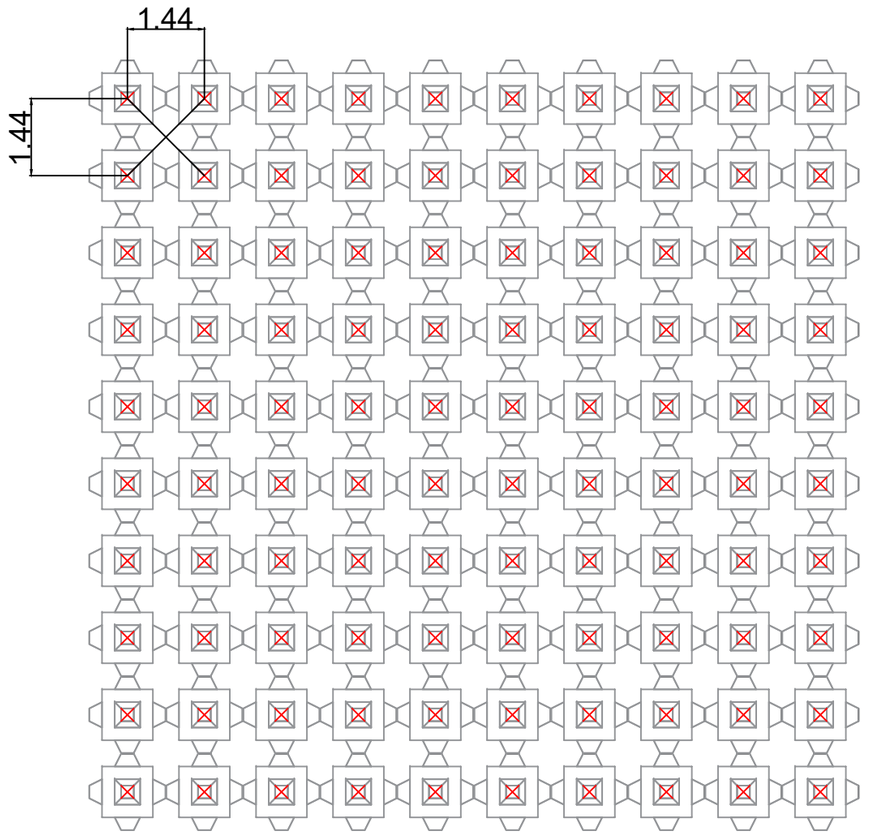
MALLA DE COLOCACIÓN ENSAYOS FÍSICOS

p% = 0.52 // Dn = 4.36 cm



MALLA DE COLOCACIÓN SIMULACIONES PLACSIM

p% = 0.52 // Dn = 1



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

CAMINOS upv

Estudio experimental de colocación de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota de coronación con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de la playa de Mayakobá (México)

PLANO:

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL: MALLA DE COLOCACIÓN

AUTOR: CLAUDIA BARJOLA MARTÍNEZ

CBarjola

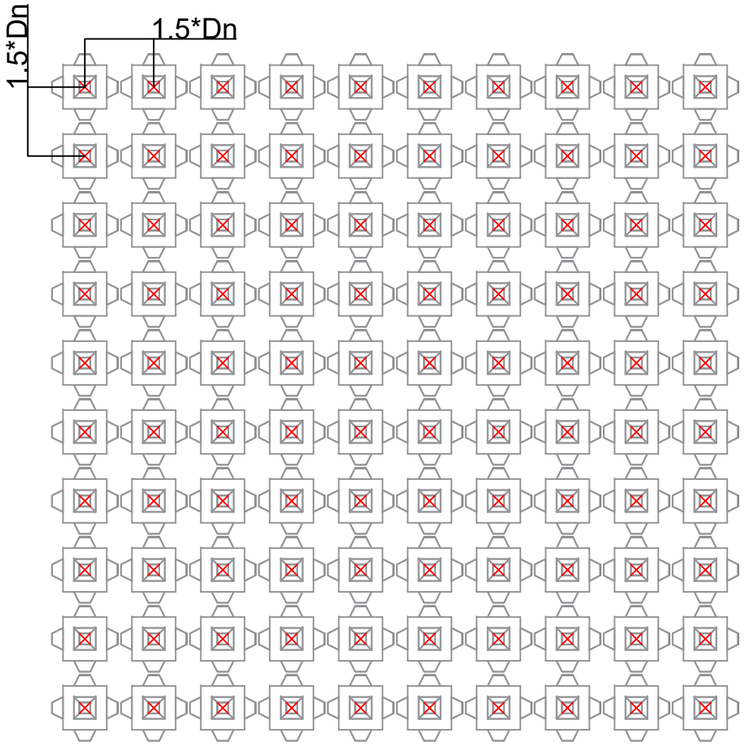
FECHA FEBRERO 2026

PLANO Nº1 3

ESCALA: 1:5

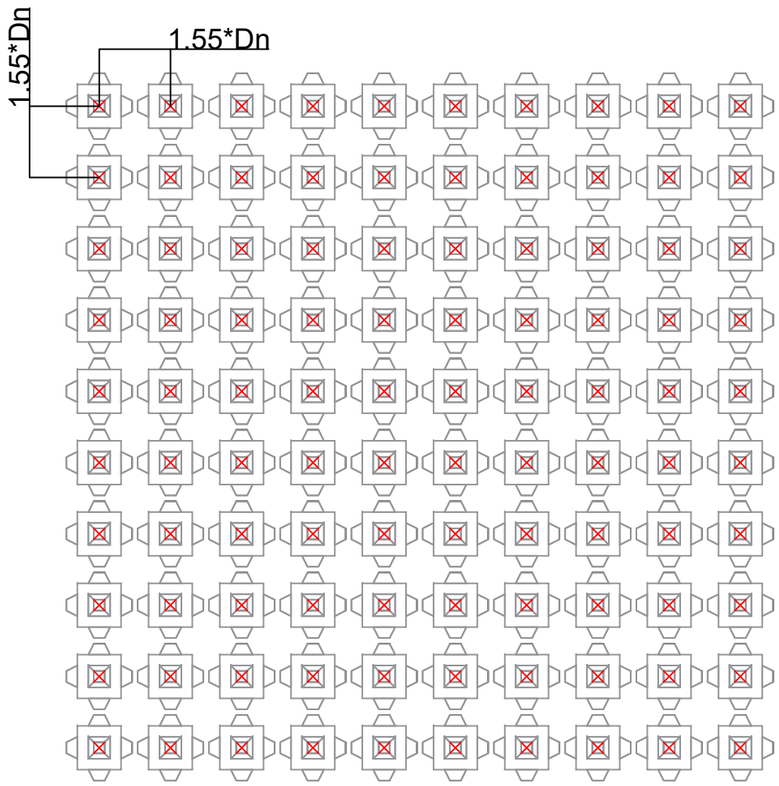
ALTERNATIVA 1

p%=0.56



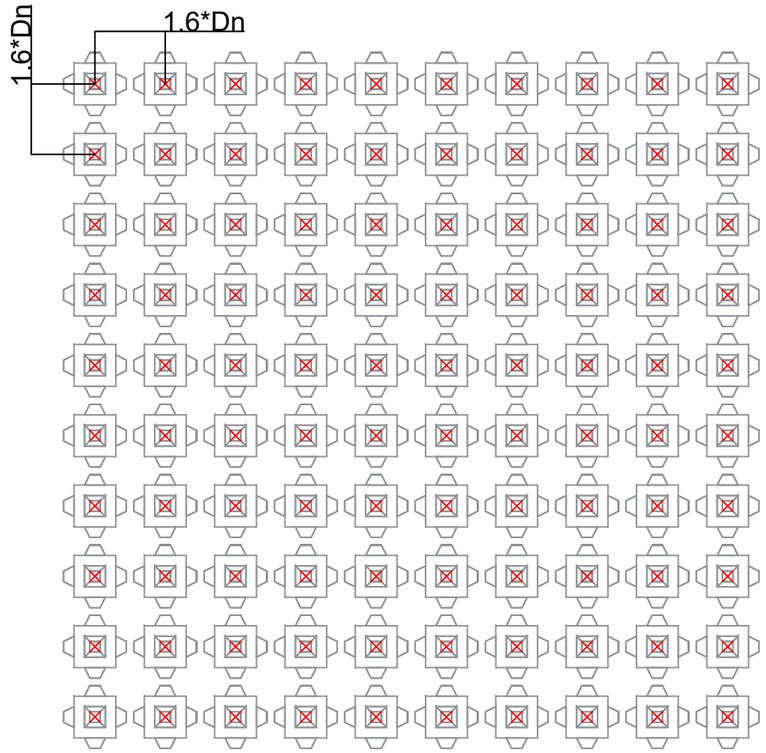
ALTERNATIVA 2

p%=0.58



ALTERNATIVA 3

p%=0.61



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

CAMINOS upv

Estudio experimental de colocación de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota de coronación con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de la playa de Mayakobá (México)

PLANO:

ALTERNATIVAS DE MALLA DE COLOCACIÓN

AUTOR: CLAUDIA BARJOLA MARTÍNEZ

CBarjola

FECHA FEBRERO 2026

PLANO Nº1 4

ESCALA: 1:3000

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

CAMINOS upv

Estudio experimental de colocación de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota de coronación con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de la playa de Mayakobá (México)

PLANO:

ALTERNATIVA 1 DE UBICACIÓN EN PLANTA:
3 DIQUES DE 200 METROS

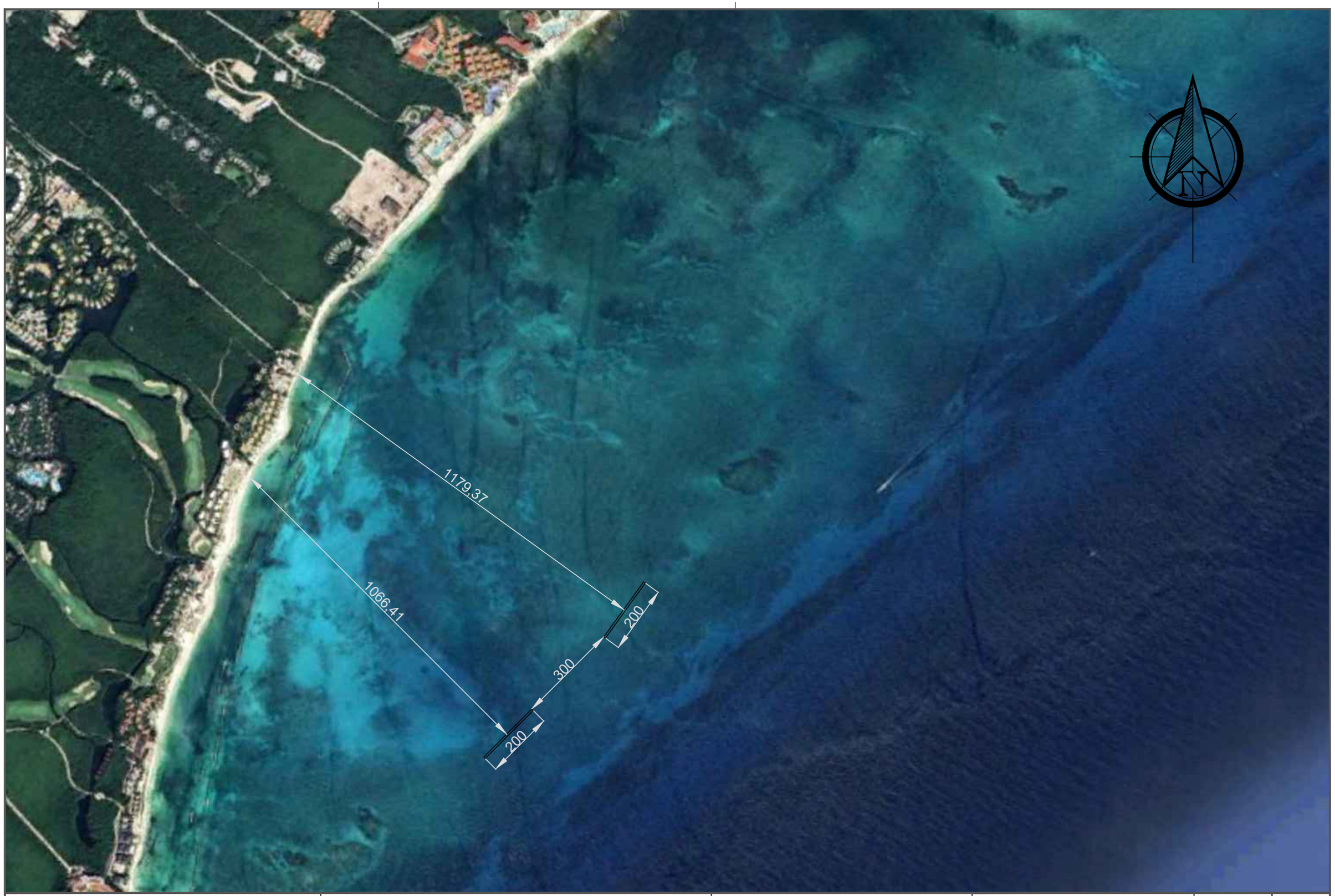
AUTOR: CLAUDIA BARJOLA MARTÍNEZ

CBarjola

FECHA FEBRERO 2026

PLANO Nº1 5.1

ESCALA: 1:10



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

CAMINOS upv

Estudio experimental de colocación de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota de coronación con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de la playa de Mayakobá (México)

PLANO:

ALTERNATIVA 2 DE UBICACIÓN EN PLANTA:
2 DIQUES DE 200 METROS

AUTOR: CLAUDIA BARJOLA MARTÍNEZ

CBarjola

FECHA
FEBRERO 2026

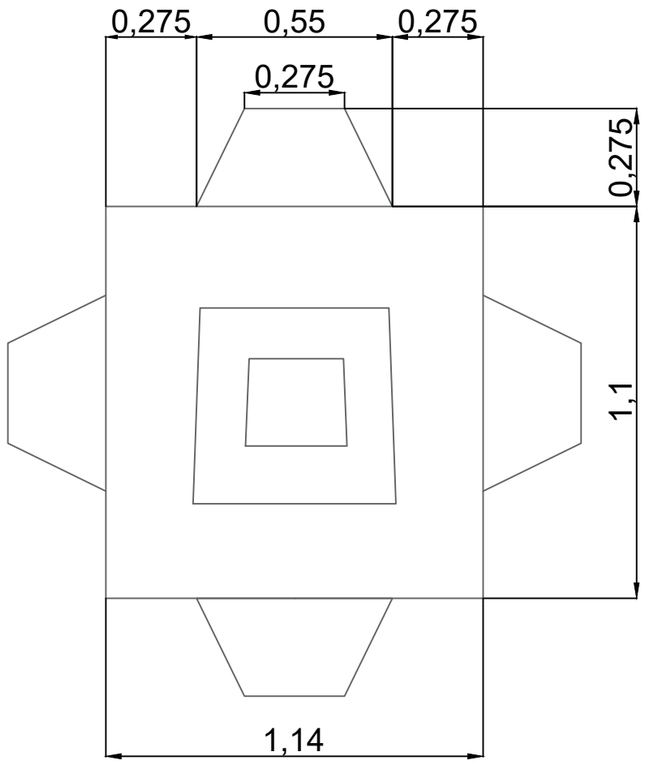
PLANO Nº1
5.2

ESCALA:
1:10

DIMENSIONES DE CUBÍPODO

ESCALA: 1:16

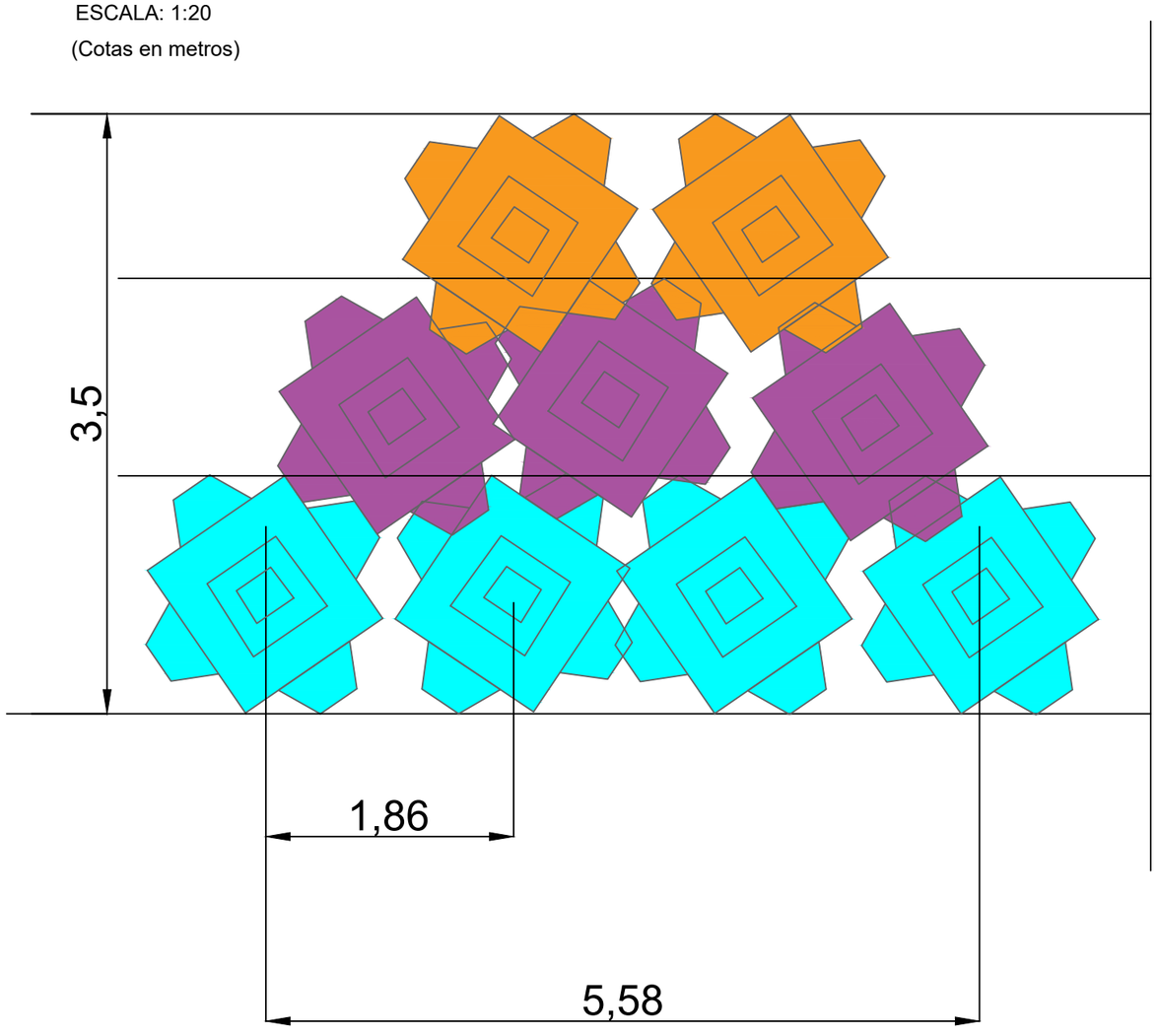
(Cotas en metros)



SECCIÓN TRANSVERSAL

ESCALA: 1:20

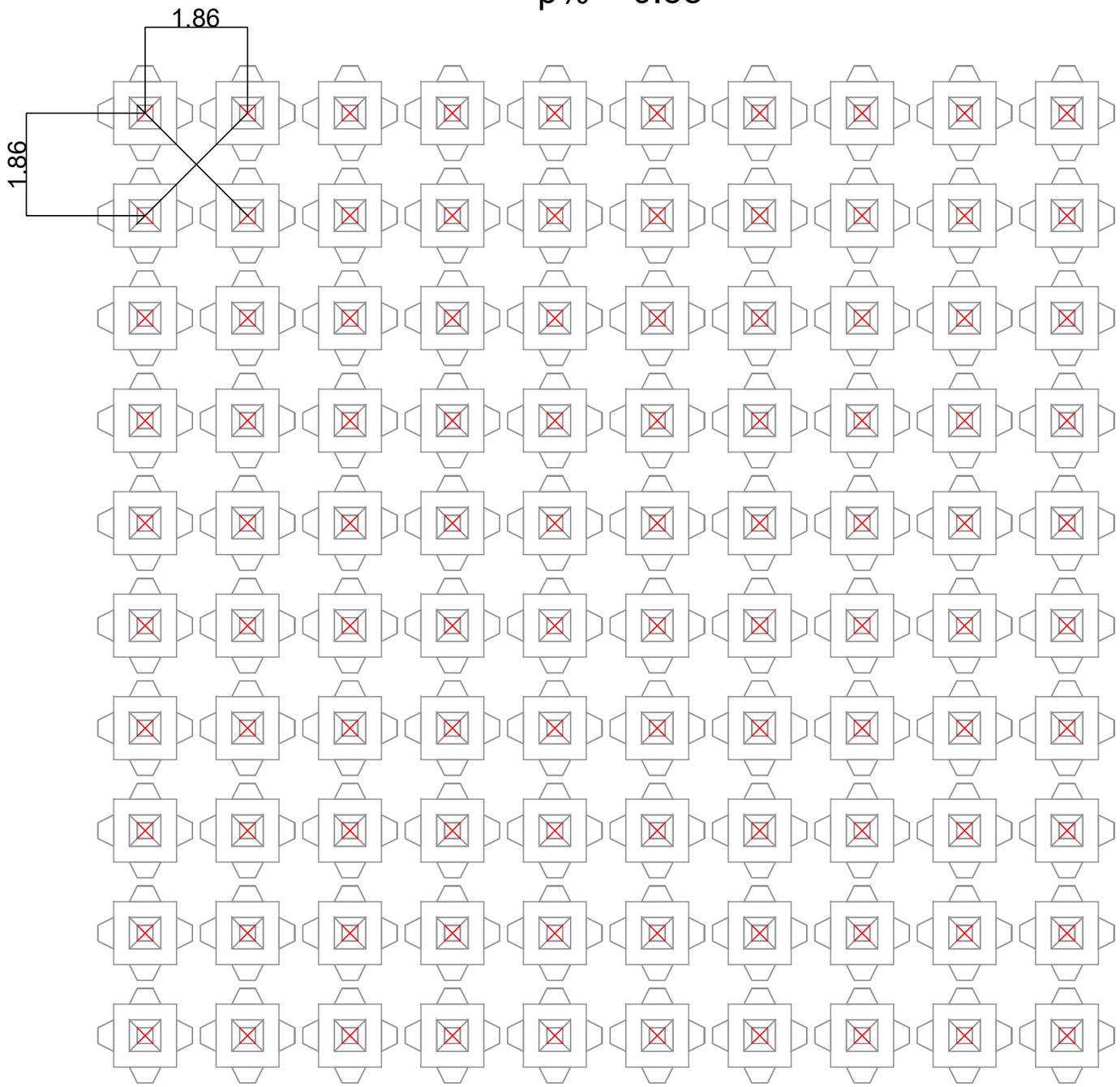
(Cotas en metros)



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA / CAMINOS upv	Estudio experimental de colocación de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota de coronación con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de la playa de Mayakobá (México)	PLANO: DISEÑO FINAL:DIMENSIONES DE CUBÍPODO Y SECCIÓN TRANSVERSAL	AUTOR: CLAUDIA BARJOLA MARTÍNEZ *CBarjola*	FECHA FEBRERO 2026 / PLANO Nº1 6.1 / ESCALA: VARIAS

(Cotas en metros)

p% = 0.58



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA CAMINOS upv	Estudio experimental de colocación de diques homogéneos de Cubípodos de baja cota de coronación con malla cuadrada. Aplicación a la protección costera de la playa de Mayakobá (México)	PLANO: DISEÑO FINAL: MALLA DE COLOCACIÓN	AUTOR: CLAUDIA BARJOLA MARTÍNEZ CBarjola	FECHA FEBRERO 2026 PLANO Nº1 6.2	ESCALA: 1:50