

Trabajo Fin de Grado Ingeniería Civil

Hidrodinámica de playas heterogéneas: aplicación a la playa de Carchuna (Granada).

Autor: Rafael Vázquez Villalba

Tutor: Alejandro López Ruiz

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Sevilla, 2016



Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería de Civil

Hidrodinámica de playas heterogéneas: aplicación a la playa de Carchuna (Granada).

Autor:

Rafael Vázquez Villalba

Tutor:

Alejandro López Ruiz

Profesor ayudante doctor

Dep. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Hidrodinámica de playas heterogéneas: aplicación a la playa de Carchuna (Granada).

Autor: Rafael Vázquez Villalba

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, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, a mi tutor y previamente profesor, Alejandro López, que me ha guiado en la elaboración de éste documento y que me ha transmitido su gusto por la ingeniería marítima y el oleaje.

También quiero agradecer a mis padres y a mis amigos, personas que me han acompañado durante todo mi proceso formativo, todo el apoyo que me han dado siempre y el que espero que me sigan dando.

No puedo dejar de mencionar el maravilloso grupo de personas que conforman la generación del Grado en Ingeniería Civil 2012-2013, con las que las horas de clase han sido especialmente amenas y en descansos de clase, me recordaba a la clase que tenía en la escuela en la que estudié. Muchas gracias por hacer piña entre todos como pocos pueden, y por hacer de estos cuatro años dignos de recordar y de seguro, recordados por todos nosotros.

Por último y no por ello menos importante, me gustaría dedicarlo a mis profesores de la escuela, especialmente a Cristina Giménez por saber sacar de mí lo que más me gustaba y, sobre todo, por apoyarme y creer en mí siempre.

Resumen

La playa de Carchuna, situada en Granada, al sureste de la Península Ibérica en la vertiente sur de Sierra Nevada, presenta seis puntas en localizaciones fijas a lo largo de la línea de costa y fijas en el tiempo, pero sin ningún patrón aparente. Sin embargo, éstas varían su longitud con el tiempo, dependiendo del transporte de sedimentos que el oleaje produzca en un determinado periodo de tiempo (Ortega-Sánchez et al., 2010).

El presente documento pretende analizar la afección del Cañón de Jolúcar, un valle fluvial sumergido extinto de la vertiente mediterránea, sobre el oleaje y el transporte longitudinal de sedimentos ya que la relación entre estos no está totalmente definida. Se estudiará para distintos estados de mar y distintos escenarios batimétricos para desvelar el rol del cañón en la formación de los denominados “horns”. También juegan un papel fundamental las ondulaciones de la cuña litoral, que se encuentran al Este del cañón, y los grandes ángulos de incidencia del oleaje en la costa.

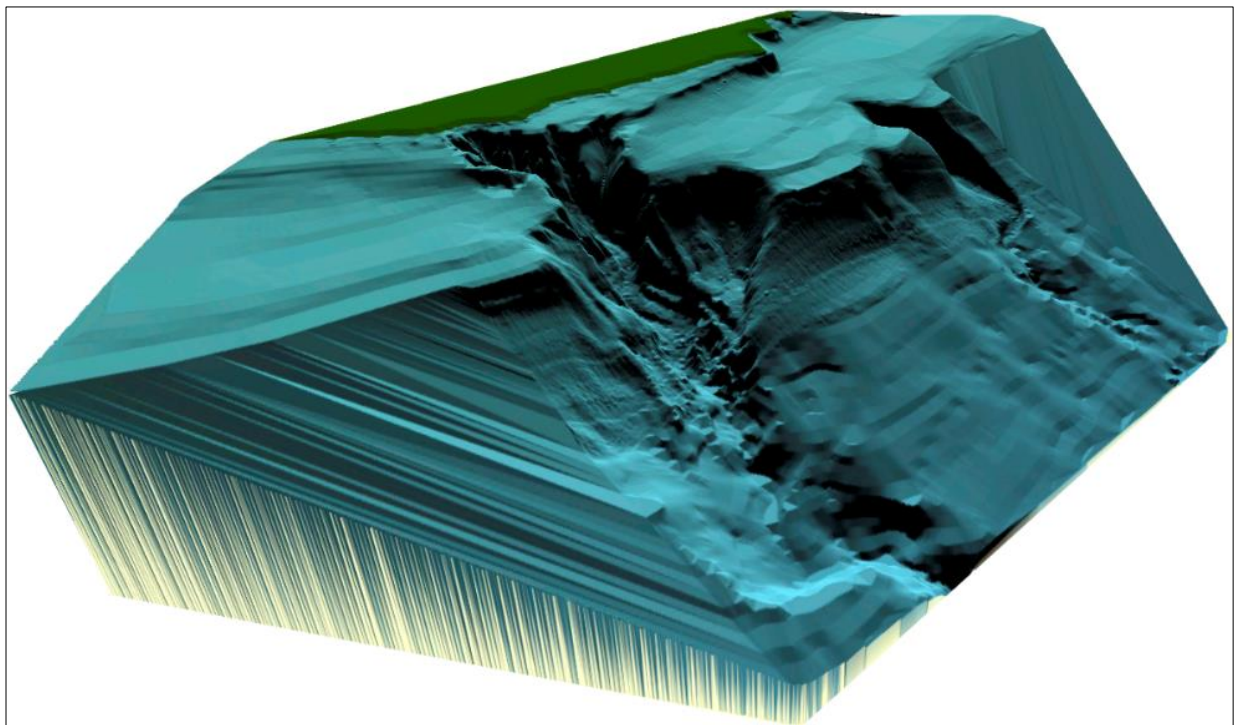


Ilustración 1. Batimetría de la playa de Carchuna. Modelo 3D

Para ello se pretende comparar cualitativamente la altura de ola que llega a cada uno de los puntos del área de estudio bajo unas condiciones de oleaje concretas que se verán más adelante. Éstas intentan ser representativas de 4 combinaciones de dos características de oleaje (clima medio y extremo con oleajes provenientes del Este y del Oeste).

Para el cálculo de las alturas de ola en el área de estudio de los estados de mar convenientes se considerarán el aperaltamiento y reflexión mediante el modelo SWAN, el cual se implementará a través de DELFT3D. Tras la exportación de los datos del modelo al programa MatLab, se generarán perfiles transversales a la línea de consta para estudiar las propiedades que presentan cada uno de ellos.

La comparación de las alturas de ola arrojará datos de las distintas distribuciones de la energía sobre la superficie del Mar de Alborán en la zona que nos concierne, mientras que las alturas de ola en rotura para cada uno de los perfiles permitirán calcular el transporte longitudinal del sedimento, dato crucial a la hora de saber cuáles son las zonas de erosión y cuáles las de deposición, elaborando así un mapa de transporte. Todo este posprocesado se llevará a cabo mediante el entorno de programación MATLAB.

Por último, se pretende calcular el transporte neto longitudinal, principal formador de las puntas, producido durante un periodo prolongado de tiempo.

De todos éstos estudios se deduce que la hidromorfodinámica la rigen dos grupos de accidentes geográficos; por un lado, el cañón submarino determina la forma del cabo Sacratif y alrededores hasta H-2, y por otro la cuña de la IPW influye indistinguiblemente en la forma del resto de puntas, modelándolas con los regímenes de oleaje provenientes del Este y del Oeste.

Abstract

Carchuna beach, located in Granada, southeast of the Iberian Peninsula in the southern slope of Sierra Nevada, presents six horns at fixed locations along the coastline and fixed in time, but no apparent pattern. However, they vary in length over time, depending on sediment transport that waves produce in a given period of time (Ortega-Sánchez et al., 2010).

This paper aims to analyze the condition Jolúcar Canyon, an extinct river valley submerged in the Mediterranean side, on the waves and longshore sediment transport because the relationship between these is not fully defined. It will be studied for different states of sea and different bathymetric scenarios to reveal the role of cannon in the formation horns. They also play a key role the undulations of the infralitoral prograding wedge, to the east of the canyon, and large angles of incidence of waves on the coast.

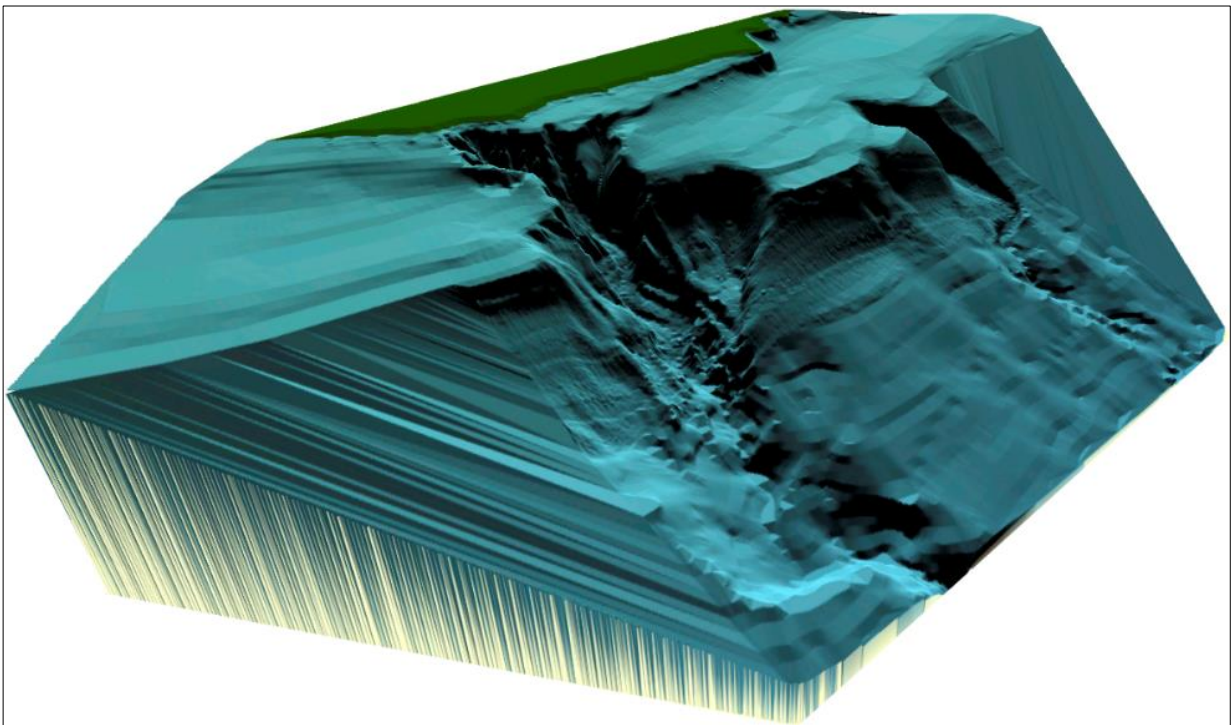


Ilustración 2. Bathymetry of Carchuna Beach. 3D model

This is intended to compare qualitatively the wave height that reaches each of the points of the study area under conditions of specific states of sea that will be discussed later. These are representative of 4 combinations of wave characteristics (mean and extreme weather with waves from the East and West).

In order to calculate wave heights in the study area reflexion and shoaling will be considered by the SWAN model, which will be implemented through DELFT3D. After exporting model data to MatLab programming environment, cross sections profiles will be generated to study the properties presented in each one of them.

Comparison of wave heights will yield data from different distributions of energy on the surface of the Alborán Sea, concretely in the area that concerns us, while wave heights at break for each of the profiles allow us to calculate the longitudinal transport sediment, crucial information to know which are the areas of erosion and deposition, thus drawing up a transport map. All this postprocessing is carried out using MATLAB programming environment too.

Finally, it is intended to calculate the net longitudinal transport, main agent in horns formation, produced over a long period of time.

From these studies we deduce that hydromorphodynamics is governed by two groups of landforms; on the one hand, the submarine canyon determines how Cape Sacratif and environs to H-2, and on the other hand wedge IPW influences indistinguishably in the form of the rest of the horns, modeling them with regimes waves from the East and West.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiv
Índice	xvi
Índice de Tablas	xviii
Índice de Figuras	xx
1 Introducción	23
2 El sistema litoral de Carchuna	25
2.1 <i>El sistema litoral de Carchuna</i>	25
2.2 <i>Geomorfología</i>	25
2.3 <i>Clima marítimo</i>	29
3 Metodología	33
3.1 <i>Hipótesis de partida</i>	33
3.2 <i>Área de estudio</i>	34
3.3 <i>Propagación de oleaje y cálculo de transporte de sedimentos</i>	38
3.4 <i>Simulación de series temporales largas</i>	46
4 Resultados de los casos representativos	51
4.1 <i>La hidrodinámica de Carchuna</i>	51
4.2 <i>Comparación de los escenarios uno y dos</i>	54
4.3 <i>Comparación de los escenarios uno y tres</i>	57
4.4 <i>Comparación de los escenarios uno y cuatro</i>	59
4.5 <i>Comparación de los escenarios uno y cinco</i>	61
4.6 <i>Comparación de los escenarios uno y seis</i>	63
4.7 <i>Comparación de los escenarios uno y siete</i>	65
5 Resultados para la serie temporal larga	68
5.1 <i>Comparación de los escenarios uno y dos</i>	68
5.2 <i>Comparación de los escenarios uno y tres</i>	70
5.3 <i>Comparación de los escenarios uno y cinco</i>	71
5.4 <i>Comparación de los escenarios uno y seis</i>	73
5.5 <i>Comparación de los escenarios uno y siete</i>	74
5.6 <i>Mapas de transporte</i>	76
6 Conclusiones	80
7 Líneas futuras de investigación	82
Referencias	83
Anexo i. Códigos de Matlab	84

Índice de Tablas

Tabla 1. Estudio cualitativo. Oleajes representativos	31
Tabla 2. Presencia de los distintos agentes morfológicos en las batimetrías	37
Tabla 3. Número de nodos de cada grid.	39

Índice de Figuras

Ilustración 1. Batimetría de la playa de Carchuna. Modelo 3D	xi
Ilustración 2. Bathymetry of Carchuna Beach. 3D model	xiv
Ilustración 3. Ortofotografía de la península ibérica. Posición de Carchuna	25
Ilustración 4. Ortofotografía de la península ibérica. Posición de Carchuna	25
Ilustración 5. Zonas diferenciadas. Posiciones de las cúspides	26
Ilustración 6. Perfiles en la IPW	27
Ilustración 7. Cuantía de sedimento en Carchuna	28
Ilustración 8. Fracción por debajo de 1 milímetro	29
Ilustración 9. Fracción por encima de 1 milímetro	29
Ilustración 10. Rosa de oleaje. SIMAR 2042080	29
Ilustración 11. Mar Mediterráneo. Posición de Carchuna y Oleajes predominantes	30
Ilustración 12. Rosa de los vientos. SIMAR 2042080	30
Ilustración 13. Área de estudio.	34
Ilustración 14. Batimetría natural	34
Ilustración 15. Batimetría 2, sin Cañón Jolúcar	35
Ilustración 16. Batimetría 3, ausencia del tributario Oeste	35
Ilustración 17. Batimetría 4, ausencia de tributario Este	36
Ilustración 18. Batimetría 5, ausencia de ambos tributarios	36
Ilustración 19. Batimetría 6, carente de ondulaciones en IPW	37
Ilustración 20. Batimetría 7, carente de ondulaciones en IPW y ausencia de ambos tributarios	37
Ilustración 21. Área de estudio definida por los 'grids'	39
Ilustración 22. Perfiles utilizados para el cálculo	40
Ilustración 23. Resultado SWAN como ejemplo de grid grande	41
Ilustración 24. Resultado SWAN 'grid' anidado	41
Ilustración 25. Profundidades asociadas a los perfiles	42
Ilustración 26. Fracciones de rotura asociadas a los perfiles	42
Ilustración 27. Alturas de ola asociadas a los perfiles	42
Ilustración 28. Relación $H_s - Q_b$	43
Ilustración 29. Comparación fracciones de rotura	43
Ilustración 30. Criterio de rotura de McCowan y alturas de ola frente a la profundidad en valor real.	44
Ilustración 31. Línea de rotura obtenida	45

Ilustración 32. Altura de ola en rotura para oleaje extremo y medio	45
Ilustración 33. Transporte longitudinal	46
Ilustración 34. Rosa de oleaje. CERC	47
Ilustración 35. Proyección de la nube de puntos de los casos del 'downscaling'	47
Ilustración 36. Propagación de oleajes para batimetrías naturales	52
Ilustración 37. Detalle del oleaje a su paso por las cabeceras Este y Oeste	52
Ilustración 38. Alturas en rotura en Carchuna.	53
Ilustración 39. Seno del doble del ángulo de los estados de mar anteriores en la línea de rotura	54
Ilustración 40. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 2. Oeste	54
Ilustración 41. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 2. Este	55
Ilustración 42. Comparación oleaje Oeste entre escenario uno y dos	55
Ilustración 43. Comparación oleaje Este entre escenario uno y dos	56
Ilustración 44. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 3. Oeste	57
Ilustración 45. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 3. Este	57
Ilustración 46. Comparación oleaje Oeste	58
Ilustración 47. Comparación oleaje Este	59
Ilustración 48. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 4. Oeste	59
Ilustración 49. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 4. Este	59
Ilustración 50. Comparación oleaje Oeste	60
Ilustración 51. Comparación oleaje Este	61
Ilustración 52. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 5. Oeste	61
Ilustración 53. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 5. Este	62
Ilustración 54. Comparación oleaje Oeste	62
Ilustración 55. Comparación oleaje Este	63
Ilustración 56. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 6. Oeste	63
Ilustración 57. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 6. Este	64
Ilustración 58. Comparación oleaje Oeste	64
Ilustración 59. Comparación oleaje Este	65
Ilustración 60. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 7. Oeste	65
Ilustración 61 - Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 7. Este	66
Ilustración 62. Comparación oleaje Oeste	66
Ilustración 63. Comparación oleaje Este	67
Ilustración 64. Comparación del transporte promedio entre los escenarios 1 y 2	69
Ilustración 65. Comparación del transporte total entre los escenarios 1 y 2	69
Ilustración 66. Comparación del transporte promedio entre los escenarios 1 y 3	70
Ilustración 67. Comparación del transporte total entre los escenarios 1 y 3	71
Ilustración 68. Comparación del transporte promedio entre los escenarios 1 y 5	72
Ilustración 69. Comparación del transporte total entre los escenarios 1 y 5	72
Ilustración 70. Comparación del transporte promedio entre los escenarios 1 y 6	73

Ilustración 71. Comparación del transporte total entre los escenarios 1 y 6	74
Ilustración 72. Comparación del transporte promedio entre los escenarios 1 y 7	75
Ilustración 73. Comparación del transporte total entre los escenarios 1 y 7	75
Ilustración 74. Probabilidad de transporte del escenario 1	76
Ilustración 75. Probabilidad de transporte del escenario 7	77
Ilustración 76. Probabilidad de transporte del escenario 5 menos escenario 1.	78
Ilustración 77. Probabilidad de transporte del escenario 6 menos escenario 1.	79
Ilustración 78. Probabilidad de transporte del escenario 7 menos escenario 1.	79
Ilustración 79. Muestra del efecto lineal	81

1 INTRODUCCIÓN

“El romper de una ola no puede explicar todo el mar”.

- Vladimir Nabokov -

Por transporte de sedimentos se entiende cualquier desplazamiento de material pétreo, generalmente muy erosionado, por causas naturales. Éste puede ocurrir por suspensión, disolución, arrastre, rodadura o saltación. En éste proceso en el agua juega un papel fundamental porque, aunque el viento también funciona como transportista de sedimentos, es mucho más útil enfocarlo a los cauces fluviales, a las desembocaduras, y a las costas, localizaciones donde la ingeniería civil sitúa en numerosas ocasiones sus infraestructuras.

La construcción de un dique para un puerto o de un dique exento para incrementar la superficie visitable de playa son ejemplos claros de la importancia de los sedimentos y de su transporte longitudinal a lo largo de la línea de costa, ya que, aunque el proceso es lento, el oleaje en rotura mueve los sedimentos incesantemente acumulándolos tras estas estructuras. Sin embargo, en otros casos el efecto es el contrario ya que, si el balance de transporte es negativo, la cota sufrirá una erosión pudiendo incluso desaparecer tramos completos de playa.

El transporte transversal de sedimentos queda en un segundo plano en éste estudio ya que, por lo general, suele ser periódico por lo que no modifica la línea de costa de forma tan pronunciada como lo hace el longitudinal.

El caso que se trata es éste documento no contiene estructuras artificiales como las antes mencionadas, pero la línea costera presenta puntas que se adentran en el mar a lo largo de su longitud debido a un balance irregular del transporte en la misma. Ésta desigual distribución del transporte de sedimentos se debe presuntamente a la presencia de una batimetría muy compleja en la zona, conteniendo un cañón y ondulaciones en el borde de la cuña litoral.

Este documento viene en línea con dos estudios sobre Carchuna; ‘The influence of shelf-indenting canyons and infralittoral prograding wedges on coastal morphology: The Carchuna system in Southern’ Spain (Ortega-Sánchez et al., 2014) y On the development of large-scale cusped features on a semi-reflective beach Carchuna beach (Ortega-Sanchez, Losada, Baquerizo., 2003).

En el primero se concluye que el cañón es el principal agente moldeador de la costa y que este eleva la altura de ola en determinadas zonas hasta un 25%. Además, proporciona una explicación para el desarrollo de la IPW; ésta puede proceder de la erosión de la costa a largo plazo sin que haga falta una fuente de procedencia extra explicándose así la forma de la misma, cada vez más ancha de Oeste a Este. Concluye diciendo que la formación de esta es la que a su vez refuerza la creación de las cúspides al modificar los patrones de propagación de la ola. Para explicar ésta última afirmación se centra en el aumento y la disminución de los coeficientes como se volverá a ver en el desarrollo de este estudio, además de hacer una simulación con línea de costa variable en la que se muestran unas formaciones muy parecidas a los ‘horns’ de Carchuna.

En el segundo estudio predecesor a éste se hace referencia a que la forma concreta de los cabos mencionados anteriormente depende del clima marítimo que se haya desarrollado previamente, siendo las tormentas los

eventos que producen las puntas y que posteriormente los estados de mar moderados forman un sistema circulatorio que refuerza la forma de las bahías y de las puntas. Los estados de mar más suaves mantendrían la forma en un equilibrio dinámico. De éste mismo documento se incluye la hipótesis de que la difracción es despreciable para éste caso en concreto.

Objetivos generales

Se enfocará este documento a descifrar la influencia de cada uno de las morfologías submarinas en transporte longitudinal de sedimentos de playas heterogéneas, en concreto se tomará como ejemplo la playa de Carchuna ya que ningún estudio se ha centrado en discutir este aspecto en concreto. Se han centrado en cómo éstos redistribuyen la energía del oleaje, pero, aunque esto esté directamente relacionado con el transporte de sedimentos, no da una relación directa con la posible evolución de la forma en planta de la línea de costa.

Objetivos específicos

Para conseguir diferenciar que morfologías influyen sobre cada zona de la línea de costa;

- Se modificará la batimetría natural, generando siete batimetrías artificiales donde se han aislado los distintos elementos.
- Propagando estados de mar representativos que nos permitan tener una primera aproximación de estas influencias y que permitan comparar las alturas de ola y los transportes de cada escenario.
- Utilizar la técnica de ‘downscaling’ para obtener el transporte para todos los estados de mar de SIMAR 2042080 (1958-2015).
- Realizar distintas comparaciones y cálculos con los datos obtenidos para tener una idea de la forma en la que la propagación del oleaje se ve influenciada por la morfología submarina

2 EL SISTEMA LITORAL DE CARCHUNA

2.1 El sistema litoral de Carchuna

La playa de Carchuna está situada en Granada, más concretamente en la vertiente sur de sierra nevada, al sureste de la Península Ibérica. Baña su costa El mar de Alborán que tiene unos 180 km de ancho en dirección N-S y unos 350 km de longitud en dirección E-O, y está situado en el centro de la región geológica del Arco de Gibraltar. Su profundidad media es de unos 1.000 m, aunque la máxima supera los 2.200 m en la zona oriental. Hay varias pequeñas islas de entre las que destaca la isla de Alborán, situada en la zona central.

El mar de Alborán presenta además montes submarinos de origen volcánico lo que puede reflejarse en las costas de nuestra zona de estudio (Wikipedia.,2016).

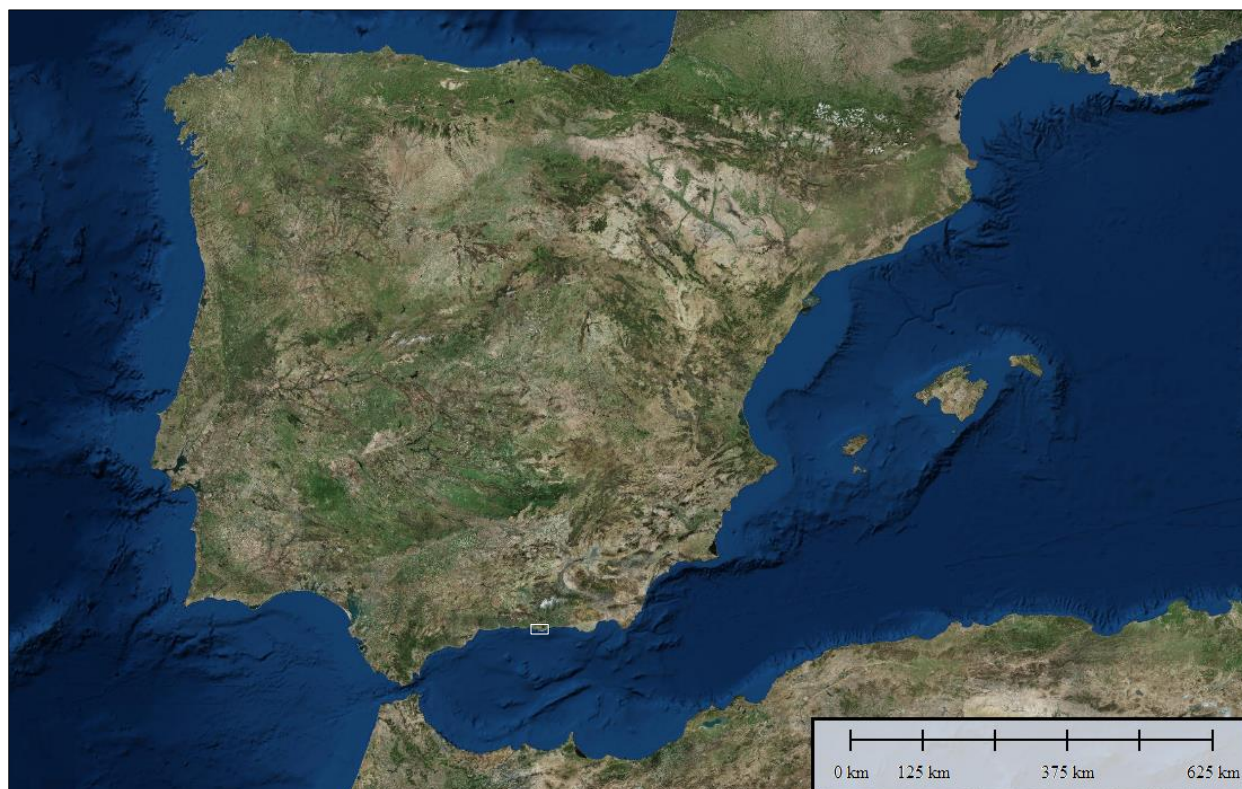


Ilustración 3. Ortofotografía de la península ibérica. Posición de Carchuna

La línea de costa de playa de Carchuna se extiende a lo largo de 3900m y presenta una casi perfecta alineación Oeste-Este. Está contenida en la cuenca mediterránea andaluza delimitando al Norte su subcuenca la Sierra de Contraviesa. Se muestra en la Ilus. 3 una ortofoto de la zona.

Las edificaciones cercanas a la costa no están lo suficientemente cerca ni tienen la suficiente envergadura para poder influir en la dinámica costera.



Ilustración 4. Ortofotografía de la península ibérica. Posición de Carchuna

2.2 G
eomor
fología

En el

sistema litoral de Carchuna diferenciamos tres zonas para delimitar correctamente el área de estudio como han hecho otros autores previamente (Ortega-Sánchez et al.,2014):

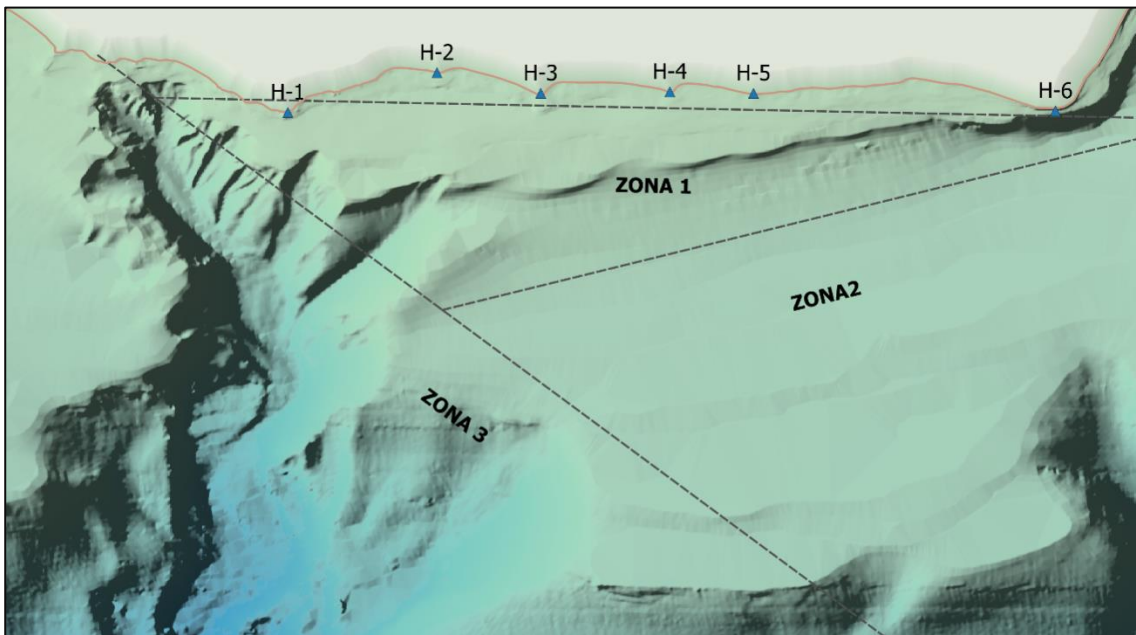


Ilustración 5. Zonas diferenciadas. Posiciones de las cúspides

En primer lugar, la zona más cercana a la playa, la zona 1, la cual linda al Este con el fin de la curvatura del fondo, al Oeste con una línea oblicua que pasa por la base de los tributarios del cañón y al norte con la costa.

Ésta presenta una planicie con pendiente suave desde la línea de costa hasta una discontinuidad en pendiente que ocurre aproximadamente en la batimétrica 18m. Después continúa a la cota del suelo marino con menor pendiente.

Ésta orografía en particular se denomina IPW del inglés ‘Infralitoral Prograding Wedge’ (Ortega-Sánchez et al.,2014) y hace referencia al crecimiento o avance de la tierra hacia dentro del mar por deposición.

Para visualizar éste relieve se presentan cuatro perfiles:

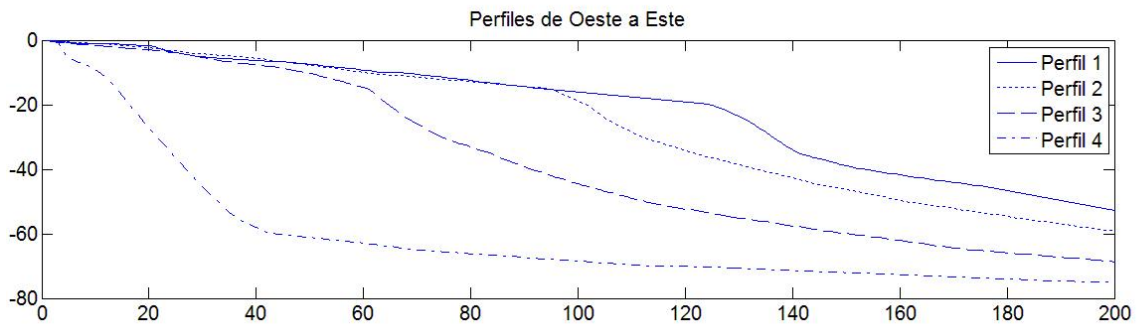
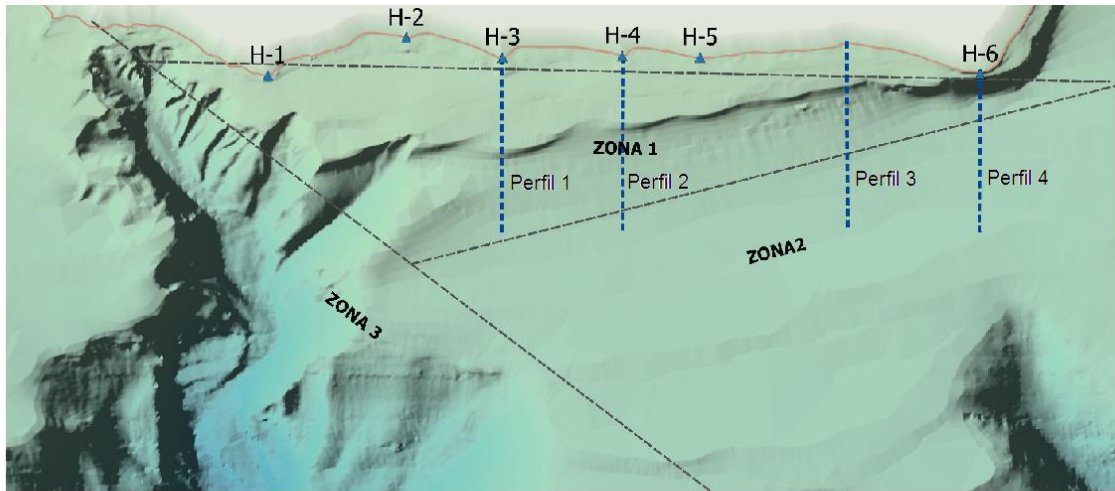


Ilustración 6. Perfiles en la IPW

Ésta contendría el material para el transporte ya que Carchuna se considerará un sistema cerrado debido a su geometría como ya han hecho otros autores (Bárcenas et al., 2011) y se supone una costa en erosión constante. El sedimento tiene una granulometría bien clasificada, variando desde muy fino hasta pequeñas rocas de tamaño centimétrico, concretamente arenas gravosas disminuyendo el contenido en arena conforme nos aproximamos al cambio de pendiente (90-70%) y Gravas arenosas aumentando su contenido en gravas (5-25%) con la aproximación al fin de la cuña (Bárcenas et al., 2011). El único ‘horn’ que no presenta sedimento como tal es H-1, ya que éste es fijo por ser la prolongación de la montaña.

A modo resumen se muestra el siguiente histograma de tamaños de sedimento extraído de la página Morphal, realizado por Rafael J. Bergillos (Bergillos., 2013) donde claramente existen dos magnitudes de sedimento; una fracción por debajo de un milímetro y otra por encima de éste valor la cual tiene un máximo en la subfracción de dos a ocho milímetros de tamaño.

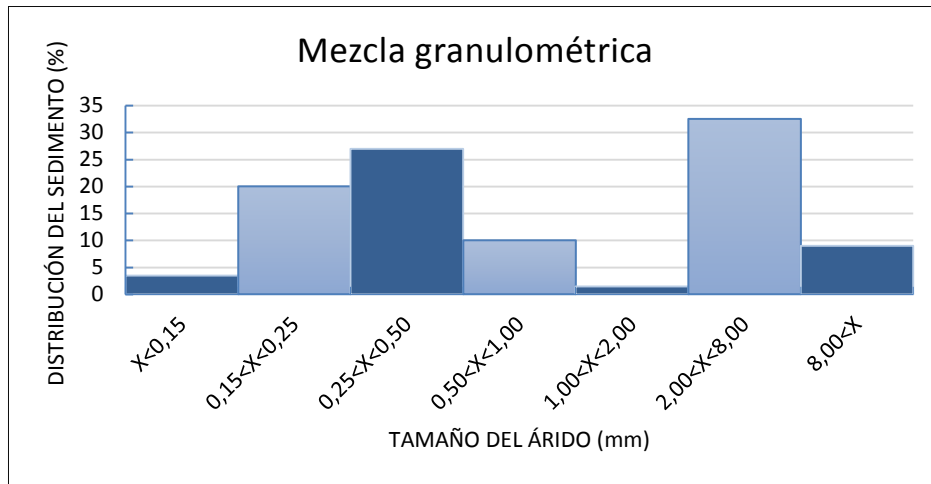


Ilustración 7. Cuantía de sedimento en Carchuna



Ilustración 8. Fracción por debajo de 1 milímetro



Ilustración 9. Fracción por encima de 1 milímetro

La zona 2 es la extensión del lecho marino tras el fin de la discontinuidad y límite con la zona 1 a la cota -65m y descendiendo, con una pendiente del 12.8 %. En ella el efecto del transporte es muy tenue debido a su profundidad.

Y por último la zona 3 linda superiormente con la zona 1 y presenta como característica principal el cañón de Jolúcar el cual, orientado NO-SSE, comienza a escasos metros de la costa y se extiende hasta profundidades de 350 m dentro de la zona de estudio con una pendiente en su recorrido de mínima pendiente del 70%. Por éste se desvían los sedimentos provenientes del sector al Oeste de Carchuna hasta el lecho por debajo de la cota -200 de las zonas 2 y 3 (Motivo del aislamiento del sistema junto a la IPW).

La presencia de éste cañón que fractura la explanación que se encuentra en aguas someras producirá modificaciones en el coeficiente de propagación del oleaje hasta la costa, sin embargo, su parte más profunda no se englobará en el modelo hidrodinámico por su baja afección a la dinámica litoral.

2.3 Clima marítimo

Tras analizar los datos de SIMAR 2042080 de puertos del estado (Ministry of Public Works, Spain, WANA project) podemos decir que el oleaje del mediterráneo, más concretamente el proveniente del mar de Alborán, en raras ocasiones se vuelve extremadamente energético. Es más, se mueve en un rango de bajo a moderado y con condiciones de micromarea, lo que se define como carreras de marea menores de 2metros, como en éste caso, de unos 0.5 metros como ya han indicado otros autores (Bárcenas et al., 2011).

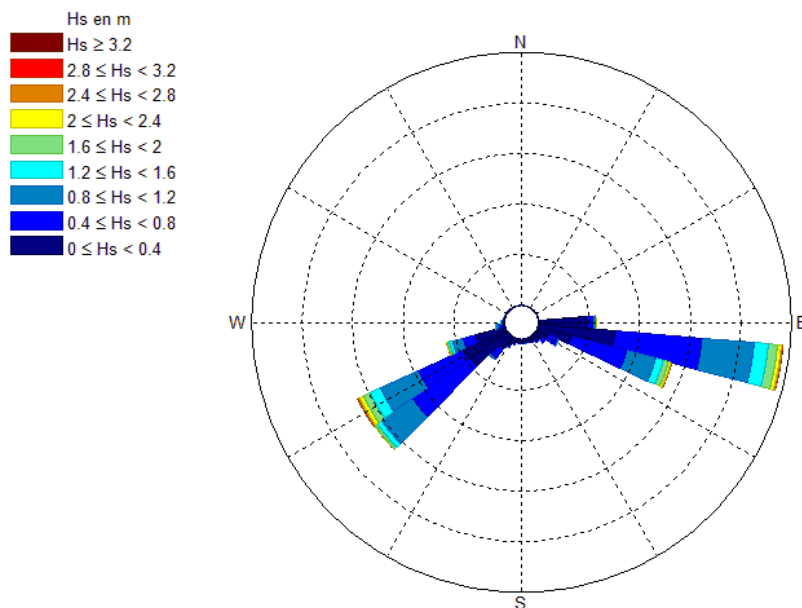


Ilustración 10. Rosa de oleaje. SIMAR 2042080

Los oleajes más probables provienen del W, WSW, SW, ESE y E lo que produce frentes de onda muy perpendiculares a la costa, lo que hace del escenario aún más particular.

Además, cabe mencionar que el oleaje proveniente del W, generalmente ha pasado por el estrecho de Gibraltar, lo que le induce esa componente sur visible en la rosa de oleaje al igual que la posición en avanzadilla respecto del resto de la línea de costa de Carchuna hace que gran parte del oleaje mediterráneo tenga una fuerte componente E.



Ilustración 11. Mar Mediterráneo. Posición de Carchuna y Oleajes predominantes

Aunque en el estudio no se tenga en cuenta la influencia del viento superficial se muestra una rosa de los vientos del mismo punto SIMAR del que se recoge el oleaje. Los datos son obtenidos a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar.

Los predominantes provienen del Este y del Oeste alternándose con bastante simetría, siendo mucho menores los vientos procedentes de norte y sur.

Cuando proceden de éstas direcciones el módulo de su velocidad alcanza los 5 m/s, mucho menor que en los otros casos con un máximo de 20 m/s.

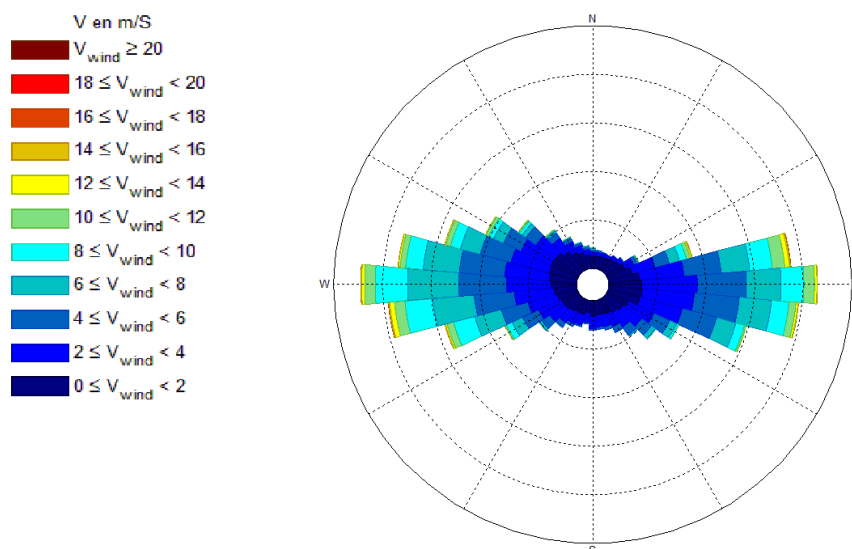


Ilustración 12. Rosa de los vientos. SIMAR 2042080

Para hacer un estudio en primera aproximación de cómo afecta la batimetría los coeficientes de propagación se utilizarán cuatro estados de mar. Éstos se han demostrado ser representativos del resto de oleajes, en condiciones medias del clima marítimo medio y en condiciones de tormenta. (R.J. Bergillos):

Tabla 1. Estudio cualitativo. Oleajes representativos

	<i>Average</i>		<i>Storm</i>	
	East	West	East	West
H_0 (m)	0,4	0,4	3,2	3,2
T_p (s)	4,5	4,5	8,4	8,4
θ (°)	112	225	112	225

Con todo éste entorno e influencias se explicará en los siguientes apartados de qué manera se procesó la información hasta llegar a tener el transporte que ve cada punto de la costa.

3 METODOLOGÍA

3.1 Hipótesis de partida

Este estudio cuenta con un modelo simplificado que tiene múltiples limitaciones. Para que quede constancia de éstas se enumeran a continuación junto con una breve explicación.

- No se tendrán en cuenta efectos de marea; debido a que éste estudio es estático, es decir, el oleaje se propaga en el mar con cota cero para medir el transporte que éste produce, no se introducirá el efecto de la marea en ningún caso. Dadas las condiciones micromareales de la zona de estudio, despreciar el efecto de la marea no tiene una gran afección a los resultados.
- No se tendrán en cuenta las corrientes debido a su complejidad, aunque en ocasiones éstas sí que pueden tener un rol importante en el transporte de sedimento.
- No se tendrá en cuenta la acción directa del viento sobre la lámina de agua; a pesar de tener datos que da SIMAR de velocidad del viento a diez metros de altura, se ha decidido no incluir el efecto del viento sobre el oleaje.
- Los efectos de difracción en el oleaje son despreciables para el estudio del transporte de sedimentos.
- La costa es fija; al realizar un estudio de transporte de sedimentos, precisamente estamos esperando un cambio en la línea de costa a lo largo del tiempo. Sin embargo, la batimetría se considera fija en el tiempo de forma que la línea de costa también, debido a la falta de datos con una resolución temporal suficiente.
- Criterio de rotura en perfiles con fracción de rotura (Q_b); en muchas ocasiones la fracción de rotura en un perfil no supera el valor mínimo calculado. En estos casos se utilizó el criterio de rotura lineal. La combinación de dos criterios puede inducir pequeños errores.
- Suposición de sedimento constante; el sedimento se supuso con un D_{50} de un milímetro en toda la costa. Por la naturaleza heterogénea del sedimento en Carchuna esto inducirá error también.
- Resolución de las batimetrías artificiales.

También es importante mencionar que el objetivo principal es comparar los escenarios y, como todas las propiedades que se han modificado de la realidad van a ser iguales para todos los escenarios, se atenuará el efecto en las comparaciones.

3.2 Área de estudio

El área de estudio se define con una extensión suficiente para no alterar los resultados en cuanto a dinámica costera, en este caso, ésta empieza en el Cabo Sacratif y acaba en la Punta de Carchuna adentrándose en el mar unos 3.5 Km, hasta la batimétrica de cota 200m. La forma parabólica y los contornos del grid primario tan alejados de la playa a estudiar se sitúan de esta manera para evitar los efectos numéricos cerca de los contornos. Éstos en caso de estar cerca de Carchuna, podrían distorsionar los resultados.

Se puede definir bien mostrando las áreas que engloban las cuadrículas del cálculo numérico:

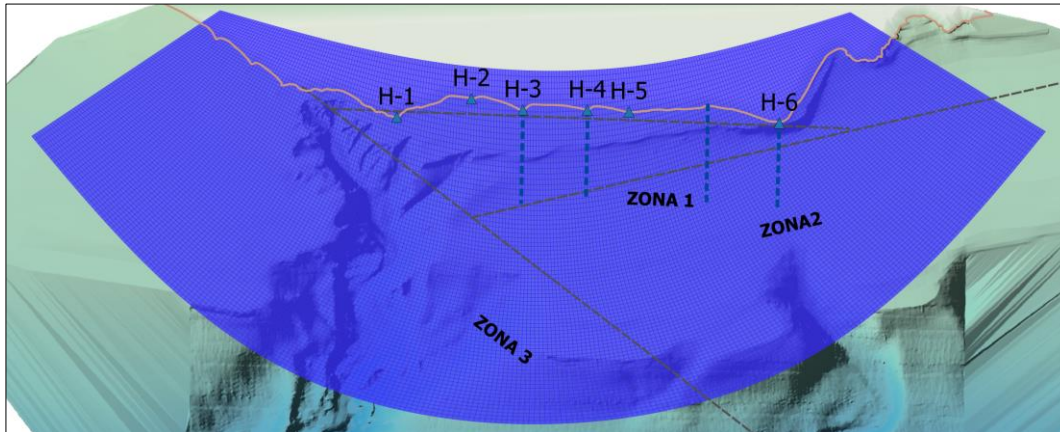


Ilustración 13. Área de estudio.

Con el fin de analizar correctamente y poder realizar la comparativa se propagarán distintos oleajes sobre distintas batimetrías; tanto la natural, como otras modificadas artificialmente. La batimetría natural ha sido tomada en los veranos de 2001 y 2002 con un Simrad EM3000D de 300 kHz, obteniendo una batimetría de resolución 5 m con precisión vertical centimétrica. La nube de puntos ha sido procesada de distintas formas para obtener el escenario. (Ortega-Sánchez et al., 2014)

Fueron procesadas para obtener los distintos escenarios naturales carentes de uno o de otro agente. Se muestran a continuación las distintas batimetrías con curvas de nivel cada dieciséis metros:

- Ninguna modificación. Batimetría natural del sistema.

Éste es el escenario natural y en los siguientes se verán descompuestas sus principales características geomorfológicas en distintos escenarios con el fin de aislar su influencia

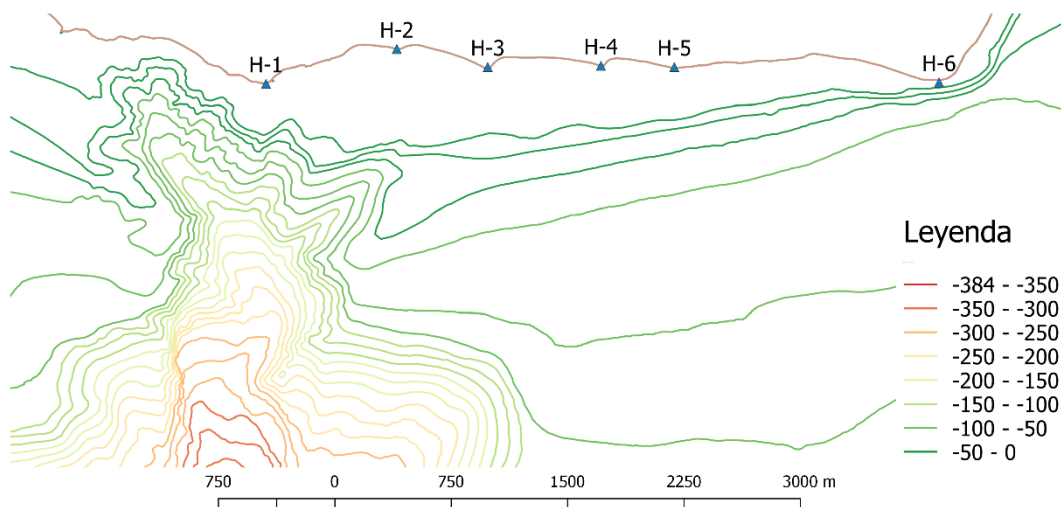


Ilustración 14. Batimetría natural

- La eliminación del cañón completo.

Manteniendo la cuña y sus ondulaciones, en éste escenario sólo se ha eliminado el cañón y sus tributarios, permaneciendo la ondulación del fondo.

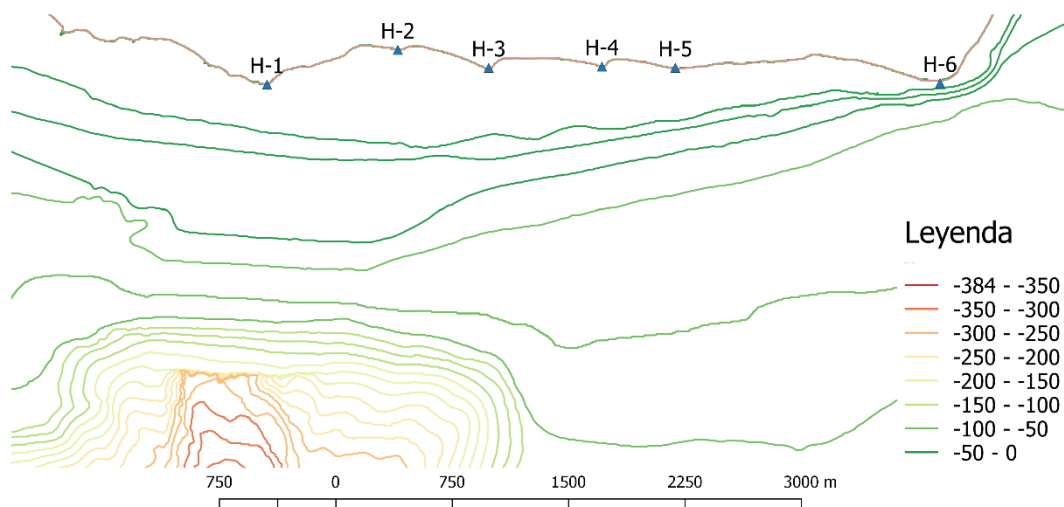


Ilustración 15. Batimetría 2, sin Cañón Jolúcar

- La eliminación del tributario oeste del cañón

En éste escenario se mantiene el cañón y la cuña infralitoral, pero se ha la cabecera Oeste más cercana a H-1 y principal influencia de los cabos H-1 y H-2.

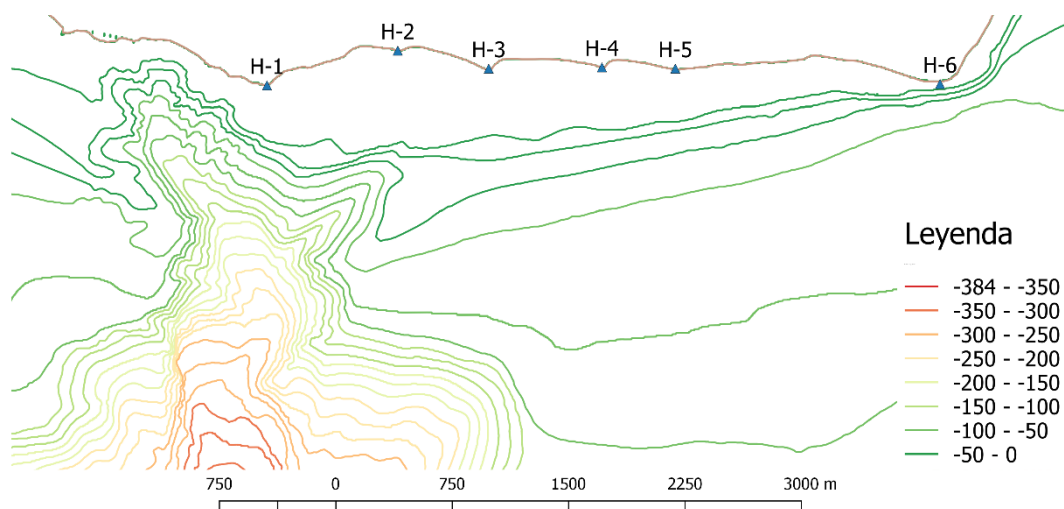


Ilustración 16. Batimetría 3, ausencia del tributario Oeste

- La eliminación del tributario este del cañón

Al igual que en el tercer escenario con la salvedad de que la cabecera eliminada es la que se encuentra en la vertical con H-2. Ésta tiene un efecto mucho menos notable, pero está relacionada con las mismas cúspides

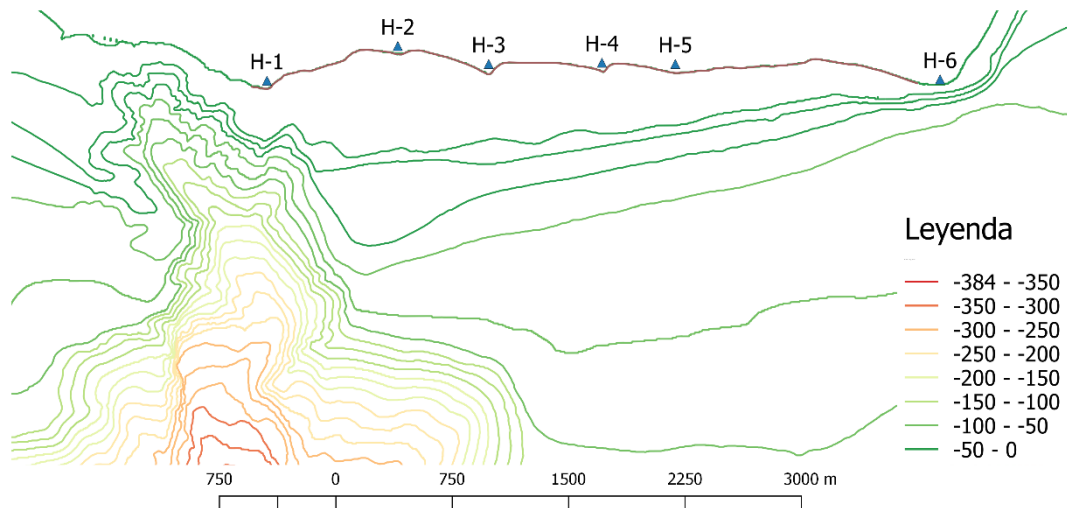


Ilustración 17. Batimetría 4, ausencia de tributario Este

- Eliminación de ambos tributarios

Combinación de los dos escenarios anteriores, eliminando ambas cabeceras. Por ello mismo se espera que el resultado de la simulación también sea semejante a una combinación de los anteriores.

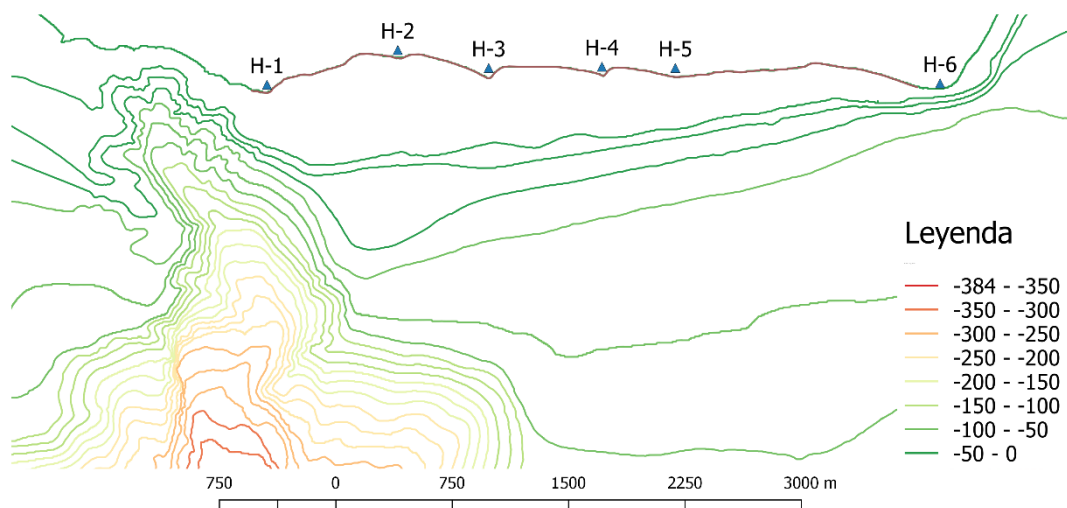


Ilustración 18. Batimetría 5, ausencia de ambos tributarios

- Eliminación de las ondulaciones de la cuña del este.

La cuña infralitoral que existe en la zona1 presenta unas ondulaciones en su borde. Éstas serán eliminadas en el escenario seis.

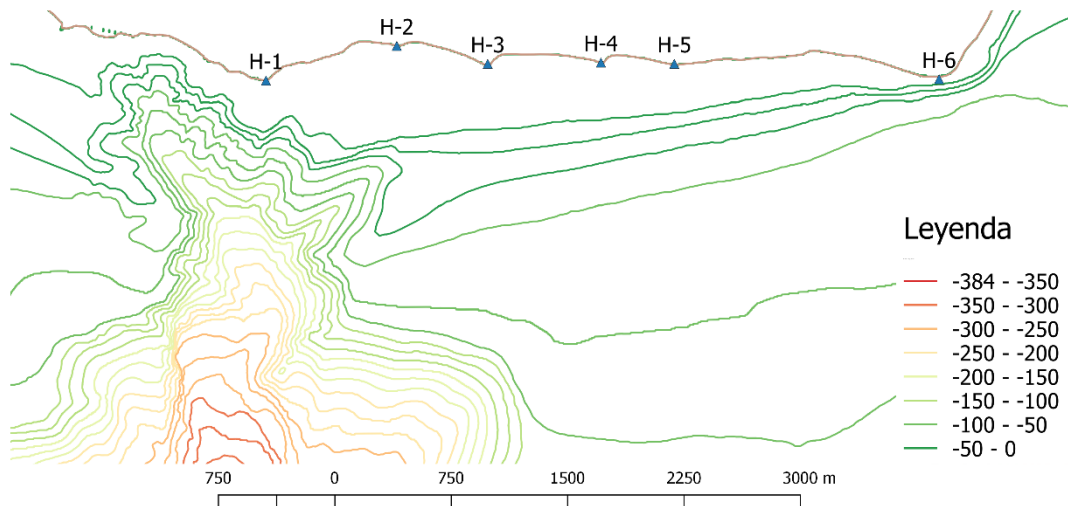


Ilustración 19. Batimetría 6, carente de ondulaciones en IPW

- Eliminación tanto de las ondulaciones de la cuña como las crestas del cañón.

En esta batimetría se mezclan los escenarios cinco y seis ya que no presenta ni cabeceras del cañón ni tampoco presenta ondulaciones en la cuña. Es el escenario que más modificaciones presenta, pero del que menos información podemos sacar pues ésta está mezclada.

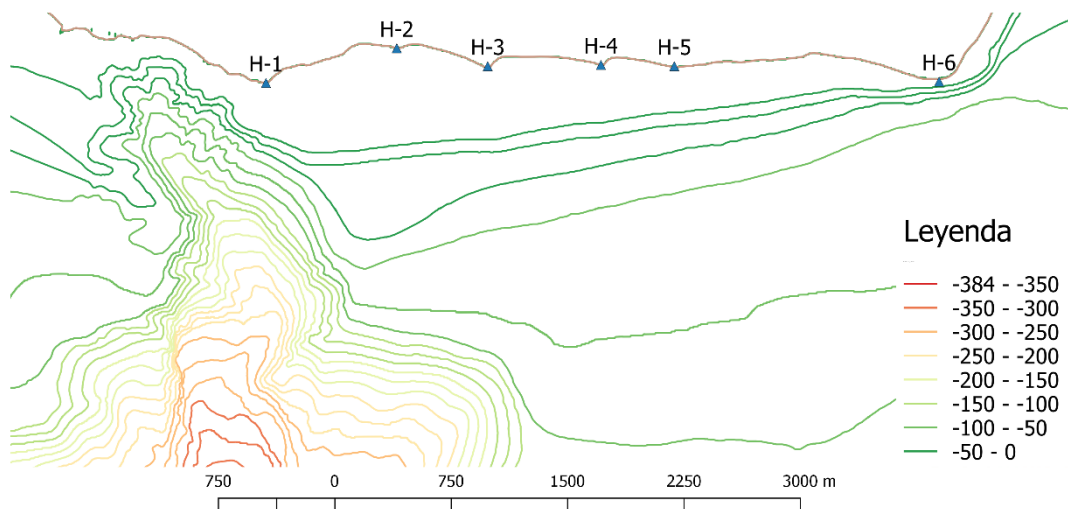


Ilustración 20. Batimetría 7, combinación de los escenarios cinco y seis, carente de ondulaciones en IPW y ausencia de ambos tributarios

Estos siete escenarios intentan separar los elementos del fondo y su posible papel en la distorsión del oleaje. Por un lado, las cabeceras del cañón y por otro, las ondulaciones en la cuña infralitoral.

Se muestra también una tabla resumen que indica que agentes contiene cada escenario con un aspa.

Tabla 2. Presencia de los distintos agentes morfológicos en las batimetrías

	<i>E. 1</i>	<i>E. 2</i>	<i>E. 3</i>	<i>E. 4</i>	<i>E. 5</i>	<i>E. 6</i>	<i>E. 7</i>
<i>Trib O</i>	X			X		X	
<i>Trib E</i>	X		X			X	
<i>O. IPW</i>	X	X	X	X	X		

3.3 Propagación de oleaje y cálculo de transporte de sedimentos

En primera instancia se procede a seleccionar unos estados de mar representativos, a gran escala, del resto de estados de mar que se dan en Carchuna. Como ya se ha mencionado en el apartado 2.3 de éste documento, en la tabla 1 podemos ver los oleajes que nos servirán para estudiar el funcionamiento de cada uno de los agentes morfológicos de Carchuna. A pesar de no ser condiciones reales, son representativos de condiciones medias y de tormenta.

Para el cálculo de la propagación de los oleajes mencionados desde los puntos SIMAR más cercanos, se utilizará la modelización proporcionada por el simulador numérico de tercera generación SWAN (Simulating WAVes Nearshore) a través de Delft 3D. Éste se basa en la formulación discreta del balance espectral de la densidad de actuación para propagaciones en refracción sobre una batimetría arbitraria y líneas de corriente, apoyándose en condiciones de contorno y vientos locales sobre la superficie. Tiene en cuenta efectos de refracción, interacción ola-ola y efectos de disipación de energía tanto por fricción con el fondo, como por fenómenos de rotura del oleaje (Olabarrieta et al., 2014). Por esto mismo, es un gran simulador cuando se requiere simular oleaje generado por viento en grandes masas de agua y sin obstáculos.

En SWAN el oleaje es descrito mediante el espectro bidimensional de densidad de acción $N(\sigma, \theta)$ en lugar del espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$. Por tanto, la evolución de la energía del oleaje es descrita por la ecuación espectral de balance de la acción, $N(\sigma, \theta)$ a partir de condiciones arbitrarias de viento, corrientes 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 (Whitham, 1974).

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, esta ecuación de conservación de la acción se presenta:

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

(Hasselmann et al., 1973)

El primer término de la parte izquierda representa la evolución local a lo largo del tiempo de la densidad de la acción, el segundo y el tercer término representan la propagación de $N(\sigma, \theta)$ en el espacio geográfico (con velocidades 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 término representa 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:

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

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 White-capping.

$S_{ds,br}$: Término debido a la rotura por disminución de la profundidad.

$S_{ds,b}$: Disipación de energía por fricción con el fondo

Es importante mencionar que éste programa aplica la formulación en forma discreta, utilizando una discretización del área de estudio mediante el uso de ‘grids’ que se adaptan a la orografía y batimetría de la zona. Los aquí presentados y utilizados son dos, el primero, con forma parabólica que albergará la mayor parte de la superficie a modelar y cuyas celdas miden aproximadamente 60x40 m, y el segundo con una forma más rectangular y centrado en mejorar la precisión en la orilla cuyas celdas miden 10x20 m.

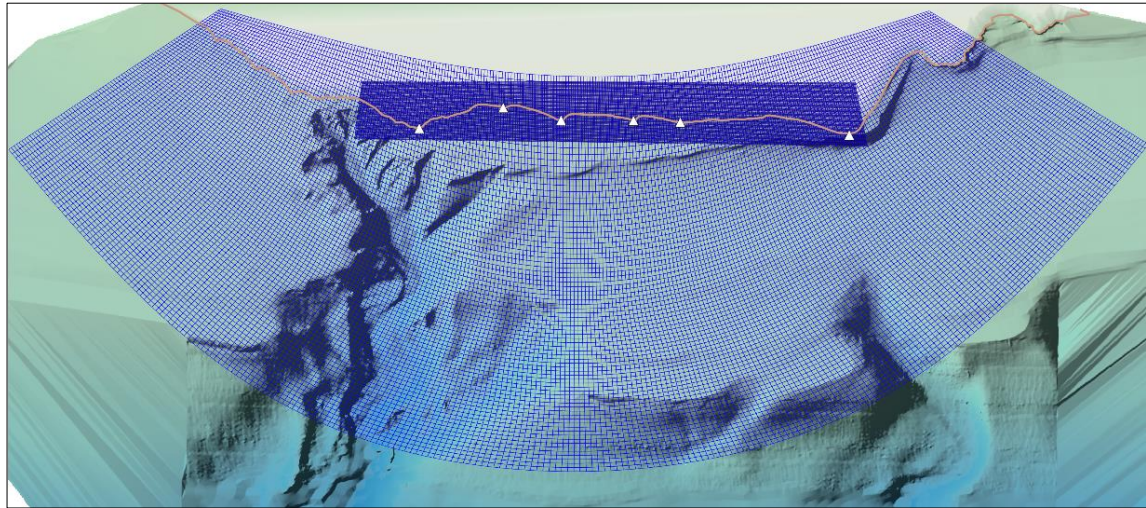


Ilustración 21. Área de estudio definida por los ‘grids’

Cada cruce de dos líneas será un nodo de cálculo para SWAN. Estas mallas han sido generadas mediante el programa RFGRID integrado en DELFT. Mientras que la primera (de mayor extensión) abarca un área mayor con una precisión determinada la segunda, que se centra en el área entre los ‘horns’, tiene una mayor precisión para el cálculo en esa zona.

Esta clase de procesamiento del cálculo se llama ‘nesting’, que utiliza ‘nested grids’, que se podría traducir al español como mallas anidadas. En éstas, las condiciones propagadas desde el borde (introducidas por el usuario) en la rejilla de menor precisión hasta los bordes de la segunda rejilla, sirven como condición de contorno para un segundo cálculo de mayor precisión. El resultado; salidas de DELFT en pares de matrices de resultados, una para cada ‘grid’.

Tabla 3. Número de nodos de cada grid.

	<i>Nodos M</i>	<i>Nodos M</i>
<i>Grid001</i>	244	82
<i>Grid002</i>	244	82

Como se puede ver, ambas rejillas tienen el mismo número de nodos, sin ser esto más que una casualidad.

Se comprobó tras realizar un pequeño análisis de sensibilidad con Delft3D, que no existían errores numéricos para múltiples oleajes por lo que esta discretización numérica se tomó para el cálculo del resto de casos. Se calculó en modo estacionario para los oleajes representativos de las condiciones medias y de tormenta mostrados anteriormente como ya se dijo anteriormente, sin tener en cuenta efectos de corrientes ni de viento.

Los datos extraídos de DELFT3D son:

- Grid anidado, coordenadas de cada punto del mallado.
- Profundidades, en cada punto del grid.
- Alturas de ola, en cada punto del grid.

- Fracción de rotura en cada punto del grid.
- Dirección significante del oleaje, en cada punto del grid.
- Periodo en cada punto del grid.

Posteriormente se procesaron los datos extraídos mediante el software MatLab. Con el fin de estudiar el transporte a lo largo de la costa, se generaron perfiles perpendiculares a ésta como se puede ver en la siguiente figura:

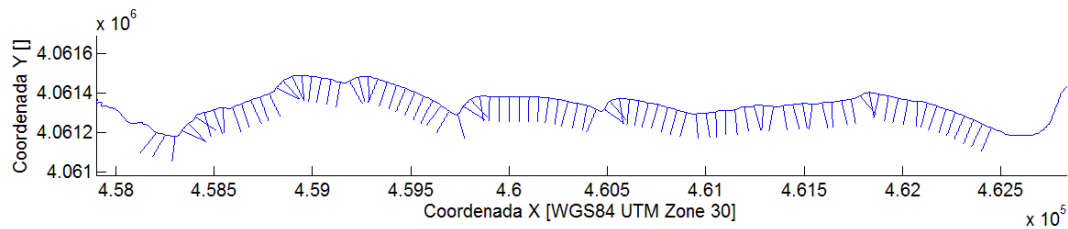


Ilustración 22. Perfiles utilizados para el cálculo

En la figura no se muestran todos los perfiles para no distorsionar la figura, en su lugar se muestran de cinco en cinco. Los 460 perfiles que se han obtenido tienen 260 puntos cada uno, separados una distancia entre sí de 50 cm. A su vez, los perfiles están separados cada uno unos 10 metros del siguiente, variando esta distancia hasta un 2% de unos a otros debido a la geometría de la costa.

Para pasar los datos de DELFT a MatLab se procede de la siguiente forma: primero se muestran de qué forma son las matrices que DELFT da como resultados, una matriz por atributo (profundidad, periodo altura de ola...) y malla. Esto nos abre un amplio abanico de datos para utilizar en las comparaciones y analizar.

Por ahora, nos centramos en decir que sólo se procesaron los 'grids' de mayor precisión ya que son los que contienen información realmente útil. Los de mayor tamaño son desechados dada su baja precisión para éste propósito. Para todos los ejemplos del proceso de cálculo se muestra sólo un estado de mar como ejemplo, en concreto, el de dirección 225° , periodo 8.4 s, altura 3.2m con batimetría natural. En este caso añadió una transparencia para apreciar el fondo:

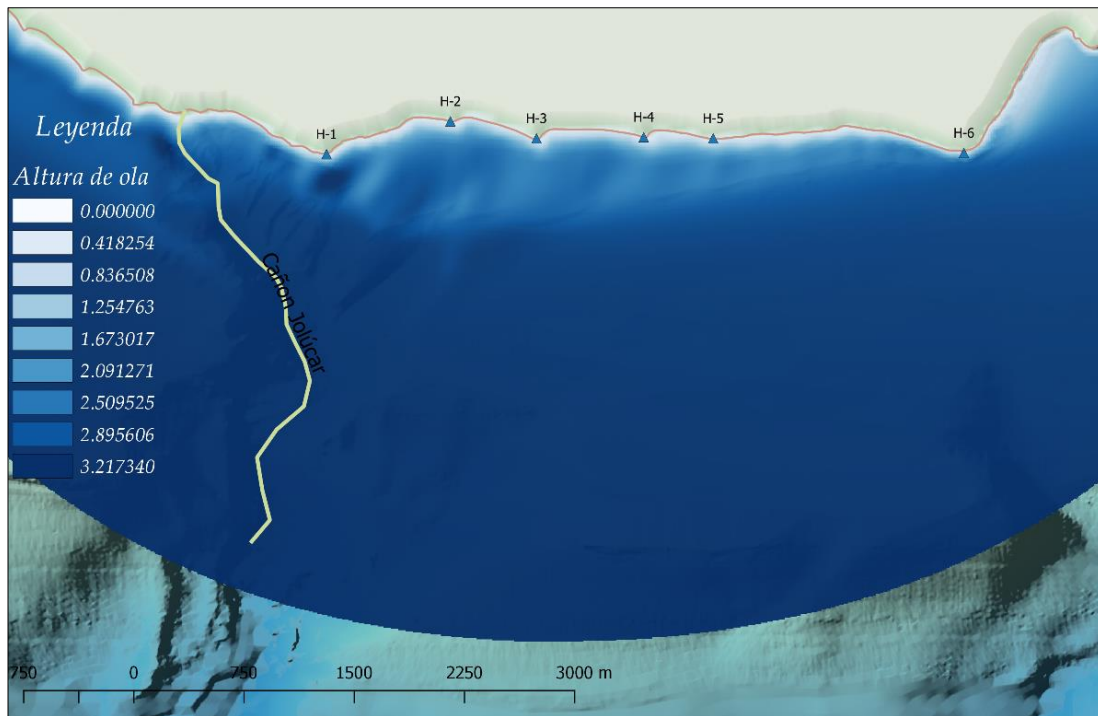


Ilustración 23. Resultado SWAN como ejemplo de grid grande

Cómo se comentaba anteriormente, sólo se emplearán los grid de mayor resolución. Aquí se muestra el resultado perteneciente al cálculo anidado del grid de la Ilus.10.:

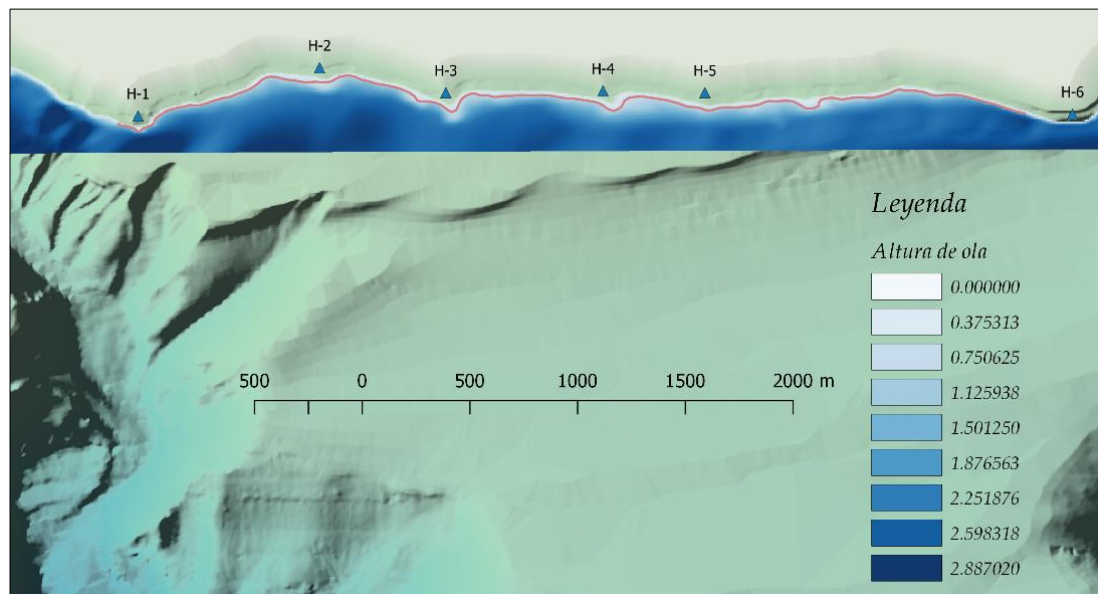


Ilustración 24. Resultado SWAN 'grid' anidado

Como se puede ver la resolución del TIFF aumenta notablemente lo que se traducirá en más precisión a la hora del cálculo de las propiedades en los perfiles transversales.

A continuación, se triangulan las profundidades en cada punto del perfil. La función 'griddata' de Matlab facilita éste trabajo. Éste nuevo 'grid' tiene la propiedad de que su primera coordenada curvilínea es perpendicular a la línea de costa y la segunda paralela a esta por lo que se establece un sistema de referencia inequívoco para cada punto de la costa. Aquí se muestra un mapa en TIFF con las profundidades interpoladas de los perfiles, sólo para ver de qué manera está el programa interpretando los datos de profundidad, y como se puede ver, lo hace de manera correcta en el dominio solicitado.

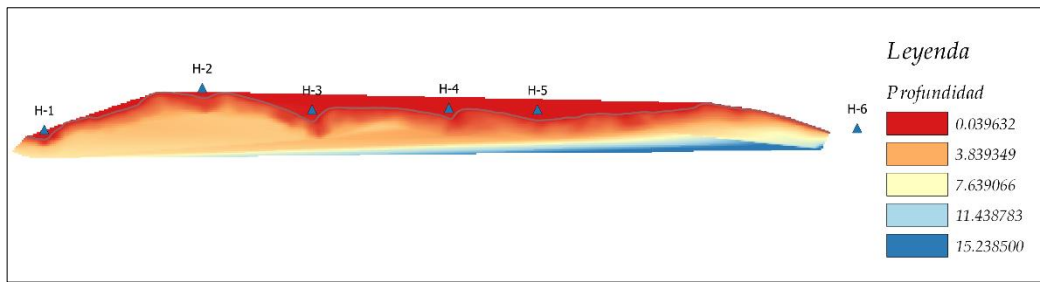


Ilustración 25. Profundidades asociadas a los perfiles

Se sigue exactamente el mismo proceso interpolando las demás propiedades extraídas de DELFT para los perfiles; altura de ola y fracción de rotura.

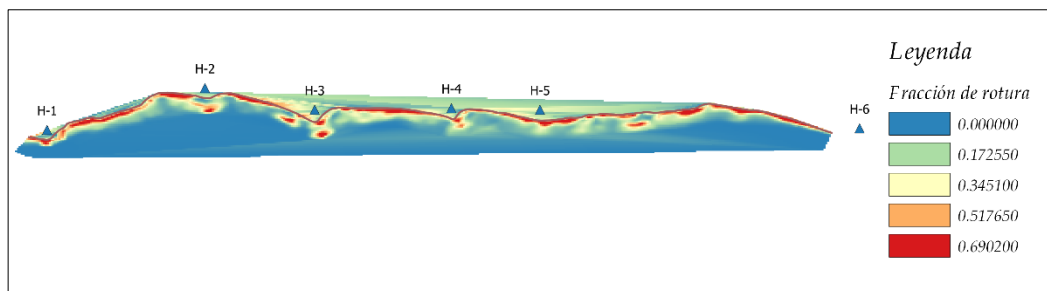


Ilustración 26. Fracciones de rotura asociadas a los perfiles

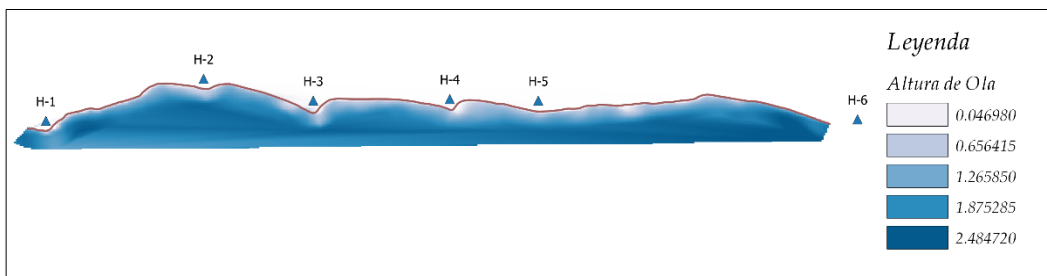


Ilustración 27. Alturas de ola asociadas a los perfiles

Ahora se supone que el oleaje tiene como rayos de onda líneas más o menos paralelas a las de los perfiles generados cuando se acerca a la costa. Para buscar la rotura a efectos de transporte, se requiere saber dónde el oleaje ha roto lo suficiente (ya que lo hace a medida que va sufriendo 'shoaling' en la 'surf zone') como para considerar que esa altura de ola producirá un transporte parecido al que hace el conjunto de oleaje rompiendo en realidad.

Criterio 'No Lineal'; fracción de rotura.

La práctica más común es buscar el valor del coeficiente de rotura ('fraction breaking') que coincide con el punto donde la altura de ola comienza a bajar bruscamente, es decir, la condición física de la rotura.

Para hallar éste valor se visualizaron uno a uno múltiples perfiles en varios casos de oleaje buscando por ensayo y error y sabiendo que éste valor se mueve en el intervalo 0,05-.125. Finalmente se optó por tomar el valor 0.08.

En la siguiente figura se pueden ver dos a dos, relacionados por colores, las alturas de ola en el perfil y su fracción de rotura asociada.

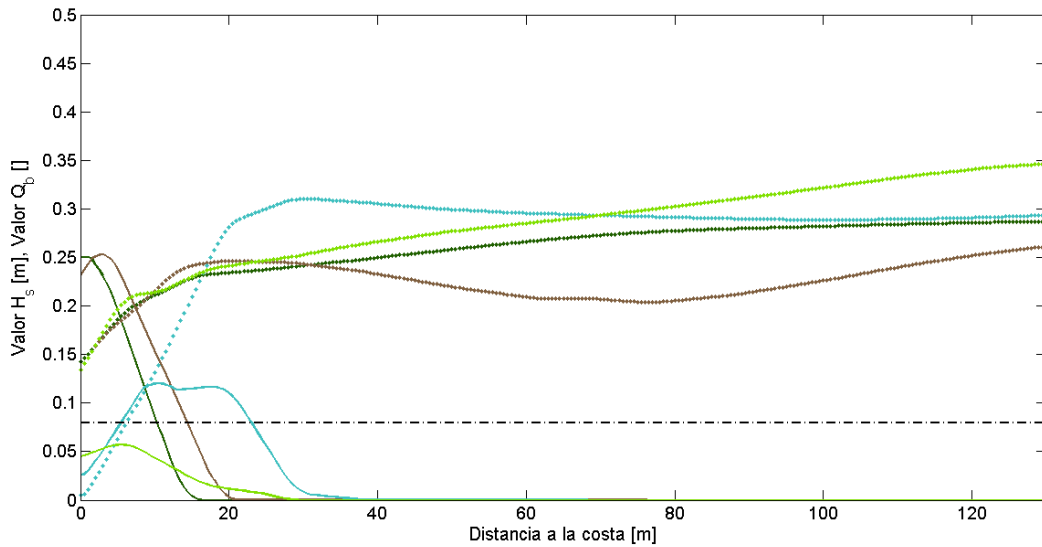


Ilustración 28. Relación Hs -Qb

Se ha marcado el valor 0.08 en la gráfica para dar énfasis al valor de rotura considerado. Véase como el momento en el cual la altura de ola comienza a decrecer, rotura del oleaje, es aproximadamente aquel en el que la fracción de rotura alcanza el valor indicado.

Criterio ‘Lineal’; criterio de McCowan.

En algunos casos, como en oleaje poco energéticos, la gráfica de la fracción de rotura en algunos perfiles es muy achatada, tanto, que nunca llega a alcanzar el valor de rotura (Ilus. 29). Esto se puede visualizar en playas cuando el oleaje es muy suave y apenas rompe hasta llegar a la orilla donde se rompe en una pequeña voluta.

Estos casos generan muy poco transporte ya que éste va relacionado con la altura de ola principalmente, elevada a 2.5, por lo que valores muy pequeños de altura de ola no generarán un caudal de sólidos remarcable.

Para estos perfiles donde la condición de rotura no lineal aplicada da problemas, se aplicará automáticamente el criterio de rotura lineal, o criterio de McCowan.

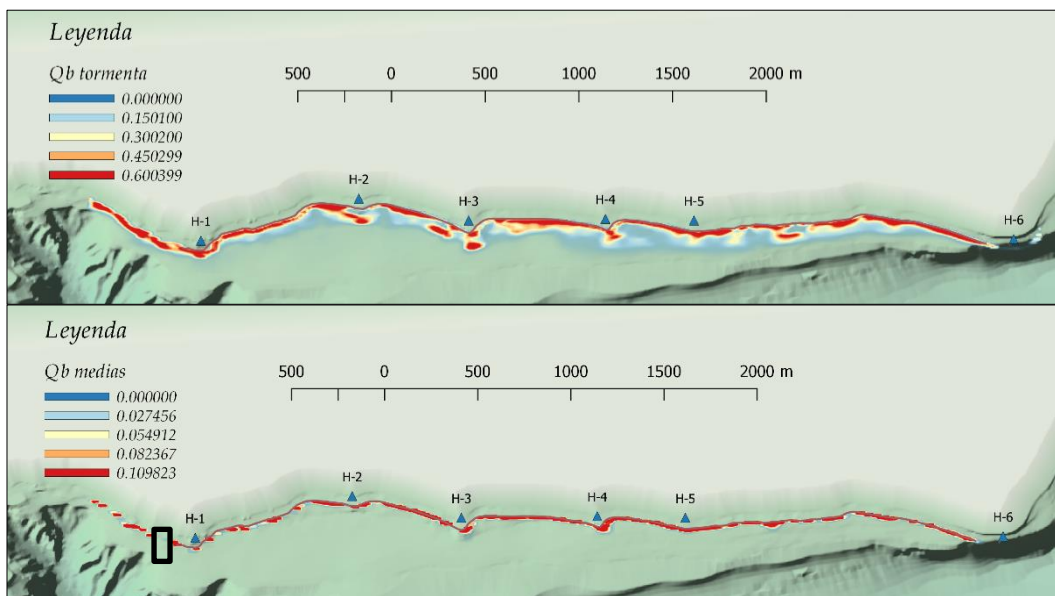


Ilustración 29. Comparación fracciones de rotura

Ejemplo de zona problemática

Éste criterio propone considerar una relación entre la altura de ola máxima y la profundidad a la que se encuentra el lecho de forma proporcional. El coeficiente se toma como $\gamma = 0.78-0.83$ para una ola solitaria, pero en caso de hablar de espectros de oleaje como ocurre ahora, se rebaja éste valor hasta aproximadamente $\gamma = 0.5$. (J.P. Sierra et. Al., 1998).

$$H_b = \gamma h_b$$

Siendo H_b la altura de ola máxima estable en un punto de profundidad h_b .

Las siguientes fotografías muestran que tan bien funciona el criterio en la búsqueda de la rotura en aquellos perfiles en los que la fracción de rotura es demasiado baja.

De nuevo las líneas de mismo color representan el criterio de rotura aplicada a cada perfil buscando el corte con la línea de altura de ola que le corresponde, mientras que la segunda muestra la altura de ola de cada perfil asociada al perfil de cada fondo.

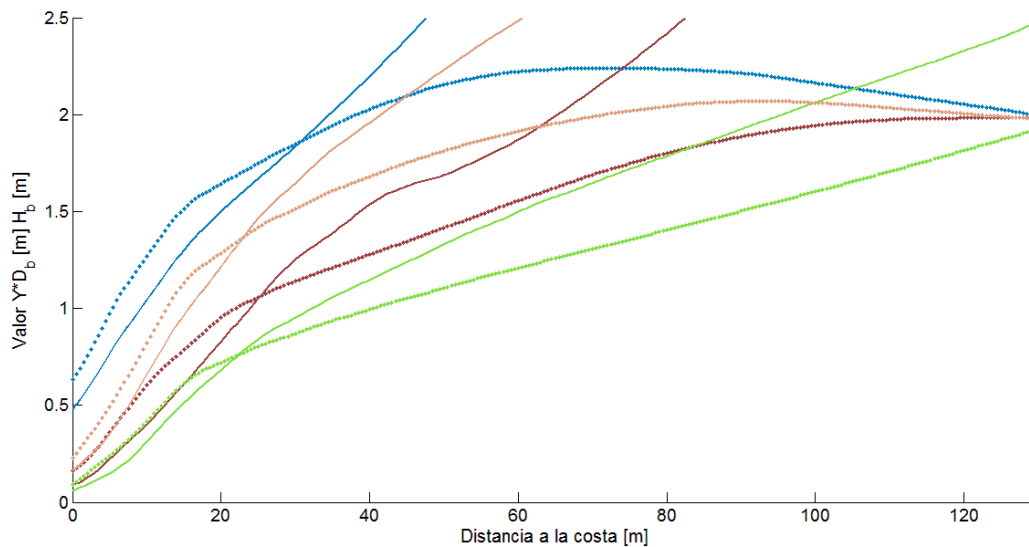


Ilustración 30. Criterio de rotura de McCowan y alturas de ola frente a la profundidad en valor real.

Mediante el procedimiento explicado se procede con todos los perfiles, con los cuatro estados de mar representativos y para las 7 batimetrías por lo que se obtienen 28 escenarios, con sus respectivas líneas de rotura las cuales tienen asociada una altura de ola en su coordenada longitudinal.

Se muestra aquí la línea de rotura del caso ejemplo como se viene haciendo para cada paso del procedimiento.

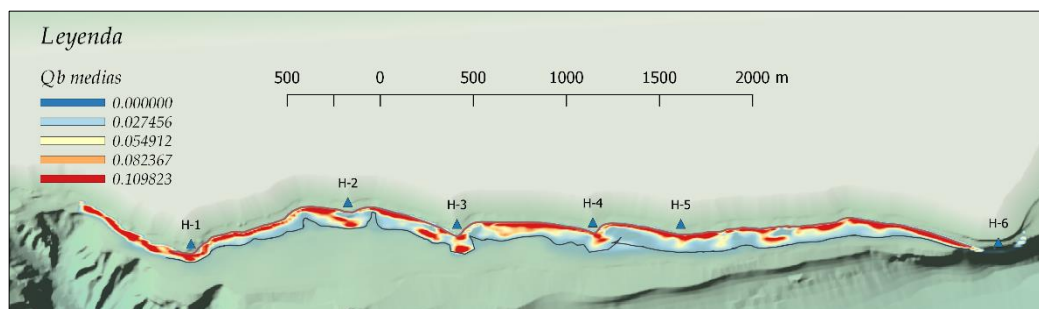


Ilustración 31. Línea de rotura obtenida

Esa línea tiene propiedades muy interesantes para el cálculo de transporte, ya que en ella se da la altura de ola y la profundidad que provocan transporte longitudinal en el perfil transversal.

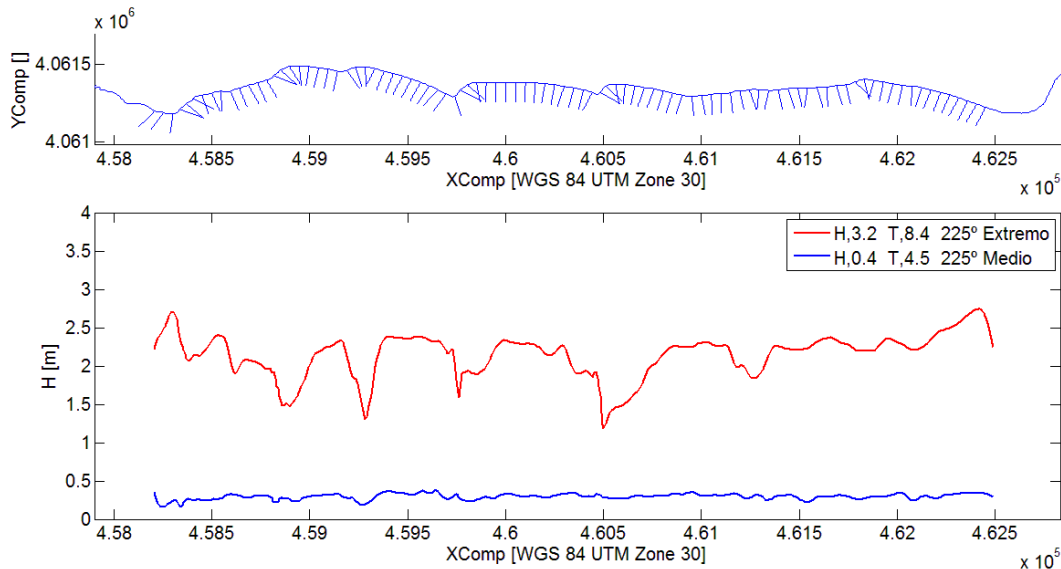


Ilustración 32. Altura de ola en rotura para oleaje extremo y medio

En ésta ilustración se ve la gran diferencia entre la altura de ola en rotura para un clima medio y para un extremo motivo por el cual a partir de éste punto del documento la altura de ola para regímenes medios quedará parcialmente excluida en las comparaciones dado que, ambos escenarios son ficticios, éste contrastará mucho más los datos y permitirá ver mejor las diferencias.

Ésta discriminación no es sólo por motivos estéticos. Cuando hablamos de altura de ola en rotura se ha de decir que ésta va elevada a la potencia de 2.5 en la fórmula implementada para el transporte lo que incrementará aún más la diferencia para nuestro objeto de estudio. No obstante, los regímenes medios serán naturalmente incluidos en el cálculo prolongado en el tiempo.

Por ello mismo, al mismo tiempo que se buscó la rotura, se buscó el valor de la altura de ola y la dirección del oleaje en cada punto. De ésta forma se puede calcular de forma automática el transporte longitudinal de sedimentos mediante la fórmula (USACE.,1984):

$$Q = \frac{\rho K \sqrt{g/k}}{16(\rho_s - \rho)(1 - p)} H_b^{5/2} \sin(2\theta_b)$$

Donde:

- ρ es la densidad del agua, con valor 1025 Kg/m³.
- K depende del tamaño de grano: (del Valle, Medina, Losada.1993).

$$K = 1.6^{-2.5D_{mm}}$$

- g es la aceleración debida a la gravedad, con valor 9.81 m/s².
- k es el valor de la fracción de rotura.
- ρ_s es la densidad del sedimento a transportar, con valor 2560 Kg/m³
- p es la porosidad del material, con valor 0.3.

- H_b es la altura de ola.
- θ_b es el ángulo de incidencia respecto de la perpendicular a la línea de costa.

De ésta forma se calcula el transporte que para el caso ejemplo se representa frente a la coordenada inicial del perfil al que corresponde. Para el caso ejemplo:

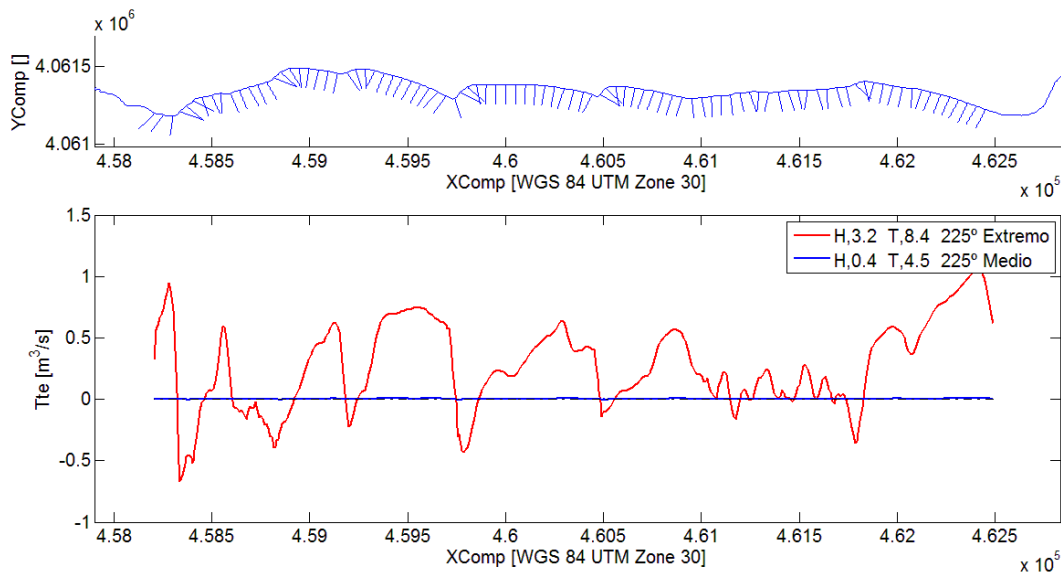


Ilustración 33. Transporte longitudinal

Nótese que valores positivos indican valores del transporte en sentido positivo del eje x, es decir, dirección Este mientras que los valores negativos indican un transporte en sentido negativo del eje x, es decir, hacia el Oeste. También se ha de volver a mencionar el desechable papel del clima medio en cuanto a transporte. Con éste último cálculo se obtiene el transporte longitudinal para cualquier caso de los 28 mencionados.

3.4 Simulación de series temporales largas

Éste mismo código de MatLab servirá para procesar el cálculo desde el 1 de enero de 1958 a las 00:00h hasta el 4 de noviembre de 2015 a las 10:00 en intervalos de 3 horas, es decir, 167462 pasos de cálculo. Éste intervalo de datos viene especificado por la toma de los mismos ya que la boya lo hace con ésta cadencia, suponiendo que un estado de mar no varía bruscamente en éste intervalo de tiempo.

Para poder realizar éste habrá que extender el código de MatLab y los archivos de DELFT en el dominio del tiempo. Para ello DELFT permite introducir los datos mediante archivos 'wavecon' (wave configuration), y da salidas en hipermatrices de $M \times N \times T$, siendo M y N los nodos de la malla y T el número de pasos de tiempo introducidos. Como era de esperar en Matlab, se amplió en una dimensión los bucles de recorrido.

Las matrices resultado de la simulación prolongada son de un tamaño considerable. En concreto serían 7 hipermatrices de tamaño $82 \times 244 \times 167462$ por cada parámetro. Éste volumen de datos tarda en procesarse con Matlab mucho tiempo. Por esto mismo se ha de buscar un método más compacto, por lo que se recurre al 'downscaling' Camus et al. (2011, 2014).

Downscaling

En primer lugar, se sintetizan todos los datos que se tienen en 280 estados de mar que representen en cierto modo todas las condiciones de oleaje en aguas profundas posibles. Éstos estados de mar se encuentran en el rango $s H_0 \in (0.1, 5.2)$ m, $T_p \in (2.5, 19)$ s, and $\theta \in (0, 360^\circ 202)$, sin estar igualmente repartidos para presentar más datos en la zona de más probabilidad de ocurrencia.

En segundo se propagan estos 280 estados de mar y se obtienen los parámetros de rotura para calcular el transporte en cada caso, teniendo así el transporte de cada uno de los estados de mar representativos.

Éstos resultados permiten reconstruir el transporte durante la serie larga al completo, interpolando cada condición de oleaje en aguas profundas desde 1958 en los 280 casos anteriormente citados. Además, teniendo ésta base de datos se puede calcular el transporte para más estados de mar sin tener que propagar

Este procedimiento acorta en un 99.4% el tiempo de cálculo haciendo viable el cálculo en un periodo corto de tiempo ya que de no existir se tardaría aproximadamente seis meses.

El USACE (USACE.,1984) nos ha cedido los 280 estados de mar representativos del resto, que permiten realizar ésta área de interpolación de donde extraer los caudales de sólidos para los casos reales. La Ilus.21 muestra la rosa de oleaje de éstos estados de mar.

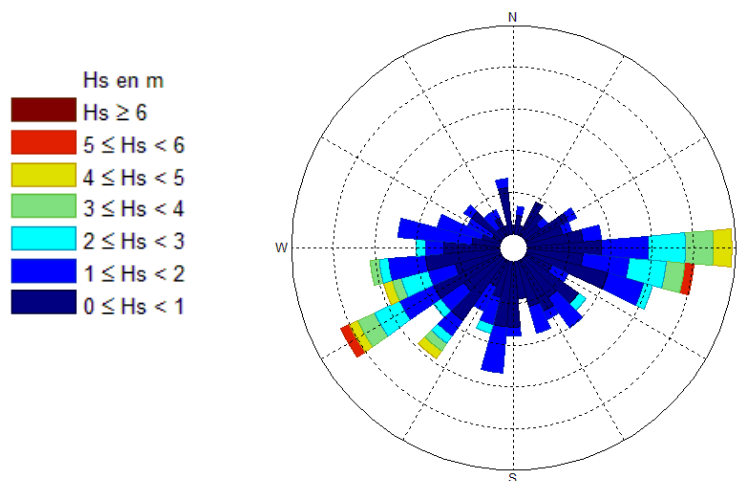


Ilustración 34. Rosa de oleaje. CERC

Se ha repetido el proceso de propagación de los estados de mar para cada una de las batimetrías. Una vez realizado éste procedimiento comprobamos cuantos estados de mar reales han podido ser interpolados obteniendo así un 98.22% de estados de mar interpolados con éxito.

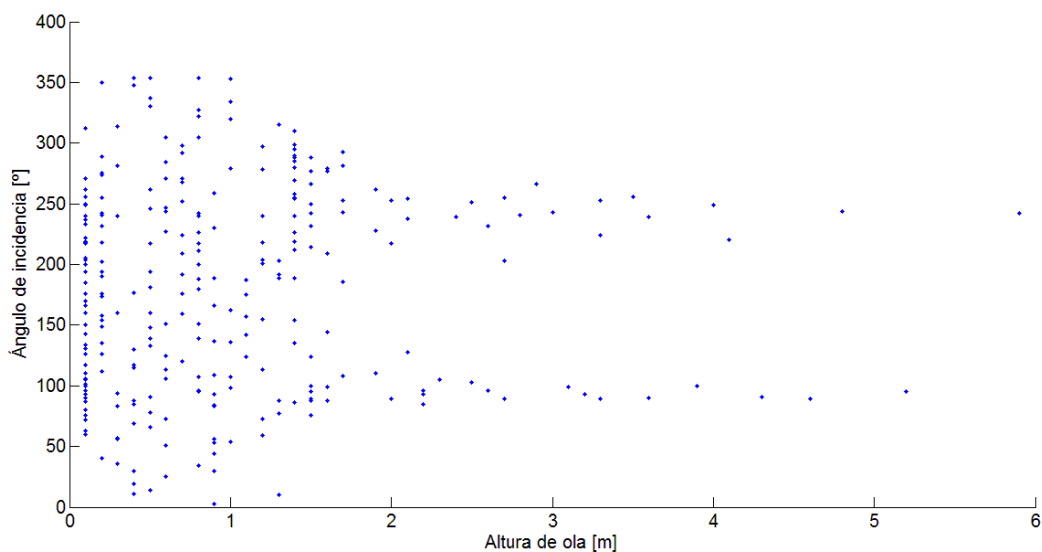


Ilustración 35. Proyección de la nube de puntos de los casos del 'downscaling' sobre los ejes de ángulo y altura de ola

El resultado de la interpolación es una matriz de tamaño 460x167462 con caudales de sólidos en m³/s, lo que representa el valor del transporte para cada uno de los 460 perfiles y para cada uno de los 167462 estados de mar estudiados. Ésta matriz contiene gran cantidad de información y se analizará mediante distintas funciones estadísticas para extraer conclusiones de los datos que contiene.

4 RESULTADOS DE LOS CASOS REPRESENTATIVOS

En primer lugar, se analizarán las características hidrodinámicas básicas de Carchuna. Posteriormente se compararán las alturas de ola entre distintos escenarios batimétricos. Para ello se obtendrá un nuevo ráster como el obtenido para las alturas de ola, pero empleando dos de ellos y comparándolos mediante la expresión:

$$H_r = \frac{H_j}{H_i} \quad \text{para comparar el escenario i con el j}$$

Lo que implica que valores por encima de la unidad indicarán un aumento de la altura de ola en el escenario ficticio o secundario y valores por debajo de la unidad una disminución de la altura significativa en el mismo.

Estas comparaciones son para casos exclusivos de estados de mar y por tanto no son representativas de las series temporales largas, sin embargo, nos ayudan a visualizar de forma clara de qué manera se modifica el régimen hidromorfodinámico durante un estado de mar concreto.

4.1 La hidrodinámica de Carchuna

Para comprender como funciona de manera natural el sistema, se propagan los estados de mar anteriormente mencionados para la batimetría natural. Esta batimetría natural de alta resolución 5x5 metros, así como los escenarios modificados han sido cedidos por el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (GDFA) de la Universidad de Granada para la realización de éste documento.

En la Ilus.36 podemos ver las propagaciones de oleaje sobre la batimetría natural. Éstos son los oleajes que antes se decían parecidos a los más probables que puedan ocurrir en SIMAR 2042080.

La primera informa a detallar por el resultado es la baja influencia que tiene el fondo en la forma de propagación de la energía pues en los regímenes medios no se observa perturbación alguna en la altura de ola. Esta varía de forma gradual desde la altura de aguas profundas a cero sin mostrar patrones de ningún tipo a su paso por el cañón, en el caso de 225°, ni a su paso por las ondulaciones en la IPW, con el oleaje a 112°.

En segundo lugar, para los oleajes más energéticos aparecen extraños patrones de propagación del oleaje generados por la presencia del cañón de Jolúcar. Desde que el frente de onda pasa por encima su rayo de avance comienza a difractarse por la presencia del fondo.

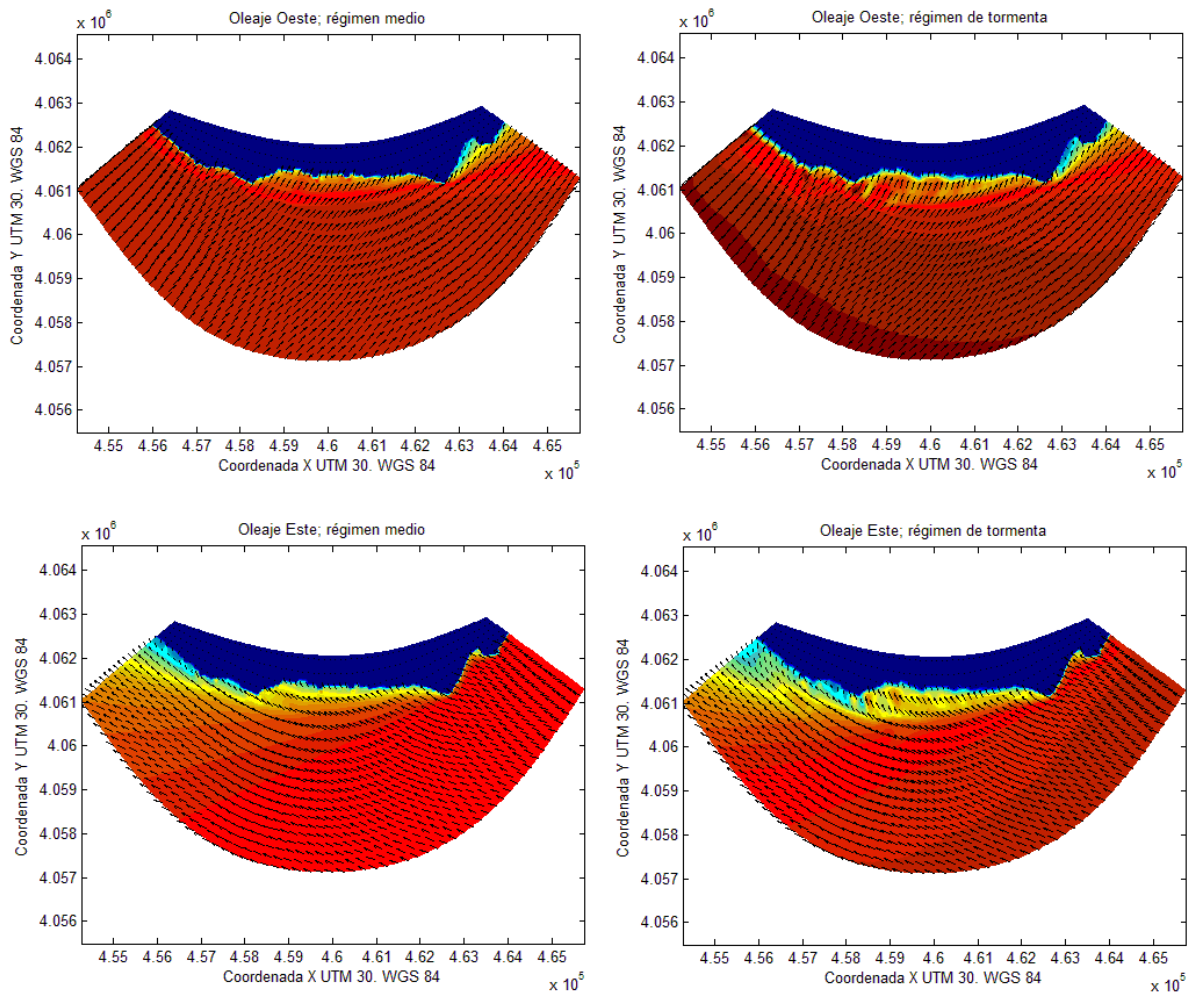


Ilustración 36. Propagación de oleajes para batimetrías naturales

Además, las alturas de ola decaen más rápidamente donde hay un cambio fuerte de profundidad, decayendo más lentamente las alturas de ola correspondientes a los rayos que recorren las cabeceras.

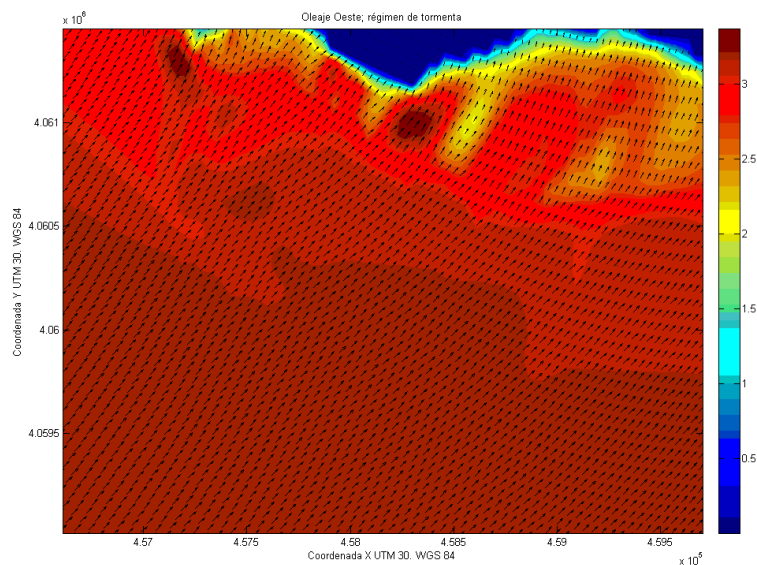


Ilustración 37. Detalle del oleaje a su paso por las cabeceras Este y Oeste

También se percibe un efecto de refracción generalizado en toda la costa como era de esperar debido a los cambios de profundidad que sufre el oleaje al acercarse a la costa durante su propagación. Junto a eso, la posición de la playa adentrada en el mar hace que algunos estados de mar apenas perturben la zona cercana a la línea de costa.

El oleaje proveniente del Oeste presenta ese ángulo debido a que es el que mantiene la playa con el estrecho de Gibraltar, permitiendo la entrada al oleaje que provenga de esa zona. Este estado de mar llega de lleno a la costa, mientras que el oleaje proveniente del Este tiene un ángulo muy acusado por lo que peina la zona en dirección Oeste.

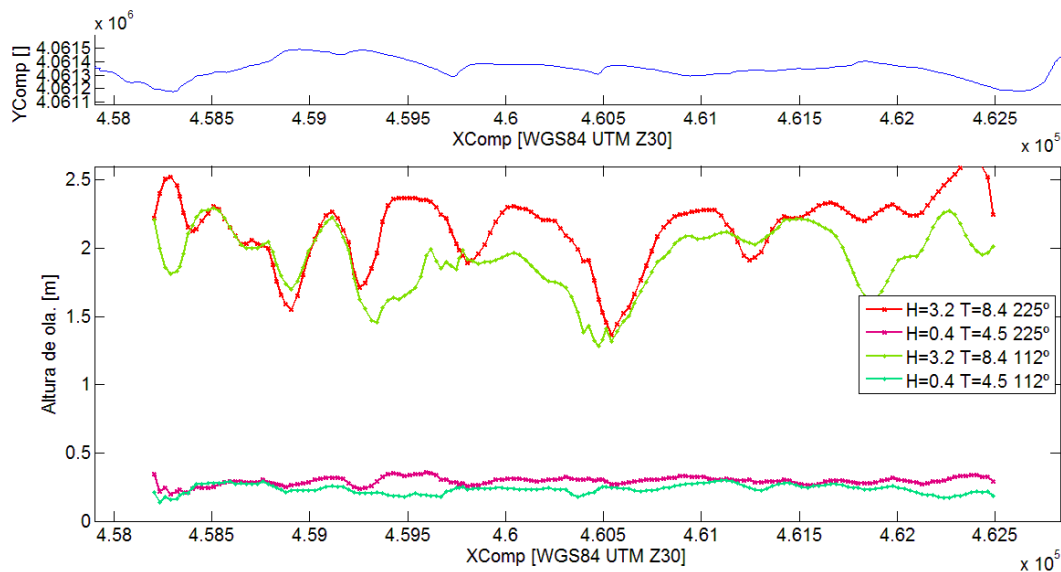


Ilustración 38. Alturas en rotura en Carchuna. Las alturas de ola, periodos y ángulos utilizados son los correspondientes a los casos descritos anteriormente

En la Ilus.38 se muestran las alturas de ola en rotura de cada perfil de la costa (la condición de rotura se explica en el apartado 3, metodología). Las alturas de ola para regímenes medios a lo largo de la costa no varían en demasía a diferencia de las alturas de ola que se observan en estadios de tormenta. Este energético oleaje es más sensible al fondo al tener mayor altura de ola, por lo que sufre más las variaciones del cañón y de la morfología de la costa. Se puede ver como se crean zonas de sombra tras las cúspides, justo en el lugar opuesto a la procedencia del oleaje, alternándose por tanto con el estado de mar.

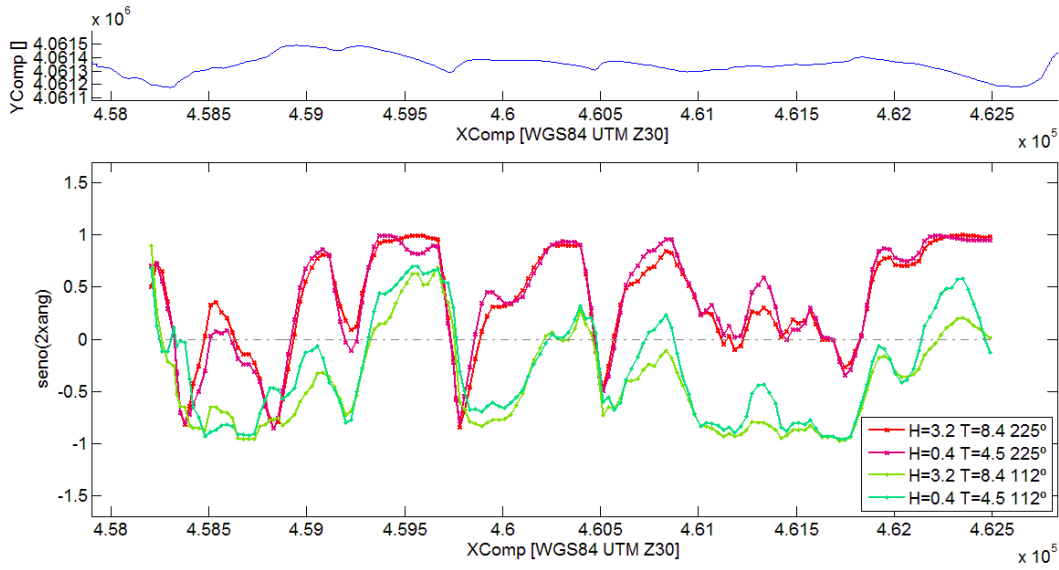


Ilustración 39. Seno del doble del ángulo de los estados de mar anteriores en la línea de rotura

Se muestra el seno del doble del ángulo ya que ésta es la magnitud fundamental a la hora del cálculo del transporte. Los valores por encima de cero indican dirección tangencial a la línea de costa en sentido Este y viceversa, por esto mismo los oleajes provenientes del Oeste muestran direcciones positivas al contrario que los oleajes provenientes del Este, que arrastrarán el sedimento en sentido contrario.

Un seno igual a cero, por lo que el ángulo también, indica incidencia completamente perpendicular del oleaje respecto del perfil de playa.

4.2 Comparación de los escenarios uno y dos

Se proceden a comparar como se indica al principio de éste capítulo los distintos resultados de la propagación de oleaje, sus alturas de ola en rotura y sus caudales sólidos.

En primer lugar, se comparan el escenario primero y segundo, éstos divergen en el cañón principal, ya que en el segundo se ha eliminado toda la parte Norte del mismo, lo que a efectos hidrodinámicos simularía que no existe. Para el oleaje representativo proveniente del Oeste en régimen extremo:

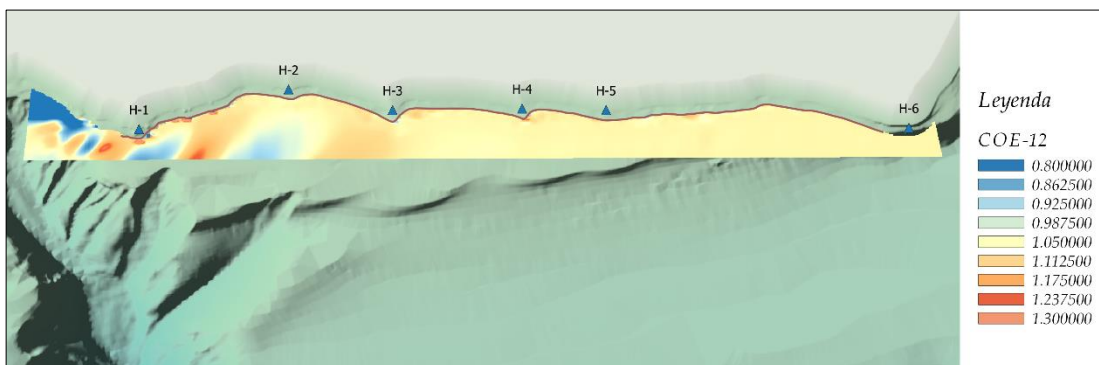


Ilustración 40. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 2. Oleaje proveniente del Oeste

Se puede ver de qué manera la presencia del cañón perturba fuertemente la distribución de la altura de ola por la costa hasta un 25% y que sobre la zona Este no hay afección alguna. El efecto del ‘shoaling’ hace que sólo las puntas de las cabeceras afecten realmente a la hidrodinámica costera ya que a mayor profundidad el ‘shoaling’ no ha ocurrido y el oleaje se sigue propagando en condiciones de aguas profundas-intermedias.

También es interesante comparar los mismos escenarios en condiciones de tormenta, pero con el oleaje proveniente del Este.

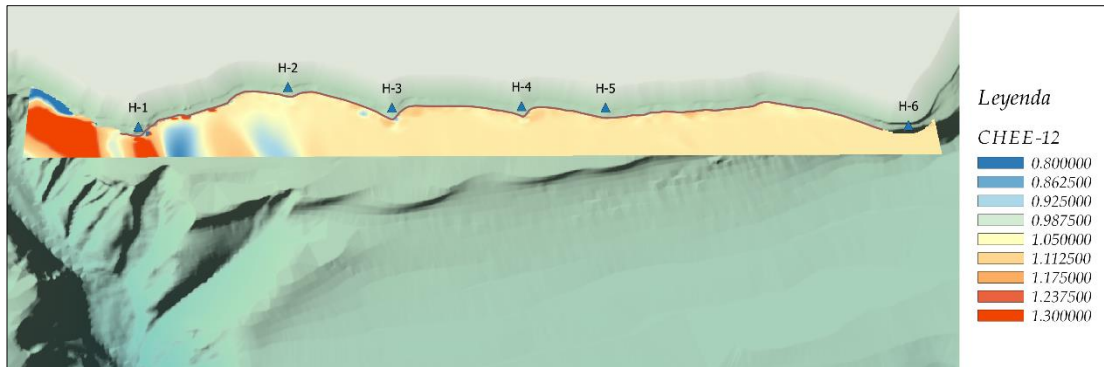


Ilustración 41. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 2. Oleaje proveniente del Este

El efecto en éste caso es parecido, con variaciones aún más fuertes, de hasta un 30%. Para ambos resultados se comienza a percibir la fiel relación que guardan Jolúcar con la peculiar forma de la costa de Carchuna en su zona más occidental, formación dominada por los tonos azules que indican mayor altura de ola en el escenario real y por tanto una presunta erosión.

Se comparan ahora las alturas de ola y sus transportes;

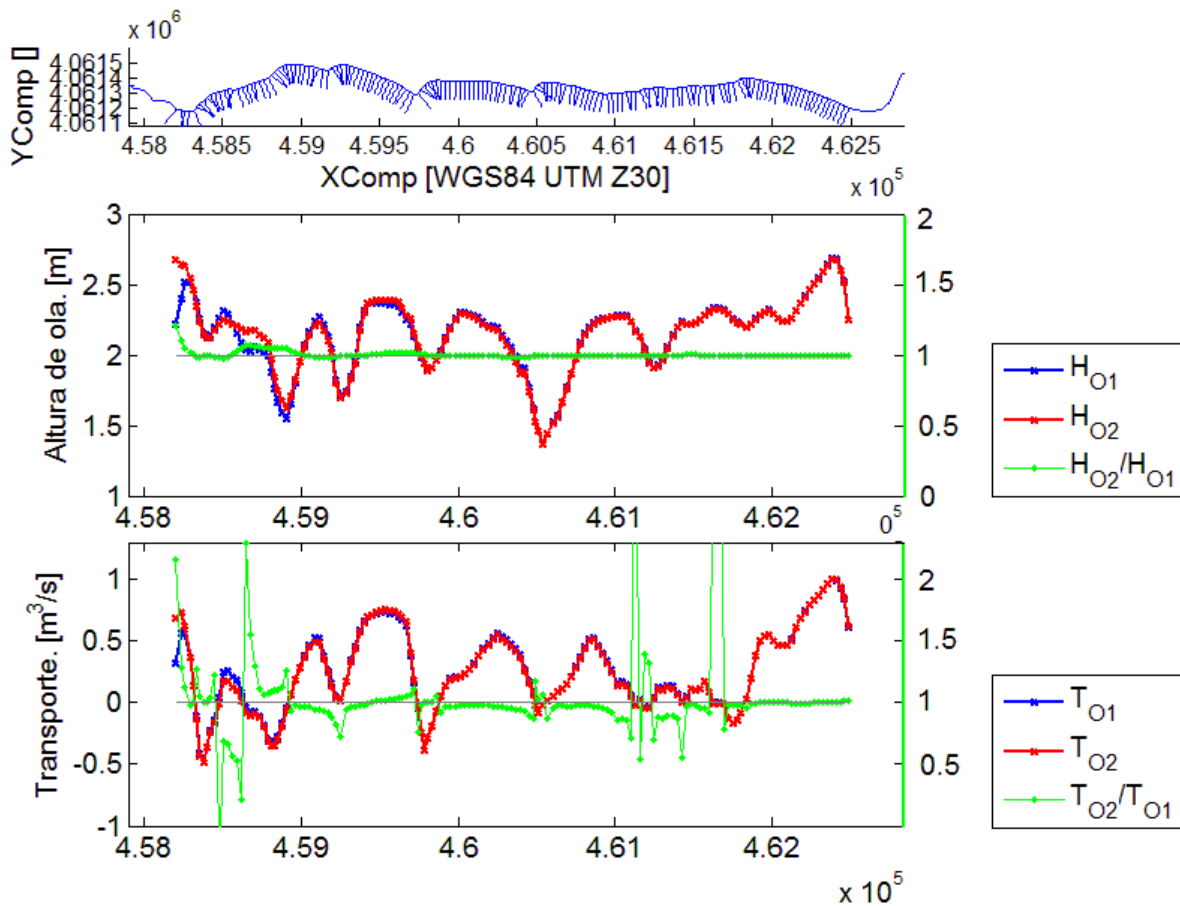


Ilustración 42. Comparación oleaje Oeste entre escenario uno y dos

En primer lugar, la mayoría del transporte ocurre en dirección Este como era de esperar. Las olas provenientes del Oeste barren la costa en ese sentido. Existen variaciones de la altura de ola de hasta el 20% en la línea de rotura y como era de esperar, esta se localiza a escasos metros de la cabecera del cañón.

En ocasiones, el transporte puede presentar diferencias muy grandes o que tienden a infinito. Esto ocurre no por un cambio muy brusco de la altura de ola, sino debido a aquellos puntos donde el oleaje anteriormente llegaba totalmente perpendicular y no producía transporte.

Al modificar levemente las condiciones el ángulo de incidencia se modifica también el transporte de forma suave y comienza a existir, el cual, dividido entre el caso anterior a transporte cero, tiende a infinito. Se ha intentado suavizar éste efecto evitando éstos perfiles. Por este mismo motivo los gráficos de diferencias se han de mirar en conjunto, ya que las diferencias de altura de ola nos darán las pistas para saber si la variación de transporte es lógica. Un sitio donde la altura de ola no varía a penas pero que muestra una diferencia en el transporte muy grande indica una situación problemática.

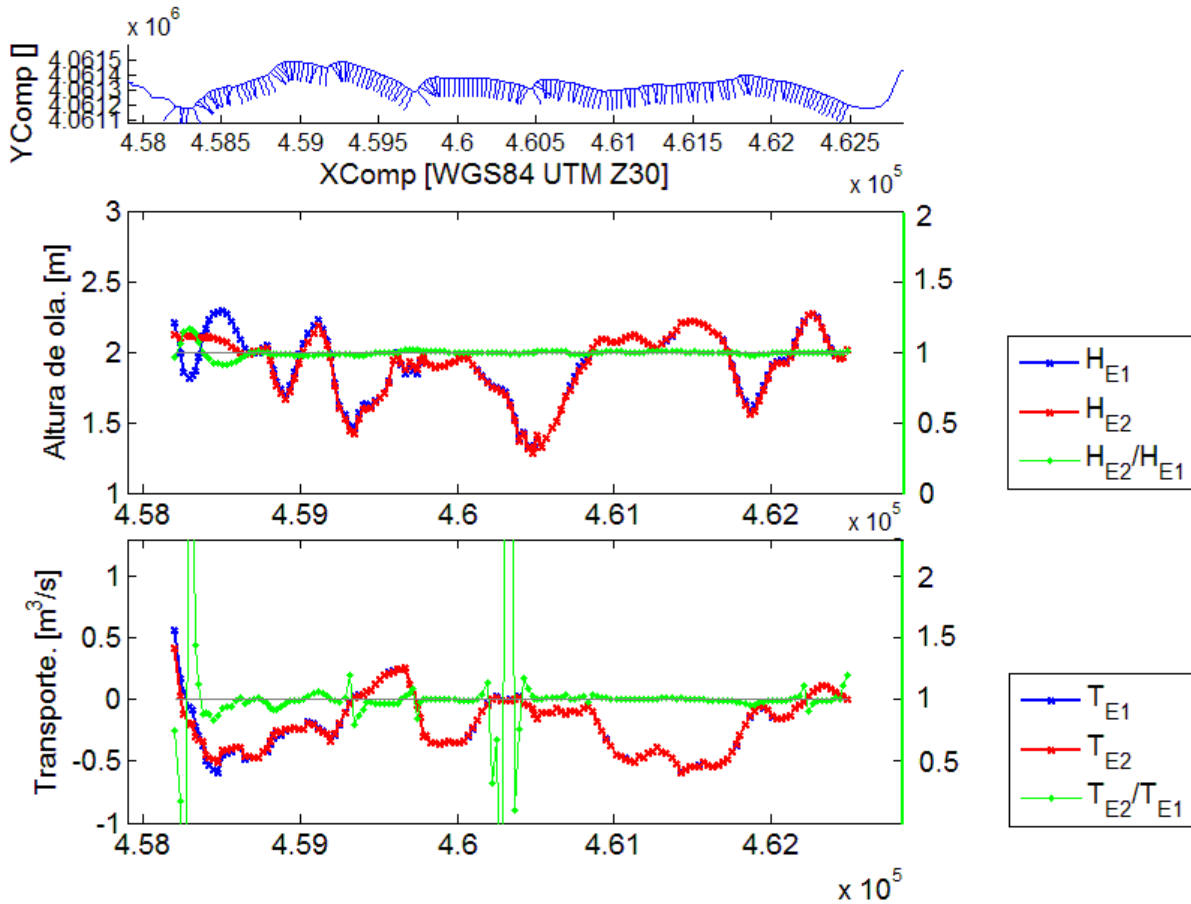


Ilustración 43. Comparación oleaje Este entre escerio uno y dos

A diferencia que en el caso anterior aquí el transporte es menor (menos área bajo la curva) y en su mayoría en dirección Oeste como era previsible.

En el gráfico de variación de altura y en el de variación de transporte se ven diferencias en la zona occidental de Carchuna. Las grandes variaciones en la zona central se pueden ver relacionadas con zonas donde la altura de ola no varía y donde el transporte es casi cero, lo que da lugar al problema anteriormente expuesto.

De estas dos comparaciones se obtiene una clara conclusión; el cañón Jolúcar parece tener influencia sobre la aparición de las cúspides H1 y H2.

4.3 Comparación de los escenarios uno y tres

En éste caso se compara el escenario real con el escenario ficticio tres, en el cual no existe el tributario Oeste del cañón.

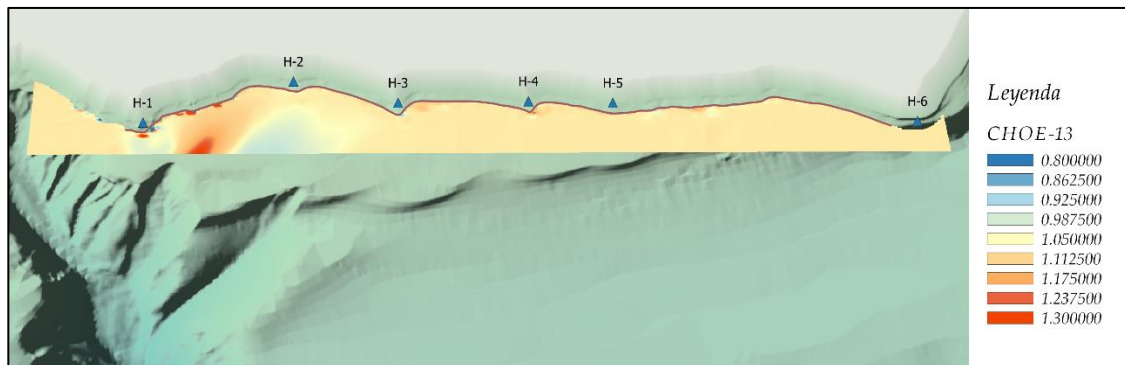


Ilustración 44. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 3. Oleaje proveniente del Oeste

El primer dato destacable que se extrae de la comparación de éstos escenarios es el hecho de que del cabo Sacratif hacia el Este la variación de alturas de ola es prácticamente igual al caso anterior. Esto nos hace pensar en que el tributario Oeste debe influir poco en la hidrodinámica.

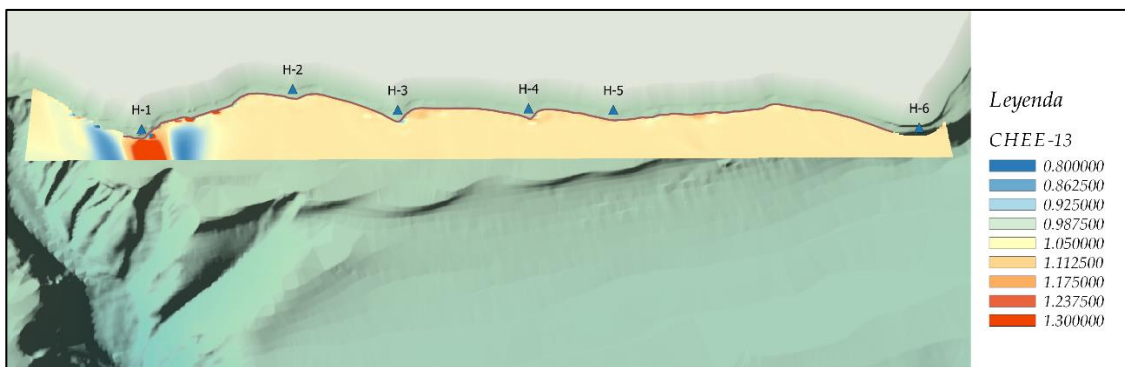


Ilustración 45. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 3. Oleaje proveniente del Este

Igual para éste caso donde, además, a los laterales del rayo incidente en la primera cúspide se percibe una disminución de la altura de ola respecto de la batimetría natural, quizá por la acumulación de la energía él y la pérdida en los flancos.

Como era de esperar, se ve una variación de la altura de ola al este del cabo Sacratif muy parecida al caso anterior mientras que el resto tampoco modifica excesivamente sus condiciones de altura de ola.

En cuanto al transporte se puede ver que las variaciones más notables ocurren en la zona donde también lo hace la altura de ola mientras que los lugares donde la altura de ola varía menos no muestran excesiva variación del transporte, es decir, los ángulos de incidencia a penas se han modificado en la vertiente oriental de Carchuna.

Para el caso opuesto al anterior la altura de ola se centra frente a H-1, incrementando la altura de ola al Oeste del mismo y disminuyéndola en el lado contrario. El mismo efecto se refleja en el transporte por lo que se ve la influencia clara que tiene el tributario Oeste en la primera punta del sistema.

En ambos casos transporte se aumenta en la zona modificada, en un sentido o en otro, lo que podría hacer pensar en que el H-1 podría ser barrido, pero no olvidemos que éste es fijo por su naturaleza montañosa.

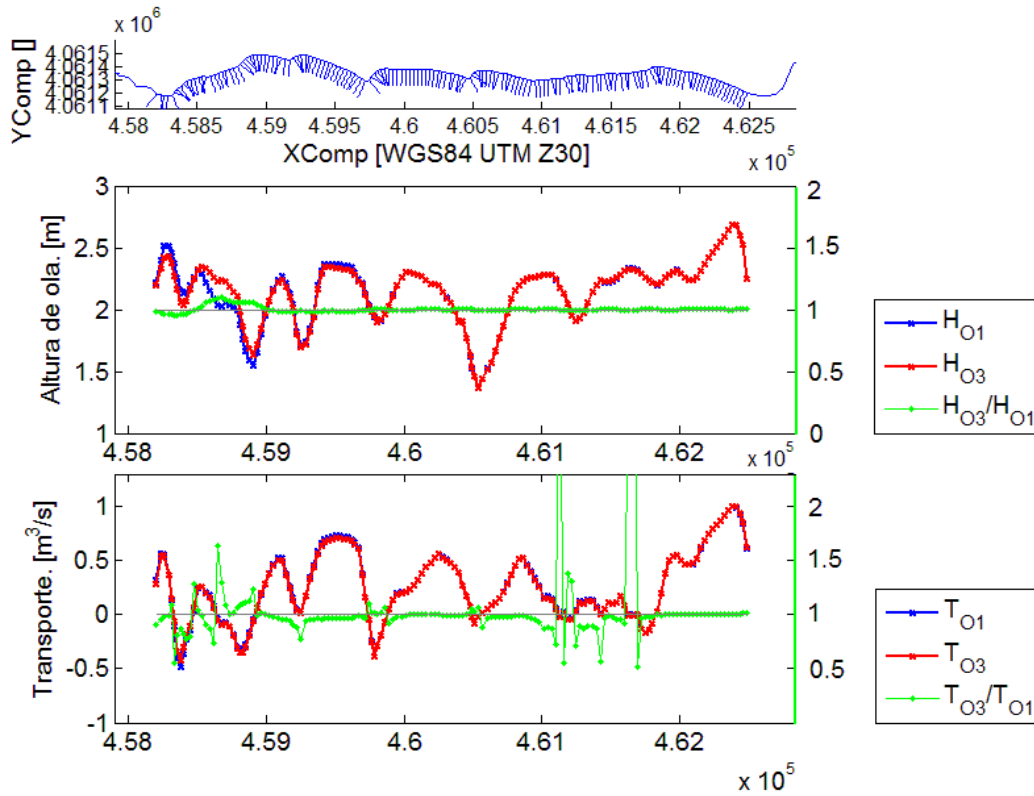


Ilustración 46. Comparación oleaje Oeste

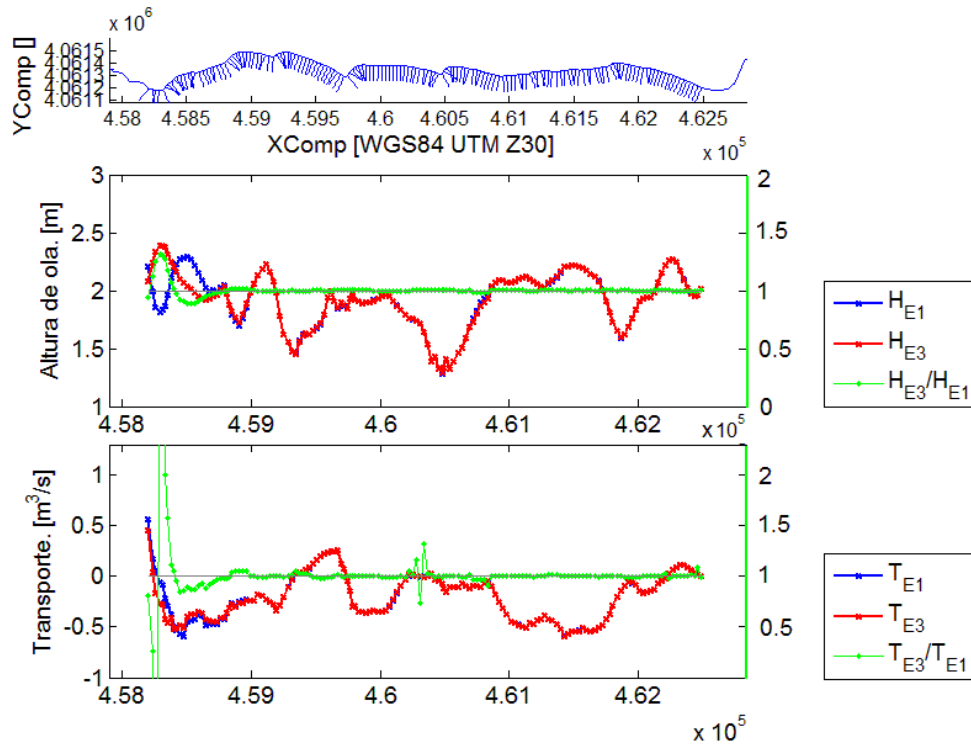


Ilustración 47. Comparación oleaje Este

4.4 Comparación de los escenarios uno y cuatro

Comparamos ahora el escenario natural con el cuarto escenario, que no contiene al agente más débil de los mencionados en éste documento, el tributario Este. Probablemente su impacto sea tan débil debido a su profundidad lo que haría que los efectos de shoaling fueran menores que en el caso anterior.

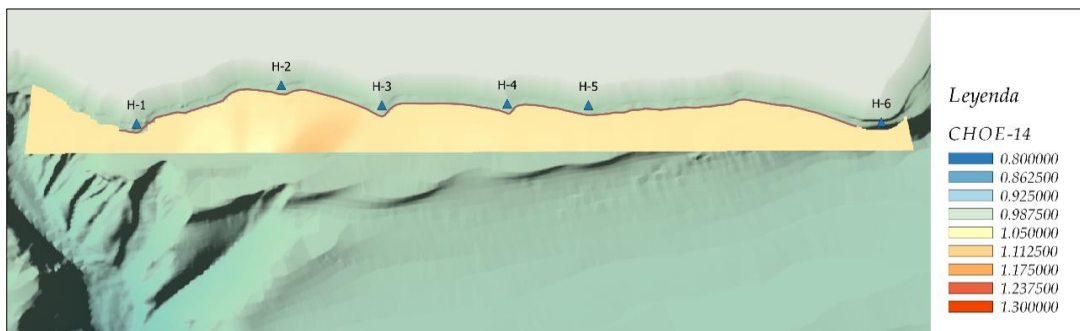


Ilustración 48. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 4. Oleaje proveniente del Oeste

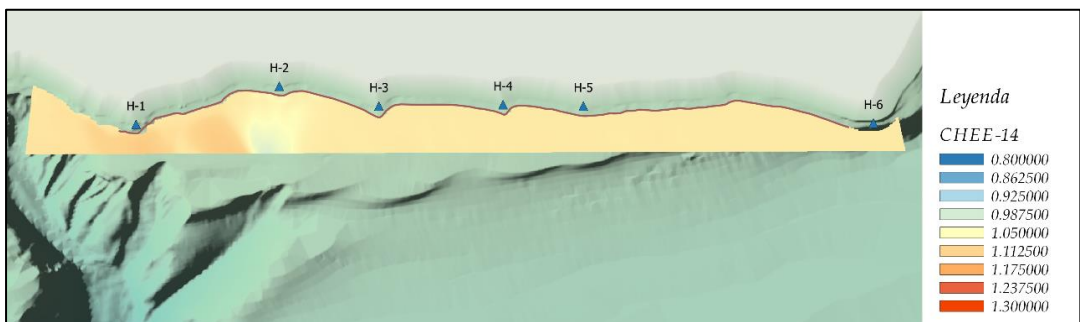


Ilustración 49. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 4. Oleaje proveniente del Este

Ambos casos tienen débiles variaciones de un escaso 10% y esta leve variación va dirigida al H-1 para oleajes provenientes de Este y al H-3 en aquellos que provienen del Oeste.

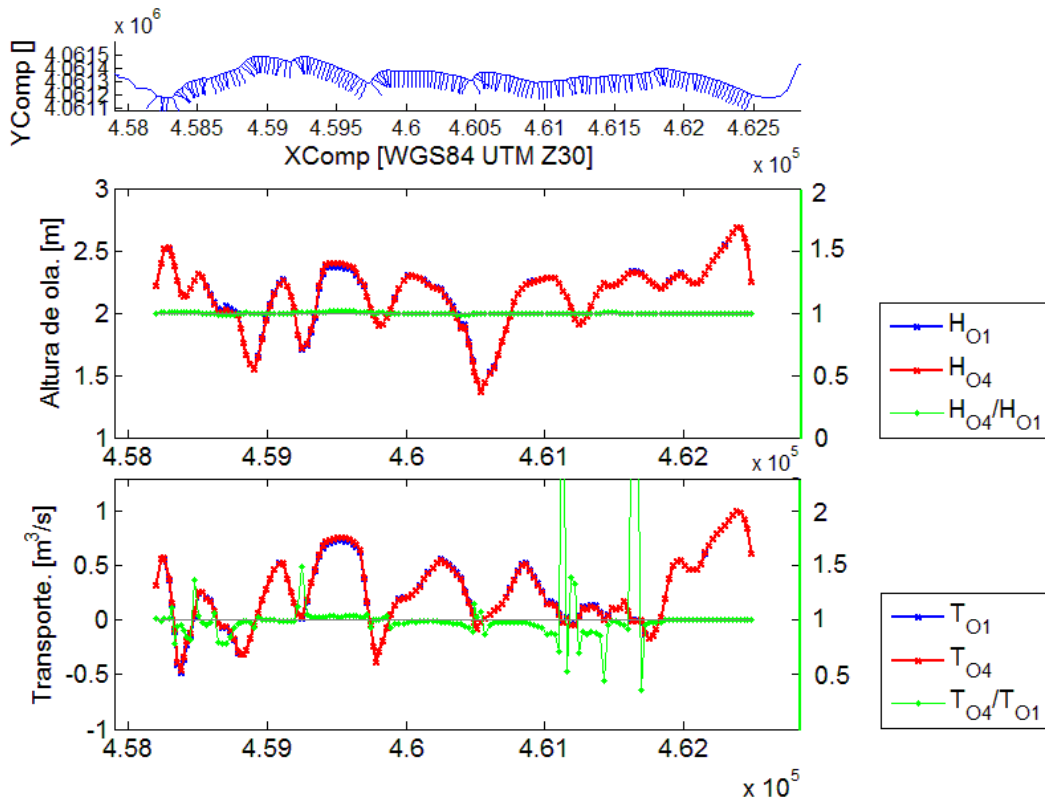


Ilustración 50. Comparación oleaje Oeste

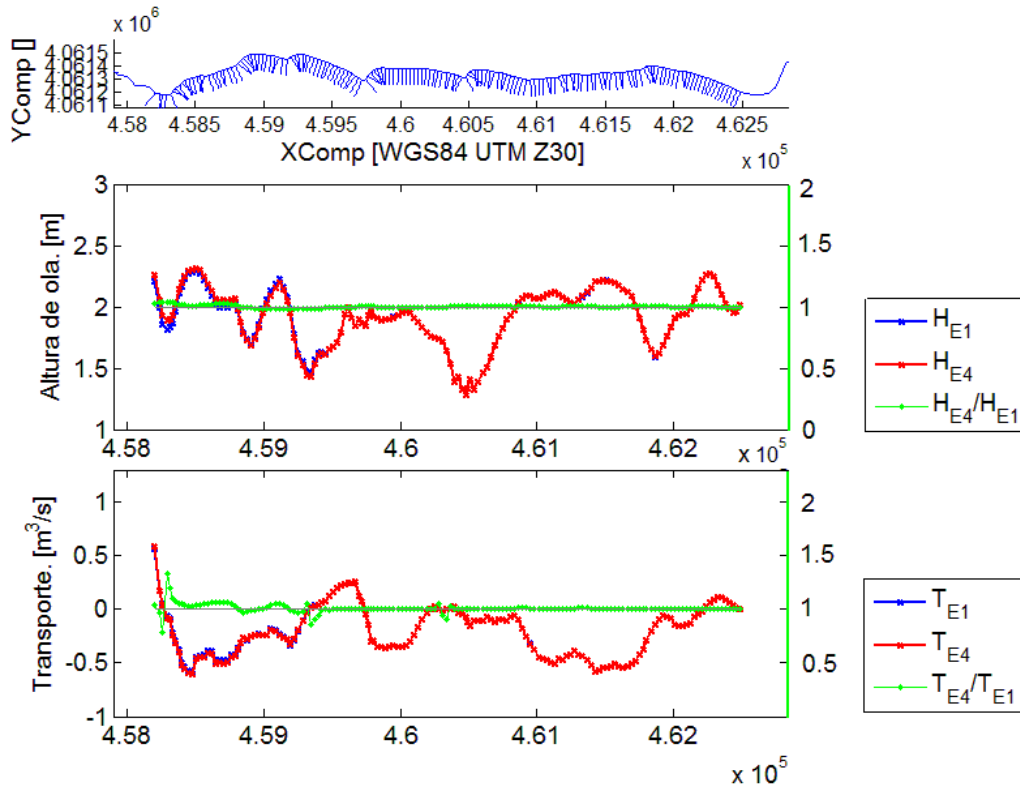


Ilustración 51. Comparación oleaje Este

Se puede ver en todas las gráficas una gran similitud entre ambos sistemas. La influencia es prácticamente despreciable. Con esto concluimos que el tributario Este por si solo introduce pocas modificaciones sobre la línea de costa que introduce el cañón por completo.

4.5 Comparación de los escenarios uno y cinco

En el caso que se compara a continuación se han eliminado ambos tributarios, tanto el Oeste como el Este, combinación de los escenarios tres y cuatro. Se espera de este escenario un comportamiento parecido al de los dos escenarios anteriores o una combinación entre ellos.

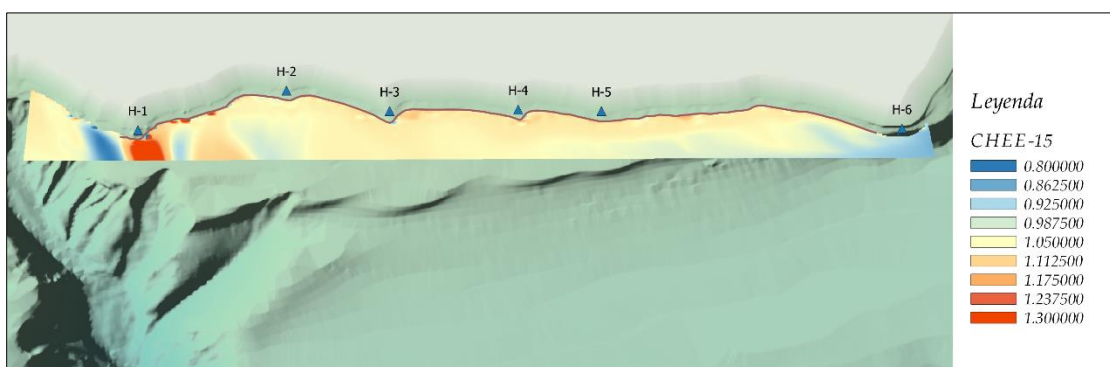


Ilustración 52. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 5. Oleaje proveniente del Oeste

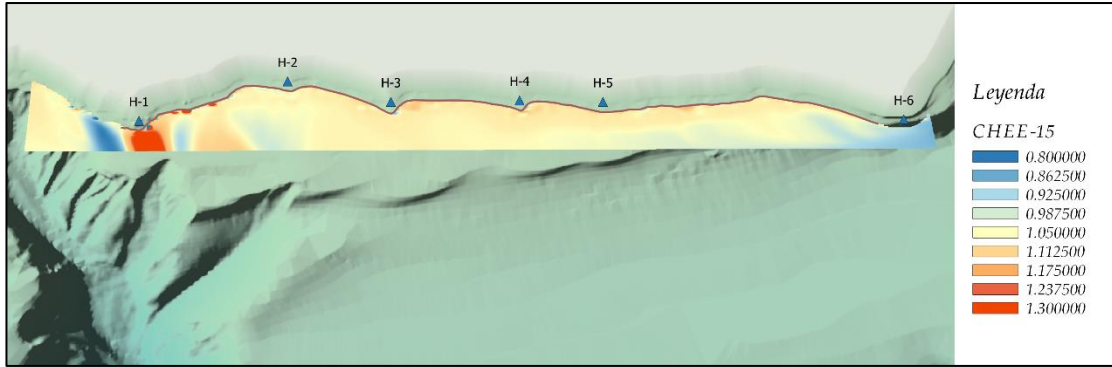


Ilustración 53. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 5. Oleaje proveniente del Este

En efecto, como se explicó en el primer párrafo, el comportamiento calculado es prácticamente una suma de los dos escenarios para ambos casos de oleaje y se ve su clara repercusión sobre los cabos uno, para el caso del oleaje a 225°, y sobre los cabos dos y tres en el caso de 112°.

Se percibe por tanto un efecto lineal en la propagación del oleaje. Esto nos puede dar pistas sobre lo que pasará en el escenario 7, ya que éste es una combinación de los escenarios tres, cuatro y seis.

Al igual que en escenarios anteriores la inexistencia de los tributarios incrementa el barrido de las cúspides tendiendo a suavizar la línea de costa.

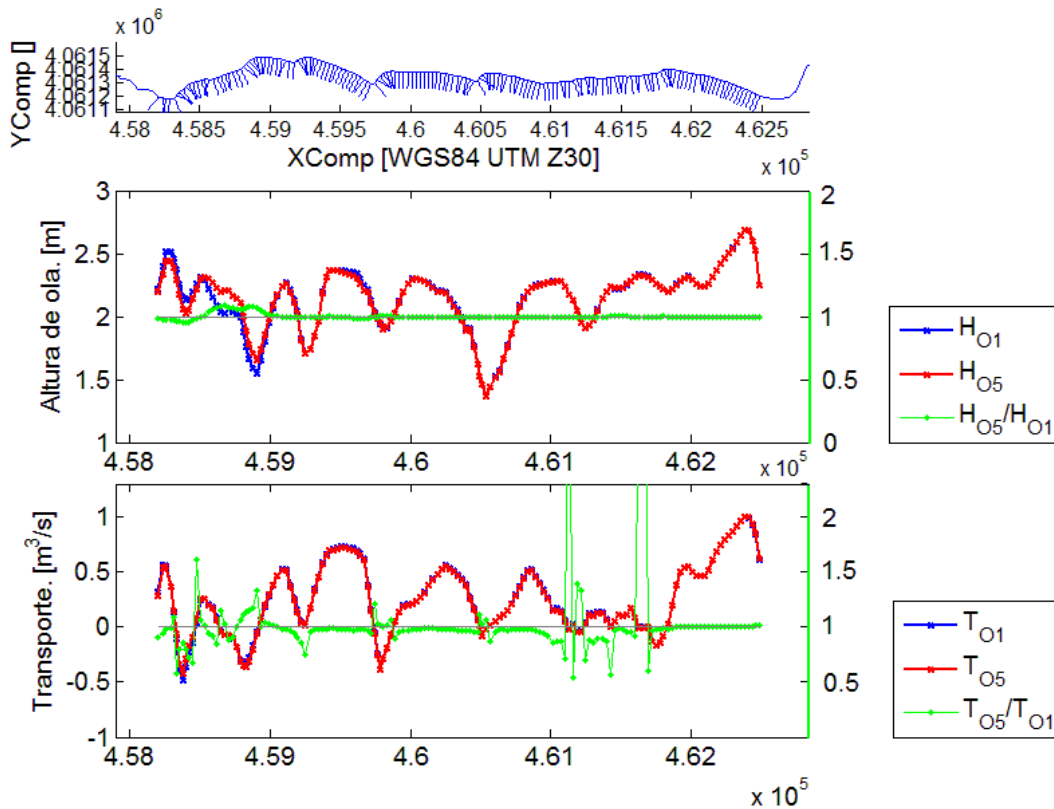


Ilustración 54. Comparación oleaje Oeste

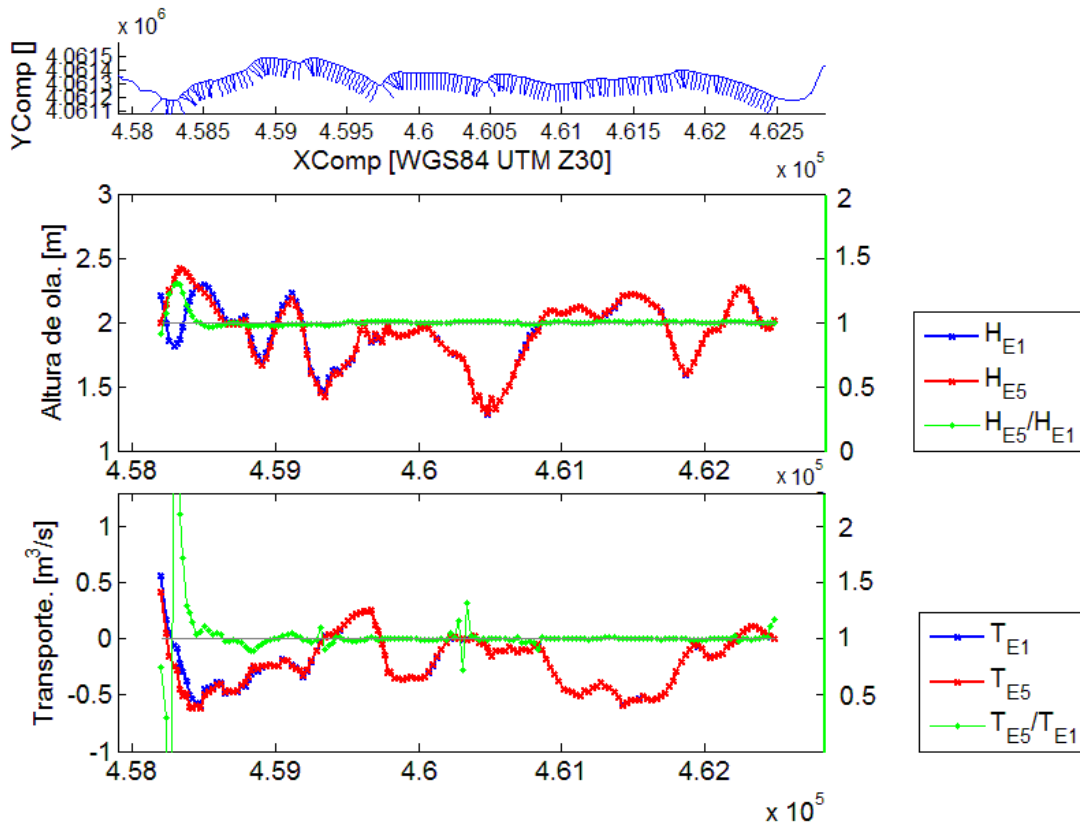


Ilustración 55. Comparación oleaje Este

4.6 Comparación de los escenarios uno y seis

En el escenario seis se han eliminado las curvaturas de la cuña infralitoral, detalle que no se muestra con suficiente precisión en los esquemas. Se muestra aquí abajo un detalle de la modificación.

A pesar de ser un cambio leve, éste tiene una gran influencia sobre la morfología costera ya que como se ha dicho anteriormente el cañón y sus tributarios sólo influyen en la formación de los H-1 y H-2.

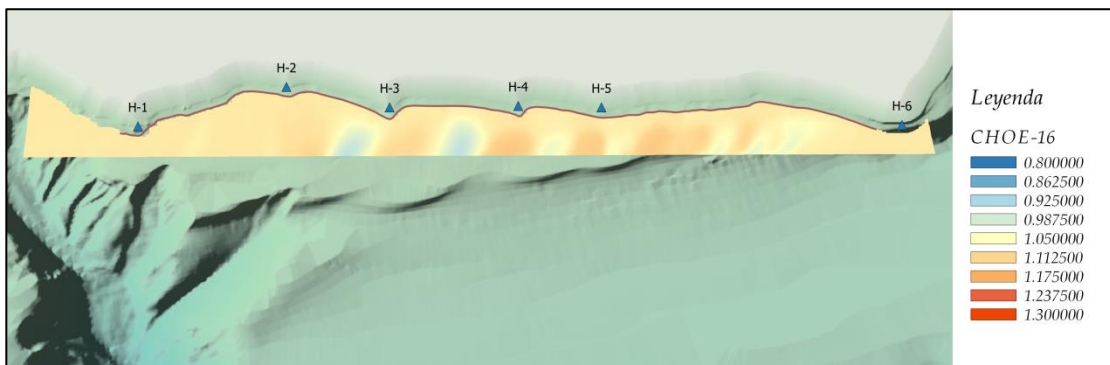


Ilustración 56. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 6. Oleaje proveniente del Oeste

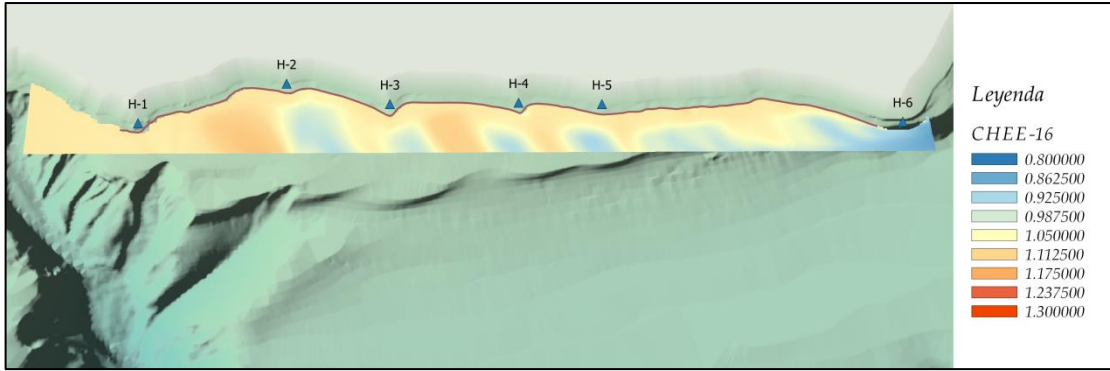


Ilustración 57. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 6. Oleaje proveniente del Este

Se aprecian numerosos frentes de aumento de altura de ola y de disminución de la misma propagándose con la misma dirección que el oleaje de entrada. Éste ejemplo es el más claro para vislumbrar a el funcionamiento de una disminución de la profundidad o un aumento de ésta; una elevación prematura del nivel del fondo (en términos relativos, ya que comparamos con el escenario original) hace que la ola sufra antes el aperaltamiento y por tanto llegue a la zona de transporte menor parte de ésta y por tanto menor energía.

Al contrario, una depresión, produce el efecto inverso por lo que el transporte es incrementado.

Se observa con facilidad en el ráster de alturas de ola la apariencia periódica de las variaciones y además estas variaciones coinciden con la ondulación de la IPW por lo que el efecto es claro sobre todas las puntas excepto la H-1.

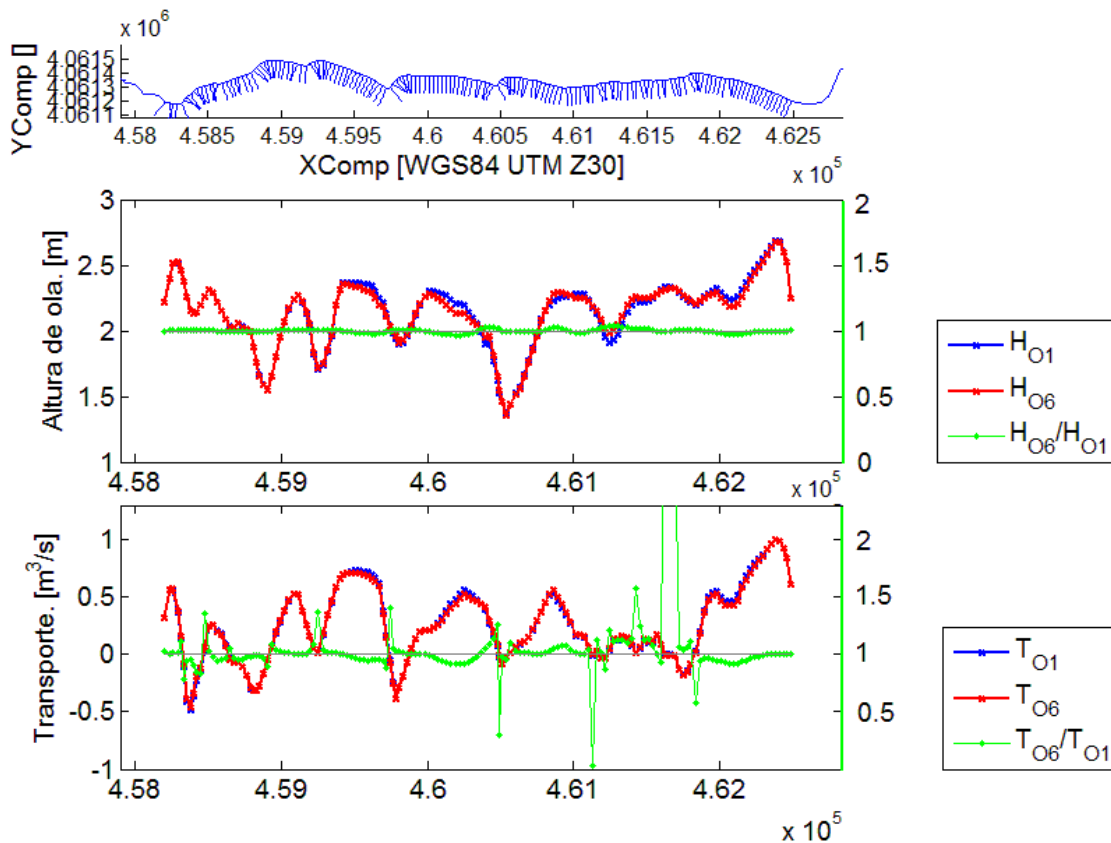


Ilustración 58. Comparación oleaje Oeste

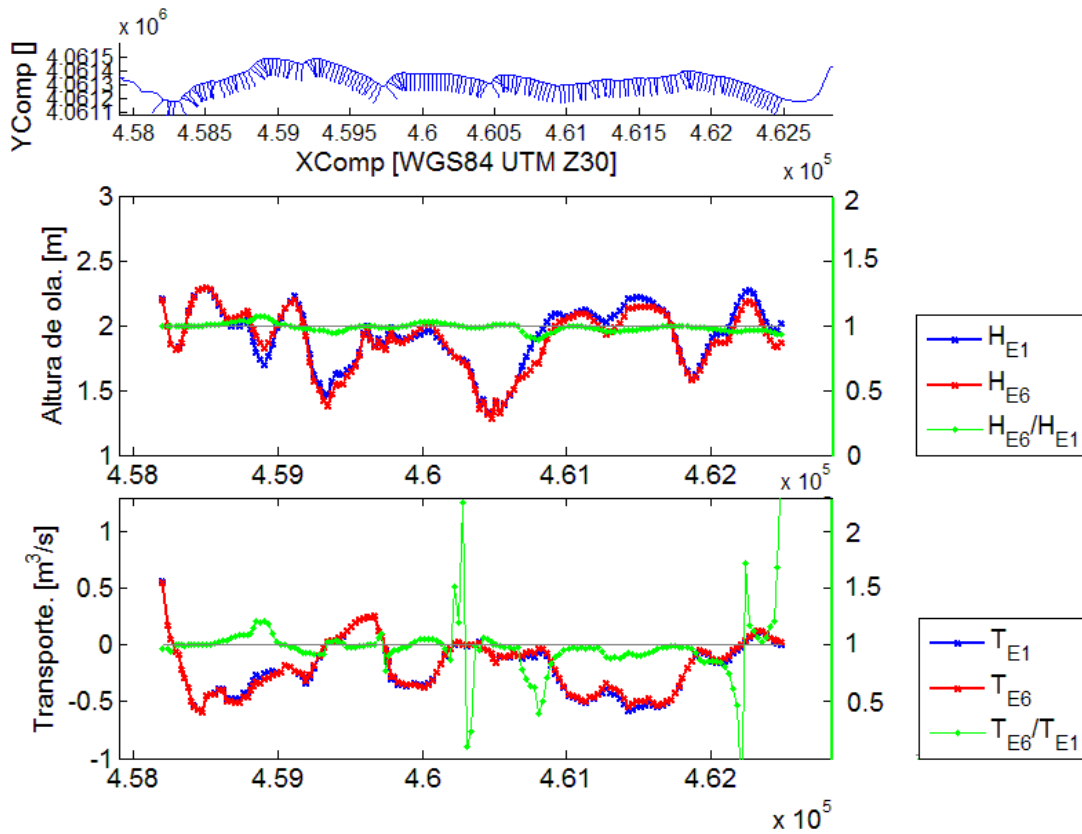


Ilustración 59. Comparación oleaje Este

Las mayores diferencias de altura de ola se producen frente a H-2 y antes de H5 para los oleajes provenientes del Este. Las variaciones de altura de ola que se producen en ambos casos tienen un formato periódico lo que recuerda a la forma de los ‘horns’.

En éste caso, además, se ve reflejado en el transporte el cual muestra las variaciones más claras en frente de las puntas. Las variaciones son un orden de magnitud por debajo de las que produce Jolúcar, pero tienen una gran influencia en el modelado de la costa.

4.7 Comparación de los escenarios uno y siete

Este escenario no contiene los tributarios Este ni Oeste y además se han eliminado de él las ondulaciones en la IPW. Ésto de nuevo da lugar a algo parecido a una suma lineal de resultados entre los escenarios cuatro cinco y seis.

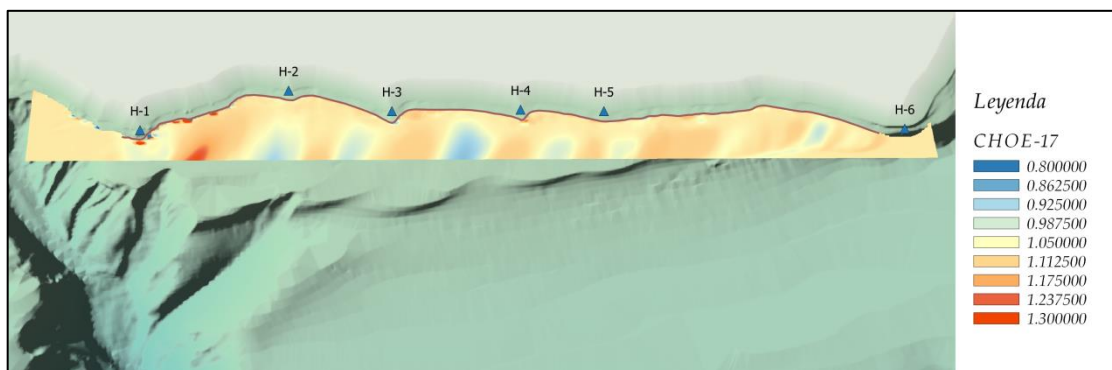


Ilustración 60. Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 7. Oleaje proveniente del Oeste

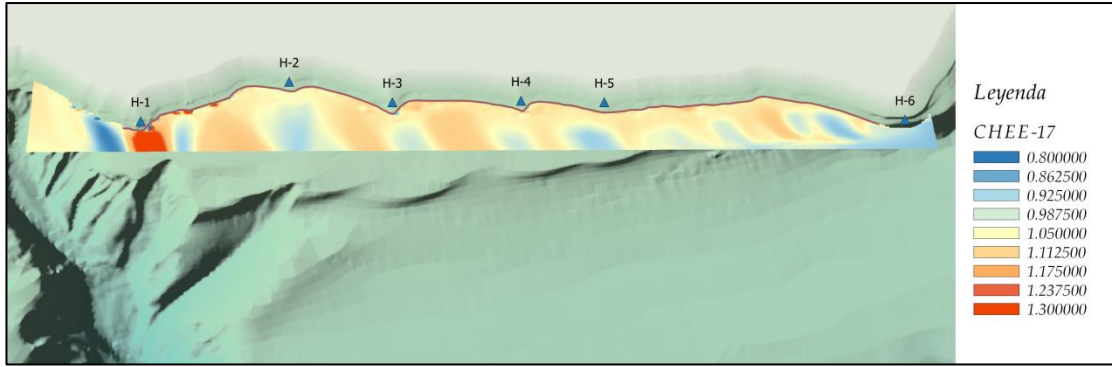


Ilustración 61 - Comparación de alturas de ola entre el escenario 1 y el escenario 7. Oleaje proveniente del Este

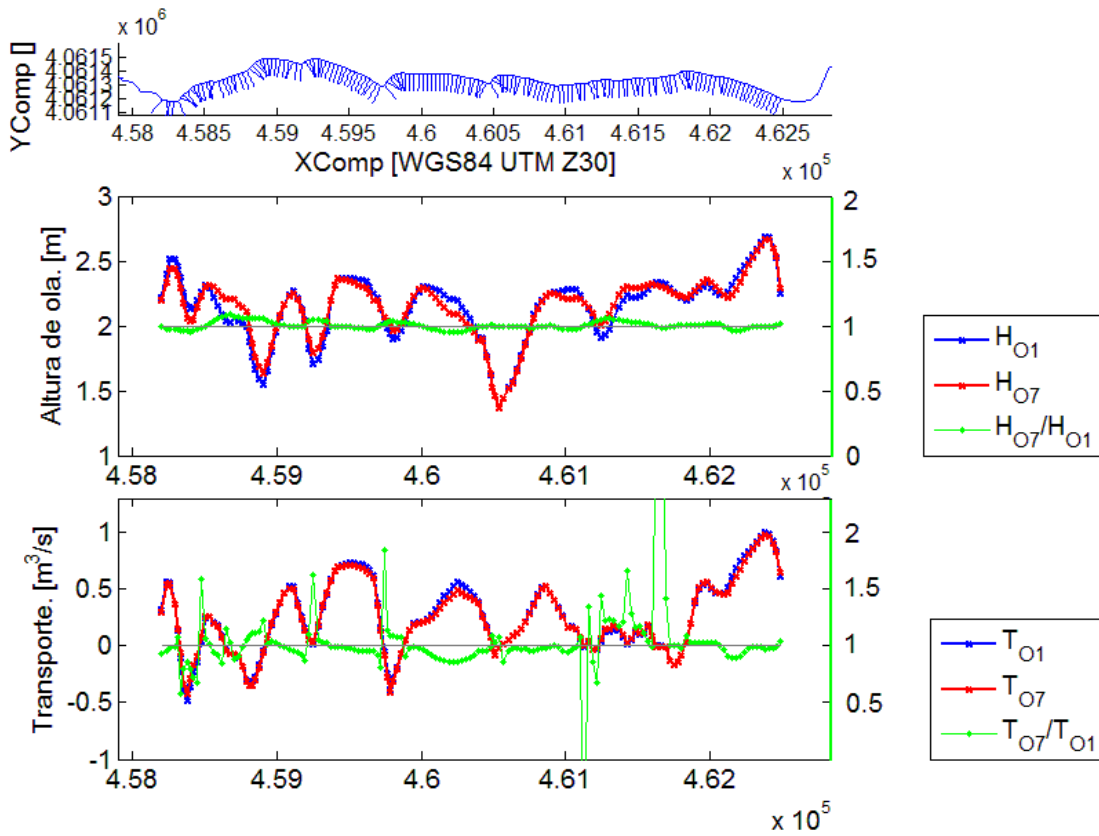


Ilustración 62. Comparación oleaje Oeste

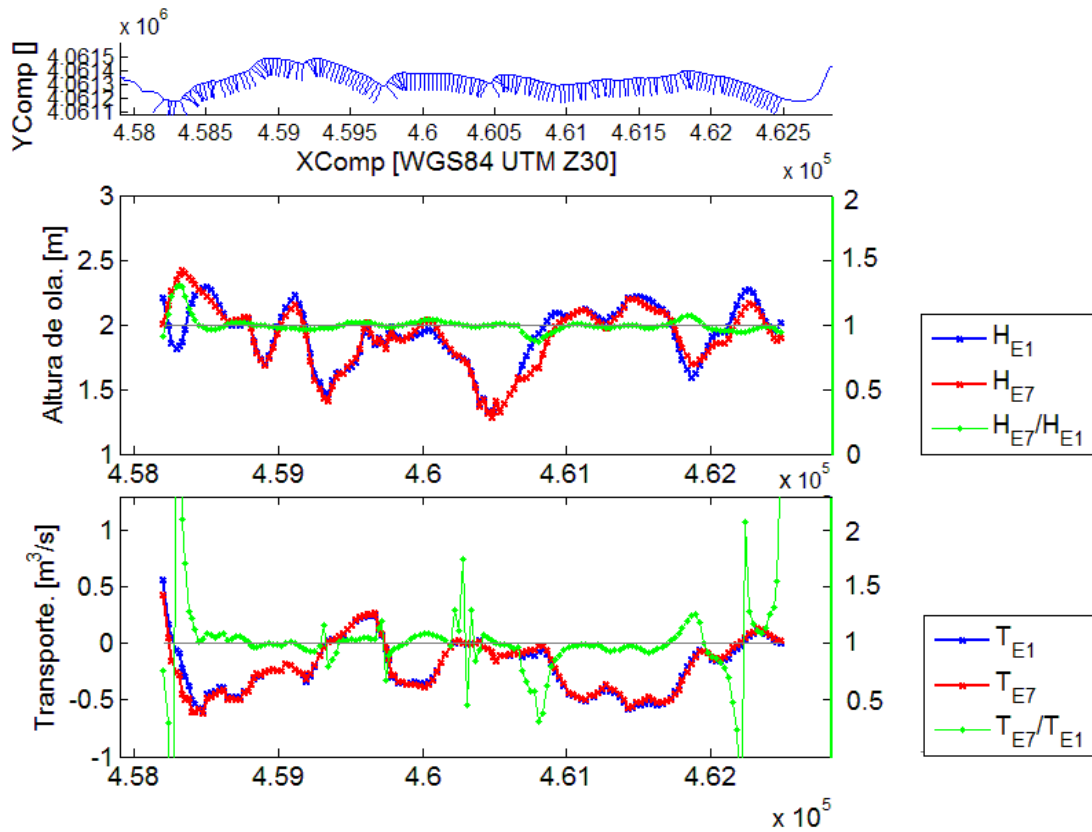


Ilustración 63. Comparación oleaje Este

Y al igual que en el caso de la comparación con el escenario cinco, sus alturas de ola normalizadas con los valores del escenario real son una suma de la misma magnitud en los escenarios 5 y 6. El escenario sin ningún agente presenta todas las variaciones anteriormente mencionadas conjugadas en distintas proporciones. Más que el gráfico de caudal sólido, el de la variación de las alturas de ola permite vislumbrar de algún modo la forma de la playa de Carchuna.

5 RESULTADOS PARA LA SERIE TEMPORAL LARGA

Como se explicó en apartado 3.2, la metodología para la simulación en periodo extendido nos permitirá conocer el comportamiento del transporte, no para un escenario batimétrico con un estado de mar concreto, sino saber cómo funciona la morfodinámica de la costa cuando actúan sobre él una amplia gama de oleajes con distintas alturas y direcciones.

Además, conociendo datos reales éste es mucho más interesante pues la probabilidad de tormenta coincide con la real, incrementando así la fiabilidad del estudio.

Para analizar la matriz de transporte, vamos a realizar distintos procedimientos de extracción de información. En primer lugar, se obtiene la media de transporte para cada perfil (incluido signo, ya que el transporte en un punto podría resultar ser cero a lo largo del tiempo) y para cada escenario batimétrico.

Además, se obtienen también las diferencias entre ambos vectores de datos, lo que representa la variación del transporte medio debido al cambio del fondo del mar.

La segunda comprobación realizada se dirige a la erosión y a la deposición del sedimento. En éste segundo apartado se obtiene la suma total de transporte para cada perfil y para cada escenario batimétrico, para luego calcular la diferencia de transporte entre perfiles consecutivos. Obtendremos así valores positivos en las zonas de acreción, y valores negativos en las zonas de erosión.

5.1 Comparación de los escenarios uno y dos

Mencionar de nuevo la principal diferencia entre éstos escenarios; el cañón Jolúcar al completo desaparece en el segundo. Dicho esto, mencionar también la notable mayor dispersión de los efectos que se percibe en estas simulaciones pues al haber un amplio rango de ángulos al igual que de alturas de ola, los efectos de erosión y deposición se distribuyen en un mayor rango de localizaciones en vez de estar condicionados exclusivamente por las direcciones utilizadas para el apartado anterior, 112° y 225° . Ya no se puede identificar cada elemento estrictamente con una punta de la playa.

De nuevo se observan en las diferencias de éste escenario una fuerte variación del transporte en la zona más occidental de la costa. Los valores positivos de la diferencia significan un incremento del transporte relacionado con un incremento de la altura de ola en el escenario ficticio y viceversa.

Aunque las variaciones se han dispersado a lo largo de la costa, sí que los efectos más notables de este escenario se concentran en los primeros 800m.

Comparando la ilus. 66 con los otros transportes litorales de los casos representativos, se sigue viendo un patrón similar en las gráficas y tampoco una gran diferencia entre el transporte.

Para evitar los efectos de multiplicación de las diferencias en el transporte, se ha calculado el incremento como una resta, en lugar de calcular la diferencia como una división lo que nos permite ver las diferencias con más claridad

Para verlo reflejado en la permanencia o fuga de sedimentos en cada perfil, se ha procedido tal y como se explica en la introducción a este apartado.

Así, obtenemos el gráfico de erosión y deposición que encaja a la perfección con la costa de Carchuna. Los picos por encima de cero representan deposición de sedimentos, situándose estos junto en las puntas de los horns, mientras que los que están por debajo de cero indican una erosión de la línea costera. También se ha pintado la diferencia entre las erosiones.

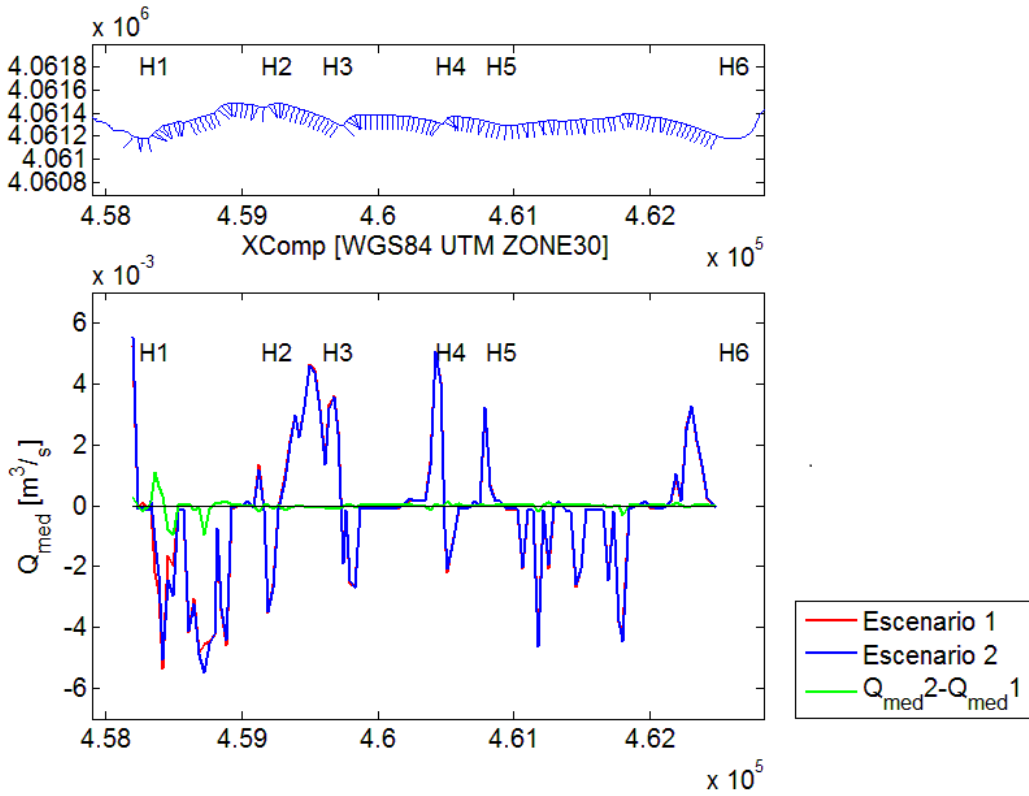


Ilustración 64. Comparación del transporte promedio entre los escenarios 1 y 2

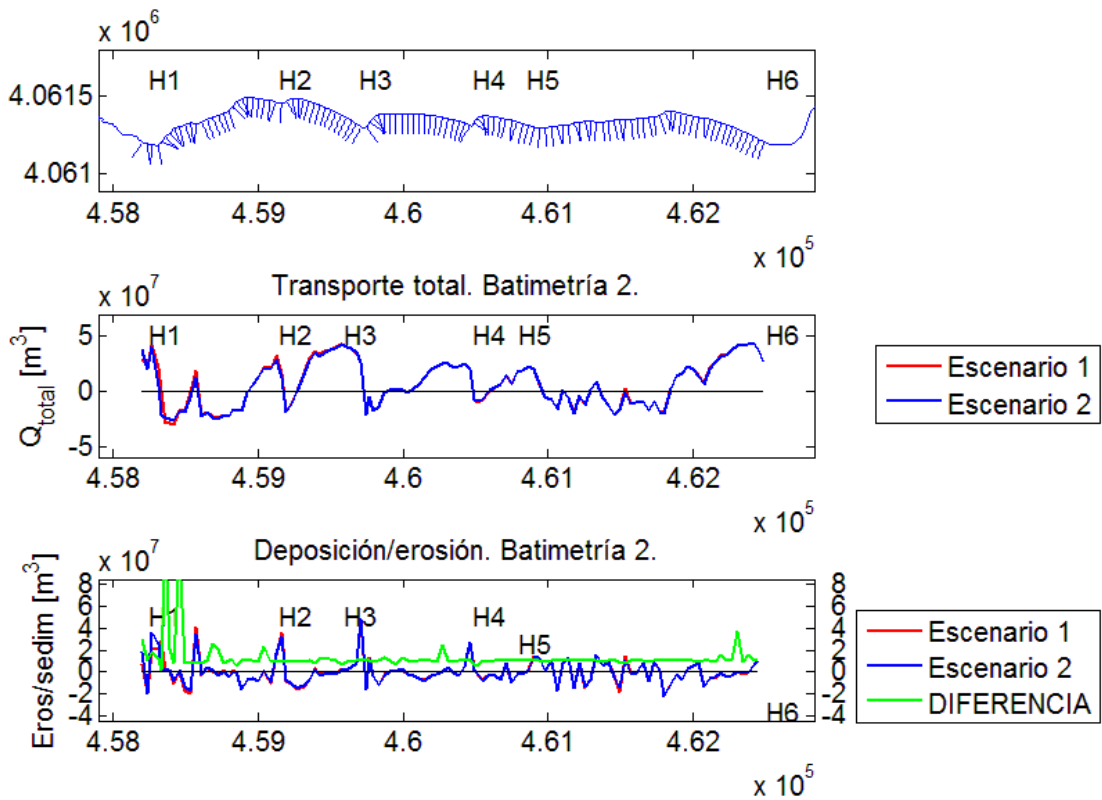


Ilustración 65. Comparación del transporte total entre los escenarios 1 y 2

5.2 Comparación de los escenarios uno y tres

En el segundo caso, se compara el escenario uno con el escenario tres, en el cual no existe la cabecera Oeste del cañón.

De nuevo vemos en la Ilus.67 cómo éste tributario influye de forma localizada en la misma zona que la anterior configuración.

En éste caso hay diferencias con el anterior a deferencia de lo que ocurría en los casos representativos. La diferencia en los causales medios tiene un pico que no ocurre en éste caso mientras que aquí el transporte en sentido negativo en la zona a la izquierda de H-2 tiene dos puntas en lugar de una.

Esto puede significar varias cosas, pero para extraer alguna conclusión hay que verlo en conjunto al resto de gráficas de los demás casos.

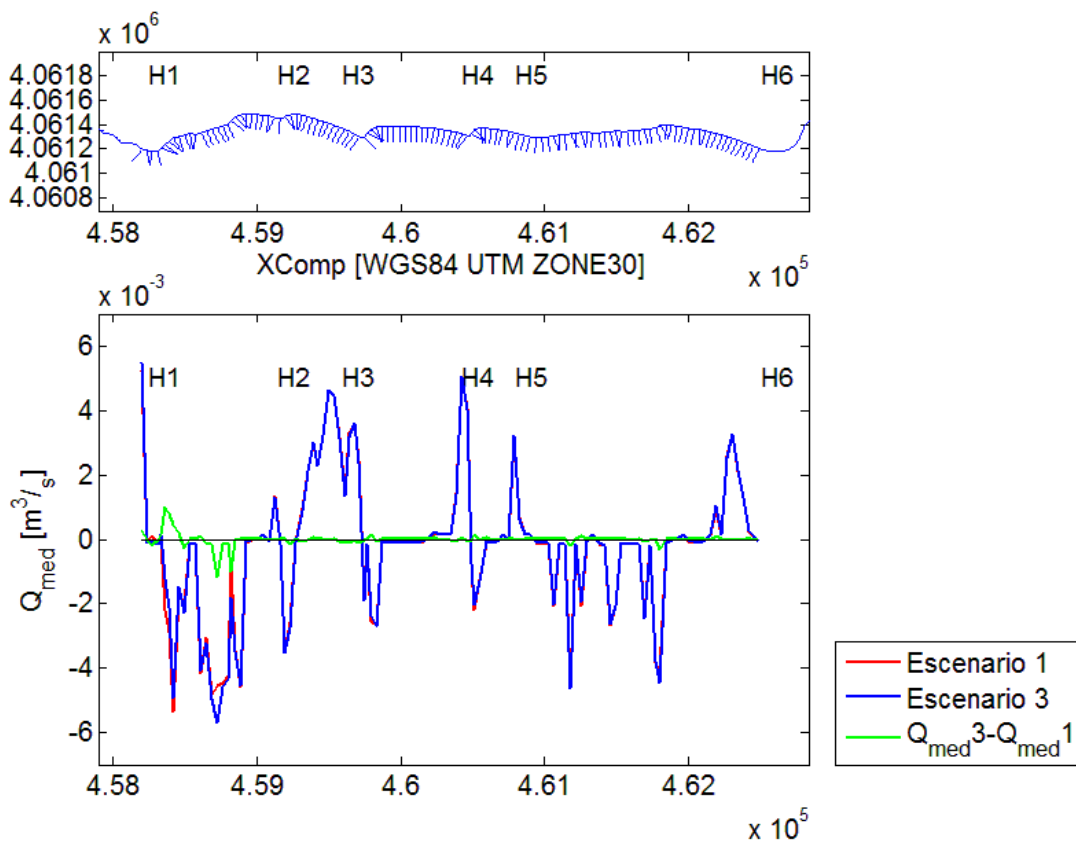


Ilustración 66. Comparación del transporte promedio entre los escenarios 1 y 3

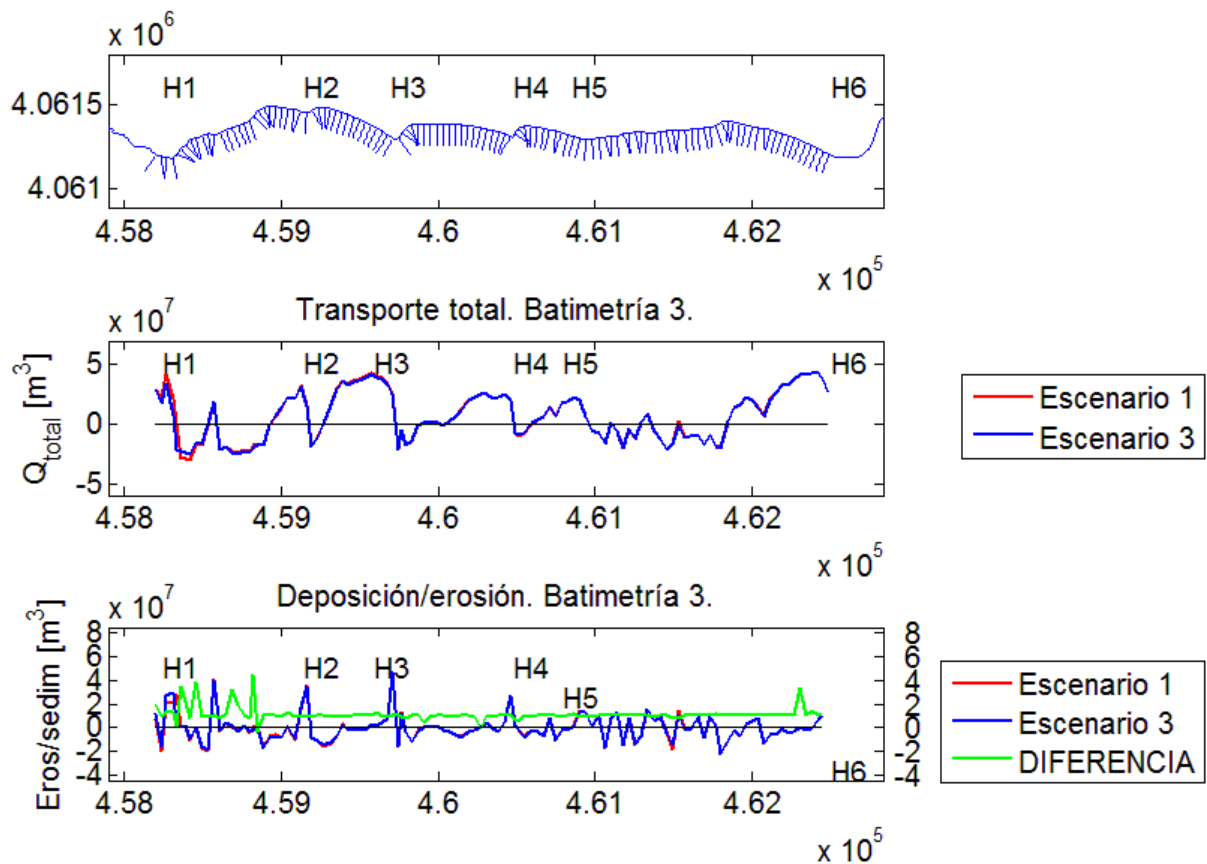


Ilustración 67. Comparación del transporte total entre los escenarios 1 y 3

5.3 Comparación de los escenarios uno y cinco

Ya se estudió anteriormente la influencia del tributario Este y se comprobó que no tenía grandes efectos sobre la dinámica de transporte. Por ese motivo se suprimió, aprovechando el ya denominado efecto lineal y el escenario cinco que contiene el efecto de éste agente combinado con el del escenario tres.

Éste caso, tiene la misma estructura que el caso segundo (comparación de los escenarios 1 y 3) por lo que podemos suponer que la hipótesis de que el segundo tributario no afecta demasiado al transporte es correcta.

Esto nos lleva a pensar que las diferencias en el transporte entre los escenarios dos y tres son provocadas por el resto del cañón, refractando los frentes de onda y modificando el transporte de sedimentos. Por tanto, la parte profunda del cañón puede tener un pequeño efecto que modifique las condiciones hidrodinámicas.

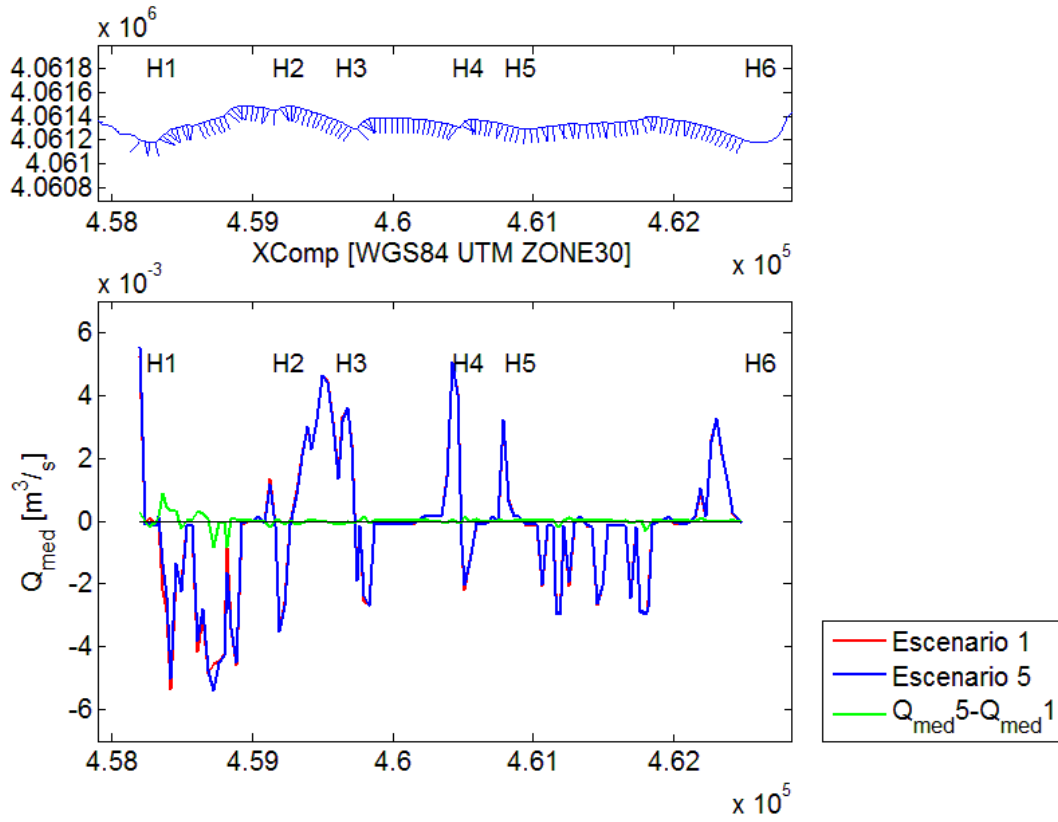


Ilustración 68. Comparación del transporte promedio entre los escenarios 1 y 5

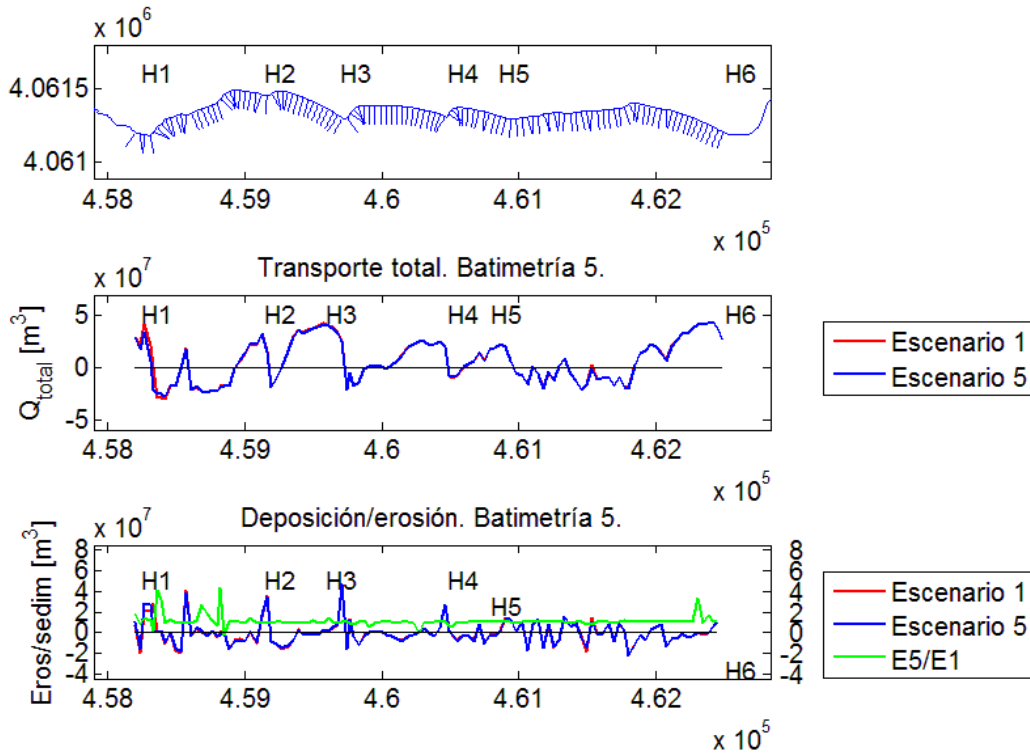


Ilustración 69. Comparación del transporte total entre los escenarios 1 y 5

5.4 Comparación de los escenarios uno y seis

La comparación de ésta batimetría con la primera presenta unas diferencias de un orden inferior al resto. Probablemente esto se deba a una reducción del propio orden de magnitud de las ondulaciones modificadas, pues recordemos que éstas son simples ondulaciones en el borde de la cuña infralitoral, pero no por ello menos importantes en cuanto a transporte.

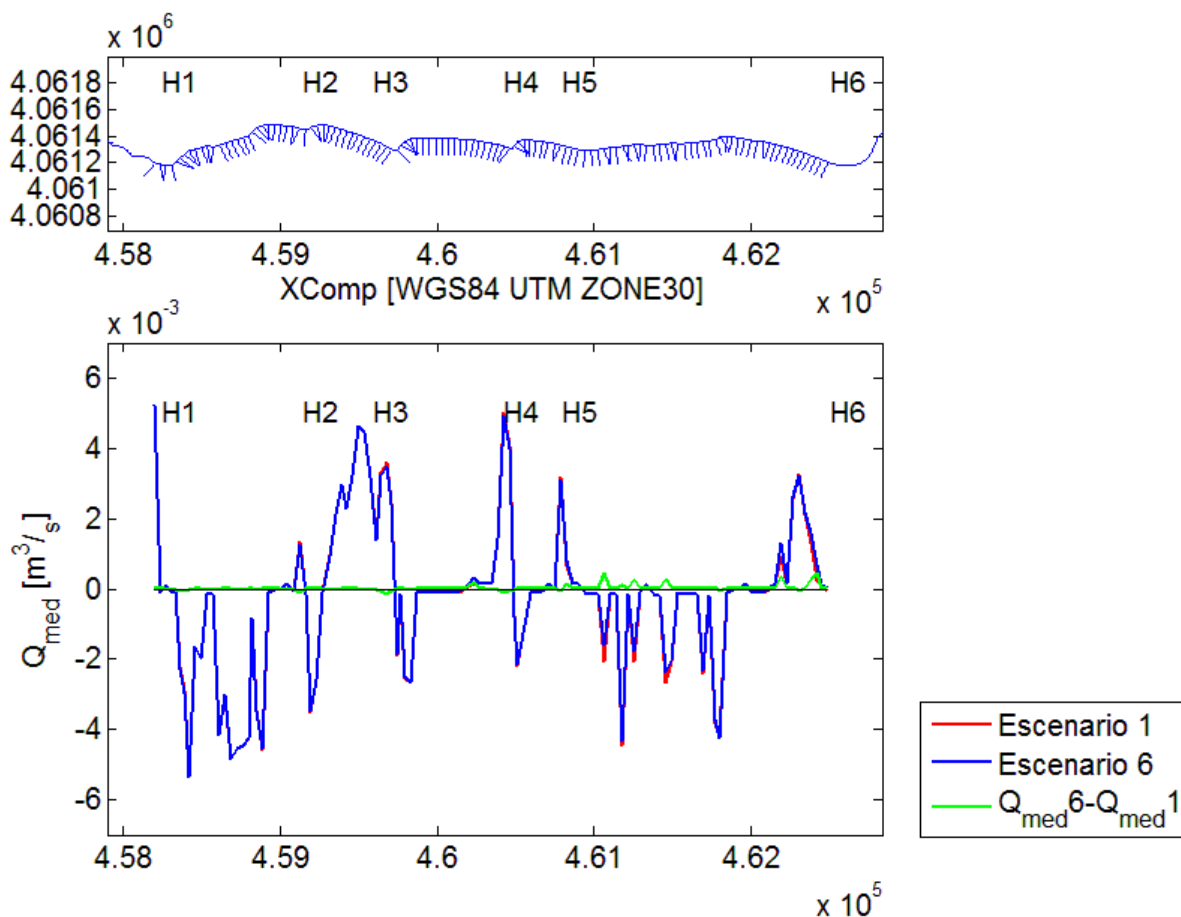


Ilustración 70. Comparación del transporte promedio entre los escenarios 1 y 6

Éstas ondulaciones no modificaban el régimen hidrodinámico notablemente en la zona Oeste. Esto nos permite atribuir la forma de la zona occidental de Carchuna al cañón Jolúcar al igual que, debido a la presencia de variaciones en éste caso que no existían anteriormente, nos permite atribuir el resto de las puntas a las ondulaciones en la IPW.

El efecto se esparce por toda la costa sobre todo entre H-3 y H-6 donde la variación es mayor.

El mayor problema que presenta este estudio y que aquí podría estar afectando bastante en los resultados es la línea de costa fija. Ésta no permite que los horns varíen y, por tanto, aunque las condiciones de olaje exijan un cambio en la batimetría esto no ocurre.

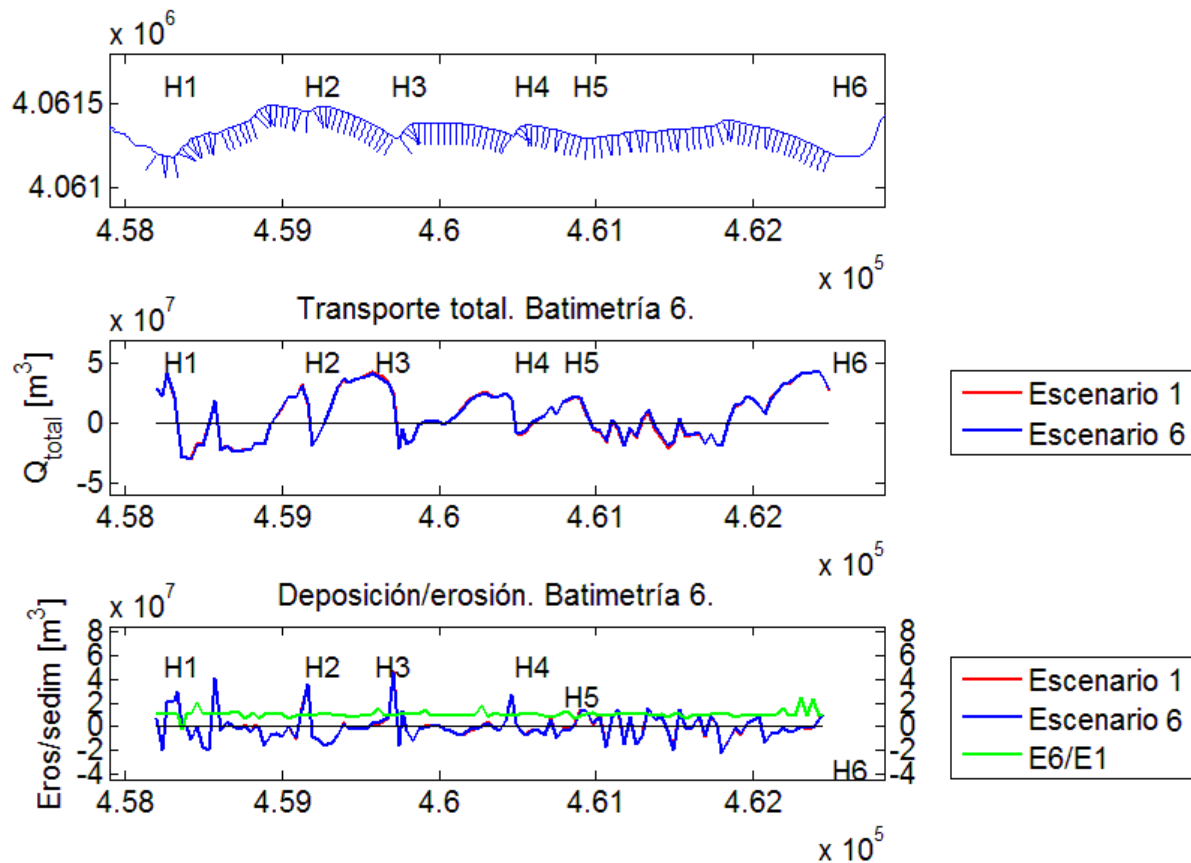


Ilustración 71. Comparación del transporte total entre los escenarios 1 y 6

5.5 Comparación de los escenarios uno y siete

En el escenario séptimo recordemos, se han eliminado ambos tributarios del cañón y las ondulaciones de la cuña. Es el escenario que más cambio introduce debido a que contiene las modificaciones de todos los anteriores apartados.

No existen acoplamientos notables entre los efectos por lo que como ya hemos comprobado, éste será muy parecido a la suma de los resultados de transporte de los escenarios cinco y seis.

Combinar las gráficas de diferencias de los dos grupos de elementos es complicado pues el orden de magnitud de las variaciones debidas a las modificaciones del cañón es un orden de magnitud superior que las debidas a las modificaciones al este de Carchuna.

Se muestra en el gráfico de transporte promedio (ilus. 61) una diferencia sobre H-1 muy marcada asociada a la cabecera Oeste y otra diferencia asociada a la misma cabecera a media distancia entre H-1 y H-2.

La influencia del tributario Este ya se ha comprobado mucho menos importante que la mencionada anteriormente y sólo se le atribuye una disminución de la altura de ola, y por tanto del transporte, en algunos estados de mar frente a la batimetría modificada.

A lo largo de toda la costa se repite una perturbación de la diferencia de transportes, influencia ya atribuida en la conclusión del anterior apartado a las ondulaciones en el borde de la IPW.

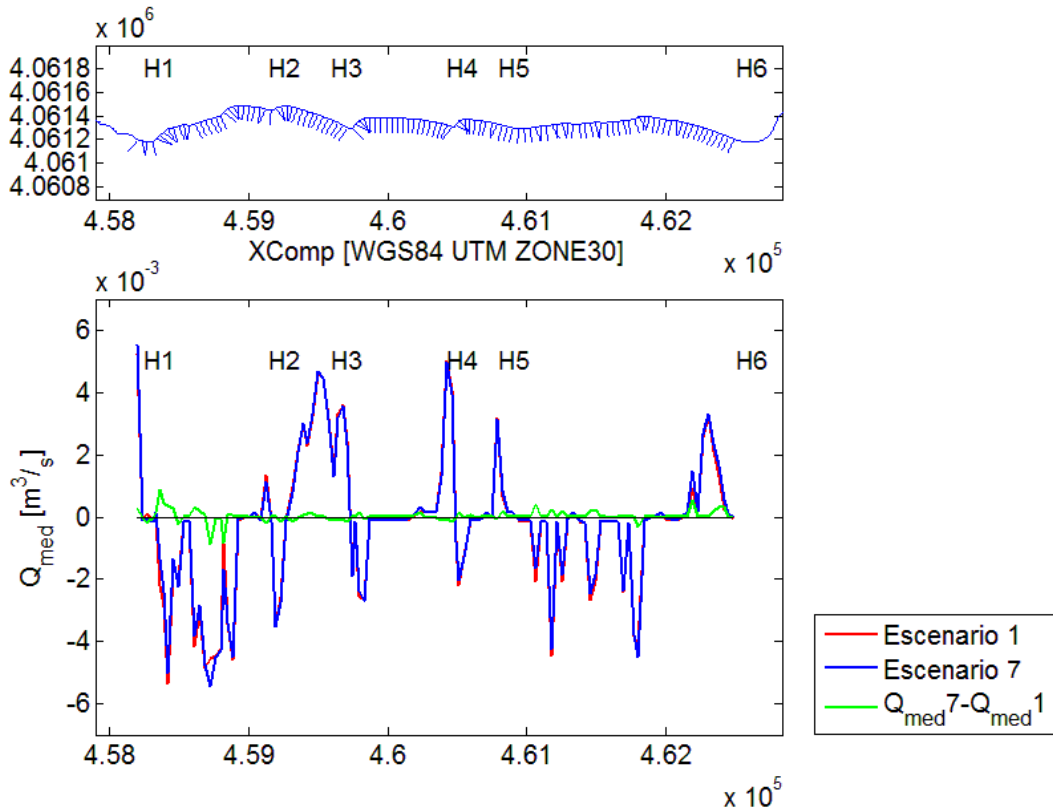


Ilustración 72. Comparación del transporte promedio entre los escenarios 1 y 7

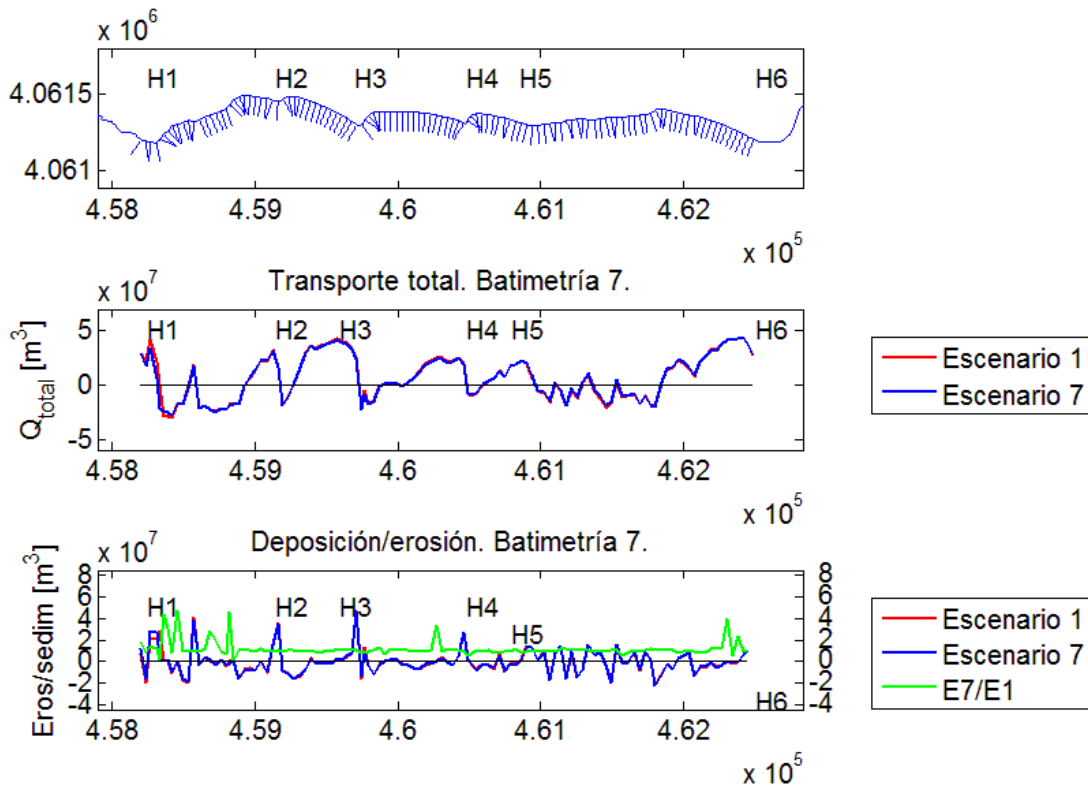


Ilustración 73. Comparación del transporte total entre los escenarios 1 y 7

5.6 Mapas de transporte

Para visualizar de forma sencilla el perfil de transporte de la costa de Carchuna se ha dibujado en la planta de la costa la campana de Gauss del transporte de cada perfil en una gama de colores que va de cero a uno siendo el cero un suceso imposible y el uno un suceso seguro. Esto arroja un gráfico de colores donde los valores positivos de la probabilidad indican transporte en sentido Este y los negativos en sentido Oeste.

Se ha decidido exponer aquí sólo y exclusivamente los mapas de probabilidad de transporte de los escenarios 1 y 7, ya que son la batimetría natural y el que contiene todas las variaciones. Además la variación de uno a otro no es simplemente visible así que se compararán, restando el escenario artificial al original, los escenarios 5, 6 y 7 con el escenario 1.

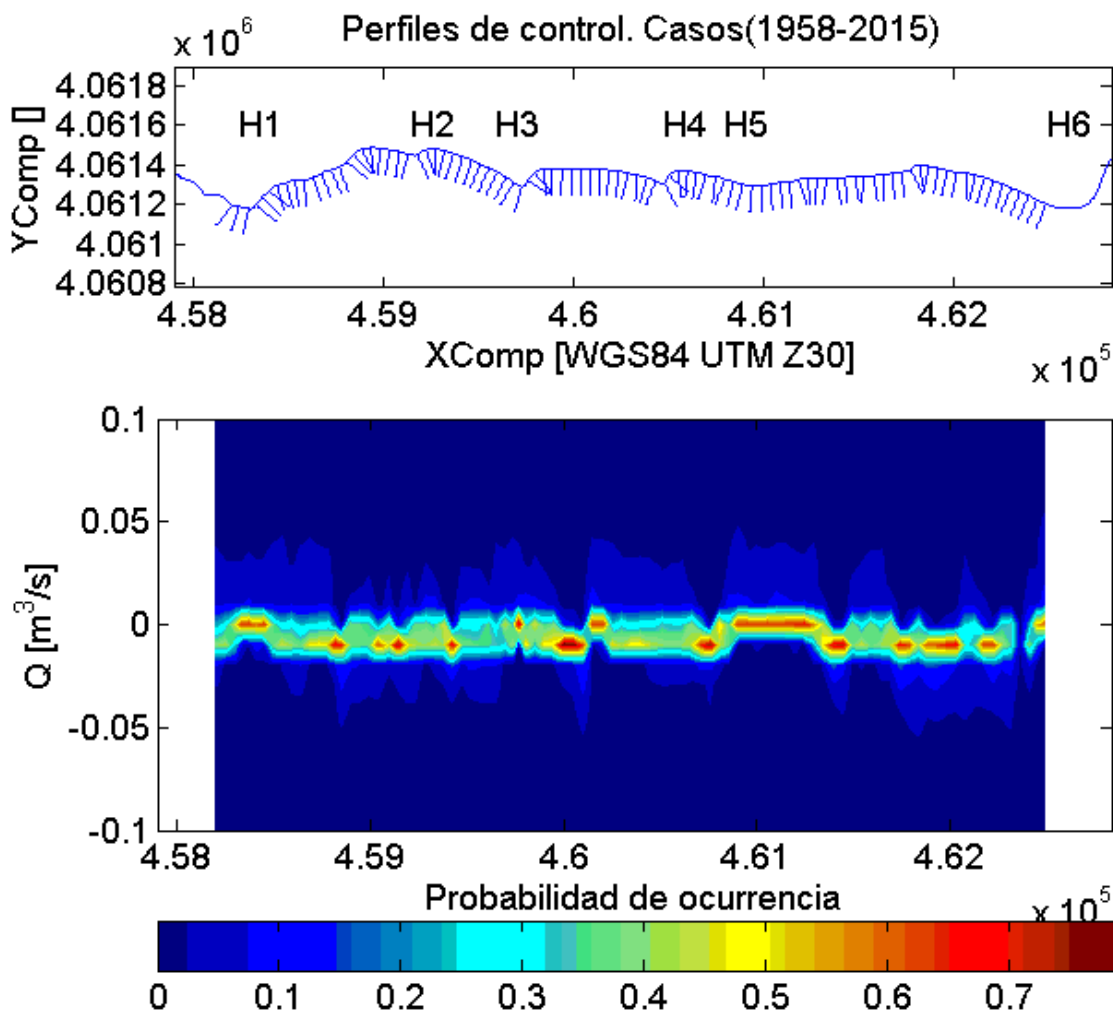


Ilustración 74. Probabilidad de transporte del escenario 1

Los valores más rojos indican que tipo de transporte ocurre con más frecuencia y aquellas zonas en color azul oscuro suponen un transporte casi imposible. Esto está directamente relacionado con transporte o no de sedimentos ya que los eventos más energéticos tienen baja probabilidad de ocurrir.

Esto se refleja en una zona central cercana a transporte cero con alta probabilidad de ocurrir y una zona dispersa y mas variable a lo largo de la línea de costa con fuerte transporte de sedimentos.

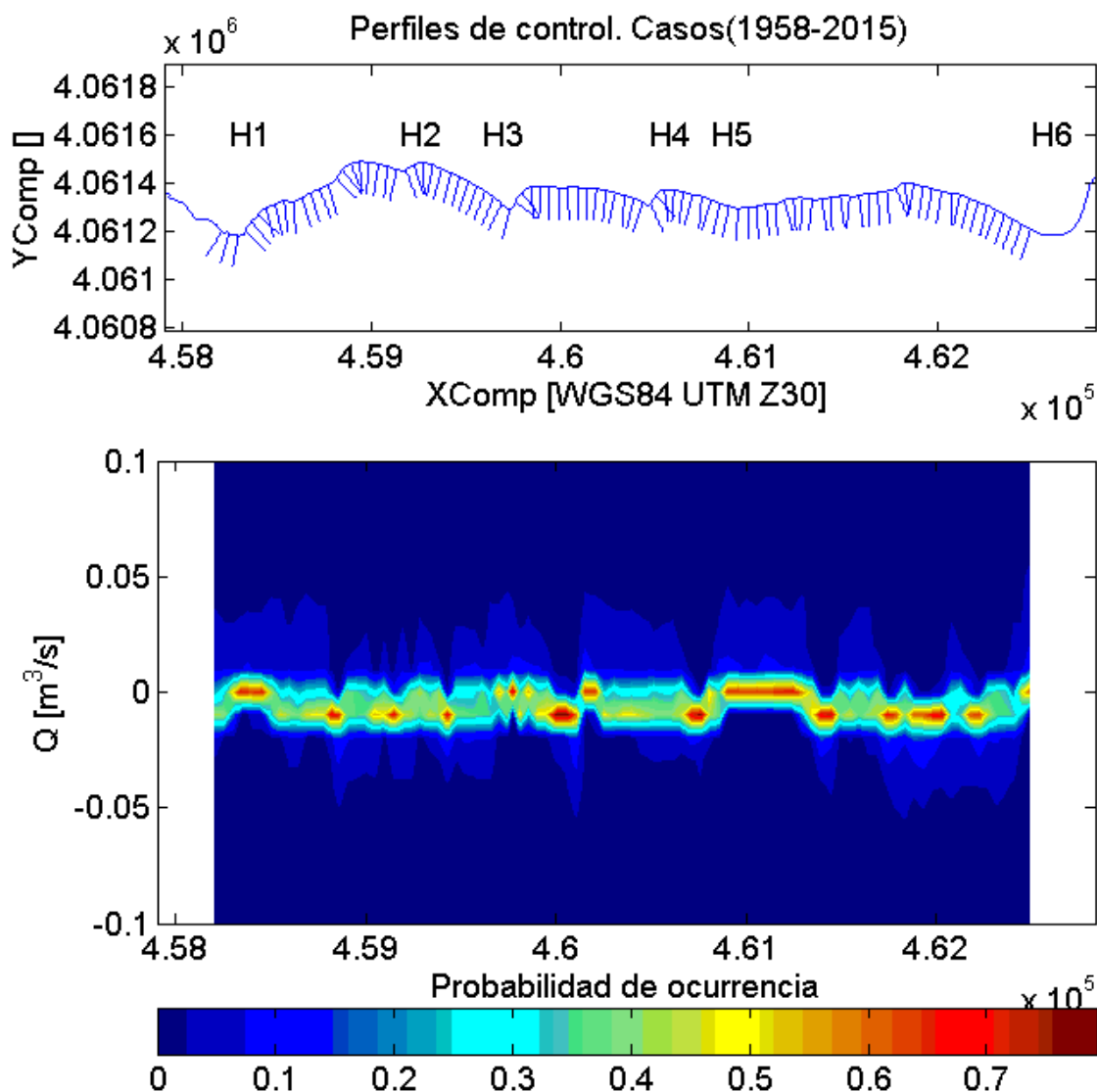


Ilustración 75. Probabilidad de transporte del escenario 7

En la comparación del escenario 1 con el escenario 5 (ilus. 76), se puede apreciar la dispersión de la variación por toda la línea de costa debido a la ausencia de tributarios y a los oleajes provenientes de múltiples direcciones.

También se puede ver cierta simetría respecto del eje x, mientras que los cabos más afectados por la variación son el 1, el 5.

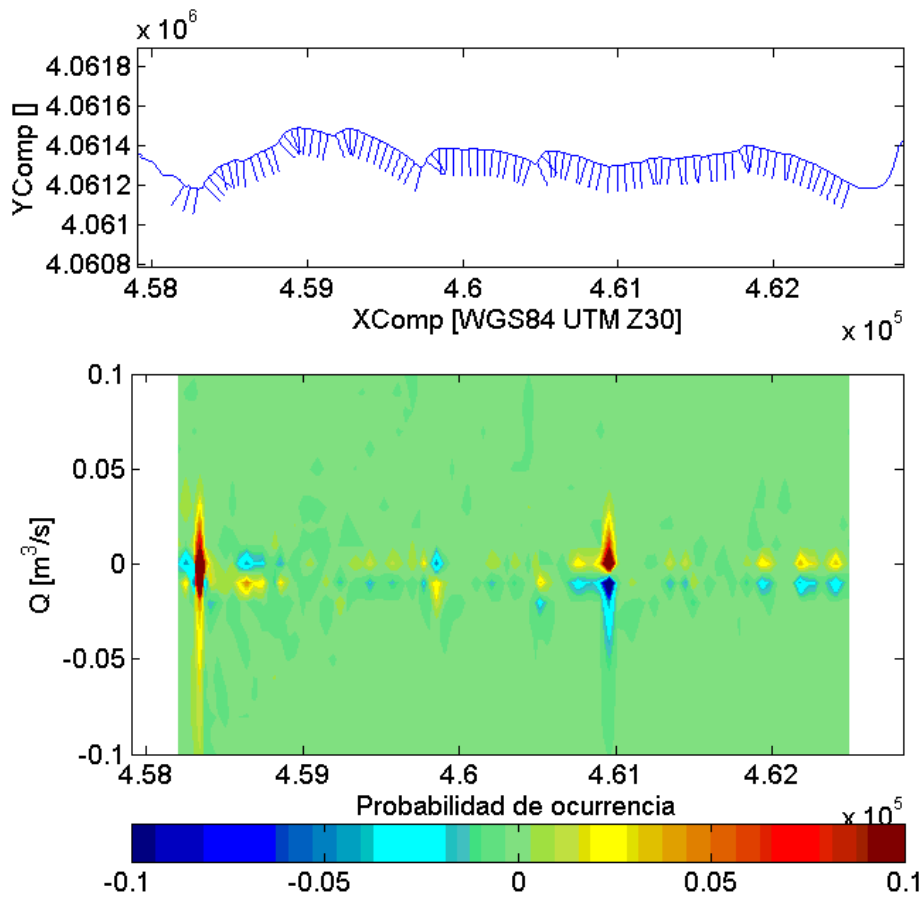


Ilustración 76. Probabilidad de transporte del escenario 5 menos escenario 1.

En la comparación del escenario 1 con el escenario 6 (ilus. 77), se puede apreciar la dispersión de la variación por toda la línea de costa debido a la ausencia de ondulaciones en la IPW y a los oleajes provenientes de múltiples direcciones.

Los efectos sí que se concentran ahora indistinguiblemente en la zona Este de la playa.

También se puede ver cierta simetría respecto del eje x, mientras que el cabo más afectado es H-6.

Al igual que las diferencias entre los transportes presentaban un efecto lineal cuando el oleaje era proveniente de direcciones concretas y fijas, en ésta ocasión también se puede ver un efecto parecido al comparar el escenario de la batimetría natural con el 7 (ilus. 78), que contiene todos los cambios.

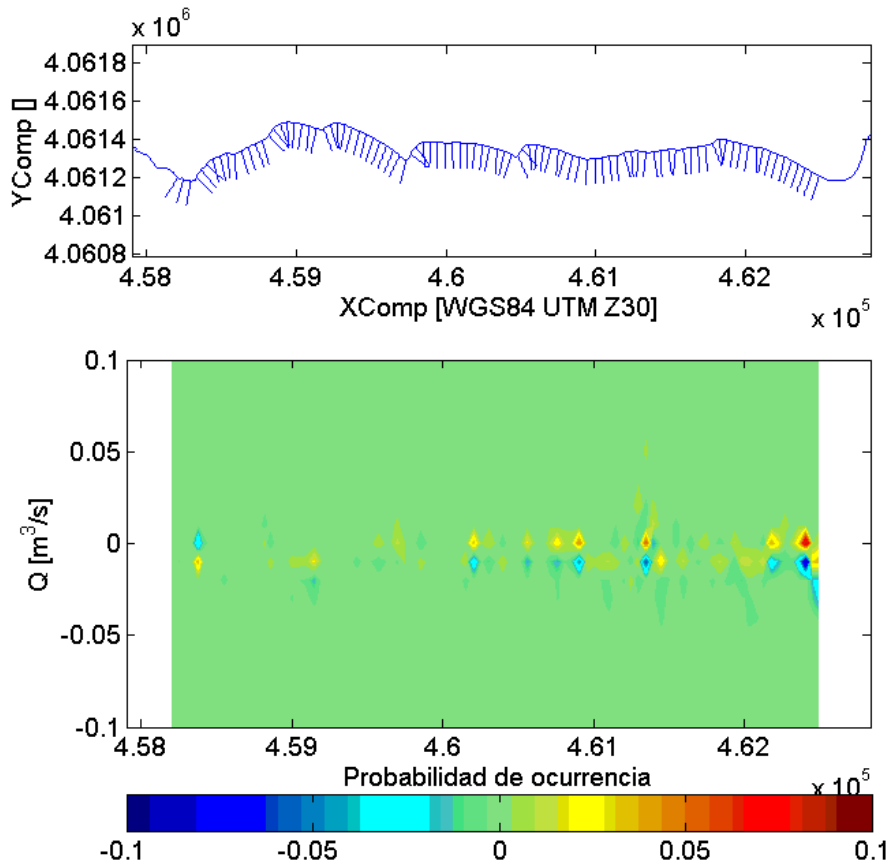


Ilustración 77. Probabilidad de transporte del escenario 6 menos escenario 1.

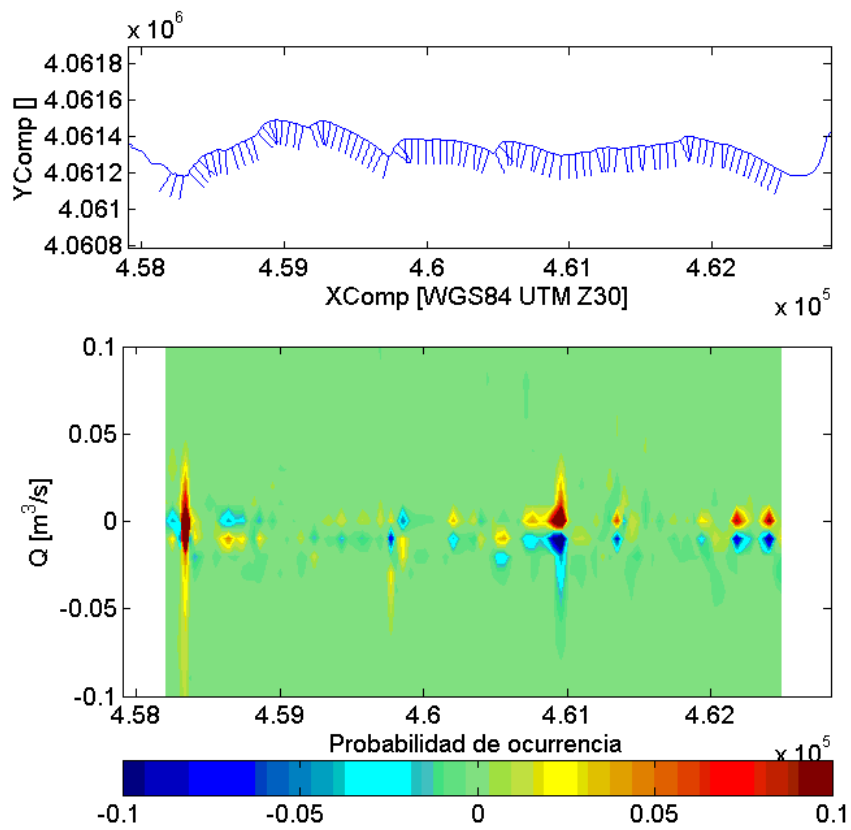


Ilustración 78. Probabilidad de transporte del escenario 7 menos escenario 1.

6 CONCLUSIONES

Se pretendía estudiar la influencia de las morfologías submarinas en playas heterogéneas, en concreto en la playa de Carchuna.

La eliminación de cualquier elemento de los mencionados (cañón, tributarios u ondulaciones), produce una disminución de la profundidad haciendo que el shoaling comience antes y que el transporte longitudinal sea menor. Esto podría dar lugar a la desaparición de algunas características de la costa si la batimetría no presentara la complejidad mostrada.

El cañón gracias a su compleja orografía aperlta y refracta el oleaje generando la compleja forma de la línea de costa en su parte más occidental.

La propagación de oleaje, hasta cierto punto, se comporta de forma lineal ya que escenarios que contienen las características de otros dos esenarios (como el 7, que contiene las características morfológicas del 5 y del 6) presentan resultados de diferencias con la batimetría natural que se pueden expresar en cierta medida como suma entre unas y otras. Esto ocurre siempre que se comparen escenarios con una sola dirección de procedencia de oleaje, no siendo aplicable a la serie temporal larga donde los oleajes provienen de distintas direcciones.

En la ilus. 79 se puede ver como las comparaciones se pueden relacionar entre ellas como una suma. Se han comparado en la ilustración las variaciones de transporte y altura de ola de los escenarios 5, 6 y 7.

Esto nos da una idea general del funcionamiento de los agentes mencionados, a continuación, en los siguientes apartados se estudian los casos más interesantes mediante la propagación de oleajes en un periodo prolongado.

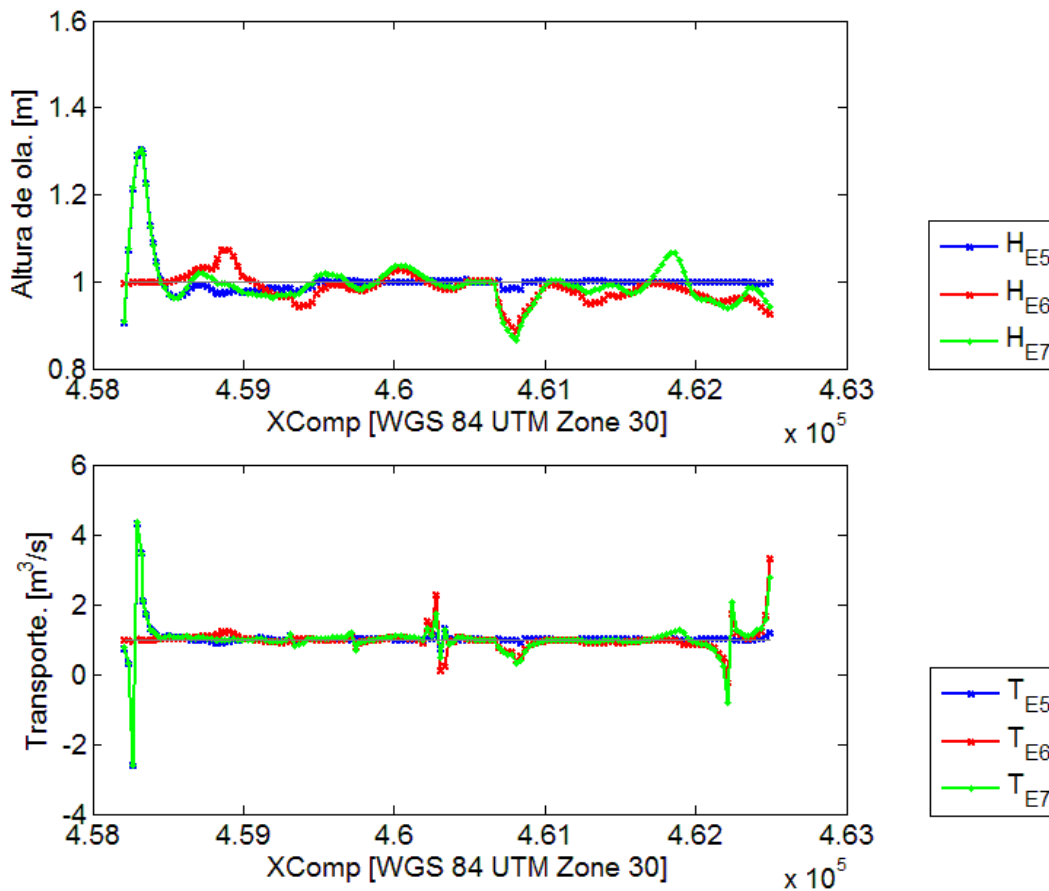


Ilustración 79. Muestra del efecto lineal

Se pueden resumir las conclusiones de este documento en las siguientes afirmaciones:

- El cañón Jolúcar tiene afecta a la formación de las puntas de una forma muy definida; por un lado, el tributario Oeste es el principal culpable de la modificación hidrodinámica que produce el transporte responsable de la formación de H-2, además de favorecer la permanencia de H-1, que siempre está fijo en la costa.
- Por otro lado, el tributario Este, contenido en el mismo cañón no produce cambios notables en la altura de ola, mientras que el resto del cañón (la parte central del mismo), a pesar de tener una leve influencia sí que introduce una interferencia en los patrones de transporte de la cabecera Oeste.
- Las ondulaciones en la IPW, la cual está formada por los sedimentos arrastrados de la zona 1 hacia el Este, produce las modificaciones del régimen hidrodinámico que favorece la aparición de los H-3, H-4, H-5, H-6 y en cierto modo también H-2, debido a su influencia en oleajes provenientes del Este.
- El conjunto de los distintos agentes se puede estimar como una suma de los efectos de los distintos agentes morfodinámicos ya que se ha intuido a lo largo del estudio un efecto lineal en la modificación de las alturas de ola significantes (y no tanto en los ángulos por lo que el transporte siente menos el efecto lineal)
- Además, es importante remarcar que la peculiaridad de los oleajes que afectan a la zona también es parte responsable de la formación de los Horns. En los mapas de transporte se puede ver cómo, efectos de ciertas formas de fondo, que en los oleajes de casos particulares no se apreciaban, aparecen potenciados al haber un amplio abanico de ángulos de procedencia.

7 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Para obtener mejores resultados y comprobar que efectos produce exactamente cada agente es necesario sería interesante realizar un estudio con línea de costa variable.

Éstos son un problema iterativo que de forma general siguen la estructura;

- Proposición de una línea horizontal como costa inicial.
- Calculo de la propagación de un estado de mar y de su transporte sólido litoral. Calculo de volúmenes de erosión y de sedimentación.
- Generación de la nueva línea de costa, la cual habrá variado levemente por la desigual distribución del sedimento.
- Propagación del siguiente estado de mar.
- Repetición del procedimiento hasta propagar todos los estados de mar.
- Repetición del problema para cada escenario.

El estudio de línea permite conocer cómo sería la línea de costa en caso de modificar la morfología mientras que éste estudio sólo permite conocer los cambios en el transporte y en la erosión y sedimentación.

REFERENCIAS

Ortega-Sánchez, M., Baquerizo, A., Losada, M.A., (2010). Morfodinámica de la playa de carchuna (granada): análisis teórico y mediante técnica de video imágenes.

Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A., Baquerizo, A., (2003). On the development of large-scale cusped features on a semi-reflective beach: Carchuna beach, Southern Spain.

Ortega-Sánchez, M., Lobo, F.J., López-Ruiz, A., Losada, M.A., Fernández Salas, L.M., (2014). The influence of shelf-indenting canyons and infralittoral prograding wedges on coastal morphology: The Carchuna system in Southern Spain.

Wikipedia., (2016). Mar de Alborán. https://es.wikipedia.org/wiki/Mar_de_Albor%C3%A1n

Bergillos, R.J., (2013). MORPHAL. Morfodinámica de Playas Heterogéneas en el Litoral Andaluz del Mar de Alborán. <http://gdfa.ugr.es/morphal/distribucion-del-sedimento-en-carchuna/>

Bergillos R.J., López-Ruiz A., Ortega-Sánchez M., Masselink G., Losada, M.A. Implications of delta retreat on wave propagation and longshore sediment transport – Guadalfeo case study (southern Spain). *Marine Geology* 2016 [Submitted to publication].

USACE, (1984). Shore protection manual. Coastal Engineering Research Center, Government Printing Office, Washington DC.

Sierra, J.P., Lo Presti, A. (1998) Estudio comparativo de criterios de rotura del oleaje regular. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/2977/51article2.pdf>

Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., 2011. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering* 58, 851–862.

ANEXO I. CÓDIGOS DE MATLAB

1. Cálculo de los parámetros de rotura y transporte para los casos representativos;

```

%% CREACION DEL WORKSPACE
clear
load ('water depth.mat')
dep=data;
load ('wave grid.mat')
gri=data;
load ('hsig wave height.mat')
H=data;
load ('fraction breaking.mat')
Q=data;
load ('mean wave period.mat')
T=data;
load('hsig wave vector.mat')
D=data;
load costa
clear data
%% RECORTE DE COSTA
%% CÁLCULO DE PERFILES TRANSVERSALES
clear perfil

t=1;
z=[0; 0; -1];
Lper=130;
cada=0.5;
np=Lper/cada+1;
i=50;
k=1;
l=1;
cero=[1 0 0];
while i<size(costa,1)-40
    paralelo=[];
    perpendicular=[];
    per=[];
    paralelo=[(costa(i+1,:)-costa(i,:)) 0];
    paralelo=paralelo./norm(paralelo);
    perpendicular=cross(paralelo,z);
    perpendicular=perpendicular./norm(perpendicular);
    Dist(l)=norm(costa(i+1,:)-costa(i,:));
    ap(k,i,:)=paralelo;
    coseno=perpendicular(1);
    angcos(l)=acos(coseno);
    cooR(l)=costa(i,1);
    l=l+1;
    for c=0:cada:Lper
        per=[perpendicular(1) perpendicular(2)];
        perfil(t,:)=costa(i,:)+per*c;
        t=t+1;
    end
    i=i+1;
end
angcosta=fliplr(angcos);
%angcos; angulo que forma un vectos O-E con el paralelo a la costa en cada

```

```

%ESTRUCTURA DE LA MATRIZ DE PERFILES
%           1           2           3           4           5           6           7
%           CoordX    CoordY    Dep           Hs           0           yH           Qb

%% ASIGNACIÓN DE PROFUNDIDADES Y ALTURAS Y ROTURA
for i=1:size(H.Time,1)

    depi(:,:)=dep.Val(i, :, :);
    perfil(:,3)=griddata(gri.X,gri.Y,depi,perfil(:,1),perfil(:,2));

    Hi(:,:)=H.Val(i, :, :);
    perfil(:,4)=griddata(gri.X,gri.Y,Hi,perfil(:,1),perfil(:,2));

    Qi(:,:)=Q.Val(i, :, :);
    perfil(:,7)=griddata(gri.X,gri.Y,Qi,perfil(:,1),perfil(:,2));

    Ti(:,:)=T.Val(i, :, :);
    perfil(:,8)=griddata(gri.X,gri.Y,Ti,perfil(:,1),perfil(:,2));

    perfil(:,5)=0.1*ones(size(perfil,1),1);

    perfil(:,6)=0.5*perfil(:,3);

    perfil3(i, :, :)=perfil(:, :);

end

%% REORDENA
nper=size(perfil,1)/(np);
for k=1:size(H.Time,1)
    for j=1:nper
        for i=1:np
            Xp(k,i,j)=perfil3(k,np*(nper-j)+i,1);
            Yp(k,i,j)=perfil3(k,np*(nper-j)+i,2);
            Dp(k,i,j)=perfil3(k,np*(nper-j)+i,3);
            Hp(k,i,j)=perfil3(k,np*(nper-j)+i,4);
            Qp(k,i,j)=perfil3(k,np*(nper-j)+i,7);
            Tp(k,i,j)=perfil3(k,np*(nper-j)+i,8);
        end
    end
end

%% BURCAR ROTURA
clear Cpl Cpn rotn rotl
Cpn=Hp.*0;
err=0;
waitbar(0,'Busq, rotura')
for k=1:size(H.Time,1)
    Dirxt(:,:)=D.XComp(k, :, :);
    Diryt(:,:)=D.YComp(k, :, :);
    waitbar(k/size(H.Time,1));
    for j=1:size(Hp,3)

```

```

    for i=size(Hp,2):-1:1
        if Qp(k,i,j)>0.08
            Cpn(k,i,j)=1;
            break
        end
    end
    if Cpn(k,:,j)==0
        if j==1
            Cpn(k,2,j)=1;
        else
            for i=size(Hp,2):-1:1
                if Cpn(k,i,j-1)==1;
                    Cpn(k,i,j)=1;
                    err=err+1;
                    break
                end
            end
        end
    end
end
end

%INTERPOLACIÓN DEL ÁNGULO

t=1;
l=1;
for j=1:size(Cpn,3)
    for i=1:size(Cpn,2)
        if Cpn(k,i,j)==1
            rotn(k,:,t)=[Xp(k,i,j) Yp(k,i,j) Hp(k,i,j) Qp(k,i,j) Tp(k,i,j)];
            flag=[k i j];
            eqp(1)=Xp(k,i,j);
            iip(1)=Yp(k,i,j);
            vecola=[griddata(gri.X,gri.Y,Dirxt,eqp,iip)
griddata(gri.X,gri.Y,Diryt,eqp,iip) 0];
            coseno=vecola(1)/norm(vecola);
            angol(k,j)=acos(coseno);
            t=t+1;
        else
            end
    end

end

end

angcosta=fliplr(angcos);
for t=1:length(D.Time)
    angins=angol(t,:);
    ang=pi-angins+angcosta;
    angl(t,:)=ang;
end

%% CALCULO DEL TRANSPORTE
rotn(rotn<0.08)=0.08;
ro=1025; % Kg/m3
g=9.81; % m/s2
K=1.6 * exp (-2.5 * 1); %
rs=2560; % Kg/m3
p=0.3; % %
for t=1:size(H.Time)

```

```

    for i=1:size(rotn,3)
        C=ro*K*sqrt(g/rotn(t,4,i))/(16*(rs-ro)*(1-p));
        tte(t,i)=C*(rotn(t,3,i)^(5/2))*sin(2*angl(t,i));
        Vol(i)=Dist(i)*tte(i);
    end
end
save workspace

```

1. Cálculo de los parámetros de rotura y transporte para las series temporales larga;

```

%% CREACION DEL WORKSPACE
clear
load ('water depth.mat')
dep=data;
load ('wave grid.mat')
gri=data;
load ('hsig wave height.mat')
H=data;
load ('fraction breaking.mat')
Q=data;
load ('mean wave period.mat')
T=data;
load('hsig wave vector.mat')
D=data;
load costa
clear data
%% CÁLCULO DE PERFILES TRANSVERSALES
clear perfil

t=1;
z=[0; 0; -1];
Lper=130;
cada=0.5;
np=Lper/cada+1;
i=50;
k=1;
l=1;
cero=[1 0 0];
while i<size(costa,1)-40
    paralelo=[];
    perpendicular=[];
    per=[];
    paralelo=[(costa(i+1,:)-costa(i,:)) 0];
    paralelo=paralelo./norm(paralelo);
    perpendicular=cross(paralelo,z);
    perpendicular=perpendicular./norm(perpendicular);
    Dist(l)=norm(costa(i+1,:)-costa(i,:));
    ap(k,i,:)=paralelo;
    coseno=perpendicular(1);
    angcos(l)=acos(coseno);
    cooR(l)=costa(i,1);
    l=l+1;
    for c=0:cada:Lper
        per=[perpendicular(1) perpendicular(2)];
        perfil(t,:)=costa(i,:)+per*c;
        t=t+1;
    end
    i=i+1;
end
angcosta=fliplr(angcos);
%angcos; angulo que forma un vectos O-E con el paralelo a la costa en cada

```

```

%ESTRUCTURA DE LA MATRIZ DE PERFILES
%           1       2       3       4       5       6       7
%           Coord  Coord  Dep     Hs     0       yH     Qb
%axis equal

%% ASIGNACIÓN DE PROFUNDIDADES Y ALTURAS Y ROTURA
for i=1:size(H.Time,1)

    depi(:, :)=dep.Val(i, :, :);
    perfil(:, 3)=griddata(gri.X, gri.Y, depi, perfil(:, 1), perfil(:, 2));

    Hi(:, :)=H.Val(i, :, :);
    perfil(:, 4)=griddata(gri.X, gri.Y, Hi, perfil(:, 1), perfil(:, 2));

    Qi(:, :)=Q.Val(i, :, :);
    perfil(:, 7)=griddata(gri.X, gri.Y, Qi, perfil(:, 1), perfil(:, 2));

    Ti(:, :)=T.Val(i, :, :);
    perfil(:, 8)=griddata(gri.X, gri.Y, Ti, perfil(:, 1), perfil(:, 2));

    perfil(:, 5)=0.1*ones(size(perfil, 1), 1);

    perfil(:, 6)=0.5*perfil(:, 3);

    perfil3(i, :, :)=perfil(:, :);

end

%% REORDENA
nper=size(perfil, 1)/(np);
for k=1:size(H.Time, 1)
for j=1:nper
    for i=1:np
        Xp(k, i, j)=perfil3(k, np*(nper-j)+i, 1);
        Yp(k, i, j)=perfil3(k, np*(nper-j)+i, 2);
        Dp(k, i, j)=perfil3(k, np*(nper-j)+i, 3);
        Hp(k, i, j)=perfil3(k, np*(nper-j)+i, 4);
        Qp(k, i, j)=perfil3(k, np*(nper-j)+i, 7);
        Tp(k, i, j)=perfil3(k, np*(nper-j)+i, 8);
    end
end
end

end

%% BURCAR ROTURA
clear Cpl Cpn rotn rotl
Cpn=Hp.*0;
err=0;
waitbar(0, 'Busq, rotura')
for k=1:size(H.Time, 1)
    Dirxt(:, :)=D.XComp(k, :, :);
end

```

```

        Diryt(:, :)=D.YComp(k, :, :);
        waitbar(k/size(H.Time,1));
    for j=1:size(Hp,3)
        for i=size(Hp,2):-1:1
            if Qp(k,i,j)>0.08
                Cpn(k,i,j)=1;
                break
            end
        end
        if Cpn(k, :, j)==0
            if j==1
                Cpn(k,2,j)=1;
            else
                for i=size(Hp,2):-1:1
                    if Cpn(k,i,j-1)==1;
                        Cpn(k,i,j)=1;
                        err=err+1;
                        break
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end

%INTERPOLACIÓN DEL ÁNGULO

t=1;
l=1;
for j=1:size(Cpn,3)
    for i=1:size(Cpn,2)
        if Cpn(k,i,j)==1
            rotn(k, :, t)=[Xp(k,i,j) Yp(k,i,j) Hp(k,i,j) Qp(k,i,j) Tp(k,i,j)];
            flag=[k i j];
            eqp(1)=Xp(k,i,j);
            iip(1)=Yp(k,i,j);
            vecola=[griddata(gri.X,gri.Y,Dirxt,eqp,iip)
                griddata(gri.X,gri.Y,Diryt,eqp,iip) 0];
            coseno=vecola(1)/norm(vecola);
            angol(k,j)=acos(coseno);
            t=t+1;
        else
            end
    end
end

end
end

%% Calculo angulo
angcosta=fliplr(angcos);
for t=1:length(D.Time)
    angins=angol(t, :);
    ang=pi-angins+angcosta;
    angl(t, :)=ang;
end

```

```
%% CALCULO DEL TRANSPORTE
rotn(rotn<0.08)=0.08;
ro=1025; % Kg/m3
g=9.81; % m/s2
K=1.6 * exp (-2.5 * 1); %
rs=2560; % Kg/m3
p=0.3; % %
for t=1:size(H.Time)
    for i=1:size(rotn,3)
        C=ro*K*sqrt(g/rotn(t,4,i))/(16*(rs-ro)*(1-p));
        tte(t,i)=C*(rotn(t,3,i)^(5/2))*sin(2*angl(t,i));
        Vol(i)=Dist(i)*tte(i);
    end
end
end
%%
save workspace
```