



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Propuesta de intervención costera para estabilizar Punta
Maroma en Quintana Roo (México)

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Peña García, Isaac

Tutor/a: Escudero Castillo, Mireille del Carmen

Cotutor/a externo: Mendoza Baldwin, Edgar Gerardo

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Propuesta de intervención costera para
estabilizar Punta Maroma en Quintana Roo
(México)

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

Autor: Isaac Peña García
Tutora: Escudero Castillo, Mireille del Carmen
Cotutor externo: Mendoza Baldwin, Edgar Gerardo
CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN	9
1.1	OBJETIVOS.....	10
2.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	10
2.1	LOCALIZACIÓN	10
2.2	TOPOGRAFÍA Y BATIMETRÍA	14
2.2.1	TOPOGRAFÍA.....	14
2.2.2	BATIMETRÍA.....	14
2.3	USOS DEL SUELO Y ECOSISTEMAS.....	16
2.3.1	MANGLARES	16
2.3.2	DUNAS COSTERAS	17
2.3.3	PASTOS MARINOS	17
2.3.4	SISTEMA ARRECIFAL.....	19
2.4	INTERVENCIÓN ANTRÓPICA EN PUNTA MAROMA	25
2.5	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA COSTA.....	26
2.5.1	INTRODUCCIÓN.....	26
2.5.2	ANÁLISIS EVOLUTIVO POR FECHAS	27
2.5.3	INTERPRETACIÓN GENERAL	31
3.	CLIMA MARÍTIMO	32
3.1	INTRODUCCIÓN	32
3.2	HURACANES.....	33
3.3	BASE DE DATOS DEL OLEAJE.....	35
3.4	CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE	36
3.4.1	ESTADÍSTICO BÁSICO DEL OLEAJE	37
3.4.2	RÉGIMEN MEDIO DE OLEAJE	41
3.4.3	RÉGIMEN EXTREMAL DE OLEAJE	42
3.4.4	PROBABILIDAD CONJUNTA.....	43
3.4.5	REGÍMENES DE OLEAJE: TORMENTA Y CALMA.....	48
4.	DINÁMICA LITORAL	54
5.	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS Y CONDICIONES DE MODELACIÓN.....	57
5.1	INTRODUCCIÓN	57

5.2	MODELO NUMÉRICO DE PROPAGACIÓN WAPO	57
5.2.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	58
5.2.2	FUNDAMENTO TEÓRICO.....	58
5.2.3	FICHEROS DE ENTRADA	60
5.3	MODELO NUMÉRICO DE CORRIENTES COCO.....	63
5.3.1	ESTRUCTURA DEL PROGRAMA.....	64
5.3.2	FUNDAMENTO TEÓRICO	64
5.3.3	FICHEROS DE ENTRADA	65
5.3.4	FICHEROS DE SALIDA.....	65
5.4	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN SELECCIONADOS	66
5.5	RESULTADOS	67
5.5.1	RESULTADOS DE SUPERFICIE LIBRE	67
5.5.2	RESULTADOS DE ALTURA DE OLA	71
5.5.3	RESULTADOS DEL SISTEMA DE CORRIENTES	75
6.	EVALUACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	79
7.	ESTUDIO DE SOLUCIONES	79
7.1	INTRODUCCIÓN	79
7.2	MECANISMOS DE ESTABILIZACIÓN	79
7.3	CONFIGURACIÓN Y DISEÑO DE LAS ALTERNATIVAS.....	80
7.4	ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS	80
7.4.1	ALTERNATIVA 1	81
7.4.2	ALTERNATIVA 2.....	82
7.4.3	ALTERNATIVA 3.....	83
7.4.4	ALTERNATIVA 4.....	84
7.5	IMPACTO AMBIENTAL	86
7.6	VIABILIDAD TÉCNICA.....	88
8.	PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	96
8.1	DISEÑO DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN	96
8.2	RESPUESTA DE LA LÍNEA DE COSTA DETRÁS DE LOS DIQUES	102
8.3	ALIMENTACIÓN ARTIFICIAL.....	104
8.4	PROCESO CONSTRUCTIVO.....	105
8.5	VALORACIÓN ECONÓMICA	106

9. BIBLIOGRAFÍA.....	107
----------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de Quintana Roo en México. Fuente: Wikipedia.	10
Figura 2. Mapa de municipios de Quintana Roo. Fuente: DescargarMapas.net....	11
Figura 3. Localización Punta Maroma. Fuente: Google Earth.....	12
Figura 4. Mapa de localización del tramo de estudio. Fuente: Google Earth.	13
Figura 5. Batimetría de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	15
Figura 6. Mapa de uso del suelo y vegetación de la zona costera asociada a los manglares. Fuente: CONABIO (2021).	16
Figura 7. <i>Thalassia testudinum</i> . Fuente: Fuente: Adaptado de Perera-Valderrama et al. (2020).	18
Figura 8. Cobertura Bentónica de los Ecosistemas Marinos del Caribe Mexicano. Fuente: CONABIO 2018.	18
Figura 9. Arrecife de Punta Maroma. Fuente: CataloniaHotels.	19
Figura 10. (A) Localización de Punta Maroma. (B) Arrecife situado entre Playa del Carmen y Puerto Morelos alrededor de la costa. Fuente: Adaptado de Blanchon et al. (2017).	21
Figura 11. Retrogradación en los corales. Adaptado de Blanchon et al. (2023). ...	23
Figura 12. Tramo de estudio por sectores. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 13. Evolución de la línea de Costa (2006/10). Fuente: Google Earth.....	27
Figura 14. Evolución de la línea de Costa (2011/02). Fuente: Google Earth.....	28
Figura 15. Evolución de la línea de Costa (2014/08). Fuente: Google Earth.....	28
Figura 16. Evolución de la línea de Costa (2016/04). Fuente: Google Earth.....	29
Figura 17. Evolución de la línea de Costa (2019/08). Fuente: Google Earth.....	30
Figura 18. Evolución de la línea de Costa (2024/02). Fuente: Google Earth.....	31
Figura 19. Evolución de la línea de Costa (2006-2024). Fuente: Google Earth.	32
Figura 20. Número de huracanes extremos en el Atlántico durante el periodo de 1988 al 2005. Adaptado de Márquez García et al. (2010).	33
Figura 21. Trayectoria de huracanes en los 25 años anteriores a 2013. Adaptado de Márquez García et al. (2010).....	34
Figura 22. Serie de altura de ola significativa (Hs), de 1940 a 2022. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.	37
Figura 23. Función de distribución de altura de ola significativa. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.	37
Figura 24. Histograma de altura de ola significativa. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.	38
Figura 25. Rosa anual de altura de ola significativa. Fuente: Elaboración propia ..	39
Figura 26. Rosas de oleaje por estaciones. Fuente: Elaboración propia	40

Figura 27. Régimen medio anual escalar de oleaje. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.	41
Figura 28. Estadísticos básicos del régimen medio anual direccional del oleaje. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.	42
Figura 29. Régimen extremal de altura de ola significativa. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.	43
Figura 30. Distribución Hs-Tp. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 31. Distribución Hs-Dirección. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 32. Análisis de dispersión Hs-Tp. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 33. Análisis de dispersión Hs-Dirección. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 34. Rosa de oleaje de tormenta anual. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 35. Rosas de oleaje de tormenta por estaciones. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 36. Rosa de oleaje de calma anual. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 37. Rosas de oleaje de calma por estaciones. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 38. Tasas de acumulación y erosión presentes en la Riviera Maya. Fuente: Adaptado de Márquez García et al. (2010).	56
Figura 39. Condiciones del fondo marino. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 40. Batimetría de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 41. Superficie libre. Caso 1. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 42. Superficie libre. Caso 5. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 43. Superficie libre. Caso 9. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 44. Altura de ola. Caso 2. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 45. Altura de ola. Caso 4. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 46. Altura de ola. Caso 6. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura 47. Altura de ola. Caso 8. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura 48. Corrientes. Caso 1. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 49. Corrientes. Caso 6. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 50. Corrientes. Caso 9. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 51. Disposición alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 52. Disposición alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 53. Disposición alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.	83
Figura 54. Disposición alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 55. Cobertura Bentónica. Fuente: Elaboración propia.	87
Figura 56. Altura de ola. Caso 3. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura 57. Altura de ola. Caso 6. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.	90

Figura 58. Altura de ola. Caso 8. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.	91
Figura 59. Corrientes. Caso 2. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.	93
Figura 60. Corrientes. Caso 5. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.	94
Figura 61. Corrientes. Caso 8. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.	95
Figura 62. Propuesta elegida. Fuente: Elaboración propia.....	98
Figura 63. Secciones transversales. (a) Dique-norte. (b) Dique-central. (c) Dique-sur. Fuente: Elaboración propia.	101
Figura 64. Respuesta de la costa a la colocación de un dique exento. Fuente: Adaptado de Hsu et al. (2003).	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Casos de oleaje seleccionados. Fuente: Elaboración propia.	66
Tabla 2. Resultados de Dn50. Fuente: Elaboración propia.	99
Tabla 3. Resultados de las formaciones. Fuente: Elaboración propia	104

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento, titulado "*Propuesta de intervención costera para estabilizar Punta Maroma en Quintana Roo, México*", se redacta como Trabajo de Fin de Grado (TFG) por Isaac Peña García, alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (ETSICCP) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), para la obtención del título de Grado en Ingeniería Civil.

El trabajo aborda la problemática de erosión costera que afecta a Punta Maroma, un entorno prácticamente virgen de alto valor ecológico situado en el Caribe Mexicano, caracterizado por sus sistemas dunares y la presencia de un arrecife coralino adyacente. La intervención en esta zona no solo busca estabilizar la playa, sino también contribuir a la protección de los ecosistemas asociados y a la recuperación de las áreas litorales colindantes. Para ello, se analizará el estado actual de la playa y su evolución histórica mediante datos climáticos y oceanográficos, apoyándose en modelos numéricos de propagación de oleaje de reconocido prestigio internacional.

Quedan excluidos del alcance del trabajo la realización de campañas *in situ*, estudios de impacto ambiental exhaustivos, valoraciones económicas detalladas y la redacción de un proyecto constructivo definitivo.

Este TFG permitirá aplicar las competencias adquiridas durante el grado, especialmente en el diseño de obras marítimas, el análisis de procesos morfodinámicos y el manejo de modelos numéricos. Asimismo, reforzará la capacidad para plantear soluciones sostenibles en entornos frágiles, alineándose principalmente con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

- Objetivo 13: Acción por el clima.
- Objetivo 14: Vida submarina.
- Objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres.

La concienciación ambiental se erige como un eje transversal, dado que la estabilidad de Punta Maroma depende directamente de la preservación de sus dunas y arrecifes.

Esta memoria se estructura en diez capítulos. El Capítulo 1 constituye la presente introducción. El Capítulo 2 describe la zona de estudio. El Capítulo 3 analiza el clima marítimo. El capítulo 4 diagnostica la dinámica litoral. El Capítulo 5 describe los modelos numéricos y las condiciones de modelación. El Capítulo 6 evalúa la problemática identificada. El Capítulo 7 realiza el estudio de soluciones. El Capítulo 8 detalla la propuesta de solución definitiva. Finalmente, el Capítulo 9 recoge las referencias bibliográficas.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal es desarrollar una propuesta técnica viable bajo criterios ambientales, económicos y sociales, priorizando la preservación del arrecife de coral. El estudio se centrará en:

1. El diagnóstico de los procesos erosivos mediante herramientas de dinámica litoral.
2. La evaluación de alternativas de intervención sostenibles.
3. La selección de una solución óptima que integre conocimientos de ingeniería marítima y conservación ambiental.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 LOCALIZACIÓN

El tramo de estudio se ubica en Punta Maroma, en la costa oriental de la Península de Yucatán, dentro del estado de Quintana Roo, México (figura 1), formando parte del corredor turístico más importante del Caribe mexicano. Situado aproximadamente a 35 km al sur de Puerto Morelos y 20 km al norte de Playa del Carmen, esta área forma parte del municipio de Solidaridad (figura 2) y se encuentra enclavada en uno de los tramos litorales de mayor valor paisajístico y ecológico de la Riviera Maya, entre Puerto Morelos y Playa del Carmen (figura 3). Geográficamente, sus coordenadas se sitúan entre 20°39' N y 86°57' O, en una región caracterizada por sus extensas playas de arenas blancas y aguas cristalinas, típicas de los ambientes carbonatados de la plataforma yucateca.



Figura 1. Localización de Quintana Roo en México. Fuente: Wikipedia.

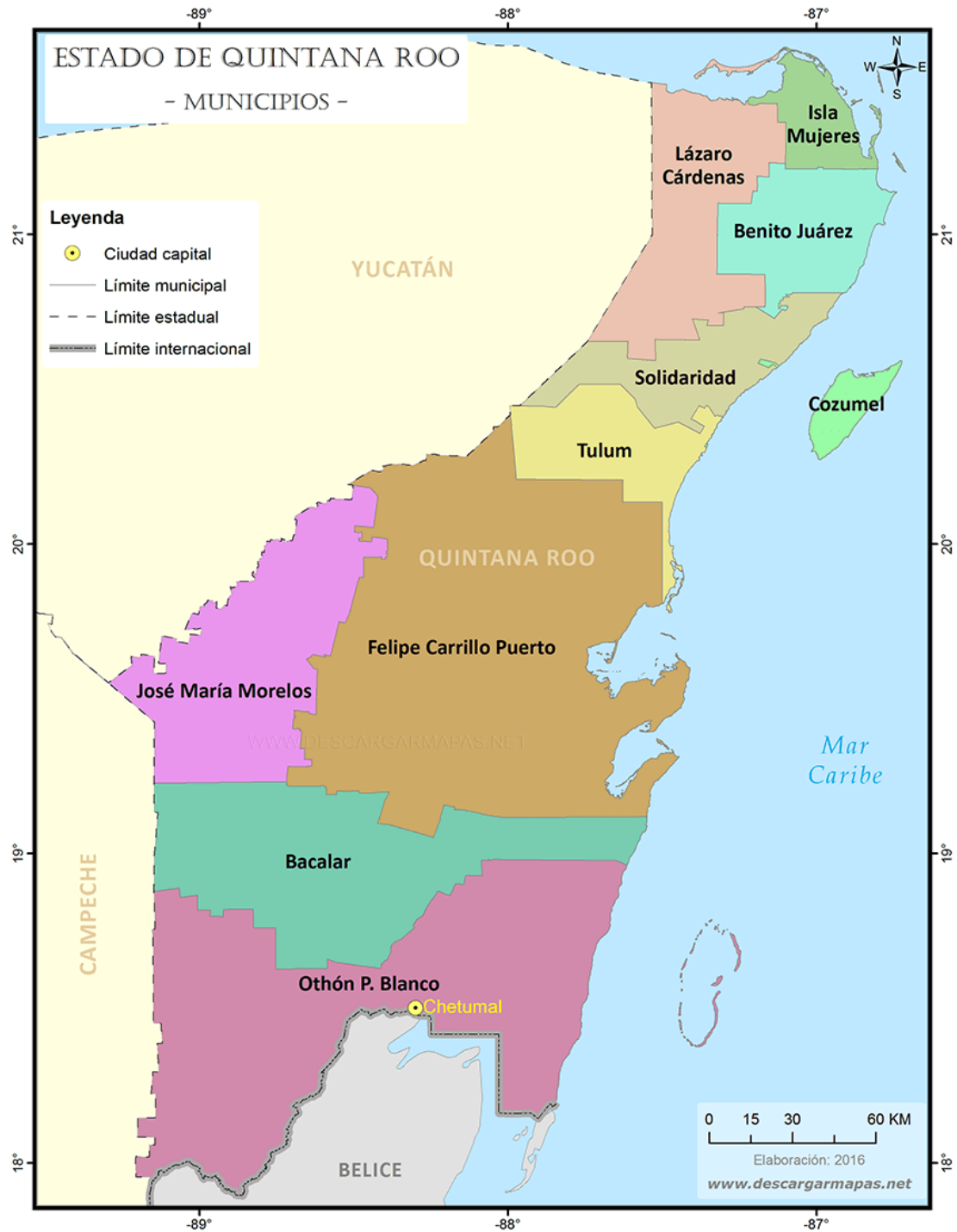


Figura 2. Mapa de municipios de Quintana Roo. Fuente: DescargarMapas.net.

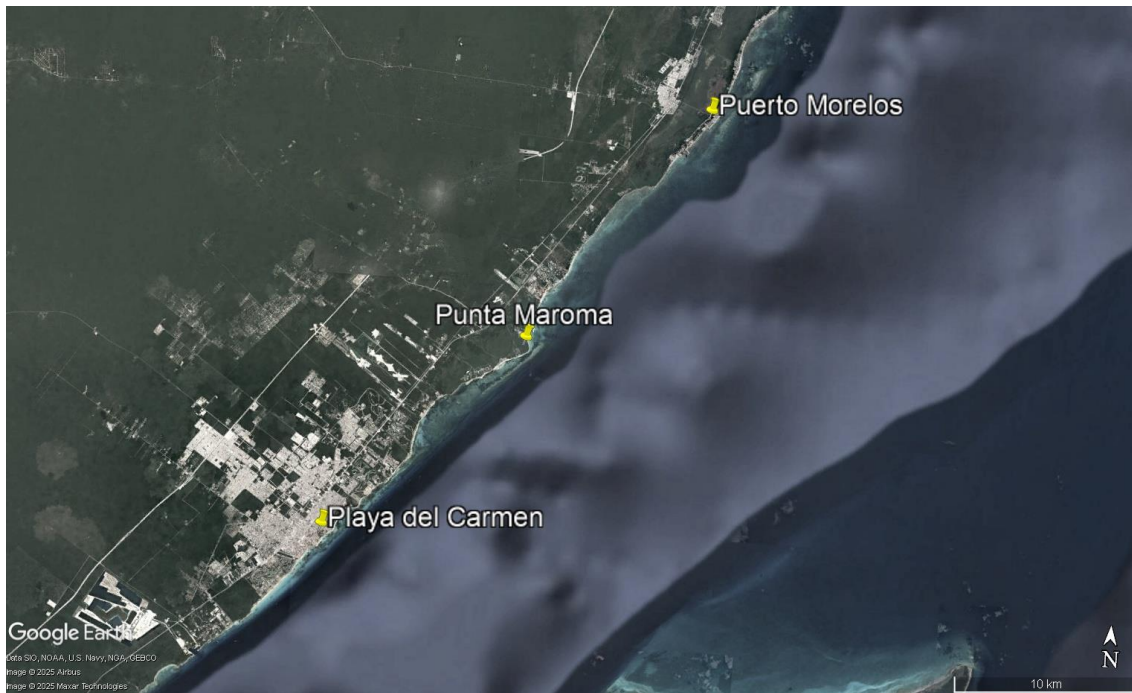


Figura 3. Localización Punta Maroma. Fuente: Google Earth.

Esta zona costera forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano, también conocido como Gran Arrecife Maya, que con sus más de 1,000 km de extensión se erige como la segunda barrera de coral más grande del mundo, solo superada por la Gran Barrera de Coral australiana. La proximidad de Punta Maroma a este ecosistema arrecifal es necesaria para entender tanto su dinámica sedimentaria como su vulnerabilidad ante fenómenos naturales. El arrecife actúa como barrera natural que atenúa la energía del oleaje proveniente del Mar Caribe, creando condiciones únicas para el desarrollo de playas de grano fino y aguas someras de color turquesa, características que han convertido a esta región en un destino turístico de renombre internacional.

Desde el punto de vista geomorfológico, Punta Maroma se asienta sobre la plataforma calcárea de Yucatán, una formación geológica de origen kárstico desarrollada durante el Cenozoico. Este sustrato geológico, compuesto principalmente por rocas calizas y sedimentos carbonatados, confiere a la zona una alta permeabilidad y una peculiar hidrogeología, con numerosos sistemas de cuevas submarinas y cenotes que conectan el mar con el acuífero continental. La península forma una gran llanura de baja altitud, donde los procesos de disolución de las calizas han dado lugar a un paisaje costero singular, con playas que en algunos tramos superan los 50 metros de anchura durante la temporada seca.

En el contexto actual, Punta Maroma representa un enclave de gran importancia tanto ecológica como socioeconómica. Su posición intermedia entre los desarrollos turísticos consolidados de Cancún y Playa del Carmen, y las áreas más

preservadas de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an al sur, la convierte en una zona de transición donde confluyen intereses de conservación y desarrollo. La carretera federal 307, principal eje vial de la región corre paralela a la costa a unos 3-5 km tierra adentro, conectando el área con la red de servicios básicos mientras mantiene cierto grado de aislamiento que ha permitido preservar su carácter natural. Esta relativa accesibilidad, combinada con la presencia de algunos de los complejos hoteleros más exclusivos de la Riviera Maya, ha posicionado a Punta Maroma como un destino de turismo de alto nivel, al tiempo que plantea desafíos para la gestión sostenible de su frágil litoral.

El tramo de estudio dispone de 1700 m de longitud dentro de Punta Maroma (figura 4), cuya zona es particularmente sensible a los fenómenos meteorológicos extremos que afectan regularmente a la región. Su exposición al oleaje generado por los vientos del este y este-sureste, combinada con la influencia estacional de ciclones tropicales, configura una dinámica costera donde los procesos erosivos y de acreción sedimentaria varían significativamente a lo largo del año.

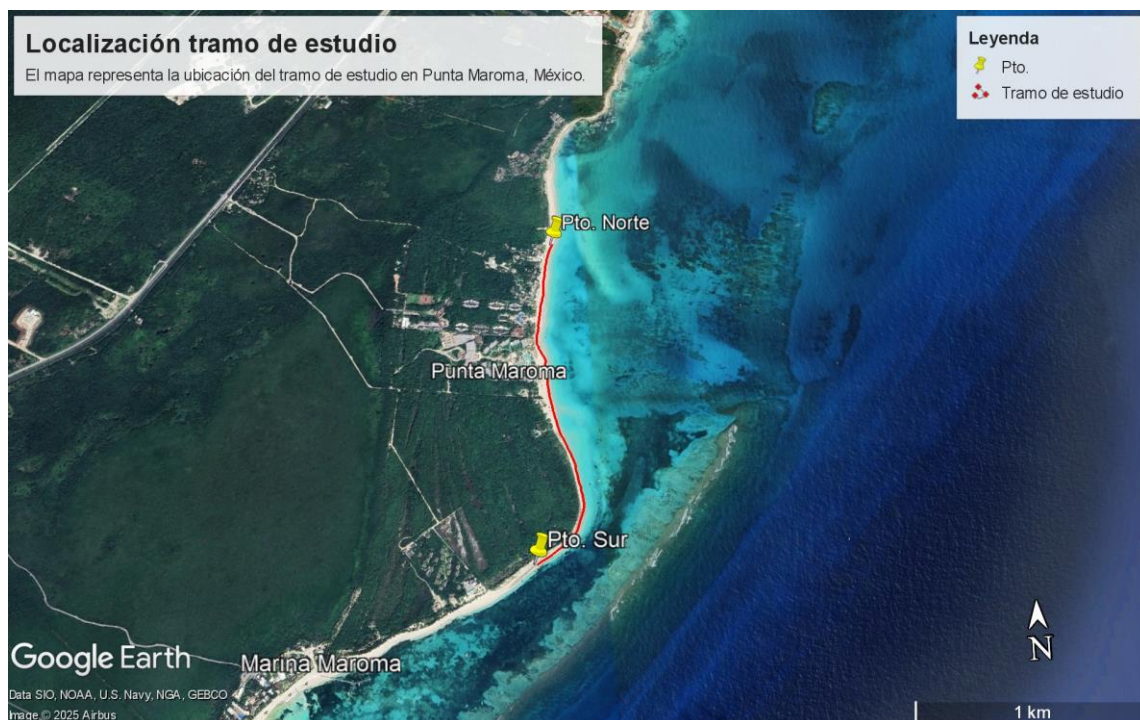


Figura 4. Mapa de localización del tramo de estudio. Fuente: Google Earth.

Este tramo fue seleccionado por presentar un alto grado de erosión costera registrado en los últimos años, su proximidad al arrecife y los impactos de un crecimiento no regulado en la zona.

2.2 TOPOGRAFÍA Y BATIMETRÍA

2.2.1 TOPOGRAFÍA

La topografía de Punta Maroma es representativa de la costa del Caribe mexicano, caracterizada por una llanura costera de muy baja elevación. La unidad morfológica principal es la playa, compuesta por arenas blancas de carbonato cálcico cuyo ancho varía significativamente a lo largo de este tramo de litoral, oscilando en su estado actual entre los 10 m en zonas de mayor erosión y los 50 m en los sectores más estables o propensos a la acumulación.

El terreno es esencialmente plano, con una pendiente suave, da paso rápidamente a zonas de manglar, selva baja inundable y, en algunos casos, cenotes costeros. Esta topografía tan plana y la alta permeabilidad del sustrato calcáreo significan que no existen barreras topográficas naturales. Esta es la razón fundamental por la que toda esta área es extremadamente vulnerable a la inundación costera provocada por el rebase de olas y fuertes temporales o huracanes.

2.2.2 BATIMETRÍA

La topografía submarina de la plataforma continental Caribe en la zona de Punta Maroma presenta una configuración compleja y fuertemente condicionada por la actividad tectónica regional. Se observa un progresivo estrechamiento de la plataforma en dirección Norte-Sur, acompañado de notables discontinuidades morfológicas asociadas a sistemas de fallas activas. Estas características generan gradientes batimétricos pronunciados donde se registran variaciones de profundidad de varios cientos de metros en espacios reducidos.

El perfil batimétrico se estructura en tres tramos principales:

1. Zona somera (0 a -30 m):
 - Pendiente suave y uniforme del 4% hacia mar abierto.
 - La isobata de -30 m se localiza aproximadamente a 3 km de la línea de costa.
2. Plataforma media (-30 a -35 m):
 - Pendiente mínima ($\approx 0.25\%$), requiriéndose unos 2 km para descender 5 m de profundidad.
 - Superficie de equilibrio dominada por procesos sedimentarios.
3. Talud continental (-35 a -480 m):
 - Pendiente acentuada con dos sectores diferenciados:

- De -35 a -200 m: Gradiente del 41% (400 m de desplazamiento horizontal).
- De -200 a -480 m: Gradiente del 14% (2 km de desplazamiento horizontal).
- Morfología controlada por fracturas y procesos de masa activos.

La figura 5 muestra la batimetría de la zona de estudio:

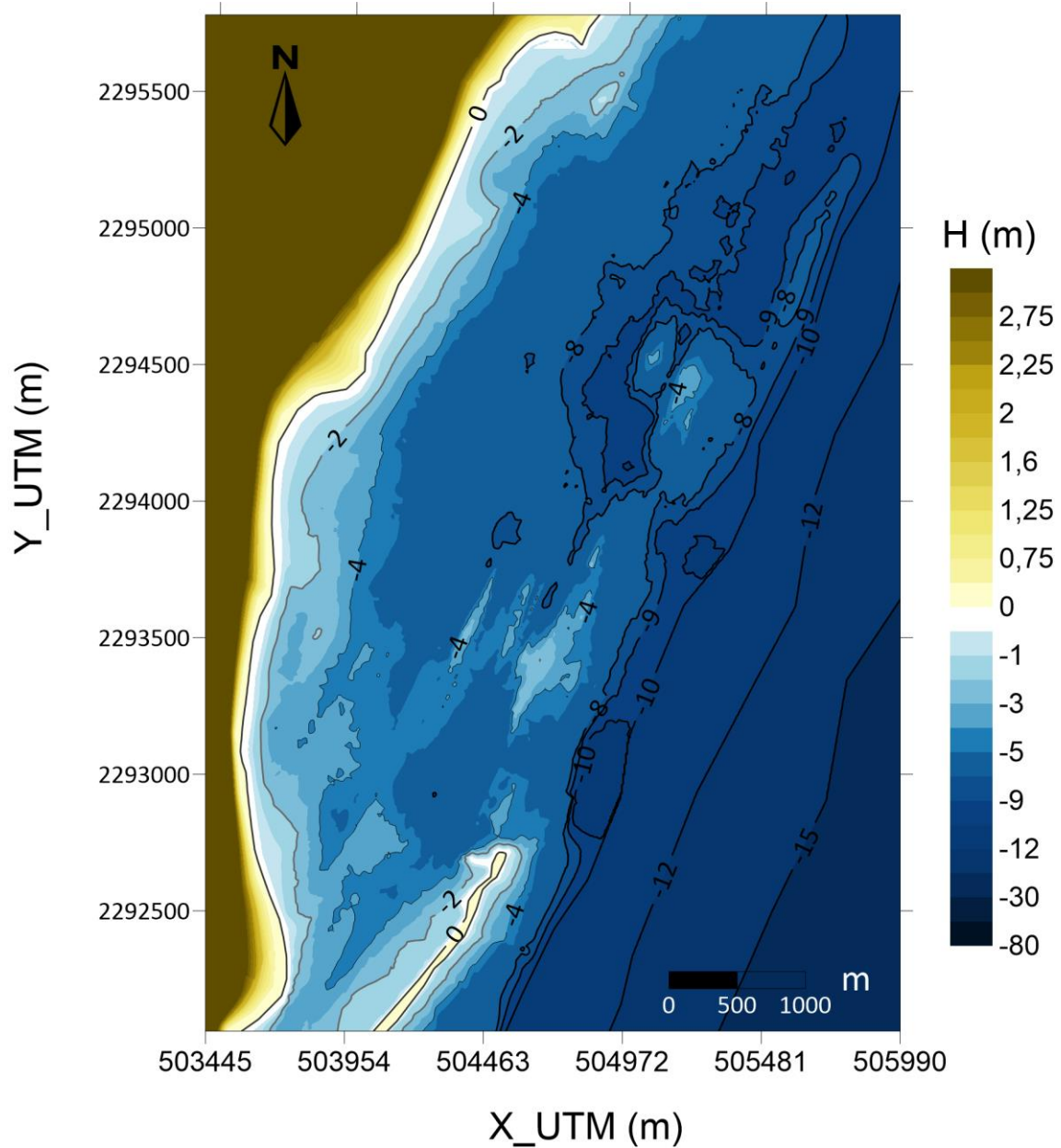


Figura 5. Batimetría de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

2.3 USOS DEL SUELO Y ECOSISTEMAS

El área de estudio se caracteriza por su alto valor ambiental, gracias a la presencia de ecosistemas costeros únicos. Dunas costeras, arrecifes de coral, manglares y pastos marinos conforman un paisaje natural de gran importancia ecológica. Estos ecosistemas no solo albergan una rica biodiversidad, sino que también protegen la costa de la erosión y aportan estabilidad al litoral. En este apartado se describen los usos actuales del suelo y las características principales de estos entornos, cuya conservación es relevante para el equilibrio natural de la zona.

2.3.1 MANGLARES

Los manglares son ecosistemas de transición entre el medio terrestre y marino, caracterizados por la presencia de árboles y arbustos tolerantes a la salinidad. En México, y particularmente en la costa caribeña, estas comunidades están dominadas por cuatro especies principales: *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo). Sirven como áreas de refugio, alimentación y reproducción para una gran diversidad de especies marinas y aves (Valderrama-Landeros; et al., 2017, p.4).

El Mapa de Uso de Suelo y Vegetación de la zona costera asociada a los manglares (figura 6) revela la presencia de los manglares cerca de la zona de estudio, típicamente asociados a zonas inundables, lagunas costeras y desembocaduras de flujos de agua. Su distribución está directamente influenciada por factores como la salinidad, el tipo de sustrato y el régimen hidrológico.

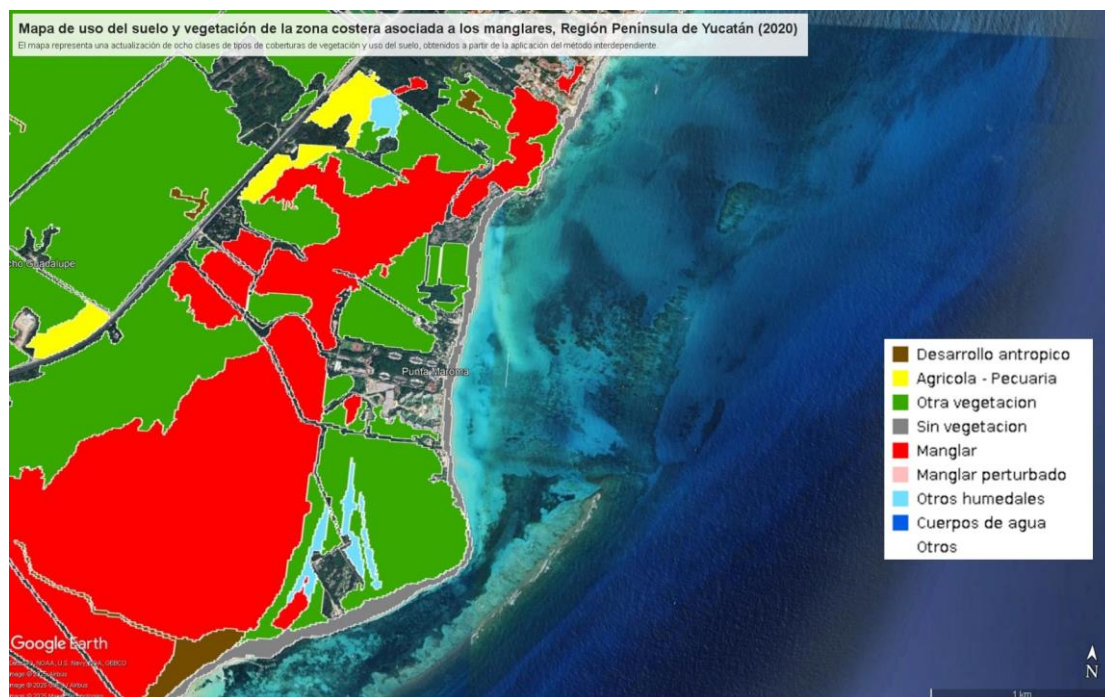


Figura 6. Mapa de uso del suelo y vegetación de la zona costera asociada a los manglares. Fuente: CONABIO (2021).

2.3.2 DUNAS COSTERAS

México cuenta con aproximadamente 800,000 hectáreas de dunas costeras, lo que representa cerca del 1% de la superficie total del país. Estos ecosistemas se distribuyen a lo largo del 80% del litoral mexicano y cumplen funciones relevantes como la protección costera frente a la erosión, la contención de inundaciones, la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de procesos sedimentarios naturales (Jiménez-Orocio et al., 2015).

Detrás de la playa, en los sectores donde existe un suministro de arena suficiente y la vegetación ha podido establecerse, se desarrollan cordones dunares de baja altura (normalmente entre 0.5 y 1.5 m) (figura 5). Estas dunas, actúan como una reserva estratégica de sedimentos, amortiguando el impacto del oleaje y alimentando la playa tras los eventos erosivos, funcionando, así como el primer sistema de defensa natural del litoral.

Se establece la especie *Sporobolus virginicus*, que coloniza la playa y las dunas embrionarias. Su tolerancia a la salinidad y al enterramiento por arena les permite formar tapetes vegetales que inician la fijación del sustrato.

Este conjunto de vegetación actúa como un sistema de amortiguamiento que reduce la energía del viento y del oleaje, captura y retiene sedimentos, y participa en el equilibrio natural de la playa, actuando como una reserva de arena en condiciones de oleaje de tormenta. La presencia y estado de estas especies son indicadores de la salud del ecosistema, y su conservación resulta indispensable para mantener la resiliencia de la costa ante perturbaciones tanto naturales como antrópicas.

2.3.3 PASTOS MARINOS

Los pastos marinos son plantas angiospermas que forman praderas sumergidas en zonas costeras someras. En México, estos ecosistemas están representados principalmente por especies del género *Thalassia* (*T. testudinum*) *Syringodium* (*S. filiforme*) y *Halodule* (*H. wrightii*) (figura 7) (Perera-Valderrama et al., 2020, p. 84).

Las praderas de pastos marinos estabilizan los fondos marinos, reducen la energía del oleaje, atrapan sedimentos, mejoran la calidad del agua y constituyen uno de los sumideros de carbono azul más eficaces del planeta. Además, sirven como áreas de crianza, refugio y alimentación para una gran diversidad de especies, incluyendo peces, crustáceos y moluscos de importancia comercial.

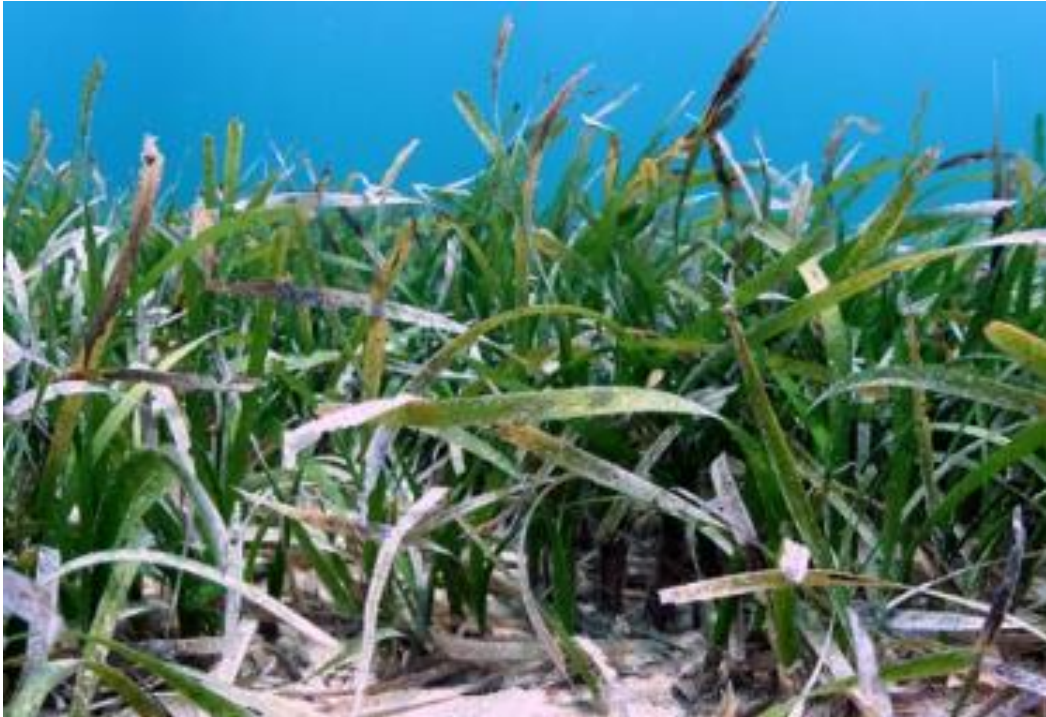


Figura 7. *Thalassia testudinum*. Fuente: Fuente: Adaptado de Perera-Valderrama et al. (2020).

El mapa de *Cobertura Bentónica de los Ecosistemas Marinos del Caribe Mexicano* 2018 (figura 8) permite identificar la presencia de extensas praderas de pastos marinos en las proximidades de Punta Maroma. Su distribución responde a factores como la profundidad, la transparencia del agua, el tipo de sustrato y la energía hidrodinámica.

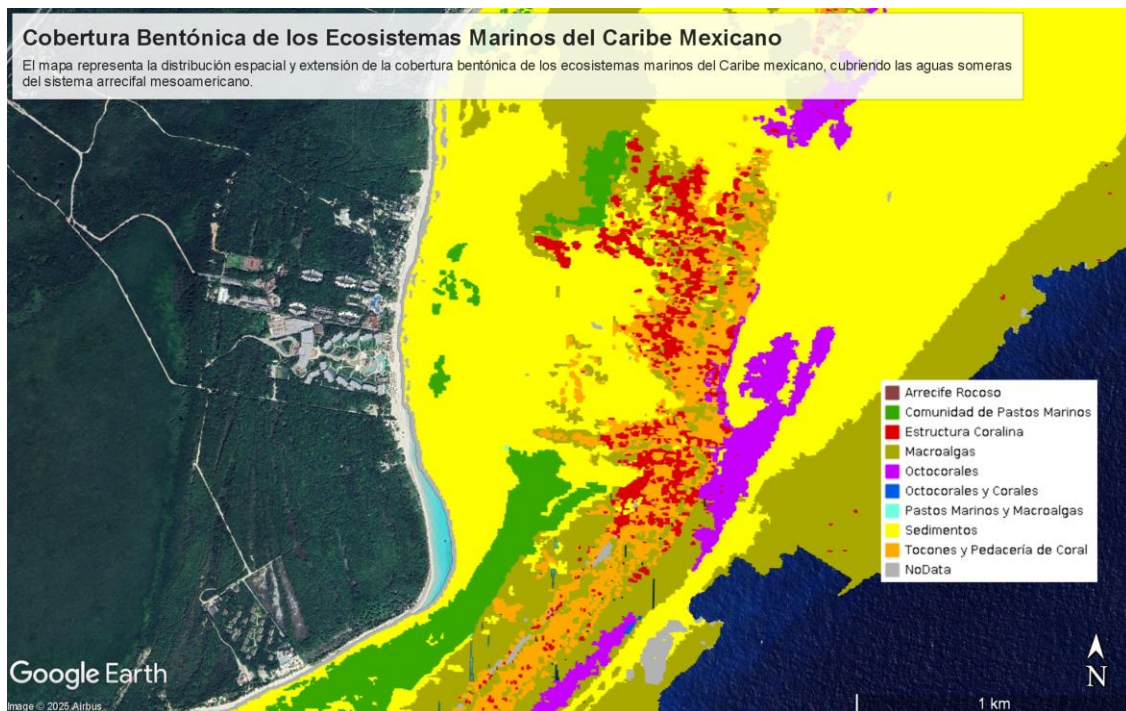


Figura 8. *Cobertura Bentónica de los Ecosistemas Marinos del Caribe Mexicano*. Fuente: CONABIO 2018.

Conocer la localización exacta de estos hábitats es vital por dos razones principales. Primero, porque son indicadores biológicos de la salud ambiental costera; su presencia y estado reflejan la calidad del agua y la estabilidad del ecosistema. Segundo, y directamente vinculado al proyecto de estabilización costera, porque cualquier intervención mediante estructuras debe realizarse fuera del área ocupada por estas praderas para evitar impactar negativamente sobre las mismas. La construcción de diques, espigones o cualquier otra infraestructura sobre estas zonas alteraría irreversiblemente las condiciones de luz e hidrodinámicas que requieren los pastos para sobrevivir, conduciendo a su degradación y pérdida.

2.3.4 SISTEMA ARRECIFAL

El arrecife de Punta Maroma es un sistema franjeante representativo del sector norte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM). Se localiza en la costa oriental de la Península de Yucatán, México (figura 9) y dispone una anchura variable que oscila entre los 110 metros y los 170 metros.

La configuración morfológica actual del arrecife es el resultado de la compleja interacción de procesos geológicos, hidrodinámicos y ecológicos a lo largo del Holoceno, siendo especialmente sensible a los cambios ambientales de los últimos milenios.



Figura 9. Arrecife de Punta Maroma. Fuente: CataloniaHotels.

2.3.4.1 Morfología del arrecife

El análisis batimétrico de alta resolución derivado de satélite (SDB) permite identificar una marcada zonación paralela a la línea de costa, donde cada unidad morfológica desempeña un rol específico en la disipación de energía del oleaje (figura 10) (Blanchon et al., 2017). La secuencia, desde la línea de costa hacia mar abierto, es la siguiente:

1. Laguna Trasera (Back-reef): Plataforma sedimentaria somera (profundidad < 3 m), compuesta predominantemente por arenas carbonatadas. Está delimitada hacia la costa por una escarpa de ~1 m de desnivel que la separa de la laguna costera interior.
2. Cresta Arrecifal (Crestline): Constituye la divisoria morfológica primaria del sistema. Se presenta como un cambio abrupto de pendiente que marca el límite entre la plataforma sedimentaria de la laguna trasera y el talud activo de la zona frontal. Su posición define el punto de rotura principal del oleaje bajo condiciones normales.
3. Zona Frontal (Reef-front): Talud de mayor inclinación que se extiende desde la cresta hasta una ruptura de pendiente de 1-3 m de altura (Reef-front break). Esta zona presenta una subdivisión morfológica y ecológica clave, especialmente en el sector norte del arrecife:
 - Zona de Toconos y Bloques (Stump-and-boulder zone): De escasa profundidad (< 3 m), se caracteriza por la presencia de bases erosionadas (*tocones*) de *Acropora palmata* y bloques coralinos dispersos, resultado de la acción hidrodinámica de alta energía.
 - Zona de Espolones y Surcos (Spur-and-groove zone): Entre 3-8 m de profundidad, representa el núcleo estructural del arrecife. Los espolones (crestas de marco coralino y detrito consolidado) alternan con surcos (canales de arena) que favorecen el drenaje del agua y la disipación de energía, otorgando la máxima rugosidad superficial y complejidad topográfica al sistema.
4. Terraza Rocosa (Rock terrace): Plataforma de sustrato rocoso consolidado, con profundidades entre 4-10 m. Actúa como una superficie de abrasión y transición hacia el talud continental.
5. Ruptura de Pendiente de la Plataforma Media (Mid-shelf slope break): Escarpe de ~6 m de desnivel relativo, localizado entre las isobatas de 10 y 16 m. Esta característica geomorfológica es fundamental en la dinámica del sistema, ya que actúa como un umbral crítico que fuerza el rompimiento del oleaje de tormenta y huracanes.

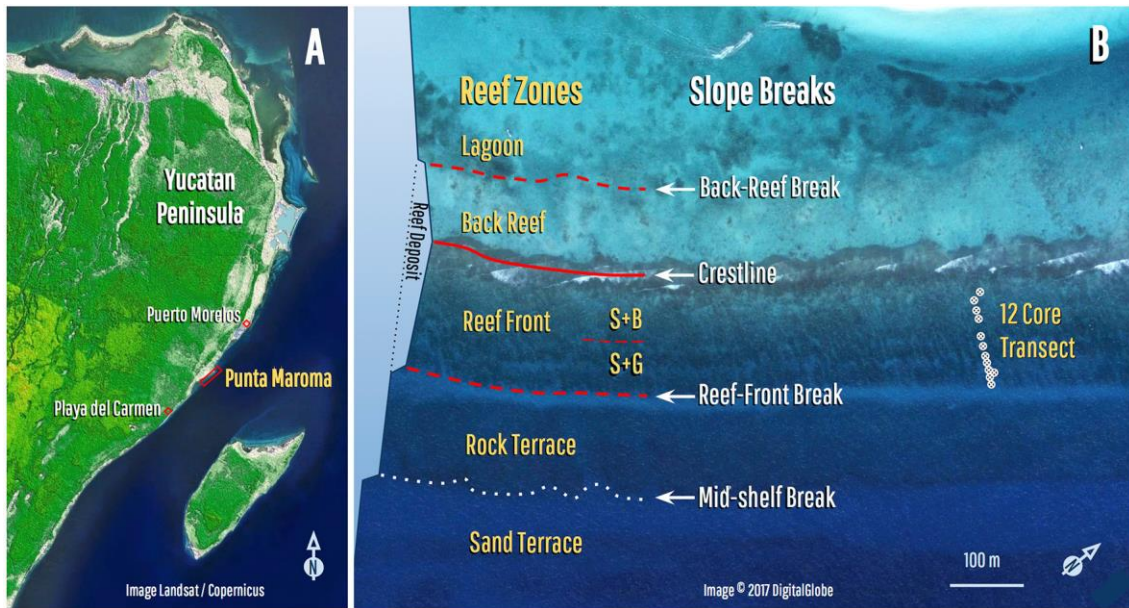


Figura 10. (A) Localización de Punta Maroma. (B) Arrecife situado entre Playa del Carmen y Puerto Morelos alrededor de la costa. Fuente: Adaptado de Blanchon et al. (2017).

El hallazgo geomorfológico más relevante para la estabilidad costera es que la posición de la cresta arrecifal se mantiene a una distancia notablemente uniforme de 315 ± 15 m de la ruptura de pendiente de la plataforma media. Esta relación espacial constante es un fuerte indicador de que la localización y evolución del arrecife están controladas hidrodinámicamente por los procesos de rompimiento de oleaje inducidos por esta característica del fondo marino.

2.3.4.2 Geología

Los datos de perforación, datados mediante la técnica de ^{230}Th (Uranio-Torio), que es el método estándar para datar materiales carbonatados como corales y espeleotemas de hasta aproximadamente 500,000 años, indican que el arrecife moderno no es una estructura de crecimiento vertical continuo, sino un depósito detrítico de 2 m de espesor, compuesto en un 90% por clastos de coral (principalmente *A. palmata*) y solo un 10% por colonias *in situ* (Blanchon et al., 2017).

La estructura interna evidencia una clara retrogradación. El arrecife comenzó a formarse hace aproximadamente 5.5 miles de años a 3 m bajo el nivel del mar actual (msnm) y, desde entonces, ha retrocedido unos 100 m hacia la costa sobre sus propios sedimentos. Este patrón es consistente con un modelo de desarrollo controlado por huracanes y el ascenso gradual del nivel del mar.

2.3.4.3 Estado actual del arrecife

Históricamente, el arrecife estuvo dominado por especies constructoras:

- Zona de cresta y laguna trasera: *Acropora palmata* fue la especie clave, aportando alta complejidad estructural y tasa de crecimiento.

- Zona frontal: *Orbicella annularis* y *O. faveolata* fueron los principales constructores, junto con *Pseudodiploria strigosa* y *Siderastrea spp.*

Sin embargo, entre 1985 y 2016, la comunidad coralina experimentó una homogenización ecológica y un declive funcional pronunciado (figura 11):

- Pérdida de especies clave: La cobertura de *A. palmata* en la zona posterior del arrecife se desplomó de 14% a <0.1%, y las especies foliosas-digitiformes (*Agaricia tenuifolia*, *Porites porites*) también disminuyeron drásticamente.
- Aumento de especies no constructoras: Especies con menor contribución a la estructura tridimensional y a la producción de carbonato, como *Agaricia agaricites* y *Porites astreoides*, incrementaron su cobertura relativa, especialmente en la zona frontal.
- Convergencia funcional: Las comunidades en la parte externa del arrecife y posterior son ahora más similares en composición, dominadas por especies de bajo relieve, lo que resulta en una pérdida de la heterogeneidad habitativa entre zonas.

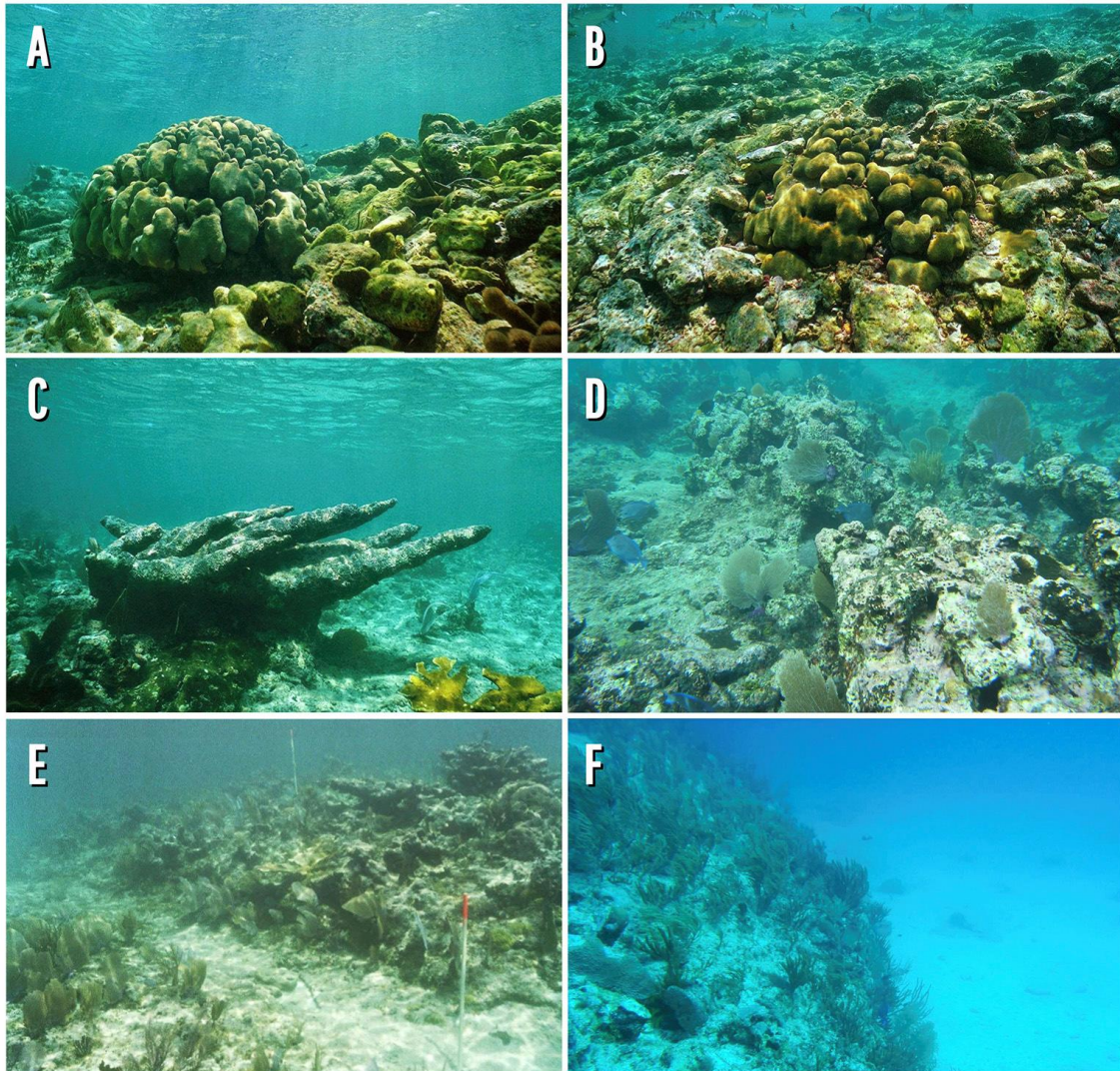


Figura 11. Retrogradación en los corales. Adaptado de Blanchon et al. (2023).

La salud estructural de un arrecife coralino depende fundamentalmente de su balance de carbonato, donde un resultado positivo (producción > erosión) indica crecimiento, mientras que uno negativo (producción < erosión) implica deterioro. En el caso de Punta Maroma, todos los indicadores confirman un balance netamente negativo, lo que sitúa al arrecife en un estado de erosión activa (Estrada-Saldívar et al., 2019).

Este desequilibrio resulta de la combinación de dos tendencias críticas. Por un lado, la capacidad de producción de carbonato por parte de los corales ha experimentado una drástica reducción durante las últimas tres décadas, disminuyendo a menos de la mitad en la zona de back-reef, al pasar de 3.51 a 1.38 kg CaCO₃ m⁻² año⁻¹ (Estrada-Saldívar et al., 2019).

El resultado final es un presupuesto carbonatado claramente deficitario. El arrecife ha perdido completamente su capacidad de crecimiento vertical y, más grave aún,

que su estructura existente se está degradando de manera activa. La gravedad de esta situación se refleja adicionalmente en la evolución del Índice de Función Arrecifal (RFI), cuyo descenso significativo corrobora una pérdida generalizada de la funcionalidad estructural del sistema en su conjunto (Estrada-Saldívar et al., 2019).

2.3.4.4 Impacto de huracanes sobre el arrecife

La evolución geológica y el estado actual del arrecife están determinados fundamentalmente por la acción de los huracanes. El mecanismo de influencia comienza cuando las grandes olas generadas por estos eventos interactúan con la ruptura de pendiente de la plataforma media.

Este proceso hidrodinámico tiene dos consecuencias directas para la formación del arrecife. En primer lugar, la enorme energía liberada fragmenta las colonias coralinas existentes. En segundo lugar, transporta los fragmentos resultantes (clastos) hacia la costa.

La recurrencia de huracanes intensos (categorías 4-5) en la región, estimada entre 150-300 años, establece un ciclo constante de destrucción y recuperación incompleta. La estructura resultante está permanentemente dominada por depósitos de tormenta en lugar de crecimiento coralino in situ. Estos factores originan un período necesario para la recuperación total del arrecife de unos 60 años.

Un factor adicional crítico es la influencia del ascenso del nivel del mar, que reduce progresivamente la eficiencia de disipación energética en la ruptura de pendiente. Este fenómeno permite que el oleaje de tormenta penetre más hacia la costa y transporte clastos a distancias mayores, constituyéndose así en el motor principal del proceso de retrogradación documentado en el arrecife.

2.3.4.5 Implicaciones del arrecife en la estabilidad costera de Punta Maroma

La caracterización realizada conduce a que el arrecife de Punta Maroma ha perdido su resiliencia estructural y funcional como defensa costera natural. Su capacidad para disipar energía del oleaje está severamente comprometida debido a estos tres factores:

- La transición de un arrecife constructor a uno netamente erosivo.
- La retrogradación que acerca la zona de rompimiento a la línea de costa
- La homogenización y pérdida de complejidad estructural que reduce la rugosidad superficial.

Si bien el foco principal de este estudio es la estabilización de la playa, la degradación del arrecife es un factor importante que ayuda en el problema de erosión costera.

Existe una relación de retroalimentación positiva entre la estabilidad de la playa y la salud del arrecife: una playa estable reduce la turbidez y el estrés sedimentario sobre los corales, creando condiciones que favorecen la recuperación de la producción de carbonato. A su vez, un arrecife funcional incrementa su capacidad de disipación energética, protegiendo más efectivamente la línea de costa. Por tanto, las soluciones de estabilización costera en Punta Maroma presentan una oportunidad única de generar un beneficio doble: restaurar el activo playero y, simultáneamente, crear las condiciones hidrodinámicas y ambientales que faciliten la recuperación natural del ecosistema arrecifal adyacente.

Cabe destacar que, actualmente, este arrecife carece de estatus de protección ambiental específico que garantice su conservación activa. En consecuencia, el diseño de cualquier estrategia de estabilización costera para Punta Maroma debe evaluarse no solo por su eficacia hidrodinámica inmediata, sino también por su capacidad para generar externalidades positivas en el ecosistema arrecifal circundante. Si bien la recuperación integral del arrecife excede el alcance de este proyecto y requeriría de una gestión específica, las intervenciones planteadas deben concebirse como el primer eslabón de una estrategia integral que permita, en el futuro, la reconexión funcional entre la playa recuperada y el arrecife.

2.4 INTERVENCIÓN ANTRÓPICA EN PUNTA MAROMA

Punta Maroma se ubica dentro del corredor turístico de la Riviera Maya, el destino más importante de México. El desarrollo turístico ha experimentado un crecimiento exponencial. La Riviera Maya ha visto multiplicarse durante el siglo XX el número de establecimientos hoteleros y la afluencia de visitantes, superando los tres millones de turistas anuales. Este boom turístico ha generado un aumento en la económica y en el empleo, consolidando a la región como el motor económico de Quintana Roo (Dachary, 2008).

No obstante, a diferencia de los sectores altamente urbanizados del norte como Cancún o Playa del Carmen, Punta Maroma ha mantenido un modelo de desarrollo distinto, caracterizado por una baja densidad de infraestructura hotelera.

El paisaje costero de la zona se conserva en estado seminatural, con amplios sectores de vegetación nativa y un perfil prácticamente virgen. El desarrollo se manifiesta a través de hoteles y complejos de baja altura, integrados entre la cobertura vegetal.

A pesar de este modelo menos agresivo, la intervención humana ha introducido alteraciones significativas. La construcción de instalaciones turísticas, aunque aislada, ha modificado localmente la línea de costa, eliminado vegetación nativa y alterado los procesos sedimentarios naturales. La frecuentación turística, aunque menor en escala, ejerce presión sobre playas y arrecifes, mientras que la infraestructura de servicios asociada introduce fuentes de contaminación y fragmentación del hábitat.

2.5 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA COSTA

2.5.1 INTRODUCCIÓN

El presente apartado tiene como objetivo estudiar la evolución de la línea de costa en un tramo específico de la región de Punta Maroma (Riviera Maya, México) desde el año 2006 hasta la actualidad. Para ello, se han utilizado imágenes satelitales disponibles en la plataforma Google Earth, seleccionando aquellas fechas que ofrecen la mejor resolución para la observación detallada de los cambios morfológicos costeros. Las fechas elegidas han sido: octubre de 2006, febrero de 2011, junio de 2014, abril de 2016, agosto de 2019 y febrero de 2024.

El tramo de costa analizado se ha dividido en tres sectores diferenciados:

- Sector Norte (780 m), caracterizado por la presencia de edificaciones hoteleras.
- Sector Central (760 m), zona virgen anterior a la punta
- Sector Sur (240 m), zona virgen posterior a la punta



Figura 12. Tramo de estudio por sectores. Fuente: Elaboración propia.

Mediante la superposición de las líneas de costa correspondientes a cada fecha, se ha evaluado la evolución espacial del litoral, identificando tanto procesos de erosión como de acumulación sedimentaria.

2.5.2 ANÁLISIS EVOLUTIVO POR FECHAS

2006/10

La imagen más antigua analizada muestra una costa en estado parcialmente natural, con las primeras edificaciones hoteleras establecidas en la zona norte (figura 13). La línea de costa presentaba un ancho de playa que oscilaba entre los 45 y 65 m en la zona norte, incrementándose hasta los 75-125 m en la zona central, mientras que, en el extremo sur, el ancho se reducía a unos 25 m. Esta configuración indica un sistema costero aún funcional, con variaciones típicas de un entorno natural en equilibrio.



Figura 13. Evolución de la línea de Costa (2006/10). Fuente: Google Earth.

2011/02

Durante este periodo se identifican nuevas construcciones significativas como el complejo Secrets Maroma Beach Riviera Cancún y varios bares de playa. Además, se observan edificaciones en el extremo norte actualmente abandonadas. El impacto urbanístico se traduce en una notable regresión de la línea de costa, con una pérdida media de unos 13 m respecto a la fecha de 2006, a lo largo del frente litoral alcanzando en algunos puntos de la zona central hasta 50 m. En contraste, en la zona sur se detecta un leve avance de la línea de costa (aproximadamente 15 metros), lo que sugiere una acumulación de sedimentos posiblemente derivada de procesos de deriva litoral (figura 14).



Figura 14. Evolución de la línea de Costa (2011/02). Fuente: Google Earth.

2014/06

No se registran nuevas edificaciones en este intervalo, sin embargo, la regresión continúa de forma significativa. Se calcula una pérdida media de 15 m respecto a la fecha de 2011, siendo más intensa en la zona central, especialmente en la curva del litoral, donde se alcanzan valores de hasta 25 m. Esto podría atribuirse a la ausencia de medidas de mitigación frente a la erosión causada por la acción del oleaje (figura 15).



Figura 15. Evolución de la línea de Costa (2014/08). Fuente: Google Earth.

2016/04

Durante este año tampoco se observan nuevas infraestructuras relevantes, sin embargo, la erosión se mantiene constante. El retroceso medio de la playa respecto a la fecha de 2014 es de aproximadamente 12 metros (figura 16).



Figura 16. Evolución de la línea de Costa (2016/04). Fuente: Google Earth.

2019/08

La línea de costa presenta una ligera recuperación en comparación con la medición de 2016, con un avance estimado de 10 m. No obstante, no se identifican elementos externos (construcciones, obras costeras, etc.) que justifiquen este cambio, lo cual sugiere la posible influencia de eventos estacionales (figura 17).



Figura 17. Evolución de la línea de Costa (2019/08). Fuente: Google Earth.

2024/02

La imagen más reciente muestra una clara reactivación del proceso erosivo. En comparación con 2016, se ha producido una regresión promedio de 10 m en la zona norte, alcanzando pérdidas de hasta 38 metros en la zona central, concretamente en la curva del litoral. La erosión ha reducido considerablemente la superficie de playa utilizable, lo cual constituye un riesgo para las infraestructuras turísticas cercanas. Mientras tanto, en el extremo sur del área de estudio, la acumulación de sedimentos ha continuado lentamente, logrando una ganancia neta de aproximadamente 18 m en los últimos 18 años (figura 18).



Figura 18. Evolución de la línea de Costa (2024/02). Fuente: Google Earth.

2.5.3 INTERPRETACIÓN GENERAL

La evolución registrada entre 2006 y 2024 (figura 19) muestra una clara tendencia regresiva en la línea de costa, especialmente en el sector norte y central, donde la existencia antropológica ha sido más intensa. El desarrollo turístico sin una adecuada planificación ambiental ha contribuido a alterar los procesos naturales de transporte y deposición de sedimentos, favoreciendo fenómenos erosivos severos.

En contraste, el sector sur presenta una dinámica opuesta, con una ganancia neta de terreno frente al mar. Este comportamiento puede explicarse por la redistribución de sedimentos arrastrados desde las zonas erosionadas del norte y depositados en esta parte menos expuesta del litoral.

Los casos más críticos se encuentran en la zona central de la playa y en la parte de la punta, donde se han perdido 75 m de playa y el retroceso acumulado ha sido tan grave que prácticamente ha eliminado la franja de playa. La forma del relieve costero, caracterizada por una curva saliente, ha potenciado el impacto directo del oleaje en esta área, acelerando los procesos erosivos. De no implementarse medidas de protección y regeneración costera, es probable que esta dinámica erosiva se extienda hacia el sur, comprometiendo aún más la estabilidad del frente litoral.

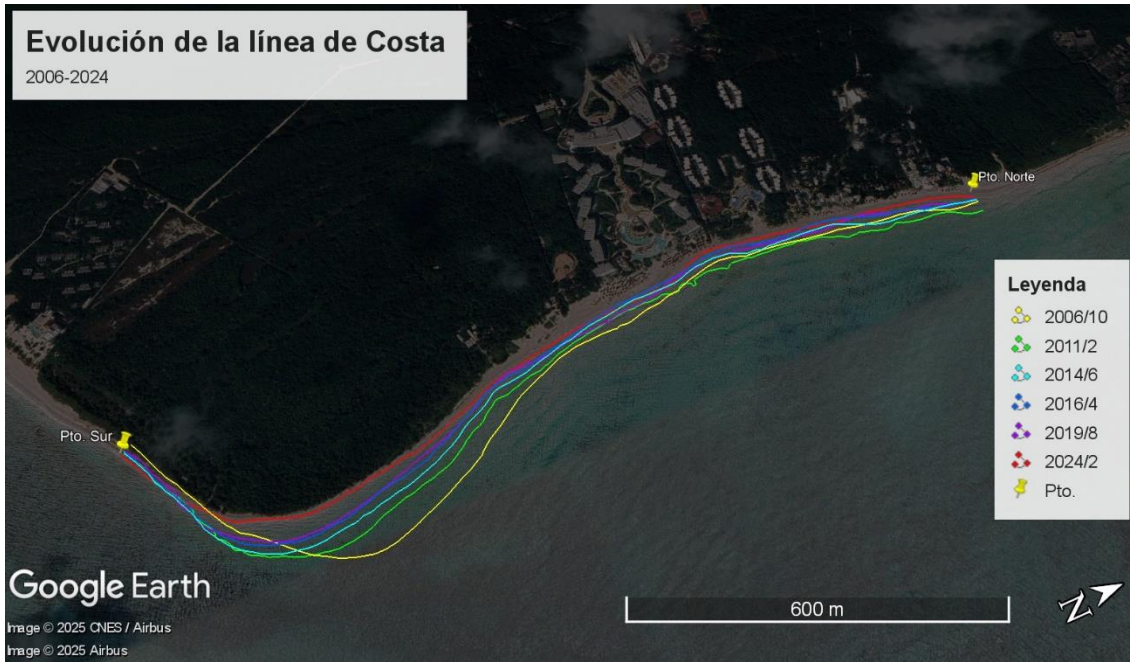


Figura 19. Evolución de la línea de Costa (2006-2024). Fuente: Google Earth.

2.5.3.1 CONCLUSIONES

La evolución de la línea de costa entre 2006 y 2024 refleja un proceso de regresión litoral. La falta de intervención para mitigar la erosión, junto con la alteración de la dinámica sedimentaria natural, ha resultado en una pérdida significativa de playa, especialmente en el sector central y en la zona de la punta.

3. CLIMA MARÍTIMO

3.1 INTRODUCCIÓN

El estudio del clima marítimo proporciona información sobre las propiedades del oleaje en aguas profundas, el cual, al propagarse hacia la costa, repercute directamente en la zona de interés.

La descripción del oleaje se lleva a cabo mediante su evaluación en condiciones medias y extremas. Las situaciones de tormenta tienen una gran importancia en el mar Caribe, debido a su recurrencia y a su papel determinante en el comportamiento morfodinámico del litoral. Para ello, se emplean series de datos sintéticos generados mediante modelos numéricos de predicción de oleaje de segunda y tercera generación.

Las variaciones del nivel del mar en la región están dominadas principalmente por el fenómeno de marea de tormenta, inducida por alteraciones en la presión atmosférica y por la intensidad y dirección de los vientos asociados a ciclones tropicales.

3.2 HURACANES

La costa de Punta Maroma se sitúa en una de las regiones más expuestas a la actividad ciclónica del Atlántico Norte. Los huracanes no son meros eventos meteorológicos aislados; son potentes agentes geomorfológicos que, en cuestión de horas, pueden alterar drásticamente el perfil de una costa, erosionando playas, inundando humedales costeros y modificando la batimetría de la plataforma continental. Su influencia está ligada a las condiciones oceánicas y atmosféricas, que a su vez están siendo modificadas por el cambio climático global.

El artículo de Márquez García et al. (2010) sintetiza la relación crítica entre el calentamiento de la superficie del mar y la actividad de los huracanes. Citando el análisis de Saunders y Lea (2007, 2008), el estudio establece que un incremento de apenas 0.5 °C en la temperatura superficial del océano (especialmente en los meses críticos de agosto y septiembre) puede producir un aumento de aproximadamente un 40% en la frecuencia e intensidad de los huracanes en el Atlántico, en comparación con los promedios históricos de la segunda mitad del siglo XX. Esta tendencia se vio dramáticamente confirmada en la temporada récord de 2005, que registró cuatro huracanes de categoría 5 (Wilma, Katrina, Rita y Emily), una cifra sin precedentes en la historia meteorológica moderna (NOAA, 2006) (figuras 20 y 21). Los modelos climáticos del IPCC citados en el trabajo proyectan para el Golfo de México y el Caribe un aumento de la temperatura superficial del mar de entre 1 y 2 °C, lo que favorecería que los ciclones tropicales alcancen con mayor frecuencia las categorías superiores en la escala Saffir-Simpson.

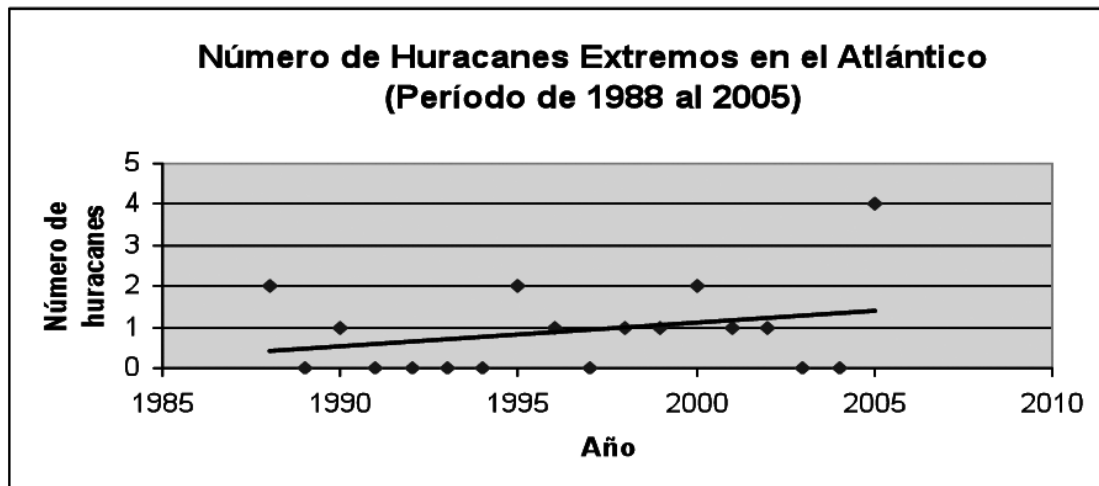


Figura 20. Número de huracanes extremos en el Atlántico durante el periodo de 1988 al 2005. Adaptado de Márquez García et al. (2010).

El impacto de un huracán en la costa se manifiesta a través de tres mecanismos principales:

- Marea de tormenta: Un ascenso anormal del nivel del mar, inducido por los vientos y la baja presión, que puede alcanzar varios metros de altura e inundar extensas áreas terrestres.
- Oleaje de alta energía: Olas generadas por los vientos huracanados que, al propagarse hacia la costa, movilizan enormes volúmenes de sedimentos y provocan una intensa erosión.
- Corrientes litorales inducidas: Que redistribuyen masivamente los sedimentos, pudiendo causar acreción en unos sectores y erosión severa en otros.

A pesar de esta poderosa fuerza, el estudio de Márquez García et al. (2010) revela una resiliencia notable en la Riviera Maya. El análisis de la línea de costa entre 1978 y 2005 mostró que, si bien existen procesos de erosión y acreción, las tasas netas anuales son bajas (< 1 m/año), especialmente al compararlas con las registradas en el Golfo de México (ej: 3-5 m/año en Sánchez Magallanes y 8-9 m/año en la desembocadura del Río San Pedro y San Pablo, según Hernández-Santana et al., 2008). Los autores atribuyen esta estabilidad relativa a la protección natural que brindan el sistema arrecifal mesoamericano, que disipa la energía del oleaje; la Isla de Cozumel, que actúa como una barrera natural; y la propia morfología kárstica y rocosa del litoral, más resistente a la erosión.

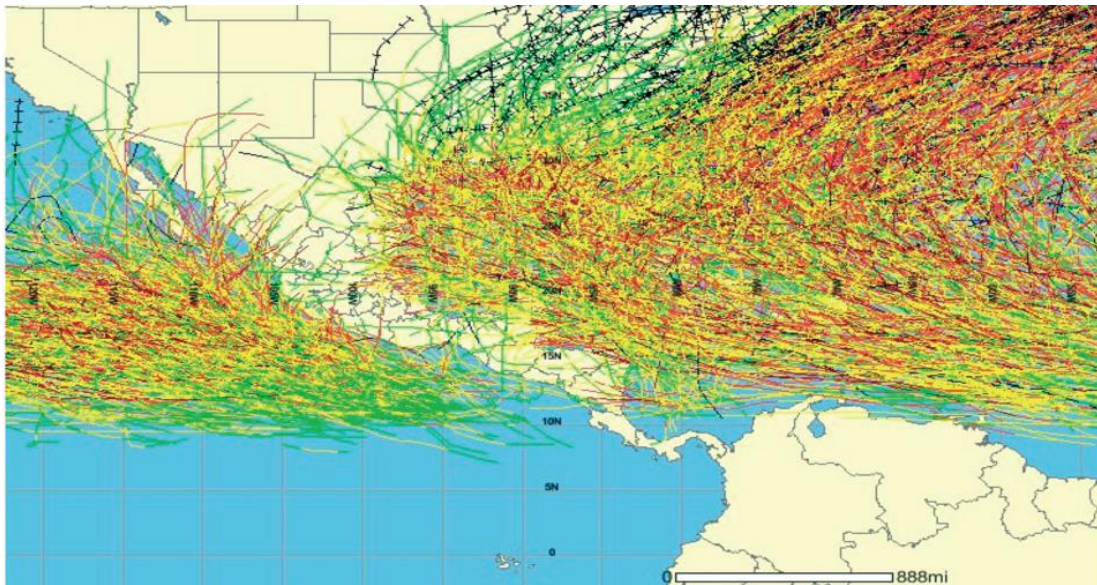


Figura 21. Trayectoria de huracanes en los 25 años anteriores a 2013. Adaptado de Márquez García et al. (2010)

El mayor riesgo para el futuro de Punta Maroma no reside únicamente en huracanes más intensos, sino en su sinergia con otro proceso derivado del cambio climático: la elevación progresiva del nivel del mar. Márquez García et al. (2010) analizaron perfiles topográficos de 12 playas, incluida Punta Maroma, y estimaron el impacto de dos escenarios:

- Con una elevación de 0.5 m, se perdería aproximadamente el 20% de las playas. Punta Maroma, con una altura de solo 0.4 a 1.2 m, se encontraría en riesgo extremo, con su playa prácticamente desaparecida.
- Con una elevación de 1.0 m, la pérdida se dispararía hasta el 90% de las playas de la región.

Un nivel del mar más alto permite que el oleaje, ya de por sí energético durante un huracán, llegue más lejos tierra adentro con mayor fuerza, al reducirse la fricción con el fondo. Esto amplifica exponencialmente el poder erosivo, saturando la capacidad de protección que ofrecen el arrecife y la propia playa.

Si bien el cambio climático es algo innegable, sus consecuencias varían en tipo y grado, y dependen de las condiciones locales y regionales. El nivel del mar en Punta Maroma está aumentando, pero los escenarios comentados son poco probables para el Caribe Mexicano. El aumento del nivel del mar posibilita proyectos de restauración.

La intervención debe diseñarse para resistir la energía de un huracán categórico, aunque también se debe valorar un posible nuevo régimen marítimo con un nivel del mar elevado.

3.3 BASE DE DATOS DEL OLAJE

Para el análisis del clima marítimo se ha utilizado la base de datos de análisis de acceso abierto ERA5 del Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Proporciona información de una serie sintética compuesta por 727584 estados de mar horarios desde las 0 horas del día 1/1/1940 hasta las 23 horas del día 31/12/2022. Los datos corresponden a la celda de modelado situada sobre el punto de coordenadas geográficas 20.75° latitud Norte y -86.75° longitud Oeste que corresponden a aguas profundas.

La base de datos incluye para cada registro temporal los siguientes parámetros fundamentales:

- Altura significativa de ola (H_s)
- Período de pico espectral (T_p)
- Período medio (T_m)
- Dirección de procedencia del oleaje

ERA5 constituye el fifth generation reanalysis del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), que combina observaciones históricas con modelado numérico avanzado para reconstruir las condiciones atmosféricas, oceánicas y de superficie de las últimas ocho décadas. El sistema utiliza el modelo integrado de forecast IFS (Cy41r2) con una resolución espacial de 31 km y 137 niveles verticales en la atmósfera.

Los datos de oleaje se generan mediante el modelo de onda WAM (Wave Model). Se trata de un modelo híbrido que resuelve la ecuación bidimensional del transporte de energía del espectro del oleaje teniendo en cuenta:

- El proceso de generación del oleaje por viento.
- El proceso de la interacción no lineal que se presenta entre las olas.
- La disipación de la energía del oleaje, tanto por el efecto de la rotura del oleaje en aguas profundas como por los fenómenos de fricción del fondo y percolación en aguas más someras.

La serie temporal de 83 años con resolución horaria permite caracterizar el clima marítimo de la zona, incluyendo el análisis de condiciones medias, variabilidad estacional, tendencias a largo plazo y la estadística de eventos extremos. La localización específica de la celda seleccionada captura las condiciones de oleaje antes de su transformación en aguas someras costeras.

3.4 CARACTERIZACIÓN DEL OLAJE

En esta sección se analizan las características principales del oleaje mediante diversos indicadores estadísticos. Se incluyen histogramas y funciones de distribución empíricas para la altura de ola significativa y el periodo pico de oleaje, lo que permite evaluar la frecuencia de ocurrencia de distintos rangos de estos parámetros. Asimismo, se presentan rosas de oleaje anuales y estacionales para identificar las direcciones predominantes del oleaje a lo largo del año y en cada estación. El estudio contempla tanto el régimen medio como extremal del oleaje.

3.4.1 ESTADÍSTICO BÁSICO DEL OLEAJE

La serie de altura de ola significativa (H_s) desde el año 1940 a 2022 se muestra en la figura 22.

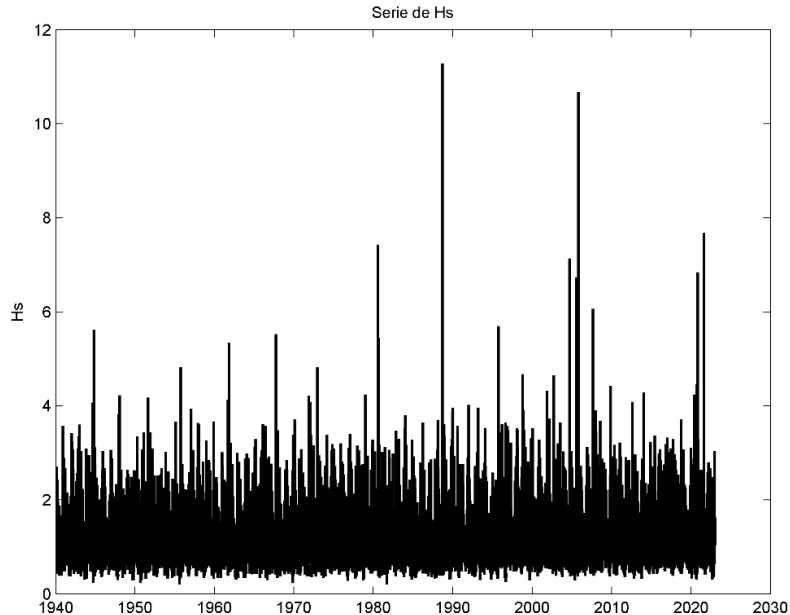


Figura 22. Serie de altura de ola significativa (H_s), de 1940 a 2022. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.

La función de distribución empírica de la altura de ola significativa se incluye en la figura 23.

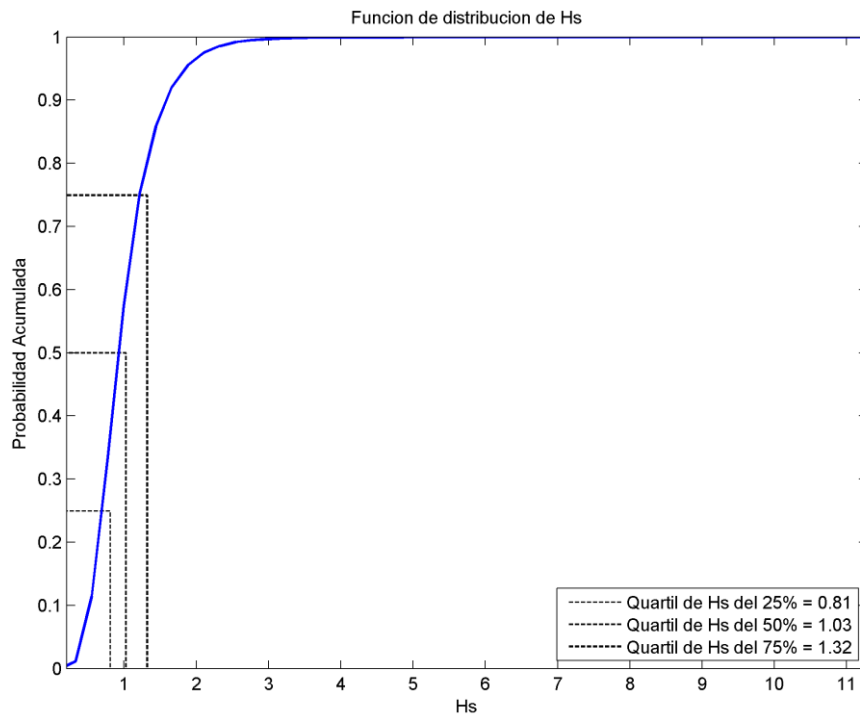


Figura 23. Función de distribución de altura de ola significativa. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.

Los cuantiles empíricos de la altura de ola significativa (H_s) correspondientes a los percentiles 25 %, 50 % (mediana) y 75 % son 0.81 m, 1.03 m y 1.32 m, respectivamente. Estos valores indican que:

- El 50 % de las olas registradas presentan una $H_s \leq 1.03$ m, reflejando condiciones predominantes de oleaje moderado.
- El 75 % de los datos no superan 1.32 m, lo que confirma la predominancia de olas de baja a media energía en la zona de estudio.
- Solo el 25 % restante de los eventos registrados exhiben alturas significativas superiores a 1.32 m, asociadas a condiciones meteorológicas excepcionales o temporales.

El histograma de la altura de ola significativa se muestra en la figura 24.

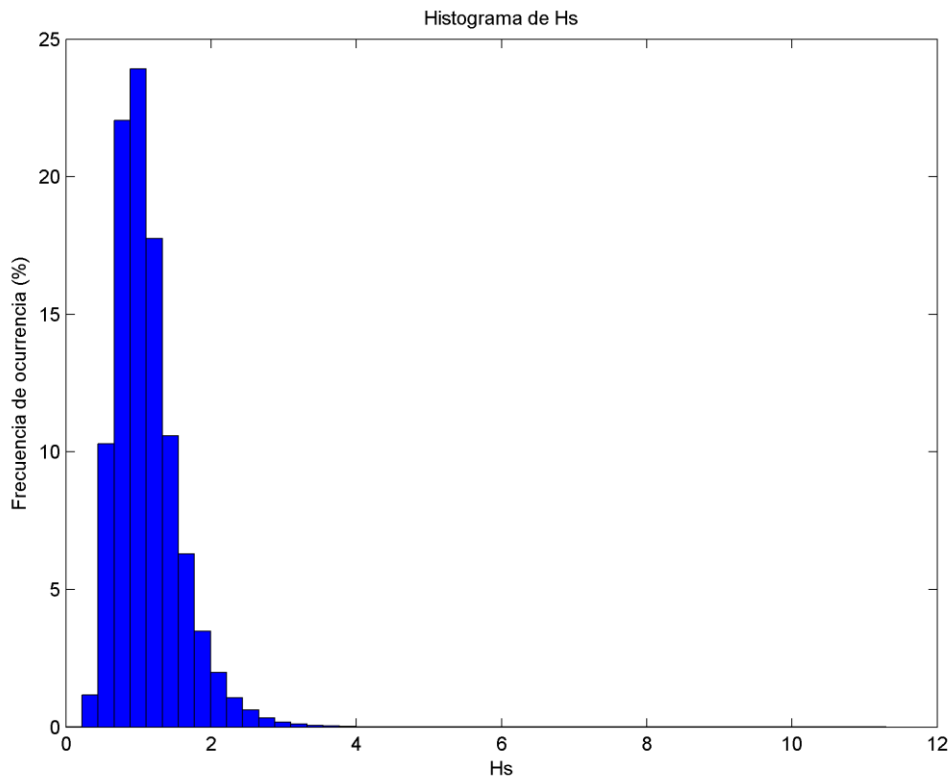


Figura 24. Histograma de altura de ola significativa. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.

El análisis del histograma revela que las alturas de ola en Punta Maroma se concentran principalmente en el rango de 0.5 a 2 m, mostrando un patrón típico de zonas costeras con predominio de oleaje moderado. La distribución presenta una marcada asimetría, con una cola alargada hacia valores superiores que corresponde a eventos extremos ocasionales. Estos resultados confirman que

mantiene condiciones de oleaje generalmente calmado durante la mayor parte del tiempo.

La rosa de oleaje anual se muestra en la figura 25.

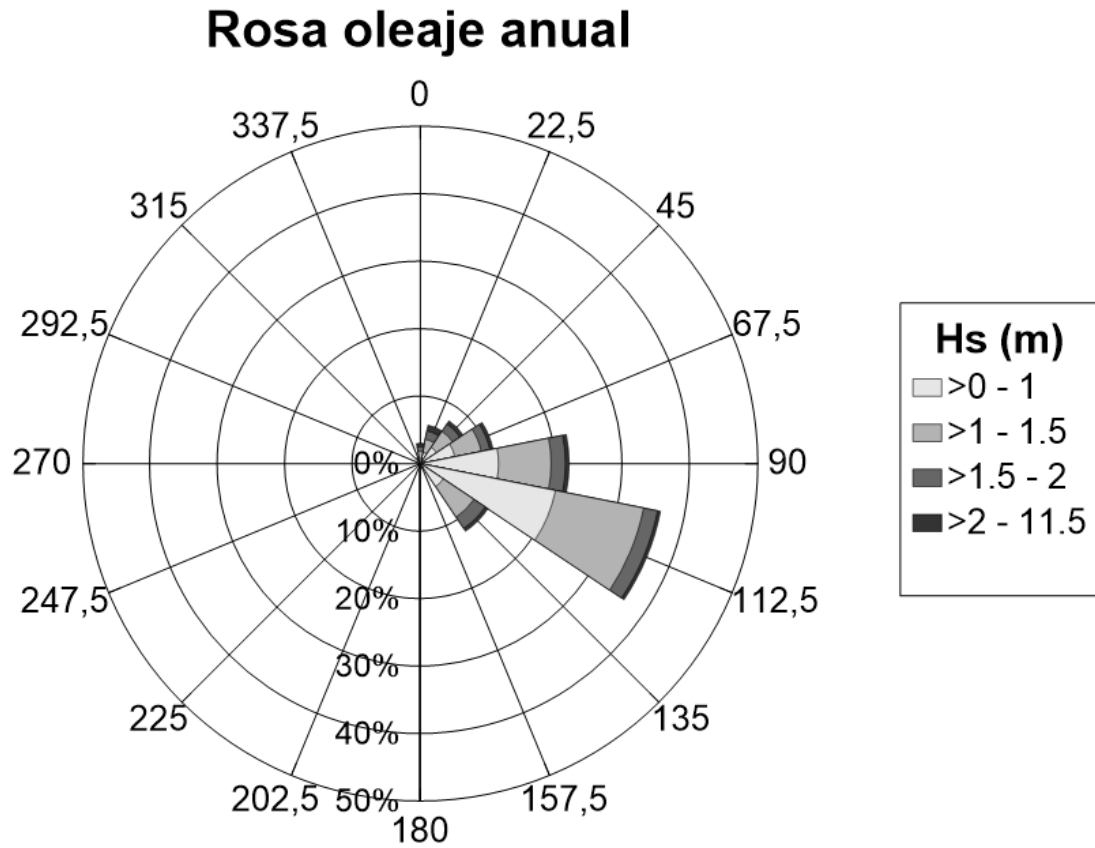


Figura 25. Rosa anual de altura de ola significativa. Fuente: Elaboración propia

La rosa muestra que la dirección predominante del oleaje es del ESE (112.5°), seguida por la dirección E (90°). En estas direcciones predominantes se registran las mayores alturas de ola, alcanzando hasta 5 m, aunque las alturas más frecuentes se concentran en los rangos de 0.5-1 m y 1-1.5 m. El oleaje proviene de todas las direcciones comprendidas entre el N (0°) y SE (135°). La distribución observada explica los procesos de transporte sedimentario y erosión costera característicos de la zona, donde la acción continuada del oleaje del este hasta el este-sureste condiciona la morfología litoral.

Las rosas del oleaje por estaciones se incluyen en la figura 26.

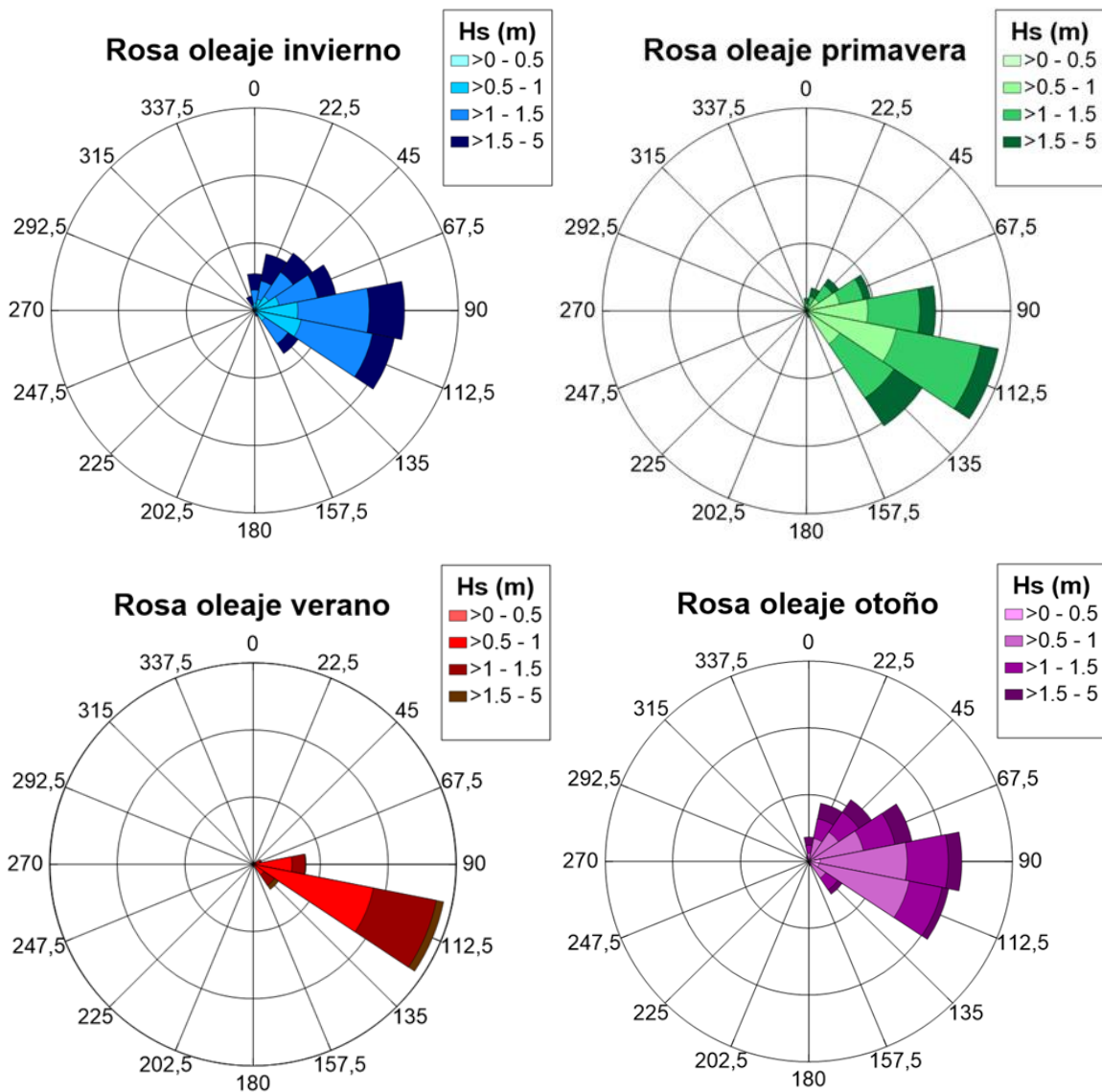


Figura 26. Rosas de oleaje por estaciones. Fuente: Elaboración propia

El régimen de oleaje muestra una notable constancia en las alturas significantes de 1-1.5 m durante todo el año, particularmente en las direcciones predominantes del E y ESE. Sin embargo, se observan variaciones estacionales significativas: en verano y otoño dominan las olas de 0.5-1 m, mientras que en invierno y primavera aumentan tanto la frecuencia de olas de 1-1.5 m como la diversidad de direcciones de procedencia. Estas dos últimas estaciones presentan patrones direccionales similares y concentran los registros de mayores olas procedentes de huracanes y tormentas tropicales.

3.4.2 RÉGIMEN MEDIO DE OLAJE

3.4.2.1 Régimen medio anual escalar

El régimen medio anual de oleaje se determinó aplicando el programa CAROL V1.0 (desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria) a la serie de datos disponible. Mediante el método de ajuste gráfico en papel probabilístico, se identificó que la distribución Log-Normal presenta el mejor ajuste a los datos experimentales, con un coeficiente de correlación R^2 de 0.9995 (figura 27), lo que demuestra una excelente correlación entre la función teórica y los datos observados.

La función de distribución Log-Normal utilizada se expresa mediante la ecuación:

$$y = F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^*} \int_0^x \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(x) - \mu^*}{\sigma^*}\right)^2\right] dx$$

donde:

- μ^* representa el parámetro de localización (media de la distribución normal original)
- ζ^* corresponde al parámetro de escala (desviación típica de la distribución normal original)

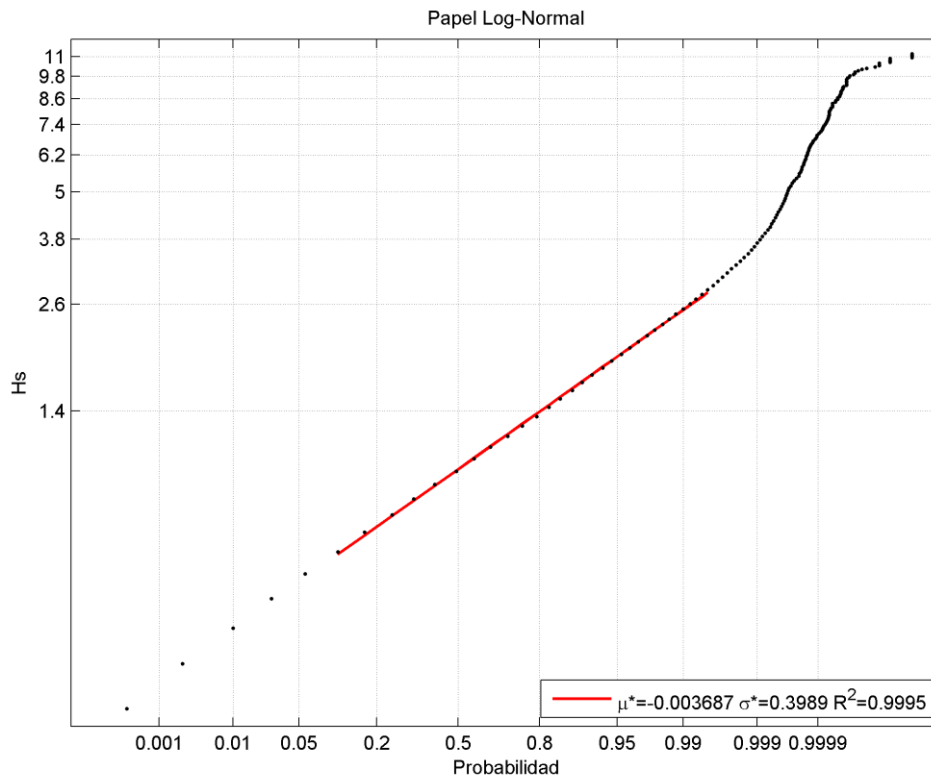


Figura 27. Régimen medio anual escalar de oleaje. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.

3.4.2.2 Régimen medio anual direccional

La siguiente tabla presenta los estadísticos básicos del régimen medio anual direccional del oleaje, mostrando la distribución de frecuencias y alturas de ola significativa (H_s) por dirección. Cuantifica los patrones dominantes del clima marítimo.

TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: H_s

direcciones(°)	prob.direccion	$H_{s_{50\%}}$	$H_{s_{90\%}}$	$H_{s_{99\%}}$	$H_{s_{12}}$
N	0.0301	1.3500	2.2500	3.2500	4.2290
NNE	0.0580	1.2800	2.1900	3.1360	3.7800
NE	0.0762	1.1400	1.8900	2.7900	3.7653
ENE	0.1097	1.0300	1.6800	2.6500	3.5019
E	0.2205	0.9800	1.5700	2.3100	3.3773
ESE	0.3628	0.9600	1.4100	2.0500	2.7300
SE	0.1205	1.1600	1.7400	2.4000	3.0840
SSE	0.0074	1.3600	2.1000	3.7053	7.4743
S	0.0008	1.1900	2.6760	7.0568	8.6021
SSW	0.0004	1.0800	2.8360	8.2104	8.4600
SW	0.0002	1.1700	3.3090	6.6666	6.8300
WSW	0.0002	1.0900	1.9350	4.7660	6.8500
W	0.0003	1.1150	2.1010	3.7844	4.1700
WNW	0.0006	1.2900	2.1880	3.3400	6.8613
NW	0.0018	1.5100	2.4500	3.2800	4.2992
NNW	0.0104	1.5900	2.3800	3.1500	3.9134

Figura 28. Estadísticos básicos del régimen medio anual direccional del oleaje. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.

El análisis revela que la dirección ESE presenta la mayor frecuencia de ocurrencia (36.3%) con alturas medias moderadas ($H_{s50\%}=0.96\text{m}$), seguida del E (22.1%, $H_{s50\%}=0.98\text{ m}$) y ENE (11%, $H_{s50\%}=1.03\text{m}$). Las direcciones meridionales (S, SSW, SW) muestran las mayores alturas extremas ($H_{s12\%}>8\text{m}$) aunque con frecuencias mínimas ($<0.5\%$). Por otro lado, las direcciones norteñas (N-NNW) presentan alturas medias relativamente altas ($H_{s50\%}=1.35\text{-}1.59\text{ m}$) con frecuencias bajas (1-3%).

3.4.3 RÉGIMEN EXTREMAL DE OLAJE

El análisis del régimen extremal de oleaje se basa en la distribución estadística de los valores máximos de altura de ola significativa. Para este estudio se ha aplicado el método POT (Peaks Over Threshold), que considera como eventos extremos aquellos que superan un umbral predefinido de $H_{s99.5\%}=2.8658\text{ m}$. Esta

metodología selecciona los valores de altura de ola significativa de cada evento que exceden dicho umbral, proporcionando un ajuste óptimo entre la función de distribución teórica y los datos observados (figura 29).

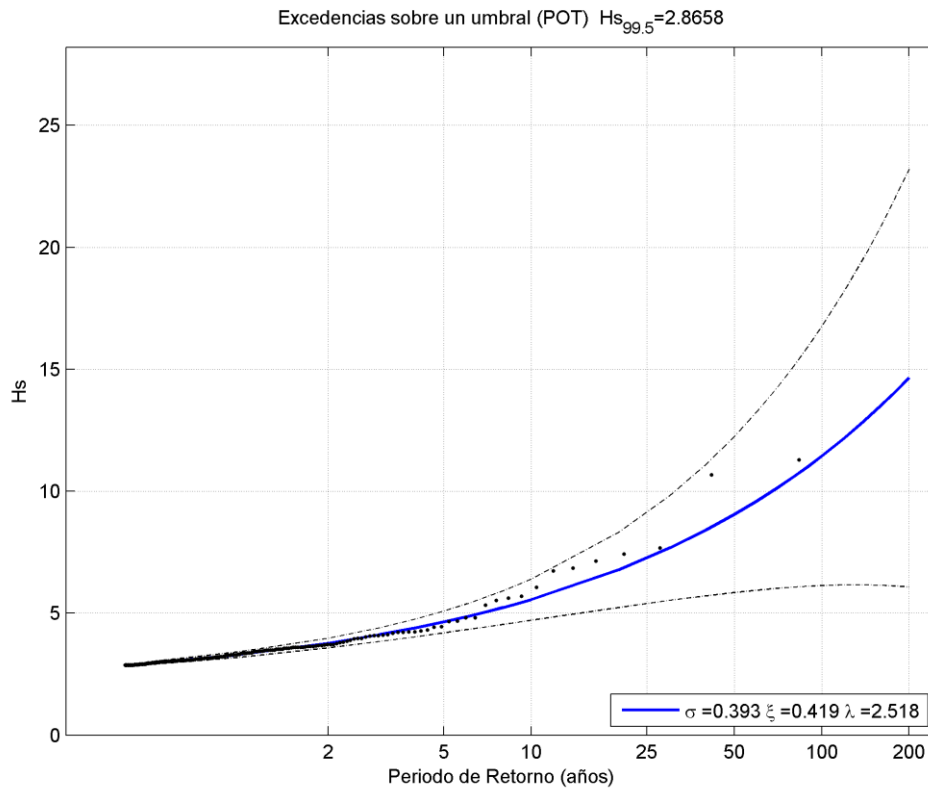


Figura 29. Régimen extremo de altura de ola significativa. Fuente: Elaboración propia, con la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.

A partir de la función de distribución de extremos ajustada mediante el método POT, es posible determinar la altura de ola significativa (H_s) asociada a diferentes periodos de retorno. Esta relación permite cuantificar la magnitud de los eventos extremos esperados en escalas temporales específicas.

3.4.4 PROBABILIDAD CONJUNTA

En este estudio, se han generado cuatro tipos de gráficas mediante programación en MATLAB a partir de los datos horarios de la base de datos ERA5: dos gráficas que relacionan la altura significativa (H_s) con el período de pico (T_p), y dos que vinculan H_s con la dirección del oleaje. Cada par incluye una representación mediante escala de color que indica la frecuencia de ocurrencia de cada combinación, y otra mediante dispersión de puntos que muestra la distribución real de los datos.

- Distribución Hs-Tp:

El análisis muestra que las combinaciones más probables se concentran en el rango de Hs entre 0.5-1.5 m y Tp entre 5-7 s (figura 30). La máxima densidad de probabilidad (3.5×10^{-4}) corresponde específicamente a Hs = 1.0 m combinado con Tp = 6 s. La distribución también muestra combinaciones muy probables combinando una Hs=1.0 m con un Tp=8 s.

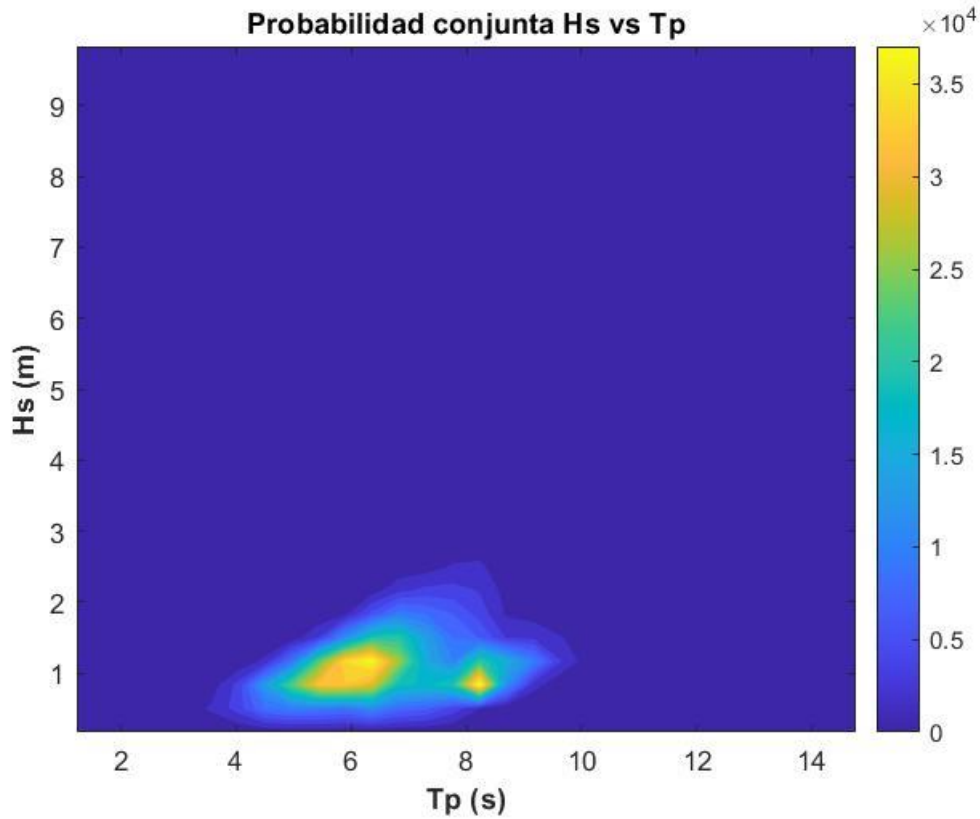


Figura 30. Distribución Hs-Tp. Fuente: Elaboración propia.

- Distribución Hs-Dirección:

Se identifica una clara preferencia direccional para cada rango de alturas de ola (figura 31). La mayoría de los eventos con $H_s \leq 1$ m provienen del sector ESE ($112.5^\circ \pm 10^\circ$), con una densidad de probabilidad máxima de 5×10^{-4} para $H_s = 1$ m y dirección 112.5° . Para oleaje más energético ($H_s > 2$ m), la dirección predominante varía entre el ENE (67.5°) y el ESE (112.5°).

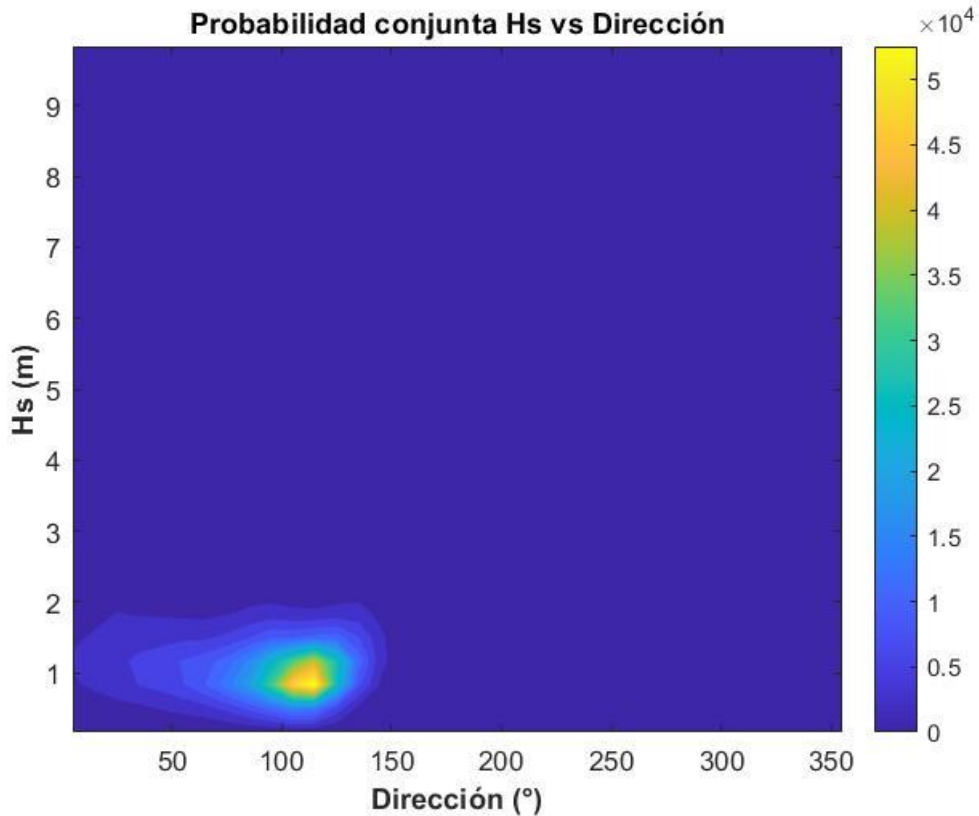


Figura 31. Distribución Hs-Dirección. Fuente: Elaboración propia.

- Análisis de dispersión Hs-Tp:

Los eventos extremos presentan una correlación no lineal definida. Las mayores alturas de ola ($H_s \geq 7$ m) se asocian sistemáticamente con Tp entre 12-14 s, con un valor modal de 13 s. Esta relación confirma que el oleaje energético en la zona mantiene una relación Hs/Tp constante, característica de mar de viento bien desarrollado.

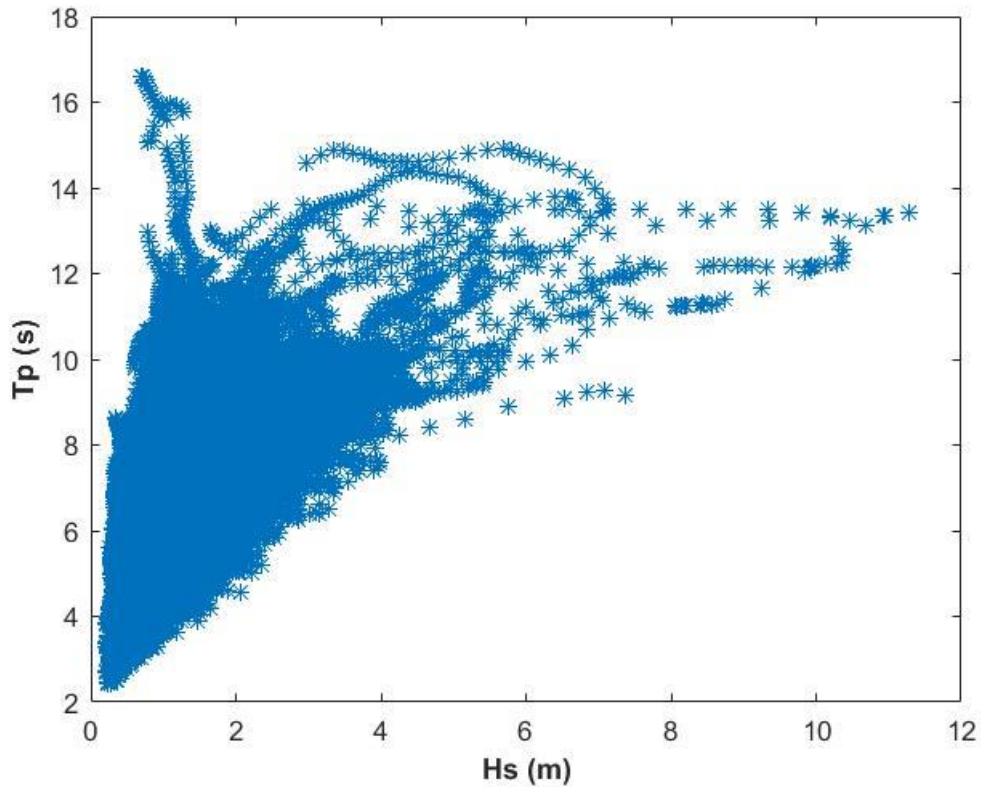


Figura 32. Análisis de dispersión Hs-Tp. Fuente: Elaboración propia.

- Análisis de dispersión Hs-Dirección:

Se observa que los eventos de mayor energía ($H_s > 5$ m) provienen de distintas direcciones, con una concentración notable alrededor de los 125° . Este patrón direccional está asociado a frentes fríos del Atlántico y eventos extratropicales provenientes del Mar Caribe.

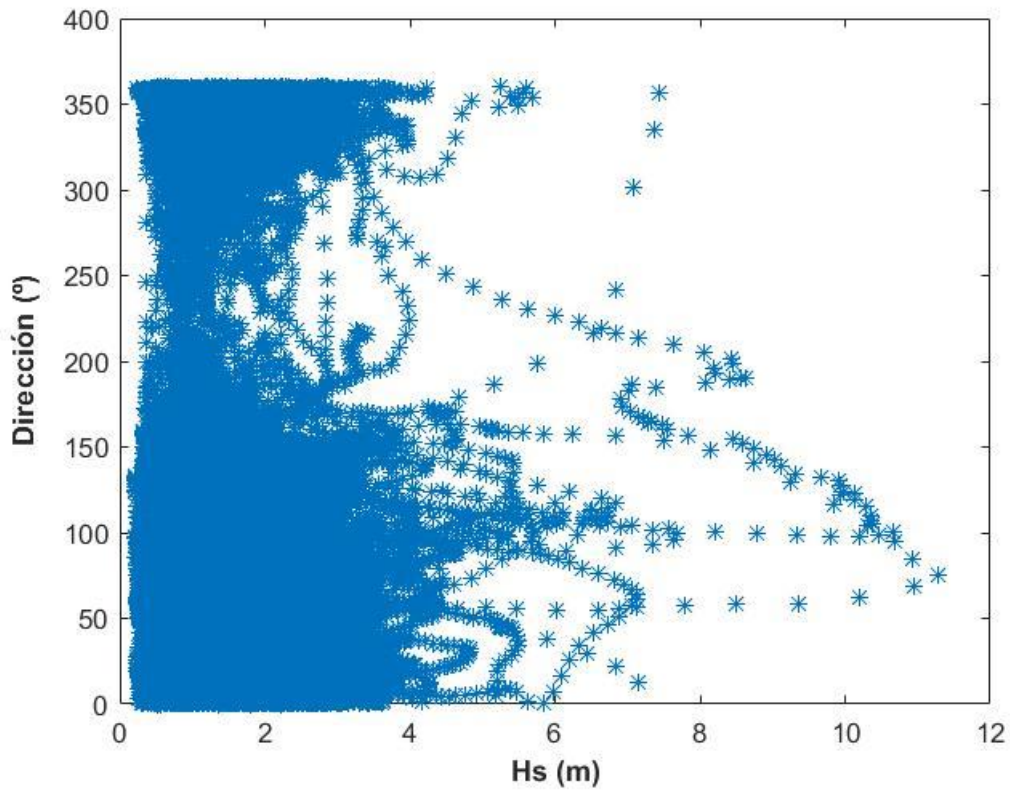


Figura 33. Análisis de dispersión Hs-Dirección. Fuente: Elaboración propia.

3.4.5 REGÍMENES DE OLEAJE: TORMENTA Y CALMA

Para caracterizar los regímenes de oleaje en la zona de estudio, se establecen criterios objetivos que permiten clasificar las condiciones marítimas en dos categorías principales: tormentas y calmas. Para este caso las condiciones que definen una tormenta son:

1. Umbral de altura de ola significativa: Se considera tormenta cuando la altura de ola significativa (H_s) supera los 2 m, valor que representa aproximadamente 1.5 veces la altura cuadrática significativa media de la zona.
2. Duración mínima del evento: La excedencia del umbral debe mantenerse de forma continua durante un mínimo de 2 horas para ser considerado un evento de tormenta.
3. Criterio de agrupamiento temporal: Si la discontinuidad entre excedencias del umbral es inferior a 12 horas, se considera que forman parte de la misma tormenta, permitiendo capturar la evolución completa de los sistemas meteorológicos.

El análisis complementario considera las calmas como aquellos periodos en los que la altura de ola significativa se mantiene por debajo del umbral de 2 m o con una altura de ola significativa mayor de 2 m en un tiempo menor a 2 horas.

3.4.5.1 Resultados del análisis de tormentas

La rosa de oleaje de tormenta anual se muestra en la siguiente figura:

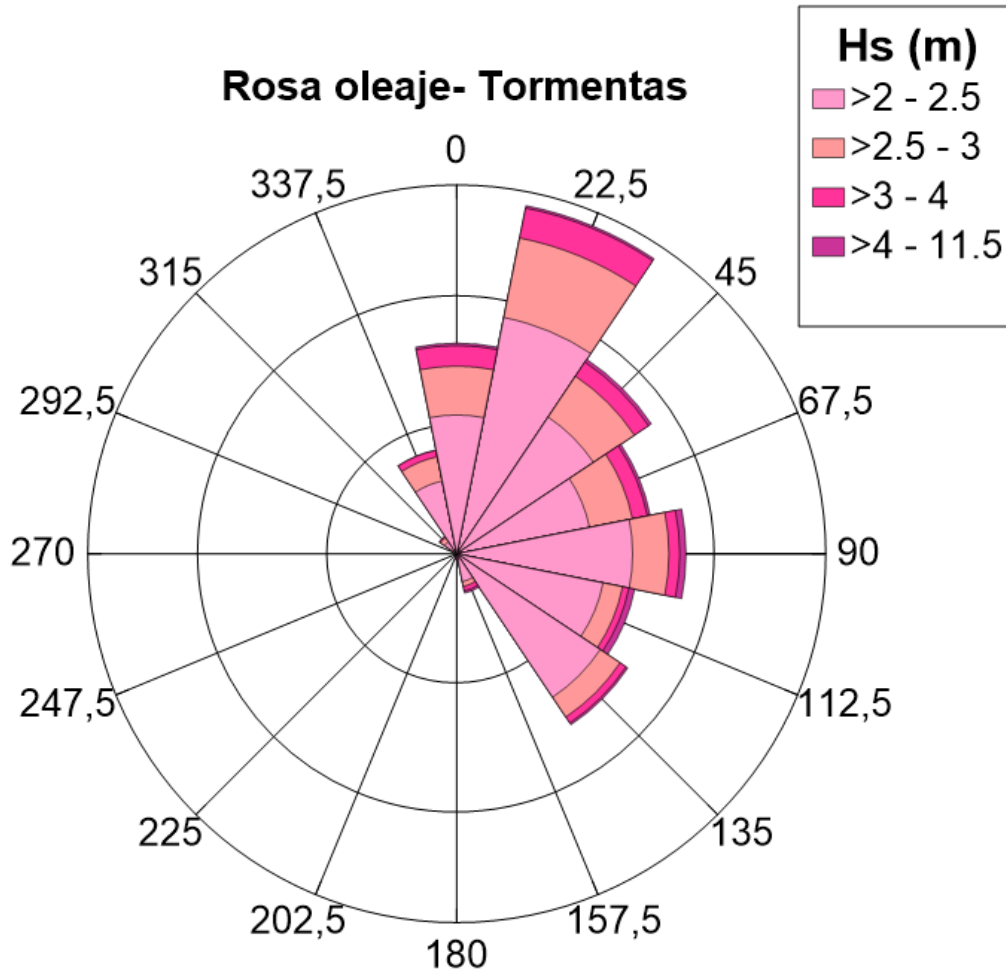


Figura 34. Rosa de oleaje de tormenta anual. Fuente: Elaboración propia.

La rosa de oleaje anual para condiciones de tormenta muestra que la dirección principal del oleaje energético es NNE (22.5°), seguida de cerca por las direcciones NE (45°), E (90°) y SE (112.5°).

Resulta particularmente relevante el hecho de que la mayoría de los eventos más energéticos ($H_s > 4$ m) proceden predominantemente del E (90°), lo que sugiere una influencia notable de huracanes provenientes del Golfo del Caribe. Por otra parte, la mayor frecuencia de eventos de intensidad media (H_s entre 2.5-4 m) provienen de la dirección principal NE (45°), lo cual indica la influencia de sistemas tormentos asociados al Golfo de México.

-Estacional

Los valores máximos de altura de ola significativa registrada en cada tormenta son agrupados por estaciones para conocer la distribución de tormentas en el año. La agrupación de meses en las distintas estaciones se ha hecho de la siguiente forma:

- Primavera: marzo, abril y mayo.
- Verano: junio, julio y agosto.
- Otoño: septiembre, octubre y noviembre.
- Invierno: diciembre, enero y febrero.

Las rosas de altura de ola significativa de tormenta por estaciones son:

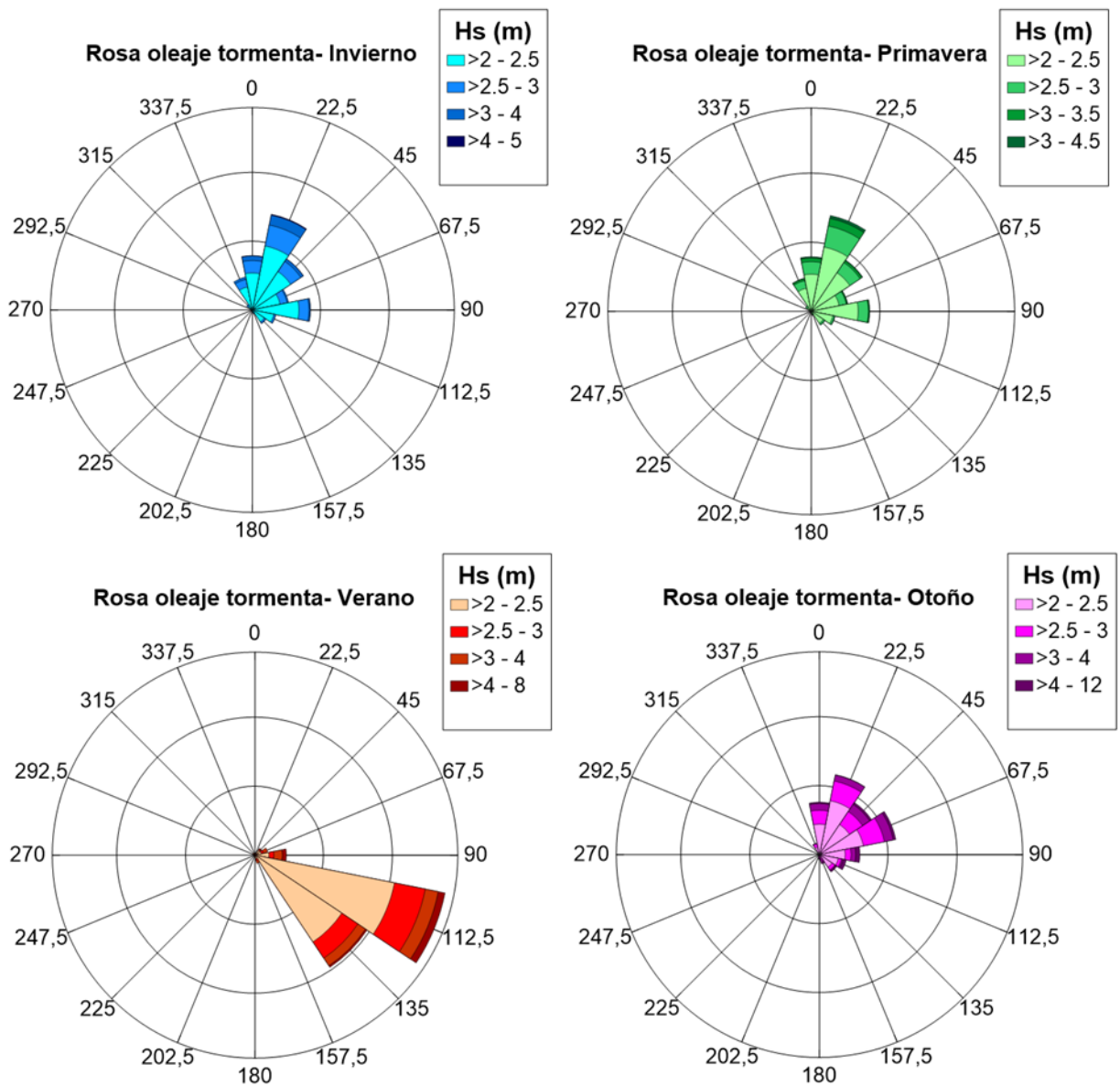


Figura 35. Rosas de oleaje de tormenta por estaciones. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de las rosas de oleaje por estaciones revela un patrón estacional claramente diferenciado entre el verano y el resto del año. Mientras que las estaciones de invierno, primavera y otoño presentan una distribución direccional relativamente uniforme, la estación de verano muestra un comportamiento marcadamente distinto, con una clara predominancia de las direcciones ESE (112.5°) y SE (135°) en la procedencia de las tormentas. Esta orientación resulta significativamente más frecuente en verano que en las demás estaciones.

Durante invierno y primavera, la mayor parte de las tormentas tienden a originarse desde el NNE (22.5°), procedentes del Golfo de México. Por su parte, el otoño presenta una transición caracterizada por la aparición frecuente de tormentas desde el ENE (67.5°), lo que indica un cambio progresivo en los patrones meteorológicos dominantes.

Los registros más energéticos se concentran predominantemente en los periodos de verano y otoño, con una procedencia mayoritaria desde el ESE (112.5°). Esta coincidencia temporal y direccional con la época de huracanes en el Mar Caribe sugiere una clara asociación entre los eventos más extremos y la actividad ciclónica tropical.

Cabe destacar que durante los meses de otoño (especialmente octubre y noviembre) se registran las tormentas con mayores alturas de ola significativa ($H_s > 8$). Estos eventos, conocidos localmente como "nortes", se caracterizan por generar fuertes vientos del este que dan lugar a condiciones marítimas particularmente severas. La combinación de estos factores convierte a los periodos otoñal y verano en las épocas de mayor riesgo para la dinámica costera en la zona de estudio.

3.4.5.2 Resultados del análisis de calmas

La rosa de oleaje de calma anual se muestra en la siguiente figura:

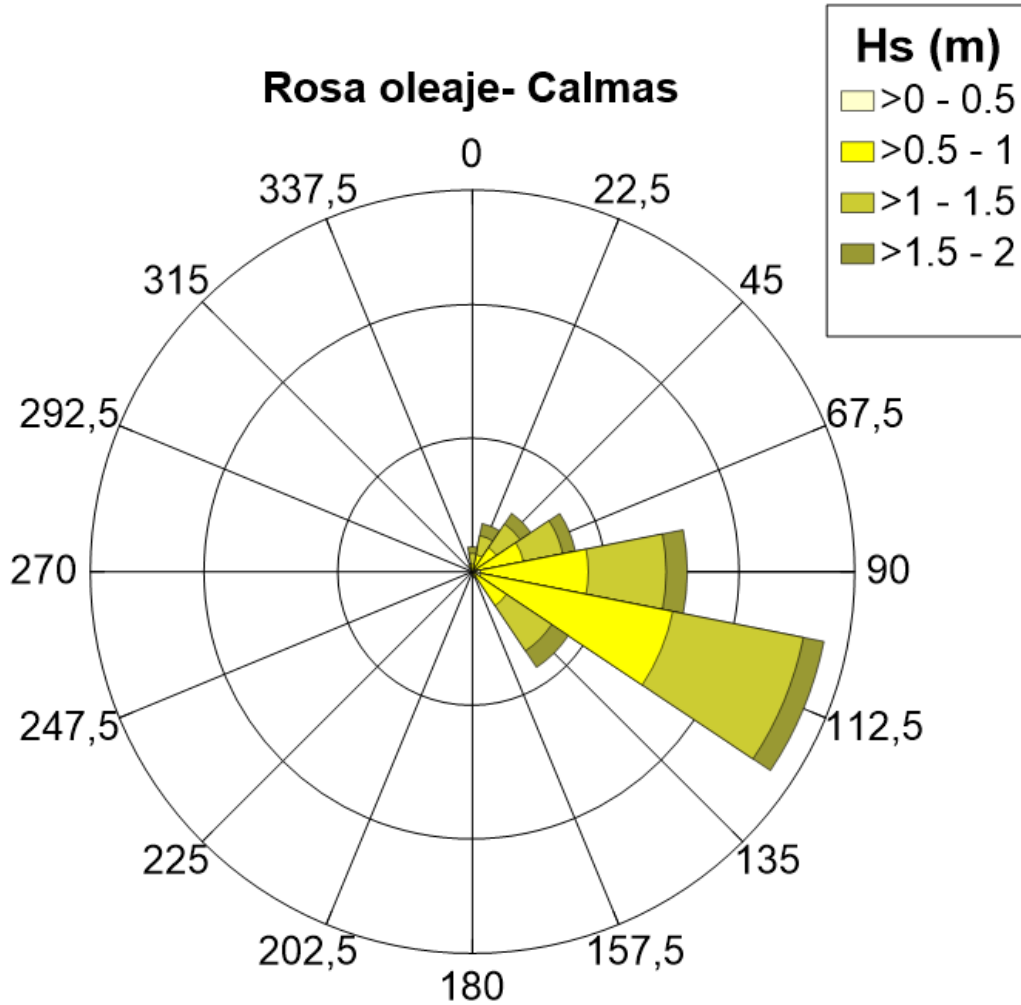


Figura 36. Rosa de oleaje de calma anual. Fuente: Elaboración propia.

La rosa de oleaje correspondiente a condiciones de calma ($H_s < 2$ m) muestra que la dirección principal del oleaje de baja energía es ESE (112.5°), seguida de forma secundaria por la dirección E (90°). Este patrón direccional revela la influencia de eventos de muy baja energía, que presentan una distribución constante con alturas de ola significantes reducidas, lo que indica condiciones de mar de viento local debilitado o de fondo residual de sistemas lejanos.

Cabe destacar la presencia persistente de componentes del E (90°) incluso en condiciones de calma, lo que refuerza el papel relevante de la dinámica del Caribe en el régimen de oleaje local, aunque con energías notablemente atenuadas respecto a los eventos de tormenta.

Los valores máximos de altura de ola significativa registrada de cada periodo de calma están agrupados por estaciones para conocer la distribución de tormentas en el año. La agrupación de meses en las distintas estaciones se ha hecho de la siguiente forma:

- Primavera: marzo, abril y mayo.
- Verano: junio, julio y agosto.
- Otoño: septiembre, octubre y noviembre.
- Invierno: diciembre, enero y febrero.

Las rosas de altura de ola significativa de calma por estaciones son:

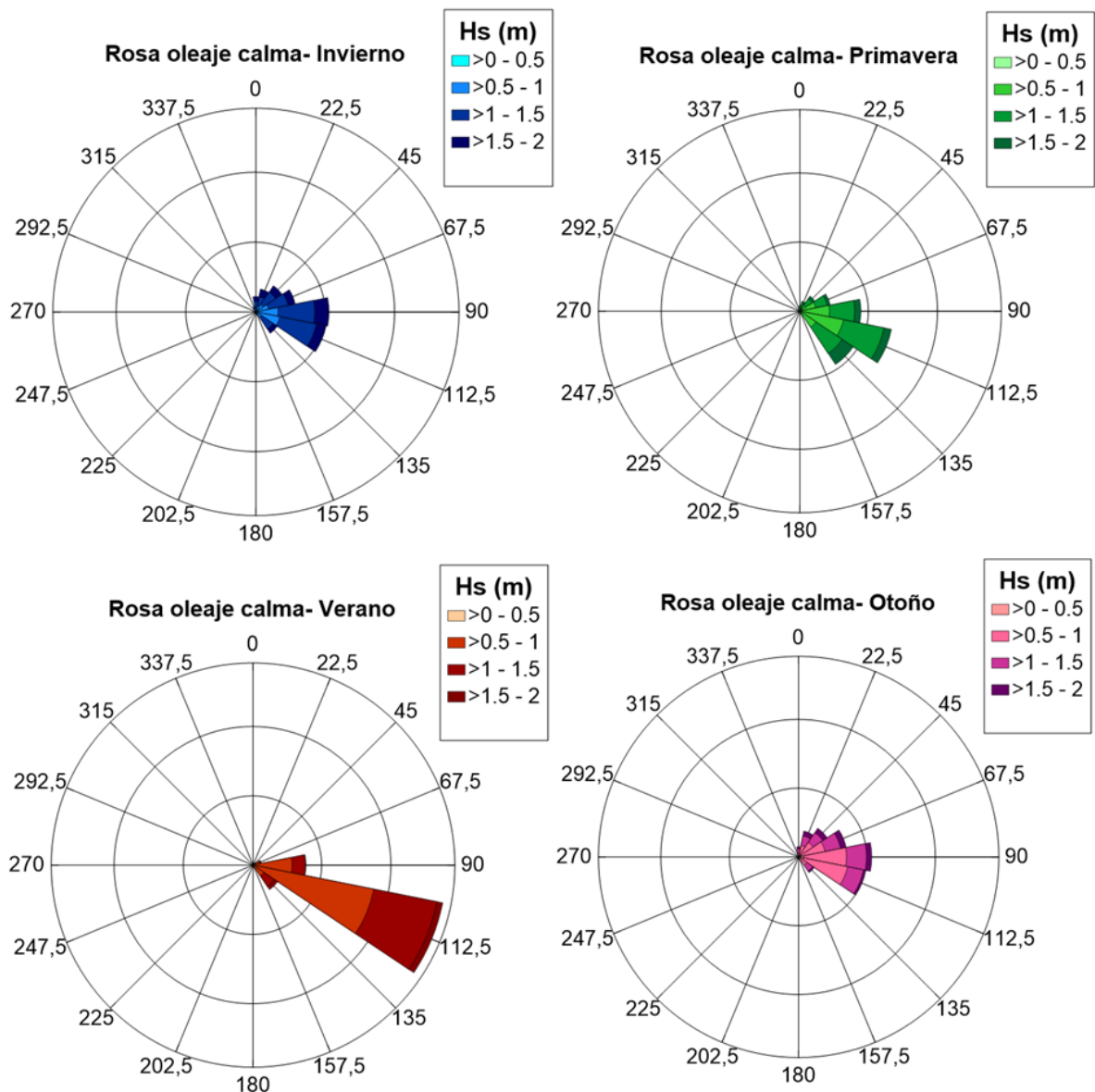


Figura 37. Rosas de oleaje de calma por estaciones. Fuente: Elaboración propia.

Durante la estación de verano, se registra la mayor frecuencia de condiciones de calma, con una dominancia casi absoluta del ESE (112.5°) como dirección

principal del oleaje de baja energía. Este patrón estival muestra una notable uniformidad direccional.

En contraste, las estaciones de otoño e invierno presentan una dirección predominante del E (90°), aunque con una mayor diversidad en las procedencias del oleaje en comparación con el verano. La primavera mantiene el ESE (112.5°) como dirección principal, similar al verano, pero con un abanico direccional más amplio y variado.

En invierno es donde se registran las mayores alturas de ola dentro del régimen de calma, con una proporción significativa de eventos con $H_s > 1$ m. Esto indica que, incluso en condiciones consideradas de calma, el invierno presenta una energía de oleaje relativamente mayor en comparación con las demás estaciones.

Estas variaciones estacionales reflejan la influencia cambiante de los sistemas meteorológicos a lo largo del año sobre el régimen de oleaje en condiciones de baja energía, mostrando cómo los patrones de vientos locales y regionales modulan de manera diferencial las características del oleaje en cada estación.

4. DINÁMICA LITORAL

El material sedimentario que constituye la playa es de origen casi exclusivamente biológico, resultado de la constante erosión y acumulación de fragmentos de corales, conchas de moluscos y algas calcáreas. Este origen le confiere unas propiedades geotécnicas particulares: la arena es muy permeable, no cohesiva y con un tamaño de grano predominante entre 0.2 y 0.5 mm (clasificada como arena media y fina). Su composición mineralógica, principalmente aragonito y calcita, la hace relativamente más susceptible a procesos de disolución a largo plazo. Estas características combinadas hacen que el sedimento sea excepcionalmente móvil bajo la acción del oleaje, especialmente durante tormentas y huracanes, lo que explica los cambios morfológicos significativos y rápidos que puede experimentar la línea de costa a lo largo del año e incluso entre estaciones.

El transporte de sedimentos litorales presenta una dirección predominante hacia el Oeste. Dado que la orientación general de la costa en esta región es Norte-Sur, este transporte longitudinal se manifiesta como un movimiento neto de sedimentos a lo largo de la costa, paralelo a la misma.

Como se ha documentado en el apartado de evolución de la línea de costa, se observa un proceso erosivo generalizado en la mayor parte del tramo de estudio, con una excepción: una zona de acumulación sedimentaria inmediatamente después de la punta. Este patrón morfológico responde a la dinámica de las corrientes litorales en la zona. Las corrientes son inducidas por el oleaje, es decir,

el oleaje pone el sedimento en suspensión y la corriente es la encargada de transportarlo.

La causa principal de esta configuración radica en el comportamiento de la deriva sedimentaria. A mitad del tramo de estudio, la corriente de sedimentos experimenta un cambio direccional que la impulsa de regreso hacia el norte, pero con una componente mar afuera significativa. Este movimiento combinado provoca que una parte sustancial del material sedimentario se transporte hacia zonas profundas de la plataforma continental.

La pronunciada pendiente submarina existente en el área actúa como un mecanismo de retroalimentación negativa. Una vez que los sedimentos alcanzan estas zonas profundas, quedan fuera del alcance de los procesos hidrodinámicos normales capaces de reintroducirllos en el sistema costero. Este fenómeno representa una pérdida neta irreversible para el balance sedimentario del litoral.

Las fuentes de estos sedimentos son principalmente arrecifes coralinos y aportes biogénicos, aunque también pueden existir contribuciones menores de sedimentos terrígenos de corto alcance.

La intensidad de los procesos de erosión y acreción en esta región se ha acelerado significativamente en las últimas décadas. Si bien el estudio nacional de Valderrama-Landeros et al. (2019) no desglosa datos específicos para Punta Maroma, sí reporta que las tasas de erosión y acumulación para el Caribe mexicano se duplicaron en los periodos más recientes (2005-2015) en comparación con el periodo 1970-2005 (figura 38). Esto sugiere una posible alteración en el equilibrio del transporte sedimentario, potenciada por la sinergia entre fenómenos extremos y presiones antrópicas, que puede estar afectando la disponibilidad de sedimentos en la zona.

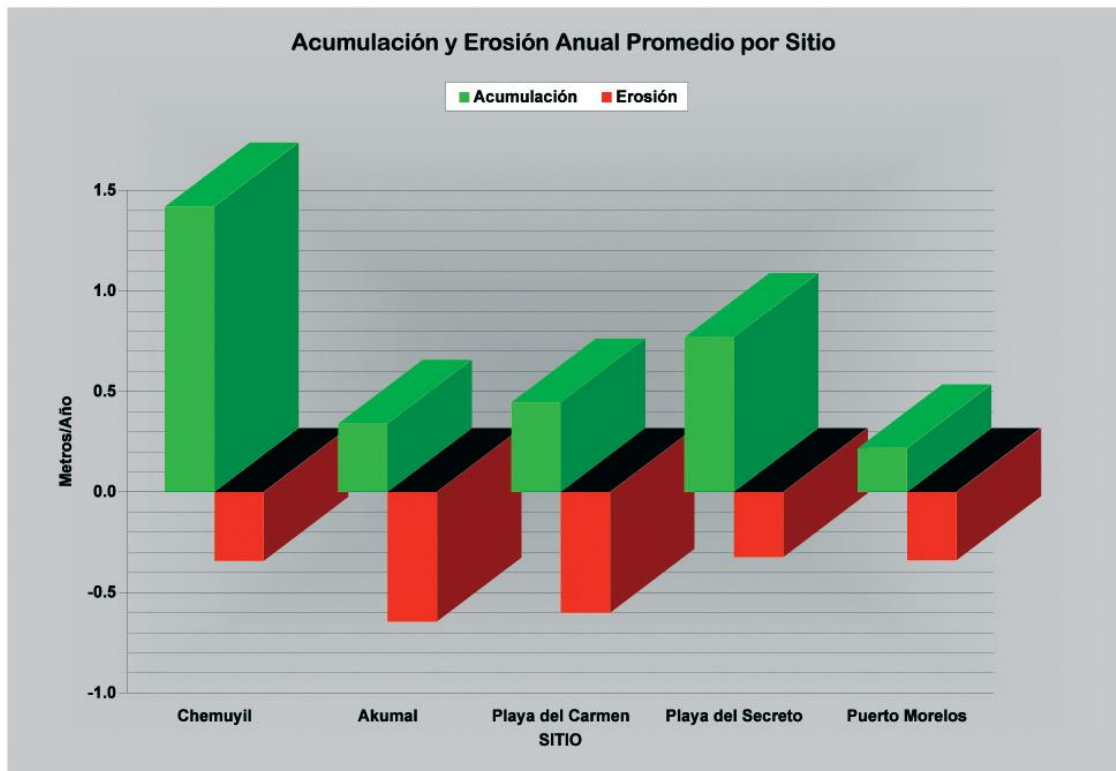


Figura 38. Tasas de acumulación y erosión presentes en la Riviera Maya. Fuente: Adaptado de Márquez García et al. (2010).

El sustrato de la región está constituido por una potente plataforma de roca caliza karstificada, formada desde el Paleozoico y que emergió durante el Triásico-Jurásico. Esta formación geológica, altamente permeable y porosa, determina el comportamiento hidrológico de la zona. La zona costera presenta un relieve muy escaso y no hay ríos superficiales, debido a la alta permeabilidad del área por el suelo cárstico.

Este fenómeno se debe a que las aguas pluviales no generan escorrentía superficial significativa. En su lugar, se infiltran rápidamente a través de la roca, alimentando un extenso sistema de acuíferos subterráneos, es decir, a través de flujos subterráneos, manantiales submarinos y cenotes, no por cauces superficiales.

Esta condición tiene una consecuencia directa y crítica para el balance sedimentario de las playas: no existe un mecanismo natural de aporte de sedimentos procedentes del interior del continente. En la mayoría de los sistemas litorales del mundo, los ríos son los principales agentes suministradores de material, construyendo deltas y alimentando las playas adyacentes mediante el transporte litoral. En Punta Maroma, y en el Caribe mexicano en general, este mecanismo está totalmente ausente.

La falta de un aporte externo constante hace que el sistema sea extremadamente vulnerable.

5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS Y CONDICIONES DE MODELACIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

Una vez conocidas las características más importantes de la zona de estudio y las condiciones de clima marítimo que pueden afectar a la misma se procede al modelado numérico de la propagación del oleaje, mediante el modelo numérico programa WAPO (Silva et al., 2005), y de la dinámica de corrientes asociadas al oleaje (Mendoza et al., 2008), con la aplicación del modelo numérico COCO, en las proximidades de la costa.

5.2 MODELO NUMÉRICO DE PROPAGACIÓN WAPO

El modelo numérico WAPO constituye el núcleo metodológico de este estudio para analizar la hidrodinámica del oleaje en Punta Maroma. Es una herramienta computacional basada en la ecuación de pendiente suave modificada que permite simular con precisión los fenómenos físicos en la propagación del oleaje. Este sistema de simulación avanzada ha sido específicamente adaptado para capturar los complejos procesos de interacción entre el oleaje, las estructuras costeras, el arrecife coralino y la línea de costa.

Su formulación matemática incorpora términos de segundo orden que superan las limitaciones de los modelos convencionales al incorporar capacidades mejoradas para representar batimetrías irregulares y fenómenos no lineales, esenciales en este sistema donde la plataforma somera, las barreras arrecifales y los sedimentos bioclásticos generan patrones de propagación únicos.

Los escenarios de simulación analizados se basan en condiciones de oleaje representativas de la zona obtenidas del análisis de clima marítimo, seleccionadas a partir del análisis estadístico de series históricas que permiten identificar las condiciones dominantes de oleaje y eventos extremos relevantes para el diseño costero.

La selección de este modelo se fundamenta en su validación previa en estudios similares del Caribe (Ruiz-Martínez et al., 2013), demostrando su eficacia en entornos con características similares a Punta Maroma.

5.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo WAPO (Wave Propagation On the coast, versión 4) es un programa desarrollado en Fortran 77, seleccionado por su eficiencia computacional, portabilidad y robustez para aplicaciones de ingeniería costera. La estructura del modelo se organiza en tres módulos principales:

1. BWAPO4: Preprocesador encargado de generar la malla de cálculo y preparar todos los parámetros de entrada requeridos.
2. WAPO4: Núcleo computacional que formula y resuelve el sistema de ecuaciones para la propagación del oleaje.
3. OLUCA-UNAM: Módulo especializado desarrollado por la Universidad Nacional Autónoma de México.

Estos subprogramas se integran y coordinan a través del programa principal MWAPO4, que gestiona la secuencia de ejecución completa. La arquitectura modular del sistema permite una implementación flexible y adaptabilidad a diferentes escenarios costeros.

La implementación del modelo WAPO para Punta Maroma emplea un dominio computacional con malla rectangular desde aguas profundas hasta la costa, capturando efectos de refracción, asomeramiento, difracción y reflexión, modificando su altura y dirección. Estos procesos generan corrientes litorales y transporte de sedimentos que moldean la línea de costa. La interacción con obstáculos produce además reflexión y difracción, redistribuyendo la energía del

oleaje. Las condiciones de oleaje incidente se derivan de un análisis espectral de series históricas, con especial atención a eventos extremos relevantes para el diseño costero. Los parámetros de disipación energética han sido calibrados específicamente para los sedimentos carbonatados locales, cuyos diámetros medios oscilan entre 0.35 y 0.45 mm. Como resultado, el modelo genera campos detallados de altura significativa y superficie libre del oleaje que permiten identificar con precisión las zonas de concentración de energía del oleaje y así, las zonas vulnerables a erosión, y los sectores de acumulación sedimentaria, proporcionando información para la gestión costera integral.

5.2.2 FUNDAMENTO TEÓRICO

El modelo numérico implementado se fundamenta en la formulación mejorada de la ecuación de pendiente suave (MMSE), desarrollada mediante contribuciones sucesivas de diversos investigadores entre 1993 y 2002. Esta versión avanzada de la ecuación supera las limitaciones del modelo clásico (MSE) al incorporar términos de segundo orden y eliminar la restricción de pendientes inferiores a 1:3, permitiendo así una representación más precisa de la propagación del oleaje sobre

batimetrías complejas. La formulación asume un flujo incompresible, homogéneo e irrotacional, donde las ondas se propagan sobre un fondo impermeable definido por la función batimétrica $h(x, y)$. El modelo integra además los efectos del campo de viento, la disipación energética por fricción con el fondo, los procesos de rotura del oleaje y la fuerza de gravedad como mecanismo de restauración durante la rompiente, ofreciendo así una descripción completa de la dinámica de propagación en zonas costeras.

La ecuación se deriva de la ecuación de continuidad y se expresa como:

$$\nabla^2 \Phi + \frac{\partial \Phi}{\partial z^2} = 0$$

$$-h(x, y) \leq z \leq 0$$

Donde:

- z : Coordenada vertical (positiva hacia arriba), con $z=0$ en el nivel medio del mar.
- $\Phi(x, y, z, t)$: Potencial de velocidades que describe el flujo.
- t : Tiempo.
- $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$: Operador gradiente horizontal.

Condiciones de frontera:

Superficie Libre ($z=0$):

- Condición Dinámica:

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

- Condición Cinemática:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

Fondo ($z = h(x, y)$):

- Condición de Impermeabilidad:

$$\varpi = \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \nabla_h h \times \nabla_h \Phi$$

La presión p se obtiene mediante la ecuación linealizada de Bernoulli:

$$p = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} + gz \right)$$

Para

$$-h \leq z \leq 0$$

Chamberlain y Porter (1995) resolvieron el problema y obtuvieron:

$$\nabla_h \times (I_1 \nabla_h \Phi) + (K^2 I_1 + r(h)) \Phi = 0$$

Con disipación de energía (término disipativo añadido):

$$\nabla_h \times (I_1 \nabla_h \Phi) + ((K^2 - i\sigma W) I_1 + r(h)) \Phi = 0$$

Donde:

- W : Término disipativo.
- σ : Frecuencia angular.
- T : Periodo.
- H_b : Altura de ola de rotura.

En los contornos se han considerado condiciones de frontera que incluyen una condición general de radiación hacia el infinito, así como fronteras abiertas o parcialmente reflectantes. La implementación numérica de la ecuación modificada de pendiente suave se realizó mediante la técnica de diferencias finitas con aproximación de segundo orden, excepto para la evaluación del oleaje incidente en zonas con fondo variable, donde se utilizó un esquema de cuarto orden para mayor precisión.

5.2.3 FICHEROS DE ENTRADA

El modelo numérico WAPO permite propagar los casos propuestos a partir de una onda monocromática definida por estos parámetros: altura de ola (H), periodo (T), dirección media de propagación (Dir) y Sobre elevación (η). Para su correcta ejecución, el modelo requiere una batimetría específica:

5.2.3.1 Batimetría

Es el dato de entrada principal que garantiza la fiabilidad de los resultados dados por el modelo numérico de propagación de oleaje. En nuestro caso de estudio, la topobatimetría se ha generado mediante una malla de propagación del oleaje estructurada en coordenadas UTM 16 N, con extensión entre X: 503445-505990 e Y: 2292060-2295780, lo que representa un área de 2.545 km × 3.720 km. Tiene una resolución espacial de 5×5 metros (509×744 celdas) que permite capturar con precisión las variaciones morfológicas. Esta malla se puede apreciar (figuras 39 y 40) y permite una aproximación detallada de las condiciones del fondo marino, esencial para la correcta propagación del oleaje en los modelos numéricos.

Esta configuración garantiza que estructuras morfológicas relevantes con dimensiones superiores a 5 m sean adecuadamente representadas en las simulaciones.

Los datos topobatimétricos proceden de la combinación de levantamientos LIDAR y mediciones con ecosonda multihaz, garantizando una precisión vertical de ± 0.15 m.

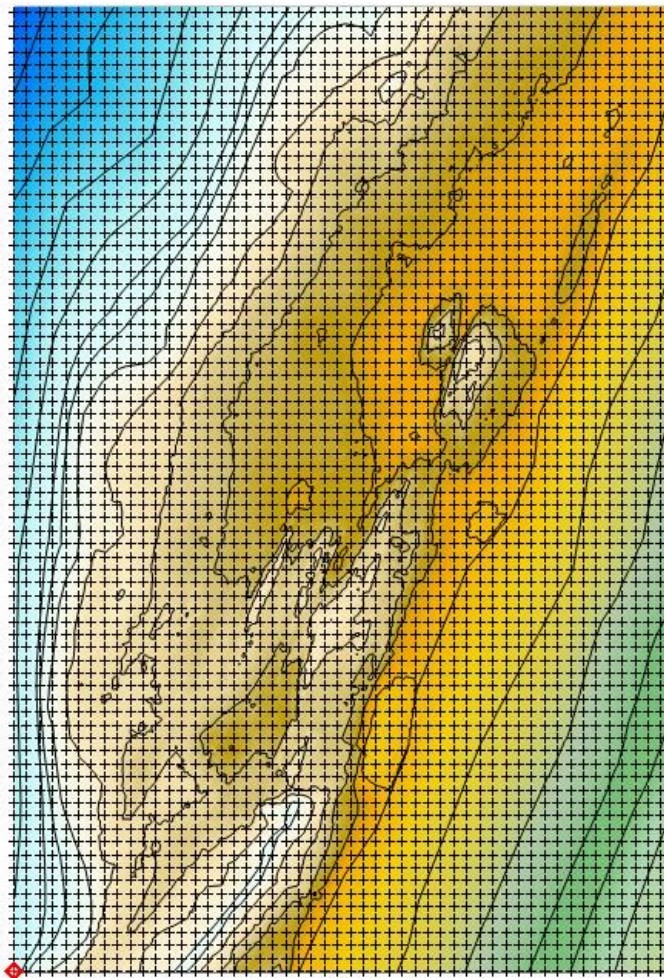


Figura 39. Condiciones del fondo marino. Fuente: Elaboración propia

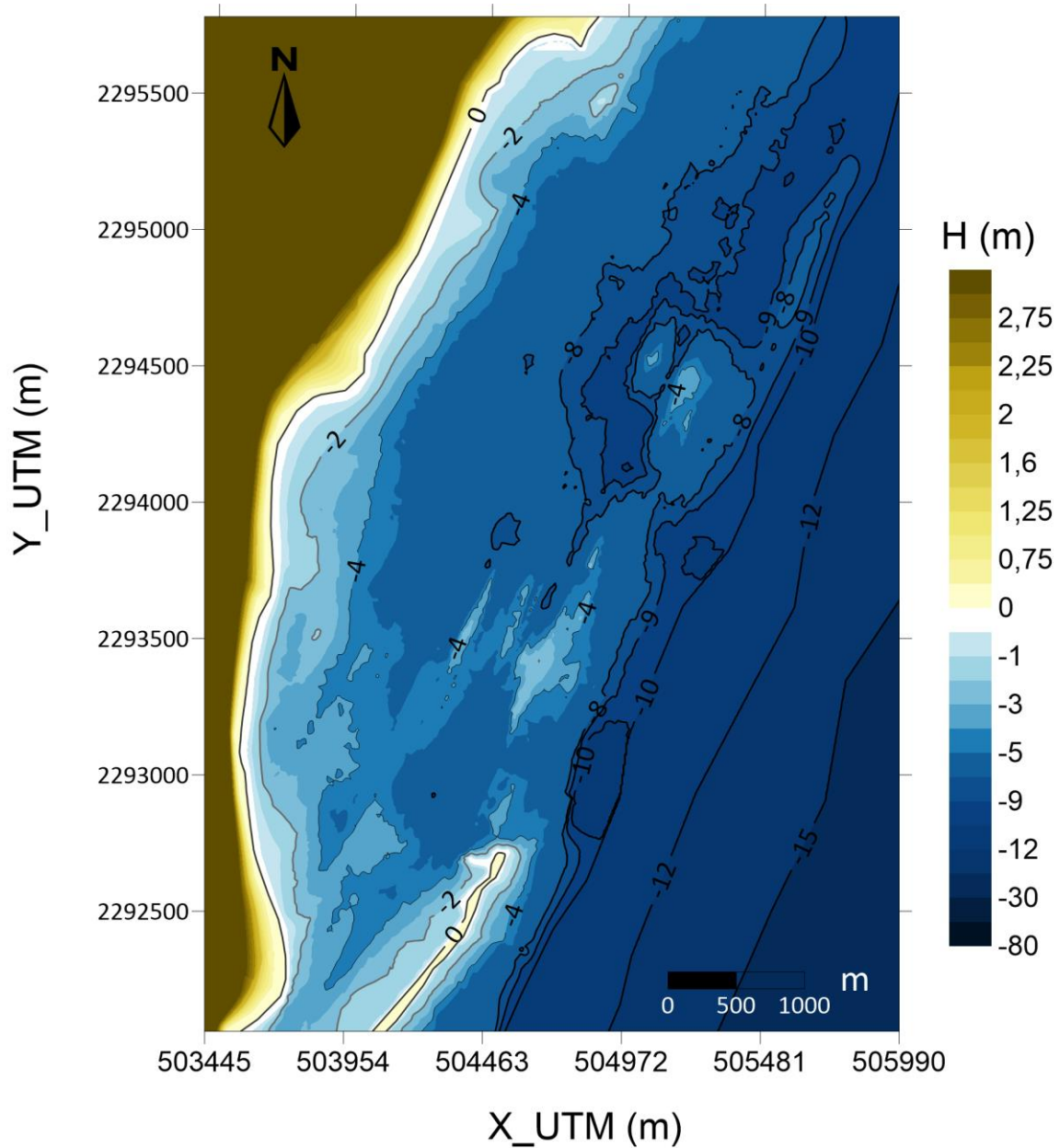


Figura 40. Batimetría de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros del oleaje incidente

El modelo requiere tres archivos principales para definir las condiciones de oleaje:

1. Altura de ola (H): Valores en metros obtenidos de análisis estadísticos de series históricas, considerando tanto condiciones medias como eventos extremos.
2. Periodo (T): Expresado en segundos, derivado de análisis espectrales que identifican los periodos dominantes para diferentes regímenes de oleaje.
3. Dirección (Dir): Definida en grados respecto al norte geográfico, obtenida mediante análisis direccional de rosas de oleaje.

4. Sobreelevación (η): Nivel del mar por encima del datum debido a efectos meteorológicos (marea de tormenta).

Estos parámetros se introducen en el contorno de la malla de simulación situada a mayor profundidad, en este caso la frontera Este.

5.2.3.2 FICHEROS DE SALIDA

Como datos de salida, la información sobre el oleaje propagado se obtiene principalmente en dos archivos con extensión grd. Uno de estos archivos registra los valores de la altura máxima del oleaje propagado, mientras que el otro contiene los resultados de la superficie libre del mar en un instante específico.

1. Altura de ola propagada (MI01AMP.GRD)

Este archivo contiene mapas espaciales de la altura máxima de ola alcanzada durante la simulación. Los valores representan:

- La transformación energética del oleaje al interactuar con la batimetría
- Los efectos combinados de refracción, difracción y disipación

2. Superficie libre instantánea (MI01SUP.GRD)

Registra la elevación momentánea de la superficie marina (η) respecto al nivel medio, incluyendo:

- La componente oscilatoria del oleaje
- Efectos de setup por rotura de olas
- Interferencias constructivas/destructivas

Formatos y organización

Los archivos GRD utilizan un formato estructurado:

- Cabecera con metadatos (sistema coordenadas, unidades, fecha)
- Matriz de valores en formato ASCII/binary
- Compatibilidad con software GIS (ArcMap, QGIS) y herramientas de visualización científica

5.3 MODELO NUMÉRICO DE CORRIENTES COCO

El modelo numérico COCO se emplea para determinar las velocidades de corriente generadas por la acción del oleaje en la zona. Esta herramienta calcula los campos de corriente a partir de los tensores de radiación, utilizando como dato de entrada principal los resultados de la propagación del oleaje obtenidos con el modelo WAPO, específicamente el archivo de amplitudes del oleaje propagado.

La implementación de COCO permite caracterizar de manera precisa las corrientes inducidas por el oleaje en áreas someras, considerando las interacciones entre la hidrodinámica y la morfología costera. El modelo se basa en un marco teórico robusto que incluye la resolución de las ecuaciones de conservación de momento y masa, incorporando los esfuerzos radiativos generados por la variación espacial de la energía del oleaje.

En los siguientes apartados se detalla la estructura general del programa, los fundamentos teóricos y las hipótesis en las que se basa, así como los archivos y parámetros de entrada requeridos para su ejecución. Además, se describen los formatos de salida generados por el modelo, los cuales contienen información detallada sobre las velocidades de corriente en la zona de estudio, proporcionando así una base sólida para el análisis de los procesos de transporte de sedimentos y la evaluación de la estabilidad costera.

5.3.1 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

El módulo de cálculo de corrientes COCO2 mantiene una estructura análoga al sistema de propagación de oleaje previamente descrito. La plataforma se encuentra programada íntegramente en lenguaje Fortran 77, aprovechando las ventajas de eficiencia computacional y precisión numérica que caracterizan a este entorno de desarrollo para aplicaciones científico-técnicas.

5.3.2 FUNDAMENTO TEÓRICO

El modelo se fundamenta en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en la vertical, que constituyen el sistema de gobierno para el flujo hidrodinámico. Este sistema bidimensional comprende: (1) la ecuación de continuidad, que garantiza la conservación de masa, y (2) las ecuaciones de cantidad de movimiento promediadas verticalmente, que rigen la dinámica del flujo.

La resolución numérica de este sistema de ecuaciones se realiza mediante un esquema de Godunov de segundo orden, el cual proporciona alta precisión en la captura de discontinuidades y gradientes pronunciados en el campo de flujo. Los flujos en las interfaces entre celdas computacionales se calculan utilizando la aproximación de Roe al problema de Riemann, método que garantiza una adecuada representación de las propiedades conservativas y la captura de frentes de onda.

La integración temporal se implementa mediante un esquema de Adams-Bashforth de segundo orden (Mendoza, 2008), que ofrece un equilibrio óptimo entre estabilidad numérica y precisión temporal. La discretización espacial se realiza aplicando el método de volúmenes finitos, el cual permite conservar las propiedades físicas fundamentales a nivel discreto y manejar eficientemente geometrías complejas mediante mallas no estructuradas.

Este marco numérico combinado permite modelar con precisión los procesos de generación y evolución de las corrientes inducidas por el oleaje, capturando adecuadamente las no linealidades y acoplamientos característicos de la hidrodinámica costera en la zona de estudio.

5.3.3 FICHEROS DE ENTRADA

La configuración del modelo de corrientes COCO2 requiere tres conjuntos principales de datos de entrada, cada uno con una función específica en el proceso de simulación:

1. Archivo Batimétrico (MIBAT.grd) El modelo utiliza la misma malla de simulación compuesta por los datos topobatimétricos en la aplicación del modelo numérico WAPO.

2. Archivo de condiciones generales

Este fichero especifica los parámetros fundamentales para la simulación:

- Características del oleaje: amplitud de ola y periodo
- Parámetros temporales: incremento de tiempo (Δt), tiempo total de simulación e instante inicial de escritura de resultados
- Parámetros físicos: coeficiente de viscosidad, coeficiente de rugosidad de Chezy, y profundidad mínima de agua para la modelación
- Configuraciones numéricas específicas del esquema de cálculo

3. Archivo de Amplitud máxima del oleaje propagado

Archivo en formato .dat generado como salida del modelo WAPO4, que contiene los valores de amplitud máxima del oleaje propagado en todo el dominio de cálculo.

5.3.4 FICHEROS DE SALIDA

Tras la ejecución del programa, se generan dos archivos principales que contienen las velocidades de corriente inducidas por el oleaje en cada celda de la malla computacional. El primer archivo corresponde al instante de escritura inicial definido en el fichero de configuración (en este caso, a los 59 segundos de simulación), mientras que el segundo archivo registra los resultados al finalizar el tiempo total de simulación (60 segundos). Esta estructura temporal permite analizar tanto la evolución transitoria como el estado estable de los campos de corriente.

Adicionalmente, el modelo produce un conjunto de archivos auxiliares que almacenan información detallada sobre los tensores de radiación calculados durante el proceso.

5.4 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN SELECCIONADOS

Se han definido 10 casos de simulación que abarcan desde condiciones medias hasta eventos extremos, considerando las direcciones predominantes (E, ESE, ENE) y diferentes combinaciones de altura de ola (H), periodo (T) y sobreelevación (figura 39). Estos casos se han seleccionado con base en el análisis de clima marítimo, cubriendo escenarios representativos de las condiciones normales del oleaje en el Caribe mexicano, así como situaciones asociadas a tormentas frecuentes y ciclones tropicales.

Los casos incluyen condiciones típicas de la temporada seca ($H_s = 1$ m, $T_p = 6-8$ s), que permiten evaluar el comportamiento del sistema bajo oleaje moderado y su capacidad para mantener el equilibrio sedimentario. Asimismo, se han incorporado eventos extremos ($H_s = 2$ m, $T_p = 8-10$ s), frecuentes durante la temporada de nortes, que ayudan a identificar zonas críticas de concentración de energía del oleaje, así como la respuesta del arrecife como barrera natural de protección. Finalmente, se han simulado escenarios más intensos ($H_s = 3$ m, $T_p = 12$ s), incluyendo un caso con sobreelevación de 2 m, para analizar los efectos de huracanes categoría 3+ en la hidrodinámica del oleaje y circulación de corrientes en las proximidades de la costa.

Esta selección de casos no solo permite evaluar la resiliencia del sistema playa-arrecife bajo diferentes condiciones de oleaje, sino que también proporciona información para el diseño de estrategias de protección costera adaptadas a los riesgos actuales y futuros. Los resultados obtenidos servirán como base para la planificación de intervenciones que minimicen el impacto de fenómenos hidrometeorológicos y favorezcan la conservación de los ecosistemas asociados.

	H (m)	T (s)	Dirección	Sobreelevación
Caso 1	1	6	E	0
Caso 2	1	8	E	0
Caso 3	1	6	ESE	0
Caso 4	1	8	ESE	0
Caso 5	2	8	E	0
Caso 6	2	10	E	0
Caso 7	2	10	ESE	0
Caso 8	2	8	ENE	0
Caso 9	3	12	E	1
Caso 10	3	12	E	2

Tabla 1. Casos de oleaje seleccionados. Fuente: Elaboración propia.

5.5 RESULTADOS

Los resultados se analizan prioritariamente mediante los archivos AMP (altura de ola propagada), que permiten estimar las zonas de concentración de mayor energía del oleaje, ya que esta es proporcional al cuadrado de la altura de ola. Complementariamente, los archivos SUP (superficie libre) permiten detallar fenómenos locales como reflexiones o difracciones.

5.5.1 RESULTADOS DE SUPERFICIE LIBRE

Las figuras 41, 42 y 43, respectivamente, ilustran los patrones de comportamiento de la superficie libre del agua para los casos 1 ($H=1$ m, $T=6$ s, E), 5 ($H=2$ m, $T=8$ s, E) y 9 ($H=3$ m, $T=12$ s, $S=1$ m, E), seleccionados por ser los más representativos de las condiciones identificadas en el análisis del clima marítimo de la zona tanto en oleaje de calma como en el de tormenta. Se ha marcado en azul el área específica de estudio de Punta Maroma, aunque resulta pertinente considerar igualmente el comportamiento del oleaje en las regiones adyacentes para comprender integralmente los procesos de propagación y transformación energética. El resto de los casos analizados se encuentran disponibles en el apartado correspondiente de anejos.

-Caso 1:

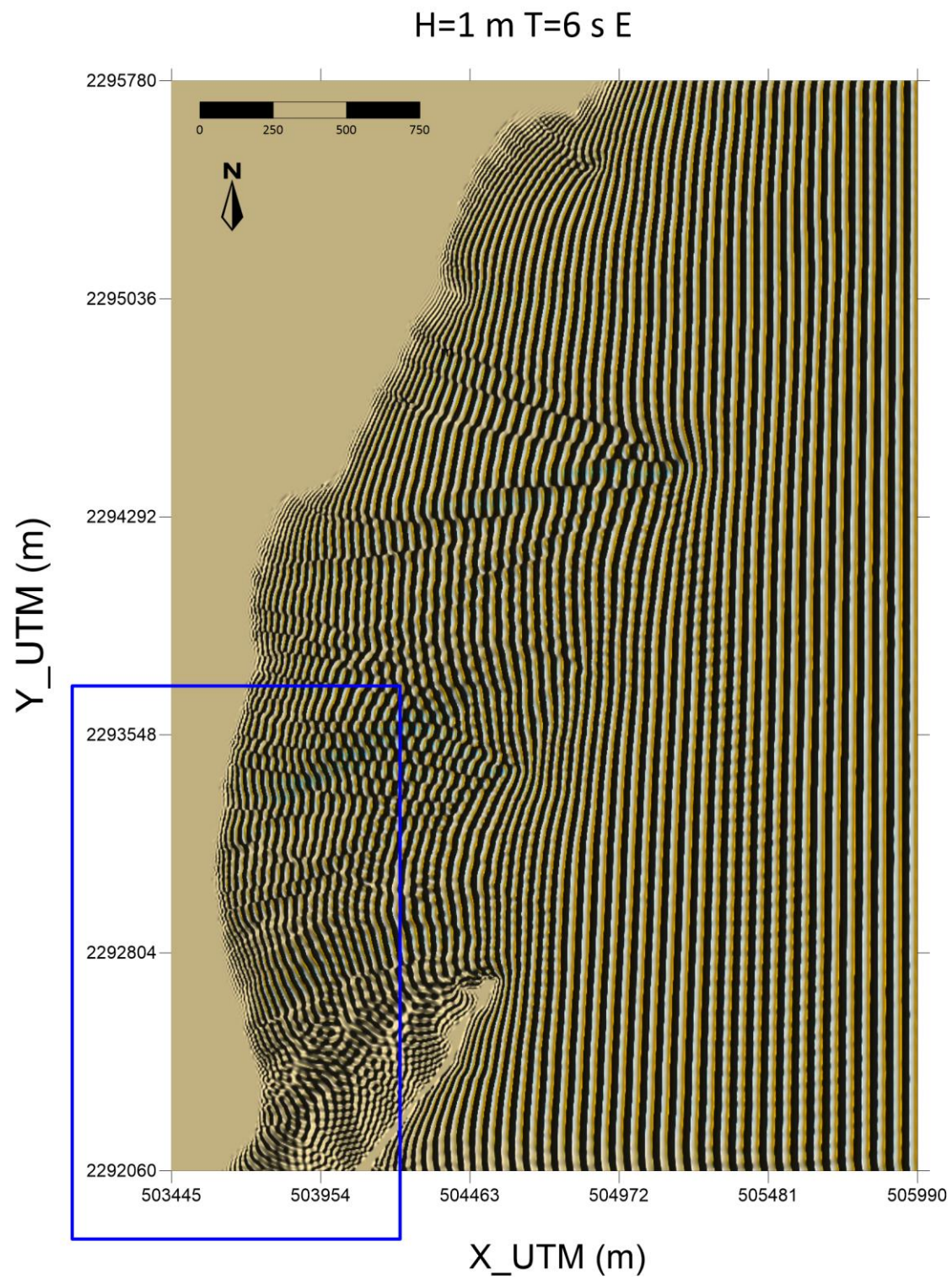


Figura 41. Superficie libre. Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

-Caso 5:

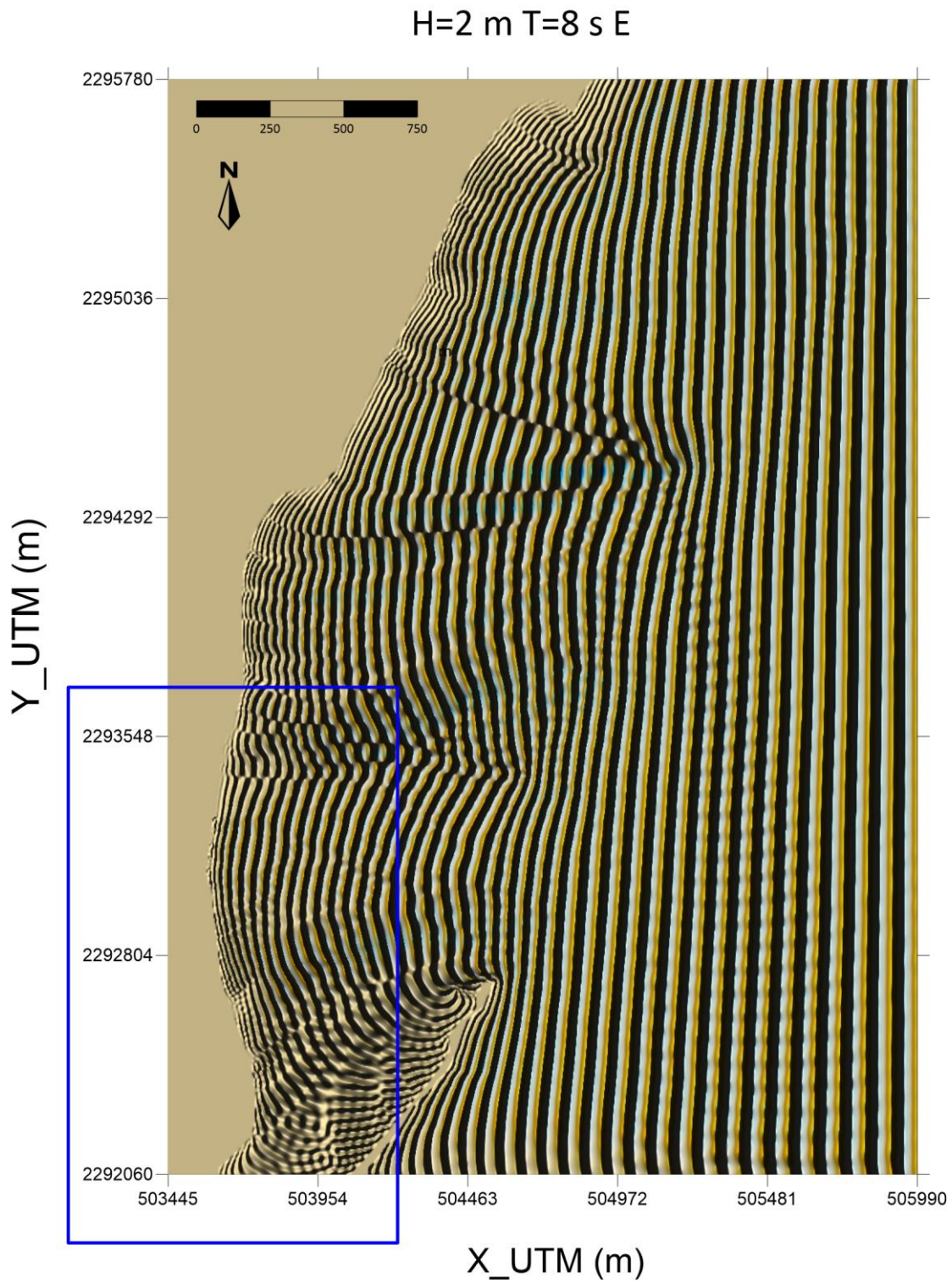


Figura 42. Superficie libre. Caso 5. Fuente: Elaboración propia.

-Caso 9:

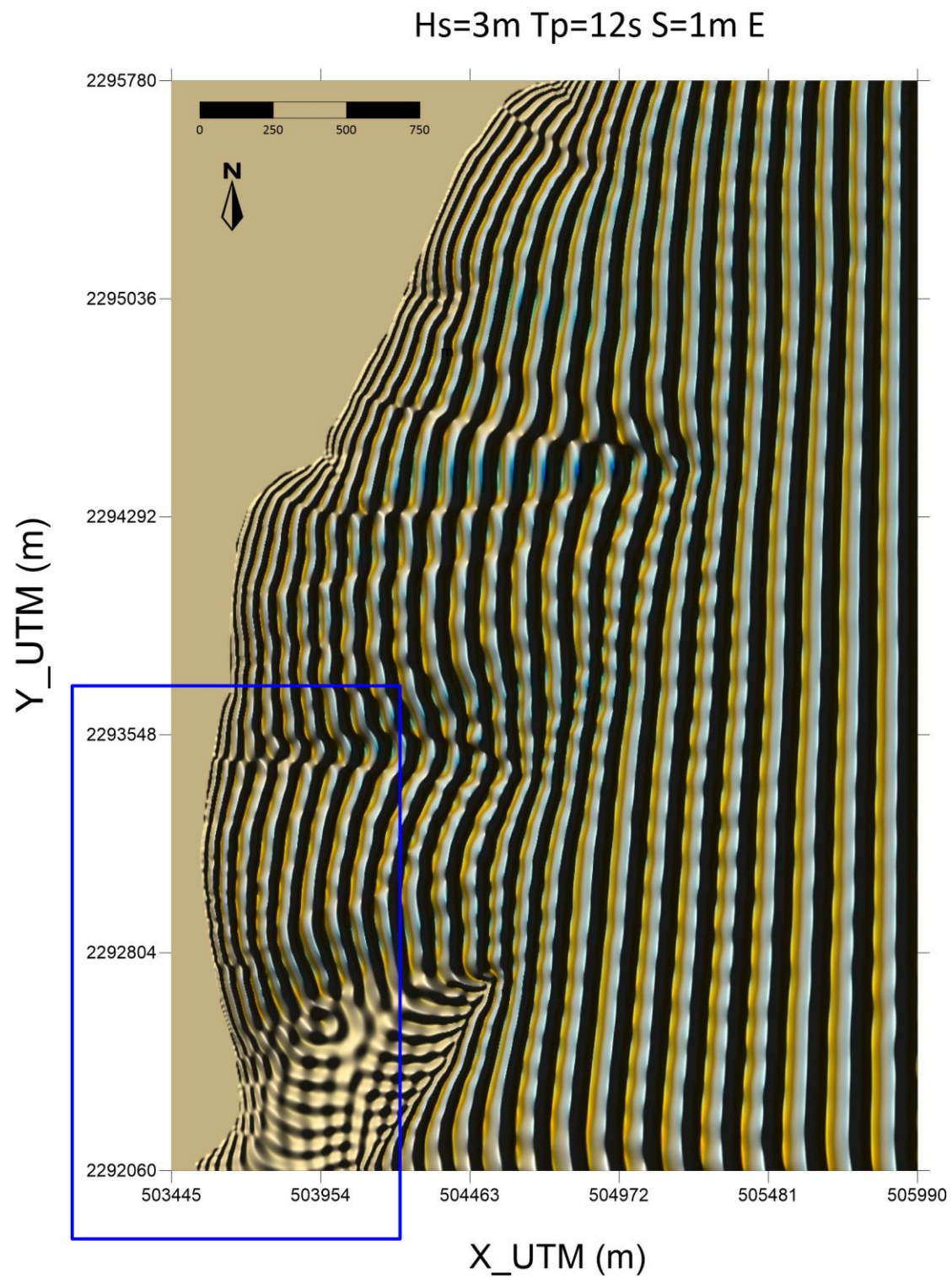


Figura 43. Superficie libre. Caso 9. Fuente: Elaboración propia.

En todas las mallas se observa la transformación que sufren los frentes de onda en su propagación hacia la costa debido principalmente a los procesos de asomeramiento, refracción y rotura de las olas.

Se observa que, el sistema arrecifal demuestra una eficacia notable en la difracción de la energía, redistribuyéndola lateralmente y evitando su impacto directo sobre la línea de costa. Se observa claramente cómo los frentes de onda giran en su aproximación a la costa por refracción tendiendo a situarse de forma paralela a las líneas batimétricas y una mayor variación de los frentes de onda en las zonas menos profundas debido a un mayor efecto del fondo (asomeramiento) que provoca el peralte y posterior rotura de las olas. Sin embargo, a medida que aumenta la intensidad del oleaje, específicamente en el Caso 9 (figura 42), y se produce una sobreelevación del nivel medio del mar por marea de tormenta, disminuye la capacidad de disipación de la energía del oleaje por el arrecife y con ello el servicio de protección que proporciona en la playa.

5.5.2 RESULTADOS DE ALTURA DE OLA

Se procede al estudio detallado de los archivos AMP, que constituyen la información más relevante para evaluar el impacto energético del oleaje en la costa. En este apartado se incluyen los casos 2 ($H=1$ m, $T=8$ s, E), 5 ($H=2$ m, $T=8$ s, E), 6 ($H=2$ m, $T=10$ s, E) y 8 ($H=2$ m, $T=8$ s, ENE), en figuras 44, 45, 46 y 47, por ser los más representativos de las características del oleaje en las proximidades de la costa en diferentes escenarios de tormenta y de calma. El resto de los casos analizados se encuentran disponibles en el apartado correspondiente de anejos.

-Caso 2:

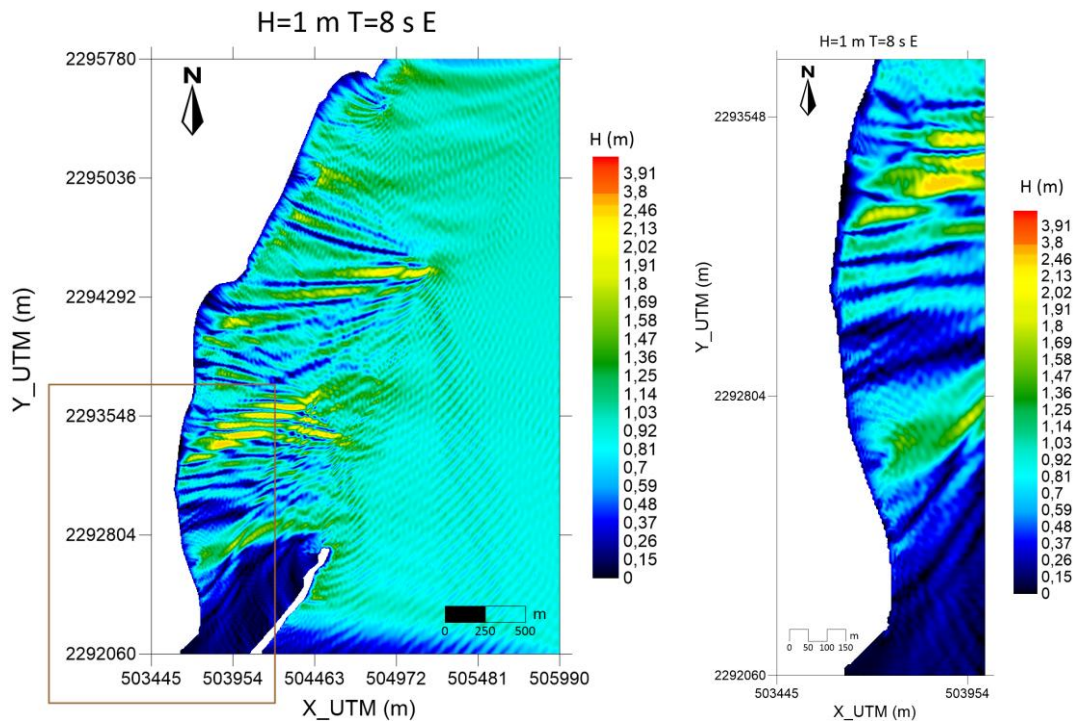


Figura 44. Altura de ola. Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

-Caso 4:

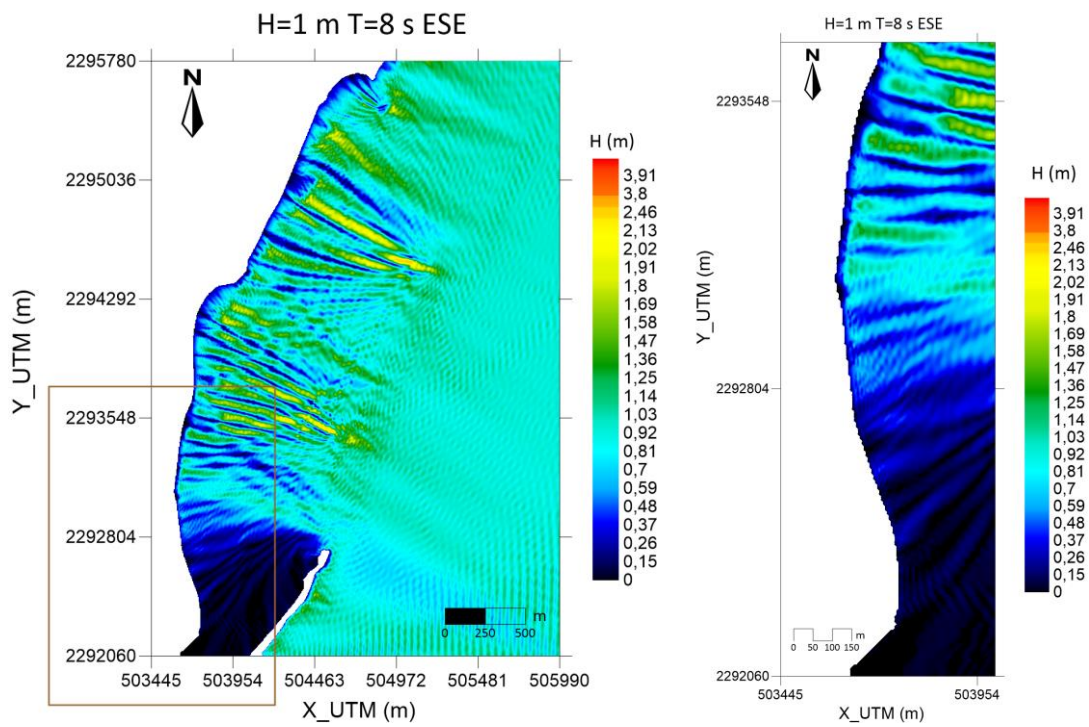


Figura 45. Altura de ola. Caso 4. Fuente: Elaboración propia.

-Caso 6:

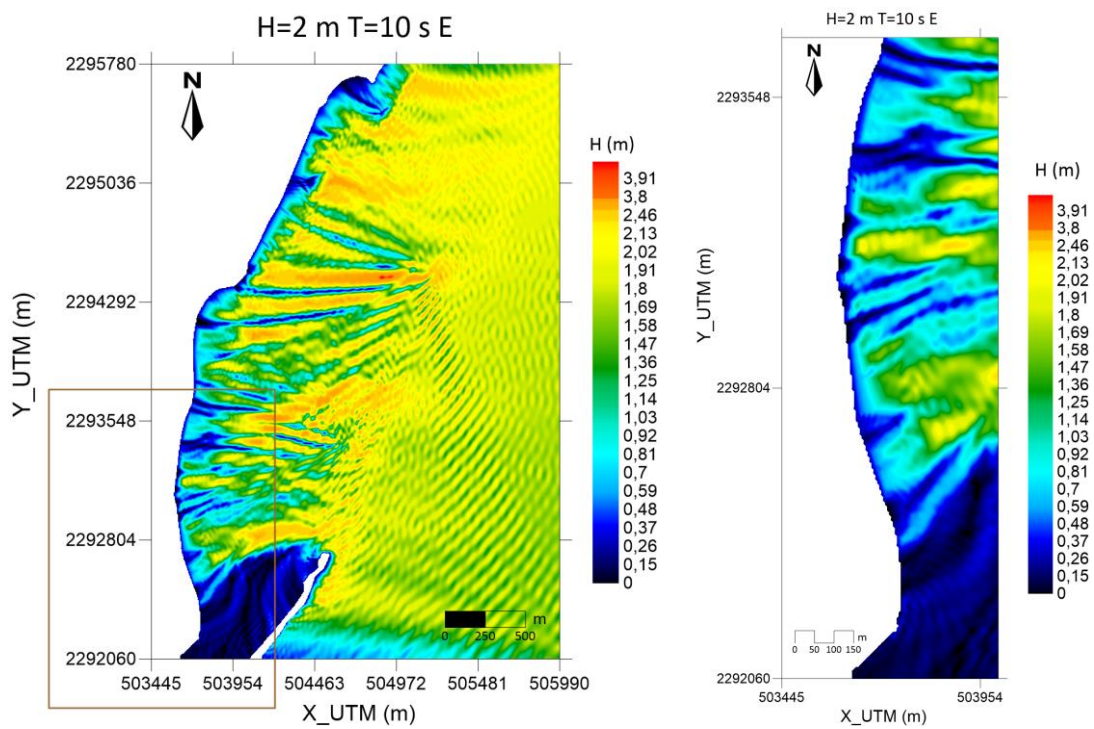


Figura 46. Altura de ola. Caso 6. Fuente: Elaboración propia.

-Caso 8:

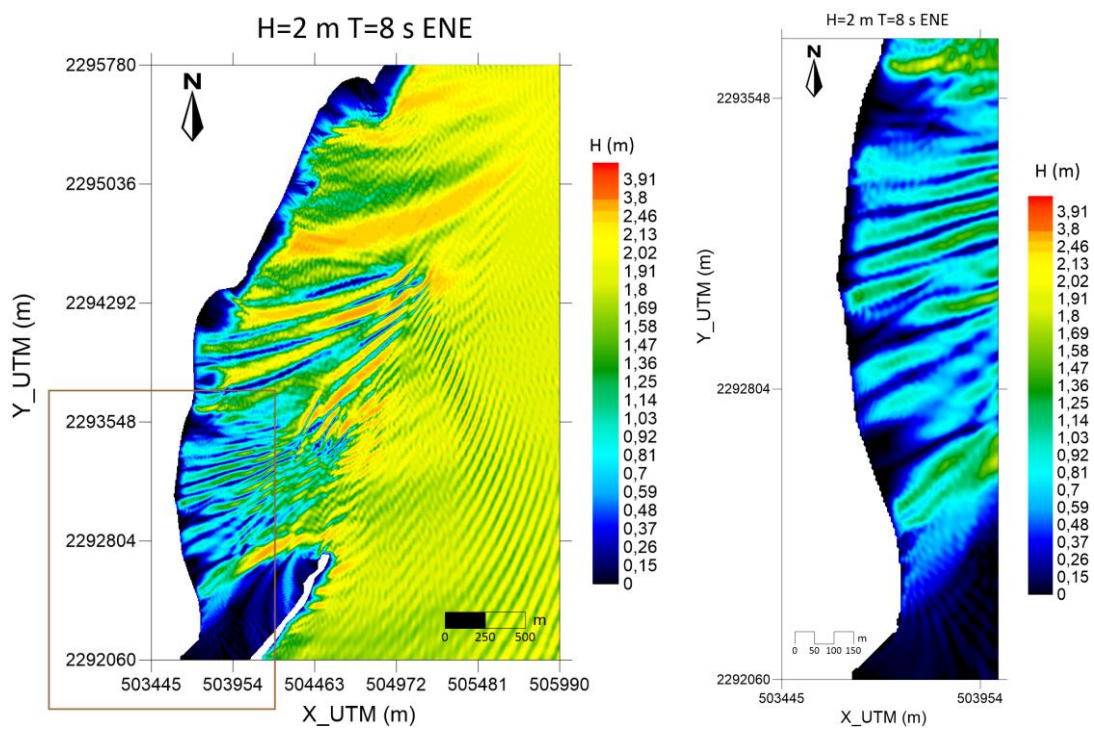


Figura 47. Altura de ola. Caso 8. Fuente: Elaboración propia.

Bajo condiciones de calma, se observa que la altura de ola que llega a la zona próxima a la playa es de aproximadamente 1 m en los sectores norte y central, mientras que en el sector sur disminuye notablemente hasta 0.25 m (figuras 44 y 45). La dirección E es la más relevante, concentrando las olas más altas principalmente en el sector norte, aunque también presenta una influencia notable en el sector central (figura 44). Cuando el oleaje proviene del ESE, el sector sur registra concentraciones de ola menores (figura 45).

En condiciones de tormenta, con una altura de ola de 2 m, la intensidad que alcanza la costa llega hasta 1.8 m en el sector norte (figuras 46 y 47). La dirección E afecta con mayor intensidad a los sectores norte y central (figura 46), mientras que la dirección ESE, en comparación, influye más en el sector sur (figura 47). Este comportamiento se debe al efecto de protección que ofrece el arrecife coralino, que actúa como barrera natural disipando parte de la energía del oleaje, especialmente para las direcciones E y ESE.

5.5.3 RESULTADOS DEL SISTEMA DE CORRIENTES

En las figuras 48, 49 y 50, se presentan los campos de velocidades de corriente de oleaje obtenidos mediante el modelo numérico COCO para los casos 1 ($H=1$ m, $T=6$ s, E), 6 ($H=2$ m, $T=10$ s, E), y 9 ($H=3$ m, $T=12$ s, $S=1$ m, E), que representan la circulación de corrientes en condiciones de oleaje de calma y de tormenta. Los resultados se representan gráficamente mediante vectores cuya orientación indica la dirección en la que tendería a moverse el sedimento por estas corrientes. Adicionalmente, los mapas incorporan una escala de color que permite visualizar la magnitud de las velocidades de corrientes inducidas por el oleaje. El resto de los casos analizados se encuentran disponibles en el apartado correspondiente de anejos.

-Caso 1:

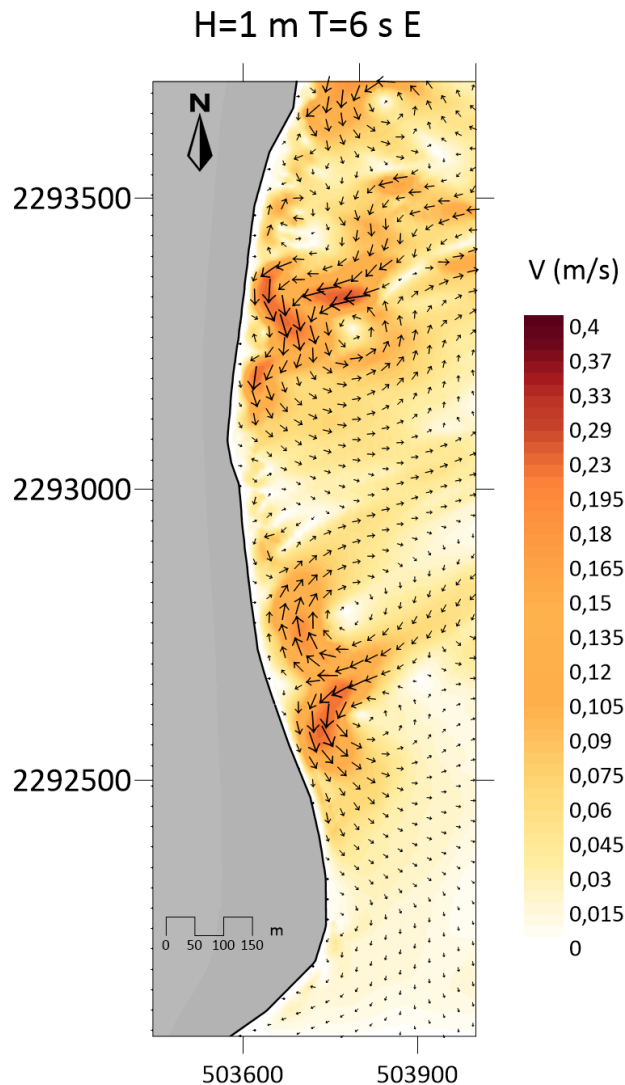


Figura 48. Corrientes. Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

-Caso 6:

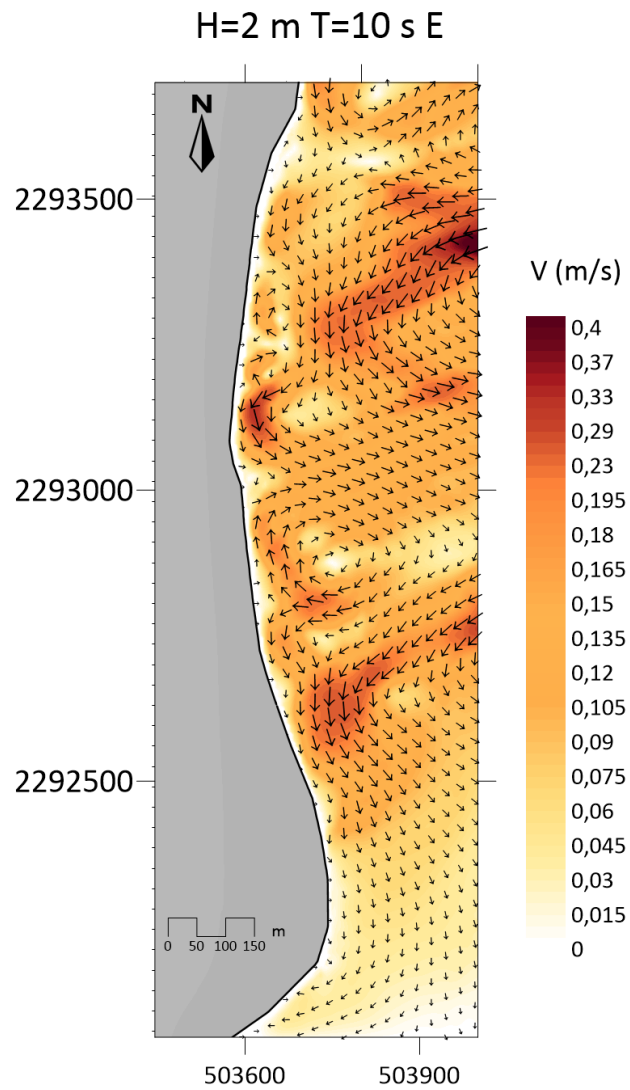


Figura 49. Corrientes. Caso 6. Fuente: Elaboración propia.

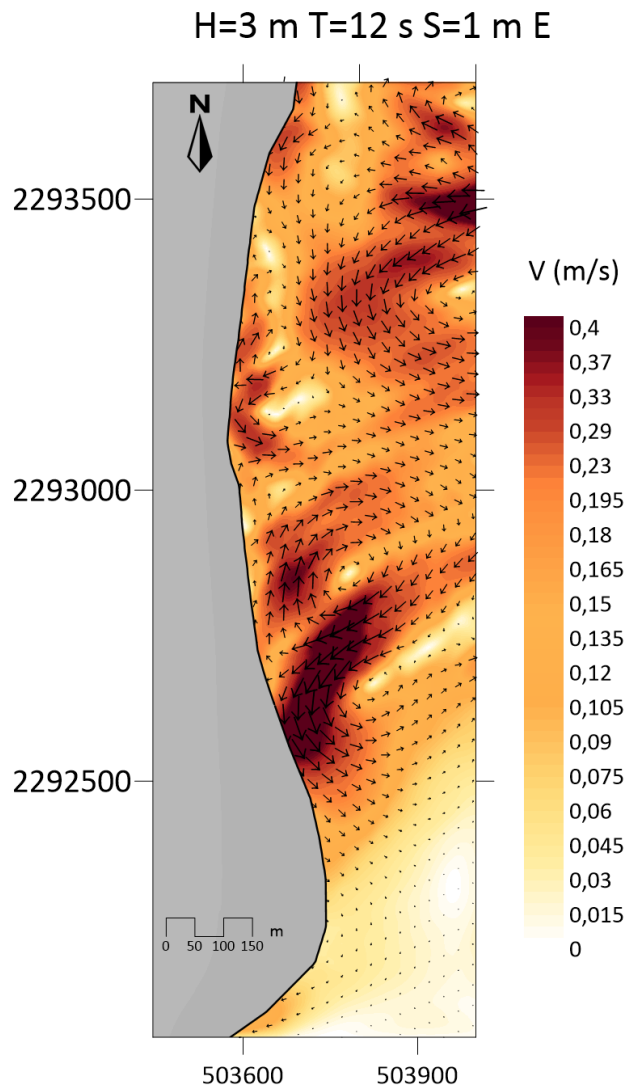
-Caso 9:

Figura 50. Corrientes. Caso 9. Fuente: Elaboración propia.

Estas corrientes, generadas por la acción del oleaje, operan mediante un mecanismo dual: mientras el oleaje moviliza y mantiene en suspensión las partículas sedimentarias, las corrientes se encargan de su transporte y redistribución a lo largo del litoral.

La magnitud de estas corrientes alcanza valores significativos, con módulos de velocidad de hasta 0.4 m/s en los casos más extremos, suficientes para movilizar sedimentos de tamaño medio y grueso. Los resultados evidencian cambios críticos en el sentido del flujo tanto en condiciones de calma como en condiciones de tormenta: aunque la tendencia general muestra una predominancia de norte a sur, se observa en el sector central la formación de remolinos que redirigen los

sedimentos hacia el norte y hacia el E (en sentido horario), favoreciendo su exportación mar adentro (figuras 48, 49 y 50).

En condiciones de calma, en el sector norte se genera otro remolino en sentido antihorario (figura 48), sin embargo, en condiciones de tormenta no existe ese fenómeno, aunque la corriente termina redirigiéndose hacia el E debido a la formación del remolino en el sector central (figuras 49 y 50).

Se observa que en condiciones de tormenta la velocidad de las corrientes en dirección E alcanza hasta los 0,25 m/s (figura 49), lo que provoca que los sedimentos abandonen definitivamente el sistema litoral al llegar a las zonas de pendiente pronunciada.

Las corrientes en el sector sur siguen la tendencia predominante de norte a sur con unas velocidades de corrientes muy reducidas (figuras 48 y 50).

5.5.3.1 CONCLUSIONES

Los esfuerzos de protección deben concentrarse en reducir la fuerza del oleaje que llega a las zonas costeras en los sectores norte y central tanto en condiciones de calma como de tormenta, y estabilizar la punta en el sector sur, donde la energía tiende a concentrarse de forma oblicua a la línea de la costa.

Los fenómenos de remolinos que envían los sedimentos en dirección E, provocan que estos abandonen definitivamente el sistema litoral al llegar a las zonas de pendiente pronunciada, impidiendo su acumulación en las playas.

Los resultados de la aplicación de los modelos numéricos confirman que el sistema en escenario actual es incapaz de mantener el equilibrio sedimentario en Punta Maroma. Existe una pérdida neta de sedimentos que requiere intervención urgente. Los datos justifican técnicamente la implementación de una solución que modifique los patrones hidrodinámicos actuales, priorizando la retención sedimentaria y la reducción de la energía incidente.

6. EVALUACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Se identifica como problemática la reducción drástica del transporte litoral de sedimentos en sentido norte-sur, que supone la pérdida de playa y el retroceso de la línea de costa. Esta situación está causada por un conjunto de factores interrelacionados: la acción continua del oleaje de tormenta, la falta de aportes significativos de sedimentos, el deterioro del arrecife que actúa como barrera natural y el desarrollo turístico masivo en la región norte del Caribe Mexicano.

Estos mecanismos explican la pérdida progresiva de material en el sistema costero y justifican la necesidad de estructuras de protección que modifiquen estos patrones hidrodinámicos para retener los sedimentos dentro de la celda litoral activa. Por tanto, la decisión de no actuar conllevaría la desaparición de la playa y la degradación de los ecosistemas colindantes.

7. ESTUDIO DE SOLUCIONES

7.1 INTRODUCCIÓN

La estrategia de intervención seleccionada consiste en la implementación de un sistema integrado por tres estructuras homogéneas de baja cota de coronación, tipo arrecife artificial, coronadas a nivel medio del mar y orientadas estratégicamente para optimizar la protección contra el régimen de oleaje predominante en Punta Maroma. Esta configuración responde a un análisis comparativo de cuatro alternativas de diseño con dimensiones y disposiciones geométricas diferenciadas, cuyas variaciones impactan directamente en la hidrodinámica local de oleaje, circulación de corrientes, y, con ello, en la evolución morfológica del litoral.

7.2 MECANISMOS DE ESTABILIZACIÓN

Los diques-arrecife operan mediante:

1. Disipación energética: Rotura y fricción del oleaje sobre superficies rugosas.
2. Retención sedimentaria: Creación de zonas de sombra hidrodinámica para acumulación de arena.
3. Integración ecológica: Superficies colonizables por biota marina que mejoran la biodiversidad.
4. Reducción de mantenimiento: Estructuras robustas con resistencia inherente al ambiente marino.

La estabilización requiere establecer posteriormente un ancho mínimo de playa mediante alimentación artificial con sedimentos con características similares a la

de la playa. Esta actuación permitirá ganar terreno al mar para crear una playa estable y funcional que trabaje simultáneamente con los diques.

7.3 CONFIGURACIÓN Y DISEÑO DE LAS ALTERNATIVAS

Tras el análisis de los resultados de modelado numérico, el diseño inicial contemplaba dos diques exentos, pero ante la necesidad de reforzar la protección frente a eventos extremos, se optimizó a un sistema de tres diques paralelos a la línea de costa. Estas estructuras, denominadas dique-norte, dique-central y dique-sur, presentan características técnicas específicas:

- Coronación: Cota 0 con ancho de coronación de 5 m en todas las alternativas.
- Longitud: Variable entre propuestas (<200 m por dique), limitada para evitar la aparición de corrientes desfavorables y problemas de retención sedimentaria, necesita recirculación para garantizar niveles de oxigenación y adecuada calidad del agua.

7.4 ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS

Previo al desarrollo de las propuestas, se evaluó la alternativa de no intervención. Los resultados de los modelos numéricos (superficie libre, altura de ola propagada y campos de corrientes) demuestran que la evolución natural del sistema conllevaría:

- Aceleración de los procesos erosivos críticos identificados.
- Pérdida irreversible de la playa y sistema dunar asociado.
- Degradación progresiva del ecosistema arrecifal adyacente.
- Amenaza a la estabilidad morfológica y ecológica a medio plazo.

Esta evaluación justifica técnicamente la necesidad de intervención activa mediante estructuras de protección y regeneración.

Las características de los diques que definen las cuatro alternativas se presentan en los siguientes apartados, con su distribución en planta incluido en las figuras 51 a 54.

7.4.1 ALTERNATIVA 1

- *Dique Norte*: Longitud de 200 m. Distancia a la costa de 105 m. Profundidad de 3 m.
- *Dique Central*: Longitud de 200 m. Distancia a la costa de 180 m. Profundidad de 3.5 m.
- *Dique Sur*: Longitud de 200 m. Distancia a la costa de 95 m. Profundidad de 2.4 m.

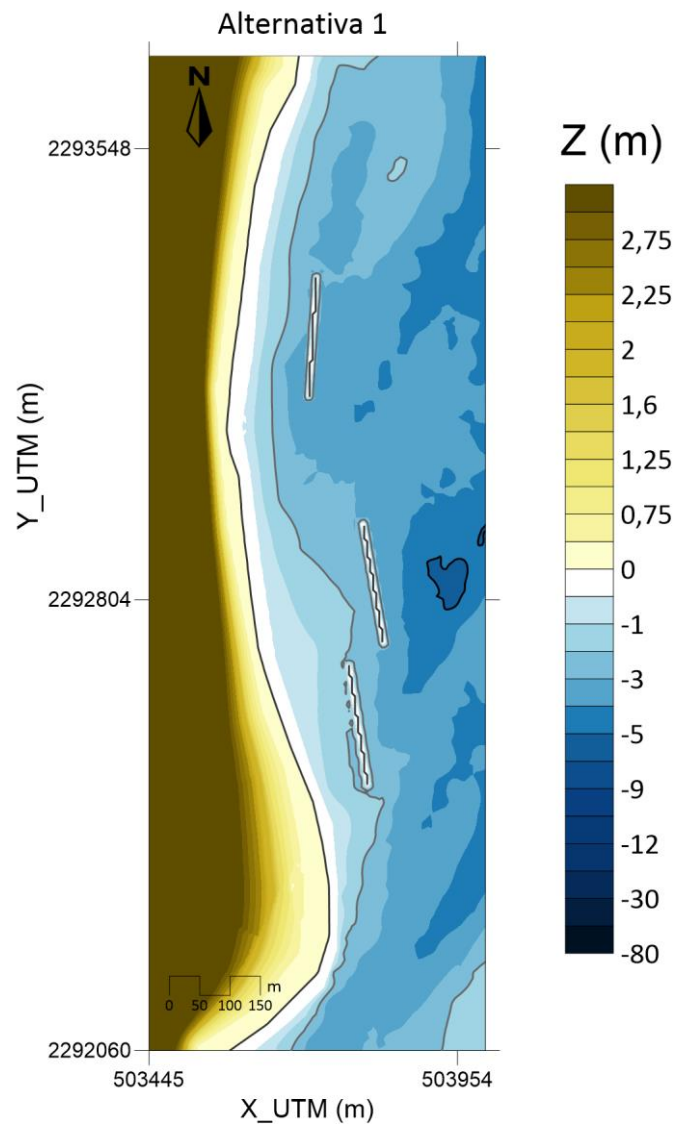


Figura 51. Disposición alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

7.4.2 ALTERNATIVA 2

- *Dique Norte*: Longitud de 150 m. Distancia a la costa: 105 m. Profundidad de 3 m.
- *Dique Central*: Longitud de 200 m. Distancia a la costa: 200 m. Profundidad de 3.5 m.
- *Dique Sur*: Longitud de 200 m. Distancia a la costa: 95 m. Profundidad de 2.4 m.

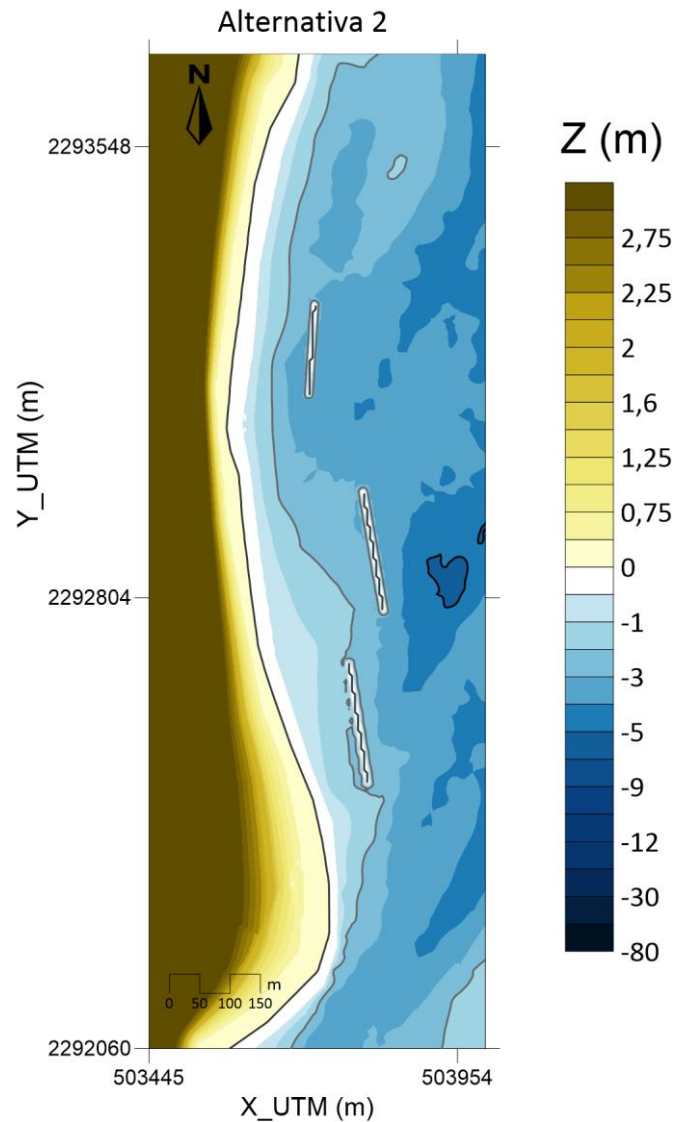


Figura 52. Disposición alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

7.4.3 ALTERNATIVA 3

- *Dique Norte*: Longitud de 120 m. Distancia a la costa: 160 m. Profundidad de 3.5 m.
- *Dique Central*: Longitud de 200 m. Distancia a la costa: 240 m. Profundidad de 4 m.
- *Dique Sur*: Longitud de 200 m. Distancia a la costa: 155 m. Profundidad de 3 m.

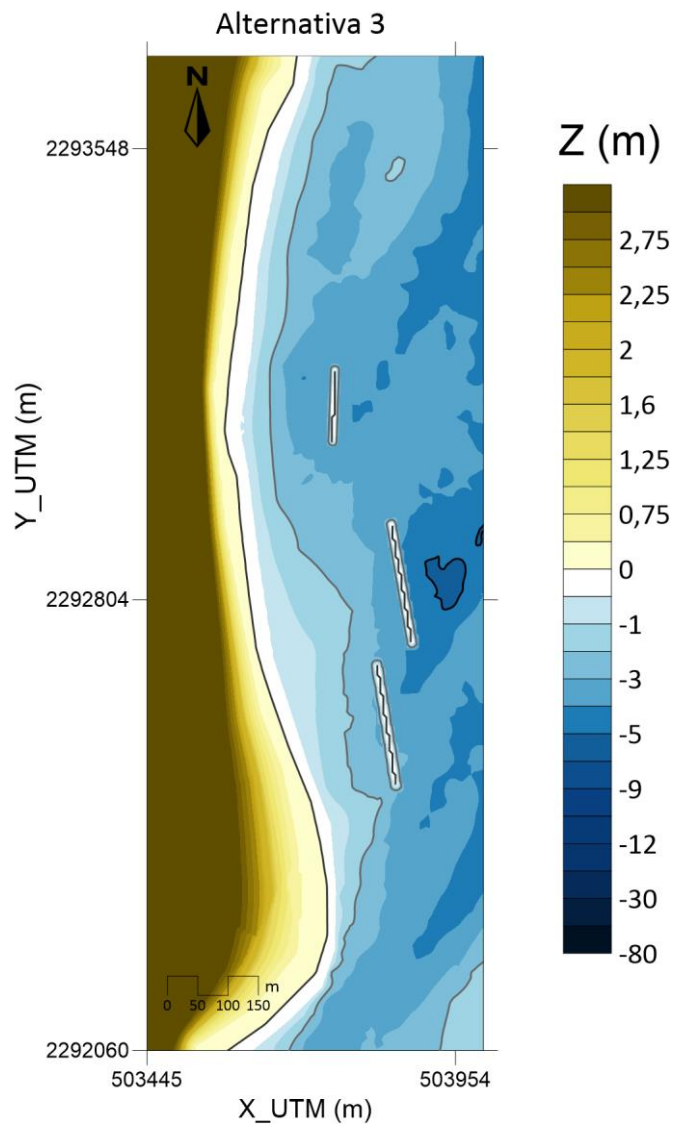


Figura 53. Disposición alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

7.4.4 ALTERNATIVA 4

- *Dique Norte*: Longitud de 100 m. Distancia a la costa: 170 m. Profundidad de 3.5 m.
- *Dique Central*: Longitud de 200 m. Distancia a la costa: 255 m. Profundidad de 4 m.
- *Dique Sur*: Longitud de 200 m. Distancia a la costa: 155 m. Profundidad de 3 m.

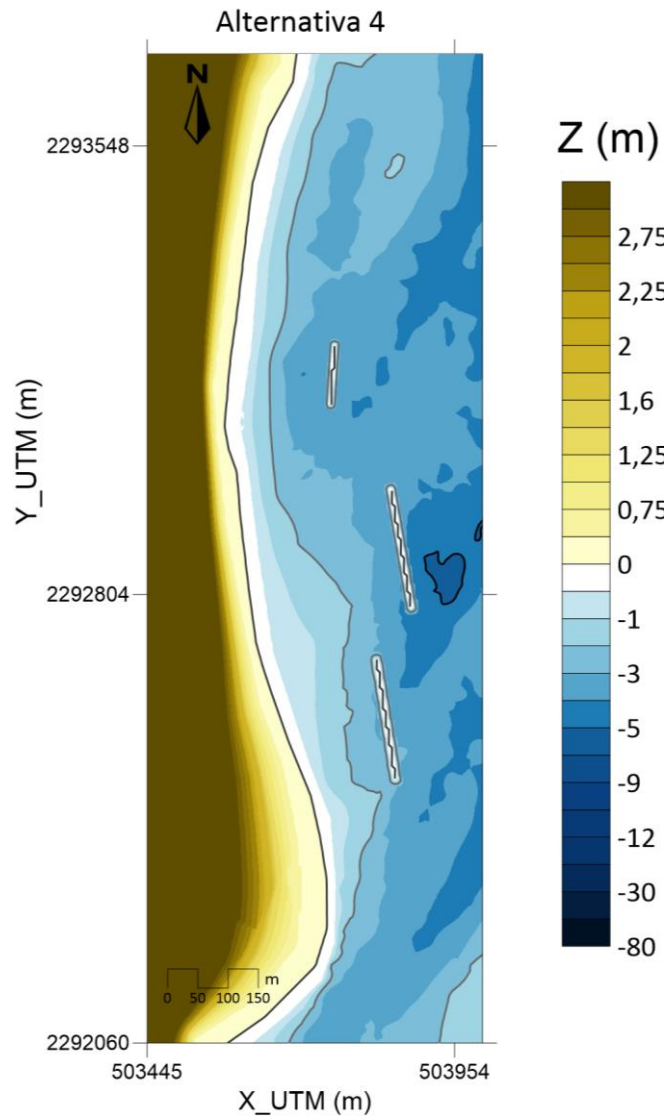


Figura 54. Disposición alternativa 4. Fuente: Elaboración propia

Aunque visualmente similares, las alternativas presentan diferencias notorias en su configuración geométrica. Las variaciones radican en estos dos aspectos:

1. Configuración del dique norte

- *Longitud variable*: Entre 100 y 200 m.
- *Posicionamiento*: Distancia a la costa variable según cada alternativa. Estos cambios alteran significativamente la interacción con el oleaje dominante del este y los patrones de corrientes inducidas.

2. Disposición de diques central y sur

Se presentan cuatro configuraciones distintas:

- Alternativa 1: Diques cercanos entre sí y próximos a la costa (figura 51).
- Alternativa 2: Diques separados y próximos a la costa (figura 52).
- Alternativa 3: Diques cercanos entre sí y alejados de la costa (figura 53).
- Alternativa 4: Diques separados y alejados de la costa (figura 54).

La elección de la alternativa más adecuada se basa en un análisis multicriterio que considera los siguientes aspectos:

1. Impacto Social:

Las tres alternativas utilizan diques homogéneos de baja cota de coronación, tipo arrecife artificial, que al no emerger sobre la superficie del agua eliminan completamente el impacto visual. Dado que todas las propuestas comparten esta característica, este criterio no discrimina entre ellas.

2. Impacto Ambiental:

Todas las alternativas promueven la regeneración de los ecosistemas dunares y costeros. La tipología de dique seleccionada está diseñada para funcionar como arrecifes artificiales, favoreciendo la colonización de especies marinas y mejorando la biodiversidad local. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, es de vital importancia no ocupar la superficie ocupada por los ecosistemas de pastos marinos.

3. Proceso Constructivo:

Las cuatro alternativas requieren metodologías constructivas similares, utilizando maquinaria marítima especializada para la colocación de unidades rocosas o prefabricadas. La complejidad y coste de construcción son similares en todos los casos.

4. Viabilidad Económica:

El análisis económico preliminar indica que las cuatro opciones presentan

inversiones y costes de mantenimiento comparables, sin diferencias significativas entre ellas; únicamente dadas por un mayor coste de construcción que supondría una mayor longitud del dique norte, con una longitud definida de 200, 150, 120 y 100 m para las alternativas 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

5. Viabilidad Técnica:

Este criterio resulta determinante para la selección de la propuesta de solución. Se evaluará mediante modelado numérico (WAPO y COCO) la capacidad de cada alternativa para:

- Reducir eficazmente la energía del oleaje incidente
- Generar patrones de corrientes favorables para el transporte sedimentario
- Estabilizar morfológicamente la punta costera
- Minimizar impactos hidrodinámicos secundarios

La decisión final se basará en los criterios de impacto ambiental y viabilidad técnica, debido a que los demás criterios no muestran diferencias significativas entre las alternativas. La alternativa que muestre mejor adaptación medioambiental, mejor comportamiento hidrodinámico y mayor eficacia en la estabilización costera será seleccionada como solución óptima.

7.5 IMPACTO AMBIENTAL

Si bien todas las alternativas propuestas incorporan criterios de sostenibilidad en su diseño y contribuyen a la mejora de los ecosistemas costeros, la Alternativa 3 destaca por presentar el menor impacto ambiental sobre los ecosistemas presentes de pastos marinos (en verde en figura 55). Esta configuración se sitúa a la mayor distancia de las praderas de pastos marinos, evitando completamente la afectación directa sobre estos ecosistemas.

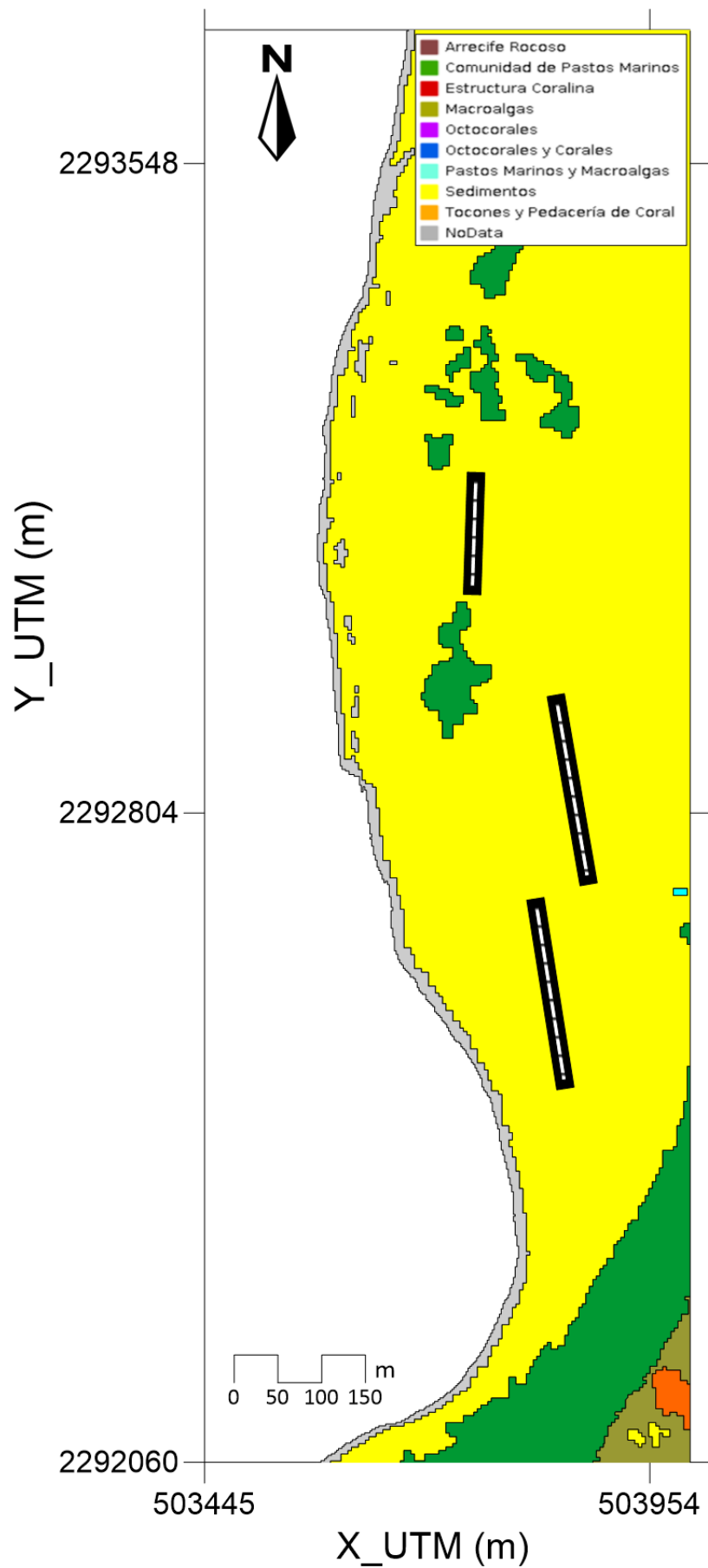


Figura 55. Cobertura Bentónica. Fuente: Elaboración propia

7.6 VIABILIDAD TÉCNICA

Los resultados obtenidos mediante el modelo WAPO para los siguientes casos que representan la altura de ola condiciones de calma y de tormenta:

- Caso 3: $H=1$ m, $T=6$ s, Dirección ESE.
- Caso 6: $H=2$ m, $T=10$ s, Dirección E.
- Caso 8: $H=2$ m, $T=8$ s, Dirección ENE.

Se presentan comparativamente en las figuras 56, 57 y 58. Se muestran en diferentes condiciones de tormenta y calma los resultados correspondientes a la Alternativa 1, la Alternativa 2, la Alternativa 3 y la Alternativa 4, respectivamente. El resto de los casos analizados se encuentran disponibles en el apartado correspondiente de anejos.

-Caso 3:

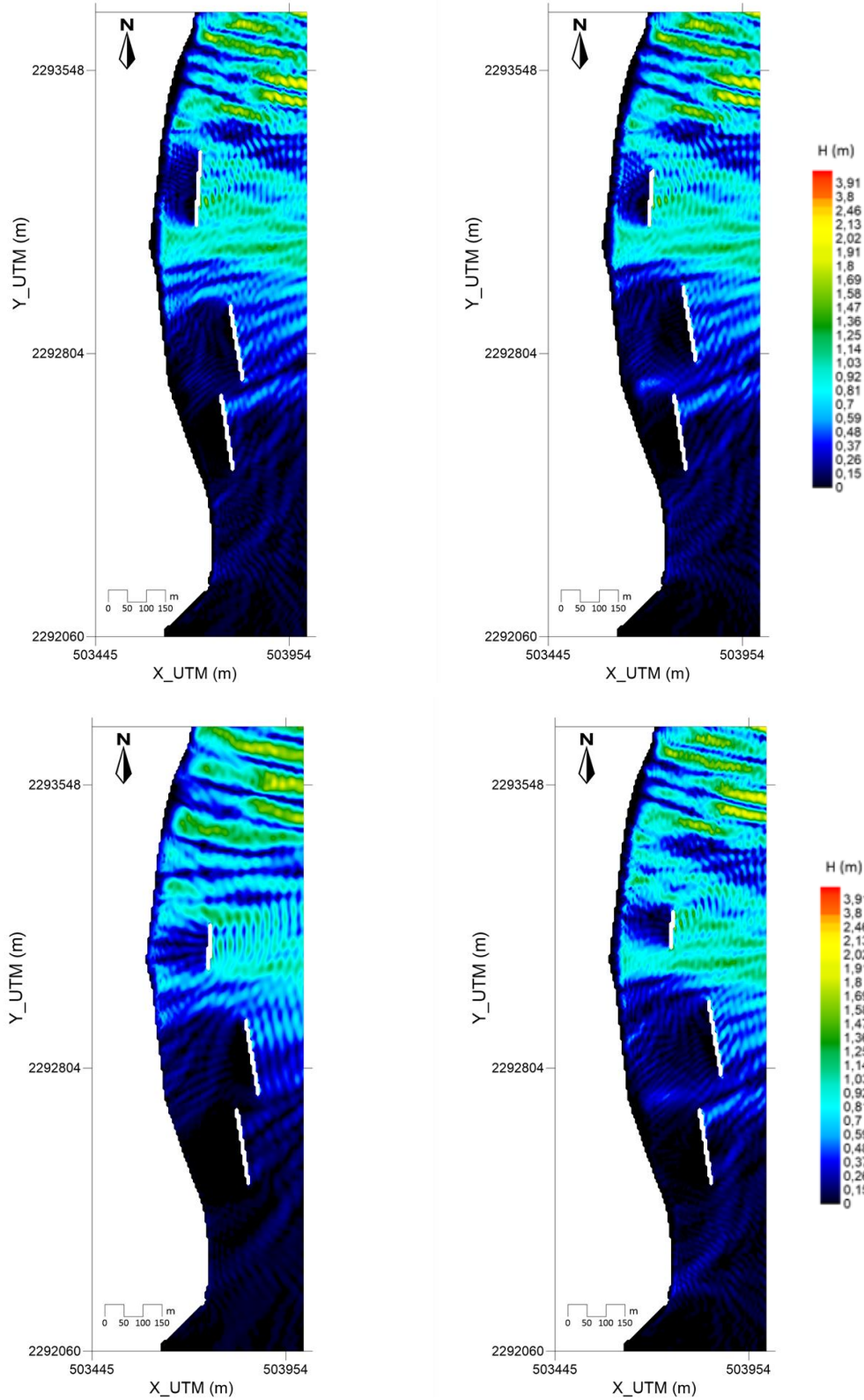


Figura 56. Altura de ola. Caso 3. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.

-Caso 6:

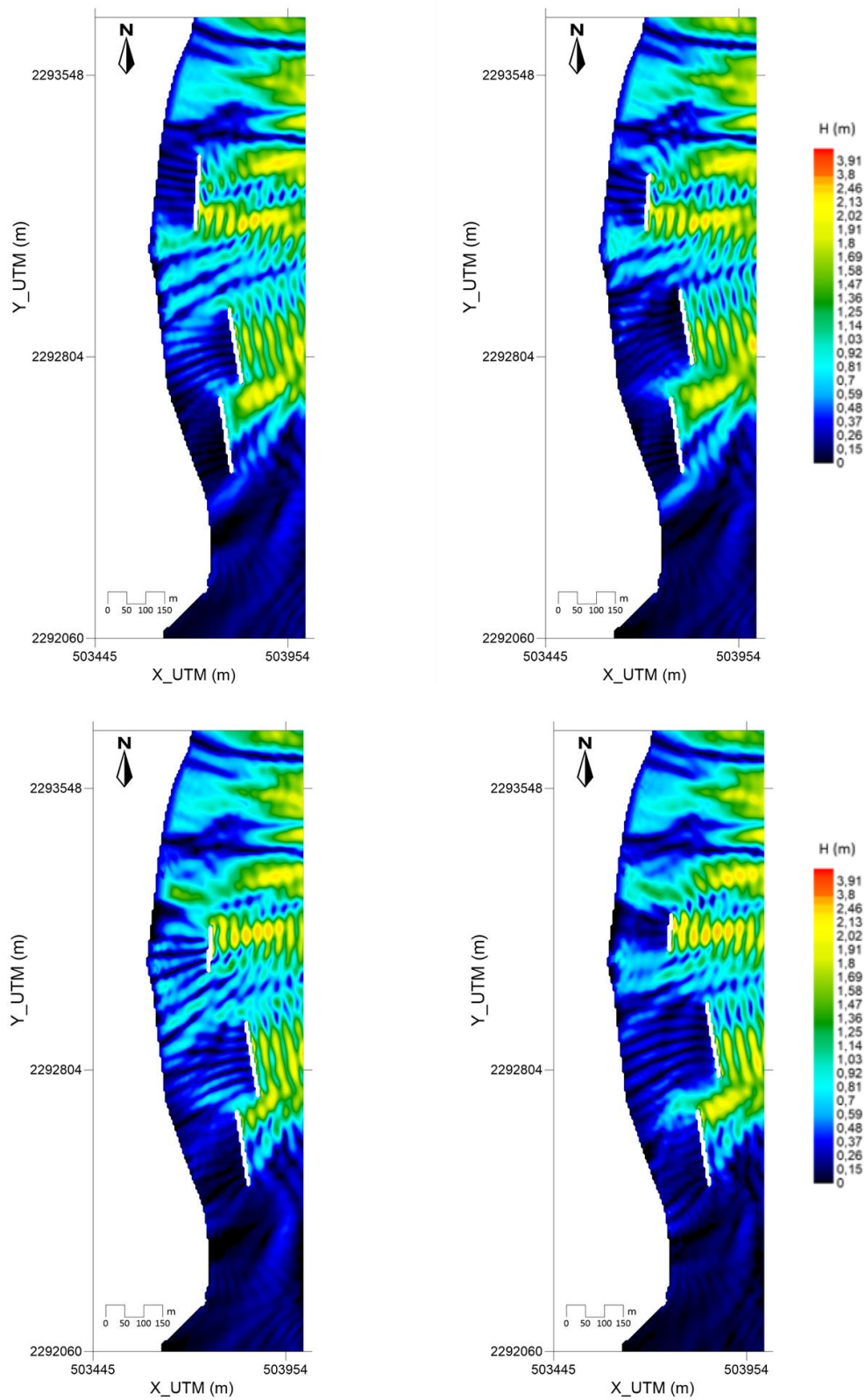


Figura 57. Altura de ola. Caso 6. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.

-Caso 8:

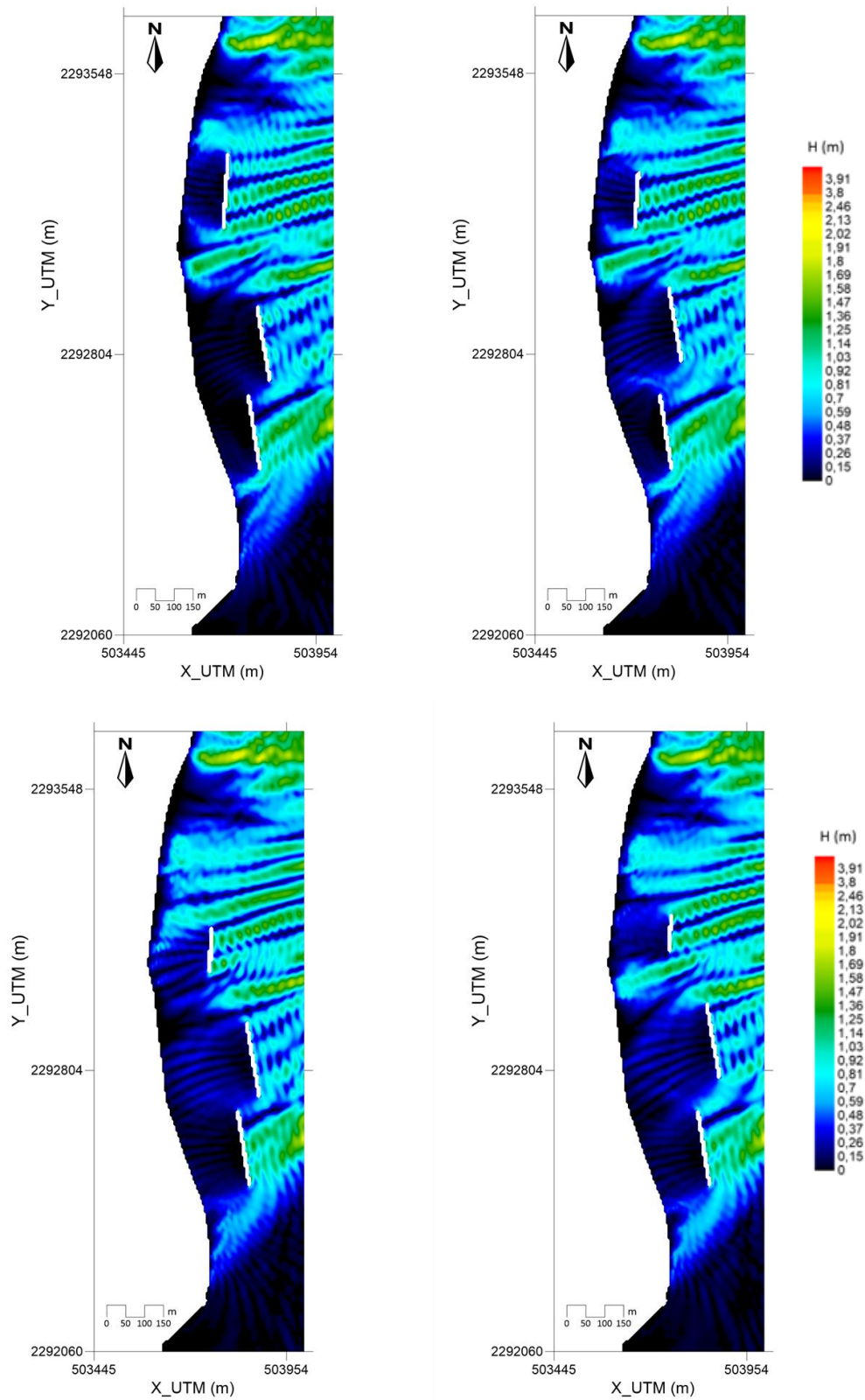


Figura 58. Altura de ola. Caso 8. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos mediante el modelo COCO para los siguientes casos:

- Caso 2: $H=1$ m, $T=6$ s, Dirección E.
- Caso 5: $H=2$ m, $T=8$ s, Dirección E.
- Caso 8: $H=2$ m, $T=8$ s, Dirección ENE.

Se presentan comparativamente en las figuras 59, 60 y 61. Se muestran en diferentes condiciones de tormenta y calma los resultados correspondientes a la Alternativa 1, la Alternativa 2, la Alternativa 3 y la Alternativa 4, respectivamente. El resto de los casos analizados se encuentran disponibles en el apartado correspondiente de anejos.

-Caso 2:

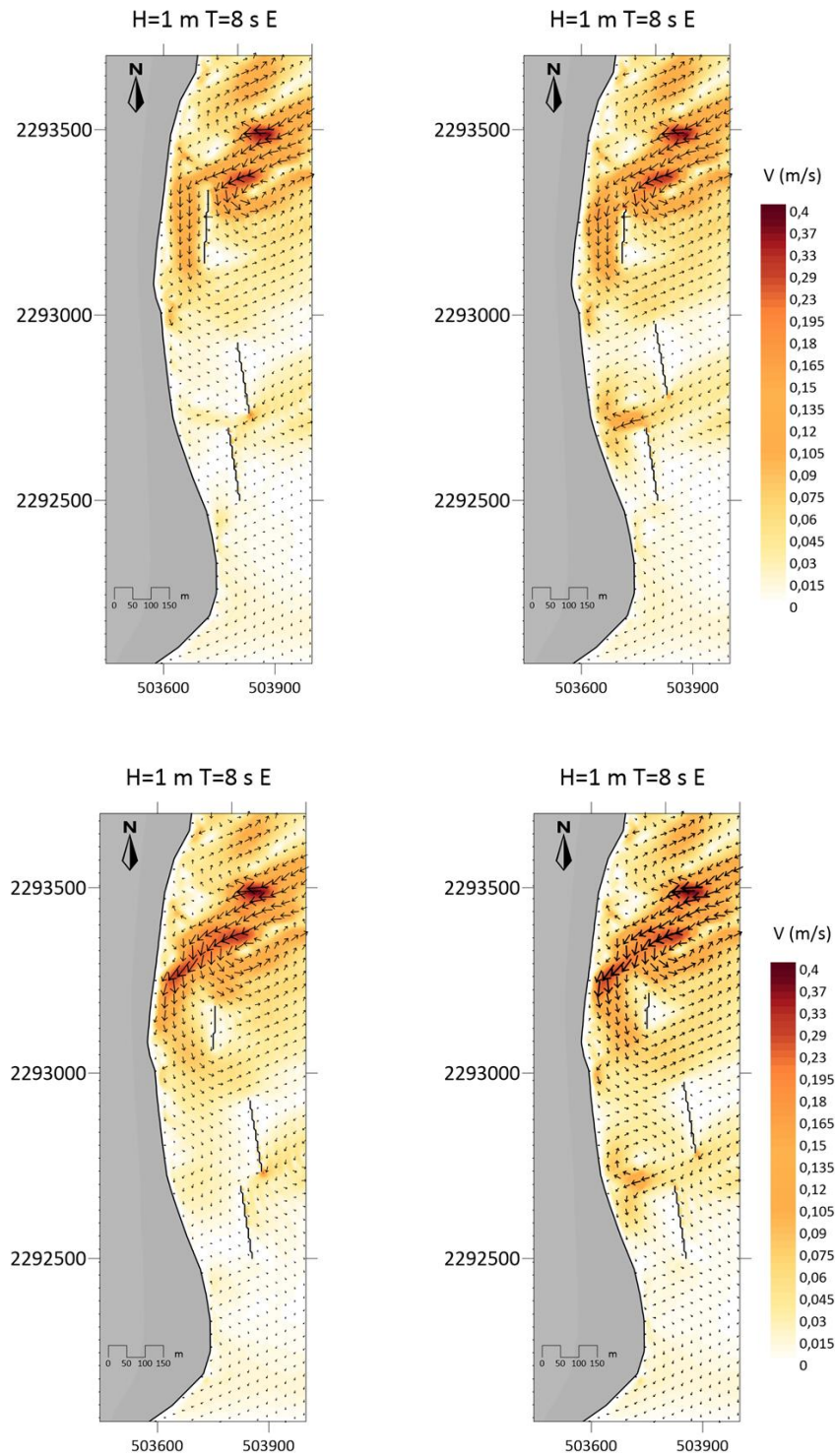


Figura 59. Corrientes. Caso 2. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.

-Caso 5:

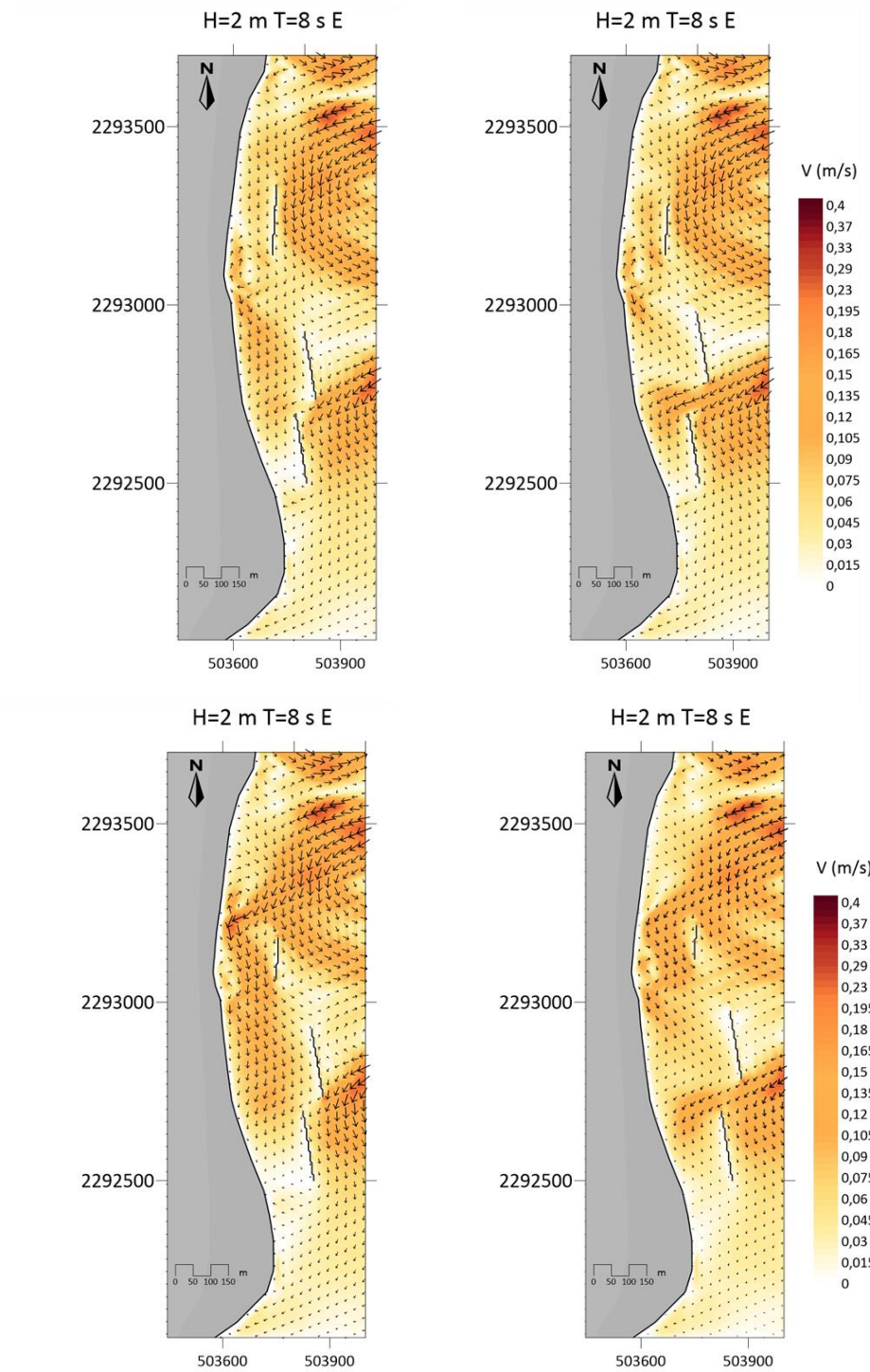


Figura 60. Corrientes. Caso 5. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.

-Caso 8:

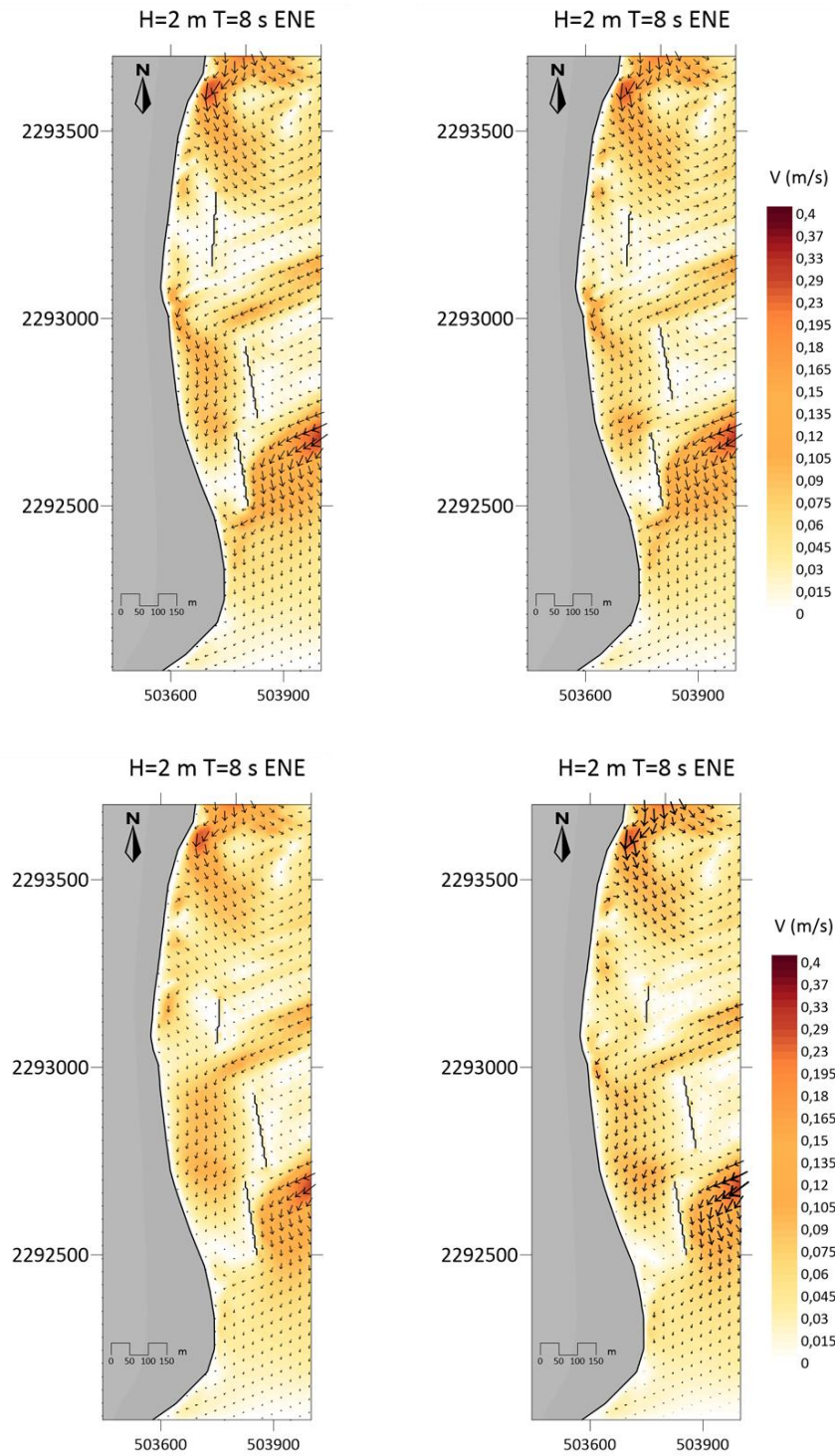


Figura 61. Corrientes. Caso 8. (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3 y (d) Alternativa 4. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la altura de ola, todas las alternativas demuestran capacidad para reducir la energía incidente, aunque se observa que las configuraciones con mayor proximidad entre el dique-central y el dique-sur (Alternativas 1 y 3, en figuras 56 y 57) logran una contención más efectiva del oleaje, particularmente en condiciones de tormenta. En el caso del dique norte, si bien todas las alternativas muestran comportamientos similares, su mayor desplazamiento hacia el sur (Alternativa 3, en figuras 56 y 58) mejora significativamente la protección de la zona más crítica en el tramo de playa situado frente a la misma.

En cuanto a las corrientes inducidas, las Alternativas 1 y 2 presentan flujos hacia el norte en las proximidades del dique norte (ver figuras 59, 60 y 61), lo que favorece el transporte de sedimentos mar adentro. Además, cuando las estructuras están más separadas entre ellas (Alternativas 2 y 4, en figuras 59 y 60), las corrientes incrementan su velocidad hacia el oeste y posteriormente se desvían al norte, exacerbando la pérdida de material. Adicionalmente, en caso de igualdad de circulación de corrientes es más favorable situar las estructuras más lejos de la costa para favorecer el uso lúdico de la playa.

Por el contrario, en las Alternativas 3 y 4, el alejamiento de las estructuras de la costa reduce la intensidad de las corrientes en las proximidades del sector central (figuras 59 y 60) y minimiza la formación de remolinos costeros, lo que favorece la retención sedimentaria en la punta.

Por tanto, la Alternativa 3 se selecciona como la propuesta de solución óptima es la que mejor resuelve los problemas identificados.

8. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

8.1 DISEÑO DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Las estructuras propuestas corresponden a la tipología de diques de baja cota de coronación, lo que significa que son obras recurrentemente rebasadas por el oleaje. Entre sus principales características de funcionamiento se destacan:

1. Exposición a oleaje perpendicular:

Al colocarse muy cerca de la costa, estas estructuras están expuestas a la acción de oleaje casi perpendicular. Dado que una de sus funciones principales es inducir la rotura controlada de las olas, se ven sujetas a condiciones particularmente agresivas. Esto hace recomendable diseñarlas para inicio de avería, permitiéndoles una dinámica controlada que absorba energía mediante movimientos limitados.

2. Vulnerabilidad a la acción del oleaje:

Dado que las olas pueden romper en el talud expuesto, sobre la corona o

sobre el talud protegido, toda la estructura debe reconocerse como atacada por el oleaje y, por ende, sujeta a deformación.

3. Diseño para diferentes condiciones de oleaje:

Una práctica saludable es contemplar en el diseño las condiciones de no rotura, rotura sobre la estructura y olas rotas. Esto asegura su estabilidad estructural y proporciona un panorama amplio de su desempeño y efectividad bajo diversos escenarios.

4. Consideraciones geométricas:

Al ubicarse en zonas de baja profundidad, la construcción con taludes convencionales se vuelve complicada. Por ello, el diseño geométrico puede incorporar configuraciones adaptadas que faciliten tanto la construcción como el desempeño hidrodinámico de la estructura.

Como se ha establecido en la propuesta seleccionada, el sistema de protección costera está compuesto por tres estructuras principales (figura 62) cuya configuración dimensional se detalla a continuación:

- *Dique Norte*: Longitud de 120 m. Distancia a la costa: 160 m. Profundidad de 3.5 m.
- *Dique Central*: Longitud de 200 m. Distancia a la costa: 240 m. Profundidad de 4 m.
- *Dique Sur*: Longitud de 200 m. Distancia a la costa: 155 m. Profundidad de 3 m.

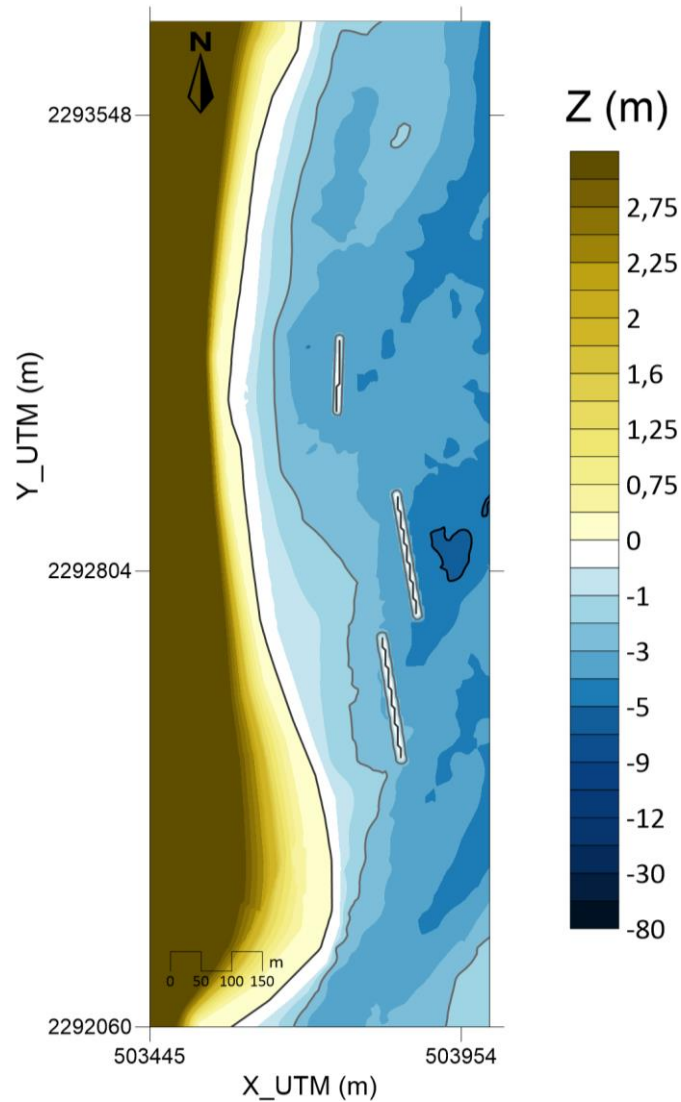


Figura 62. Propuesta elegida. Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo y verificación de los diseños propuestos se debe determinar la altura de ola de diseño mediante el valor más desfavorable entre las obtenidas con el modelo numérico WAPO a pie de dique y el máximo de altura de ola por fondo según el criterio de rotura. En este caso, los valores máximos observados corresponden a los de rotura de fondo, por lo que la altura de ola de diseño se establece en base a este criterio.

Por lo tanto, se toma:

- Altura de ola máxima por criterio de rotura (H_{max}):
Se calcula mediante la expresión:

$$H_{max} = 0.78 \times hb$$

donde hb representa la profundidad a pie de dique.

En cuanto al diseño del tamaño de las piezas que componen los diques de protección, se sigue la metodología propuesta por Burcharth et al. (2006), cuyas expresiones principales garantizan la estabilidad hidráulica de la estructura. Las ecuaciones fundamentales incluyen:

- Diques con un solo tipo de pieza en todos los sectores (taludes, corona y morros)

$$\frac{H_s}{\Delta Dn50} = 0.06 \left(\frac{Rc}{Dn50} \right)^2 - 0.23 \left(\frac{Rc}{Dn50} \right) + 1.36$$

- Diques con oleaje limitado por fondo:

$$Dn50 \geq 0.29hb$$

- Piezas de la berma de apoyo

$$\frac{H_s}{\Delta Dn50} = \left(0.24 \left(\frac{hb}{Dn50} \right) + 1.6 \right) Nod^{0.15}$$

Donde;

H_s : altura de ola significativa a pie de dique

$Dn50$: diámetro nominal de las piezas

Rc : francobordo

hb : profundidad a pie de dique

Nod : parámetro de daño

$$\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} = -1$$

Considerando:

- $\rho_s = 2100 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_w = 1030 \text{ kg/m}^3$
- $Nod=2$ (daños moderados)

Se obtienen los siguientes resultados:

				Dn50	
Estructura	hb (m)	Hmax (m)	Rc (m)	Cuerpo y morro (m)	Berma (m)
Norte	3.5	2.73	0	1.02	0.96
Central	4	3.12	0	1.16	1.09
Sur	3	2.34	0	0.87	0.82

Tabla 2. Resultados de Dn50. Fuente: Elaboración propia.

Para facilitar la construcción de las piezas se recomienda:

- Dique Norte:
 - Cuerpo, morro y berma: bloques de 1 m de arista
- Dique Central:
 - Cuerpo, morro y berma: bloques de 1.2 m de arista
- Dique Sur:
 - Cuerpo, morro y berma: bloques de 0.9 m de arista

Los pesos correspondientes por tipología de bloque (considerando hormigón de densidad 2100 kg/m^3) son:

- Bloques de 1.2 m: 3.62 toneladas
- Bloques de 1.0 m: 2.10 toneladas
- Bloques de 0.9 m: 1.54 toneladas

La densidad del hormigón se ha ajustado a 2100 kg/m^3 debido a limitaciones locales en la calidad de los áridos disponibles en la región del Caribe, inferior a las densidades habituales en España.

La estructura diseñada presenta una porosidad del 45%, valor óptimo para diques de unidades cúbicas. La sección transversal se dispone con un talud 2H:1V, adecuado para condiciones de oleaje moderado-alto.

En la figura 63 se muestra la sección transversal de los tres diques que componen la solución planteada.

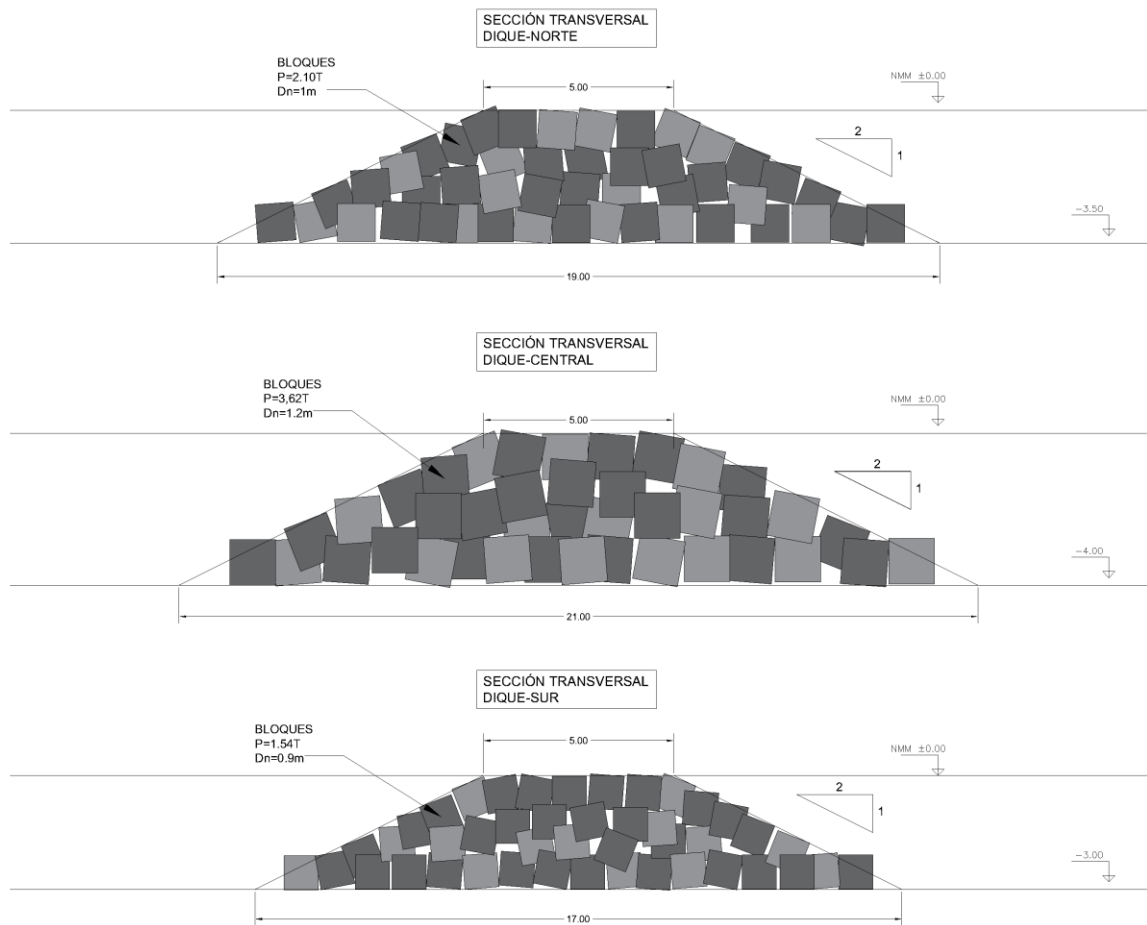


Figura 63. Secciones transversales. (a) Dique-norte. (b) Dique-central. (c) Dique-sur. Fuente: Elaboración propia.

Considerando la longitud de cada dique, las profundidades en cada ubicación (3.5 m dique-norte, 4 m dique-central, 3 m dique-sur) y las dimensiones de los cubos de hormigón, se calcula el número total de unidades requeridas:

- Dique-norte: 3,240 cubos
 - Dique-central: 5,667 cubos
 - Dique-sur: 4,200 cubos
- Total: 13,107 cubos

Para el volumen de hormigón, considerando la densidad de $2,100 \text{ kg/m}^3$ y las dimensiones de cada cubo:

- Dique-norte: $3,240 \text{ m}^3$
 - Dique-central: $9,792 \text{ m}^3$
 - Dique-sur: $3,062 \text{ m}^3$
- Total: $16,094 \text{ m}^3$

8.2 RESPUESTA DE LA LÍNEA DE COSTA DETRÁS DE LOS DIQUES

Para determinar la respuesta de la línea de costa detrás de los diques, se aplicó el modelo semiempírico de Hsu et al. (2003), que permite predecir la formación de salientes o tómbolos en función de la interacción entre las estructuras y el oleaje. La figura 64 ilustra el esquema conceptual del modelo y las variables involucradas.

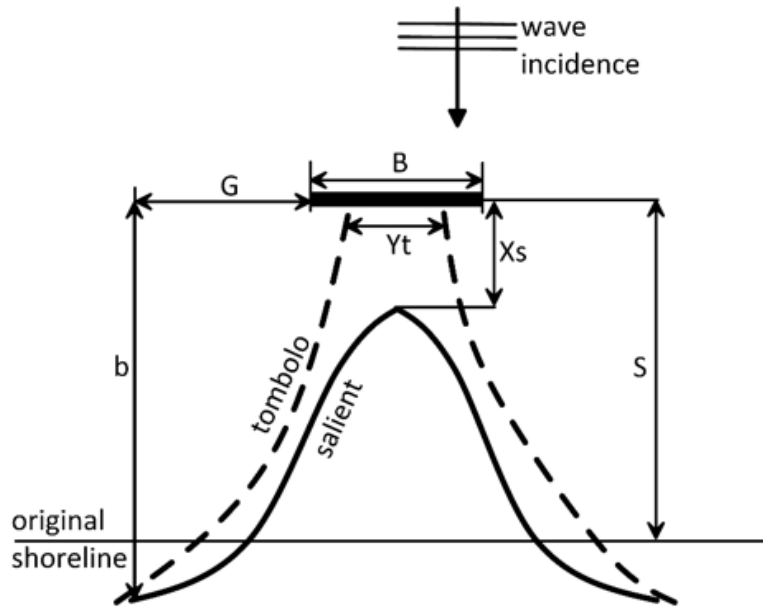


Figura 64. Respuesta de la costa a la colocación de un dique exento. Fuente: Adaptado de Hsu et al. (2003).

La altura de ola en aguas profundas (H_0) se calcula mediante el valor del cuartil 75% correspondiente al período de $T = 7$ s, resultando en una altura de ola de 1.32 m.

Es importante destacar que la intervención se complementará con una alimentación artificial de playa de 10 m de ancho, una vez que las estructuras de protección hayan sido construidas, para dar continuidad al ancho de playa que tienen las secciones adyacentes situadas al sur de la zona de estudio. Esta actuación proporcionará la continuidad sedimentaria necesaria desde el sector sur, garantizando la recuperación morfológica integral del litoral y la cohesión del perfil playa-duna. Las distancias hasta la línea de costa consideradas en los siguientes cálculos se han ajustado restando 10 m.

El área de sedimentación, según McCormick 1993, se puede estimar como:

$$\frac{A}{S^2} = -0.384 + 0.043 \frac{S}{B} + 0.711 \frac{B}{S}$$

Las variables geométricas de la línea costera final esperada se pueden estimar de la siguiente manera:

$$\frac{b}{S} = 1.0 + 0.2 (\zeta_0)^{1/2} \left(\frac{S}{B}\right)^{-5/4}$$

$$\frac{G}{b} = \frac{5}{8} \exp[\ln(\mu) + \ln(\zeta_0) - v\zeta_0]$$

Donde;

$$\zeta_0 = \frac{H_0/L_0}{S_b}$$

$$\ln(\mu) = 19.4 \tanh \left(0.91 \frac{S}{B}\right)$$

$$\sigma = 17.0 \tanh \left(0.59 \frac{S}{B}\right)$$

$$v = 20.0 \tanh \left(0.99 \frac{S}{B}\right)$$

H_0 y L_0 son la altura y longitud de las olas, respectivamente y S_b es la pendiente del fondo marino.

La distancia desde el dique hasta la punta saliente es;

$$X_s = b \sqrt{1 - \left(\frac{h}{a}\right)^2}$$

Mientras que el ancho del tómbolo en el borde de sotavento del dique es;

$$Y_t = B - 2(a - G)$$

donde;

$$h = G + 0.5B$$

$$a = \sqrt{G^2 + b^2}$$

El criterio para definir la formación de un saliente (acumulación sedimentaria parcial) o un tómbolo (unión completa entre la estructura y la costa) se determina mediante los valores a y h .

- Si $a > h$, se genera un saliente.
- Si $a \leq h$, se forma un tómbolo.

Una vez ejecutado el cálculo, se determinaron las áreas protegidas, definidas como las áreas propensas a la sedimentación de sedimentos son:

- Dique Norte (longitud: 120 m): Área de 5,367.38 m².

- Dique Central (longitud: 200 m): Área de 15,008.31 m².
- Dique Sur (longitud: 200 m): Área de 13,200.86 m².

En cuanto a la geometría de la línea de costa, la tabla 3 muestra los valores obtenidos para cada dique. La altura de ola considerada es de 1.32 m (correspondiente al valor del cuartil 75%, una altura de ola moderada, con un periodo asociado de 7 s). Se utilizó una pendiente del 4%, obtenida de la información batimétrica de la zona.

Estructura	Longitud del dique (m)	Distancia a la costa (m)	G (m)	b (m)	Formación	Xs (m)	Yt (m)
Norte	120	150	64.1	164.90	SALIENTE	117.58	-
Central	200	230	115.62	255.37	SALIENTE	163.19	-
Sur	200	145	124.73	173.47	TÓMBOLO	-	22.14

Tabla 3. Resultados de las formaciones. Fuente: Elaboración propia

Aunque el cálculo es una primera aproximación, la cual considera que hay suficiente arena en el sistema, los resultados indican la formación de un tómbolo en el dique sur, fenómeno que resulta beneficioso para la estabilización costera solamente si el sedimento logra pasar longitudinalmente hacia las playas del sur y no es interrumpido por esa formación de manera permanente. De acuerdo con el análisis de corrientes realizado en la figura 60 (c), se observa cómo las corrientes se dirigen hacia el sur alrededor de la estructura, lo que indicaría que el sedimento pasaría por el canalillo entre las estructuras, manteniendo así un volumen de transporte longitudinal. Por tanto, esta acumulación sedimentaria contribuiría a estabilizar morfológicamente la punta, consolidando el avance de la línea de costa y completando el proceso de regeneración de la playa. Por el contrario, en el sector norte se debe evitar la formación de un tómbolo, ya que obstaculizaría el flujo natural de transporte de sedimentos.

8.3 ALIMENTACIÓN ARTIFICIAL

Respecto a la alimentación artificial ya mencionada, se realizará de manera progresiva desde la playa seca para evitar cualquier posible afección a las praderas de pastos marinos o a los arrecifes.

El volumen necesario se estima mediante la siguiente fórmula: (Millán, 2023).

$$V(m^3) = L \times x \times (d + h)$$

Cuyas variables son:

L : la longitud del tramo

x : el ancho objetivo

$d+h$: Suma de la profundidad de cierre y la altura de berma

Para el cálculo de la profundidad de cierre se calculará mediante las formulaciones de Harllemeier (1978) y de Birkemeier (1985). La H_{s12} tiene un valor de 3.30 m, se ha obtenido mediante la herramienta CAROL V1.0, implementada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, y está asociada a un período de 8 s.

Harllemeier:

$$h_{*1} = 2.28 \times H_{s12} - 68.5 \times \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right)$$

$$h_{*1} = 6.34 \text{ m}$$

Birkemeier:

$$h_{*2} = 1.75 \times H_{s12} - 57.9 \times \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right)$$

$$h_{*2} = 4.77 \text{ m}$$

Obteniendo como resultado final de la profundidad de cierre un promedio entre las dos formulaciones:

$$h_* = \frac{h_{*1} + h_{*2}}{2} = 5.55 \text{ m}$$

El tramo es de 1700 metros de longitud y el ancho a ganar es de 10 m. Se establecerá como objetivo alcanzar una berma de +1 m respecto al NMM para garantizar una playa funcional.

Con estos parámetros, el volumen de sedimento requerido para la regeneración asciende a:

$$V(m^3) = 1700 \times 10 \times (5.55 + 1) = 111,350 \text{ m}^3$$

8.4 PROCESO CONSTRUCTIVO

Una vez construidas las estructuras se procederá a la alimentación artificial de arena para ampliar el ancho de playa seca. Para ello, se extraerá el sedimento de un banco marino autorizado cercano, fuera de zonas de arrecife y praderas de pastos marinos. Para extraer el sedimento, se utilizará una draga de succión en marcha. El transporte de sedimento a la playa se realizará mediante vertido controlado desde barcaza cercana a la costa para evitar afectar a los ecosistemas colindantes. Finalmente se perfila la playa con bulldozers.

Las medidas de protección ambiental que se considerarán son:

- Delimitación de áreas sensibles, mediante boyas y exclusión de maquinaria en arrecifes y praderas.

- Extracción controlada para no afectar áreas con hábitats frágiles, monitoreando la turbidez.
- Ventanas de trabajo, preferentemente en los meses de febrero a abril, donde el mar está en periodo de calma y fuera de temporada de huracanes, la cual tiene lugar de junio a octubre. Además, se debe evitar trabajar en la temporada de reproducción de tortugas marinas (mayo a octubre) y corales (agosto-septiembre), así como la temporada alta de turismo en el Caribe (principalmente en diciembre-enero y Semana Santa). Como opción secundaria, con plan de contingencia meteorológica y control por eclosiones tardías de tortugas marinas, se podría trabajar en periodo de mitad de octubre a mitad de noviembre.

8.5 VALORACIÓN ECONÓMICA

Para el diseño de las piezas cúbicas de hormigón, se utilizará como referencia la metodología de estimación recogida en el *Manual del Cubípodo (2015)*.

$$C_B = (265 + HOR) + 0,75 \times \left[10^5 \times \left(\frac{1}{\ln(V_B \times W_B)} \right)^2 - 10^4 \times \left(\frac{1}{\ln(V_B \times W_B)} \right) \right]$$

CB = Precio unitario del bloque cúbico (€/m³ de hormigón en cubos de hormigón)

HOR = Coste del hormigón suministrado (€/m³ de hormigón) ≈ 68 €/ m³

Wb = Peso del cubo (t)

VB = Volumen total de hormigón utilizado en cubos (m³ de hormigón)

Dado que hay diferentes tamaños de piezas:

$$V_B = \sum_{m=1}^M V_m$$

$$W_B = \frac{\sum_{m=1}^M (V_m \times W_m)}{V_B}$$

$$V_B \times W_B = 46,971 \text{ t m}^3$$

El coste obtenido por metro cúbico de hormigón en cubos es de 283.92 (€/m³) y el coste total para la construcción de los cubos es de 4,569,498.5 €.

9. BIBLIOGRAFÍA

Punta Maroma. (s. f.). *Wikipedia*. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Punta_Maroma

Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011). the Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology journal*, 19(3), 507-524.

McField, M., & Kramer, P. (2007). Healthy reefs for healthy people: a guide to indicators of reef health and social well-being in the Mesoamerican Reef Region. *Smithsonian Institution, Washington, DC, EEUU*, 208.

Silva, R., et al. (2020). Coastal erosion along the Mexican Caribbean. *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), 389-394.

Rioja-Nieto, R., & Álvarez-Filip, L. (2019). Coral reef systems of the Mexican Caribbean: Status, recent trends and conservation. *Marine Pollution Bulletin*, 140, 616-625.

Mapa del estado de Quintana Roo – municipios. (s. f.). En *DescargarMapas.net*. Recuperado de <https://descargarmapas.net/mexico/quintana-roo/mapa-estado-quintana-roo-municipios>

Quintana Roo. (s. f.). *Wikipedia*. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Quintana_Roo

Baldwin, J., & Márquez, F. (2022). The Economic Value of Beaches: A Study of the Riviera Maya, Mexico. *Journal of Coastal Research*, 38(4), 723–735.

Ortiz, J. C., & Gómez, R. (2021). The role of mangrove forests in coastal protection: A review. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 49(4), 523–536.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)*. Capítulo 4: Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities.

Silva, R., Borthwick, A. G., and Taylor, R. E. (2005). Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation. *Coast*. doi:10.1016/j.coastaleng.2004.12.009

Mendoza, E., Silva, R., Baquerizo, A. & Losada, M.A. 2008 Quad-tree based numerical model for coastal hydrodynamics simulations. In: *Ocean Engineering Research Advances*. Alan I. Prescott (Ed.). Nova Publishers. Chap. 9, pp. 243 – 266. New York, USA

Estrada-Saldívar, N., Jordán-Dahlgren, E., Rodríguez-Martínez, R. E., Perry, C., & Alvarez-Filip, L. (2019). Functional consequences of the long-term decline of reef-building corals in the Caribbean: Evidence of across-reef functional convergence. *Royal Society Open Science*, 6(12), 190298.

Blanchon, P., Richards, S., Bernal, J. P., Cerdeira-Estrada, S., Ibarra, M. S., Corona-Martínez, L., & Martell-Dubois, R. (2017). Retrograde accretion of a Caribbean fringing reef controlled by hurricanes and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science*, 5, 78.

Rodríguez-Zaragoza, F. A., & Arias-González, J. E. (2015). Coral biodiversity and bio-construction in the northern sector of the mesoamerican reef system. *Frontiers in Marine Science*, 2, 13.

Macías, B., Santiago, C., Arana, H., Villalobos, H., Adame, L., Merlín, L., ... & Solimán, V. Estudio para la caracterización y diagnóstico de humedales en Puerto Morelos.

Márquez García, A. Z., Márquez García, E., Bolongaro Crevenna Recasens, A., & Torres Rodríguez, V. (2010). Cambio en la línea de costa en la Riviera Maya debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos, ¿consecuencia del cambio global climático. *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. Campeche, México*, 345-358.

Valderrama-Landeros, L. H., Martell-Dubois, R., Ressler, R., Silva-Casarín, R., Cruz-Ramírez, C. J., & Muñoz-Pérez, J. J. (2019). Dynamics of coastline changes in Mexico. *Journal of Geographical Sciences*, 29(10), 1637-1654.

Odériz, I., Mendoza, E., Leo, C., et al. (2014). An alternative solution to erosion problems at Punta Bete–Punta Maroma, Quintana Roo. México: Conciliating tourism and nature. *Journal of Coastal Research*, 71(Suppl. 1), 75–85.

Perera-Valderrama, S., Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Rosique-De La Cruz, L. O., Caballero-Aragón, H., Ressler, R., ... & Ketchum, J. (2020). Protocolos de monitoreo de la biodiversidad marina en áreas naturales protegidas del Caribe mexicano.

Silva, R., Villatoro, M., Ramos, F., et al. (2014b). *Caracterización de la zona costera y planteamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable*. Instituto de Ingeniería UNAM y SEMARNAT.

DE, P. L. E. D. C. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA COSTERA Y PLANTEAMIENTO DE ELEMENTOS TÉCNICOS PARA LA ELABORACIÓN DE CRITERIOS DE REGULACIÓN Y MANEJO SUSTENTABLE.

Van Tussenbroek, B. I., et al. (2010). *Los pastos marinos de México: diversidad, distribución y conservación*. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2021). *Manglares y pastos marinos de México: Extensión, distribución y monitoreo*. CONABIO (2021).

Orth, R. J., Carruthers, T. J., Dennison, W. C., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., ... & Williams, S. L. (2006). A global crisis for seagrass ecosystems. *Bioscience*, 56(12), 987-996.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2018). *Tesis: [Modelado Numérico]* (Núm. 0772785_A7). Recuperado de https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2018/abril/0772785/0772785_A7.pdf

Silva, R., Borthwick, A. G., & Taylor, R. E. (2005). Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation. *Coastal engineering*, 52(5), 391-407.
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.

Martínez, A., et al. (2017). Integración de modelos numéricos para la evaluación de procesos costeros: WAPO y COCO2. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 121-135.

Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. DOI: [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47)

Burcharth, H. F., Kramer, M., Lamberti, A., & Zanuttigh, B. (2006). Structural stability of detached low crested breakwaters. *Coastal Engineering*, 53(4), 381-394.

Millán Roldán, M. D. C. (2023). Estudio de la regeneración de las playas entre el Puerto de Valencia y el Faro de Cullera, provincia de Valencia.

Burcharth, H. F. (2007). Aspects related to design and construction of breakwaters in deep water. In *Symposium Design and Construction of Deep Water Maritime Works: Gijon, Spain, 2007*.

Medina Folgado, JR.; Gómez Martín, ME. (2015). Manual del Cubípodo® 2015. Editorial Universitat Politècnica de València.
<https://riunet.upv.es/handle/10251/53871>

Martín Castillo, E. (2018). Estudio de Soluciones para la reparación del dique norte de encauzamiento del río Júcar en su desembocadura en Cullera (Valencia).
<https://riunet.upv.es/handle/10251/114912>

Barjola Martínez, C. (2024). Estudio de soluciones para la estabilización del frente litoral de la Marjal del Moro en Sagunto (Valencia). Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/210362>

Mataix Bel, C. (2021). Estudio de soluciones para la regeneración de la playa "Les Deveses" en el término municipal de Dénia (Alicante). Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/180421>

Catalonia Hotels (2023). *Punta Maroma: una de las playas más hermosas del mundo*. Catalonia Hotels Blog. <https://www.cataloniahotels.com/es/blog/punta-maroma-una-de-las-playas-mas-hermosas-del-mundo/>

Google (s.f.). *Google Earth* (versión 9.0) [Software]. <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>

CONABIO (2021). *Batimetría y modelos digitales de elevación para zonas costeras de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/biodiv/monmang/bimagdmo/py_oc2020gw

Jiménez-Orocio, O., Espejel, I., & Martínez, M. L. (2015). La investigación científica sobre dunas costeras de México: origen, evolución y retos. *Revista mexicana de biodiversidad*, 86(2), 486-507.

Dachary, A. C. (2008). Los límites del desarrollo local en una región de turismo global. El caso del corredor Cancún-Tulum. México. *Aportes y transferencias*, 12(1), 41-56.