

Estudio de la evolución de una regeneración costera en una playa heterogénea



Daniel Principal Gómez

TUTORES:

Dr. Miguel Ortega Sánchez

Rafael Jesús Bergillos Meca

*GRADO DE INGENIERÍA CIVIL. ESPECIALIDAD: CONSTRUCCIONES CIVILES.
CURSO: 2014/2015*



TRABAJO FIN DE GRADO



Estudio de la evolución de una regeneración costera en una playa heterogénea

Daniel Principal Gómez

TUTORES:

Dr. Miguel Ortega Sánchez

Rafael Jesús Bergillos Meca

*GRADO DE INGENIERÍA CIVIL. ESPECIALIDAD: CONSTRUCCIONES CIVILES.
CURSO: 2014/2015*

ÍNDICE

1. Introducción
2. Zona de estudio
3. Metodología
 - 3.1. Clima marítimo
 - 3.2. Batimetrías
 - 3.3. Líneas de costa
 - 3.4. Volúmenes
4. Resultados
 - 4.1. Análisis histórico de datos climáticos
 - 4.2. Análisis temporal del periodo de estudio
 - 4.2.1. Octubre 2014-Diciembre 2014
 - 4.2.1.1. Datos de clima marítimo
 - 4.2.1.2. Perfiles batimétricos
 - 4.2.1.3. Líneas de costa
 - 4.2.1.4. Volumen
 - 4.2.2. Diciembre 2014-Marzo 2015
 - 4.2.2.1. Datos de clima marítimo
 - 4.2.2.2. Perfiles batimétricos
 - 4.2.2.3. Líneas de costa
 - 4.2.2.4. Volumen
 - 4.2.3. Marzo 2015-Junio2015
 - 4.2.3.1. Datos de clima marítimo
 - 4.2.3.2. Perfiles batimétricos
 - 4.2.3.3. Líneas de costa
 - 4.2.3.4. Volumen
5. Conclusiones
6. Referencias

Estudio de la evolución de una regeneración costera en una playa heterogénea

Daniel Principal Gómez

Tutores:

Dr. Miguel Ortega Sánchez

Rafael Jesús Bergillos Meca

Grado de Ingeniería Civil. Especialidad: Construcciones Civiles. Curso: 2014-2015

Resumen

Este Trabajo Fin de Grado estudia la evolución de un aporte artificial de sedimento en Playa Granada. La regeneración se realiza para abordar el problema que le supone a la playa la pérdida de sedimento a partir de la construcción de la presa de Rules en el río Guadalfeo, una de las vías principales de aportación natural de sedimento a la playa. Para llevar a cabo este estudio se han analizado registros históricos, por un lado, y datos registrados durante el periodo de estudio, por otro. Dicho periodo de estudio empieza justo antes de los trabajos de regeneración y termina ocho meses después. Los datos recogidos son: información de clima marítimo, topografías que determinan líneas de costa y perfiles batimétricos. Estos datos se han analizado y relacionado entre sí, y además, se ha completado el trabajo con un cálculo aproximado de los volúmenes que ha ganado o perdido la playa a lo largo del periodo de estudio. Los resultados obtenidos indican que la zona presenta dos direcciones predominantes de procedencia del oleaje, para las cuales, la playa reacciona de forma diferente. La opción de regenerar esta playa mediante un aporte artificial de sedimento pasaría a ser una mala opción dadas las pérdidas de material que le supone a la playa a largo plazo, puesto que los temporales más fuertes en esta zona suelen ser de oleaje de poniente, que transporta el sedimento de la zona del delta del Guadalfeo, acumulándolo en la zona de playa cercana al Puerto de Motril.

1. Introducción

Este Trabajo fin de Grado aborda el estudio de la regeneración de una playa heterogénea en un sistema deltaico, y cuyo objetivo será estudiar la evolución de un aporte artificial de sedimento en esta tipología de costa a lo largo de un periodo de tiempo determinado.

Existen numerosos motivos por los que es importante el estudio de una playa heterogénea en sistemas deltaicos. Uno de ellos es que este tipo de playas ha sido escasamente estudiado, al contrario que en el caso de las playas de arena. Se podría añadir que es importante su estudio ya que el tipo de playa más común en cuanto a la variabilidad del tamaño de sedimento es la playa heterogénea.

El material que se aporta a una playa para su regeneración es un material cuya granulometría y morfología no son homogéneas, sino que hay variabilidad en el tamaño y forma del sedimento. Por tanto, adquiere más importancia el estudio de playas heterogéneas siempre que hablamos de realizar una regeneración haciendo un aporte artificial de sedimento.

Entre las distintas tipologías costeras, las playas heterogéneas son sistemas compuestos por un amplio rango de tamaños de sedimento cuya estratificación vertical es variable y con proporciones y gradación cambiantes tanto transversal como longitudinalmente (Holland and Elmore, 2008). Estas variaciones pueden ser reforzadas por la presencia de formas rítmicas, como las formas cuspidales (Short, 1999; Ortega-Sánchez et al., 2008). Las principales particularidades de las playas heterogéneas son las de presentar elevadas pendientes y reflejar una gran proporción de la energía incidente. Suelen tener una línea de rotura bien definida así como distintos escalones y bermas distribuidos en el perfil que se modifican en función de las condiciones de forzamiento y los procesos erosivos deposicionales que se produzcan. Son playas que, en general, se erosionan poco y se recuperan de forma rápida tras el paso de una tormenta (Williams et al., 2012)

La playa sometida a estudio se encuentra en un sistema deltaico, que son sistemas situados en la transición entre ambientes fluviales y marítimos. Como consecuencia de su naturaleza, los deltas

suelen responder de manera rápida a cambios naturales, estando dicha respuesta controlada principalmente por las variaciones en el suministro de sedimento que llega al dominio costero (Mateo and Siringan, 2007).

El objetivo de este estudio es realizar un seguimiento de una regeneración en este tipo de playa para observar cómo evoluciona y reacciona frente a los diferentes fenómenos marítimos que se presenten a lo largo de un periodo de estudio determinado.

El presente estudio está estructurado de la siguiente manera: primero, se presentará la zona de estudio donde se hablará de su localización y sus principales características; en segundo lugar se explicará la metodología seguida para afrontar y completar este trabajo fin de grado; seguidamente se expondrán los resultados obtenidos, tras seguir dicha metodología, comentándolos y relacionándolos entre sí; finalmente se expondrán las conclusiones a las que se han llegado tras el análisis previo de los resultados obtenidos.

la formación de barras y terrazas mareales así como la presencia de bermas de tormenta debido al transporte de finos en dirección *off-shore*.

Playa Granada presenta un problema importante debido a la construcción de la presa de Rules. Este hecho ha disminuido en gran cantidad el sedimento aportado por el río Guadalfeo a estas playas, por lo que ahora son más inestables y no se recuperan con tanta facilidad después de un temporal. El río Guadalfeo era la vía más importante de aporte natural de sedimento a esta playa. Debido a este problema, se realizó una regeneración mediante un aporte artificial de sedimento. Estos trabajos de regeneración acabaron en Noviembre de 2014 con un volumen total de 106.676 m³ de material aportado en la zona más próxima a la desembocadura del río Guadalfeo (Playa de la Cagaílla).

3. Metodología

Este Trabajo Fin de Grado estudiará la evolución del aporte de sedimento descrito anteriormente dentro del periodo de tiempo comprendido entre

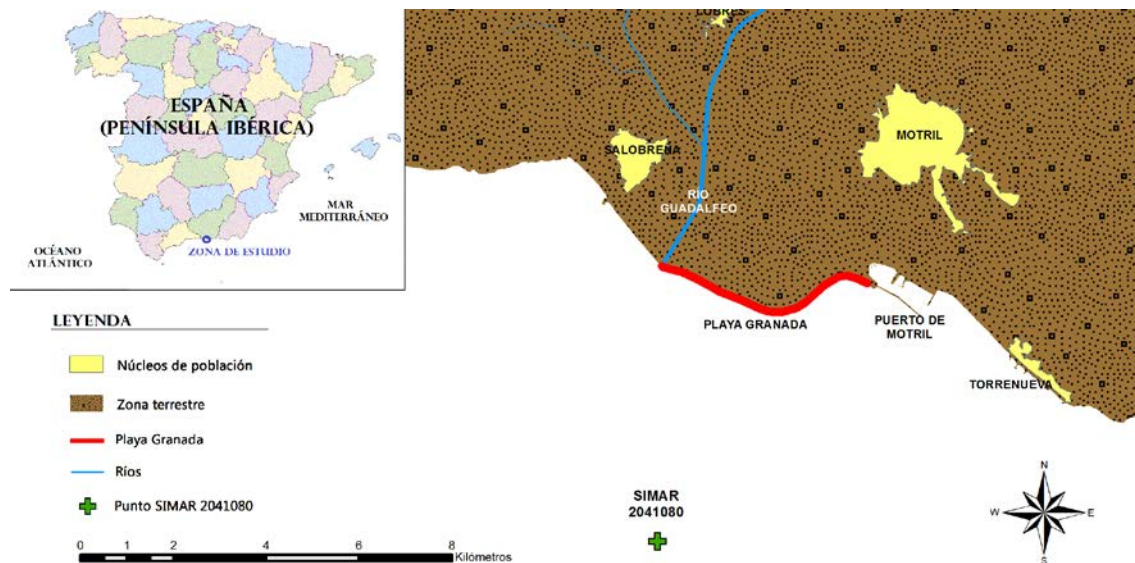


Figura 1: Panel superior izquierdo: situación de la zona de estudio. Panel principal: localización de Playa Granada, río Guadalfeo, Puerto de Motril, punto SIMAR 2041080 y localidades de Motril, Salobreña y Torrenueva.

2. Zona de estudio

La playa heterogénea objeto de estudio de este Trabajo fin de Grado es Playa Granada, situada al sur de la Península Ibérica, en el litoral granadino (figura 1).

Playa Granada tiene una longitud de aproximadamente 5 km y está limitada al Oeste por la desembocadura del río Guadalfeo y al Este por el puerto de Motril. Esta playa se caracteriza por la variación transversal del tamaño del grano,

Octubre de 2014 (justo antes de los trabajos de regeneración) y Junio de 2015.

Los datos que analizaremos serán: datos de clima marítimo, datos geográficos de líneas de costa y datos a partir de medidas batimétricas.

3.1. Clima marítimo

Los datos de clima marítimo fueron proporcionados por Puertos del Estado, y son procedentes del punto SIMAR 2041080 situado

en las coordenadas UTM (448.171; 4.058.422) (figura 1).

Se han realizado dos análisis diferentes de los datos de clima marítimo. El primero recoge una serie de 171.020 estados de mar, es decir, se han usado todos los registros desde el año 1958 hasta la actualidad, con una cadencia de tres horas, con los cuales se ha hecho una caracterización del régimen medio y otra caracterización del régimen extremal mediante el Método de Máximos Anuales. Con este primer análisis podremos presentar el comportamiento del clima marítimo en esta zona mediante un estudio más general de los datos. Para realizar este primer análisis se han usado los datos de altura de ola significativa espectral (H_{m0}), el periodo de pico espectral (T_p), dirección media de procedencia del oleaje ($DirM$) ($N = 0^\circ$, $E = 90^\circ$), velocidad media del viento ($VelV$) y dirección media de procedencia del viento ($DirV$) ($N = 0^\circ$, $E = 90^\circ$). Además, se han obtenido datos de marea astronómica y marea meteorológica desde el año 2005 hasta la actualidad, con una cadencia de registro de una hora.

El análisis de los registros de clima marítimo se ha llevado a cabo usando el software informático *MatLab*, con el cual se han podido recoger todos los datos y relacionarlos entre sí.

En el segundo análisis que se ha realizado con los datos de clima marítimo se han empleado 5.991 estados de mar, correspondientes al periodo de tiempo entre Octubre de 2014 y Junio de 2015, para realizar un estudio más concreto del comportamiento del clima marítimo y relacionarlo con la evolución de la regeneración llevada a cabo en Playa Granada. Este periodo de tiempo entre Octubre y Junio lo dividiremos en tres partes para hacer un estudio aún más específico de cada una de ellas.

3.2. Batimetrías

En el periodo de tiempo fijado para este estudio se han obtenido los datos de cuatro batimetrías multihaz realizadas por el grupo de dinámica de flujos ambientales de la Universidad de Granada: Octubre, Diciembre, Marzo y Junio.

En comparación con la de Octubre, las batimetrías de Diciembre, Marzo y Junio son parciales, es decir, únicamente se pudo realizar el registro en algunas zonas concretas de Playa Granada, entre las que incluye la zona regenerada junto a la desembocadura del río Guadalfeo.

Para comparar las batimetrías entre sí se ha seguido la siguiente metodología: con el software *Autocad* se han superpuesto, en varias capas, las distintas batimetrías con el objetivo de fijar varias líneas transversales a estas y que, en un cálculo posterior, se han usado para realizar los perfiles transversales. Una vez fijadas las líneas

transversales nos quedamos con las coordenadas UTM de los extremos de cada línea. En este caso se han realizado tres cortes transversales (figura 2)

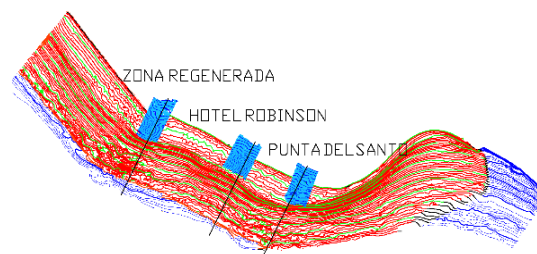


Figura 2: Localización de los perfiles transversales creados para su estudio.

A continuación, con el software *Surfer* se han cargado cada una de las batimetrías y, con la herramienta *Slice*, se han calculado los cortes transversales introduciendo como archivo de corte las coordenadas de los extremos de cada una de las líneas transversales fijadas anteriormente en el documento de *Autocad*. *Surfer* da un archivo de salida que cargándolo mediante *MatLab* se puede trabajar con los datos del perfil batimétrico o incluso representarlos mediante gráficas. Finalmente, se han representado en cada gráfica, dos perfiles batimétricos, cada uno de un periodo de tiempo distinto, aunque sí provenientes del mismo corte transversal.

3.3. Líneas de costa

Con objeto de complementar los datos de batimetría se han recogido datos geográficos de línea de costa en Playa Granada. A lo largo del periodo determinado para el presente estudio se han recogido datos de línea de costa en seis ocasiones: Octubre, Diciembre, Febrero, Marzo, Mayo y Junio. Dichos datos provienen de levantamientos topográficos realizados por el grupo de dinámica de flujos ambientales de la Universidad de Granada, empleando un GPS diferencial.

Todos estos datos han sido obtenidos a partir de la desembocadura del río Guadalfeo hacia el Este, por tanto, cuando hablamos de longitud de línea de costa, el punto inicial de medida de esa longitud es la intersección de la línea de costa con el río Guadalfeo.

Para trabajar con dichos datos se ha usado el software *ArcGis*, con el cual se han calculado las longitudes de las distintas líneas de costa y las áreas formadas entre cada una de ellas, teniendo siempre en cuenta qué área aporta pérdida o

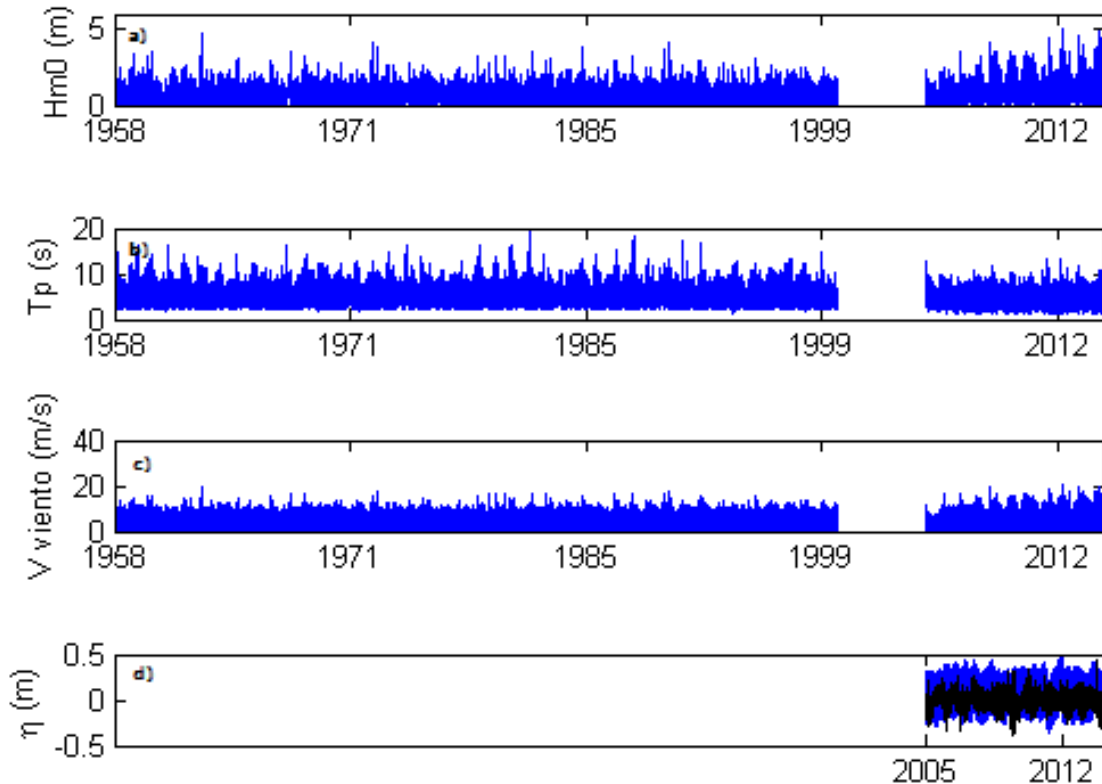


Figura 3: Datos históricos de las variables de clima marítimo: a) Altura de ola significativa; b) Periodo pico espectral; c) Velocidad media del viento; d) Marea astronómica (azul) y marea meteorológica (negro).

ganancia respecto a la línea de costa anterior en el tiempo.

3.4. Volúmenes

A partir de los datos anteriormente expuestos se han calculado, mediante una metodología aproximada, los volúmenes de sedimento que ha ganado o perdido Playa Granada a lo largo del periodo de tiempo comprendido entre cada dato de perfil batimétrico.

Esta metodología aproximada consiste en lo siguiente: calcular, en una longitud de costa determinada, la distancia media que avanza o retrocede la línea de costa a partir del área que comprenden dos de ellas. Posteriormente, en un perfil transversal, se realiza una cubicación aproximada del área que encierra este perfil con uno paralelo a una distancia igual a la que avanza o retrocede la línea de costa. Este último dato (volumen unitario) se multiplica por la longitud total de la costa resultando el volumen aproximado de sedimento que la playa gana o pierde en un determinado periodo de tiempo.

4. Resultados

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos del estudio de la siguiente manera: primero se analizarán los datos históricos generales de clima marítimo de la zona de estudio y en segundo lugar se hará un análisis, teniendo en cuenta todos los datos obtenidos, de cada periodo de tiempo comprendido entre cada registro de datos de batimetría.

4.1. Análisis histórico de datos climáticos

Los resultados obtenidos de altura de ola significativa espectral, periodo de pico espectral, velocidad media del viento y marea astronómica/meteorológica frente al tiempo están representados en la figura 3.

La figura 3d) nos indica que la zona de estudio es una zona micromareal dado que la marea, tanto astronómica como la meteorológica, presenta una elevación por debajo de 1m.

La altura de ola significativa espectral media en la zona de estudio es de 0,5834m y el periodo de pico espectral medio es de 5,2592s. Eso indica que esta playa, en general, suele estar sometida a oleajes de bajo contenido energético.

Las direcciones de procedencia del oleaje predominantes son las de O-SO y S-SE, y las de procedencia del viento son las de O-SO y E con una velocidad media de 4,1267 m/s (figura 5).

En la figura 4 (Diagrama de dispersión) se aprecia que para las alturas de ola mayores, el periodo se aproxima a 9 segundos, y que para las alturas de ola más frecuentes (menores a 1m) el periodo está comprendido entre 2 y 12 segundos. En la figura 6 se representa la función de densidad y la función de distribución de Valores Extremos Generalizada (GEV) de la altura de ola. Se aprecia que las alturas de ola con más

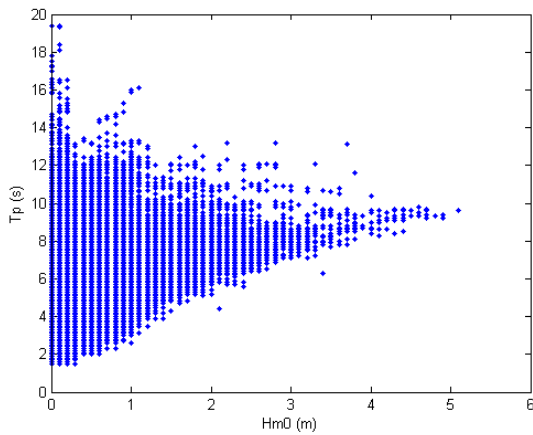


Figura 4: Diagrama de dispersión

frecuencia están comprendidas entre los valores de 0,1 y 0,4m.

Además, se ha obtenido como resultado las alturas de ola significativa máximas anuales que están representadas en la tabla de la figura 7.

La mayor altura de ola registrada ha sido de 5,1m con fecha de registro de 19 de Enero de 2013 a

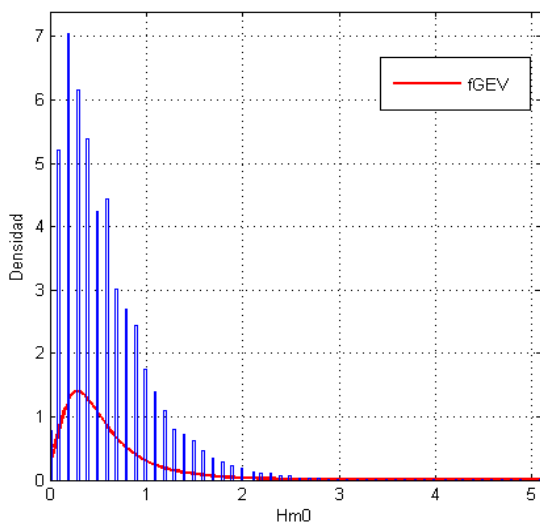


Figura 6: Izquierda: función de densidad y su aproximación por valores extremos generalizados. Derecha: función de distribución correspondiente

las 19:00 horas, proveniente del O-SO. El periodo de pico espectral correspondiente a este registro fue de 9,6 segundos, y la velocidad del viento de 16,1m/s.

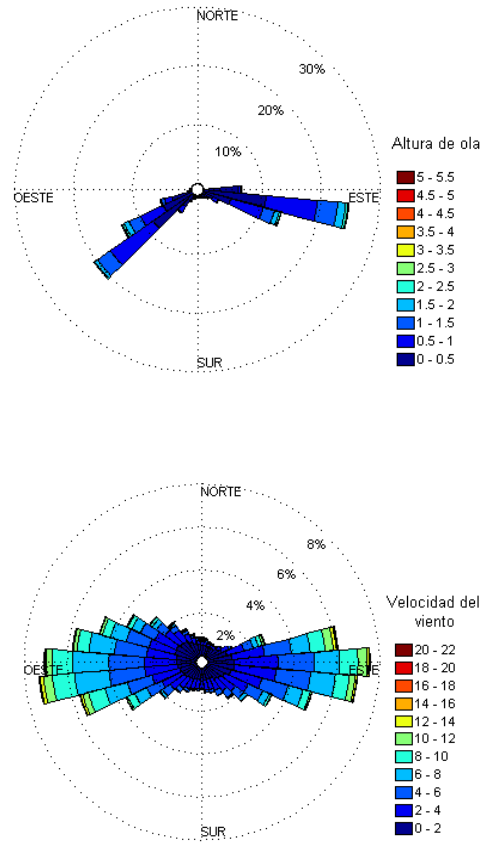
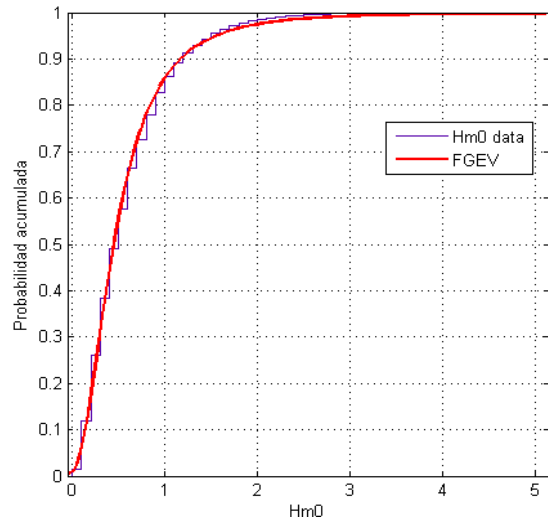


Figura 5: Arriba: Rosa de oleaje; Abajo: Rosa de viento.



1958	1959	1960	1961	1962
2,5	3,4	3,5	2,5	2,7
1963	1964	1965	1966	1967
4,7	2,3	3,1	2,2	3
1968	1969	1970	1971	1972
3,6	3,3	2,3	2,8	2,9
1973	1974	1975	1976	1977
4,1	2,7	2,8	2,4	2,3
1978	1979	1980	1981	1982
2,5	3,3	3,3	2,5	3,5
1983	1984	1985	1986	1987
3	2,4	3,8	2,5	3
1988	1989	1990	1991	1992
3,2	3,7	4,1	2,9	2,9
1993	1994	1995	1996	1997
2,8	2,5	3,1	2,6	2,5
1998	1999	2000	2001	2002
2,5	2,5	No hay dato	No hay dato	No hay dato
2003	2004	2005	2006	2007
No hay dato	No hay dato	2,3	2,5	3,5
2008	2009	2010	2011	2012
4,1	3,5	3,5	3,4	4,4
2013	2014	2015	TABLA DE MÁXIMOS ANUALES	
5,1	4	4,9		

Figura 7: Tabla de máximos anuales

El mayor dato de periodo de pico espectral es de 19.4 segundos, y se registró en la fecha del 2 de Marzo de 1982 con una altura de ola de 0,1m proveniente del O-SO y velocidad del viento de 1.5m/s.

La mayor velocidad del viento registrada es de 20,6m/s proveniente del O-SO y tiene fecha del 19 de Enero de 2013 a las 10:00 horas con una altura de ola significativa de 3m también proveniente del O-SO.

4.2. Análisis temporal del periodo de estudio

Cada periodo de tiempo está fijado entre dos registros de batimetría consecutivos y contiene datos de clima marítimo, línea de costa y perfiles derivados de dichas batimetrías.

4.2.1. Octubre 2014 – Diciembre 2014

Es importante comentar que durante este periodo de tiempo tuvieron lugar los trabajos de regeneración de la playa de 'La Cagaílla' junto a la desembocadura del río Guadalfeo, ya que los resultados que obtendremos a continuación se verán afectados, sobre todo, por ese aporte de sedimento que recibió la playa.

4.2.1.1. Datos de clima marítimo

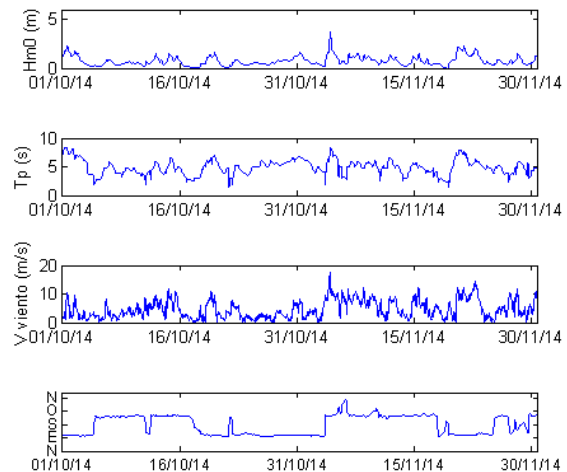


Figura 8: Variables de clima marítimo del periodo de Octubre-Diciembre: a) Altura de ola significativa; b) Periodo pico espectral; c) Velocidad media del viento; d) Dirección de procedencia del oleaje

La figura 8 muestra los datos de altura de ola significativa, periodo pico espectral y velocidad del viento dentro de este periodo temporal. Los datos mostrados aquí no se alejan de la línea que seguían los datos analizados anteriormente, de forma general, sobre la zona de estudio. La altura media de ola calculada en este periodo es de 0,75m y el periodo pico espectral medio es de 4,9s.

Se aprecia que hay una perturbación en la gráfica debido a un temporal, con olas procedentes del O-SO (figura 8d), de altura de ola máxima de 3,7m y periodo de 7,8s. Vemos que tanto la figura 8a) como la 8b) y 8c) sufren esa perturbación debido a dicho temporal. La velocidad del viento correspondiente al estado de mar en el que se alcanza la altura máxima de ola es de 14,2m/s, aunque el máximo valor de velocidad del viento se alcanza en otro momento de ese mismo temporal, y es de 17,7m/s.

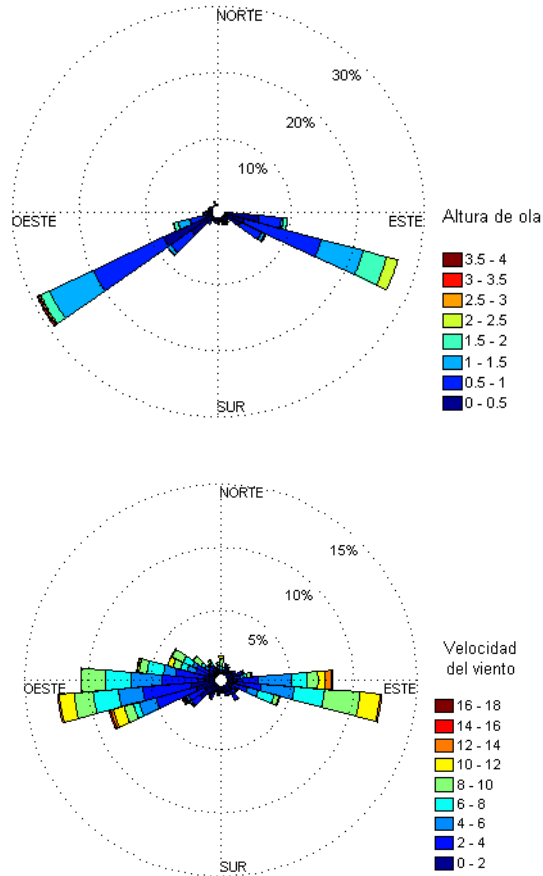


Figura 9: Arriba: Rosa de oleaje para el periodo de tiempo Octubre-Diciembre; Abajo: Rosa de viento para el periodo de tiempo Octubre-Diciembre.

En cuanto a la dirección predominante de procedencia del oleaje, la figura 9a) muestra que el oleaje procede mayormente del O-SO y del E-SE, similares a las direcciones de procedencia del viento (figura 9b)).

La figura 10 muestra las funciones de densidad y distribución de la altura de ola, las cuales indican que las alturas de ola más frecuentes en este periodo de tiempo comprenden entre 0,2m y 0,7m.

El diagrama de dispersión (figura 11) nos muestra de forma similar lo que se dedujo del estudio general. A alturas de ola pequeñas le suelen corresponder periodos menores, mientras que, conforme va aumentando la altura de ola, el periodo se aproxima a tener un valor de 9s.

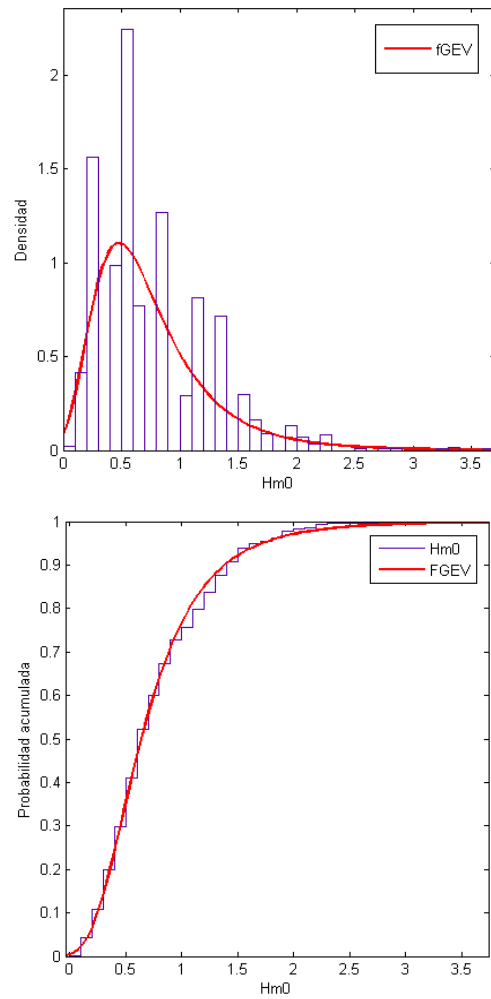


Figura 10: Arriba: función de densidad con aproximación por valores extremos generalizada; Abajo: función de distribución correspondiente; Ambas pertenecen al periodo Octubre-Diciembre.

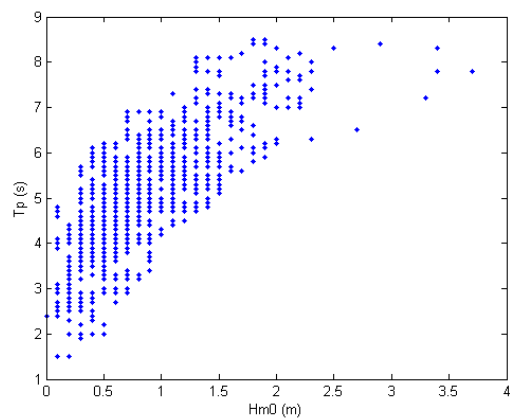


Figura 11: Diagrama de dispersión (Octubre-Diciembre)

4.2.1.2. Perfiles batimétricos

Teniendo en cuenta el esquema de la *figura 2* donde se indica la situación de cada corte transversal, se han recogido los resultados en la *figura 12* que compara tres parejas de perfiles procedentes de los registros de batimetría de Octubre y Diciembre.

En la zona de la playa de 'La Cagaílla' se puede apreciar que los perfiles son coincidentes a excepción de la zona próxima a los 5m de profundidad donde se ha almacenado sedimento debido al aporte artificial de material.

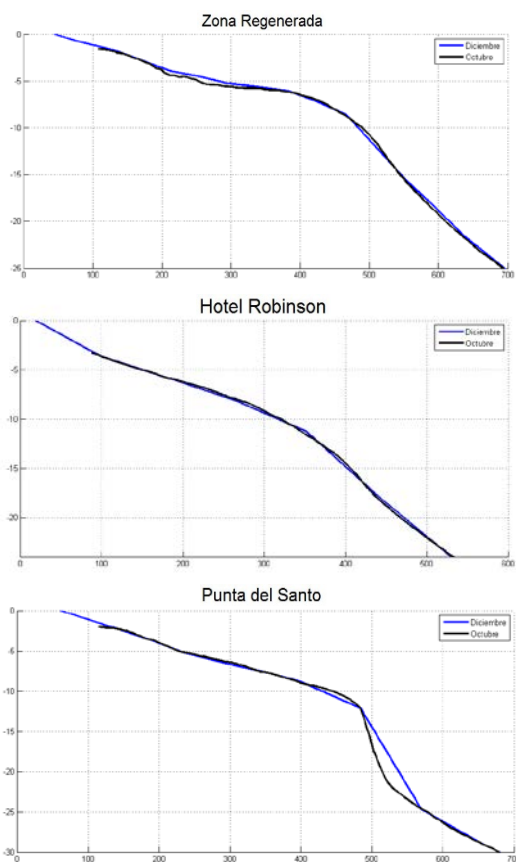


Figura 12: Perfiles correspondientes a las batimetrías de Octubre y Diciembre en: a) Zona regenerada, b) Hotel Robinson y c) Punta del Santo

La pareja de perfiles calculados a la altura del Hotel Robinson son prácticamente coincidentes, por tanto el balance de pérdidas y ganancias de sedimento es nulo.

En la zona de la Punta del Santo los perfiles son algo diferentes sobre todo entre los 10 y los 25m de profundidad, posiblemente por ser una zona que está más expuesta a ambas direcciones predominantes de procedencia del oleaje.

4.2.1.3. Línea de costa

Dentro de este periodo de tiempo se registraron dos líneas de costa correspondientes a los meses de Octubre y Diciembre.

La línea de costa registrada en el mes de Octubre presenta una longitud de 5035,08m desde la desembocadura del río Guadalfeo hasta el Puerto de Motril, sin embargo la línea de costa fechada en Diciembre presenta una longitud de 1347,18m medida desde la desembocadura del río Guadalfeo hacia el Este. Los resultados obtenidos están limitados territorialmente por la ocupación longitudinal de la línea de costa del mes de Diciembre, al presentar una longitud menor que la anterior.



Figura 13: Líneas de costa de Octubre y Diciembre, y área que encierran entre ellas.

El área que encierran ambas líneas de costa, vista en planta, se puede observar en la *figura 13* y tiene como resultado 17.842,21m² en concepto de ganancia respecto a Octubre. Este resultado es consecuencia del aporte artificial de sedimento que la playa percibió en este periodo de tiempo. Vemos en la *figura 13* que la costa que queda al Este de la zona regenerada también ha ganado sedimento. Esto es debido, asociando el caso a los resultados obtenidos en cuanto al clima marítimo, a que la dirección predominante de procedencia del oleaje ha sido O-SO y que el oleaje de mayor contenido energético de este periodo de tiempo coincide con esa misma dirección

4.2.1.4. Volumen

Para la obtención del volumen de sedimento ganado, en este caso, se ha basado el cálculo en el perfil batimétrico intermedio de los tres que se obtuvieron, es decir, el perfil situado a la altura del hotel Robinson de Playa Granada (*figura 12b*). La profundidad de cierre, en este caso, se ha fijado en 10m. A partir del área que forman las dos líneas de costa obtenidas para este periodo se ha calculado la media del avance de la línea de costa a lo largo de sus 1347,18m resultando un avance de 13,24m hacia el mar. En la tabla de la *figura 14* se aprecian los datos del proceso de

cubicación de una forma más detallada. El volumen total ganado por la playa durante este periodo de tiempo es de 89.211,05m³. Este dato se acerca al volumen de sedimento que se aportó artificialmente a la playa de ‘La Cagaílla’ (106.676m³). Resulta más reducido, posiblemente, debido al temporal descrito en el apartado de clima marítimo con altura de ola máxima de 3,7m. La dirección de procedencia del oleaje durante ese temporal era O-SO, por tanto, pudo llevarse hacia el Este parte de ese material. También puede verse en el perfil tomado en la Punta del Santo (figura 12c)). El dato de Diciembre presenta una zona donde se ha acumulado sedimento, posiblemente del que haya transportado este temporal.

VOLUMEN OCTUBRE-DICIEMBRE	
LONGITUD DE COSTA	1.347,18m
DIFERENCIA DE ÁREAS	17.842,21 m ²
AVANCE/RETROCESO DE LA LINEA DE COSTA	13,24 m
PROFUNDIDAD DE CIERRE DEL PERFIL	10 m
LONGITUD EN HORIZONTAL DEL PERFIL	300 m
VOLUMEN UNITARIO EN EL PERFIL	66,22 m ²
VOLUMEN TOTAL GANADO/PERDIDO	89.211,05 m ³

Figura 14: Tabla de los datos usados para calcular el volumen de sedimento en el periodo de Octubre-Diciembre.

4.2.2. Diciembre 2014 – Marzo 2015

4.2.2.1. Datos de clima marítimo

La figura 15 recoge nuevamente los datos de altura de ola significativa, periodo pico espectral y velocidad del viento concretados en el periodo Diciembre-Marzo. El dato promedio de altura de ola en este periodo es de 0,84m y el periodo medio de 4,9s.

En esta figura se aprecia un temporal el día 31 de Enero de 2015 con una altura de ola máxima, proveniente del O-SO, de 4,9m y periodo de 9,2s, alcanzando el viento una velocidad máxima de 19,9m/s. Comparando este temporal con el estudio de datos históricos anterior, el dato de altura de ola está cerca del máximo registrado (5,1m) y sólo es superado por 3 estados de mar desde 1958. Por tanto nos encontramos ante una de las tormentas más fuertes que ha habido en la zona desde que se registran datos.

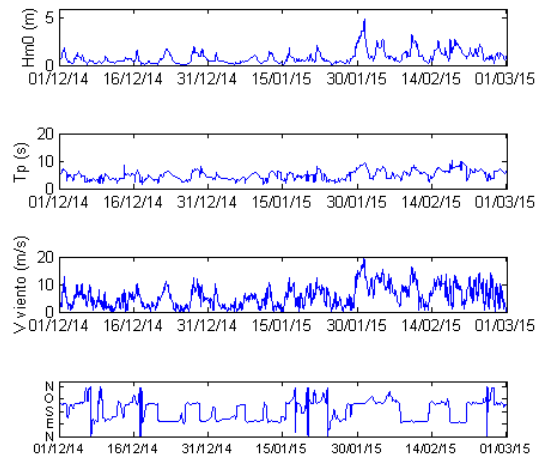


Figura 15: Variables de clima marítimo del periodo de Diciembre-Marzo: a) Altura de ola significativa; b) Periodo pico espectral; c) Velocidad media del viento; d) Dirección de procedencia del oleaje

Las direcciones de donde procede el oleaje no cambia respecto al estudio general de los datos: O-SO y E-SE (Figura 16a)). En cuanto a las direcciones de procedencia del viento tampoco presentan cambios relevantes, permanecen las direcciones predominantes de O-SO y E-SE (Figura 16b)).

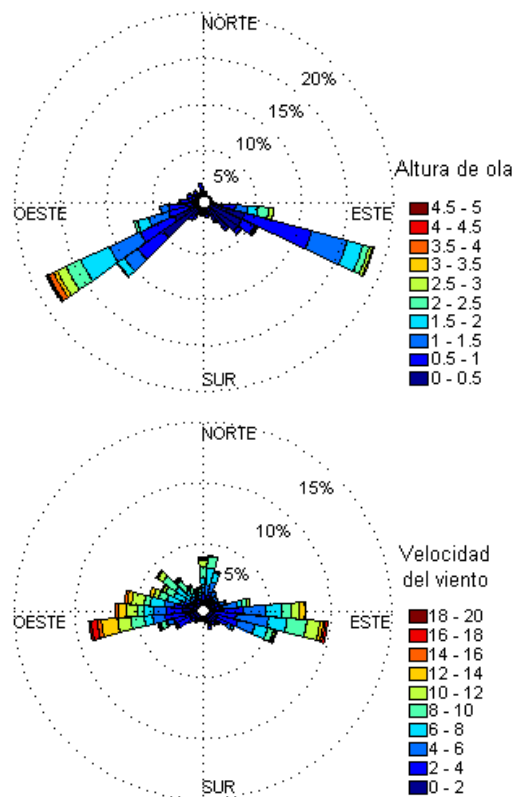


Figura 16: a) Rosa de oleaje; b) Rosa de viento; Ambas correspondientes al periodo de Diciembre-Marzo

En las *figura 17a)* y *17b)* podemos apreciar que los valores con más frecuencia son los que se encuentran entre 0,2m y 0,6m de altura de ola significativa.

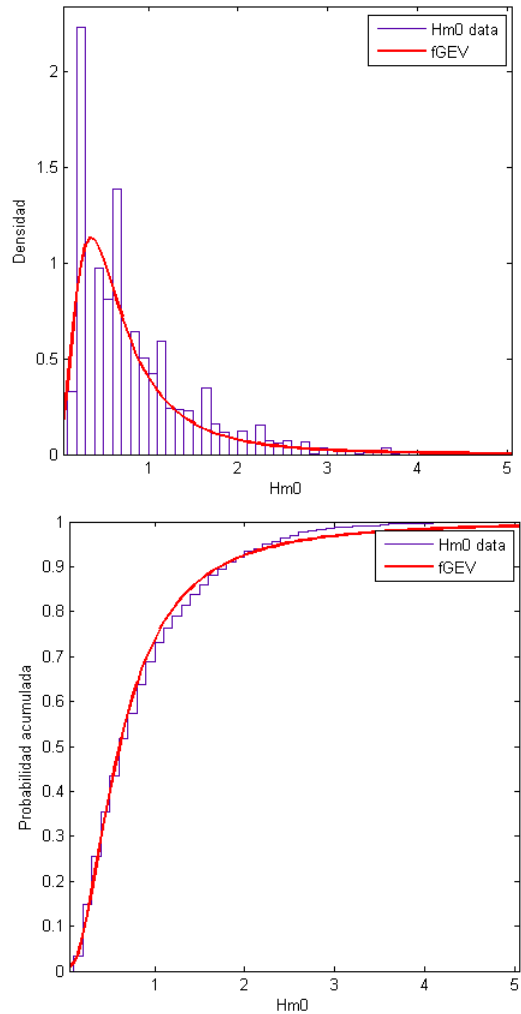


Figura 17: a)Función de densidad y aproximación por valores extremos generalizados; b)Función de distribución correspondiente.

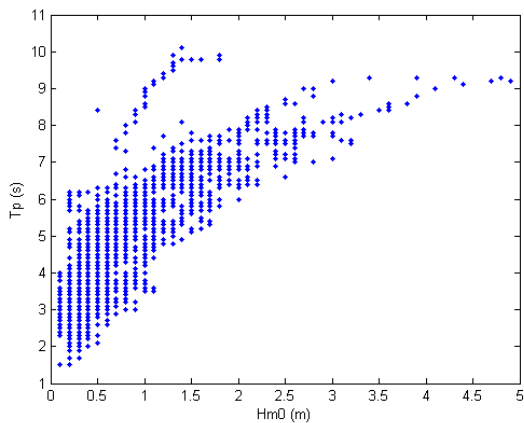


Figura 18: Diagrama de dispersión (Diciembre-Marzo)

Dado el Diagrama de dispersión de la *figura 18* se deduce la misma relación entre altura de ola y periodo y la proximidad del periodo a 9s cuando existen temporales.

4.2.2.2. Perfiles batimétricos

En la *figura 19* se han representado las comparaciones entre perfiles pertenecientes a Diciembre y a Marzo.

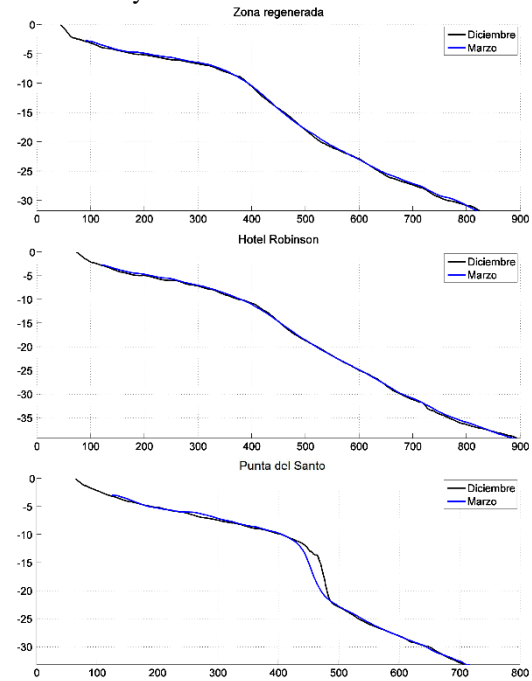


Figura 19: Perfiles batimétricos correspondientes al periodo Diciembre-Marzo: a)Zona regenerada; b)Hotel Robinson; c)Punta del Santo

En el perfil situado en la zona de la playa de ‘La Cagaílla’ vemos que existe una pequeña acumulación de material hasta, aproximadamente, los 6m de profundidad. Apoyándonos en el estudio de líneas de costa en planta que detallaremos a continuación, vemos que al final de este periodo temporal, la playa presenta más material en la zona de la playa de ‘La Cagaílla’ debido a que, al final de este mismo periodo, la playa sufrió olas de más de 3m procedentes del E-SE y provocó la acumulación de sedimento en esta zona.

En el perfil situado a la altura del hotel Robinson de Playa Granada vemos que, comparando ambos, son aproximadamente coincidentes, aunque se puede apreciar una pequeña acumulación de sedimento acumulada hasta los 6m de profundidad.

Los perfiles situados en la Punta del Santo presentan un detalle llamativo entre los 10 y 22m de profundidad. Al estar esta zona más desplazada hacia el mar, está expuesta a las dos direcciones predominantes. Y debido al fuerte temporal que sufrió la costa en Enero, sumado a las olas de más de 3m de altura que tuvieron lugar al final de este periodo de tiempo, esta zona de la playa ha sido la más maltratada.

4.2.2.3. Línea de costa

En este periodo disponemos de tres datos de líneas de costa: Diciembre, Febrero y Marzo.



Figura 20: Líneas de costa de Diciembre y Febrero, y área que encierran entre ellas.

La figura 20 detalla gráficamente las dos primeras líneas de costa consecutivas en el tiempo y el área que encierran. La longitud de la línea de costa de Diciembre es de 1347,18m y de 1.496,01m la de Febrero. El área que encierran da un valor de 8.384,08m² en concepto de pérdida de sedimento de la playa. Al comparar con los datos de clima marítimo se comprueba que, temporalmente, entre las dos líneas de costa, la playa sufrió la tormenta antes descrita de altura de ola máxima de 4,9m. Esta tormenta es la causante de que la playa haya perdido más de la mitad de la superficie que fue regenerada (superficie entre las líneas de costa de Octubre y Diciembre).



Figura 21: Líneas de costa de Febrero y Marzo, y área que encierran entre ellas.

En la figura 21 se representan las líneas de costa de Febrero y Marzo. La longitud de esta última es de 1.484,60m y el área que encierran entre ellas da un valor de 8.143,14m² en concepto de ganancia de material para la playa. Esto se debe a que durante el mes de Febrero ha habido numerosas ocasiones en las que se han superado los 3m de altura de ola significativa (figura 15a), y además hay que añadir que la dirección de esos temporales fue la de E-SE (figura 15d), es decir la dirección contraria a la que existía en el primer temporal con el que se perdió sedimento. Esto ha producido un transporte de material en dirección contraria (hacia el oeste), quedando el material acumulado en la zona próxima a la desembocadura del río Guadalfeo, ya que la línea

de costa en esa zona es aproximadamente perpendicular a la dirección descrita.

4.2.2.4. Volumen

La obtención del volumen final en este periodo de tiempo se ha basado en el perfil situado a la altura del hotel Robinson de Playa Granada. Se ha fijado la profundidad de cierre en 10m, y la longitud de costa sometida a cubicación ha sido de 1.347,18m (menor longitud de todas las líneas de costa que tenemos).

Desde Diciembre hasta Febrero, debido al fuerte temporal que sufrió la costa en Enero, la línea de costa retrocedió, de media, 6,22m a lo largo de la longitud de costa tomada, resultando con la pérdida de un volumen de 41.920,4m³. Sin embargo, desde Febrero hasta Marzo, debido al cambio en la dirección del oleaje y a las olas de más de 3m de altura significativa, descritas anteriormente, la costa avanza de media 6,04m y recupera un volumen de 40.715,7m³ de sedimento.

El resultado final es una pérdida de 1.204,7m³ de material de la playa.

La tabla de la figura 22 nos da más detalles de los resultados obtenidos en el proceso de cálculo del volumen de sedimento.

VOLUMEN DICIEMBRE-FEBRERO	
LONGITUD DE COSTA	1.347,18m
DIFERENCIA DE ÁREAS	-8.384,08 m ²
AVANCE/RETROCESO DE LA LINEA DE COSTA	-6,22 m
PROFUNDIDAD DE CIERRE DEL PERFIL	10 m
LONGITUD EN HORIZONTAL DEL PERFIL	300 m
VOLUMEN UNITARIO EN EL PERFIL	-31,12 m ²
VOLUMEN TOTAL GANADO/PERDIDO	-41.920,4 m ³
VOLUMEN FEBRERO-MARZO	
LONGITUD DE COSTA	1.347,18m
DIFERENCIA DE ÁREAS	8.143,14 m ²
AVANCE/RETROCESO DE LA LINEA DE COSTA	6,04 m
PROFUNDIDAD DE CIERRE DEL PERFIL	10 m
LONGITUD EN HORIZONTAL DEL PERFIL	300 m
VOLUMEN UNITARIO EN EL PERFIL	30,22 m ²
VOLUMEN TOTAL GANADO/PERDIDO	40.715,7 m ³

Figura 22: Tablas de los datos usados para calcular el volumen de sedimento

4.2.3. Marzo 2015 – Junio 2015

4.2.3.1. Datos de clima marítimo

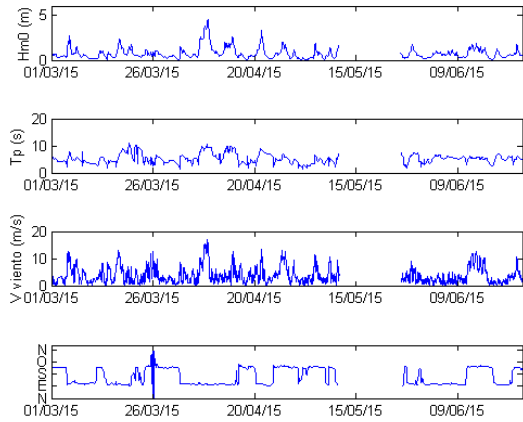


Figura 23: Variables de clima marítimo del periodo de Marzo-Junio: a) Altura de ola significativa; b) Periodo pico espectral; c) Velocidad media del viento; d) Dirección de procedencia del oleaje

La figura 23 muestra los datos de altura de ola significativa, periodo pico espectral, velocidad del viento y dirección del oleaje concretados en el periodo Marzo-Junio. El dato promedio de altura de ola en este periodo es de 0,7728m y el periodo medio de 5,3808s.

Durante este periodo de tiempo, y según la figura 23, el día 8 de Abril, esta zona costera sufrió un temporal de levante (dirección de procedencia del oleaje E-SE) con altura de ola significativa máxima registrada de 4,5m y periodo pico espectral correspondiente de 9,6s. La velocidad máxima del viento alcanzada en este temporal fue de 17m/s proveniente de la misma dirección. Las direcciones predominantes de procedencia del viento y del oleaje siguen siendo O-SO y E-SE, aunque la dirección que trajo consigo olas de más altura fue la E-SE (figura 24).

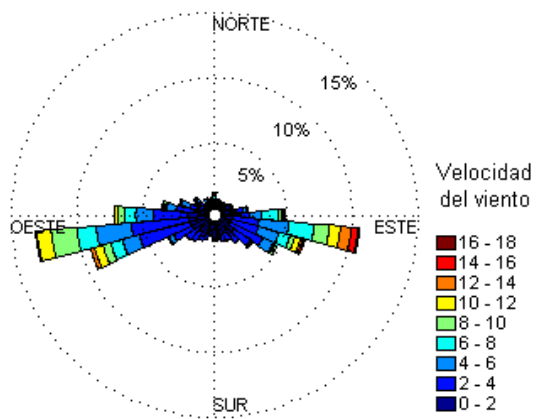
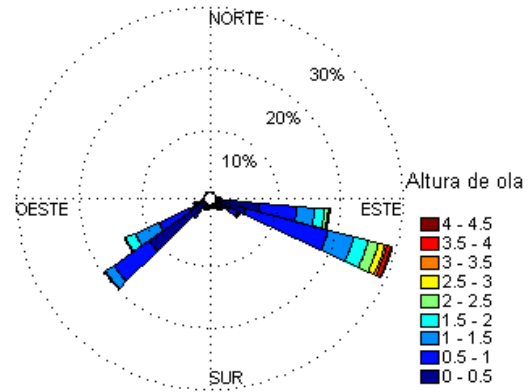


Figura 24: a) Rosa de oleaje; b) Rosa de viento; Ambas correspondientes al periodo Marzo-Junio

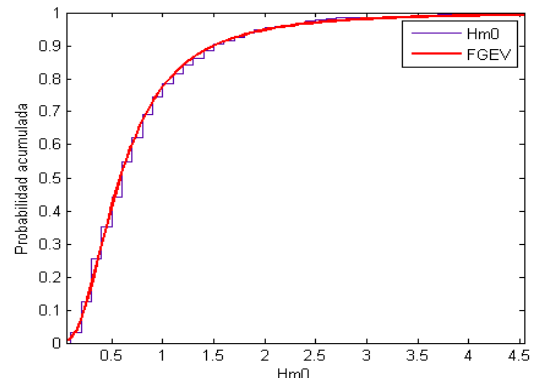
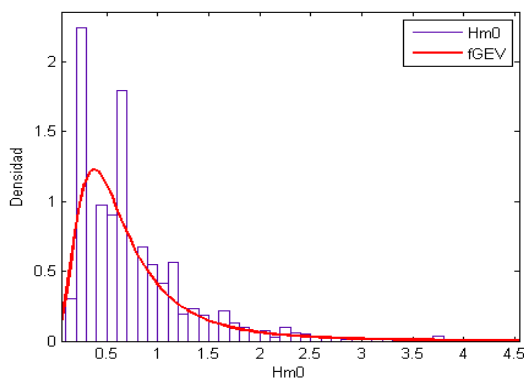


Figura 25: Izquierda: Función de densidad y aproximación por valores extremos generalizados; Derecha: Función de distribución correspondiente.

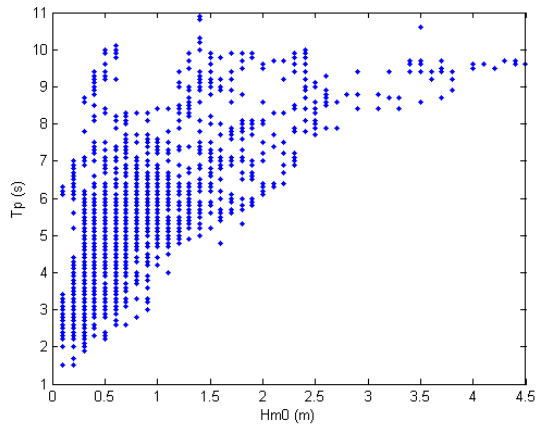


Figura 26: Diagrama de dispersión (Marzo-Junio)

En la figura 25 se dan, como para los periodos de tiempo anteriores, las funciones de densidad y distribución de valores extremos generalizados para la variable de altura de ola significativa. Se aprecia que los valores de altura de ola que más se dieron fueron los comprendidos entre 0,2 y 0,6m. También comprobamos de la figura 26 (diagrama de dispersión) que se sigue cumpliendo lo deducido en los anteriores periodos de tiempo: bajos periodos para, generalmente, bajas alturas de ola y para alturas de ola mayores el periodo se aproxima a 9s.

4.2.3.2. Perfiles batimétricos

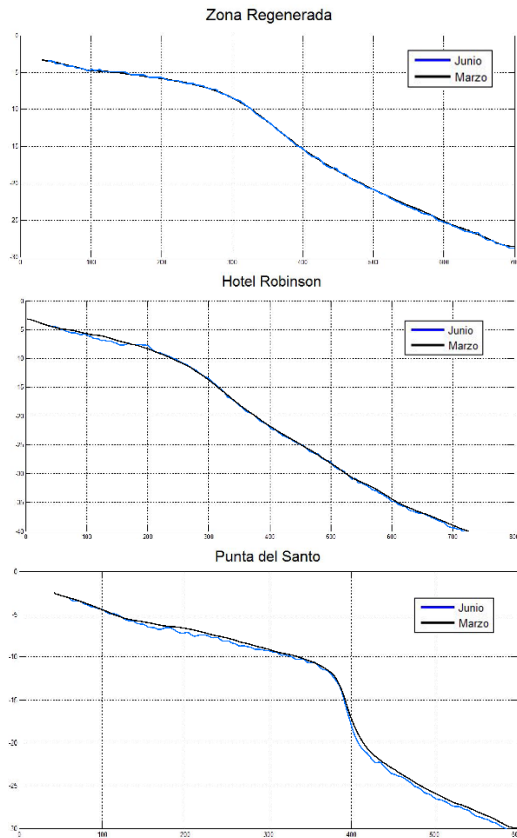


Figura 27: Perfiles batimétricos correspondientes al periodo Marzo-Junio.

Al igual que en los casos anteriores, se han realizado tres secciones transversales situadas en la zona regenerada (playa de ‘La Cagaílla’), a la altura del hotel Robinson de playa Granada y en la Punta del Santo (figura 27).

La comparación del primer perfil con el periodo anterior muestra que el cambio ha sido tan ínfimo que en la gráfica, los dos perfiles parecen coincidentes (figura 27a)).

En el perfil intermedio (figura 27b)) existe una pequeña variación hasta una profundidad aproximada de 8m. Esta variación da a entender que esta zona de la playa ha perdido un poco de sedimento. Esto último lo terminará de corroborar el estudio en planta de la línea de costa.

La zona cuyo perfil muestra mayor diferencia con el del periodo anterior es la de la Punta del Santo. Comprobamos que esta zona ha sido la más cambiante a lo largo del presente estudio por ser la zona más expuesta a las dos direcciones predominantes. En este caso (figura 27c)), el perfil muestra una pérdida de sedimento en la zona que se extiende a profundidades de 12m. Para complementar los datos de batimetría necesitamos, como siempre, estudiar en planta la evolución de la línea de costa.

4.2.3.3. Línea de costa



Figura 28: Líneas de costa de Marzo y Mayo, y área que encierran entre ellas.

En este periodo disponemos de tres datos de línea de costa: Marzo, Mayo y Junio. Los resultados de la línea de costa de Marzo se han comentado anteriormente. Los datos de Mayo recogen una línea de costa de longitud 2.314,54m. El área que encierran entre ellas da un valor de 6.024,09m² en concepto de ganancia de material (figura 28). Como se ha ido comprobando a lo largo del presente estudio, esta zona de Playa Granada ha ido perdiendo sedimento cuando se han presentado temporales de poniente (dirección de procedencia del oleaje O-SO), en cambio, al venir el oleaje de levante, la playa recupera sedimento. La dirección que se dedujo como predominante a partir del estudio histórico de datos de clima marítimo en esta zona fue la de O-SO, por tanto, la playa va a perder sedimento siempre a largo plazo. Ese sedimento que pierde se transporta y, la mayoría queda acumulado en

la zona de playa junto al Puerto de Motril. Esta zona, con el paso del tiempo va adentrándose en el mar debido a la acumulación de sedimento. Esto que se explica sirve para deducir que cuando el oleaje viene del E-SE, la playa vuelve a recuperar sedimento ya que se transporta el que hay acumulado en la zona de playa cercana al puerto de Motril.



Figura 29: Líneas de costa de Mayo y Junio, y área que encierran entre ellas.

La línea de costa obtenida en Junio tiene una longitud de 2.332,93m y el área obtenida con la fechada en Mayo resulta un valor de 2.727,27m² de pérdida de sedimento (figura 29). Entre Mayo y Junio, los máximos datos de altura de ola han llegado hasta 1,9m predominando la dirección O-SO de procedencia del oleaje. Con esto se explican las pérdidas que ha sufrido la zona de playa cercana a la desembocadura del Guadalfeo en cuanto a sedimento, ya que, como se ha citado antes, con oleaje de poniente la playa de ‘La Cagaílla’ tiende a perder material transportándolo a la zona de playa junto al Puerto de Motril.

4.2.3.4. Volumen

Al igual que para los demás periodos estudiados en este trabajo, el perfil tomado para realizar la cubicación y calcular el volumen de material es el registrado a la altura del hotel Robinson de Playa Granada (figura 27b)). Se ha fijado la profundidad de cierre en 13m.

La longitud de playa, medida desde la desembocadura del Guadalfeo, que utilizaremos para calcular el volumen de sedimento de diferencia entre Marzo y Junio, es la que venimos usando hasta ahora: 1.347,18m.

Entre los meses de Marzo y Mayo, dado el dato de superficie de diferencia, la costa avanza de media 4,47m hacia el mar ganando, por tanto, un volumen de 39.156,59m³ de sedimento.

Entre los meses de Mayo y Junio, sin embargo, la costa retrocede hacia el interior una media de 1,84m a lo largo de la longitud de costa antes determinada. El volumen de sedimento que pierde la playa entre Mayo y Junio es de 17.727,26m³.

Para finalizar, la suma de estos dos datos de volumen nos dará la diferencia de volumen que ha habido entre Marzo y Junio a lo largo de esos 1.484,60m de costa. Esta operación resulta: 21.429,30m³. Se deduce que la tormenta de levante que sufrió la playa a principios de Abril ha predominado finalmente en cuanto a transporte de sedimento.

Los datos obtenidos del cálculo del volumen están recogidos en la figura 30.

Si sumamos todos los datos obtenidos de volumen desde Octubre nos resulta un valor de 109.435,68m³ positivos, es decir, la playa ha ganado ese volumen desde Octubre teniendo en cuenta el aporte artificial de sedimento. Si le restamos el volumen que se aportó de forma artificial (106.676m³) resulta un volumen de 2.759,68m³ ganados por la playa de forma natural desde Octubre de 2014 hasta Junio de 2015.

VOLUMEN MARZO-MAYO	
LONGITUD DE COSTA	1.347,18m
DIFERENCIA DE ÁREAS	6.024,09 m ²
AVANCE/RETROCESO DE LA LINEA DE COSTA	4,47 m
PROFUNDIDAD DE CIERRE DEL PERFIL	13 m
LONGITUD EN HORIZONTAL DEL PERFIL	290 m
VOLUMEN UNITARIO EN EL PERFIL	29,07 m ²
VOLUMEN TOTAL GANADO/PERDIDO	39.156,59 m ³
VOLUMEN MAYO-JUNIO	
LONGITUD DE COSTA	1.347,18m
DIFERENCIA DE ÁREAS	-2.727,27 m ²
AVANCE/RETROCESO DE LA LINEA DE COSTA	-2,02 m
PROFUNDIDAD DE CIERRE DEL PERFIL	13 m
LONGITUD EN HORIZONTAL DEL PERFIL	290 m
VOLUMEN UNITARIO EN EL PERFIL	-13,16 m ²
VOLUMEN TOTAL GANADO/PERDIDO	-17.727,26 m ³

Figura 30: Tablas de los datos usados para calcular el volumen de sedimento; Arriba: tabla correspondiente al periodo Marzo-Mayo; Abajo: tabla correspondiente al periodo Mayo-Junio.

5. Conclusiones

Tras el manejo de los datos y obtención de sus correspondientes resultados se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

- Las direcciones predominantes de procedencia del oleaje en la zona de Playa Granada son E-SE y O-SO, siendo esta última la que presenta consigo, generalmente, las olas de mayor altura.
- El periodo de pico espectral suele tener un valor en torno a 9 segundos cuando la altura de ola significativa sobrepasa los 3,5m en la zona de estudio.
- La playa gana o pierde volumen de sedimento según si el oleaje procede del E-SE o del O-SO respectivamente.
- Los cambios generados por la bidireccionalidad del oleaje a lo largo de la costa afectan tanto a la línea de costa en planta como al perfil de playa y su correspondiente profundidad de cierre.
- La opción de realizar un trabajo de regeneración mediante un aporte artificial de material no es la mejor opción para abordar el problema de pérdida de volumen de sedimento en Playa Granada. Esto se deduce de las conclusiones anteriores atendiendo a que la dirección predominante con mayores alturas de ola a lo largo de la historia ha sido la de O-SO, por tanto, la playa siempre va a perder sedimento a largo plazo. Una opción, con la que se garantizaría una playa con más estabilidad, sería la de construir esta playa por detrás de la posición de equilibrio de la línea de costa. En este caso, se debería construir cogiendo como referencia la posición de la primera línea de costa estudiada y fechada en Octubre. Este hecho lleva consigo el replanteo del Dominio Público Marítimo Terrestre.

6. Referencias

Bergillos Meca, R. J., 2013. Caracterización de procesos hidrodinámicos y morfológicos en playas heterogéneas.

Bergillos Meca, R.J., 2014. Estudio de la evolución reciente del delta del Guadalfeo (Granada, España).

Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, Universidad de Granada.

Holland, K.T., Elmore, P.A., 2008. A review of heterogeneous sediments in coastal environments. *Earth-Science Reviews* 89, 116–134.

Mateo, Z.R.P., Siringan, F.P., 2007. Tectonic control of highfrequency holocene delta switching and fluvial migration in lingayen gulf bayhead, northwestern philippines. *Journal of Coastal Research* , 182–194.

Ortega-Sánchez, M., Bramato, S., Quevedo, E., Mans, C., Losada, M.A., 2008. Atmospheric-hydrodynamic coupling in the nearshore. *Geophysical Research Letters* 35.

Puertos del Estado.

Short, A.D., 1999. Handbook of beach and shoreface morphodynamics.

Williams, J.J., Buscombe, D., Masselink, G., Turner, I.L., Swinkels, C., 2012. Barrier dynamics experiment (BARDEX): Aims, design and procedures. *Coastal Engineering* 63, 3–12.

