

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

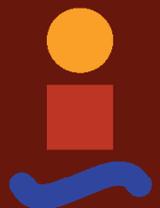
Hidrodinámica de arrecifes artificiales para la
práctica de surf

Autor: Raúl García Pila

Tutor: Alejandro López Ruiz

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Hidrodinámica de arrecifes artificiales para la práctica de surf

Autor:

Raúl García Pila

Tutor:

Alejandro López Ruiz

Profesor Ayudante Doctor

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Máster: Hidrodinámica de arrecifes artificiales para la práctica de surf

Autor: Raúl García Pila

Tutor: Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2013

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis profesores

Agradecimientos

Agradecer en primer lugar a mi tutor, Alejandro Ruiz, por todo el apoyo mostrado durante la elaboración del presente Trabajo Fin de Máster, por su total disponibilidad cuando ha sido necesaria, por su amabilidad y responsabilidad mostrada durante todo su desarrollo y por facilitarme toda la documentación necesaria para que la realización del presente documento, aunque compleja, haya sido lo menos tediosa posible. Sinceramente, gracias por todo.

También quisiera agradecer a mis amigos por las numerosas horas echadas en la biblioteca durante mi vida universitaria. Gracias a ellos, el camino recorrido ha sido menos pedregoso.

Finalmente, agradecer a mis familiares, seres queridos y amigos desde la infancia por el apoyo mostrado durante todos estos años.

Resumen

El aumento del número de personas que cada año se animan a practicar surf motiva a investigar sobre la construcción de arrecifes artificiales, buscando reproducir las características idóneas que presentan aquellas playas óptimas para la práctica de este deporte. Esto ha motivado estudios anteriores en los que se ha investigado sobre la viabilidad y el impacto en la surfeabilidad que conlleva la construcción de un arrecife artificial en la costa de Conil de la Frontera (Cádiz).

A lo largo del presente Trabajo Fin de Máster se han estudiado, mediante el modelo numérico Delft3D, las consecuencias que acarrea la construcción de un arrecife artificial de características idóneas para la práctica de surf en dicho emplazamiento en términos de hidrodinámica y morfodinámica; mediante el análisis comparativo de 2 escenarios: Escenario 0 (sin arrecife) y Escenario 1 (con arrecife).

Para ello, se han simulado 2 combinaciones de oleaje con objeto de identificar los cambios que el arrecife provoca en las siguientes variables: altura de ola, posición de la línea de costa, forma del perfil transversal de playa, variación de la batimetría (erosión/sedimentación), corrientes y nivel del mar. Así mismo, los diferentes oleajes simulados son: una tormenta de periodo de retorno igual a 25 años procedente de la dirección más desfavorable y aquel oleaje con la probabilidad mayor de ocurrencia para el emplazamiento analizado.

Se ha concluido que, bajo la incidencia de un oleaje con la mayor probabilidad de producirse en la costa de Conil de la Frontera, el arrecife artificial presenta un efecto positivo sobre el emplazamiento donde se ubica, originando una ganancia de playa seca en su parte posterior, una disminución de la altura de ola sobre éste y una reducción de la velocidad que lleva la corriente longitudinal favoreciendo el baño en la zona. Sin embargo, ante la presencia de un temporal, se produce el efecto adverso: gran erosión en la parte derecha de éste como consecuencia del aumento de la altura de ola que origina, así como una mayor velocidad de la corriente que pueden llegar a comprometer la seguridad del baño.

Finalmente, se han expuesto una serie de recomendaciones a tener en cuenta tanto durante la proyección del arrecife como tras la construcción de éste.

Abstract

The increase in the number of people who are encouraged to surf every year motivates Engineers to investigate on the design and construction of artificial reefs; searching the ideal characteristics of optimal beaches for the practice of this sport. That motivated previous studies in which the feasibility and impact on surfing that entails the construction of an artificial reef on the coast of Conil de la Frontera (Cádiz) were analyzed.

In this MsC Thesis, the consequences of the construction of an artificial reef with ideal characteristics for the practice of surfing in this location in terms of hydrodynamics and morphodynamics have been studied using the numerical model Delft3D; through the comparative analysis of 2 scenarios: Scenario 0 (without reef) and Scenario 1 (with reef).

For this, 2 wave combinations have been simulated in order to identify the changes that the reef causes in the following variables: wave height, coastline position, transverse beach profile shape, variation of the bathymetry (erosion / sedimentation), currents and water level. Likewise, the different simulated waves are: a storm with a return period equal to 25 years from the most unfavorable direction and the wave conditions with the highest probability of occurrence for the analyzed site.

In conclusion, under the incidence of a wave with the highest probability of occurring on the coast of Conil de la Frontera, the artificial reef has a positive effect on the site where it is located, causing a dry beach gain on its backwards, a decrease in the height of the wave over the reef and a reduction of the magnitude of the longitudinal current that enhances swim in the area. However, under the presence of a storm, the adverse effect occurs: great erosion on the right side of the reef as a result of the increase in wave height that originates, as well as a greater speed of the current that can compromise the swim.

Finally, a series of recommendations are exposed to be considered both during the design of the reef and after its construction.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de tablas	xvii
Índice de figuras	xix
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	3
3. Arrecife artificial.....	5
4. Zona de estudio	9
4.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	9
4.2 DATOS DE ELEVACIONES	10
4.3 VARIACIONES DEL NIVEL DEL MAR.....	12
4.3.1 <i>Marea astronómica</i>	13
4.3.2 <i>Marea meteorológica</i>	14
4.3.2.1 Viento.....	15
4.3.2.2 Oleaje	18
4.3.2.3 Presión atmosférica	21
4.3.2.4 Rotura del oleaje cerca de la costa (setdown y setup).....	21
5. Metodología	23
5.1 ESCENARIOS DE ESTUDIO: ESCENARIO 0 Y ESCENARIO 1	23
5.2 MODELO NUMÉRICO DE CÁLCULO: DELFT3D.....	24
5.2.1 <i>Módulo Wave</i>	25
5.2.2 <i>Módulo Flow</i>	25
5.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE CÁLCULO	27
5.3.1 <i>Malla o Grid</i>	27
5.3.2 <i>Implementación de los módulos Wave y Flow</i>	29
5.3.3 <i>Batimetría</i>	29
5.3.4 <i>Simulaciones y tiempo de simulación</i>	30
5.3.5 <i>Condiciones de contorno (oleaje)</i>	30
5.3.6 <i>Condiciones de contorno hidrodinámicas</i>	34
5.3.7 <i>Fricción</i>	35
5.3.8 <i>Definición del sedimento</i>	37
5.3.9 <i>Morfología</i>	38
6. Resultados	39
6.1 SIMULACIÓN 1	40
6.1.1 <i>Altura de ola</i>	40
6.1.2 <i>Línea de costa</i>	43
6.1.3 <i>Perfil transversal de playa</i>	44
6.1.4 <i>Variación de la batimetría</i>	48
6.1.5 <i>Campo de velocidad</i>	49
6.1.6 <i>Nivel del mar</i>	54

6.2	SIMULACIÓN 2	56
6.2.1	<i>Altura de ola</i>	56
6.2.2	<i>Línea de costa</i>	58
6.2.3	<i>Perfil transversal de playa</i>	59
6.2.4	<i>Variación de la batimetría</i>	63
6.2.5	<i>Campo de velocidad</i>	64
6.2.6	<i>Nivel del mar</i>	68
7.	Conclusiones	71
8.	Recomendaciones	73
9.	Bibliografía	75

Índice de tablas

<i>Tabla - 1. Armónicos de Marea Conil de la Frontera.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla - 2. Características Mallado.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla - 3. Picos de Tormentas Simuladas.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla - 4. Periodos de Simulación.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla - 5. Condiciones Tipo Water Level. Armónicos de Marea Conil de la Frontera.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla - 6. Simulación 1.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla - 7. Simulación 2.....</i>	<i>56</i>

Índice de figuras

Figura - 1. Perfil Cóncavo Arrecife Artificial	6
Figura - 2. Croquis Orientación Arrecife	6
Figura - 3. Arrecife Artificial 3D.....	7
Figura - 4. Localización de la Zona de Estudio	9
Figura - 5. Batimetría General de la Zona de Estudio	10
Figura - 6. Batimetría Especifica de la Zona de Estudio	11
Figura - 7. Batimetría Escenario 0 (Sin Arrecife).....	11
Figura - 8. Batimetría Escenario 1 (Con Arrecife)	12
Figura - 9. Batimetría Escenario 1 (Con Arrecife) Modificada	12
Figura - 10. Armónicos de Marea Conil de la Frontera	14
Figura - 11. Localización punto SIMAR 6018024.....	15
Figura - 12. Serie Temporal Velocidad del Viento	16
Figura - 13. Probabilidad Velocidad del Viento	16
Figura - 14. Rosa de Viento	17
Figura - 15. Análisis del Viento en las Direcciones de Estudio	18
Figura - 16. Serie Temporal Altura de Ola.....	19
Figura - 17. Probabilidad Altura de Ola.....	19
Figura - 18. Rosa de Olaje	20
Figura - 19. Análisis del Oleaje en las Direcciones de Estudio.....	20
Figura - 20. Batimetría Escenario 0 (Sin Arrecife).....	24
Figura - 21. Batimetría Escenario 1 (Con Arrecife) Modificada	24
Figura - 22. Discretización Malla 1	28
Figura - 23. Localización Malla 1 y Malla 2.....	28
Figura - 24. Implementación Wave y Flow	29
Figura - 25. Batimetría Malla 1 y Malla 2	30
Figura - 26. Bordes con Condiciones de Contorno.....	31
Figura - 27. Máximas Alturas de Ola Significantes (Hs) Simuladas.....	32
Figura - 28. Alturas de Ola Simuladas	33
Figura - 29. Direcciones de Oleaje Simuladas.....	33
Figura - 30. Periodos de Oleaje Simulados.....	33
Figura - 31. Velocidades de Viento Simuladas.....	34
Figura - 32. Direcciones de Viento Simuladas.....	34
Figura - 33. Coeficiente de Chézy.....	36
Figura - 34. Detalle Coeficiente de Chézy.....	37
Figura - 35. Capa de Sedimento Disponible	38
Figura - 36. Área de Estudio.....	39
Figura - 37. Ampliación Área de Estudio	40
Figura - 38. Comparativa Altura de Ola. Bajamar. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha).....	41
Figura - 39. Comparativa Altura de Ola. Nivel Medio. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)	41
Figura - 40. Comparativa Altura de Ola. Pleamar. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)	42
Figura - 41. Batimetría 3D Escenario 0 (Sin Arrecife).....	42
Figura - 42. Batimetría 3D Escenario 1 (Con Arrecife)	43
Figura - 43. Comparativa Línea de Costa	43
Figura - 44. Comparativa Línea de Costa	44
Figura - 45. Perfiles Transversales de Playa.....	44
Figura - 46. Comparativa Perfil Transversal Izquierdo	45
Figura - 47. Comparativa Perfil Transversal Izquierdo	45
Figura - 48. Comparativa Perfil Transversal Central	46
Figura - 49. Comparativa Perfil Transversal Izquierdo	46
Figura - 50. Comparativa Perfil Transversal Derecho	47

Figura - 51. Comparativa Perfil Transversal Derecho.....	47
Figura - 52. Variación Batimetría Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha) Rojo indica erosión, azul sedimentación.....	48
Figura - 53. Comparativa Variación Batimetría.....	49
Figura - 54. Batimetría 3D Escenario 0 (Sin Arrecife).....	50
Figura - 55. Batimetría 3D Escenario 0 (Sin Arrecife).....	50
Figura - 56. Comparativa Velocidad. Bajamar.....	51
Figura - 57. Comparativa Velocidad. Bajamar. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha).....	51
Figura - 58. Comparativa Velocidad. Nivel Medio.....	52
Figura - 59. Comparativa Velocidad. Nivel Medio. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha).....	53
Figura - 60. Comparativa Velocidad. Pleamar.....	53
Figura - 61. Comparativa Velocidad. Pleamar. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha).....	54
Figura - 62. Comparativa Water Level. Pleamar.....	55
Figura - 63. Comparativa Water Level. Pleamar.....	55
Figura - 64. Comparativa Altura de Ola. Bajamar. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha).....	56
Figura - 65. Comparativa Altura de Ola. Nivel Medio. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha).....	57
Figura - 66. Comparativa Altura de Ola. Pleamar. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha).....	57
Figura - 67. Comparativa Línea de Costa.....	58
Figura - 68. Comparativa Línea de Costa.....	59
Figura - 69. Comparativa Perfil Transversal Izquierdo.....	59
Figura - 70. Comparativa Perfil Transversal Izquierdo.....	60
Figura - 71. Comparativa Perfil Transversal Central.....	61
Figura - 72. Comparativa Perfil Transversal Central.....	61
Figura - 73. Comparativa Perfil Transversal Derecho.....	62
Figura - 74. Comparativa Perfil Transversal Derecho.....	62
Figura - 75. Variación Batimetría Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha) Rojo indica erosión, azul sedimentación.....	63
Figura - 76. Comparativa Variación Batimetría.....	64
Figura - 77. Comparativa Velocidad. Bajamar.....	65
Figura - 78. Comparativa Velocidad. Bajamar. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha).....	65
Figura - 79. Comparativa Velocidad. Nivel Medio.....	66
Figura - 80. Comparativa Velocidad. Nivel Medio. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha).....	66
Figura - 81. Comparativa Velocidad. Pleamar.....	67
Figura - 82. Comparativa Velocidad. Pleamar. Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha).....	67
Figura - 83. Comparativa Water Level. Pleamar.....	68
Figura - 84. Comparativa Water Level. Pleamar.....	68

1. Introducción

En los últimos años, el surf se ha convertido en uno de los deportes acuáticos más practicados a lo largo de las costas de los cinco continentes; con un considerable aumento de personas dispuestas a experimentar la sensación de sobrevolar distintas olas con características muy diversas.

Es tal el auge de dicho deporte que, en los Juegos Olímpicos de Tokio 2020, ha conseguido hacerse por primera vez un hueco entre los deportes más populares al cumplir el requisito de “ser un deporte ampliamente practicado en un mínimo de 75 países y 4 continentes por hombres, y un mínimo de 40 países y 3 continentes por mujeres”.

A pesar de la gran afluencia de personas dispuestas a practicarlo, no es posible su disfrute en todas y cada una de las playas que constituyen las costas mundiales, ya que éstas deben presentar una serie de características específicas para que las olas que se propagan hacia la costa puedan considerarse como surfeables.

Las principales características que describen los oleajes y permiten identificar si éstos son surfeables o no son las siguientes:

- Altura de ola en rotura: altura máxima que alcanza la ola antes de romper próxima a la costa debido al rozamiento con la batimetría del fondo.
- Peel angle: ángulo existente en la línea de rotura (estela de ola rota) y el frente de onda (línea tangente a la cresta de la ola en el punto de rotura).
- Intensidad y tipo de rotura de la ola: las cuales viene determinadas por la batimetría, pudiendo diferenciarse los siguientes tipos de rotura: spilling, plunging, collapsing y surging.
- Longitud de sección de la ola: como consecuencia del oleaje irregular y una batimetría también irregular, la rotura de la ola se produce en tramos o secciones. Dicho cambio de secciones a lo largo de la cresta de la ola es lo que produce un mayor interés entre los surfistas.

Todas estas características dependen casi exclusivamente de la batimetría existente, es decir, de la forma y profundidad que presenta el fondo marino; de manera que la modificación de éste permite variar las características anteriormente mencionadas y, consecuentemente, la conversión de olas no surfeables en surfeables.

Esta variación de la batimetría se lleva a cabo mediante la adición de material de aportación, de características determinadas y con una geometría específica; lo que se conoce como arrecife artificial.

El objetivo es que dichas estructuras artificiales se parezcan lo más posible a los arrecifes naturales existentes con características excelentes para la generación de oleaje clasificado como surfeable.

Entre las mejores playas del mundo para la práctica de este deporte se encuentran Waimea (Hawái), Goldcoast (Australia) y Lagundri Bay (Indonesia); aunque en el territorio nacional también se localizan magníficas playas como son Mundaka (Vizcaya), Playa de Somo (Cantabria) y Playa de Rodiles (Asturias), entre otras.

En lo referente a las playas que cuentan con la presencia de arrecifes artificiales, caben destacar El Segundo (California), Cable Beach (Australia) y Monsoon (India). Si nos centramos ahora en nuestro país, no se localizan arrecifes artificiales con objeto de mejorar las condiciones necesarias para la práctica de surf; sino que éstos se han diseñado principalmente para la atracción de peces, tanto para la pesca, como para la práctica de buceo. Entre los existentes en España, hay que destacar los presentes en la costa valenciana (playa de La Malvarrosa), en las Islas Baleares y en las Islas Canarias.

Además, la existencia de estas estructuras artificiales no sólo modifica las características de los oleajes que se propagan hacia la costa, sino también la morfología litoral; produciéndose zonas de erosión/sedimentación y variando la cota de inundación del emplazamiento donde se ha proyectado el arrecife artificial.

Múltiples han sido los estudios llevados a cabo por diversos autores sobre como diseñar un arrecife artificial lo óptimo posible; atendiendo, por un lado, al aumento del número de olas surfeables y, por otro, a la protección de las costas. Entre ellos, se destaca: Neves (2006), Black et al (2009) y Mendonça et al (2012). Todos ellos, han tenido en cuenta aspectos hidrodinámicos a la hora de realizar sus estudios, aunque, el transporte de sedimentos, y por tanto la morfología, ha recibido mucha menos atención.

La variación de la morfología litoral como consecuencia de la presencia de un arrecife artificial, atendiendo al transporte de sedimentos, será el objeto principal del presente Trabajo Fin de Máster.

2. Objetivos

El objeto general del presente Trabajo Fin de Máster es el estudio numérico de las distintas afecciones que se pueden producir en las costas de Conil de la Frontera (Cádiz) tras la construcción de un arrecife artificial de características idóneas para la práctica de surf en dicho emplazamiento. Para ello, se realizará una comparativa entre un escenario 0, en el cual no existe aún dicho arrecife, y un escenario 1, tras la construcción de éste; analizándose parámetros como la erosión o sedimentación en la línea de costa (transporte de sedimentos), altura de la cota de inundación, corrientes (campos de velocidad) y variación del nivel medio, entre otros. De esta manera, se podrán analizar tanto los efectos en la hidrodinámica como en la morfología de la presenta de estas estructuras.

Para ello, se empleará el modelo numérico Delft3D, el cual presenta 2 módulos acoplados: Wave y Flow. Con el primero de ellos se realizará la propagación del oleaje desde aguas indefinidas hasta la costa a partir del oleaje incidente y del viento que se introducirán como condiciones de contorno. El módulo Flow permite el estudio del campo de velocidades (corrientes), niveles medio del mar, transporte de sedimentos (tanto longitudinal como transversal) y cambios en la morfología de la franja litoral.

La determinación del arrecife que permite obtener el mayor número de horas al año con olas potencialmente surfables fue objeto de un Trabajo Fin de Máster previo¹, por lo que está fuera del objeto de este Trabajo Fin de Máster. Por tanto, para el estudio de las consecuencias tomaremos dicha solución propuesta y partir de ella realizaremos los estudios pertinentes.

Tras la realización de las simulaciones numéricas expuestas anteriormente, se llevará a cabo un análisis de los resultados obtenidos centrándonos en la comprobación de si dicho arrecife solución tiene un efecto positivo para la playa de Conil de la Frontera.

Para la realización de los objetos principales de estudio del presente Trabajo Fin de Máster se llevarán a cabo los siguientes objetivos específicos:

- Identificación de la mejor solución de arrecife para la práctica de surf. El cálculo de ésta está fuera del objeto del presente trabajo como ya se ha mencionado anteriormente.
- Descripción de la zona de estudio: emplazamiento, batimetría, clima marítimo, etc.
- Implementación de un modelo numérico hidro-morfodinámico avanzado que permita la simulación de los principales procesos a tener en cuenta.
- Análisis comparativo de la solución obtenidas en cada escenario en términos de hidrodinámica y morfodinámica.
- Conclusiones y elaboración de recomendaciones.

¹ José María Tortolero Jara. Diseño y optimización de arrecifes artificiales para la práctica de surf (Trabajo Fin de Máster). Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla. 2017.

3. Arrecife artificial

A lo largo del presente apartado se desarrolla, a modo de resumen, el arrecife artificial solución del Trabajo Fin de Máster de José María Tortolero Jara (Diseño y optimización de arrecifes artificiales para la práctica de surf. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla. 2017), con objeto de describir el arrecife artificial empleado a lo largo del presente Trabajo Fin de Máster; ya que, como ha sido expuesto en apartados anteriores, el diseño de éste está fuera del objeto del mismo.

En primer lugar, se determinó la posición del arrecife artificial atendiendo al criterio de diversos autores; destacando a Ranasinghe et al (2006). Así mismo, la punta de éste se situó a una distancia aproximada de 220 metros desde la línea de costa; distancia que, a priori, permite la acreción de la playa tras el arrecife.

Respecto a la forma del arrecife, lo importante es conseguir que ésta se parezca lo más posible a los arrecifes naturales existentes en las mejores playas para la práctica del surf. Es por ello, que la forma de éste finalmente adoptada ha sido de delta con taludes que simulan el esquema de niveles múltiples.

En lo referente al ángulo de apertura de las aspas del arrecife, Voorder (2009) determinó que ángulos del orden de 66 grados, originaban olas idóneas para surfistas no expertos, es decir, amateur – intermedios; tanto en situación de tormenta como en condiciones climáticas normales.

A la hora de determinar la profundidad del arrecife (distancia entre la meseta y la superficie del agua), hay que tener en cuenta dos aspectos claves:

- Debe ser lo suficientemente somero para que el oleaje rompa en el arrecife.
- Debe ser lo suficientemente profundo para asegurar la seguridad de los surfistas.

De esta forma, la profundidad establecida ha sido 1.5 metros respecto al nivel medio del mar (NMM).

Por otro lado, la altura del arrecife, es decir, la distancia vertical entre el pie y la cabeza del talud del arrecife es de 3.2 metros.

El último aspecto por definir para el diseño de la geometría del arrecife artificial proyectado es el perfil de éste. Autores como Hearing (2006) recomiendan perfiles con forma convexa, con pendientes variables desde 1:5 en el pie del talud hasta 1:20 en la cabeza del mismo.

En la imagen adjunta, se muestra el perfil del arrecife de estudio; tomándose como cota 0 la meseta de dicho arrecife.

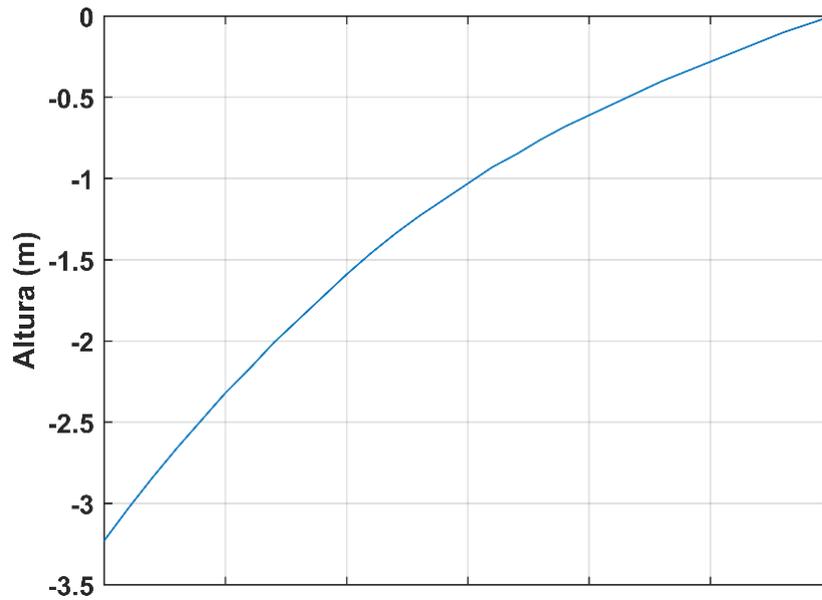


Figura - 1. Perfil Cóncavo Arrecife Artificial

Finalmente, queda por definir la orientación que adoptará dicho arrecife. Como cita Voorde et al (2008), el funcionamiento óptimo se produce cuando el ángulo de incidencia de la ola respecto al vértice sea 0 grados. Es por ello, que la cresta del arrecife se dispondrá perpendicular a la costa, es decir, coincidente con la dirección Oeste – Suroeste (WSW).

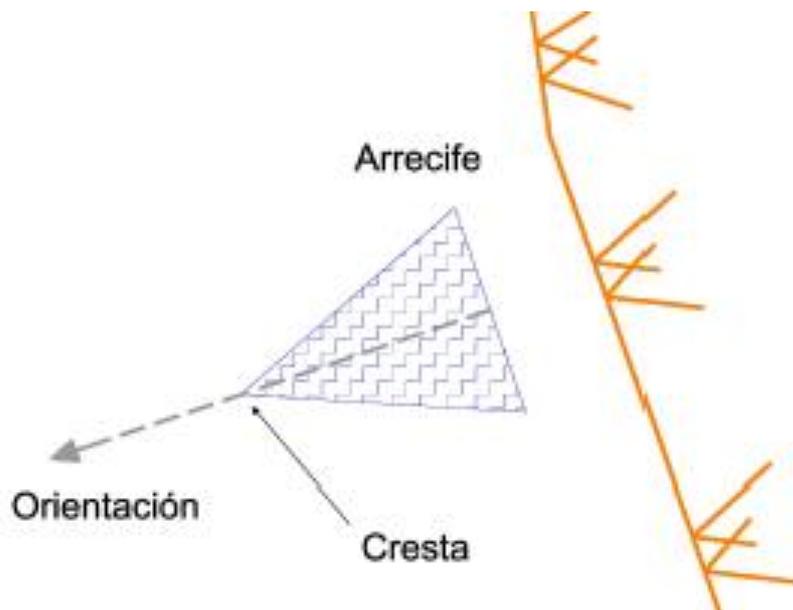


Figura - 2. Croquis Orientación Arrecife

En la imagen siguiente se muestra, a modo de resumen, el arrecife artificial en 3 dimensiones.

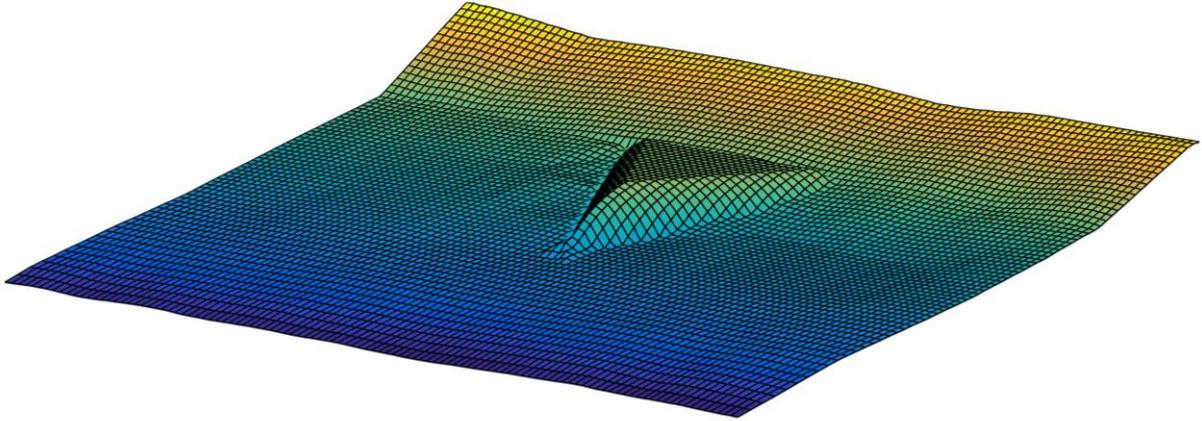


Figura - 3. Arrecife Artificial 3D

Nota aclaratoria: todo el contenido desarrollado a lo largo del presente apartado se ha obtenido directamente del Trabajo Fin de Máster de José María Tortolero Jara (Diseño y optimización de arrecifes artificiales para la práctica de surf. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla. 2017), es decir, tanto el contenido escrito como gráfico no es elaboración propia; ya que el objeto del presente apartado es únicamente describir el arrecife artificial diseñado por D. José María Tortolero Jara y empleado para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster.

4. Zona de estudio

A pesar de que las mejores playas para la práctica de este deporte en constante crecimiento se localizan en el norte de España, Andalucía no tiene nada que envidiar a la costa cantábrica. En la provincia de Cádiz se encuentran playas de reconocimiento internacional como son Los Lances (Tarifa), Caños de Meca (Barbate) o El Palmar donde la gran variabilidad de olas permite el disfrute tanto de los más amateur como de los más profesionales.

Próxima a las playas mencionadas se localiza la playa de Conil de la Frontera, la cual también cuenta con un gran turismo (aunque menor que las playas anteriores) de personas en busca de olas que surfear.

El aumento del número de personas que practican el deporte del surf junto con el menor número de surfista que se desplazan a Conil para el disfrute del mar (en relación con playas como Los Lances, Caños de Meca o El Palmar) fueron aspectos clave a la hora de decidir el emplazamiento del arrecife artificial proyectado. Esto producirá un aumento del turismo en el municipio, así como de la economía de la zona.

Se recuerda nuevamente antes de proseguir con la descripción de la zona de estudio que la elección de ésta y el diseño del arrecife artificial están fuera del objeto del presente Trabajo Fin de Máster.

4.1 Localización de la zona de estudio

El arrecife artificial por analizar se localiza en el municipio gaditano de Conil de la Frontera (Andalucía) a unos 43 kilómetros de la capital de provincia, Cádiz. Las coordenadas geográficas del arrecife, en latitud y longitud son 36.274 y -6.096 grados, respectivamente.



Figura - 4. Localización de la Zona de Estudio

Conil de la Frontera, localizado al suroeste de la provincia entre los municipios de Chiclana y Vejer de la Frontera, presenta una extensión total de 87 km². La costa de Conil de la Frontera cuenta con una longitud de 14 km de playa, caracterizada por la existencia de cuantiosas calas en la zona norte, y amplias playas de arena fina, en la zona sur. La playa urbana, enfrente del pueblo de Conil, se caracteriza por el amplio frente litoral que la constituye; y es ahí donde se localiza el arrecife de estudio.

Así mismo, cuenta con una población aproximada de 22400 habitantes (año 2017). Es un municipio con un alto valor turístico cuya población se quintuplica en los meses estivales llegando a alcanzar los 100000 habitantes.

4.2 Datos de elevaciones

La batimetría, o lo que es lo mismo, la forma y profundidad que presenta el fondo marino, es uno de los aspectos más importantes, si no el que más, a la hora de realizar cualquier estudio en Ingeniería Marítima y Costera.

Los principales procesos de propagación del oleaje desde alta mar hacia la zona de rompiente, es decir, shoaling (reducción de la longitud de onda al acercarse la ola a la costa y, consecuentemente, aumento de la altura de la misma) y refracción (fenómeno por el cual el oleaje tiende a ponerse paralelo a la línea de costa), depende exclusivamente de la batimetría, es decir, de la variación del fondo marino desde la zona de generación del oleaje hasta la franja donde éste comienza a romper. Así mismo, la rotura del oleaje que llega a la costa depende también de la profundidad de éste; de manera que cuando la profundidad vaya disminuyendo conforme nos acercamos a la costa, los oleajes de mayor amplitud irán rompiendo progresivamente.

Por lo tanto, una batimetría precisa es de vital importancia a la hora de realizar un estudio en Ingeniería Marítima y Costera ya que, contra más exacta sea ésta, más fiables serán los resultados obtenidos tanto en la propagación del oleaje como en los cambios morfodinámicos que se pudieran producir.

La batimetría necesaria para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster ha sido facilitada en forma de fichero de texto, en el que se incluye, para cada punto (expresado en coordenadas UTM Huso 30), la profundidad de éste, y obtenida a partir de la ecobatimetría realizada por el Ministerio de Medio Ambiente en el año 2012, con una resolución de 10x10 metros en las zonas de hasta 50 metros de profundidad, y de la base de datos de EMODnet para las zonas de mayor profundidad. Para la topografía se ha utilizado el MDT de la Junta de Andalucía con resolución 10x10 metros. Todas las fuentes de datos se han referenciado sobre el nivel medio del mar (NMM) en la zona.

En la imagen siguiente se muestra la batimetría facilitada incluyéndose además la posición del arrecife artificial.

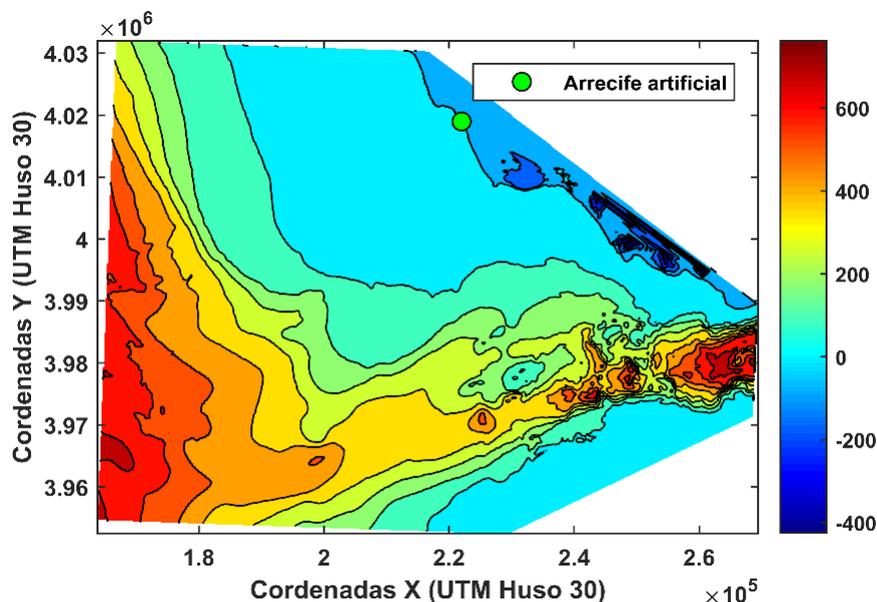


Figura - 5. Batimetría General de la Zona de Estudio

Para una mayor apreciación de la batimetría de la zona de zona de estudio, se ha hecho un zoom obteniéndose la imagen siguiente; mostrándose igualmente la posición del arrecife artificial.

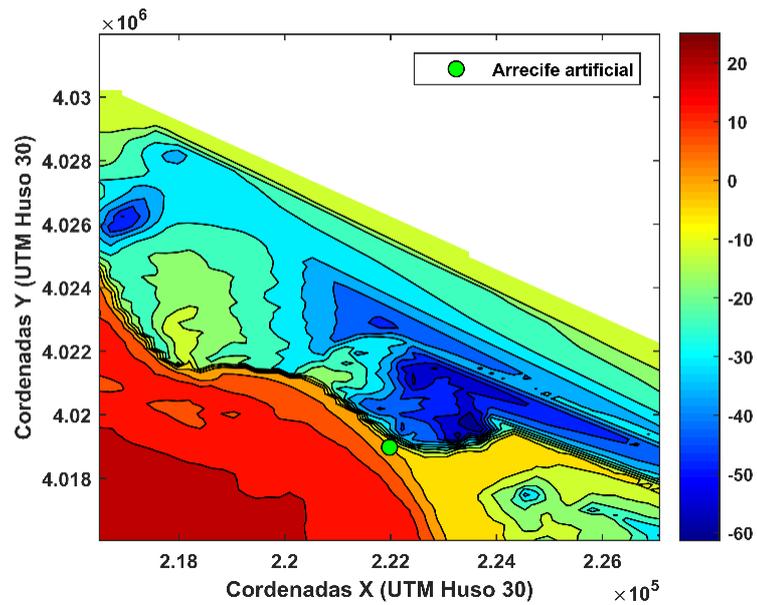


Figura - 6. Batimetría Específica de la Zona de Estudio

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, el objeto del presente Trabajo Fin de Máster es el estudio de las consecuencias de construir un arrecife artificial en la costa de Conil de la Frontera. Por tanto, serán necesarias dos batimetrías: una primera sin la presencia de dicho arrecife (Escenario 0) y otra con el arrecife proyectado (Escenario 1).

A continuación, se muestra en detalle la localización del arrecife de estudio y cómo la batimetría se ha visto modificada por la presencia de éste.

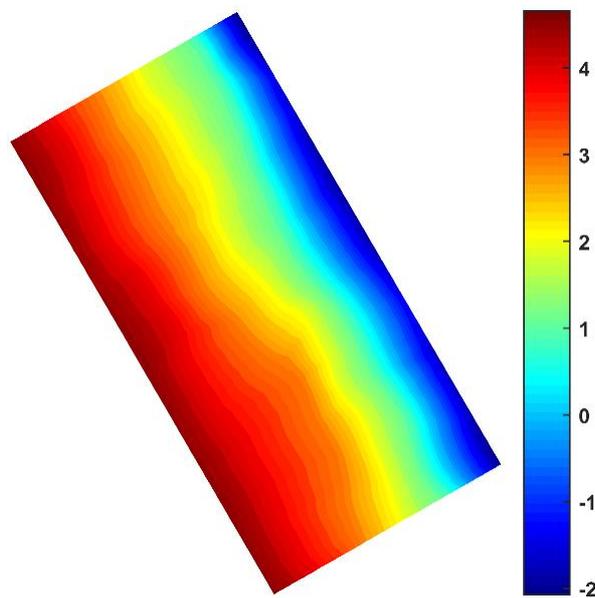


Figura - 7. Batimetría Escenario 0 (Sin Arrecife)

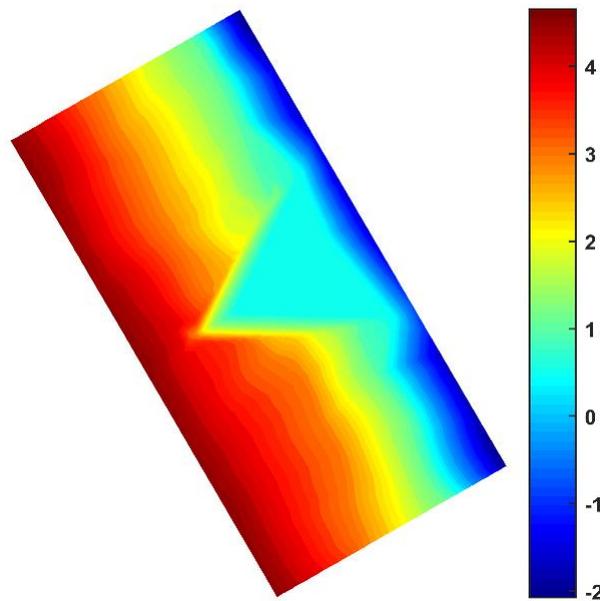


Figura - 8. Batimetría Escenario 1 (Con Arrecife)

Si comparamos ambas batimetrías, se puede observar que la construcción del arrecife artificial trae como consecuencia un retraso excesivo de la línea de costa; lo cual impide que se puedan realizar comparativas reales entre ambos escenarios. Es por ello por lo que la batimetría original del Escenario 1 (con arrecife) se ha visto modificada, la cual se muestra en la siguiente imagen.

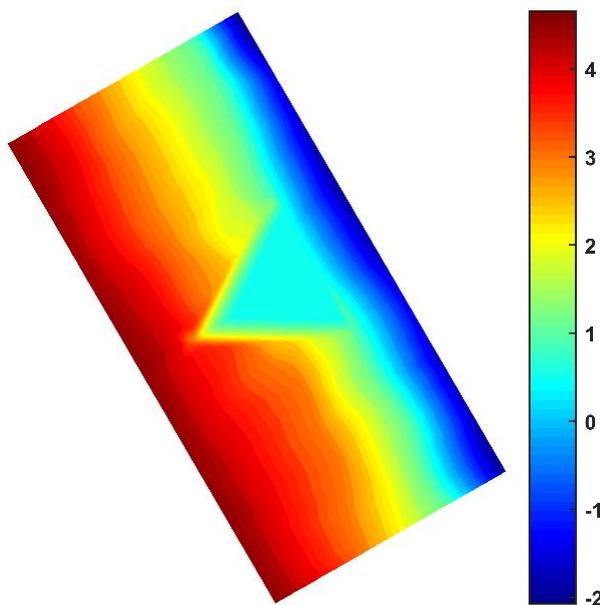


Figura - 9. Batimetría Escenario 1 (Con Arrecife) Modificada

La solución que se ha adoptado es la siguiente: a partir del punto de intersección entre la batimetría del Escenario 0 (sin arrecife) y el Escenario 1 (con arrecife), la batimetría de este último se ha reemplazado por la correspondiente al Escenario 0 (sin arrecife).

Mencionar finalmente que la batimetría se ha definido con signo positivo para profundidades encontradas bajo el nivel medio del mar (NMM), es decir, el fondo marino se ha caracterizado con cotas positivas, mientras que el terreno de costa emergido, con cotas negativas.

4.3 Variaciones del nivel del mar

La variación que sufre el nivel medio del mar (NMM) a lo largo del día tiene su origen en diversos factores muy diferentes; los cuales se clasifican en función de su periodo en variaciones a largo plazo y variaciones a corto

plazo.

La primera de ellas, es decir, las variaciones a largo plazo, tiene un efecto prácticamente despreciable en el nivel medio del mar, ya que el periodo de actuación de las mismas sobrepasan los años e incluso las décadas; produciendo un aumento de la amplitud de la onda propagada de apenas milímetros al año. Dentro de este grupo se engloban las variaciones producidas debido a las tendencias climáticas, así como las producidas por los campos gravitatorios de los cuerpos celestes (marea astronómica) más alejados de la Tierra.

Además, se ha despreciado el efecto que producen estos factores ya que la escala de tiempo en la que se lleva a cabo el estudio (evento) es muy inferior al periodo de actuación de los mismos.

Por otro lado, los factores que presentan un periodo de actuación clasificado como corto tiene un efecto mucho más significativo en la variación del nivel medio del mar; dando lugar variaciones de metros en apenas unas horas o incluso segundos. Dentro de este grupo se encuentran las variaciones producidas debido a los campos gravitatorios de los cuerpos celestes (marea astronómica) más próximos a la Tierra (sol y luna, principalmente), las producidas por las variaciones en la presión atmosférica, las ocasionadas por el efecto del viento soplando sobre la superficie del agua (principal generador del oleaje) y las originadas por la rotura del oleaje al llegar a la costa (setdown y setup). Estas tres últimas se clasifican dentro de la marea meteorológica.

4.3.1 Marea astronómica

La marea astronómica se define como “una variación del nivel del mar por efecto de la atracción por cuerpos celestes, es decir, oscilación del nivel del mar debido a la distorsión de la masa de agua oceánica provocada por el efecto combinado de los campos gravitatorios de la luna, el sol y la rotación de la tierra”².

Sin embargo, a pesar de que son el sol y la luna los causantes de las mayores variaciones del nivel medio del mar (NMM) debido a la marea astronómica, existen más de 390 componentes que producen dicho efecto, con periodos que oscilan entre 8 horas y 18.6 años; lo que hace necesario un registro de 19 años para una correcta caracterización de la marea astronómica en cualquier punto del planeta.

Para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster se han considerado únicamente las 13 componentes principales; las cuales se recogen en la tabla adjunta indicándose, para la zona de estudio, su periodo y amplitud, así como una breve descripción de las mismas.

Símbolo	Amplitud (cm)	Fase (°)	Periodo (h)	Descripción
M2	89.89	54.41	12.42	Lunar principal semidiurna
S2	32.96	78.87	12.00	Solar principal semidiurna
N2	19.14	37.67	12.66	Lunar elíptica mayor semidiurna
K2	8.97	77.01	11.97	Lunisolar declinacional semidiurna I
K1	5.11	50.92	23.93	Lunisolar declinacional diurna
O1	4.70	303.56	25.82	Lunar principal diurna
P1	1.45	44.53	24.07	Solar principal diurna
Q1	1.51	256.00	26.87	Lunar elíptica mayor diurna
MF	0.00	7.33	327.86	Quincenal lunar
MM	0.08	221.64	661.3	Mensual lunar
M4	1.66	154.35	6.21	Curta diurna
MS4	0.32	232.93	6.10	Curta diurna
MN4	0.51	68.02	6.27	Curta diurna

Tabla - 1. Armónicos de Marea Conil de la Frontera

² Variación del nivel del mar. Alejandro López Ruiz. Puertos y Costas. Universidad de Sevilla. 2018.

En la imagen siguiente se representa gráficamente los 13 armónicos de marea considerados teniendo en cuenta la amplitud de cada uno de ellos, así como su fase. La línea negra recoge el sumatorio de éstos para cada instante de tiempo.

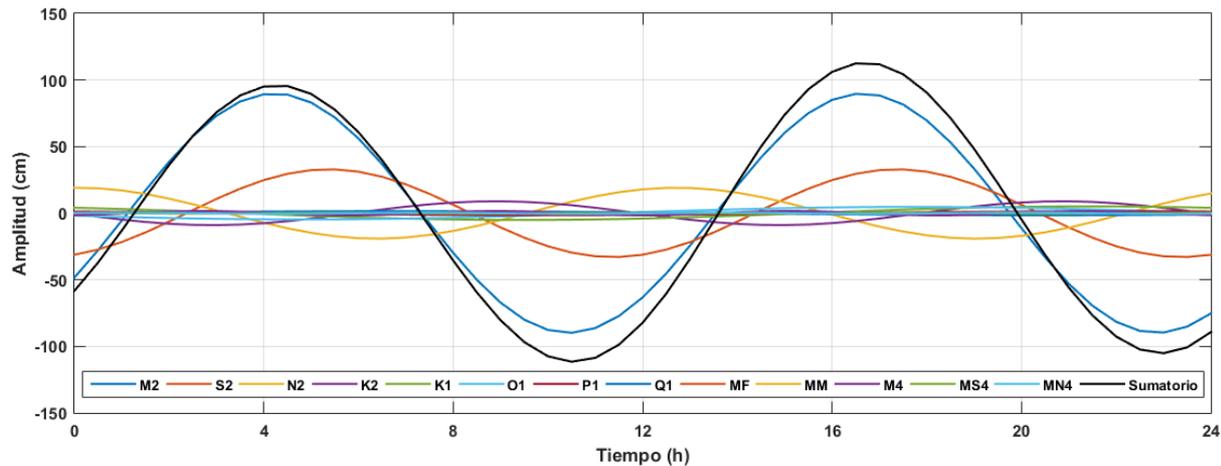


Figura - 10. Armónicos de Marea Conil de la Frontera

La formulación empleada para llevar a cabo la representación anterior es la que se muestra a continuación.

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{n=1}^k a_n * \cos(\omega_n * t + \phi_n)$$

Donde:

- a_0 : nivel medio.
- a_n : amplitud de cada componente de marea n.
- ω_n : frecuencia de cada componente de marea n.
- ϕ_n : fase de cada componente de marea n.

Dado que dicha representación sólo busca mostrar la variación que se produce en el nivel medio del mar (NMM) debida a la marea astronómica, éste se ha considerado como 0, es decir, $a_0 = 0$.

Se puede observar en la representación gráfica anterior como son la luna y el sol los que producen una variación de nivel medio (NMM) mayor en comparación con el resto de los armónicos estudiados.

4.3.2 Marea meteorológica

La marea meteorológica se define como “respuesta del nivel del mar a las tensiones tangenciales inducidas por el viento (transmitidas por viscosidad al interior del fluido), a los esfuerzos normales generados por campos de presión atmosférica y las variaciones del nivel medio del mar cerca de la costa debidas a la rotura del oleaje”³.

La importancia de tener un registro amplio y extenso de los distintos oleajes, campos de vientos y variaciones de presión atmosférica que se han producido durante años en la zona de estudio reside en la alta probabilidad de que tales tormentas se vuelvan a producir en el futuro. Esto permite, empleando modelos numéricos avanzados (Delft3D entre otros), tener una idea muy aproximada de las consecuencias que temporales de características similares a los pasados pueden llegar a producir en la zona a analizar: inundaciones costeras, variaciones en la morfología litoral, cambios en las velocidades de las corrientes, etc.

La serie de datos históricos se ha obtenido del punto SIMAR 6018024 facilitado por Puertos del Estado (Ministerio de Fomento), el cual se encuentra en aguas indefinidas; de forma que el oleaje no se ha visto afectado por la batimetría existente.

El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes

³ Variación del nivel del mar. Alejandro López Ruiz. Puertos y Costas. Universidad de Sevilla. 2018.

de modelado numérico. Son, por tanto, datos sintéticos y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR-44 y WANA. El objetivo es el de poder ofrecer series temporales más extensas en el tiempo y actualizados diariamente. De este modo, el conjunto SIMAR ofrece información desde el año 1958 hasta la actualidad.

Sin embargo, el archivo de datos empleados para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster cuenta únicamente con una serie histórica que abarca los años 2005 – 2016, ambos inclusive, con toma de muestra horaria; serie suficientemente extensa para el objeto del mismo.

A continuación, se muestra en la imagen adjunta la localización del punto SIMAR empleado identificándose, además, el arrecife artificial de estudio.

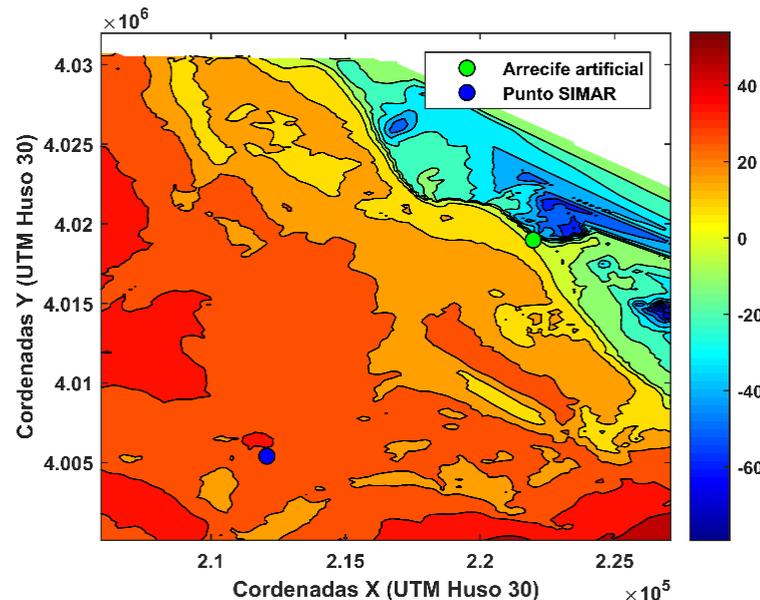


Figura - 11. Localización punto SIMAR 6018024

Como ya se ha mencionado anteriormente, los factores que constituyen la marea astronómica son los siguientes:

- Viento.
- Oleaje: aunque realmente es consecuencia del primero, entre otros, se tratará como un factor independiente.
- Presión atmosférica.
- Rotura del oleaje cerca de la costa (setdown y setup).

A continuación, se procederá al desarrollo de los mismo.

4.3.2.1 Viento

El efecto que tiene el viento sobre el nivel medio del mar, aunque constante, no siempre llega a producir una variación apreciable del mismo. Esta variación se produce debido al apilamiento del agua como consecuencia del esfuerzo que el viento ejerce sobre la superficie del agua.

Esta intensidad depende principalmente de:

- Velocidad del viento cerca de la superficie del agua.
- Longitud del fetch.

Los datos de viento en lo referente a velocidad y dirección se han obtenido directamente del punto SIMAR, mostrándose dichas variables en las imágenes siguientes.

En primer lugar, se ilustra el registro de velocidad del viento del cual se dispone, indicándose para cada fecha la velocidad del mismo en metros por segundos.

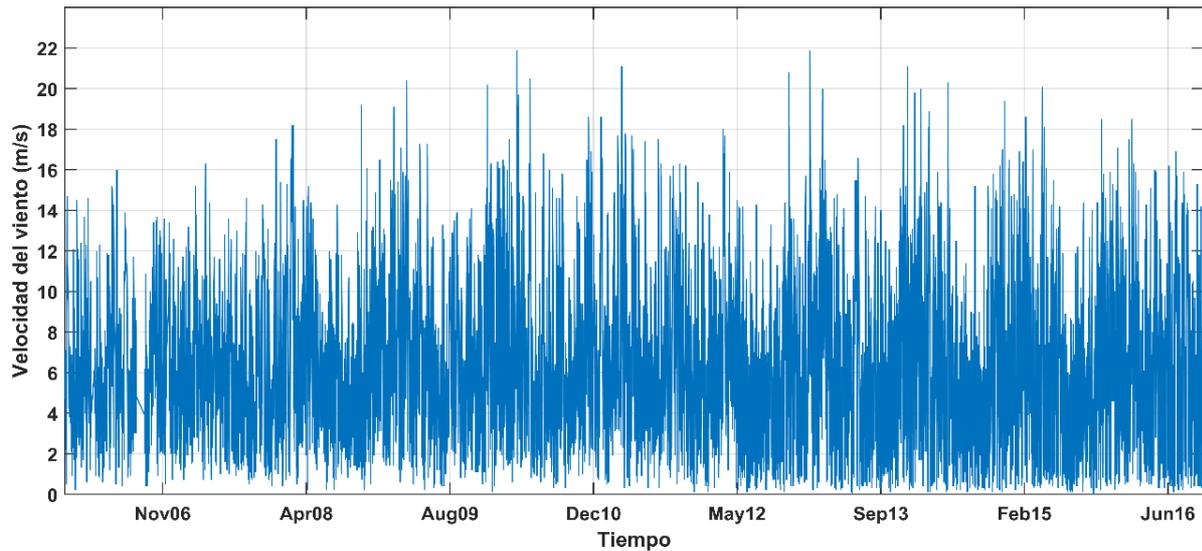


Figura - 12. Serie Temporal Velocidad del Viento

A continuación, en el diagrama de barras adjunto se recoge la frecuencia con la que se produce las velocidades de viento anteriormente mostrada.

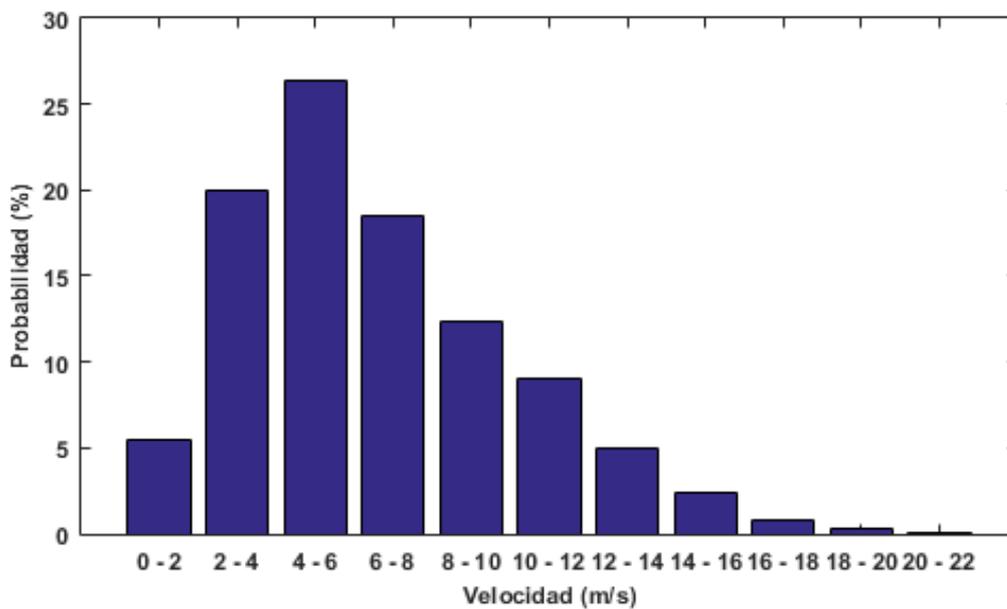


Figura - 13. Probabilidad Velocidad del Viento

Finalmente, mediante una rosa de viento se puede observar, para cada una de las direcciones del viento, la probabilidad de que se produzcan las velocidades anteriormente obtenidas, así como la probabilidad de producirse éstas. Es decir, una rosa de viento permite relacionar las tres variables: velocidad, dirección y probabilidad de ocurrencia.

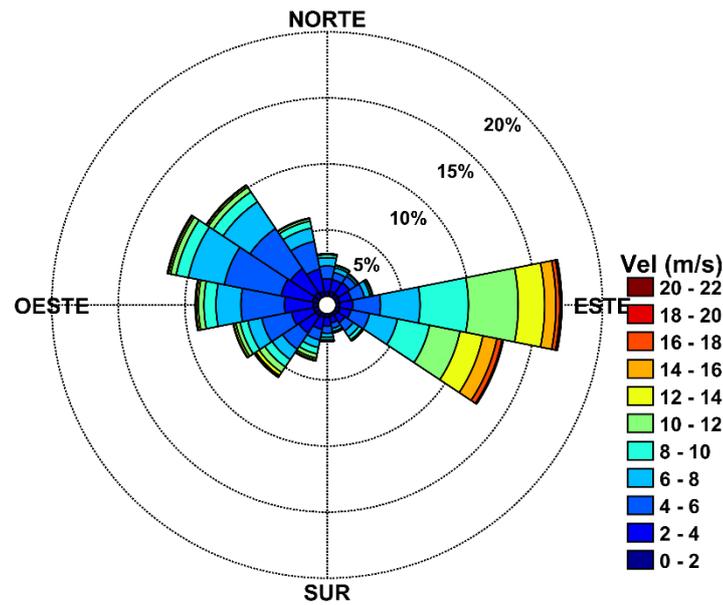


Figura - 14. Rosa de Viento

Atendiendo a los tres gráficos anteriores, se concluye que la velocidad del viento oscila entre 0 y 22 metros por segundos, donde el rango de velocidades con mayor probabilidad de ocurrencia (aproximadamente un 27%) oscila entre los 4 y 6 metros por segundos. En lo referente a la dirección del viento, es el proveniente del Este el predominante al presentar una mayor probabilidad de ocurrencia (superior al 15%); es en esta dirección donde, además, se producen las mayores rachas de viento.

Centrándonos ahora en la zona de estudio, ésta se encuentra orientada en dirección Oeste – Suroeste (WSW). Por tanto, es el viento soplando desde dicha dirección el que produce unas consecuencias más desfavorables sobre la misma. Es por ello, que se estudiará el rango de viento comprendido entre la dirección Oeste (W) y la dirección Suroeste (SW) más 10 grados de margen, es decir, se analizará el viento cuya dirección esté comprendida entre los grados 215 y 280; siendo 180 el viento soplando desde el Sur (S) y 270 soplando desde el Oeste (W). La probabilidad de ocurrencia en este rango de direcciones, según la rosa de viento de la imagen anterior, está comprendida entre un 5 y un 10 %; siendo algo superior al 20% si suman las tres probabilidades anteriores).

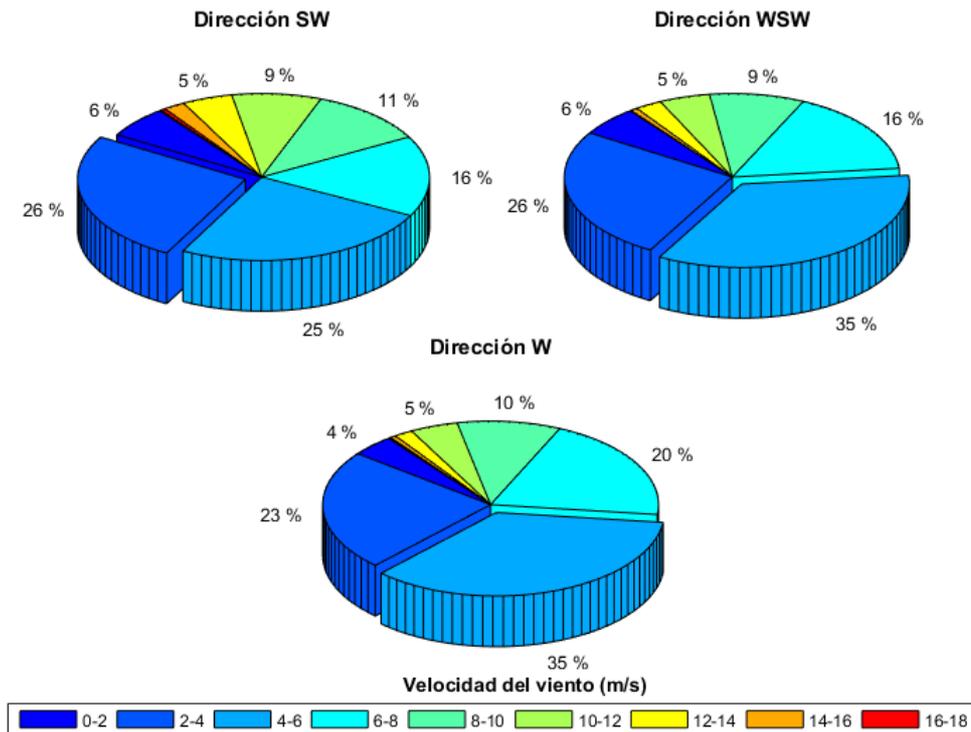


Figura - 15. Análisis del Viento en las Direcciones de Estudio

Como se recoge en los diagramas de tartas anteriores, los rangos de velocidades con una mayor probabilidad de ocurrencia, para las tres direcciones de estudio, son los comprendido entre 2 – 4 y 4 – 6 metros por segundos; siendo mayor la probabilidad de producirse un viento con rachas comprendida entre los 4 y 6 metros por segundo en la dirección Oeste – Suroeste (WSW) y en la dirección Oeste (W) (35 % en ambos casos) frente a vientos de 2 – 4 metros por segundos (26 y 23 %, respectivamente). Para la dirección Suroeste (SW) la probabilidad de ocurrencia para los dos rangos de velocidades mencionados es prácticamente la misma (26 % y 25 % para velocidades de 2 - 4 y 4 - 6 metros por segundo, respectivamente).

Así mismo, para una mejor visualización de los resultados, no se ha incluido la etiqueta en aquellos rangos de velocidades cuya probabilidad de ocurrencia es inferior al 4 %, aunque sí han sido representados en los diagramas de tartas anteriores.

4.3.2.2 Oleaje

El principal fenómeno que produce variaciones significativas en el nivel medio del mar (NMM), aunque ocasionado por el efecto del viento, es el oleaje que, tras generarse en la zona de tormentas, se va propagando desde aguas indefinidas hasta la costa; produciendo variaciones del nivel medio del mar (NMM) de centímetros a metros en cortos periodos de tiempo (horas, minutos o incluso segundos).

Los datos de oleaje sobre altura de ola y dirección del mismo se han obtenido directamente del punto SIMAR 6018024, estudiándose éstos de forma gráfica en las imágenes siguiente.

En primer lugar, se grafica un registro de las alturas de ola que se han ido produciendo en el periodo de tiempo del cual se disponen datos; indicándose para cada fecha la altura de ola en metros.

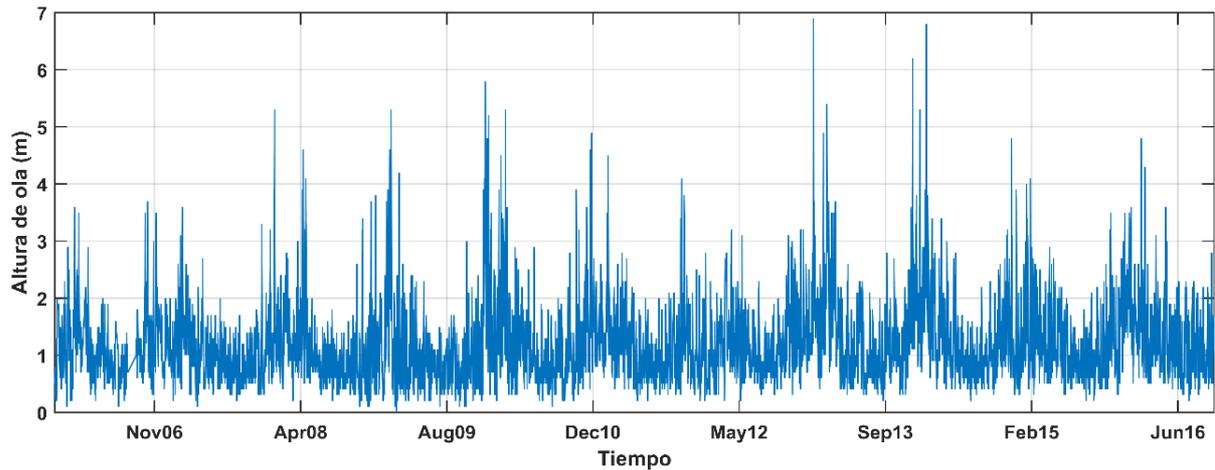


Figura - 16. Serie Temporal Altura de Ola

Se muestra a continuación, mediante un diagrama de barra, la frecuencia con la que se producen las alturas de ola anteriormente ilustradas.

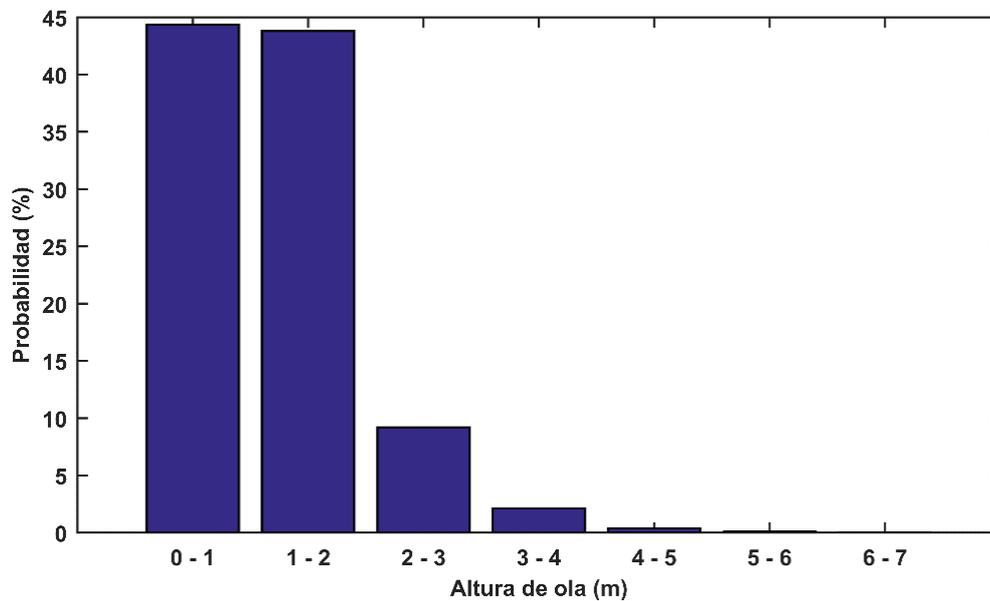


Figura - 17. Probabilidad Altura de Ola

Por último, la rosa de oleaje que se muestra en la imagen siguiente permite obtener, para cada dirección, la probabilidad de que se produzcan las alturas de ola anteriormente obtenidas, así como la probabilidad total de producirse dichas direcciones. Por tanto, a través de una rosa de oleaje se relacionan las tres variables: altura de ola, dirección y probabilidad de ocurrencia.

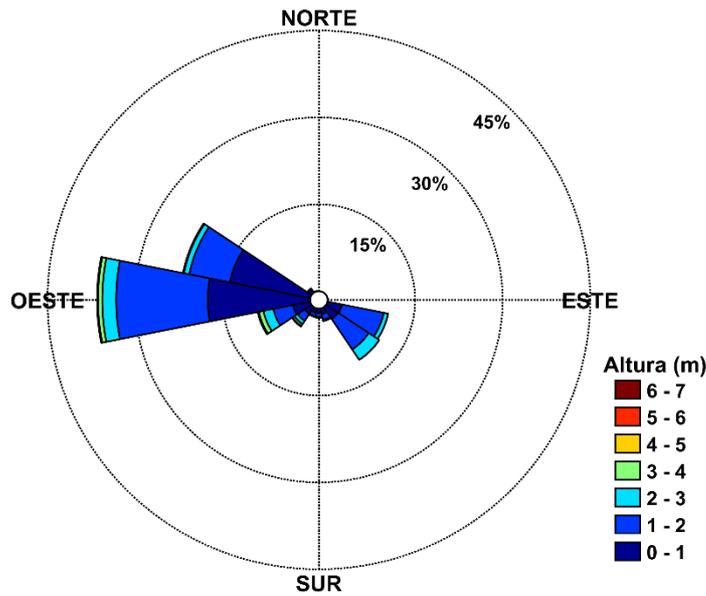


Figura - 18. Rosa de Olaje

Tras analizar los tres gráficos anteriores, se concluye que la altura de ola oscila entre 0 y 7 metros, donde los rangos de alturas con mayor probabilidad de ocurrencia (alcanzando cada uno de ellos casi el 45 %) son de 0 a 1 y de 1 a 2 metros de altura. En cuanto a las direcciones de oleaje, se puede observar que es la dirección Oeste (W) la predominante al presentar una probabilidad de ocurrencia mayor (superior al 30%). Se observa también que, en dicha dirección, son los oleajes con alturas comprendida entre 0 – 2 metros los que se producen con una mayor frecuencia, así como los que presentan una mayor altura de oleaje; aunque de probabilidad ínfima.

A continuación, se va a estudiar el oleaje en las direcciones que tienen una mayor incidencia sobre la zona de estudio: Suroeste (SW), Oeste – Suroeste (WSW) y Oeste (W); las cuales ya han sido explicadas en apartados anteriores.

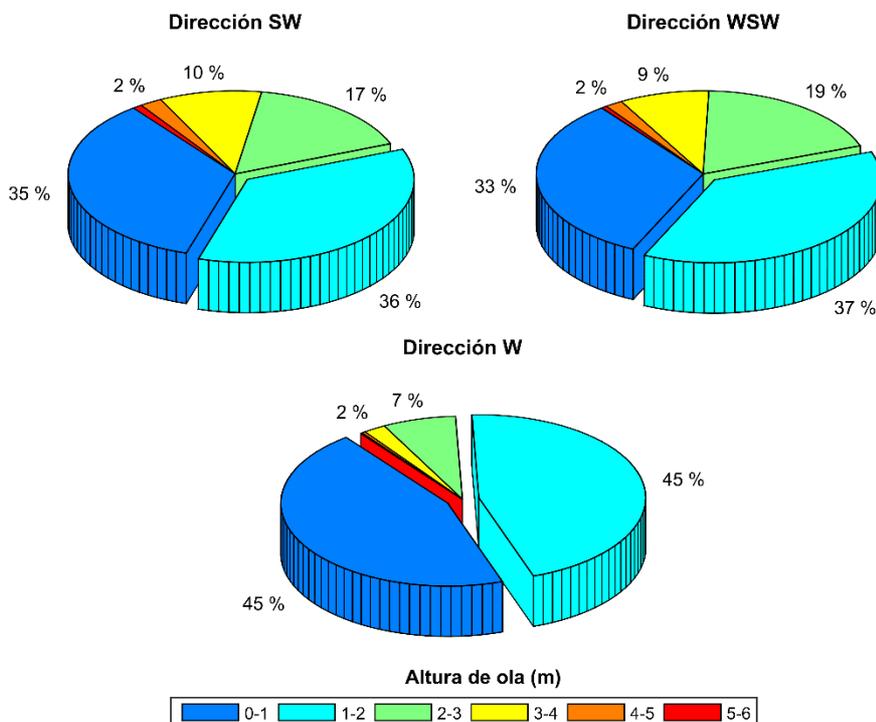


Figura - 19. Análisis del Oleaje en las Direcciones de Estudio

Como se observa en los diagramas de tartas anteriores, los rangos de altura de ola que presentan una mayor probabilidad de ocurrencia, en las tres direcciones analizadas, son los comprendido entre 0 – 1 y 1 – 2 metros;

siendo ésta la misma para ambos rangos, a excepción de la dirección Oeste – Suroeste (WSW) donde alturas de ola de 1 – 2 metros se presentan con una frecuencia ligeramente superior al rango inferior, es decir, 0 – 1 metros; con una probabilidad del 37 y 33 %, respectivamente.

Así mismo, para una mejor visualización de los resultados, no se ha incluido la etiqueta en aquellos rangos de altura de ola cuya probabilidad de ocurrencia es inferior al 2 %, aunque sí han sido representados en los diagramas de tartas anteriores.

4.3.2.3 Presión atmosférica

Cambios en la presión atmosférica implica modificaciones en el empuje que ésta ejerce sobre la superficie del agua y, consecuentemente, variaciones en el nivel medio del mar (NMM). De esta forma, las bajas presiones producen un aumento del nivel medio y viceversa, es decir, las altas presiones una disminución del mismo.

Para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster se ha despreciado el efecto que produce la variación de la presión atmosférica sobre el nivel medio del mar (NMM) dada la complejidad de introducir ésta en el modelo numérico de cálculo.

4.3.2.4 Rotura del oleaje cerca de la costa (setdown y setup)

Conforme el oleaje se va propagando desde aguas indefinidas a aguas someras, éste comienza poco a poco a sentir el fondo hasta que, debido al rozamiento que le produce la batimetría acaba rompiendo cerca de la costa.

A consecuencia de la rotura del oleaje y el consecuente desequilibrio en las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento, el nivel medio describe una curva que decrece hasta alcanzar un valor mínimo en la franja de rotura (setdown), para posteriormente crecer de forma lineal conforme nos acercamos a la costa (setup).

Esta variación del nivel medio del mar (NMM) como consecuencia de la rotura del oleaje cerca de la costa es obtenida por el modelo numérico.

5. Metodología

A lo largo del presente apartado, se llevará a cabo una explicación detallada de la metodología seguida durante el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster con el fin de alcanzar el objeto principal de éste; el cual consiste en un análisis de las consecuencias que puede acarrear la construcción de un arrecife artificial en la playa de Conil de la Frontera, en lo referente a la morfología litoral, al transporte de sedimento y a los cambios en las velocidades de la corriente, entre otras.

Para ello, será necesario definir 2 escenarios: un primer escenario, denominado Escenario 0, el cual no cuenta aún con la presencia del arrecife proyectado, y un segundo escenario, Escenario 1, una vez el arrecife artificial ha sido construido.

Ambos escenarios, como ya ha sido explicado en apartados anteriores, se modelarán mediante el software informático de cálculo Delft3D; el cual permite simular la propagación del oleaje desde aguas indefinida hasta aguas someras y, posteriormente, tras resolver la simulación, ofrece como resultados las variables objeto del estudio.

Así mismo, el modelo numérico Delft3D cuenta con 2 módulos acoplados (Wave y Flow), dando lugar a simulaciones más precisas ya que permite considerar parámetros asociados tanto a la hidrodinámica como al oleaje; los cuales se explicarán en apartados posteriores.

A continuación, se expondrá en primer lugar los escenarios de estudio y, posteriormente, se procederá a describir tanto del modelo numérico empleado como la implementación del mismo.

5.1 Escenarios de estudio: Escenario 0 y Escenario 1

Para poder realizar un estudio sobre las consecuencias va a tener la construcción de un arrecife artificial en una zona concreta de la costa, es precisa la existencia de 2 escenarios que comparar: un escenario 0 o escenario inicial, en el cual la batimetría no ha sufrido ninguna modificación debido a la construcción del arrecife, y un escenario 1 o escenario final, donde la batimetría ya representa el arrecife artificial proyectado.

Así mismo, para que el estudio tenga sentido, sobre ambos escenarios se deben aplicar las mismas condiciones de contorno, es decir, los dos escenarios se deben simular bajo las mismas condiciones de oleaje, viento y presión atmosférica (en el caso que esta última también se hubiese tenido en cuenta). En consecuencia, ambos escenarios se simularán bajo las condiciones atmosféricas existentes en una misma fecha.

Por tanto, como conclusión, los dos escenarios de estudio presentan las mismas características a la hora de modelarlos (las cuales se definirán en detalle en apartados posteriores), a excepción de la batimetría; mostrándose a continuación la batimetría existente en la zona donde se localiza el arrecife artificial.

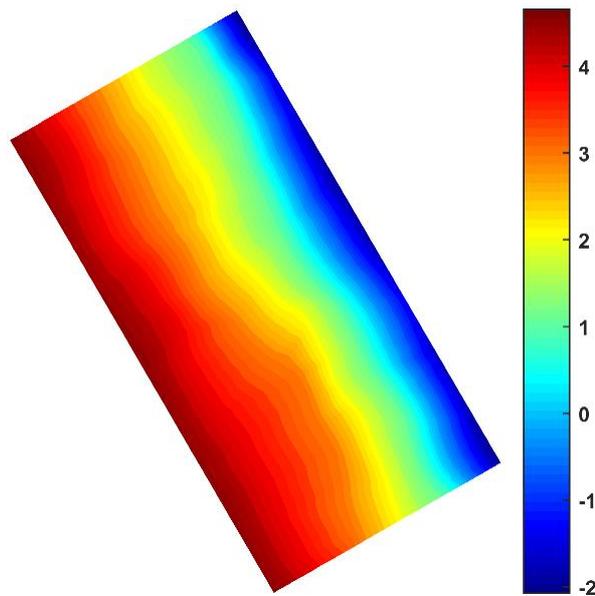


Figura - 20. Batimetría Escenario 0 (Sin Arrecife)

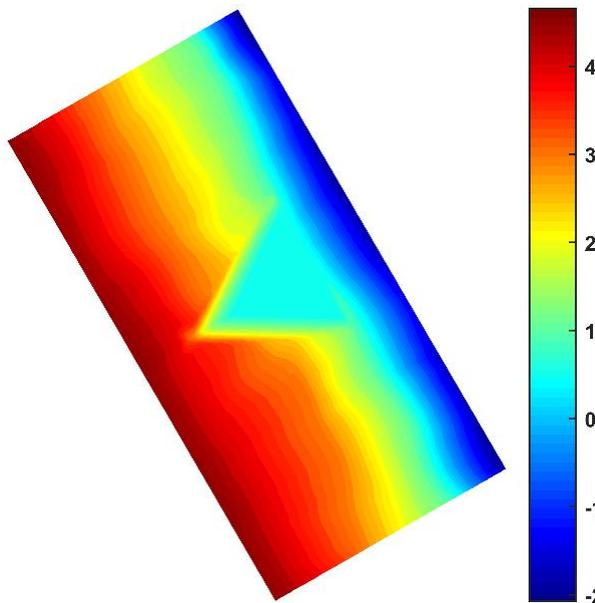


Figura - 21. Batimetría Escenario 1 (Con Arrecife) Modificada

5.2 Modelo numérico de cálculo: Delft3D

El modelo numérico de cálculo empleado para alcanzar los objetivos del presente Trabajo Fin de Máster es Delft3D; desarrollado por la Universidad Tecnológica de Delft (TU Delft, Países Bajos).

Este modelo permite tanto el estudio de la propagación del oleaje, desde aguas indefinidas hasta aguas someras, como el estudio de la hidrodinámica litoral; teniendo en cuenta, además, procesos físicos de propagación de energía, refracción, reflexión, etc.

Entre todos los módulos que contiene Delft3D, para el desarrollo del presente documento se emplearán, de forma acoplada, los módulos Wave y Flow. Con el primero de ellos se realizará la propagación del oleaje desde aguas indefinidas hasta la costa a partir del oleaje incidente y del viento que se introducirán como condiciones de contorno. El módulo Flow permite el estudio del campo de velocidades (corrientes), niveles medio del mar y transporte de sedimentos (tanto longitudinal como transversal).

5.2.1 Módulo Wave

El módulo Wave es el encargado de simular la propagación del oleaje desde aguas indefinidas hasta aguas someras; mediante la implementación del modelo Swan (Simulation Waves Nearshore), el cual permite obtener las distintas características del oleaje cerca de la costa incluido el aumento del nivel como consecuencia de la rotura del oleaje (setup).

Con este módulo se consiguen simular los distintos procesos que se recogen en el listado adjunto:

- Asomeramiento y refracción del oleaje durante su propagación sobre un fondo de profundidad variable y/o presencia de corrientes.
- Generación de oleaje producido por el viento.
- Disipación de energía por whitecapping (descrestamiento), rotura por profundidad y fricción con el fondo (mediante 3 formulaciones distintas).
- Interacciones no lineales ola – ola y ola – corriente.
- Difracción.
- Transmisión, bloqueo o reflexión del oleaje en presencia de obstáculos.

En Swan, el oleaje se describe mediante el espectro bidimensional de densidad de acción $N(\sigma, \theta)$ en lugar del espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$. Es por ello, que la evolución de la energía del oleaje se describe por la ecuación espectral de balance de la acción, $N(\sigma, \theta)$, a partir de condiciones arbitrarias de corrientes, viento y batimetría; siendo σ la frecuencia y θ la dirección de propagación. Esto es debido a que, en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no.⁴

La densidad de acción es igual a la densidad de energía dividida por la frecuencia relativa:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

En su forma general, la ecuación de conservación de la acción se presenta de la siguiente forma:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}$$

El primer término de la izquierda representa la evolución local a lo largo del tiempo de la densidad de la acción local. El segundo y el tercero representan la propagación de $N(\sigma, \theta)$ en el espacio geográfico (con velocidad de propagación C_x y C_y). El cuarto término representa los cambios de la frecuencia relativa debido a las variaciones de la batimetría y las corrientes (siendo C_σ la velocidad de propagación en el espacio σ). El quinto de ellos es la refracción del oleaje producida por los cambios de profundidad y corrientes (con velocidad de propagación C_θ en el espacio θ).

El término de la derecha ($S = S(\sigma, \theta)$) es el término fuente de energía y es representado como la superposición de varios términos fuente:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b}$$

Siendo:

- S_{in} : transferencia de energía al oleaje debida al viento.
- S_{nl} : interacciones no lineales entre olas.
- $S_{ds,w}$: disipación de energía en aguas profundas debidas al whitecapping.
- $S_{ds,br}$: término debido a la rotura por disminución de la profundidad.
- $S_{ds,b}$: disipación de energía por fricción con el fondo.

5.2.2 Módulo Flow

El módulo Flow es el encargado de proporcionar la base hidrodinámica al resto de los módulos del software informático de cálculo; incluido al módulo Wave. Flow permite simular el flujo y el transporte en aguas someras

⁴ Whitham, G (1974). Linear and nonlinear waves. Wiley.

resultados de las mareas y/o forzamiento meteorológico; teniendo en cuenta los procesos físicos que se muestran a continuación:

- Gradientes en la superficie libre como consecuencia de los efectos barotrópicos.
- Efecto Coriolis por la rotación de la tierra.
- Agua con densidad variable.
- Forzamientos de marea en contornos abiertos.
- Modelos de turbulencia.
- Efectos producidos por la tensión cortante que genera el viento sobre la superficie libre del mar.
- Esfuerzos cortantes sobre el fondo.
- Presión atmosférica sobre la superficie del mar variable tanto en el espacio como en el tiempo.
- Fuerzas generadas por las mareas.

Gracias a este módulo se pueden obtener el campo de velocidades, los niveles, la distribución de salinidad y temperatura, las tensiones sobre el fondo, el transporte de sedimento y la evolución del fondo.

Flow resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible, bajo la hipótesis de aguas someras y las hipótesis de Boussinesq. A continuación, se realiza una breve descripción de las ecuaciones de profundidad que gobiernan el modelo hidrodinámico.⁵

Si se desprecian los efectos de la precipitación y de la evaporación, la ecuación de continuidad es la siguiente:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial [h\bar{u}]}{\partial x} + \frac{\partial [h\bar{v}]}{\partial y} = 0$$

Siendo:

- \bar{u} , \bar{v} : velocidades en profundidades promediadas en las direcciones x e y (m/s), respectivamente.
- h: profundidad (m).
- ξ : nivel del agua (m).

Las ecuaciones de momento horizontal en profundidades promediadas, asumiendo una ley de fricción cuadrática, velocidad nula, condiciones de contorno de deslizamiento libre (esfuerzo tangencial nulo) en el terreno, despreciando el efecto de Coriolis y del viento, son las que se muestran a continuación:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g\bar{u}[\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}]}{C^2 h} - v \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{g\bar{v}[\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}]}{C^2 h} - v \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) = 0$$

Siendo:

- g : aceleración de la gravedad (m/s²).
- v : la velocidad de turbulencia (m/s).
- C : coeficiente de Chézy (m^{1/2}/s).

Un aspecto importante que tener en cuenta a la hora de ejecutar el módulo Flow es el paso de tiempo (Time Step) que se le da a la simulación, ya que, si éste es elevado, la simulación podría no converger. Estos problemas de convergencias son debidos a que el Número de Courant es excesivamente elevados; siendo lo ideal del orden de 10 o, en simulaciones concretas, algo superior. Dicho Número de Courant depende, principalmente, de la altura de la columna de agua sobre el fondo marino, de la discretización de la malla y del paso de tiempo impuesto a la simulación; de manera que, manteniendo fija tanto la batimetría como el tamaño de elementos de la malla, es preciso variar el paso de tiempo hasta que el Número de Courant se mantenga dentro del rango óptimo de diseño.

Es importante no confundir el Time Step (cada cuánto tiempo el software realiza una simulación) con el intervalo

⁵ Lesser, G., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M, y Stelling, G.S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. 51:883-915.

de tiempo en el cual se muestran resultados.

5.3 Implementación del modelo numérico de cálculo

En el presente apartado se describen todos los argumentos de entrada que necesita el modelo numérico de cálculo (Delft3D) para llevar a cabo la simulación de ambos escenarios. Éstos serán idénticos en ambas situaciones a excepción de la batimetría próxima a la localización del arrecife artificial; como ya ha sido expuesto en apartados anteriores.

5.3.1 Malla o Grid

En los programas de diferencias finitas, al mallar el dominio de cálculo, se pasa de tener infinitas variables a N variables finitas en las que se resolverán las ecuaciones necesarias para llegar a la solución buscada.

En esta ocasión, el dominio físico se discretizará en un número finito de celdas rectangulares, de tamaño variable, sobre las que se resolverán las ecuaciones de propagación del oleaje y las ecuaciones *shallow water*; lo cual permitirá obtener todas las variables objeto del presente Trabajo Fin de Máster.

Por otra parte, cuanto mayor sea el número de celdas en las que se discretiza el modelo, más precisos serán los resultados obtenidos en cada una de ellas. Sin embargo, cuanto mayor sea la resolución propuesta, mayor será el coste computacional que se requiere para llevar a cabo las distintas simulaciones. Es por ello, que se debe llegar a un compromiso entre precisión y coste computacional; de manera, que los resultados obtenidos sean suficientemente fiables, pero sin que el coste computacional sea excesivo.

Dado que el objeto de la presente memoria se centra en el estudio de las consecuencias que puede acarrear la construcción de un arrecife artificial, se buscará una mayor precisión en las zonas más próximas a la localización de dicho arrecife; no siendo necesaria una precisión muy elevada en aquellos puntos más alejados de éste. Esto se traduce en un tamaño de celda menor en las zonas colindantes al arrecife y algo mayor en las celdas más lejanas a la zona de estudio.

Es por ello por lo que se han definido dos mallas (o grid): una interior más pequeña (Malla 1) que abarca la zona próxima al arrecife de estudio y una segunda de mayor tamaño (Malla 2) la cual contiene a la anterior; cuyas características se recogen en la tabla adjunta.

	Malla 1	Malla 2
Dimensiones (m)	4015 x 657	9000 x 3000
Tamaño celda (m)	Variable	50 x 50
Nº celdas	257 x 85	180 x 60

Tabla - 2. Características Mallado

Con objeto de optimizar el número de elementos que constituye la Malla 1, se ha optado por un tamaño de celdas variable, de manera que éste crezca de manera progresiva conforme nos alejamos de la zona de estudio. De esta forma, se ha definido un rectángulo centrando en el eje del arrecife (de longitud 3 veces el tamaño de éste (180 metros) y anchura igual a la distancia que hay desde el borde de la malla próximo a la costa hasta la punta de arrecife artificial) constituido por celdas cuadradas de 5x5 metros de lado; a partir del cual, se ha llevado a cabo un aumento progresivo del tamaño del elemento (3.5 %), en las 2 direcciones, hasta alcanzar las dimensiones de la Malla 1 expuestas en la tabla anterior.

En la siguiente imagen se representa la mitad izquierda de la Malla 1 una vez que ésta ha sido discretizada en las diferentes celdas que la compone.

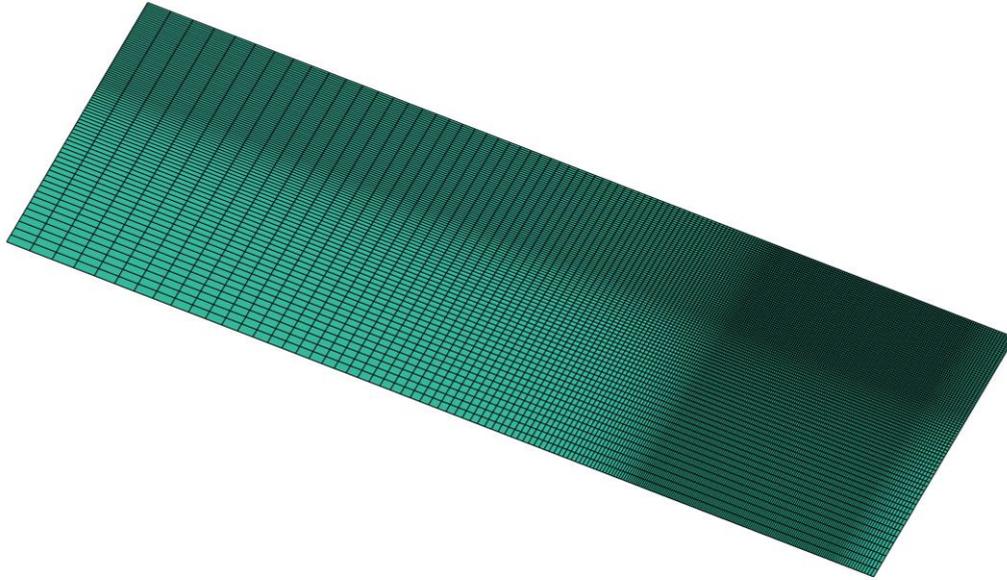


Figura - 22. Discretización Malla 1

Para que exista continuidad en la solución obtenida, ambas mallas se deben unir (anidar) por las celdas que constituyen el contorno exterior de la malla de menor dimensión (Malla 1). Esto permite, a su vez, poder aplicar las condiciones de contorno en los bordes más alejados de la zona de estudio, es decir, en los bordes de la malla exterior (Malla 2); ya que es en las zonas próximas a la aplicación de dichas condiciones de contorno donde se produce una mayor distorsión de la solución y, de esta forma, la solución obtenida en las proximidades del arrecife artificial no estará “contaminada” por las condiciones de contorno aplicadas. En la malla interior, las condiciones de contorno se obtendrán mediante interpolación del espectro en los bordes exteriores de dicha Malla 1.

En la imagen adjunta se muestra la localización de ambas mallas, indicándose, además, la ubicación del arrecife artificial.

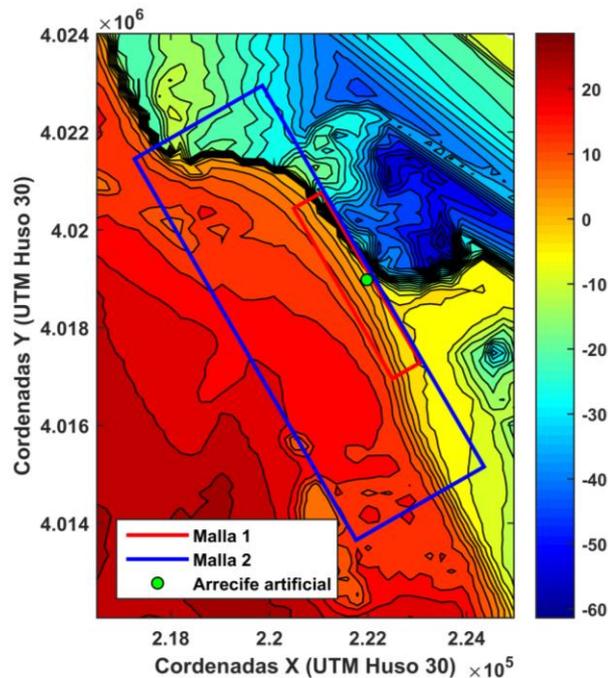


Figura - 23. Localización Malla 1 y Malla 2

Como se observa en la imagen anterior, ambas mallas se han dispuesto aproximadamente paralelas a la costa; estando éstas centradas longitudinalmente con el arrecife artificial y abarcando ligeramente parte de playa emergida.

5.3.2 Implementación de los módulos Wave y Flow

Una vez definida la discretización del espacio físico del modelo, en elementos más pequeños o celdas, se va a llevar a cabo una breve descripción de la implementación de los módulos Wave y Flow realizada.

El módulo Wave, encargado de simular la propagación del oleaje desde aguas indefinidas hasta aguas someras, se implementará en ambas mallas (Malla 1 y Malla 2); permitiendo de esta forma que la propagación se realice de forma continua por todo el dominio. Por otro lado, el módulo Flow, encargado de proporcionar la base hidrodinámica, únicamente se desarrollará en la Malla 1 (malla interior); al ser la zona donde las variaciones de flujo y transporte tendrán una implicación importante en el objeto de la presente memoria.

En la imagen siguiente se muestra, a modo de resumen, las zonas de aplicación de ambos módulos.

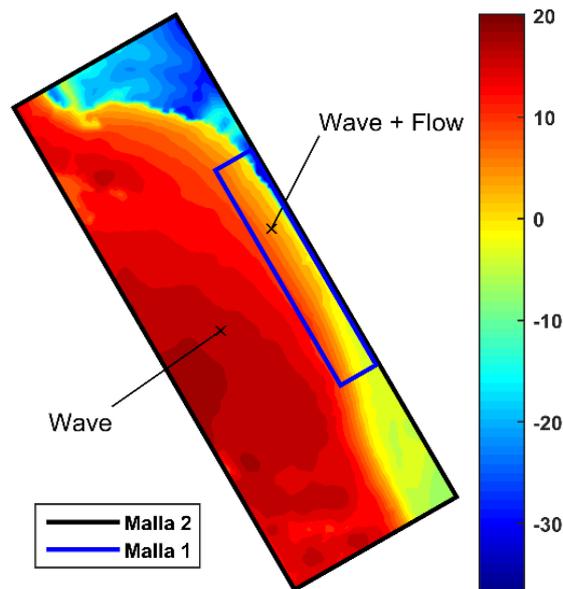


Figura - 24. Implementación Wave y Flow

Si nos centramos en la implementación en sí, en lo referente al módulo Wave, Delft3D permite variar los aspectos clave del espectro bidireccional de densidad de acción de onda. De esta forma, para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster, se ha llevado a cabo una discretización del espacio direccional en 36 subdivisiones del círculo de direcciones espectrales. Por otro lado, el espacio frecuencia se ha limitado entre 0.05 Hz y 1 Hz, con un número de divisiones igual a 24.

En cuanto a la fricción del fondo, ésta se ha introducido mediante la fórmula de Jonswap, donde el valor del coeficiente del espectro es $0.067 \text{ m}^2/\text{s}^3$.

Así mismo, el coeficiente gamma que determina la relación entre la altura de ola rota y la profundidad de la misma, es decir, la rotura por profundidad se ha establecido en 0.73.

Por otro lado, a la hora de implementar el módulo Flow, el parámetro más importante a tener en cuenta, como ya ha sido expuesto en apartados anteriores, es el Time Step (paso de tiempo), el cual se ha establecido en 0.05 minutos; garantizando de esta forma que el número de Courant se mantenga dentro del rango óptimo de diseño.

Finalmente, el intervalo de muestra de los resultados ha sido horario, es decir, aunque el módulo Flow realice simulaciones cada 0.05 minutos, los resultados se escribirán cada hora.

5.3.3 Batimetría

La batimetría necesaria para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster ha sido facilitada en forma de fichero de texto, en el que se incluye, para cada punto (expresado en coordenadas UTM Huso 30), la profundidad de éste; siendo ésta modificada en el Escenario 1 (con arrecife) como ha sido expuesto con anterioridad.

En la imagen siguiente, se muestra la batimetría existente en cada una de las mallas anteriormente definidas.

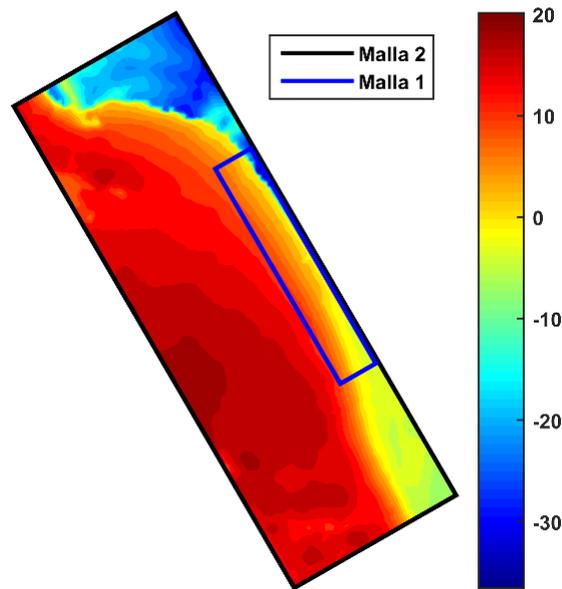


Figura - 25. Batimetría Malla 1 y Malla 2

Recordemos nuevamente que la batimetría mostrada es idéntica para ambos escenarios (Escenario 0 (sin arrecife) y Escenario 1 (con arrecife)), a excepción de la zona próxima al arrecife proyectado; cuya variación ha sido ya mostrado en apartados anteriores.

5.3.4 Simulaciones y tiempo de simulación

Nuestra zona de estudio, como ya ha sido expuesto en apartados anteriores, se encuentra orientada en dirección Oeste – Suroeste (WSW); siendo, por tanto, el oleaje procedente de dicha dirección el que producirá las consecuencias más desfavorables sobre la misma.

Por ello, en primer lugar, cada pareja de escenarios (Escenario 0, sin arrecife, y Escenario 1, con arrecife) se ha simulado bajo la acción de una tormenta procedente de dicha dirección, es decir, aquella cuyo frente de oleaje es paralelo a la línea de costa. Así mismo, dicho temporal presenta un pico de la tormenta con un periodo de retorno igual a 25 años; con objeto de identificar las variaciones tanto hidrodinámica como morfodinámica que se producen cuando la zona de estudio es sometida a una tormenta procedente de la dirección más desfavorable.

Además del caso anterior, se ha estudiado también las consecuencias que acarrea la construcción de un arrecife artificial cuando sobre la costa de Conil de la Frontera incide un oleaje con la mayor probabilidad de ocurrencia, es decir, aquél que procedente de la dirección Oeste (W) presenta un rango de alturas de ola comprendidas entre 0 y 1 metro.

Así mismo, en cada uno de los 2 comparativos se ha simulado un total de 6 días siguiendo la distribución que se muestra a continuación: 2 días de rampa para acomodar las condiciones iniciales de calma impuestas, 2 días hasta la máxima altura de ola significativa (Hs) simulada y, por último, 2 días tras ésta. Durante los 2 días de rampa, se impone al modelo una altura de ola de amplitud muy baja (0.2 metros) y una velocidad del viento nula, con objeto de “calentar” al software antes de comenzar con la simulación buscada; evitando de esta forma pequeñas distorsiones que se producen a la hora de iniciar cada una de las simulaciones a realizar.

En apartados posteriores, se expondrá los días finalmente simulados para cada una de las parejas de escenarios analizadas.

5.3.5 Condiciones de contorno (oleaje)

Las condiciones de contorno a imponer en cada una de las simulaciones a realizar, únicamente se aplicarán en los bordes de la malla exterior en el caso del módulo Wave; tal y como fue argumentado en apartados anteriores. Así mismo, dichas condiciones de contorno solamente serán aplicadas en los bordes de la Malla 2 definidos como abiertos, es decir, en aquellos bordes cuyo contorno cuenta con la presencia de celdas en mar abierto (celdas con batimetría definida como positiva según leyenda). De esta forma, los bordes sobre los que se han

impuesto condiciones de contorno son los dos bordes perpendiculares a la costa y el borde paralelo a la costa más alejado de ésta.

En la siguiente imagen, se muestran los bordes definidos como abiertos, identificándose con las etiquetas: Contorno 1, Contorno 2 y Contorno 3.

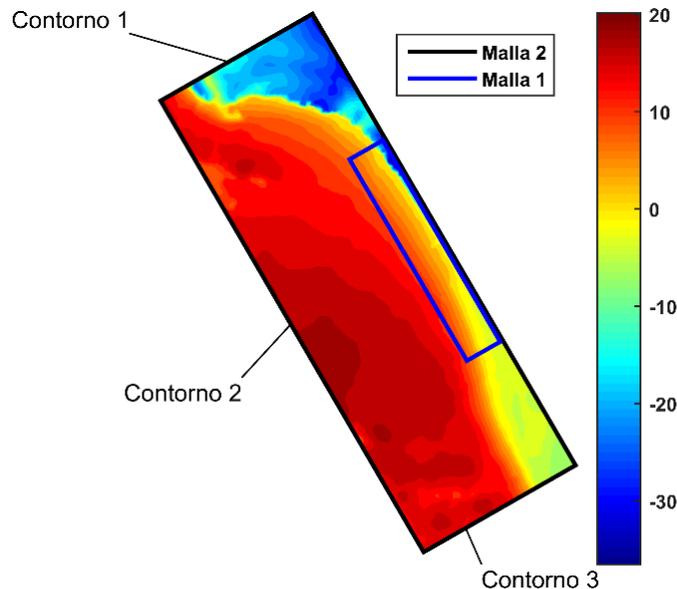


Figura - 26. Bordes con Condiciones de Contorno

Como ya fue definido en apartados anteriores, a pesar de que la Malla 1 también cuenta con la presencia de bordes clasificados como abiertos, éstos no tendrán impuestas ninguna condición de contorno ya que, en la malla interior, las condiciones de contorno se obtendrán mediante interpolación del espectro en los bordes exteriores de dicha Malla 1.

Las condiciones de contorno aplicadas en los bordes definidos como Contorno 1, Contorno 2 y Contorno 3, han sido de dos tipos: por un lado, se ha establecido como condición inicial una altura de oleaje y una dirección del mismo (oleaje que posteriormente será propagado desde dichos bordes hasta la costa), y por otro, se ha definido una velocidad del viento y una dirección de éste (ambos constantes en todo el dominio de estudio).

Estas condiciones de contorno (oleaje y viento) se han obtenido directamente del punto SIMAR 6018024 facilitado por Puertos del Estado (Ministerio de Fomento); el cual cuenta con una serie histórica, de cadencia horaria, desde el año 2005 hasta el año 2016, ambos inclusive.

Como ya se expuso en apartados anteriores, cada pareja de escenarios (Escenario 0 y Escenario 1) se simulará un total de 6 días siguiendo la siguiente distribución: 2 días de rampa para acomodar las condiciones iniciales de calma impuestas, 2 días hasta la máxima altura de ola significativa (Hs) simulada y, por último, 2 días tras ésta.

Por tanto, a continuación, se detalla, para cada uno de los distintos casos a simular, los requisitos que debe cumplir el oleaje para poder considerarlo como máxima altura de ola significativa (Hs).

- La máxima altura de ola significativa (Hs) debe ser la correspondiente al periodo de retorno de 25 años o no superior a un metro en el caso de oleaje en calma.
- Dicha altura de ola debe ser la mayor existente en todo el periodo de simulación, pudiéndose producir alturas de olas idénticas en instantes anteriores próximos a ésta.
- El oleaje a simular en cada uno de los casos no puede estar contenido en el resto de ellos.
- Los distintos oleajes analizados se deben haber producido con posterioridad al año 2012, eligiéndose el primera de ellos que cumpla con todas las condiciones anteriores. En caso de que esta condición no sea posible de solventar, se retrocederá progresivamente en el tiempo hasta hallar aquél que sí las satisfaga.

A continuación, se llevará a cabo el cálculo necesario para determinar la altura de ola que se corresponde con un periodo de retorno de 25 años.

En primer lugar, es necesario determinar la probabilidad de no excedencia. De esta forma:

$$P_{No\ excedencia} = 1 - P_{excedencia} = 1 - \frac{1}{T_r(\text{años})} = 1 - \frac{1}{25} = 0.96$$

La distribución elegida para calcular la altura de ola asociada a un determinado periodo de retorno es Weibull cuya expresión es la siguiente:

$$P_{No\ excedencia} = 1 - e^{-\left(\frac{H-B}{A}\right)^C}$$

Siendo:

- H: altura de ola (m).
- A, B y C: parámetros Weibull característicos de cada punto SIMAR.

De esta forma,

$$0.96 = 1 - e^{-\left(\frac{H-0.26}{0.94}\right)^{1.21}} \rightarrow H = 2.73\ m$$

Se concluye, por tanto, que la ola cuyo periodo de retorno es de 25 años presenta una altura igual a 2.73 metros.

En la tabla adjunta se recoge, para cada una de las simulaciones, la altura de ola significativa (Hs) máxima elegida; indicándose tanto la altura y dirección de ésta, como la fecha en la que se produce.

Simulación	H _{pico} (m)	Θ _{pico} (°)	Fecha (dd/mm/aaaa – hh:mm)
Simulación 1	2.7	244	22/10/2013 – 22:00
Simulación 2	1.0	268	28/04/2006 – 15:00

Tabla - 3. Picos de Tormentas Simuladas

A continuación, sobre la serie histórica de alturas de ola obtenidas directamente del punto SIMAR, se indican las alturas de ola significantes (Hs) elegidas como máxima en cada una de las simulaciones.

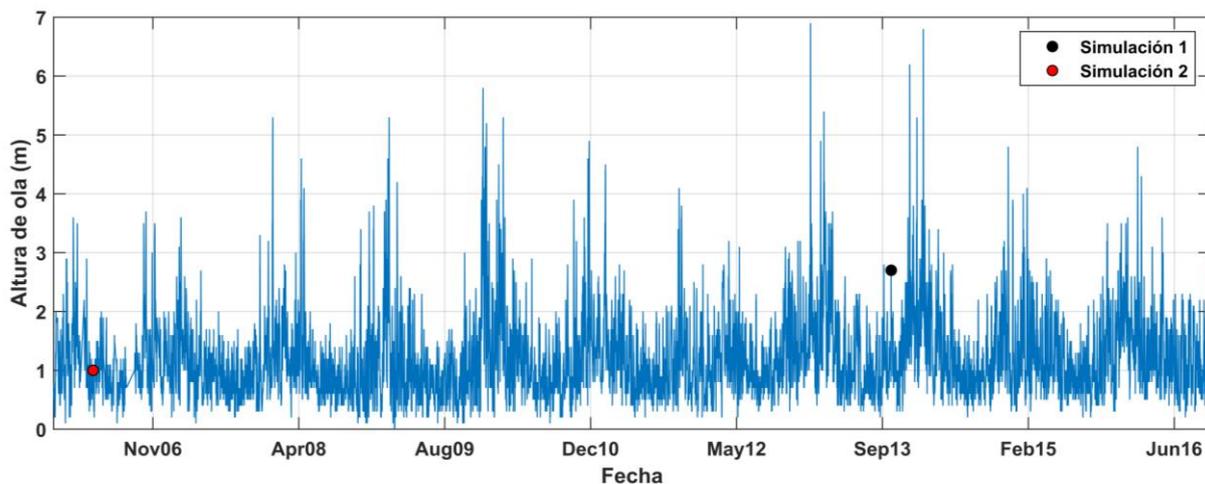


Figura - 27. Máximas Alturas de Ola Significantes (Hs) Simuladas

Conocidos los diferentes casos a analizar expresados en función de su máxima altura de ola significativa (Hs), para determinar el origen y fin de todos días a simular en cada una de las distintas parejas de escenarios (Escenario 0 y Escenario 1), se debe restar 96 horas a la fecha que ésta se produce y sumar 48 horas a la misma, respectivamente.

En la tabla siguiente se muestra la fecha de origen y fin de las distintas simulaciones a realizar.

Simulación	Origen (dd/mm/aaaa – hh:mm)	Fin (dd/mm/aaaa – hh:mm)
Simulación 1	18/10/2013 – 22:00	24/10/2013 – 22:00
Simulación 2	24/04/2006 – 15:00	30/04/2006 – 15:00

Tabla - 4. Periodos de Simulación

En la figura que se ilustra a continuación, se representa, para cada una de las simulaciones realizadas, las distintas variaciones de altura de ola que componen cada uno de los casos de estudio; indicándose tanto el origen y fin de dichas simulaciones como el instante en el que se produce la máxima altura de ola significativa (Hs). Sobre dicha gráfica se recoge también los 2 días de rampa previos durante los cuales la altura de ola es constante y de valor igual a 0.2 metros.

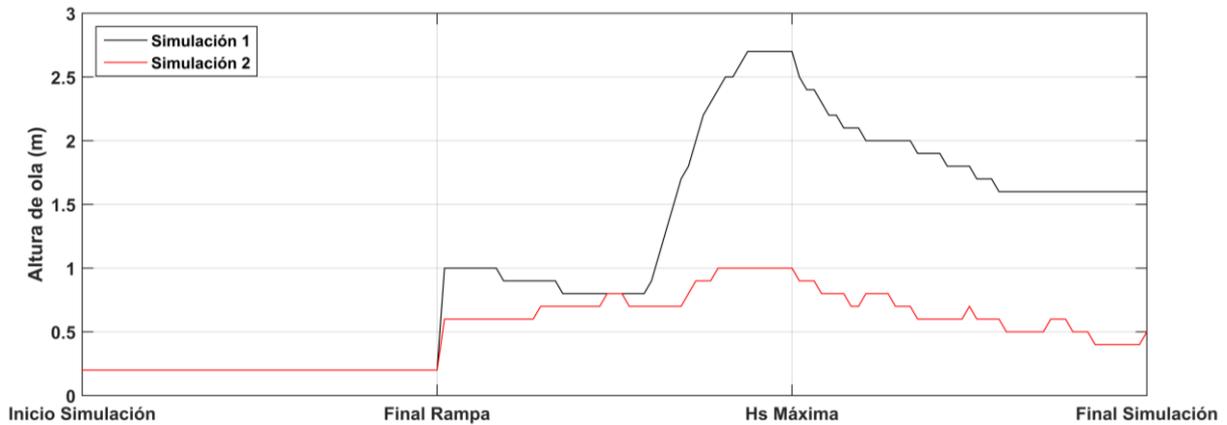


Figura - 28. Alturas de Ola Simuladas

En las imágenes siguientes se muestran, respectivamente, la dirección y el periodo del oleaje simulado en cada uno de los casos estudiados.

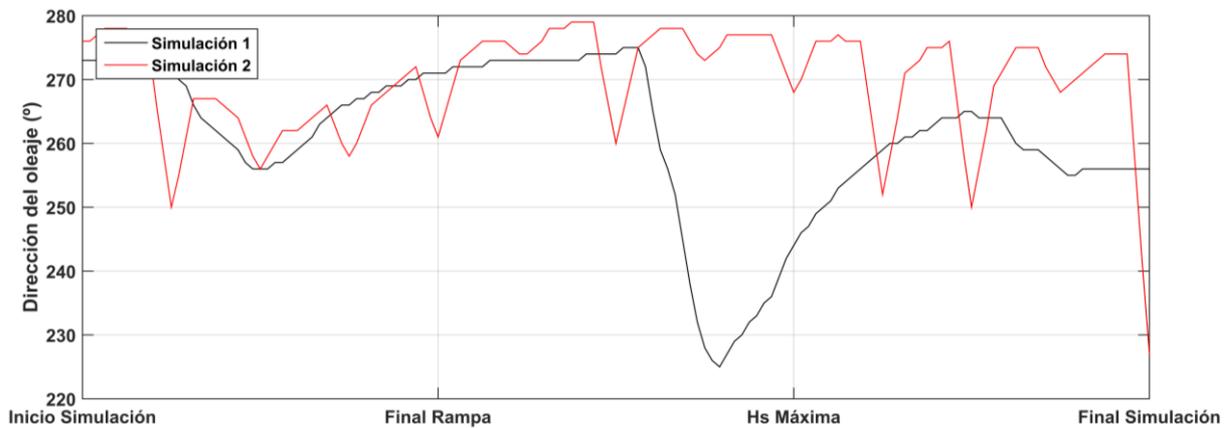


Figura - 29. Direcciones de Oleaje Simuladas

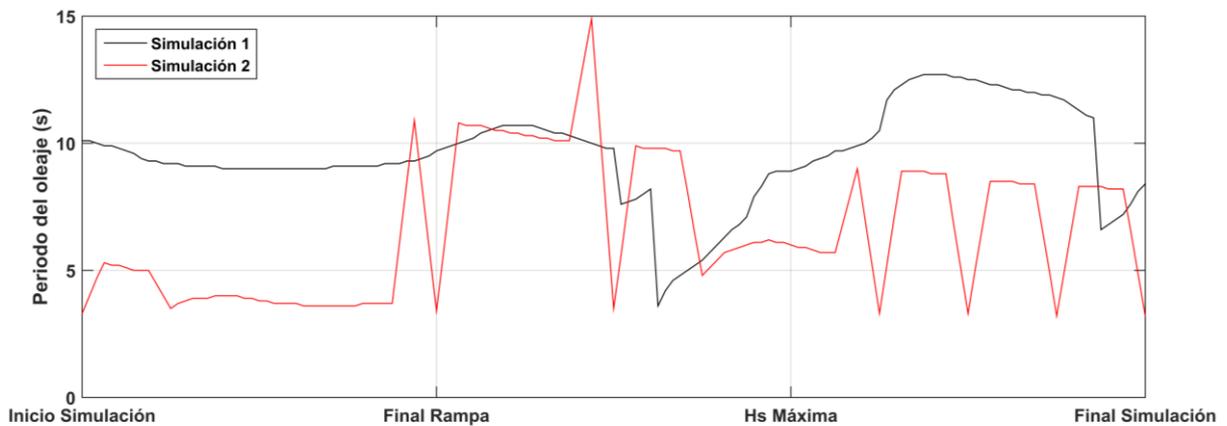


Figura - 30. Periodos de Oleaje Simulados

Igualmente, se representa en la figura siguiente las distintas velocidades del viento simuladas para cada uno de

los casos de estudio; recogiendo también los 2 días de rampa donde la velocidad del viento es constante y de valor igual a 0 m/s.

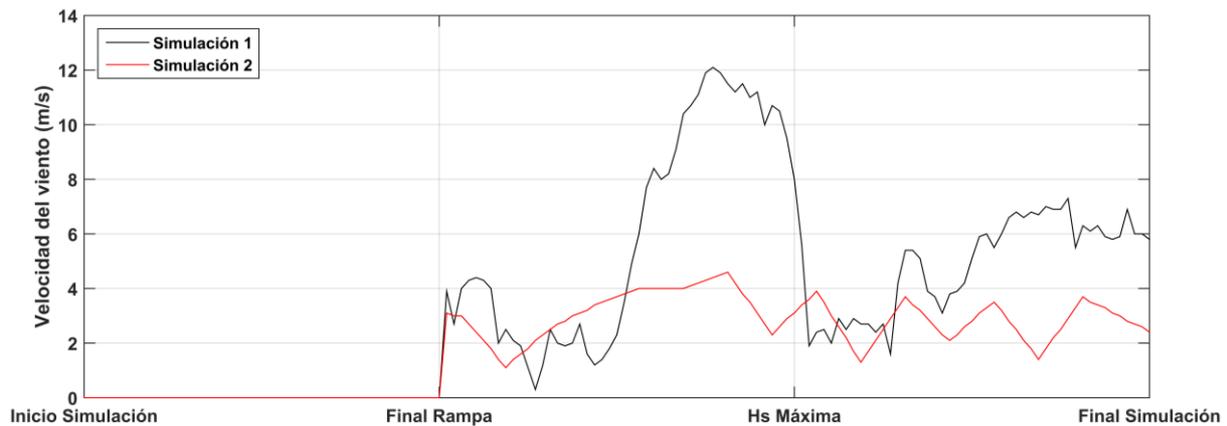


Figura - 31. Velocidades de Viento Simuladas

Finalmente, se grafica también las distintas direcciones que toma el viento en cada una de las simulaciones llevadas a cabo.

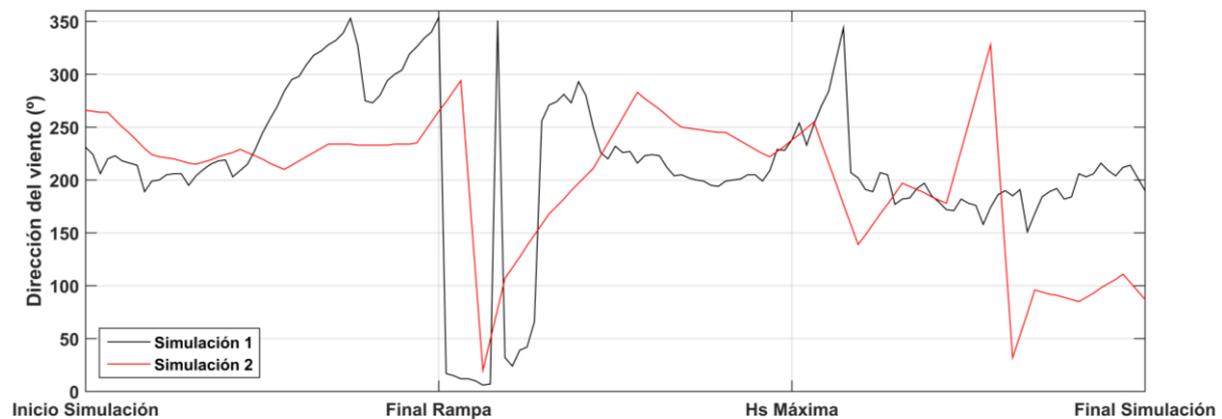


Figura - 32. Direcciones de Viento Simuladas

Como conclusión, cada pareja de escenarios (Escenario 0 o sin arrecife y Escenario 1 o con arrecife) se simulará un total de 2 veces, es decir, ambos escenarios se estudiarán ante la influencia de distintas combinaciones de oleaje (2 en total), con objeto de evaluar las consecuencias que puede llegar a producir la presencia de un arrecife artificial en la costa de Conil de la Frontera ante diversas condiciones de oleaje y viento.

Así mismo, cada simulación acarreará un total de 6 días; simulándose estos 6 días de manera horaria a partir de los datos de oleaje y viento obtenidos directamente del punto SIMAR 6018024, es decir, cada pareja de escenarios se estudiará bajo las condiciones de oleaje y viento que, de manera horaria, se produjeron en la fecha de análisis sobre la costa de Conil de la Frontera.

5.3.6 Condiciones de contorno hidrodinámicas

A diferencia de las condiciones de contorno asociadas a la propagación de oleaje expuestas anteriormente, las condiciones de contorno hidrodinámicas se aplicarán sobre los bordes de la Malla 1 que toman la denominación de abiertos; ya que es en dicha malla donde actúa el módulo Flow, encargado de proporcionar la base hidrodinámica al resto de módulos. Así mismo, estos bordes abiertos de la Malla 1 se nombrarán de la misma forma y en el mismo orden que los correspondientes a la Malla 2, es decir, Contorno 1, Contorno 2 y Contorno 3.

Estas condiciones de contorno hidrodinámicas serán idénticas para las distintas simulaciones a realizar; con independencia de la combinación de oleaje analizada.

A pesar de ser constantes para cada una de las 2 simulaciones realizadas, las condiciones de contorno hidrodinámicas serán diferentes en función del borde en el que están siendo aplicadas. De esta forma, se distinguen dos condiciones de flujo:

Condiciones de contorno hidrodinámicas tipo Water Level:

Las condiciones tipo Water Level consisten en imponer un forzamiento astronómico en los distintos contornos sobre los que están siendo aplicadas tales condiciones. Para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster, como ya fue expuesto en apartados anteriores, se han considerado únicamente las 13 componentes principales del total de componentes necesarias para describir completamente las mareas astronómicas (390 componentes); las cuales se recogen nuevamente en la tabla adjunta indicándose, para la zona de estudio, su periodo y amplitud, así como una breve descripción de las mismas.

Símbolo	Amplitud (cm)	Fase (°)	Periodo (h)	Descripción
M2	89.89	54.41	12.42	Lunar principal semidiurna
S2	32.96	78.87	12.00	Solar principal semidiurna
N2	19.14	37.67	12.66	Lunar elíptica mayor semidiurna
K2	8.97	77.01	11.97	Lunisolar declinacional semidiurna I
K1	5.11	50.92	23.93	Lunisolar declinacional diurna
O1	4.70	303.56	25.82	Lunar principal diurna
P1	1.45	44.53	24.07	Solar principal diurna
Q1	1.51	256.00	26.87	Lunar elíptica mayor diurna
MF	0.00	7.33	327.86	Quincenal lunar
MM	0.08	221.64	661.3	Mensual lunar
M4	1.66	154.35	6.21	Curta diurna
MS4	0.32	232.93	6.10	Curta diurna
MN4	0.51	68.02	6.27	Curta diurna

Tabla - 5. Condiciones Tipo Water Level. Armónicos de Marea Conil de la Frontera

Esta condición tipo Water Level únicamente se impondrá sobre el borde de la Malla 1 definido como Contorno 2, es decir, sobre el borde de dicha Malla 1 dispuesto paralelo a la costa y más alejado de ésta.

Condiciones de contorno hidrodinámicas tipo Neumann:

Las condiciones tipo Neumann consisten en imponer una velocidad del fluido en los bordes en los que están siendo aplicadas, en la dirección perpendicular de dicho borde; mediante un forzamiento del tipo Time Serie. Es decir, el movimiento que sigue la ola en tales bordes es puramente vertical, manteniéndose en todo momento la ola en el plano normal al nivel medio del mar (NMM).

Esta condición tipo Neumann se aplicará en los 2 bordes perpendiculares a la costa pertenecientes a la Malla 1 (Contorno 1 y Contorno 3), con un forzamiento tipo Time Serie igual a 0 a lo largo de ambos bordes.

5.3.7 Fricción

La imposición de unas condiciones tanto de contorno como de flujo sobre un determinado borde produce una distorsión de la solución en las zonas próximas a la aplicación de tales condiciones; distorsión que se va disipando conforme nos alejamos del área de actuación.

Las condiciones de flujo tipo Neuman establecidas sobre los bordes abiertos de la Malla 1 denominados Contorno 1 y Contorno 3 (las cuales imponen un forzamiento tipo Time Serie de valor igual a 0), introducen al modelo una corriente longitudinal excesiva que no refleja la realidad.

Con objeto de disminuir las elevadas velocidades que tales condiciones originan, se ha llevado a cabo, como

solución, un aumento de la fricción en las celdas próximas a dichos contornos perpendiculares a la costa.

Para la determinación de la fricción en las diferentes celdas que componen la Malla 1, se ha empleado la fórmula de Chézy; la cual permite, variando el coeficiente de Chézy, variar la fricción existente en cada celda. Así mismo, dicho coeficiente es inversamente proporcional a la fricción presente, es decir, contra menor sea el valor del coeficiente de Chézy, mayor es la fricción que se está imponiendo.

Para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster se ha establecido un coeficiente de Chézy variable linealmente en las proximidades al Contorno 1 y al Contorno 3, y constante fuera de la zona de influencia de las condiciones de flujo impuestas. Así mismo, dicho coeficiente toma el valor 10 en ambos contornos, variando linealmente durante las siguiente 20 celdas perpendiculares a éstos, hasta alcanzar un valor igual 65, a partir del cual éste se mantiene constante.

En la imagen siguiente se muestra el valor que toma el coeficiente de Chézy en cada una de las distintas celdas que constituyen la Malla 1.

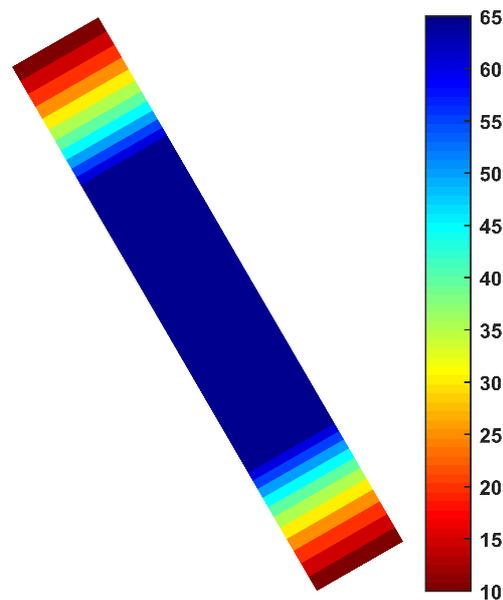


Figura - 33. Coeficiente de Chézy

Con el fin de apreciar la variación que se produce de dicho coeficiente en las proximidades a los contornos perpendiculares a la costa, en la imagen adjunta se ha realizado un zoom a tal zona; pudiéndose observar con mayor claridad la variación lineal descrita en el presente apartado.

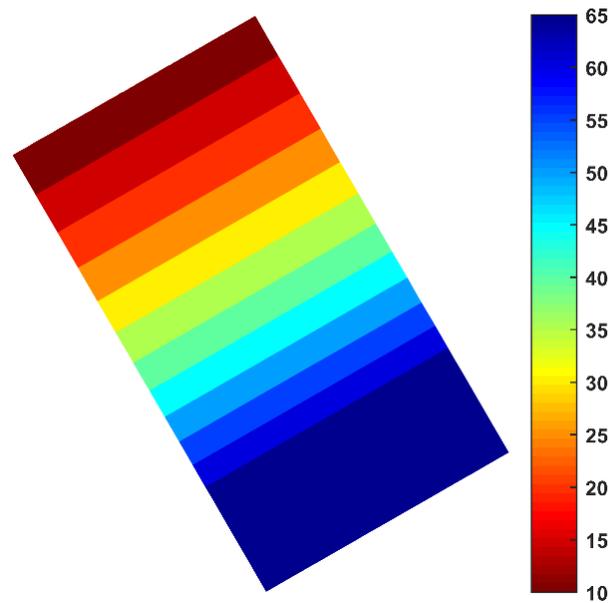


Figura - 34. Detalle Coeficiente de Chézy

5.3.8 Definición del sedimento

Para poder llevar a cabo un estudio sobre las consecuencias que acarrea la construcción de un arrecife artificial en la costa de Conil de la Frontera, en lo referente a la morfología litoral, es necesario definir el tipo de sedimento que constituye tanto la parte de playa emergida como la parte sumergida.

En primer lugar, al tratarse de arena, este tipo de sedimento se clasifica dentro de los no cohesivos, es decir, aquéllos formados por material granular constituido por granos gruesos o partículas sueltas.

Para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster, se han establecido como constantes las principales características que definen a este tipo de sedimentos, es decir, densidad específica y tamaño medio de sedimento (D_{50}), en todo el dominio de simulación (tanto en la parte emergida como sumergida); siendo en esta ocasión el encerrado por la malla interior (Malla 1), ya que es en ella donde se lleva a cabo la aplicación del módulo Flow que, como ya se ha expuesto en apartados anteriores, es el encargado de simular el transporte de sedimento y los cambios morfológicos atendiendo a diversos procesos físicos.

Ante la falta de datos específicos sobre la arena presente en las playas de Conil de la Frontera, se ha optado por tomar como 2650 kg/m^3 el valor de la densidad específica; basándonos en las clases Puertos y Costas de 2º del Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos a la hora de tomar dicha decisión. En lo referente al tamaño medio de sedimento (D_{50}), éste es igual a 0.5 milímetros al tomarse como válido el existe en las playas de Trafalgar, según Ortega-Sánchez et al (2008)⁶.

Finalmente, se ha establecido como 0.5 metros la capa de sedimento disponible, constante, en toda la Malla 1, a excepción de la zona donde se localiza el arrecife artificial, la cual se ha diseñado bajo la hipótesis de disponibilidad nula, es decir, no existe capa de material depositada encima del arrecife. Con ello, se consigue simular que el material con el que éste se construye es mucho más rígido y denso que la arena y que, por tanto, no sufrirá erosión durante el corto periodo de simulación.

Sin embargo, con objeto de analizar qué consecuencias produce la continua incidencia del oleaje sobre la punta del arrecife artificial, ésta se ha supuesto erosionable; de manera que se pueda apreciar si dicho oleaje produce la erosión de la misma.

En la imagen adjunta se muestra la capa de sedimento disponible en toda la Malla 1.

⁶ Relation between beachface morphology and wave climate at Trafalgar beach (Cádiz, Spain). Miguel Ortega-Sánchez. Octubre 2007.

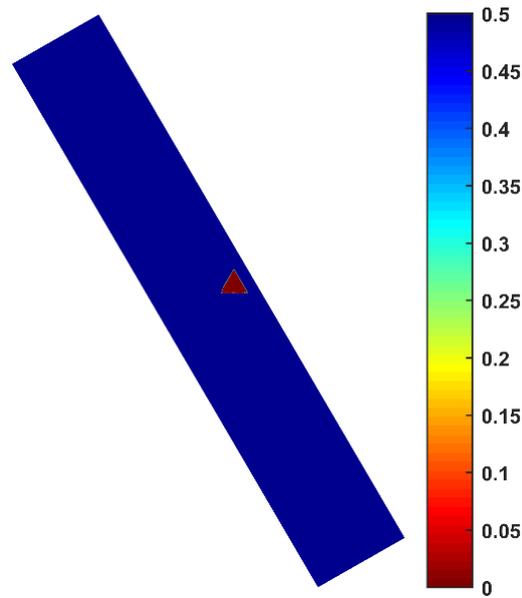


Figura - 35. Capa de Sedimento Disponible

Puede observarse como en la zona donde se localiza el arrecife artificial, la capa de sedimento disponible es nula; a excepción de la punta de éste.

5.3.9 Morfología

A lo largo del presente apartado se van a exponer las diferentes variables que, pertenecientes a la pestaña “Morfología” del módulo Flow, se han visto modificadas para lograr una correcta calibración de los distintos modelos estudiados.

En primer lugar, se ha impuesto al modelo que durante los 2 días de rampa (primeros 2880 minutos), no tengan lugar cambios en la morfología; ya que el objeto de dicho periodo es únicamente “calentar” el software antes de llevar a cabo la simulación de cada caso.

El factor de escala morfológica, encargado de extender en el tiempo los cambios morfológicos que se producen en la simulación, toma el valor unidad. Este factor permite simular la variación que sufriría la morfología en un periodo de tiempo mucho mayor al simulado, manteniendo constantes las condiciones que se están simulando, es decir, permite reproducir unas condiciones futuras con un coste computacional relativamente bajo. En el presente Trabajo Fin de Máster toma el valor unidad ya que se está estudiando los cambios morfológicos que producen una determinada combinación de oleajes en una escala temporal de evento (pocos días).

Finalmente, el factor de transporte por fondo y suspensión debido al oleaje se ha establecido en 0.15 según las recomendaciones de Nienhuis et al (2016); evitando de esta forma que la pendiente del perfil de playa tienda a hacerse mayor de una manera no realista.

6. Resultados

Para cada una de las condiciones de oleaje simuladas (2 en total) se ha llevado a cabo un análisis comparativo entre el Escenario 0 (sin arrecife) y el Escenario 1 (con arrecife) atendiendo a las siguientes variables:

- Altura de ola: gracias a esta variable es posible comparar si la construcción del arrecife artificial trae consigo un aumento o una disminución de la amplitud de las olas en su trasdós.
- Línea de costa: esta variable es de vital importancia, ya que permite identificar si dicho arrecife da lugar a una ganancia de playa seca o una erosión de la misma.
- Perfil transversal de playa: analizando de esta forma las consecuencias que produce el arrecife en lo referente a los cambios en la pendiente del perfil de playa, creación de bermas, etc.
- Variación de la batimetría: para ello, se estudiará el transporte de sedimento que se produce en el área analizada; identificándose las zonas donde se produce erosión y sedimentación.
- Campo de velocidad: analizándose las variaciones que se producen en la corriente, tanto en dirección como en intensidad, tras la construcción del arrecife artificial.
- Nivel del mar: el estudio de esta variable nos permite identificar la variación que sufre la cota de inundación tras la construcción del arrecife artificial.

Así mismo, los resultados obtenidos se han limitado a las zonas próximas a la localización del arrecife de estudio, ya que es allí donde dicho arrecife va a tener una mayor influencia sobre las variables expuestas. Esta zona se corresponde con un área reducida de la malla interior (Malla 1), de ancho igual al de dicha malla y por longitud 3 veces la del arrecife artificial (180 metros), quedando ésta centrada en el arrecife.

En la imagen adjunta se muestra el área en la cual se han analizados todas las variables anteriores; identificándose, además, la localización tanto de la Malla 1 como de la Malla 2.

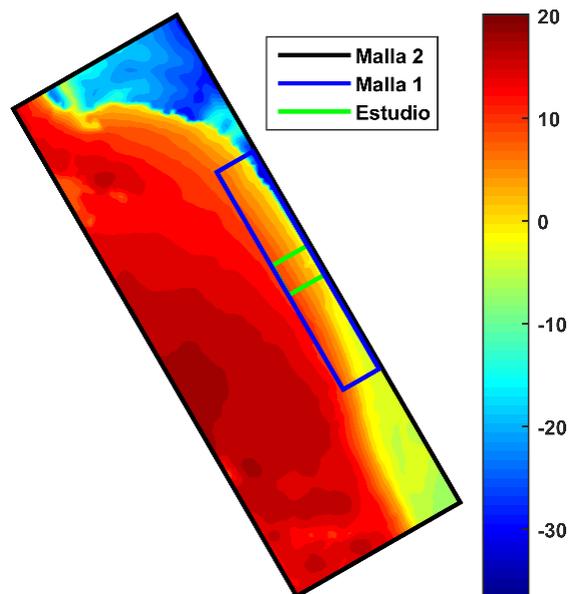


Figura - 36. Área de Estudio

Para una mayor apreciación de la extensión que presenta la zona de estudio, se ha hecho zoom a dicha área, mostrándose el resultado en la siguiente imagen.

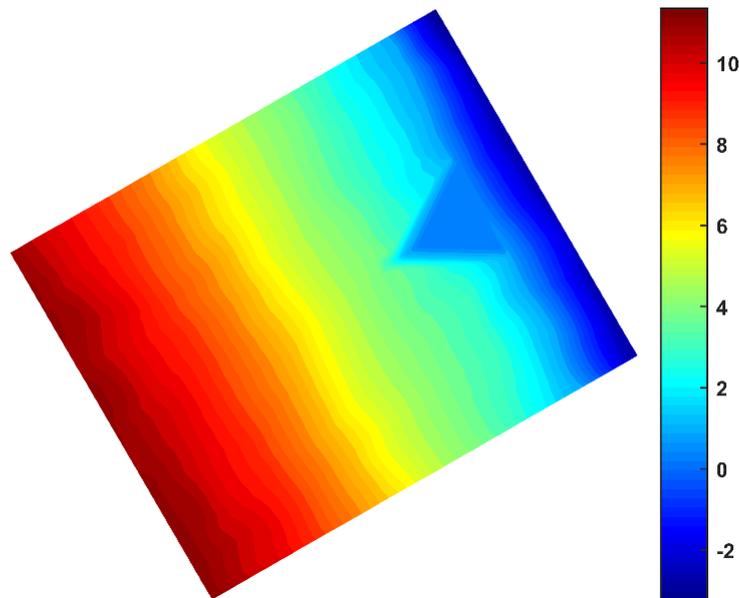


Figura - 37. Ampliación Área de Estudio

En los siguientes apartados, se ha llevado a cabo un análisis comparativo de las variables expuestas anteriormente entre el Escenario 0 (sin arrecife) y el Escenario 1 (con arrecife) para cada una de las 2 simulaciones realizadas en el presente Trabajo Fin de Máster. El planteamiento seguido en todas ellas ha sido el mismo: determinación de la situación inicial (Escenario 0) y posterior comparación con la situación final (Escenario 1) identificando los cambios que produce el arrecife artificial en las variables analizadas.

Así mismo, para poder realizar dicha comparación, las variables a analizar se deben expresar en el mismo nivel de marea (Water Level), es decir, bajamar, nivel medio o pleamar; tanto en el Escenario 0 como en el Escenario 1.

6.1 Simulación 1

La simulación 1 es la correspondiente al estudio de una tormenta cuyo frente de oleaje es paralelo a la línea de costa, es decir, la dirección de propagación es perpendicular a la misma, y cuya altura de ola en el pico de la tormenta presentaba un periodo de retorno igual a 25 años. En la tabla adjunta se recogen, a modo de resumen, las principales características del temporal analizado.

Simulación 1	
Inicio simulación	18/10/2013 – 22:00
Final simulación	24/10/2013 – 22:00
H_{pico} (m)	2.7
Θ_{pico} (°)	244

Tabla - 6. Simulación 1

6.1.1 Altura de ola

A continuación, se van a analizar las consecuencias que acarrea la construcción del arrecife artificial en lo referente a la altura de ola. Para ello, se ilustra, para cada uno de los 3 niveles de marea estudiados (bajamar, nivel medio y pleamar), la altura de ola que se produce en el Escenario 0 (sin arrecife) y, posteriormente, la variación que dicho arrecife provoca en ella.

En la imagen adjunta, correspondiente al caso bajamar, se puede observar como la construcción del arrecife

artificial tiene como consecuencia una disminución de la altura de ola sobre el propio arrecife y un aumento de la misma en la cola de éste; manteniéndose prácticamente invariable la altura de ola en el resto de la zona de estudio.

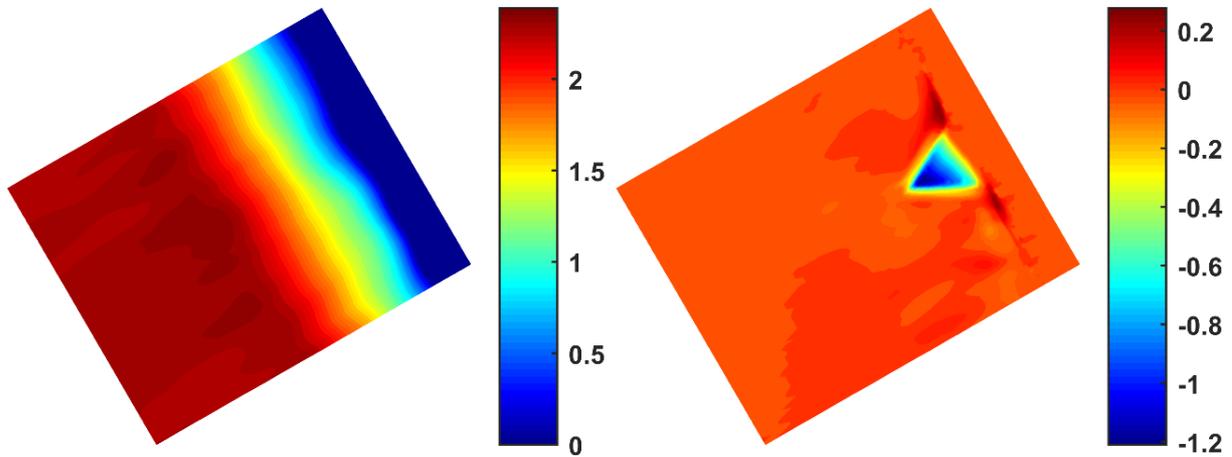


Figura - 38. Comparativa Altura de Ola. Bajamar.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

La disminución de la altura de ola es debida a la rotura de la misma como consecuencia de la pérdida de profundidad que ésta experimenta conforme se aproxima al arrecife, es decir, durante la propagación de la ola, ésta comienza a “sentir el fondo” a medida que se aproxima a dicho arrecife artificial hasta que, debido al aumento del rozamiento, ésta acaba colapsando.

En lo referente al aumento de la altura de ola que se produce en la cola del arrecife, éste es mínimo; sobrepasándose ligeramente los 20 cm en ambas esquinas, pero siendo nula la variación justo en la zona trasera. Esto es debido a que, hasta romper, el oleaje se propaga hacia dichas zonas sin encontrarse ningún obstáculo, pero sufriendo un ligero aumento de la altura de ola debido a la que se suma reflejada por el arrecife. Este aumento de altura de la ola propagada permite la rotura de la misma en instantes posteriores al Escenario 1, es decir, las olas rompen más metidas en la costa; lo que tiene como consecuencia la presencia de oleaje en zonas donde antes no existía.

En el instante que la marea presenta su nivel medio, el arrecife de estudio da lugar a las mismas consecuencias que en el caso anterior, es decir, disminución de la altura de ola sobre el arrecife y aumento de la misma en la cola de éste.

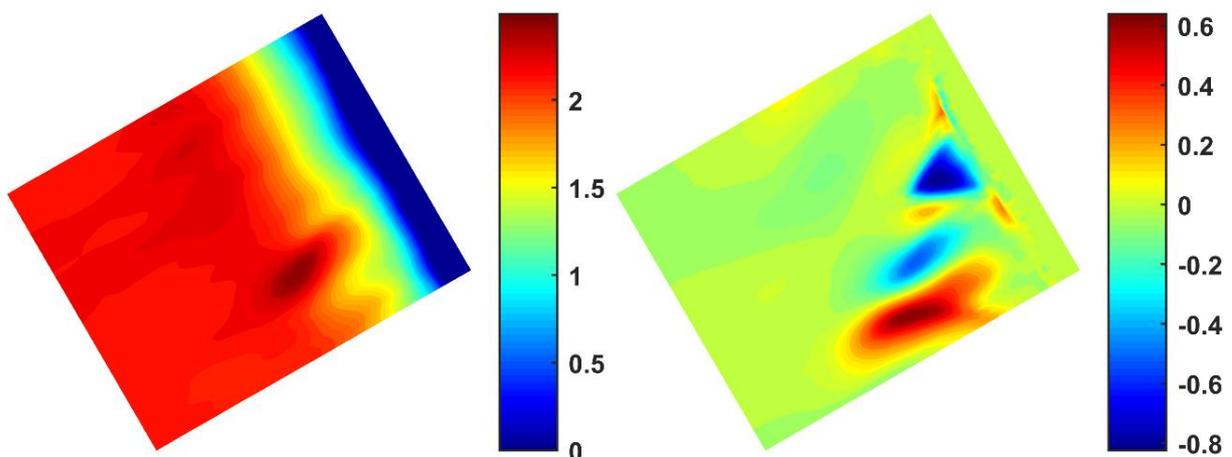


Figura - 39. Comparativa Altura de Ola. Nivel Medio.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

En esta ocasión, la disminución de la altura de ola sobre el arrecife artificial es menor que en el caso anterior. Esto es debido a que, aunque el arrecife sigue provocando la rotura del oleaje propagado, la columna de agua sobre éste es mayor como consecuencia del aumento del nivel del mar.

Así mismo, el mayor calado da lugar a alturas de olas mayores que provocan un aumento de la ola refleja por el

arrecife y, por tanto, una mayor variación de la altura de ola en la cola de éste. A pesar de ello, la variación respecto al caso anterior, aunque existente, es despreciable.

El último nivel de marea estudiado, pleamar, presenta las mismas conclusiones que los otros 2 anteriores.

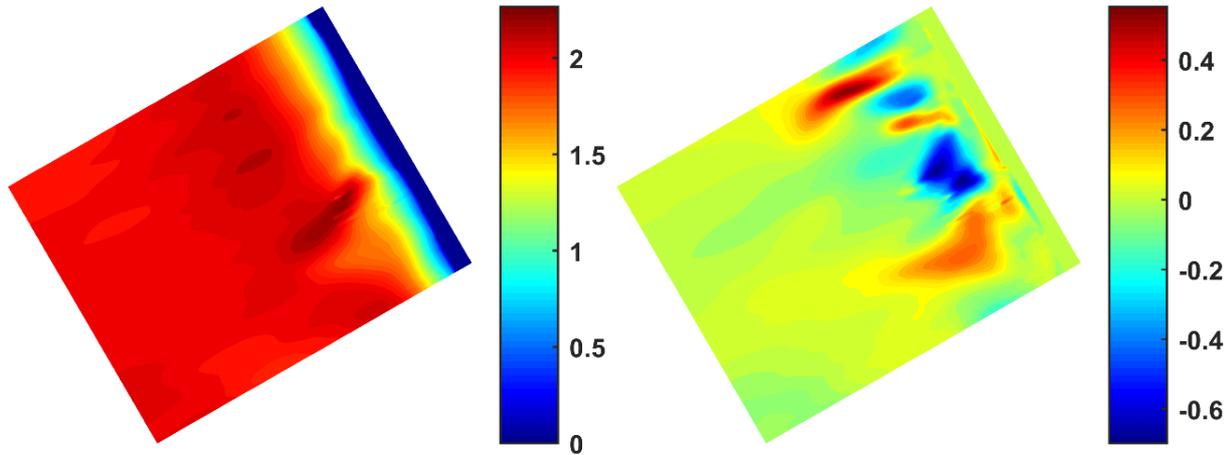


Figura - 40. Comparativa Altura de Ola. Pleamar.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

En la imagen anterior se observa que el aumento del nivel del mar provoca una magnificación de las consecuencias que acarrea la construcción del arrecife artificial, es decir, una menor variación de la altura de ola sobre el propio arrecife, pero una mayor altura en las olas que bordean a éste y, consecuentemente, un aumento de las mismas en la cola del arrecife. En esta ocasión, se produce también un incremento de la altura de ola en la parte posterior del arrecife y no sólo en las esquinas del mismo.

Se concluye, por tanto, que el arrecife artificial objeto del presente Trabajo Fin de Máster provoca una disminución de la altura de ola en la zona donde éste se localizada, como consecuencia de la menor profundidad existente debido a la construcción del mismo, y un aumento en la altura de las olas que lo bordean, llegando incluso a propagarse dicho aumento a la zona posterior del arrecife artificial.

Si analizamos la batimetría inicial del Escenario 0 (sin arrecife), la cual se muestra en 3D en la imagen adjunta hasta la cota -7 metros, se puede observar que ésta presenta una mayor profundidad en el lado derecho; siendo en el lado izquierdo más irregular.

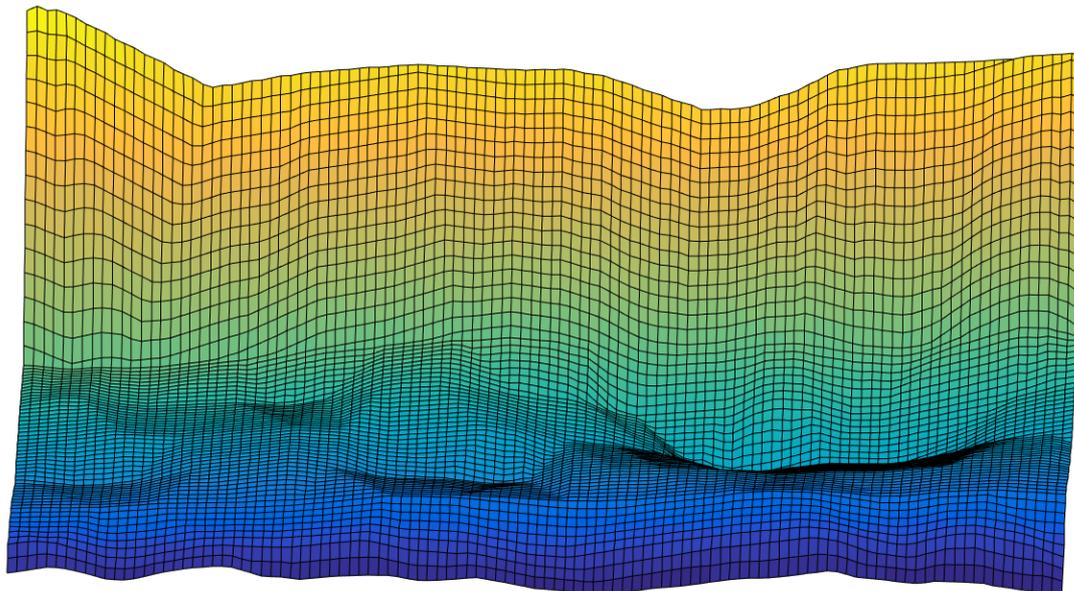


Figura - 41. Batimetría 3D Escenario 0 (Sin Arrecife)

Dicho aumento de la profundidad en esa zona localizada permite la existencia de alturas de olas mayores, ya que éstas “no sienten el fondo” y, por tanto, no colapsan; lo cual se observa en las imágenes anteriormente expuestas.

A modo de comparación, se muestra en la imagen siguiente la batimetría inicial del Escenario 1 (con arrecife), la cual se ha tomado en perspectiva (hasta la cota -7 metros) para una mejor apreciación de los cambios que sufre la batimetría.

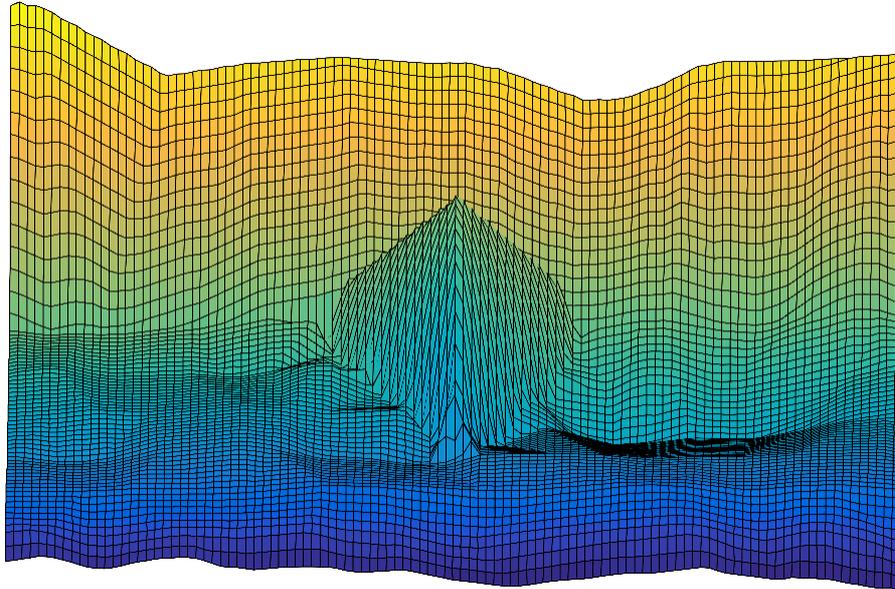


Figura - 42. Batimetría 3D Escenario 1 (Con Arrecife)

6.1.2 Línea de costa

La construcción de un arrecife artificial en la zona de estudio presenta, en lo referente a la línea de costa, una serie de variaciones respecto a la situación inicial; las cuales se muestran en la imagen adjunta.

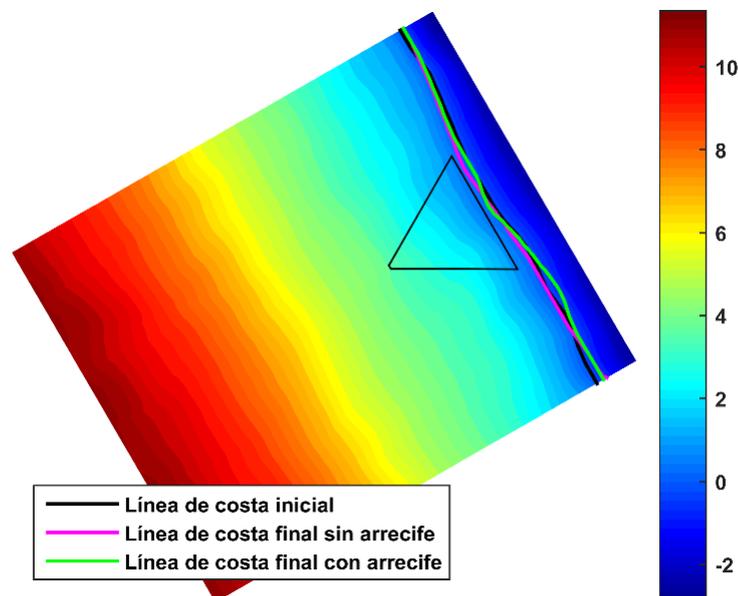


Figura - 43. Comparativa Línea de Costa

Si analizamos en primer lugar la variación que sufre la línea de costa en el Escenario 0 (sin arrecife), se puede concluir que existe una ganancia de playa seca en toda la zona de estudio a excepción de la situada más al extremo del área analizada. Dicho avance de la línea de costa es mayor en la parte izquierda de donde se ubica el arrecife artificial y menor en la parte derecha; siendo prácticamente nula en algunos tramos de dicha zona.

La construcción del arrecife artificial da lugar a unas variaciones apreciable en la línea de costa. Con respecto a la situación inicial, se observa una ligera ganancia de playa seca en la parte izquierda del arrecife, llegando a ser nula en algunos tramos. En la parte derecha, la situación es totalmente opuesta, dando lugar a una gran erosión.

El mayor avance de la línea de costa se produce en la zona central.

Si comparamos la situación final del Escenario 1 (con arrecife) con la del Escenario 0 (sin arrecife), se concluye que el arrecife artificial produce una erosión en toda la línea de costa, a excepción de un breve tramo de la zona central.

En conclusión, la parte izquierda del arrecife artificial tiende a aumentar su línea de costa en contra de lo que se produce en la parte derecha; provocando una gran erosión el arrecife artificial en dicha zona.

Para una mejor apreciación de los resultados, en la siguiente imagen se ilustra únicamente las distintas líneas de costa analizadas y la posición del arrecife artificial.

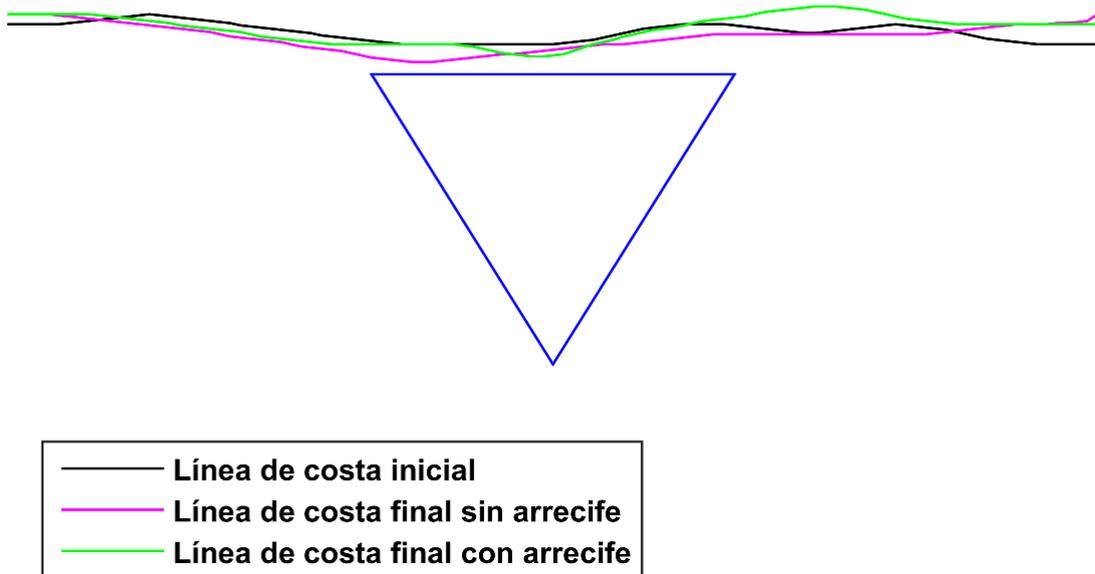


Figura - 44. Comparativa Línea de Costa

6.1.3 Perfil transversal de playa

A lo largo del presente apartado se va a analizar cómo varía el perfil transversal de la playa en las 3 zonas estudiadas con la variable anterior. Gracias a esta variable, se va a poder apreciar con claridad los cambios morfológicos que provoca la construcción del arrecife artificial.

En la imagen adjunta se muestra, sobre la batimetría del Escenario 1 (con arrecife) los 3 perfiles transversales que estudiar.

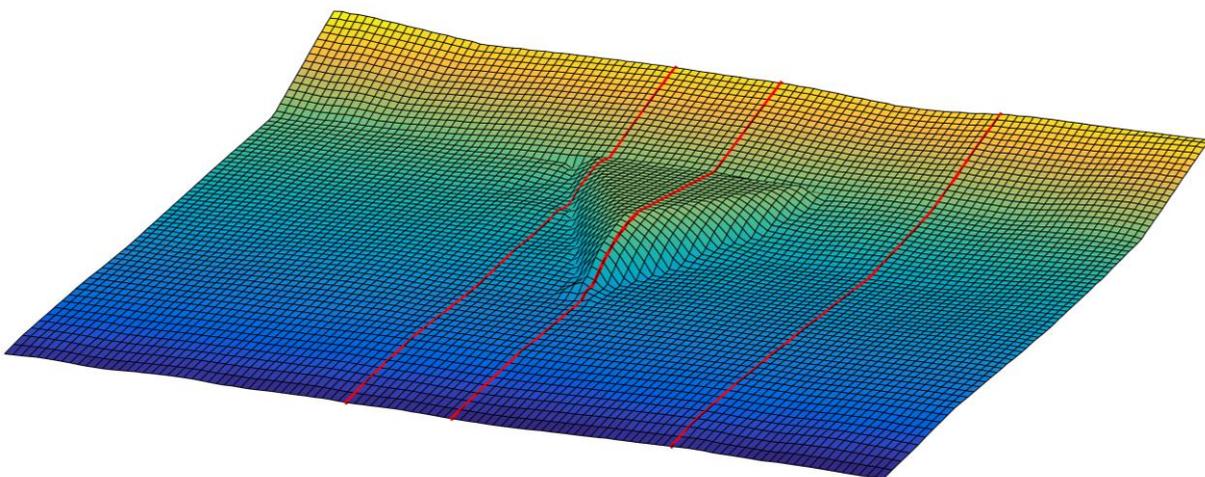


Figura - 45. Perfiles Transversales de Playa

En primer lugar, se va a llevar a cabo el análisis de la zona izquierda, la cual se muestra en la imagen adjunta.

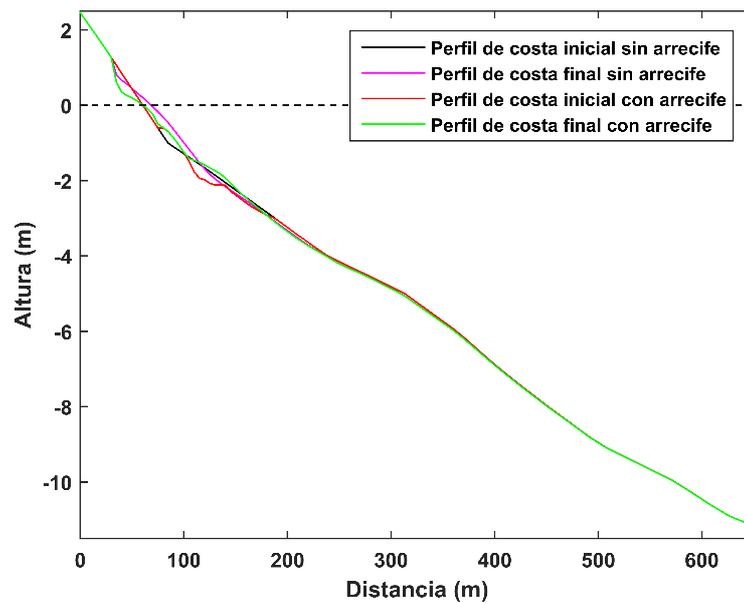


Figura - 46. Comparativa Perfil Transversal Izquierdo

Para una mejor visualización de los cambios que se producen en el perfil transversal de playa, en la siguiente imagen, se ha realizado un zoom en aquella parte donde éstos son apreciables.

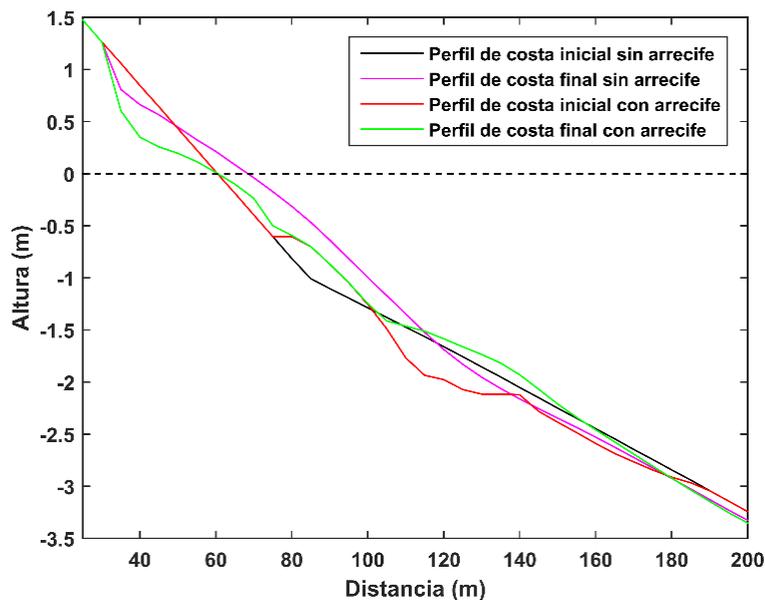


Figura - 47. Comparativa Perfil Transversal Izquierdo

En lo referente a la línea de costa, en el Escenario 0 (sin arrecife) ésta avanza, dando lugar a una ganancia de playa seca; mientras que, en el Escenario 1 (con arrecife), la línea de costa se mantiene invariable.

Haciendo un análisis global de todo el perfil, se puede observar que, en ambos escenarios, se produce una acumulación de sedimento en aquellas zonas donde el perfil de costa inicial presenta cambios bruscos de pendiente. Así mismo, en las zonas colindante al cambio de pendiente, el resuelto es totalmente opuesto, dando lugar a una pérdida de material, es decir, erosión.

Si analizamos el escenario sin arrecife, Escenario 0, el perfil inicial presenta un único cambio de pendiente, lo que origina sedimentación en dicha zona (barra) y erosión en ambos extremos del perfil. Dicha erosión, en dirección hacia aguas profundas, se extiende hasta que se alcanza la profundidad de cierre, es decir, profundidad a partir de la cual el oleaje no tiene influencia sobre la forma del perfil.

La construcción del arrecife artificial origina 2 cambios de pendiente en el perfil: uno primero en la parte alta

del arrecife y otro en la parte inferior del mismo. En ambas ocasiones el resultado es el mismo, es decir, acumulación de sedimento en la zona donde se produce dicho cambio y erosión en las zonas colindantes.

Si comparamos ambos escenarios, se concluye que mientras en el Escenario 1 (con arrecife) se originan 2 barras, en el Escenario 0 (sin arrecife) únicamente se produce una.

Con objeto de simular que el arrecife artificial no sufrirá erosión durante el corto periodo de simulación, éste se ha proyectado bajo la hipótesis de que no existe capa de sedimento depositada sobre la parte central del arrecife en la situación inicial. Esta pérdida de material erosionable trae como consecuencia un aumento de la erosión en la parte alta del perfil transversal, es decir, en la parte de playa emergida; la cual puede observarse en la imagen anterior.

El perfil transversal de la playa en la parte central del arrecife es el que se muestra en la imagen adjunta.

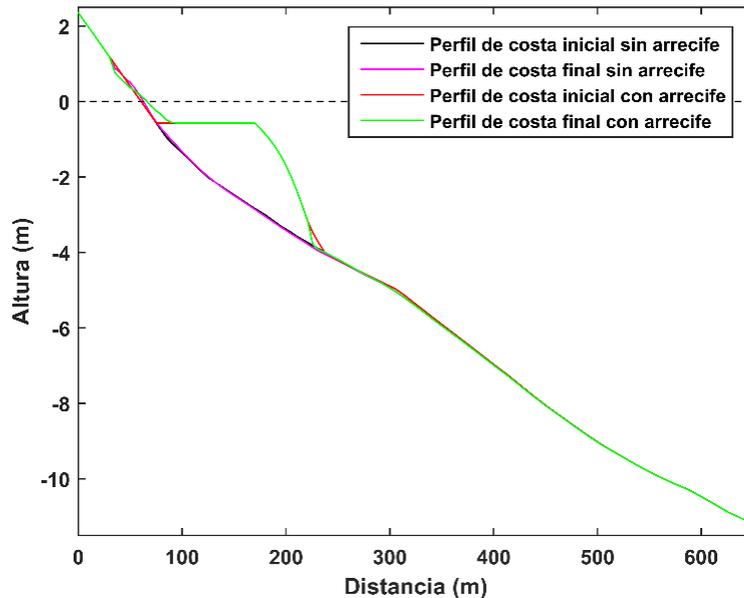


Figura - 48. Comparativa Perfil Transversal Central

Así mismo, se ha realizado un zoom a la parte donde se localiza el arrecife para que los cambios que éste produce sean visibles.

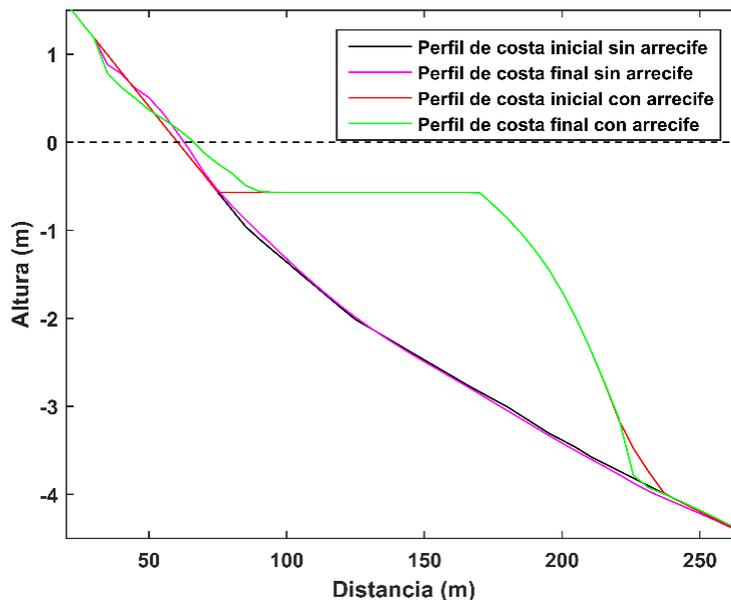


Figura - 49. Comparativa Perfil Transversal Izquierdo

En esta ocasión, el Escenario 0 (sin arrecife) presenta un perfil inicial mucho más continuo que el anterior, es decir, no se aprecian cambios bruscos de pendiente. Es por ello, que el perfil transversal de playa permanece

prácticamente invariable al final de la simulación.

La construcción del arrecife artificial (Escenario 1) provoca un cambio brusco de pendiente en la parte alta de éste, lo que origina la acumulación de sedimento que se observa en la imagen anterior.

Como se expuso con anterioridad, el arrecife se ha proyectado bajo la hipótesis de no erosionabilidad; provocando una mayor erosión en la parte de playa emergida. Esta acumulación de sedimento origina una ganancia de playa.

Con objeto de estudiar qué influencia tiene el oleaje sobre la punta del arrecife, ésta se ha diseñado, en contra del cuerpo del arrecife, como erosionable. De esta forma, se observa que el oleaje provoca la erosión de la punta del arrecife, por lo que habrá que tomar medidas para que esto no ocurra.

Finalmente, el perfil transversal en la parte derecha del arrecife artificial es el que se muestra en la imagen adjunta.

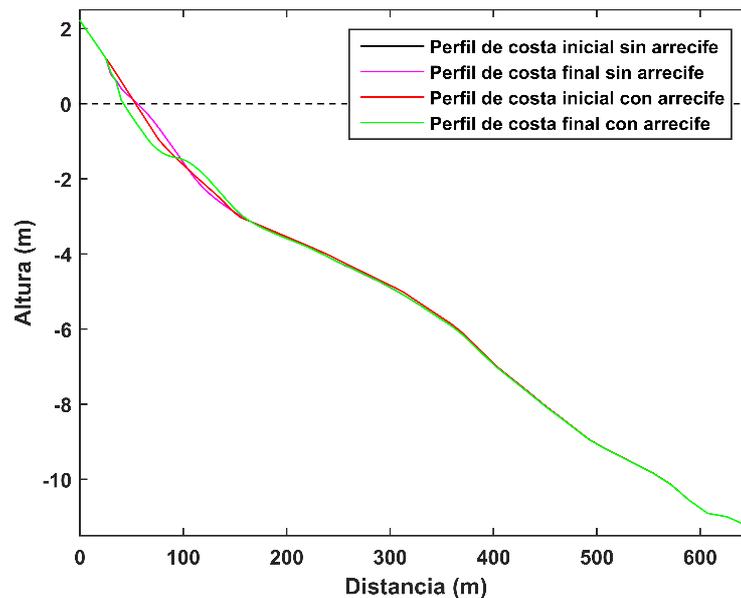


Figura - 50. Comparativa Perfil Transversal Derecho

Al igual que en los perfiles estudiados con anterioridad, se ha realizado un zoom a la zona donde se producen cambios apreciables en la morfología.

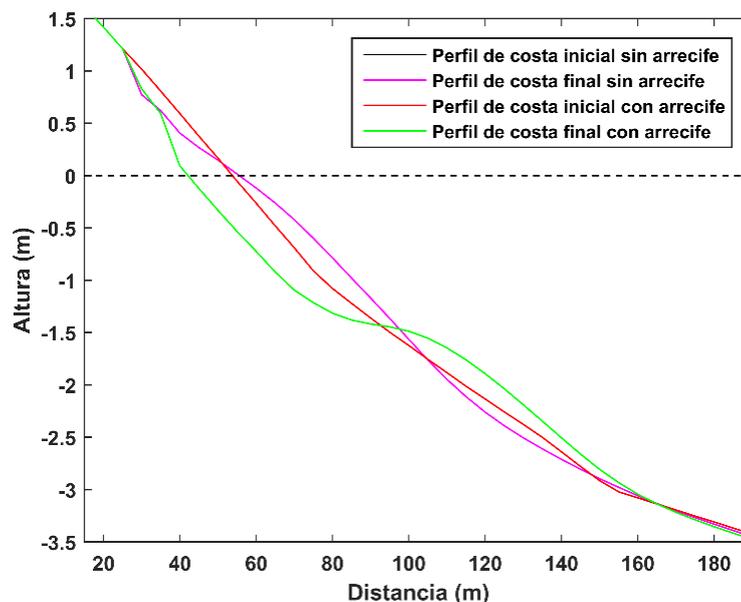


Figura - 51. Comparativa Perfil Transversal Derecho

En esta ocasión, el arrecife artificial no tiene influencia sobre la batimetría. Es por ello por lo que, en ambos

escenarios, la situación inicial es la misma.

En el Escenario 0 (sin arrecife) los cambios que se producen son idénticos a los identificados en los otros 2 perfiles transversales analizados, es decir, acumulación de sedimento en el cambio de pendiente y erosión en las zonas de antes y después del mismo.

La construcción del arrecife artificial trae como consecuencia una gran pérdida de playa seca. La mayor profundidad de la zona, sumada al aumento de la altura de ola que produce el arrecife, origina que los frentes de ola rompan más cerca aún de la línea de costa; provocando una mayor erosión de la misma.

6.1.4 Variación de la batimetría

El estudio de cómo varía la batimetría permite identificar qué zonas sufren sedimentación y cuáles erosión; llevándose a cabo un análisis global de toda el área de estudio a diferencia de lo ocurrido con las 2 variables anteriores: línea de costa y perfil transversal de playa.

En la imagen adjunta se muestra, de manera conjunta, la variación que ha sufrido la batimetría tanto del Escenario 0 (sin arrecife) como del Escenario 1 (con arrecife) entre la situación inicial y la situación final; identificándose, con valores negativos, aquellas zonas que, tras la simulación, han aumentado la capa de sedimento disponible (sedimentación), y con positivos, las que han perdido parte de ésta o incluso su totalidad (erosión).

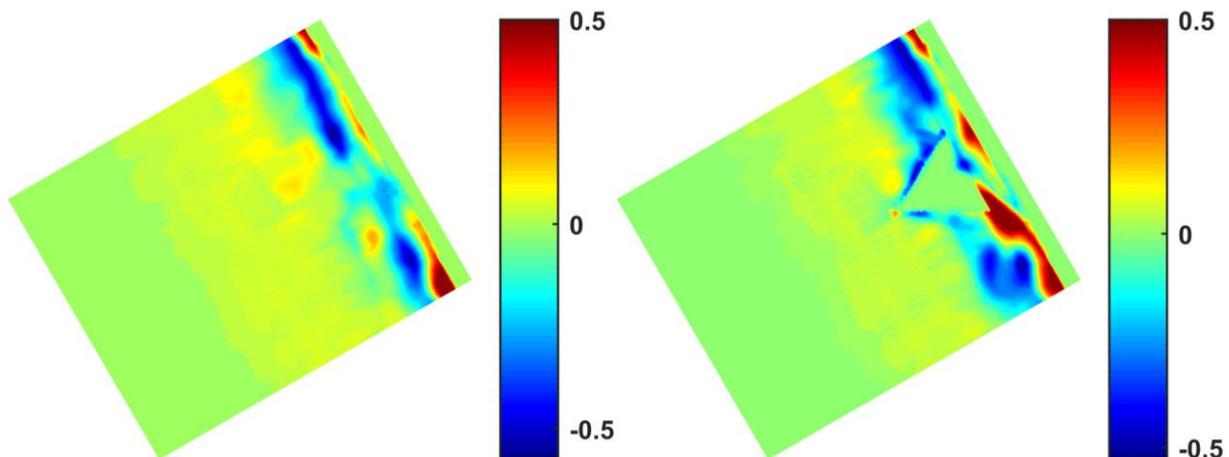


Figura - 52. Variación Batimetría
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)
Rojo indica erosión, azul sedimentación

Si analizamos en primer lugar la variación que sufre la batimetría en el Escenario 0 (sin arrecife) desde la costa hacia aguas profundas, se puede observar un primer tramo donde la playa sufre erosión, mínima en la parte central y severa en los extremos del área de estudio; llegando incluso a perder la totalidad de la capa de sedimento disponible. Tras este primer tramo, se produce el efecto inverso, es decir, sedimentación. Dicha sedimentación es también máxima en los extremos del área de estudio y mínima en la zona central de la misma.

Se concluye, por tanto, que el sedimento disponible en el Escenario 0 (sin arrecife) sufre una basculación desde la parte de playa emergida hacia la sumergida, es decir, se produce una ganancia de playa seca (avance de la línea de costa) a costa de perder material en la parte alta de la misma.

La construcción del arrecife artificial provoca que el efecto de basculación que se produce en el Escenario 0 (sin arrecife) se dé con mayor intensidad, es decir, tanto la erosión del primer tramo como la sedimentación del segundo abarcan áreas mucho más extensas.

Se puede observar que dicha erosión no sólo afecta a las zonas extremas del área de estudio, sino que, en esta ocasión, ésta se extiende también hacia la zona central; llegando incluso a perderse completamente el material disponible en zonas donde en el Escenario 0 (sin arrecife) existía sedimentación. En lo referente a la sedimentación, además de ocupar un área más extensa que en el Escenario 0 (sin arrecife) se puede observar que las alas (aspas) del arrecife favorecen la acumulación de sedimentos sobre éstas; siendo esta acumulación mayor

sobre el ala (aspa) izquierda.

Así mismo, si analizamos el eje del arrecife, la punta de éste sufre erosión como consecuencia del oleaje incidiendo sobre la misma, mientras que en su parte posterior se origina la sedimentación del material.

Se concluye, por tanto, que la construcción del arrecife provoca también la basculación del sedimento desde la parte de playa emergida hacia la sumergida; siendo dicha basculación excesiva en la zona derecha del área de estudio, lo que provoca el retraso de la línea de costa.

Finalmente, en la imagen siguiente se muestra un análisis cualitativo de la variación en la batimetría que provoca el arrecife. En dicha imagen se representa únicamente si el Escenario 1 (con arrecife) produce un efecto totalmente contrario al Escenario 0 (sin arrecife), es decir, sedimentación cuando antes había erosión y viceversa. También recoge el caso que antes no hubiese variación alguna de la batimetría y ahora sí, ya sea erosión o sedimentación.

Debido a la hipótesis de no erosionabilidad impuesta al arrecife artificial, la variación máxima que éste puede sufrir es 0, es decir, la situación final coincide con la inicial; no produciéndose nunca erosión en ninguna parte del cuerpo del arrecife. Esto trae como consecuencia que, al comparar el Escenario 1 (con arrecife) con el Escenario 0 (sin arrecife), el arrecife siempre provoque el efecto opuesto al que se produce en el Escenario 0 cuando éste no sufre sedimentación. Es decir, si la batimetría final del Escenario 1 (con arrecife) no sufre variación respecto a la inicial, pero en el Escenario 0 (sin arrecife) se produce erosión, el resultado final es que se produce sedimentación, aunque la capa de material sobre el arrecife no se haya incrementado, y viceversa.

Es por ello por lo que no se han representado aquellas zonas que no hayan sufrido variación de la batimetría en el Escenario 1 (con arrecife); con objeto de evitar lo anteriormente expuesto.

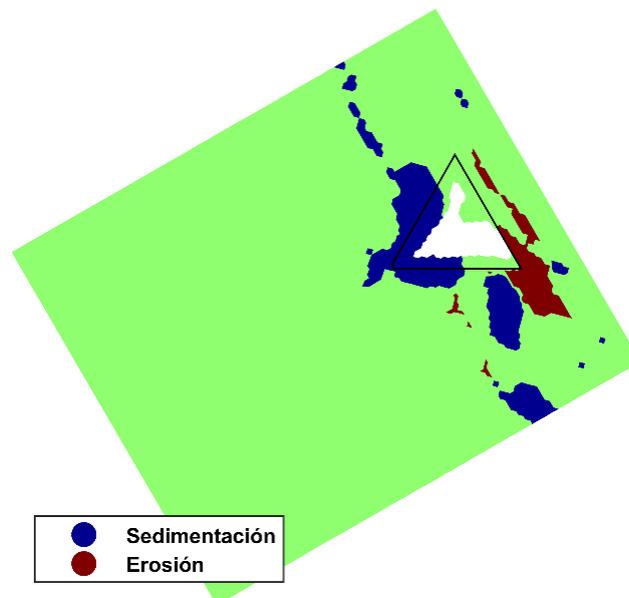


Figura - 53. Comparativa Variación Batimetría

Se concluye entonces, que la construcción del arrecife artificial provoca la sedimentación del material en la mitad delantera de éste, siendo mayor dicha área de sedimentación en la parte izquierda. Por otro lado, produce el efecto contrario en la parte posterior del mismo, originando una gran área de erosión en la parte derecha.

6.1.5 Campo de velocidad

Los campos de velocidad (corrientes) que se producen a lo largo de la costa no sólo dependen de la batimetría existente, sino que también dependen del nivel de marea presente en cada momento.

Es por ello por lo que, a continuación, se muestra nuevamente la batimetría inicial existente tanto en el Escenario 0 (sin arrecife) como en el Escenario 1 (con arrecife), las cuales nos servirá de apoyo para las siguientes explicaciones.

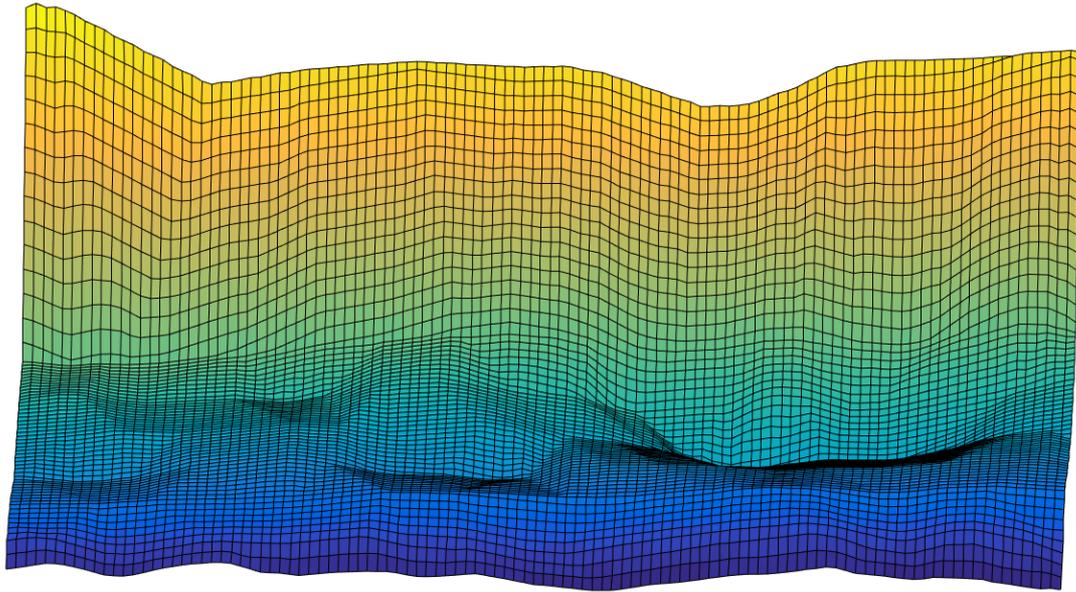


Figura - 54. Batimetría 3D Escenario 0 (Sin Arrecife)

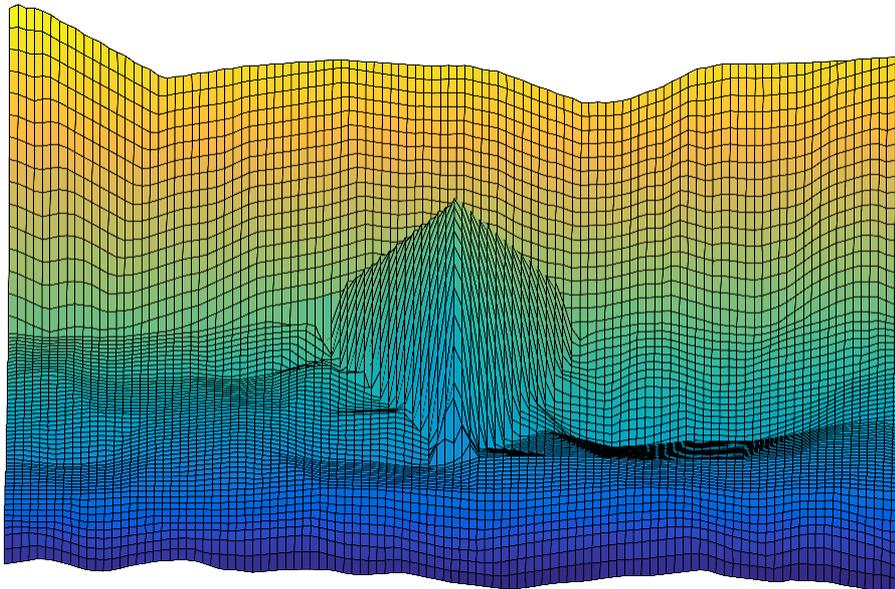


Figura - 55. Batimetría 3D Escenario 0 (Sin Arrecife)

Así mismo, esta variable se va a estudiar en los 3 niveles de marea: bajamar, nivel medio y pleamar; identificándose, para cada uno de ellos, las consecuencias que produce la construcción del arrecife artificial en lo referente a la dirección y magnitud de las corrientes.

En primer lugar, se muestra en la imagen adjunta el campo de velocidad existente en el caso bajamar para ambos escenarios de estudio. Éste se ha representado mediante flechas, lo que permite identificar, de forma rápida, la dirección que toma, así como la magnitud en función del tamaño de las mismas.

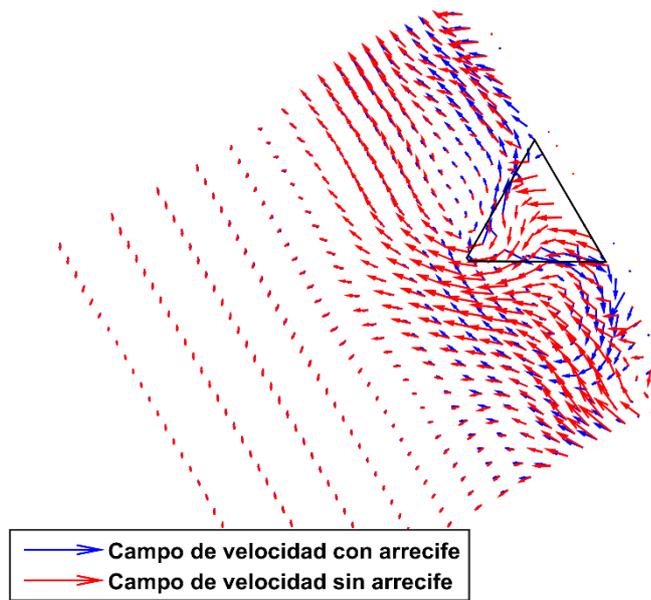


Figura - 56. Comparativa Velocidad. Bajamar

Como se puede observar en la imagen anterior, el campo de velocidad que se produce en el Escenario 0 (sin arrecife) presenta dos direcciones opuestas y claramente diferenciadas. En el tramo de la zona de estudio más próximo a la playa emergida, la corriente se desplaza en dirección Norte (N), mientras que, conforme avanzamos hacia aguas profundas, ésta comienza a revertir el sentido hasta que, a partir de una determinada distancia, el flujo se desplaza únicamente en dirección sur, es decir, opuesta a la anterior.

Si nos centramos en ese primer tramo próximo a la costa, se aprecia que la corriente trata de superar un obstáculo y, para ello, ha tenido que bordearlo. Este obstáculo es el cambio de batimetría que el flujo se encuentra en su avance, lo que obliga a la corriente a desviarse hacia zonas de batimetría más homogénea para lograr atravesarla.

Al igual que en el escenario anterior, en el Escenario 1 (con arrecife) el flujo presenta también dos direcciones opuestas de avance: dirección Norte (N) en un primer tramo más próximo a la costa y dirección Sur (S) conforme nos alejamos de ésta.

Así mismo, la construcción del arrecife artificial supone un “muro” que la corriente no es capaz de sortear, por lo que ésta tiene que girar sobre sí misma, en el sentido de las agujas del reloj, buscando la punta del arrecife para poder atravesarlos.

Finalmente, se va a llevar a cabo un estudio de los cambios que produce dicho arrecife en lo referente a la velocidad que alcanza la corriente en cada zona del área de estudio. Para ello, se muestra en la parte izquierda de la siguiente imagen la velocidad de la corriente en el Escenario 0 (sin arrecife) y en la derecha la variación que en ésta provoca el arrecife artificial.

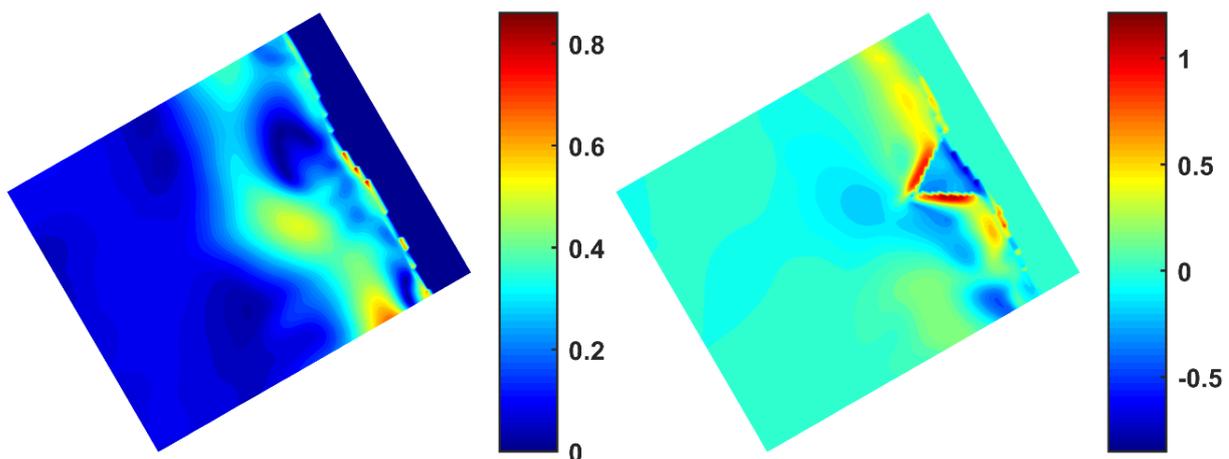


Figura - 57. Comparativa Velocidad. Bajamar.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

Se observa que, en el Escenario 0 (sin arrecife), el hecho de que la corriente tenga que bordear el cambio brusco de batimetría, provoca que ésta se acelere, donde lugar a zona de remanso en el trasdós de dicho cambio, según el sentido de avance de la corriente. Así mismo, no toda la corriente bordea el “obstáculo” sino que una mínima parte de ella discurre próxima a la línea de costa, dando lugar a picos puntuales de excesiva velocidad.

La construcción del arrecife artificial disminuye la velocidad del flujo que circula tanto sobre éste, como en su parte posterior; llegando incluso a anularla, prácticamente. Así mismo, provoca un aumento excesivo de la misma en el ala derecha como consecuencia de la recirculación que sufre el flujo al encontrarse con el arrecife en su avance. Dicha recirculación provoca, una disminución de la corriente en las zonas próximas al rebase del arrecife para, posteriormente, volver a acelerarse sobre el ala izquierda; propagándose dicho aumento de la velocidad hacia el Norte (N).

Se concluye, por tanto, que el arrecife artificial provoca un aumento en la velocidad de la corriente que discurre en dirección Norte (N), excesivo sobre sus alas, llegando incluso a alcanzar valores peligrosos para el baño, pero sin importante en cuanto nos alejamos un poco de éstas.

Cuando la marea alcanza su nivel medio, el campo de velocidades, para ambos escenarios, es el que se muestra en la siguiente imagen.

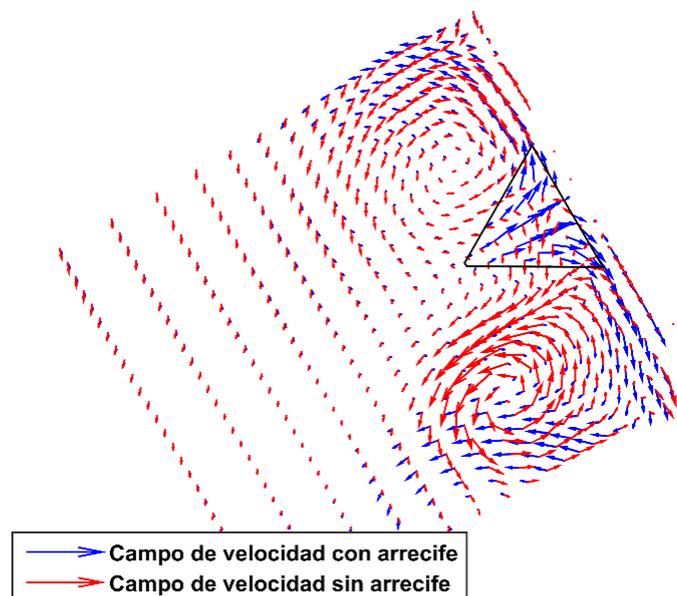


Figura - 58. Comparativa Velocidad. Nivel Medio

En esta ocasión, ambos escenarios presentan un flujo cuyas corrientes se desplazan en dirección Sur (S) a lo largo de toda la zona de estudio. Sin embargo, éste sufre ciertas particularidades, las cuales se exponen a continuación.

Si analizamos la corriente del Escenario 0 (sin arrecife) a lo largo de su dirección de avance, se llega a la siguiente conclusión: la corriente comienza viajando en dirección Sur (S) hasta que, en la zona anterior al cambio brusco de batimetría, se encuentra con un vórtice que la hace girar sobre sí misma en sentido antihorario. A la salida de éste, tras el cambio brusco de pendiente, se encuentra con otro que la vuelva a hacer girar en el mismo sentido, a partir del cual continúa su avance en dirección sur.

La construcción del arrecife artificial da lugar a cambios significativos en la dirección que toma la corriente en su avanza hacia el sur. En primer lugar, ésta se encuentra con el mismo vórtice que en el Escenario 0 (sin arrecife) que, igualmente la hace girar en el mismo sentido, es decir, antihorario. A la salida de éste, la forma del arrecife hace que la corriente afronte el nuevo vórtice por la parte superior del mismo, en lugar de por la parte inferior como ocurrió en el escenario anterior; dando como resultado que la corriente gire en sentido horario, en contra de lo ocurrido en el Escenario 0 (sin arrecife). Tras el vórtice, ésta continúa su avance en dirección sur.

En la imagen siguiente se muestra tanto la velocidad que alcanza la corriente en el Escenario 0 (sin arrecife) como la variación que, sobre ésta, produce el arrecife artificial, para el nivel medio de marea.

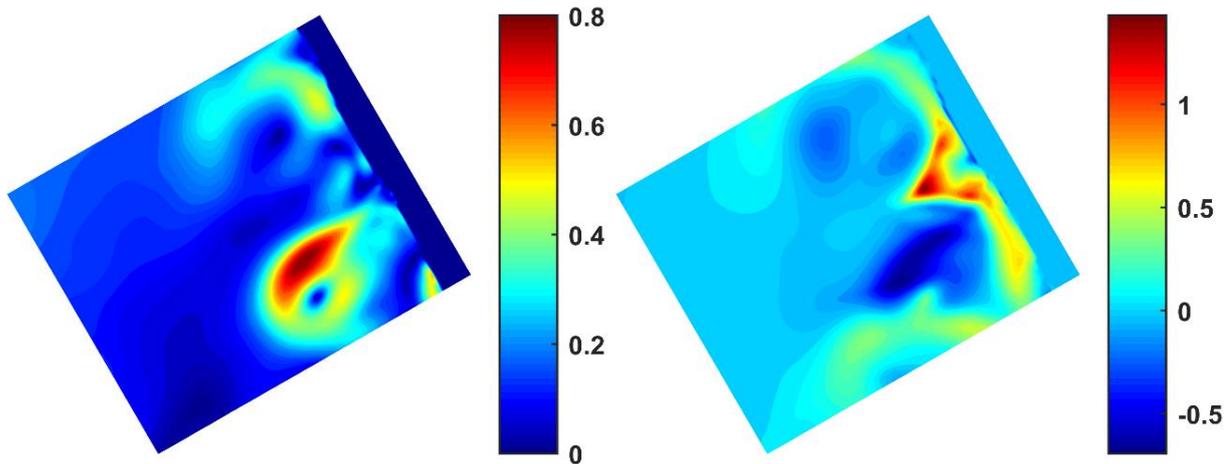


Figura - 59. Comparativa Velocidad. Nivel Medio.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

En el Escenario 0 (sin arrecife) se puede apreciar que la velocidad en las zonas donde se localizan los vórtices es superior a la hallada en el resto del área de estudio, mientras que, en la zona comprendida entre ellos, la velocidad es reducida. A pesar de ello, las velocidades que se originan no suponen un peligro para el bañista.

La forma que presenta el arrecife hace que la corriente que sale del primer vórtice se acelere al aproximarse a éste y transmita a su vez dicha aceleración al segundo vórtice. Es por ello por lo que sobre el arrecife se localizan las mayores variaciones que éste produce. Esto trae como consecuencia un aumento significativo de la velocidad de la corriente en la zona próxima a la línea de costa, pudiendo suponer un peligro para el baño en zonas concretas próximas a éstas.

El último nivel de marea estudiado, pleamar, presenta el siguiente campo de velocidad; mostrándose en la misma imagen el correspondiente para cada escenario analizado.

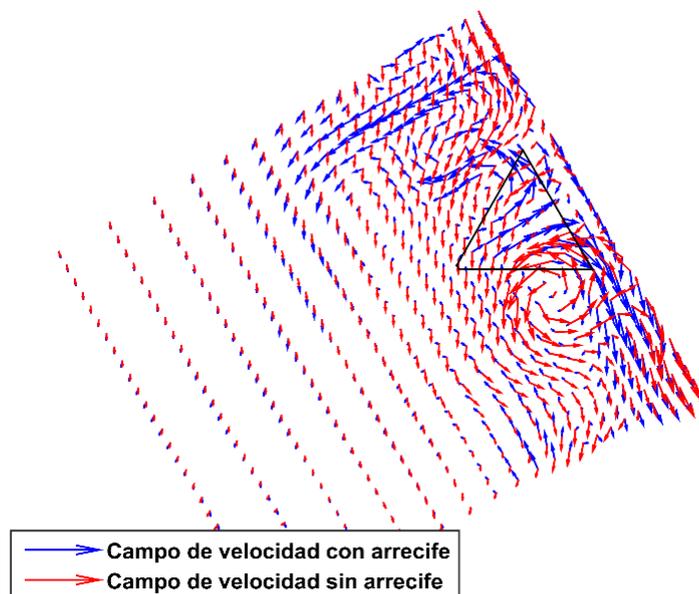


Figura - 60. Comparativa Velocidad. Pleamar

Para este nivel de marea, la dirección de la corriente, en ambos escenarios, sigue siendo la dirección sur. Como consecuencia del aumento de la marea, la columna de agua sobre la batimetría es mayor y, por tanto, los vórtices que se producen no son tan acusados como en el caso anterior.

Analizando en primer lugar el Escenario 0 (sin arrecife), se puede observar que, tras el cambio brusco de la batimetría (en el sentido de avance de la corriente) se origina un vórtice que la hace girar en sentido antihorario.

En el Escenario 1 (con arrecife) es el propio arrecife el que, al anteponerse al avance de la corriente, provoca la recirculación de la misma haciéndola girar en sentido antihorario. Así mismo, también provoca la aceleración

del flujo que circula sobre éste; haciendo que el paso de ésta sobre el vórtice no sea tan pronunciado; aunque sí produciendo una elevada aceleración en la zona próxima a la línea de costa.

En la imagen adjunta se muestran, para el caso pleamar, tanto los valores que alcanza la corriente en el Escenario 0, como la variación que produce la presencia del arrecife artificial.

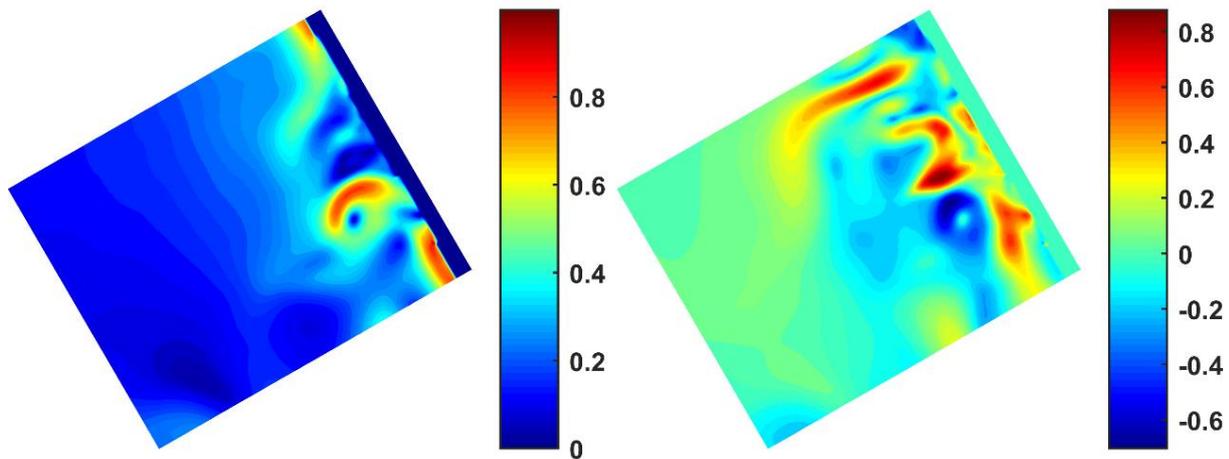


Figura - 61. Comparativa Velocidad. Pleamar.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

En la imagen anterior, en lo referente al Escenario 0 (sin arrecife), se observa con claridad el aumento de la velocidad que introduce el vórtice en el flujo de la corriente. Así mismo, se muestra también como el flujo está siendo arrastrado por dicho vórtice. Por otro lado, la zona donde se produce el cambio brusco de batimetría presenta una zona de remando con velocidades reducidas.

La desviación del flujo que provoca el arrecife artificial hace que éste se acelere dando lugar a un aumento considerable de la velocidad en la parte izquierda de la zona de estudio. Así mismo, el arrecife también da lugar a un aumento de la velocidad sobre éste. En la parte derecha del arrecife, la forma que éste tiene hace que una vez el flujo lo atraviesa, “ataque” el vórtice por su parte superior; originando un aumento de la velocidad en dicha zona y una disminución de ésta sobre el propio vórtice.

Así mismo, las velocidades que se producen como consecuencia de la construcción del arrecife no suponen una peligrosidad para el bañista, a priori.

6.1.6 Nivel del mar

A lo largo del presente apartado se ha estudiado, para el perfil transversal de playa correspondiente al eje del arrecife, la variación que sufre el nivel del mar durante la pleamar tras la construcción del arrecife artificial; identificándose de esta forma la diferencia que provoca éste en lo referente a la cota de inundación.

En la imagen adjunta se muestra, para ambos escenarios (Escenario 0, sin arrecife, y Escenario 1, con arrecife) la cota que alcanza el nivel de marea en el instante pleamar.

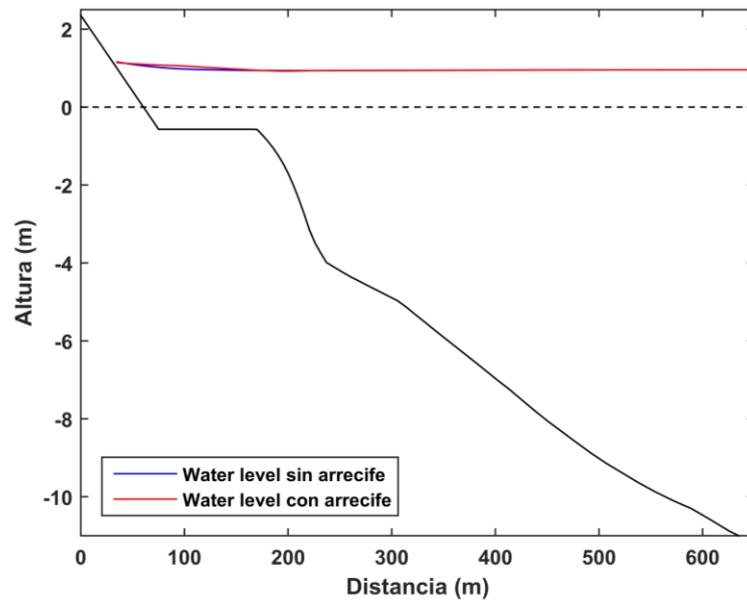


Figura - 62. Comparativa Water Level. Pleamar

Para una mejor visualización de la variación que produce el arrecife artificial en el nivel de marea pleamar, en la imagen adjunta, se ha realizado un zoom en aquella zona que ésta es apreciable.

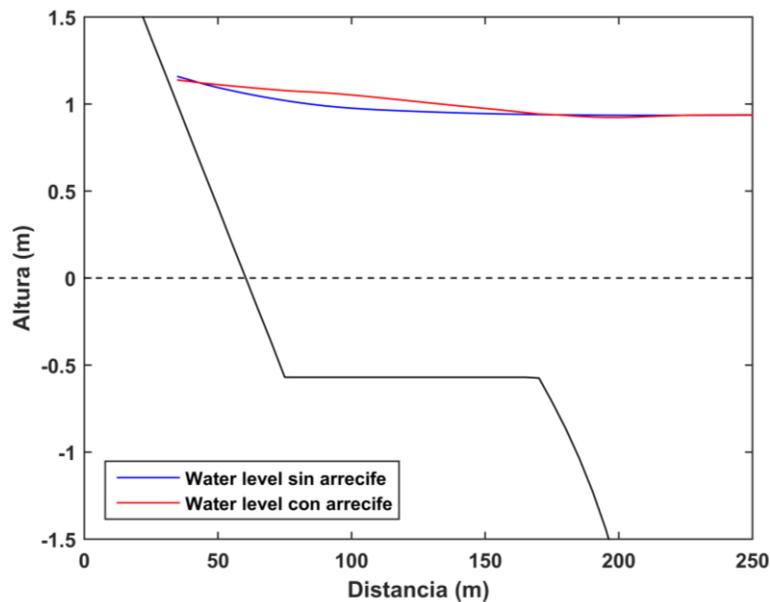


Figura - 63. Comparativa Water Level. Pleamar

En la imagen anterior se puede observar que la construcción del arrecife artificial origina un aumento del nivel de marea sobre la propia vertical donde éste se ubica; extendiéndose dicho incremento hasta la zona de playa emergida. Sin embargo, la cota final que alcanza la marea en el instante pleamar es menor en el Escenario 1 (con arrecife) que en el Escenario 0 (sin arrecife).

Se concluye, por tanto, que el arrecife artificial proyectado reduce la cota de inundación que, durante la pleamar, el mar es capaz de alcanzar.

Así mismo, el modelo numérico empleado en las distintas simulaciones, Delft3D, presenta una serie de carencias para el análisis de la zona de rompientes, por lo que, para el estudio de la cota de inundación, es recomendable el empleo de otro tipo de software (phase resolving) como por ejemplo XBeach, el cual permite caracterizar con gran exactitud los distintos parámetros de estudio en la zona de rompiente próxima a la playa seca.

6.2 Simulación 2

La simulación 2 se corresponde con el estudio de las consecuencias que acarrea la construcción del arrecife artificial cuando la costa de Conil de la Frontera es sometida al oleaje que, en condiciones normales, arremete contra dicha costa, es decir, aquel con la mayor probabilidad de ocurrencia; dirección Oeste (W) y altura de ola comprendida entre 0 – 1 metro.

En la tabla adjunta se recoge, a modo de resumen, las principales características del oleaje analizado.

Simulación 2	
Inicio simulación	24/04/2006 – 15:00
Final simulación	30/04/2006 – 15:00
H_{pico} (m)	1.0
Θ_{pico} (°)	268

Tabla - 7. Simulación 2

6.2.1 Altura de ola

Al igual que en la Simulación 1 expuesta anteriormente, la variación que produce el arrecife artificial, en lo referente a la altura de ola, se va a analizar en los 3 niveles de marea: bajamar, nivel medio y pleamar.

En la imagen adjunta se muestra, para el caso bajamar, la altura de ola que se produce en el Escenario 0 (sin arrecife), así como la variación que la construcción de dicho arrecife produce sobre esta variable.

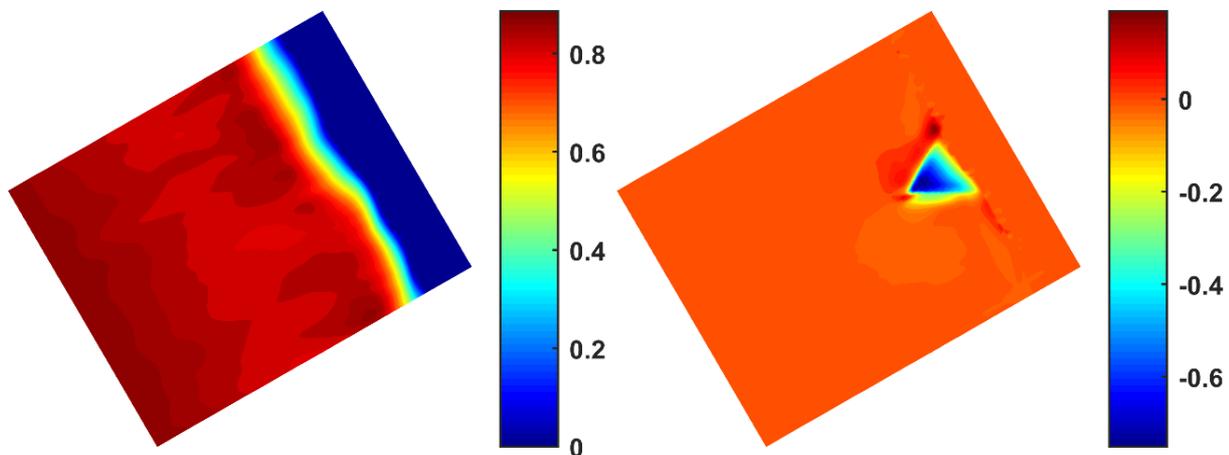


Figura - 64. Comparativa Altura de Ola. Bajamar.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

Se puede observar que la construcción del arrecife produce una variación de la altura de ola que llega a la costa de Conil de la Frontera, pero sólo en el emplazamiento donde éste se sitúa.

El oleaje que se propaga desde la dirección Oeste (W) ataca al arrecife por su cara izquierda, dando lugar a un aumento de la altura de ola como consecuencia de la disminución de la profundidad que ésta se encuentra en su avance (efecto shoaling); siendo dicho aumento más acusado tanto en la punta como en la cola de éste, aunque despreciable en ambos casos. Conforme la profundidad va disminuyendo a medida que la ola avanza sobre el ala (aspa) del arrecife, el rozamiento que le opone el fondo marino aumenta, dando como resultado el colapso de la misma sobre el propio arrecife; donde la profundidad es mínima y la variación de la altura de ola respecto al Escenario 0 (sin arrecife) máxima.

Cuando la marea alcanza su nivel medio, la situación que se produce es similar a la anterior.

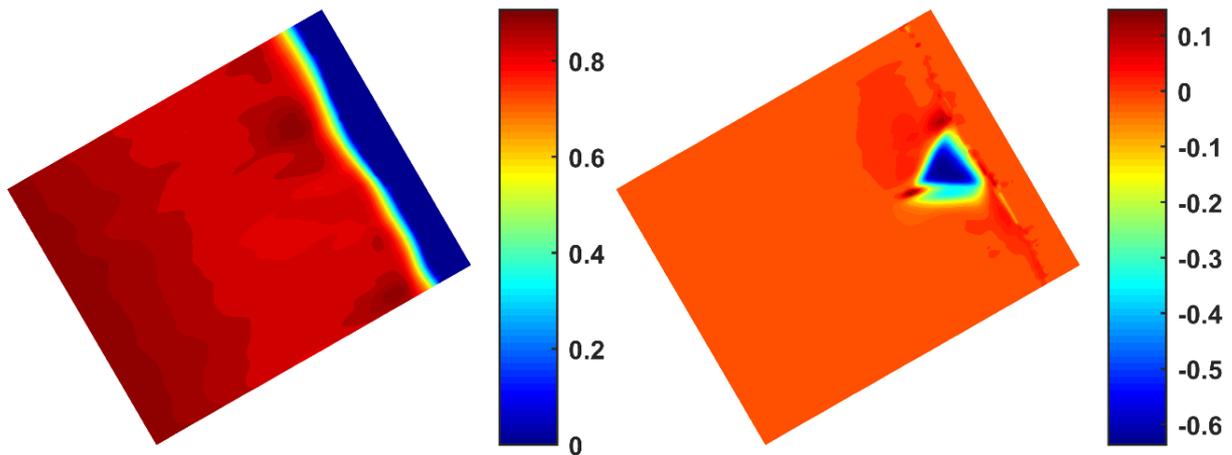


Figura - 65. Comparativa Altura de Ola. Nivel Medio.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

El aumento del nivel del mar respecto al caso anterior permite que el oleaje rompa más cerca de la costa, ya que éste tarda más en “sentir el fondo”. Esto trae como consecuencia alturas de las olas mayores sobre el propio arrecife, dando como resultado que la variación que éste produce sea menor; aunque sigue provocando la rotura del oleaje. Así mismo, el menor calado del cual dispone la ola sobre el ala (aspa) derecha del arrecife, en comparación con el Escenario 0 (sin arrecife) da lugar a una disminución de la altura de la misma en esa zona.

Por otro lado, el arrecife artificial sigue provocando un ligero aumento de la altura de ola tanto en la punta como en la cola de éste, aunque menor que en el caso anterior.

Para el nivel de marea pleamar, las consecuencias que produce el arrecife artificial se muestran en la siguiente imagen.

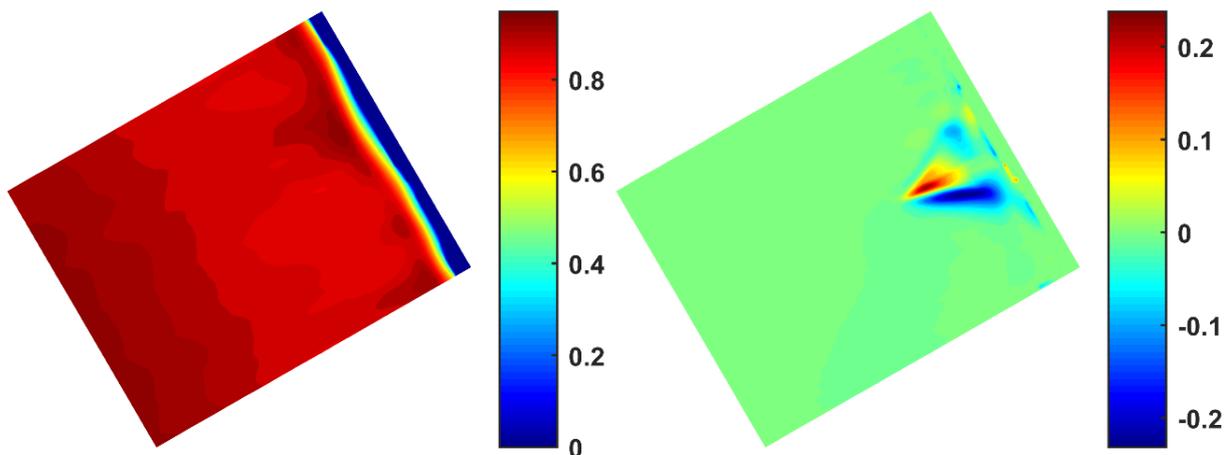


Figura - 66. Comparativa Altura de Ola. Pleamar.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

En primer lugar, se puede observar que el aumento del nivel del mar trae como consecuencia que el oleaje rompa próximo a la línea de costa, permitiendo que sobre la posición del arrecife se produzcan las mayores alturas de ola.

Dicho aumento del nivel del mar origina que el efecto shoaling que se produce debido a la disminución de la profundidad sobre el ala (aspa) del arrecife sea más pronunciado; lo que, sumado a la mayor altura de ola sobre el arrecife, origina que éste se dé sobre propio arrecife, dando lugar a las mayores alturas de ola en esa zona. Así mismo, la baja profundidad que presenta la meseta del arrecife da lugar a que dicho oleaje colapse, provocando una disminución de la altura de ola en la parte derecha del arrecife; aunque mejor que los casos anteriores.

Se concluye, por tanto, que la construcción del arrecife artificial tiene como consecuencia una disminución de la altura de ola en la parte derecha de éste y un aumento de la misma sobre el ala (aspa) izquierda; propagándose incluso dicho efecto a la zona central del propio arrecife.

6.2.2 Línea de costa

A lo largo del presente apartado, se ha llevado a cabo el estudio de las variaciones que produce la construcción del arrecife artificial en lo referente a la línea de costa; las cuales se muestran en la imagen adjunta.

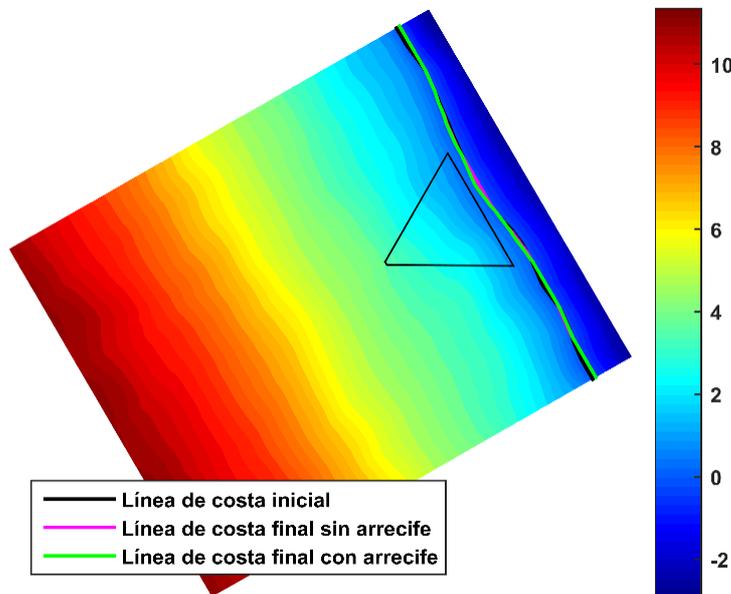


Figura - 67. Comparativa Línea de Costa

Si analizamos en primer lugar la variación que sufre la línea de costa en el Escenario 0 (sin arrecife), se puede concluir que ésta apenas difiere de la situación inicial a excepción de un pequeño tramo de la parte derecha donde sí se puede apreciar una ligera pérdida de playa seca. Así mismo, la erosión observada en los extremos del área de estudio en la Simulación 1, se sigue manteniendo en esta Simulación 2, pero de menor magnitud en el lado derecho.

La construcción del arrecife artificial no produce una variación significativa de la línea de costa respecto a la situación final del Escenario 0 (sin arrecife), aunque sí origina una ganancia de playa seca en la parte posterior de éste; dando lugar, a priori, a la generación del tómbolo característico en este tipo de construcciones.

Se concluye, por tanto, que la construcción del arrecife artificial tiene un efecto positivo en lo referente a la línea de costa, ya que no produce la erosión de la misma y sí un aumento de ésta en la parte posterior del arrecife.

Para una mejor apreciación de los resultados, en la siguiente se muestra únicamente las distintas líneas de costa analizadas y la posición del arrecife artificial.

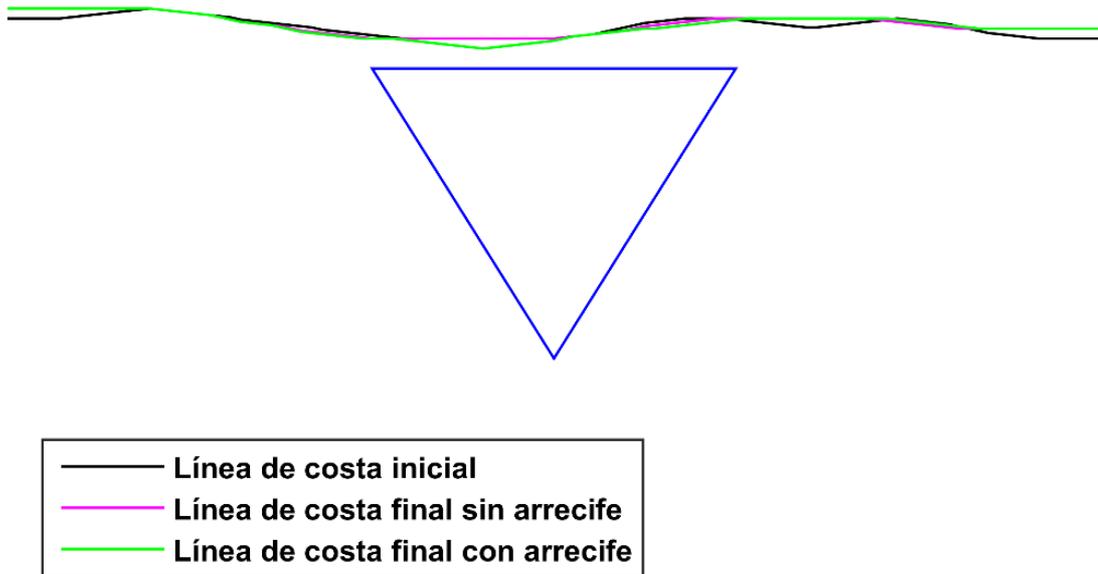


Figura - 68. Comparativa Línea de Costa

6.2.3 Perfil transversal de playa

Con objeto de poder llegar a una conclusión sobre las consecuencias que acarrea la construcción del arrecife artificial en lo referente al perfil de playa, en este apartado se han estudiados los mismos perfiles que se analizaron en la Simulación 1 anterior.

En la imagen adjunta se muestra, para ambos escenarios, la variación que sufre, en la zona izquierda, el perfil transversal de playa.

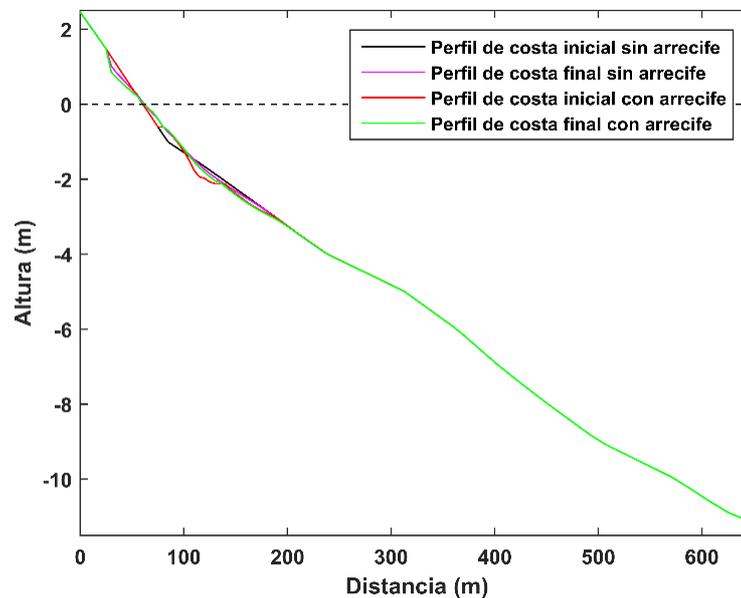


Figura - 69. Comparativa Perfil Transversal Izquierdo

Para una mejor visualización de los cambios que se producen en el perfil transversal de playa, en la siguiente imagen, se ha realizado un zoom en aquella parte donde éstos son apreciables.

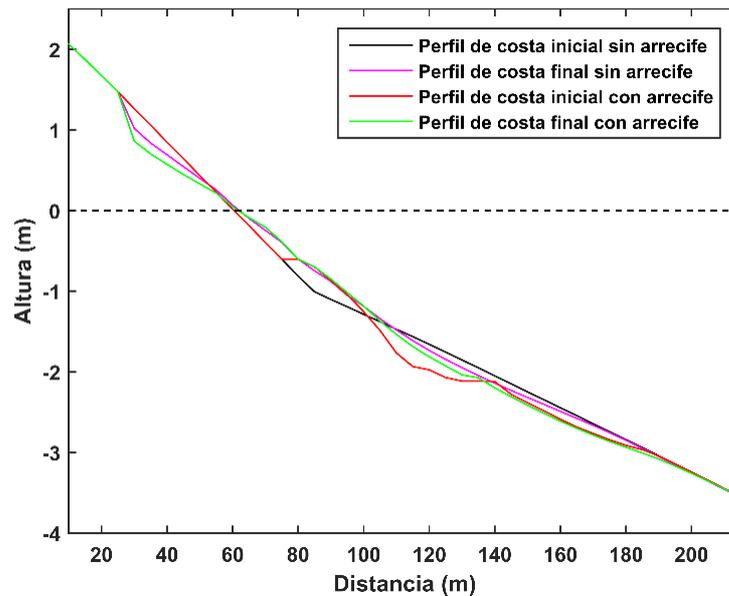


Figura - 70. Comparativa Perfil Transversal Izquierdo

En primer lugar, se puede observar que la ganancia de playa seca que se produce es despreciable tanto en el Escenario 0 (sin arrecife) como en el Escenario 1 (con arrecife).

Así mismo, la tendencia observada en la Simulación 1, en lo referente a la acumulación y pérdida de sedimentos, se sigue manteniendo en esta simulación, es decir, acumulación en las zonas próximas a los cambios brusco de pendiente y erosión en las zonas colindantes.

El perfil inicial del Escenario 0 (sin arrecife) presenta un único cambio de pendiente, dando lugar a la formación de una barra en esa zona (acumulación de material), mientras que en las zonas próximas a ésta el resultado es opuesto, es decir, erosión; extendiéndose dicha erosión hasta la profundidad de cierre.

La construcción del arrecife artificial da lugar a la formación de 2 cambios de pendiente en el perfil: uno en su parte alta y otro en la parte inferior de éste; produciéndose el mismo resultado en ambas ocasiones, es decir, sedimentación sobre dicho cambio de pendiente y erosión en las zonas colindantes. Así mismo, la hipótesis de no erosionabilidad bajo la cual se ha proyectado el arrecife artificial origina una mayor erosión en la parte alta del perfil; la cual se puede observar en la imagen anterior.

Si comparamos ambos escenarios, se concluye que mientras en el Escenario 1 (con arrecife) se originan 2 barras, en el Escenario 0 (sin arrecife) únicamente se produce una.

La menor intensidad del oleaje simulado en este caso origina que los cambios que se producen en el perfil transversal sean de menor intensidad en comparación con la Simulación 1; llegando a producirse erosión en la parte baja del perfil en contra de los observado en la simulación anterior.

El perfil transversal de la playa en la parte central del arrecife es el que se muestra en la imagen adjunta.

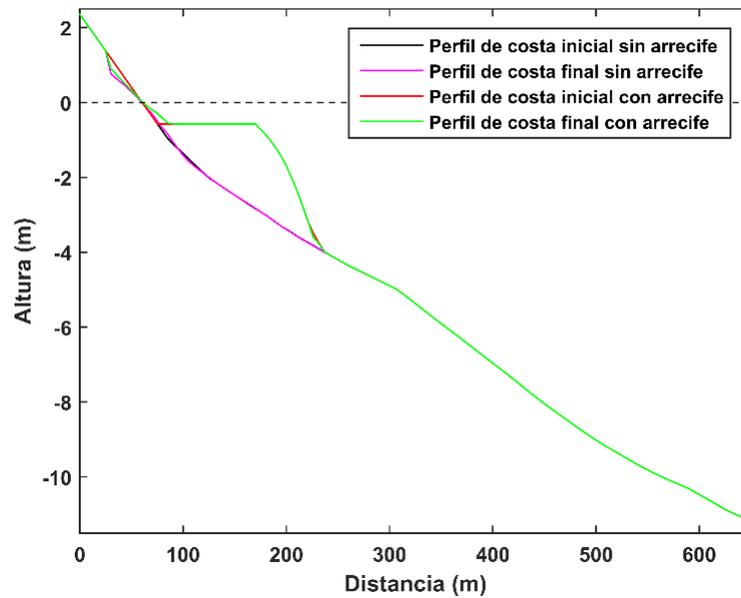


Figura - 71. Comparativa Perfil Transversal Central

Así mismo, se ha realizado un zoom a la parte donde se localiza el arrecife para que los cambios que éste produce sean visibles.

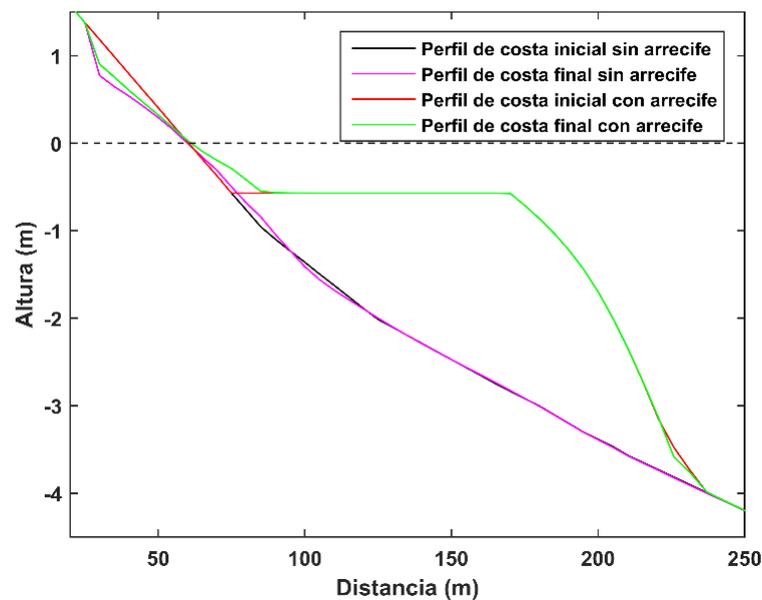


Figura - 72. Comparativa Perfil Transversal Central

La continuidad que presenta el perfil transversal inicial del Escenario 0 (sin arrecife) da lugar a que los cambios que en éste se producen, en la parte de playa sumergida, puedan considerarse despreciable. Sin embargo, la combinación de oleaje simulada provoca una gran erosión de la playa seca.

Por otro lado, el cambio brusco de pendiente que se produce en la parte alta del perfil transversal en el Escenario 1 (con arrecife), como consecuencia de la construcción de éste, favorece la acumulación de sedimentos en dicha zona; lo que origina erosión en la zona de playa emergida, estando ésta impedida en el propio arrecife (hipótesis de no erosionabilidad).

Al comparar ambos escenarios se llega a la conclusión que la construcción del arrecife artificial reduce la erosión que se origina en la zona de playa seca.

Así mismo, la erosión que se produce en la punta del arrecife como consecuencia de la continua incidencia del oleaje es menor en esta simulación debido a la menor energía que contiene el oleaje propagado; siendo igualmente necesaria la toma de medidas en dicha zona para evitar que la erosión se extienda.

Finalmente, el perfil transversal en la parte derecha del arrecife artificial es el que se muestra en la imagen adjunta.

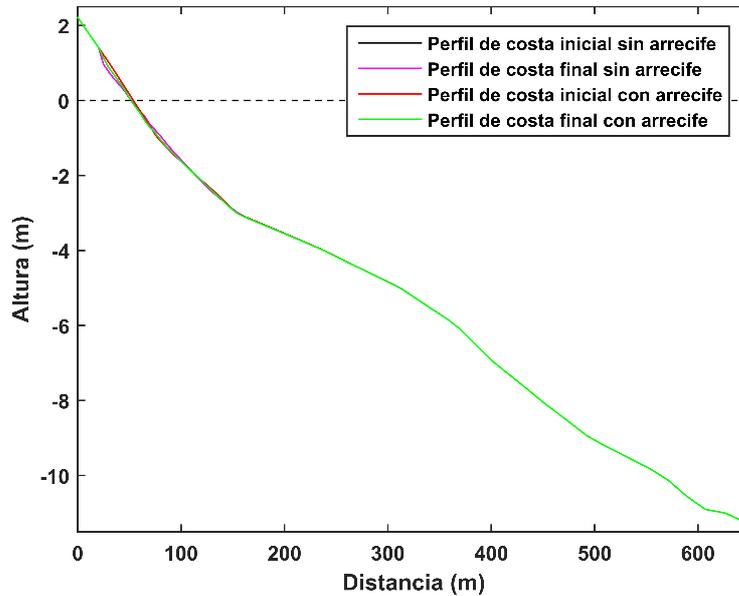


Figura - 73. Comparativa Perfil Transversal Derecho

Al igual que en los perfiles estudiados con anterioridad, se ha realizado un zoom a la zona donde se producen cambios apreciables en la morfología.

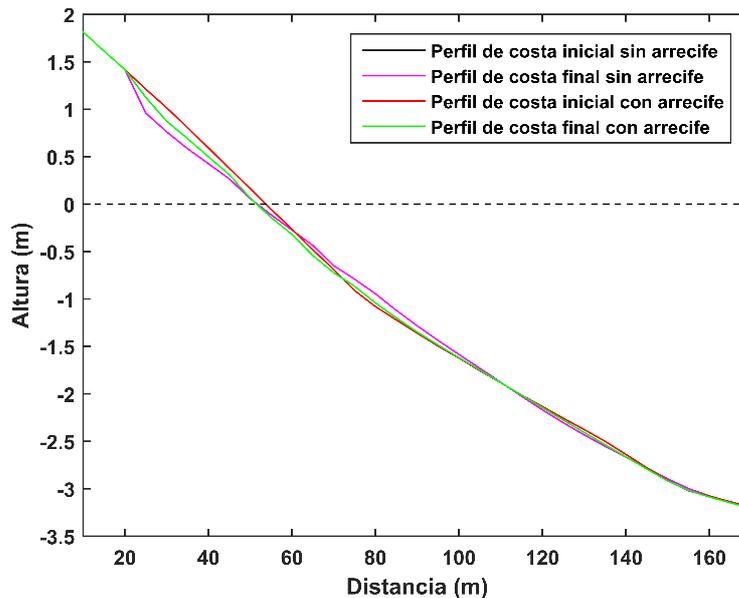


Figura - 74. Comparativa Perfil Transversal Derecho

Como ya se expuso en la Simulación 1 anterior, el perfil transversal inicial es el mismo en ambos escenarios, ya que, a esta distancia, el arrecife no tiene influencia en la batimetría.

En lo referente a la línea de costa, se puede observar que tanto en el Escenario 0 (sin arrecife) como en el Escenario 1 (con arrecife) se produce un retraso de ésta; siendo prácticamente idéntico en ambos escenarios.

Así mismo, el cambio de pendiente que presenta el perfil provoca que sobre éste se acumule material (barra), mientras que en las zonas colindante el efecto sea el contrario, es decir, erosión, tanto en la parte de playa emergida como en la parte inferior del perfil; extendiéndose dicha erosión hasta la profundidad de cierre.

Sin embargo, tras la construcción del arrecife artificial, los cambios en el perfil de playa que se observan son menos pronunciados, es decir, el arrecife reduce la erosión que se produce en la zona de playa seca.

6.2.4 Variación de la batimetría

En la imagen adjunta se muestra, de manera conjunta, la variación que ha sufrido la batimetría tanto del Escenario 0 (sin arrecife) como del Escenario 1 (con arrecife) entre la situación inicial y la situación final; identificándose, con valores negativos, aquellas zonas que, tras la simulación, han aumentado la capa de sedimento disponible (sedimentación), y con positivos, las que han perdido parte de ésta o incluso su totalidad (erosión).

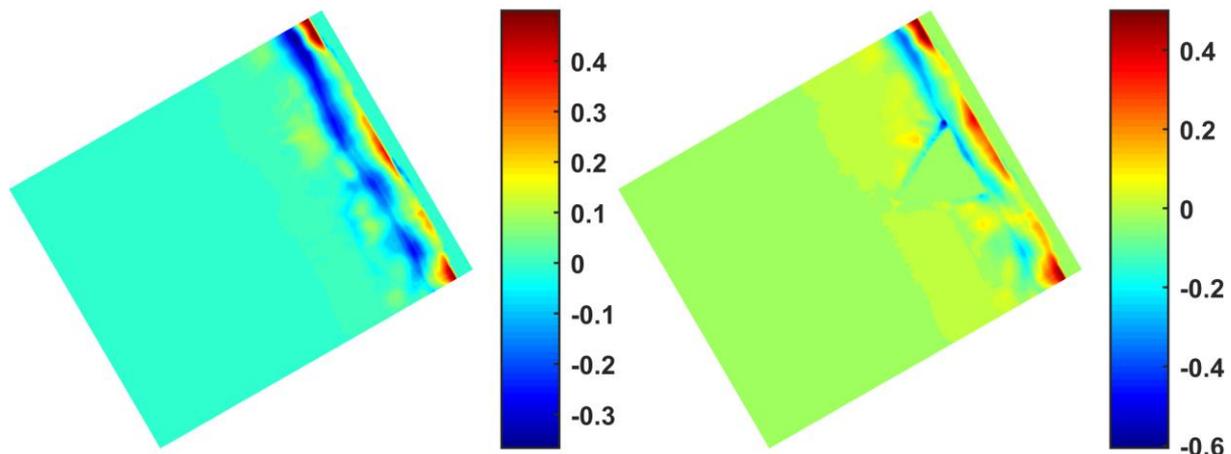


Figura - 75. Variación Batimetría
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)
Rojo indica erosión, azul sedimentación

En la imagen anterior, en lo referente al Escenario 0 (sin arrecife) se puede observar, en la parte superior de la misma, una primera franja de la zona de estudio donde ésta ha sufrido erosión, apreciable en las zonas central y extremas, y de menos envergadura en las zonas intermedias entre éstas; aunque en esta ocasión no se llega a perder la totalidad de la capa de sedimento disponible. Tras esta primera franja, se produce el efecto inverso, es decir, sedimentación; mayor en la parte izquierda de la zona de estudio, aunque igualmente apreciable en la parte derecha de ésta.

Se concluye, por tanto, que el sedimento disponible en el Escenario 0 (sin arrecife) sufre una basculación desde la parte de playa emergida hacia la sumergida; no siendo suficiente dicha basculación para producir una ganancia apreciable de playa seca.

Si analizamos el Escenario 1 (con arrecife) se aprecia que la franja de sedimentación existente en el Escenario 0 (sin arrecife) se ha visto reducida a lo largo de toda el área de estudio. Así mismo, la erosión que se produce en la parte posterior del arrecife es menor en esta ocasión; aunque abarca una extensión mayor. La erosión que se produce en los extremos del área de estudio es similar a la que se origina en el Escenario 0 (sin arrecife), ya que la influencia que tiene el arrecife a dicha distancia es reducida.

Además, la construcción del arrecife artificial origina sedimentación a lo largo de su ala (aspa) izquierda; siendo dicha ala (aspa) la que ejerce de muro al avance del oleaje propagado. Por el contrario, en el ala (aspa) derecha se produce erosión, aunque ésta es despreciable.

En lo referente al eje del arrecife, la punta de éste sufre erosión como consecuencia del oleaje incidiendo sobre la misma, mientras que en su parte posterior se origina la sedimentación del material; siendo dicha sedimentación mayor que en el Escenario 0 (sin arrecife).

Se concluye, por tanto, que la construcción del arrecife artificial origina una menor basculación de sedimentos desde la parte de playa emergida hacia la sumergida; reduciendo de esta forma la pérdida de material en las zonas de playa seca. Además, éste permite un aumento de la sedimentación en su parte posterior, lo que se traducen en un avance de la línea de costa en dicha zona.

Finalmente, en la imagen siguiente se muestra un análisis cualitativo de la variación en la batimetría que provoca el arrecife. En dicha imagen se representa únicamente si el Escenario 1 (con arrecife) produce un efecto totalmente contrario al Escenario 0 (sin arrecife), es decir, sedimentación cuando antes había erosión y viceversa. También recoge el caso que antes no hubiese variación alguna de la batimetría y ahora sí, ya sea erosión o

sedimentación.

Así mismo, al igual que en la Simulación 1 anterior, no se han representado aquellas zonas que no hayan sufrido variación de la batimetría en el Escenario 1 (con arrecife); con objeto de evitar lo expuesto con anterioridad.

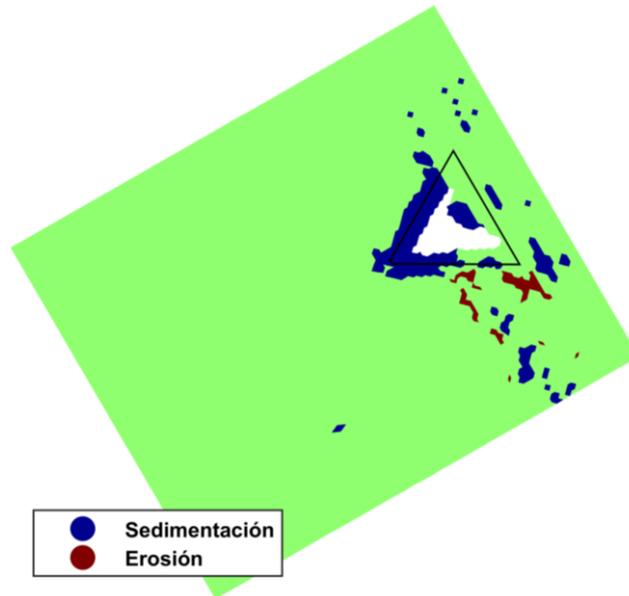


Figura - 76. Comparativa Variación Batimetría

Se concluye que la construcción del arrecife artificial provoca la sedimentación del material sobre su ala (aspa) izquierda, extendiéndose dicha sedimentación hasta parte del ala (aspa) derecha. Así mismo, la presencia de éste origina igualmente sedimentación en su parte posterior, lo que provoca una ganancia de playa seca. Por el contrario, éste da lugar a erosión en su parte, aunque dicha erosión es despreciable.

6.2.5 Campo de velocidad

Los campos de velocidad que se producen tanto en el Escenario 0 (sin arrecife) como la variación que sobre éstos provoca el arrecife artificial se van a analizar en los 3 niveles de marea estudiados en la Simulación 1, es decir, bajamar, nivel medio y pleamar.

En la figura adjunta se muestra, para el caso bajamar, el campo de velocidad existente tanto en el Escenario 0 (sin arrecife) como en el Escenario 1 (con arrecife). Éste se ha representado mediante flechas, lo que permite identificar, de forma rápida, la dirección que toma, así como la magnitud en función del tamaño de las mismas.

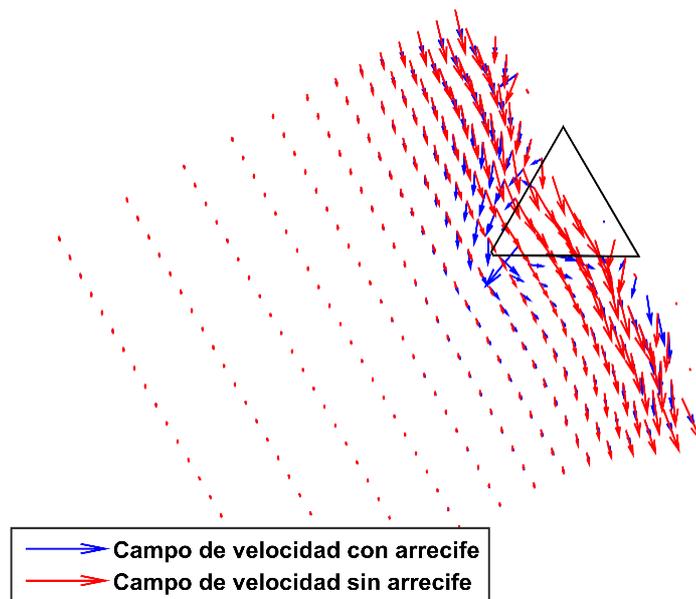


Figura - 77. Comparativa Velocidad. Bajamar

En la imagen anterior se puede observar que el campo de velocidad que se produce tanto en el Escenario 0 (sin arrecife) como en el Escenario 1 (con arrecife) se desplaza en dirección Sur (S) en toda la zona de estudio; como era de esperar dada la dirección de propagación del oleaje (dirección Oeste (O)).

Así mismo, mientras en el Escenario 0 (sin arrecife) ésta se desplaza de forma continua en todo su recorrido, la construcción del arrecife artificial obliga a la corriente a sortear dicho obstáculo, es decir, la corriente tiene que bordear al arrecife con objeto de continuar su desplazamiento hacia el Sur (S).

Finalmente, se va a llevar a cabo un estudio de los cambios que produce dicho arrecife en lo referente a la velocidad que alcanza la corriente en cada zona del área de estudio. Para ello, se muestra en la parte izquierda de la siguiente imagen la velocidad de la corriente en el Escenario 0 (sin arrecife) y en la derecha la variación que en ésta provoca el arrecife artificial.

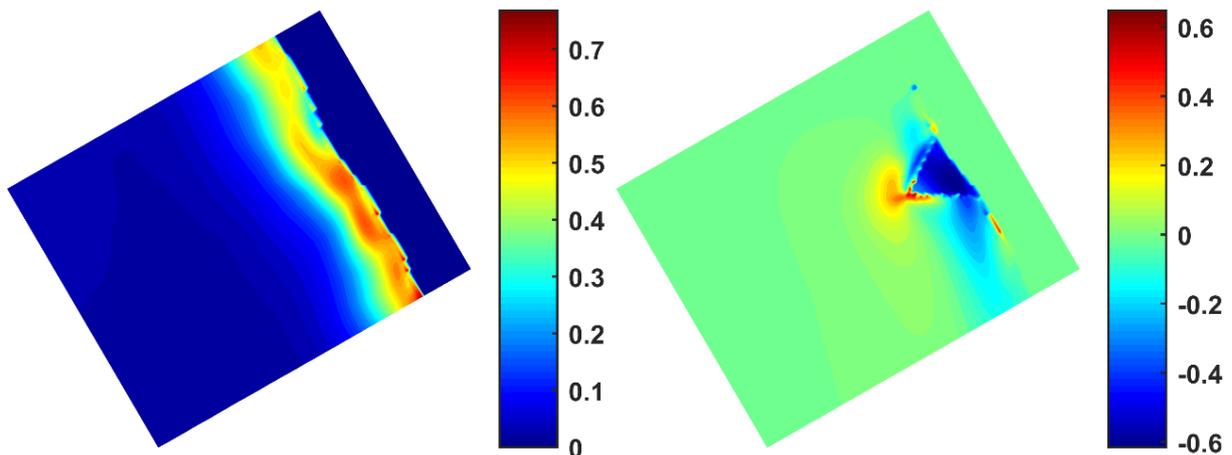


Figura - 78. Comparativa Velocidad. Bajamar.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

La velocidad que alcanza la corriente longitudinal en el Escenario 0 (sin arrecife) a lo largo de la zona de estudio es prácticamente constante en todo su recorrido. Por el contrario, la desviación que tiene que hacer ésta para sortear el arrecife artificial origina un aumento de la velocidad en la punta de éste; velocidad que se ve reducida en el trasdós del arrecife (según el sentido de avance de la corriente) e incluso llega a anularse sobre la meseta de dicho arrecife dada la baja profundidad que presente el nivel de marea estudiado.

Así mismo, aunque el aumento de la velocidad en la punta del arrecife puede llegar a alcanzar valores elevados, éstos no suponen ningún peligro para el baño.

Cuando la marea alcanza su nivel medio, el campo de velocidades, para ambos escenarios, es el que se muestra en la siguiente imagen.

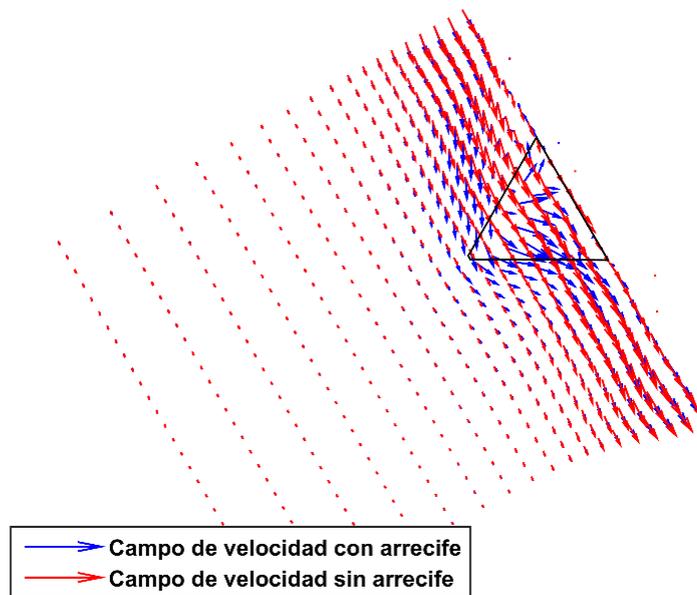


Figura - 79. Comparativa Velocidad. Nivel Medio

Al igual que en el caso bajamar, la corriente presenta, en ambos escenarios, una dirección Sur (S) en su avance en toda el área de estudio; aunque en esta ocasión, la corriente “inunda” completamente al arrecife.

Así mismo, la mayor columna de agua existente sobre el arrecife, como consecuencias del aumento del nivel del mar, permite que parte de la corriente se desplace por encima de éste, es decir, la construcción del arrecife artificial no obliga a toda la corriente a bordearlo para poder continuar su avance.

En la imagen siguiente se muestra tanto la velocidad que alcanza la corriente en el Escenario 0 (sin arrecife) como la variación que, sobre ésta, produce el arrecife artificial, para el nivel medio de marea.

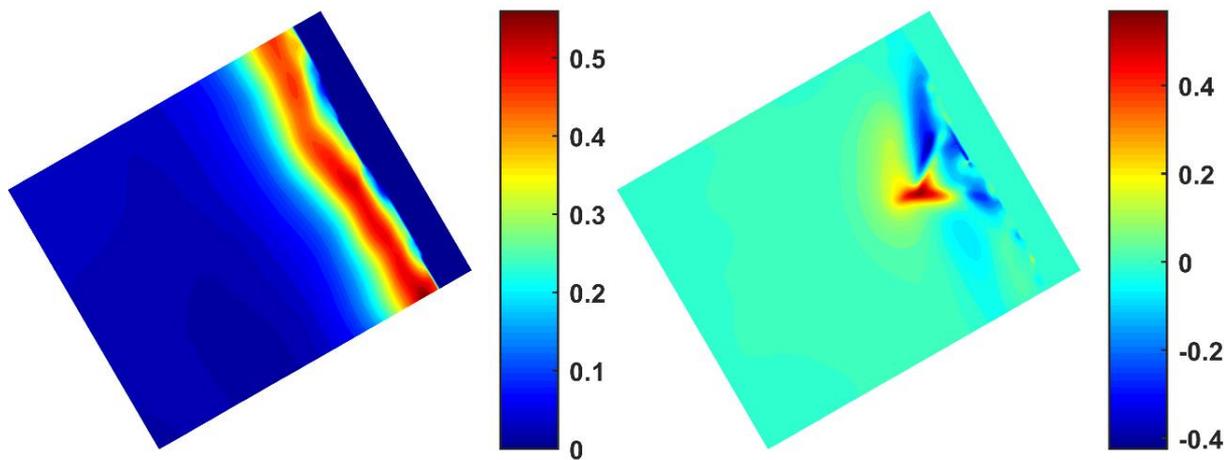


Figura - 80. Comparativa Velocidad. Nivel Medio.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

En la imagen anterior se puede observar que la homogeneidad que presenta la velocidad de la corriente en su avance hacia el Sur (S) en el Escenario 0 (sin arrecife) se ve distorsionada por la presencia del arrecife, el cual provoca que la corriente procedente del Norte (N) tienda a buscar la punta para poder rebasarlo; dando lugar a una zona de remando en la parte izquierda del arrecife. Esto provoca una aceleración de la corriente a su paso por la punta, para finalmente adoptar la corriente, en el trasdós del arrecife, la velocidad que presenta en el Escenario 0 (sin arrecife).

Así mismo, el aumento del nivel del mar también da lugar a la existencia de corrientes en la parte posterior del arrecife, aunque, dada la menos profundidad que ofrece el arrecife, las velocidades de éstas son menores que en

el Escenario 0 (sin arrecife).

A pesar de que la corriente sufra una aceleración a su paso por la punta del arrecife, los valores que se alcanzan no suponen un peligro para el baño.

El último nivel de marea estudiado, pleamar, presenta el siguiente campo de velocidad; mostrándose en la misma imagen el correspondiente para cada escenario analizado.

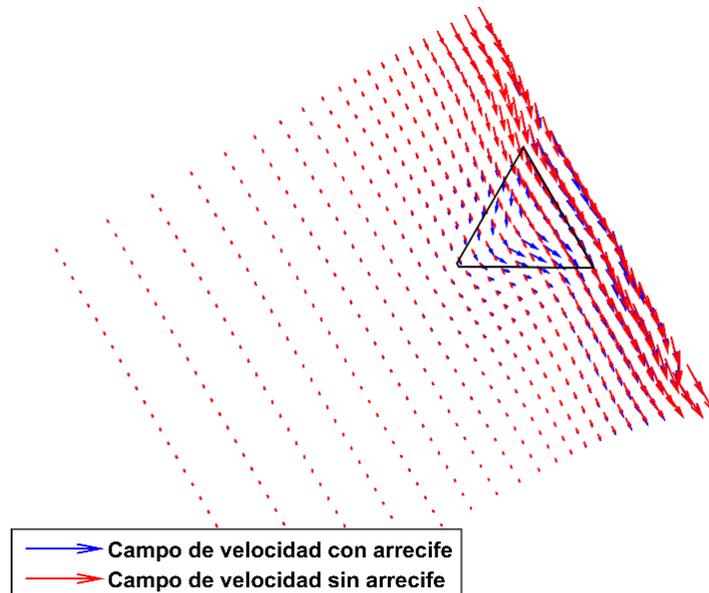


Figura - 81. Comparativa Velocidad. Pleamar

Cuando la marea alcanza su nivel más alto, la corriente longitudinal que avanza en dirección Sur (S) se traslada más cerca aún de la línea de costa; dando lugar a que el flujo de corriente, en el Escenario 0 (sin arrecife), se produzca en la parte posterior de donde se localiza el arrecife artificial.

Esto provoca que, tras la construcción del arrecife artificial, toda la corriente pase prácticamente por encima de éste; siendo mínima la porción de ésta que bordea al arrecife.

En la imagen adjunta se muestran, para el caso pleamar, tanto los valores que alcanza la corriente en el Escenario 0, como la variación que produce la presencia del arrecife artificial.

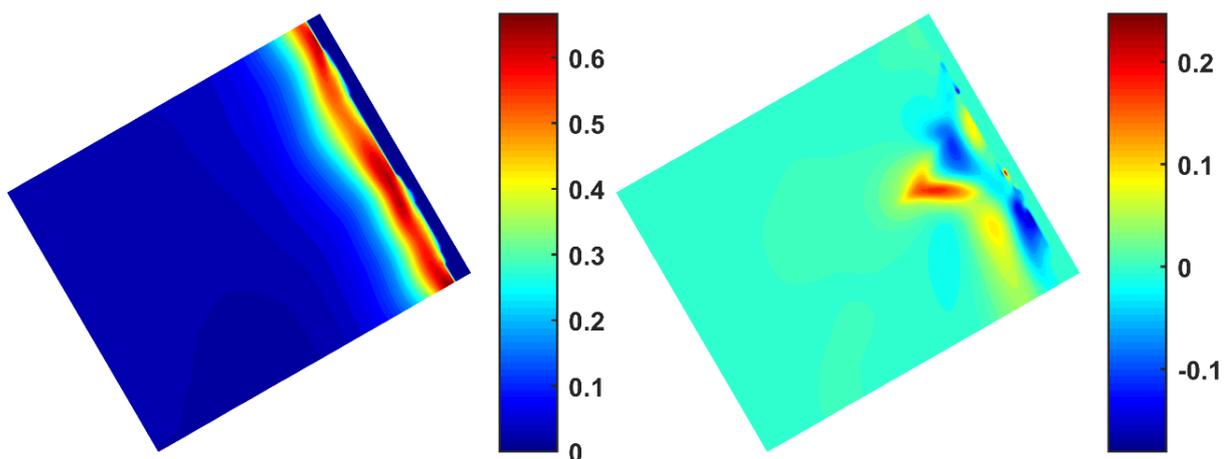


Figura - 82. Comparativa Velocidad. Pleamar.
Escenario 0 (Izquierda) - Variación Arrecife (Derecha)

A pesar de que la corriente que bordea al arrecife es mínima, la punta de éste sigue provocando la aceleración del flujo; aunque las velocidades que se alcanzan, tanto aquí como en el trasdós del arrecife (según el sentido de avance de la corriente) son despreciables.

En lo referente a las velocidades que se generan en la parte posterior del arrecife, éstas no sufren una gran

variación tras la construcción del arrecife artificial, ya se producen en la zona donde la batimetría del Escenario 0 (sin arrecife) y el Escenario 1 (con arrecife) son idénticas.

Se concluye, por tanto, que las velocidades que se generan no suponen un peligro para el baño.

6.2.6 Nivel del mar

En la imagen siguiente se muestra la variación que sufre el nivel de marea pleamar tras la construcción del arrecife artificial; estudiándose esta variable sobre el perfil transversal de playa correspondiente el eje del arrecife.

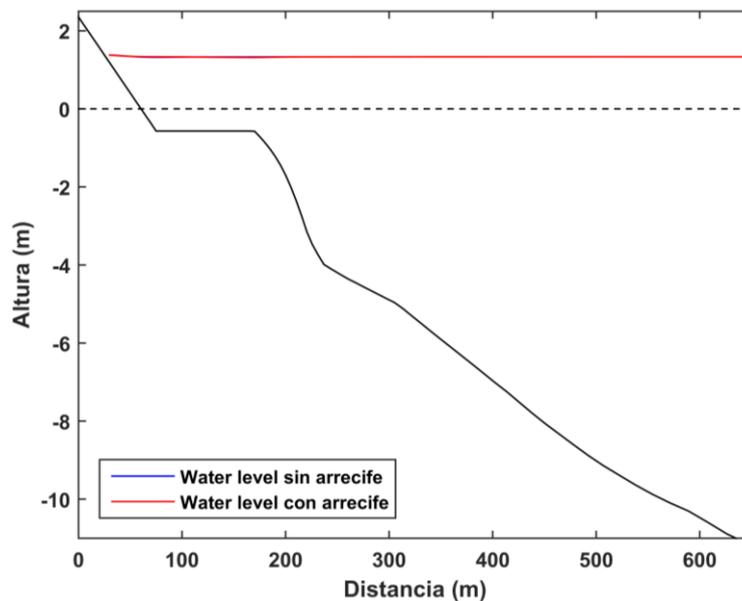


Figura - 83. Comparativa Water Level. Pleamar

Así mismo, con objeto de visualizar la diferente cota que alcanza el nivel de marea en ambos escenarios de estudio (Escenario 0 (sin arrecife) y Escenario 1 (con arrecife)), se ha realizado un zoom a la zona donde esta variación es apreciable.

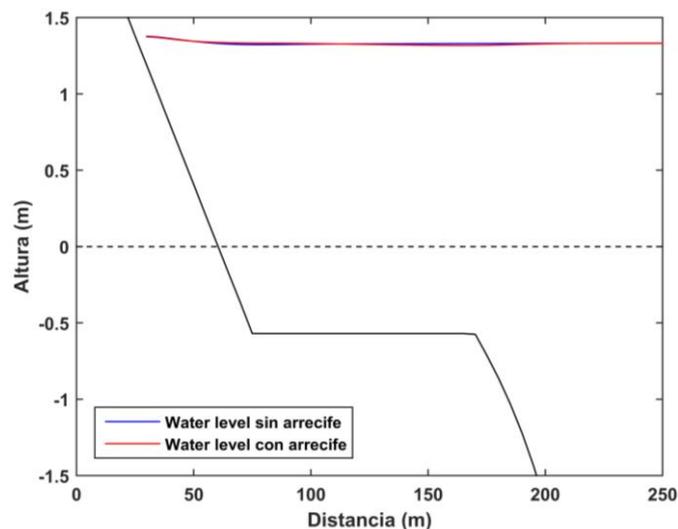


Figura - 84. Comparativa Water Level. Pleamar

En la imagen anterior se observa que el arrecife artificial no introduce cambios significativos en la cota de inundación; considerándose de esta forma despreciable la variación que el Escenario 1 (con arrecife) experimenta respecto al Escenario 0 (sin arrecife).

Así mismo, como ya fue expuesto en la sección 6.1.6 Nivel del mar, haría falta un modelo más detallado para

analizar la cota de inundación.

7. Conclusiones

En el presente Trabajo Fin de Máster se han analizado las consecuencias que acarrea la construcción de un arrecife artificial en la costa de Conil de Frontera. Para ello, se han simulado dos combinaciones de oleaje con características muy diferentes: un temporal procedente de la dirección más desfavorable, cuyo pico de la tormenta presenta un periodo de retorno de 25 años (Simulación 1), y aquel oleaje con una mayor probabilidad de ocurrencia, es decir, el procedente de la dirección Oeste (W) y cuya altura de ola se mantiene en el rango 0 – 1 metro (Simulación 2).

A continuación, se expone, para cada una de las simulaciones realizadas, las conclusiones que se han obtenido tras el comparativo entre ambos escenarios (Escenario 0, sin arrecife, y Escenario 1, con arrecife) en términos de hidrodinámica y morfodinámica.

Para la Simulación 1, las conclusiones halladas son las que se recogen en el listado adjunto:

- La altura de ola disminuye sobre el emplazamiento donde el arrecife se ubica. Sin embargo, se origina un aumento de la misma en las zonas colindantes a éste; dando lugar a que ola propagada rompa más cerca de la línea de costa.
- La basculación que se produce del material desde la parte de playa seca hacia la zona de playa sumergida es excesiva provocando una gran erosión de la playa emergida; aunque no necesariamente el retraso de la línea de costa.
- La línea de costa sufre un gran retroceso en la parte derecha de la zona de estudio. Así mismo, el avance de playa seca que se origina en el resto de ésta es mucho menor que si no existiera el arrecife; a excepción de la zona central donde se empieza a formar el tómbolo característico en este tipo de construcciones.
- La construcción del arrecife artificial favorece la acumulación de sedimento tanto en la mitad delantera como en las alas (aspas) de éste. Por el contrario, la punta del arrecife sufre una gran erosión como consecuencia del temporal incidiendo sobre ésta.
- Se producen zonas con velocidades elevadas tanto en la punta del arrecife como en las alas (aspas) de éste que pueden suponer un peligro para el baño.
- El nivel de marea para el caso pleamar aumenta sobre el propio arrecife. A pesar de ello, la cota de inundación tras la construcción del arrecife disminuye.

Para la Simulación 2, las conclusiones que se han obtenido son las siguientes:

- La altura de ola propagada sufre un ligero aumento al encontrarse con éste, para posteriormente colapsar debido a la baja profundidad que ofrece el arrecife; manteniendo constante en el resto de la zona de estudio en comparación con la situación sin arrecife.
- La línea de costa se mantiene invariable a excepción de la zona posterior del arrecife donde se produce una ganancia de playa seca al originarse el tómbolo característico en este tipo de construcciones.
- La basculación de material desde la zona de playa emergida hacia la sumergida es, en general, menor que si el arrecife no existiera.
- La construcción del arrecife artificial favorece la acumulación de sedimento tanto en la mitad delantera como en las alas (aspas) de éste. Por el contrario, la punta del arrecife sufre cierta erosión como consecuencia del oleaje incidiendo continuamente sobre ésta.
- El arrecife provoca una disminución de la corriente longitudinal en el tramo más próximo a la línea de

costa. Así mismo, el aumento de la velocidad que se produce en la punta de éste no llega a alcanzar valores excesivos que supongan un peligro para el baño.

- No se produce una variación apreciable de la cota de inundación.

A modo de resumen, se concluye que el arrecife artificial proyectado tiene un efecto positivo sobre la costa de Conil de la Frontera cuando ésta es sometida a la influencia del oleaje con mayor probabilidad de ocurrencia. Por el contrario, en el caso de que ésta se vea afectada por un temporal procedente de la dirección más desfavorable, dicho arrecife artificial origina unas consecuencias más adversas sobre la costa que si éste no se hubiera construido. Por tanto, como líneas de trabajo futuras se propone un estudio a largo plazo para evaluar el efecto de series temporales en las que se sucedan condiciones de calma (la más probables) con condiciones de temporal.

8. Recomendaciones

La construcción del arrecife artificial acarrea una serie de consecuencias sobre la costa de Conil de la Frontera. Es por ello por lo que, a continuación, se recogen algunas recomendaciones a tener en cuenta tanto durante el diseño del arrecife artificial como tras la construcción de éste.

- Se recomienda un estudio más detallado y profundo de la gran erosión que produce el arrecife a la derecha de éste cuando un temporal arremete contra la costa, con objeto de reducir la gran pérdida de material que se produce en dicha zona; así como un estudio de viabilidad de regeneración de playa en el caso de que dicha erosión no fuese subsanable.
- Estudio de viabilidad sobre la corrección de la mayor profundidad existente en la parte derecha del arrecife con respecto a la izquierda, con objeto de evitar la formación de alturas de olas mayores en dicho emplazamiento ante la presencia de un temporal.
- Desde el punto de vista de las autoridades competentes en materia de seguridad del baño, las velocidades que se alcanzan tanto en la punta como en las alas (aspas) del arrecife pueden llegar a ser peligrosas para el baño, por lo que habrá de tenerse esto en cuenta a la hora de indicar, mediante banderas, la peligrosidad que presentar el mar a la hora del baño.
- Se ha concluido que la constante incidencia del oleaje sobre la punta del arrecife provoca la erosión de la misma; mayor en el caso de un temporal. Por tanto, se recomienda la protección a ésta, mediante escollera, a fin de evitar que el continuo oleaje llegue a degradar el material que constituye el arrecife artificial, provocando el colapso de éste.
- A pesar de que la cota de inundación que se alcanza tras la construcción del arrecife no varía de forma excesiva respecto a la que se produce cuando éste no existe, se recomienda el empleo de softwares especializados para el estudio de esta variable.

9. Bibliografía

- Alejandro López Ruiz. (2018). Variación del nivel del mar. Puertos y Costas. Universidad de Sevilla.
- Black, M. y Mead, S. (2009). Design of Surfing Reefs.
- Cristina Aguilar Correa. Modelado hidrodinámico de la flecha de El Rompido y su entorno. (Trabajo Fin de Máster). (2016). Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.
- Deltares (2011). Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-dimensional Hydrodynamic Flow and Transport Phenomena, Including Sediments - User Manual.
- Hearing, J.M. (2006). Preliminary design of an artificial surfing reef for Cocoa beach, Florida. s.l.: M.Sc. thesis, Florida Institute of Technology, Melbourne, FL.
- José María Tortolero Jara. Diseño y optimización de arrecifes artificiales para la práctica de surf (Trabajo Fin de Máster). (2017). Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.
- Lesser, G., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M, y Stelling, G.S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. 51:883-915.
- Mendonça, Ana, et al. (2012). Hydrodynamics around an Artificial Surfing Reef at Leirosa, Portugal. Joarnal of waterway, port, coastal, and ocean engineering.
- Neves, M. (2006). Artificial Surfing Reefs: The preparation of physical tests and the theory behind.
- Nienhuis, J.H., Ashton, A.D., Nardi, W., Fagherazzi, S., Giosan, L. (2016). Alongshore sediment bypassing as a control on river mouth morphodynamics; 664-683.
- Ortega-Sánchez, M., Fachin, S., Sancho, F., & Losada, M. A. (2008). Relation between beachface morphology and wave climate at Trafalgar beach (Cádiz, Spain). Geomorphology, 99(1-4), 171-185
- Ranasinghe, M., Turner, I.L. y Symonds, G. (2006). Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: A numerical and physical modeling study. s.l.: Journal of Coastal Engineering.
- Voorde, M.T. (2009). Contributions to the design of multi-functional artificial reefs. s.l.: PhD thesis, Dept. of Civil Engineering.
- Voorde, M.T., Neves, M.G. y Antunes do Carmo, J.S. (2008). Preliminary study on the geometry of an artificial reef for coastal protection and surfing along the West coast of Portugal. s.l.: J. Integ. Coastal Zone Manage.
- Whitham, G (1974). Linear and nonlinear waves. Wiley.

