Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

MÉTODOS PARA ESTIMAR EL RIESGO DE INUNDACIÓN A ESCALA REGIONAL EN EUROPA

TRABAJO FINAL DE GRADO

Trabajo realizado por:

Laura Sacristán Gato

Dirigido:

Sonia Castanedo Bárcena

Fernando Javier Méndez Incera

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Santander, Junio de 2014

ÍNDICE

1 Introducción 4

1.1 Motivación personal 4

1.1.1 Contexto 4

1.1.2 Problemática existente 5

1.2 Objetivos 6

1.3 Estructura del trabajo 6

2 Estado del arte 7

3 Material y métodos 8

3.1 Base de datos 8

3.2 Área de estudio 9

3.3 Metodología 12

3.3.1 Enfoque general del estudio 12

3.3.2 Análisis de datos 17

4 Resultados 21

5 Discusión 24

6 Conclusión 29

7 Agradecimientos 30

8 Bibliografía 31

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1: resultados del agrupamiento KMA: centroides del Escenario 1.....23

Tabla 2: resultados del agrupamiento KMA: centroides del Escenario 2.....24

Tabla 3: características de los grupos del Escenario 1.....25

Tabla 4: características de los grupos del Escenario 2.....28

Figura 1: zona de estudio peninsular para la dinámica marina.....10

Figura 2: zona de estudio del archipiélago para la dinámica marina.....10

Figura 3: zona de estudio peninsular para la dinámica marina junto a la exposición.....11

Figura 4: zona de estudio insular para la dinámica marina junto a la exposición.....11

Figura 5: triángulo de riesgo.....12

Figura 6: Esquema de la cota de inundación en un punto del litoral.....14

Figura 7: Componentes de la cota de inundación.....15

Figura 8: Esquema de las componentes del nivel medio del mar.....16

Figura 9: Funciones de densidad y de distribución de la GEV para distintos tipos de parámetros de forma.....19

Figura 10: Definición de valores máximos mediante MMA.....20

Figura 11: resultados del Escenario 1 - península.....22

Figura 12: resultados del Escenario 1 - Islas Canarias.....22

Figura 13: resultados del Escenario 2 – península.....23

Figura 14: resultados del Escenario 2 – Islas Canarias.....24

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN PERSONAL

1.1.1 Contexto

La costa española posee condiciones físicas, biológicas y socioeconómicas valiosas y excepcionales lo que ha generado una continua migración de habitantes, servicios e industrias a las zonas del litoral. La causa actual de dicha migración puede resumirse en turismo de ocio y disfrute del litoral, aunque hasta ahora los motivos eran el comercio, la actividad portuaria o los asentamientos agrícolas en las zonas fértiles de los deltas y las llanuras aluviales.

Esto conlleva a una creciente presión antrópica debido al interés económico, desarrollo y crecimiento de la población en las zonas costeras. De acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), casi el 50% de la población mundial vive en la costa, sólo en Europa más de 70.000.000 de habitantes residen en municipios del litoral y concretamente en nuestro país, el Ministerio de Medio Ambiente declara que el 44% de españoles viven en la costa ocupando el 7% del territorio nacional. A esta migración de españoles hacia el litoral, se suma que el 80% de los casi 60.000.000 de turistas que visitan nuestro país cada año se concentra en nuestras costas para sus vacaciones.

Este aumento de habitantes, bienes y servicios cerca del mar están viéndose muy amenazados por la dinámica marina que genera un creciente número de inundaciones costeras que, así mismo, conllevan grandes pérdidas económicas. El coste económico de las acciones de protección ante la inundación y la erosión del litoral en Europa fue en 2001 de 3.200 millones de € y de 5.400 millones de € los costes inducidos en las actividades humanas debido a las inundaciones y la erosión.

Los temporales que azotaron el país a comienzos de año 2014, causaron daños materiales importantes. Estos daños fueron debidos principalmente, en toda la cornisa cantábrica y el litoral atlántico gallego, a la ocurrencia simultánea de tres factores: un fuerte oleaje, pleamares de coeficientes altos y la capacidad de defensa que habían perdido nuestras playas, que ya estaban muy erosionadas. Este último detalle, aun pudiendo pasar desapercibido, ha originado que, no siendo los temporales más graves que sufren estas zonas, sí hayan sido los que han causado más daños, ya que las playas son el principal mecanismo de defensa de la costa disipando el oleaje y protegiendo de las inundaciones.

En Marzo del 2014, el catedrático Íñigo Losada ha participado como autor en el último informe del IPCC de las Naciones Unidas, coordinando el capítulo sobre impactos y adaptación al cambio climático en zonas costeras. En el informe se encuentran muchas evidencias científicas sobre los riesgos derivados del aumento del nivel del mar, que se relaciona en muchas costas con inundaciones permanentes y más eventos de inundación por fenómenos extremos. Este aumento del nivel del mar se prevé que sea mayor en la costa atlántica que en la mediterránea, aunque en ambas se ha puesto de manifiesto la necesidad de reducir la exposición y la vulnerabilidad en las costas, construyendo obras de ingeniería pero también regenerando las playas, conservando y restaurando ecosistemas de protección como humedales, marismas, praderas de posidonia oceánica, dunas… así como introduciendo aspectos legales y financieros.

1.1.2 Problemática existente

En la literatura encontrada se han hallado diversos estudios sobre cotas de inundación costera y creación de mapas de peligrosidad en distintas zonas del mundo, sin embargo, no se han encontrado análisis individuales sobre las variables de la dinámica costera que intervienen en la cota final de inundación.

Observar la importancia relativa de cada factor es importante, puesto que nos diferencia las zonas del litoral según su forma más común y probable de inundación, de manera que es posible estudiar el riesgo de inundación dependiendo de los agentes que la generan.

La comisión europea del Joint Research Centre (JRC), en Junio del 2013, encargó al Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, el proyecto *"Evaluación del impacto climático sobre los sistemas costeros de Europa"* con el que se pretende:

- Estimar los impactos presentes y futuros en Europa a escala regional basándose en la información climática y socioeconómica existente.
- Desarrollar una metodología para llevar a cabo un estudio muy preciso de los impactos del clima en las áreas costeras de Europa teniendo en cuenta el calentamiento global.
- Evaluar y validar la metodología para un número de segmentos a lo largo de la costa europea.
- Extrapolar de manera fiable los impactos en las áreas costeras de referencia aplicando la metodología propuesta a toda Europa.
- Dotar de herramientas al JRC para estimar los impactos en las zonas costeras, en particular, la erosión del litoral, las inundaciones costeras y el impacto en las estructuras creadas por el hombre.

El presente trabajo se incluye en las primeras fases de este proyecto, con el fin de establecer una metodología para clasificar las costas españolas en función de los parámetros de la dinámica del oleaje o la exposición, que definen la forma de inundación en las distintas zonas analizadas. Esta metodología puede extrapolarse a cualquier punto de la costa europea siempre que se disponga de los datos necesarios.

1.2 OBJETIVOS

En este trabajo, los principales objetivos que se quieren alcanzar son:

- Clasificar el litoral español en función de la forma de inundación, según las variables de la dinámica costera que tienen mayor importancia en la cota de inundación.
- Determinar si la clasificación costera se ve influenciada al introducir datos de exposición.
- Establecer una metodología que pueda extrapolarse al estudio del riesgo de inundación en otras partes de Europa, como parte de la *"Evaluación del impacto climático sobre los sistemas costeros de Europa".*

1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Este trabajo se divide en las siguientes partes:

- Apartado 1: Introducción, donde se plantean los objetivos del trabajo y su organización.
- Apartado 2: Análisis de información sobre trabajos anteriores que tratan el objeto de estudio.
- Apartado 3: Metodología para analizar las dinámicas actuantes en la costa española.
- Apartado 4: Resultados obtenidos al realizar el estudio.
- Apartado 5: Descripción de los resultados, para su mejor comprensión.
- Apartado 6: Conclusiones generales tras analizar los resultados y previsión del trabajo futuro.
- Apartado 7: Agradecimientos.
- Apartado 8: Bibliografía de la teoría del estudio.

2 ESTADO DEL ARTE

Los trabajos encontrados más recientes y completos sobre el tema a tratar son el "Atlas de inundación del litoral peninsular español" desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C.) de la Universidad de Cantabria, por el que recibió el Premio Nacional de Medio Ambiente en 1999. En ese documento, se reúnen un conjunto de textos y modelos numéricos, denominados *Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral*, que han sido desarrollados con el objetivo de:

- Evaluar con precisión la dinámica de los sistemas costeros.
- Diseñar con fiabilidad las estrategias de actuación necesarias.
- Estableces una metodología para el diseño, ejecución y seguimiento de las actuaciones a realizar en la costa.
- Recopilar la experiencia española en el campo de la Ingeniería Litoral.

Otro trabajo más actual encontrado relacionado con el tema, es el documento *"Cambio Climático en la Costa Española"* creado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria y que analiza el impacto en las zonas costeras debido al cambio climático y entre otros muchos factores, la inundación y retroceso de la costa española. A partir de este trabajo, se ha creado un programa informático de acceso público, C3E, en el que se pueden visualizar las variables para analizar el riesgo de inundación tanto en la actualidad como en escenarios futuros. Nos da información de variables de dinámicas marinas, de exposición y de vulnerabilidad en numerosos puntos a lo largo del litoral español.

El Ministerio de Medio Ambiente español, comenzó en Diciembre de 2013 a generar mapas de peligrosidad y riesgos de inundación para tener finalizados en Diciembre del 2015 los planes de gestión del riesgo de inundación.

En el ámbito europeo, el JRC está comenzando un proyecto denominado *"Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union base don bottom-up Analysis"* (PESETA II) en el que se realiza un estudio multisectorial de la evaluación del impacto del cambio climático en Europa para el periodo de tiempo 2071-2100. Este proyecto está en su mayoría basado en el conocimiento y experiencia derivados del anterior proyecto PESETA concluido en 2009. El proyecto PESETA describe en detalle la metodología general del proyecto y los métodos y resultados particulares para cada categoría del impacto del cambio climático, tanto como la integración económica de esos impactos.

3 MATERIAL Y MÉTODOS

En este capítulo se van a seguir todos los cálculos llevados a cabo a lo largo del estudio, la metodología general en la que se ha enfocado el trabajo y los métodos analíticos empleados para hallar los resultados finales. Para una mejor comprensión de las operaciones realizadas, se presentará primero la base de datos utilizada, es decir, las variables empleadas y su procedencia.

3.1 BASE DE DATOS

Los principales valores de los datos usados en el trabajo se han sacado de los utilizados en el proyecto de *"Cambio climático en la costa española"* desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria y la posterior aplicación informática, el visor C3E.

Las variables de estudio son:

- **Cota de inundación (CI)**: cota que alcanza el nivel del mar debido a la acción conjunta de la marea astronómica, la marea meteorológica y el run-up generado por las olas.
- **Altura de ola significante (H_s)**: parámetro estadístico definido a partir de un registro de oleaje, es la altura de ola media del tercio de las mayores olas del registro.
- **Run-up**: sobreelevación absoluta, medida desde el nivel medio del mar en reposo hasta el punto máximo que alcanza el mar al romper ola tras ola.
- **Marea meteorológica (MM)**: oscilación del nivel del mar debida a la acción conjunta de la presión atmosférica y el arrastre del viento, y su período puede ser desde varios minutos a días. Las bajas presiones asociadas a las borrascas generan un ascenso del nivel del mar asociado a la depresión barométrica de las mismas. Las grandes borrascas extra-tropicales que afectan el litoral español generan normalmente, sobreelevaciones del orden de 30-40 centímetros y pueden llegar al metro.

- **Marea astronómica (MA)**: ondas de gran amplitud que producen oscilaciones del nivel del mar y son conocidas vulgarmente como "mareas". La magnitud de la misma es muy variable a lo largo de la costa española, con un máximo de carrera de marea en Santander, donde se superan los 5 metros, y un mínimo en Gerona, donde apenas se alcanzan los 40 centímetros en las mareas vivas.
- **Nivel medio del mar (NMM)**: elevación del mar sobre el nivel de referencia. En España, se toma como referencia: Alicante.
- **Nivel medio del mar mensual (NMMM)**: media aritmética de los valores del nivel del mar durante un mes.
- **Anomalías del nivel medio del mar mensual (ANMMM)**: diferencia entre los valores del mar diarios y el valor del nivel medio del mar mensual correspondiente.

3.2 ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se ha llevado a cabo a lo largo del litoral español, en la vertiente atlántica, mediterránea y el archipiélago de las Islas Canarias, cubriendo aproximadamente 7.876 km de costa. La costa española presenta una gran diversidad de playas, acantilados y rías y está bañada por el Océano Atlántico, y los mares Cantábrico y Mediterráneo, que generan las distintas dinámicas marinas que se pueden observar.

Para el análisis de las variables que intervienen en la cota de inundación debida a la dinámica marina, se han utilizado 423 puntos repartidos por las tres zonas del estudio; 102 puntos en la vertiente atlántica, 211 en la vertiente mediterránea y 110 en las Islas Canarias, como se muestra en las figuras 1 y 2.

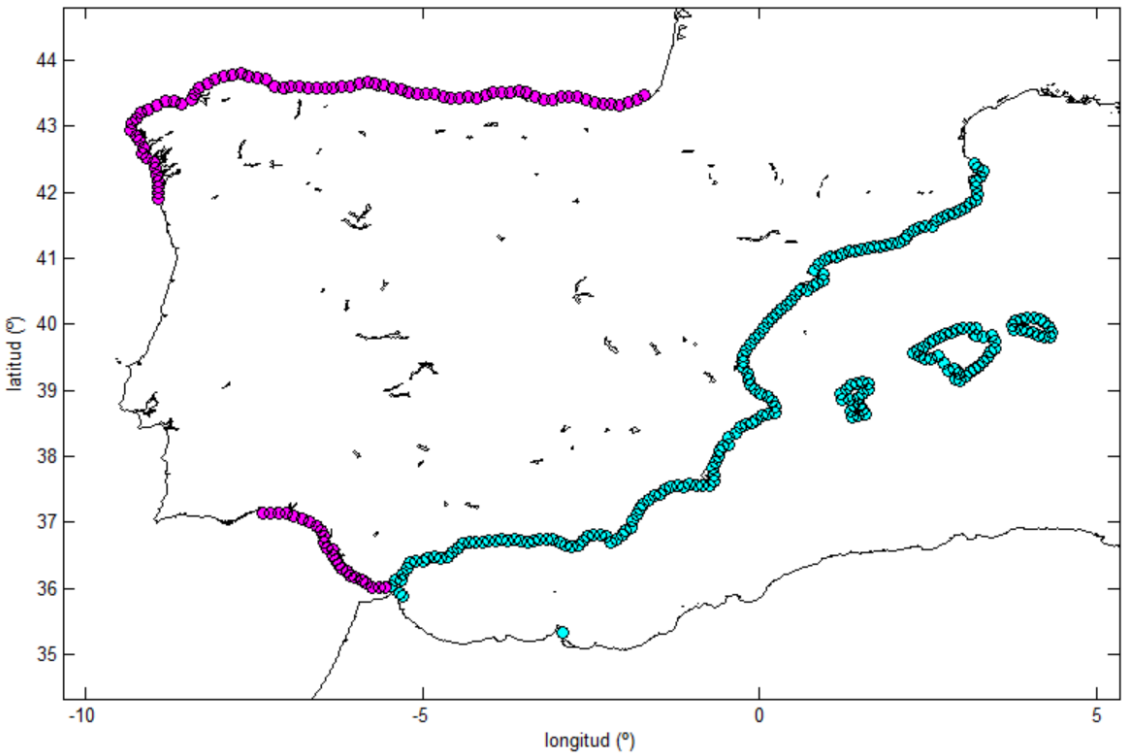

Figura 1: zona de estudio peninsular para la dinámica marina.

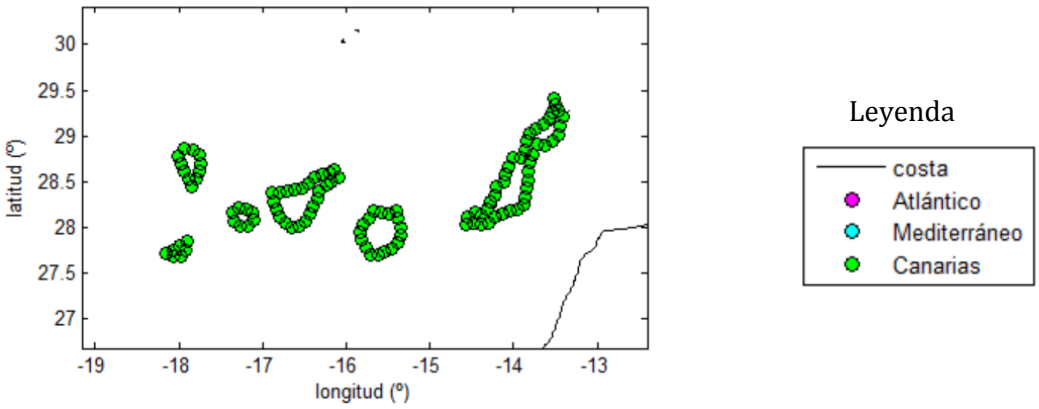

Figura 2: zona de estudio del archipiélago para la dinámica marina.

Para el análisis de la cota de inundación teniendo en cuenta la exposición, se ha utilizado información de 220 puntos repartidos por las tres áreas del estudio; 37 puntos en la vertiente atlántica, 58 puntos en la vertiente mediterránea y 125 en el archipiélago de las Islas Canarias, como se puede ver en las figuras 3 y 4.

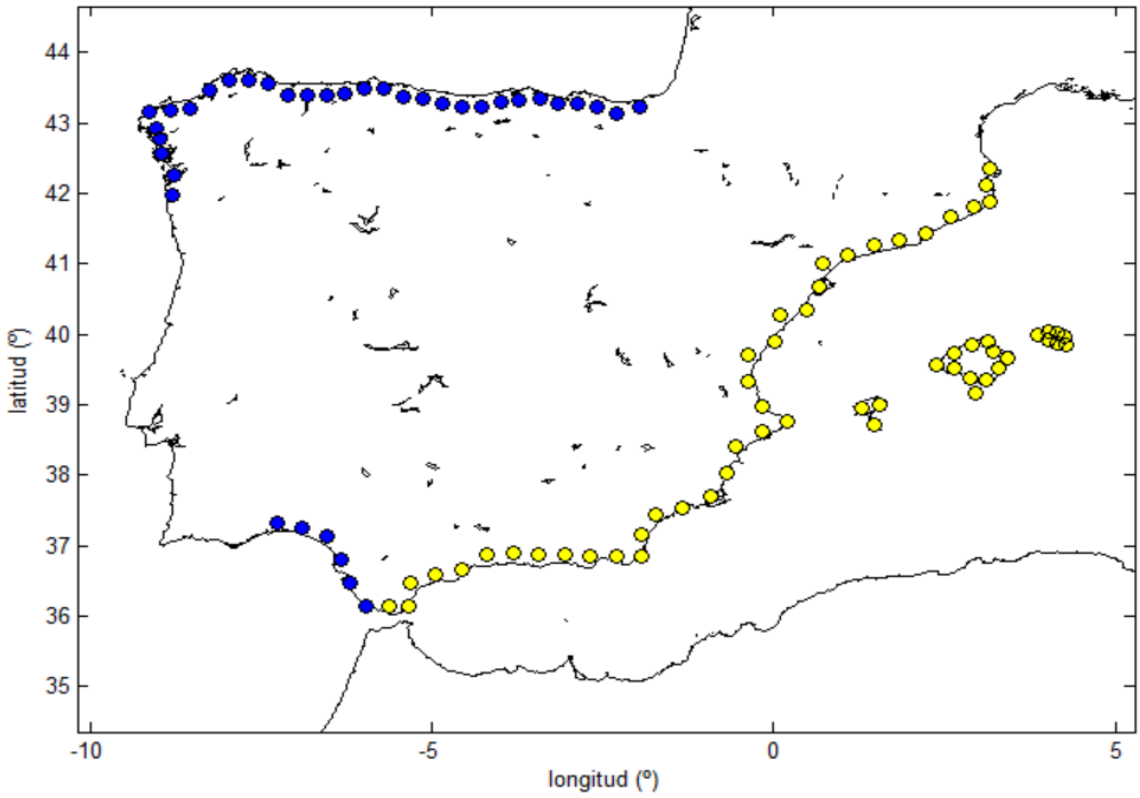

Figura 3: zona de estudio peninsular para la dinámica marina junto a la exposición.

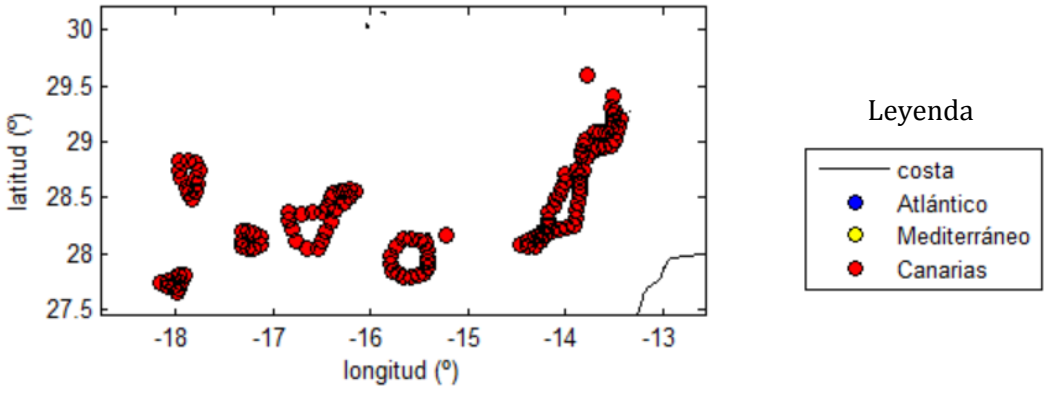

Figura 4: zona de estudio insular para la dinámica marina junto a la exposición.

3.3 METODOLOGÍA

Este trabajo tiene un enfoque general muy diferenciado del proceso matemático y estadístico seguido para conseguir los resultados que se pretenden, por eso en este apartado se ha diferenciado entre la perspectiva del trabajo y la metodología seguida en sí.

3.3.1 Enfoque general del estudio

El concepto de riesgo responde a diferentes definiciones y existen varios métodos para su estimación. La definición utilizada para este estudio es la planteada por la Comisión Europea, y se refiere a la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas como resultado de una amenaza o peligro sobre una zona expuesta a la misma durante un tiempo determinado. El riesgo (R) es por tanto, función de la probabilidad de ocurrencia de la amenaza (H), de la exposición de la zona o elementos objeto de estudio (E) y de la vulnerabilidad (V) de los mismos.

Figura 5: triángulo de riesgo.

Los términos que intervienen en el análisis del riesgo se entienden como:

- **Peligrosidad**: característica de un evento o fenómeno físico potencialmente dañino que puede ocasionar pérdidas de vida o lesiones personales, en propiedades trastornos sociales y económicos o degradación ambiental. Dentro de la peligrosidad intervienen las dinámicas y las amenazas.

  Las dinámicas, son variables y procesos físicos capaces de generar una amenaza, mientras que la amenaza es en sí el evento físico potencialmente dañino objeto de estudio, generado por las dinámicas y que se caracteriza por su localización, intensidad, frecuencia, probabilidad de ocurrencia y duración.
- **Exposición**: elementos en riesgo, inventario de aquellas personas o elementos expuestos a un peligro en una zona y periodo de tiempo determinados.

- **Vulnerabilidad**: condiciones y características de los elementos afectados por los impactos que pueden implicar una mayor o menos afección al sistema. La vulnerabilidad está determinada por factores y procesos físicos, ambientales, sociales, económicos y administrativos. Para determinar la vulnerabilidad del objeto de estudio, se analizaran la sensibilidad y la resiliencia.

  La sensibilidad se considera a la predisposición de ser afectado por cambios físicos o socioeconómicos, incluidos los daños y las pérdidas y es una cualidad intrínseca al elemento expuesto. Sin embargo, la resiliencia es la capacidad de un sistema para absorber perturbaciones y reorganizarse mientras experimenta un cambio con el fin de conservar la misma función, estructura, identidad y feedback. Esta última es una composición de la capacidad de respuesta y la capacidad de recuperación del sistema ante la perturbación.

En este análisis, sólo evaluaremos la peligrosidad y la exposición que intervienen en el riesgo de inundación en la costa. La amenaza analizada es el riesgo de inundación para distintos escenarios, el primero teniendo en cuenta la dinámica costera y el segundo teniendo en cuenta el efecto de la inundación si además consideramos la exposición.

Los métodos existentes para estimar la distribución de la cota de inundación en una determinada localización, usando datos de campo pueden dividirse en métodos directos e indirectos. Los métodos directos analizan los extremos de los niveles de agua observados y los indirectos, los niveles donde los factores de marea astronómica, marea meteorológica y oleaje se analizan por separado y el nivel extremo se deduce a partir de ellos.

Dentro de los métodos indirectos, a su vez, puede distinguirse entre métodos indirectos teóricos, en los que los factores son combinados de manera teórica a través de sus funciones de distribución, y métodos indirectos de simulación. Puesto que la disponibilidad de datos medidos tan sólo abarca un número limitado de ubicaciones, son los métodos indirectos los únicos viables para estimar la cota de inundación a lo largo del litoral español.

El fenómeno de inundación en una playa puede representarse en un instante determinado, en el que la playa está caracterizada por un nivel de marea compuesto por la marea astronómica y la meteorológica y una batimetría. Sobre este nivel de marea, se encuentra el oleaje que, en función de sus características y la batimetría de la playa, se propaga hacia la costa.

Al alcanzar la costa, el oleaje rompe en la playa, produciéndose un movimiento de ascenso de la masa de agua a lo largo del perfil de playa, lo que se conoce como run-up. Para calcular el run-up en este trabajo se utilizará una aproximación muy común con la siguiente relación: $Run\ up = 0{,}3 \cdot H_s$

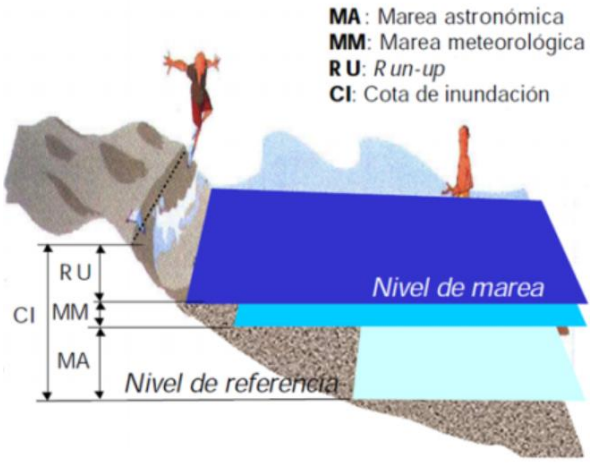

Figura 6: Esquema de la cota de inundación en un punto del litoral.

El primer paso para el desarrollo de la metodología propuesta es recabar información sobre cada uno de los elementos que componen el riesgo que queremos evaluar teniendo en cuenta estos aspectos:

- Para analizar el riesgo de inundación en la costa, el agente que se va a evaluar es la cota de inundación, que a su vez depende de otras variables como son el nivel del mar y el oleaje, por eso es necesario tener información de cada una de las variables para conseguir la mayor precisión posible.

La cota de inundación es el resultado del sumatorio de diversas variables:

$$CI = 0{,}3 \cdot H_s + MM + MA + NMM + ANMMM + NR$$

- H_s: Altura de ola
- MM: Marea meteorológica
- MA: Marea astronómica
- NMMM: Nivel medio del mar mensual
- ANMMM: Anomalía del nivel medio del mar mensual
- NR: Nivel de referencia (Alicante)

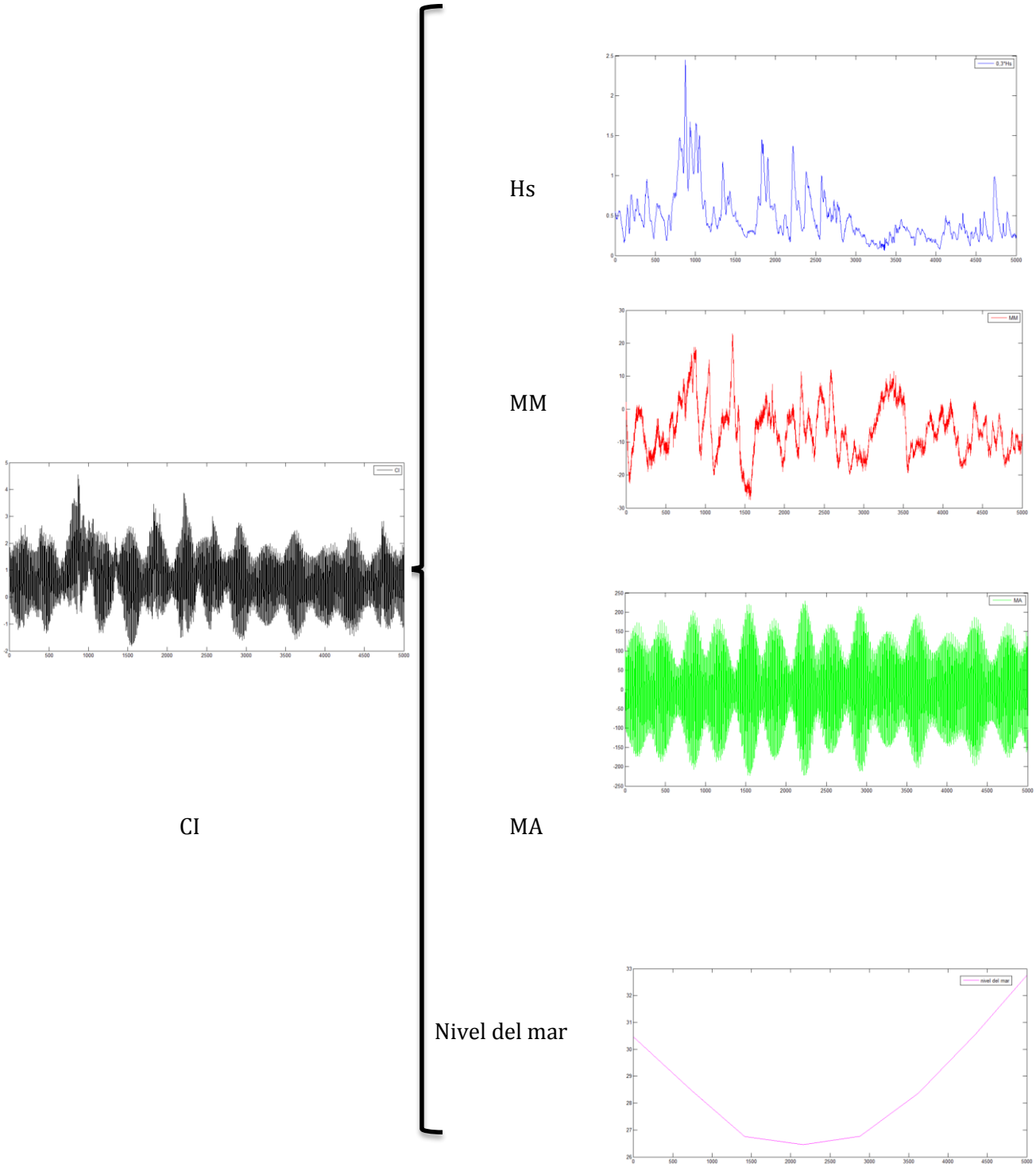

Figura 7: componentes de la cota de inundación.

El nivel del mar es el resultado de 2 componentes:

- NR: el nivel de referencia en Alicante en un punto del litoral
- NMM: nivel medio del mar

Este último también es composición de 2 variables:

- NMMM: el nivel medio de las alturas del mar durante un mes
- ANMMM: la diferencia entre el valor del mar en un día y la media del mes

NMM con tendencia ascendente

SLR (Sea Level Rise)

tendencia

NMMM

ANMM

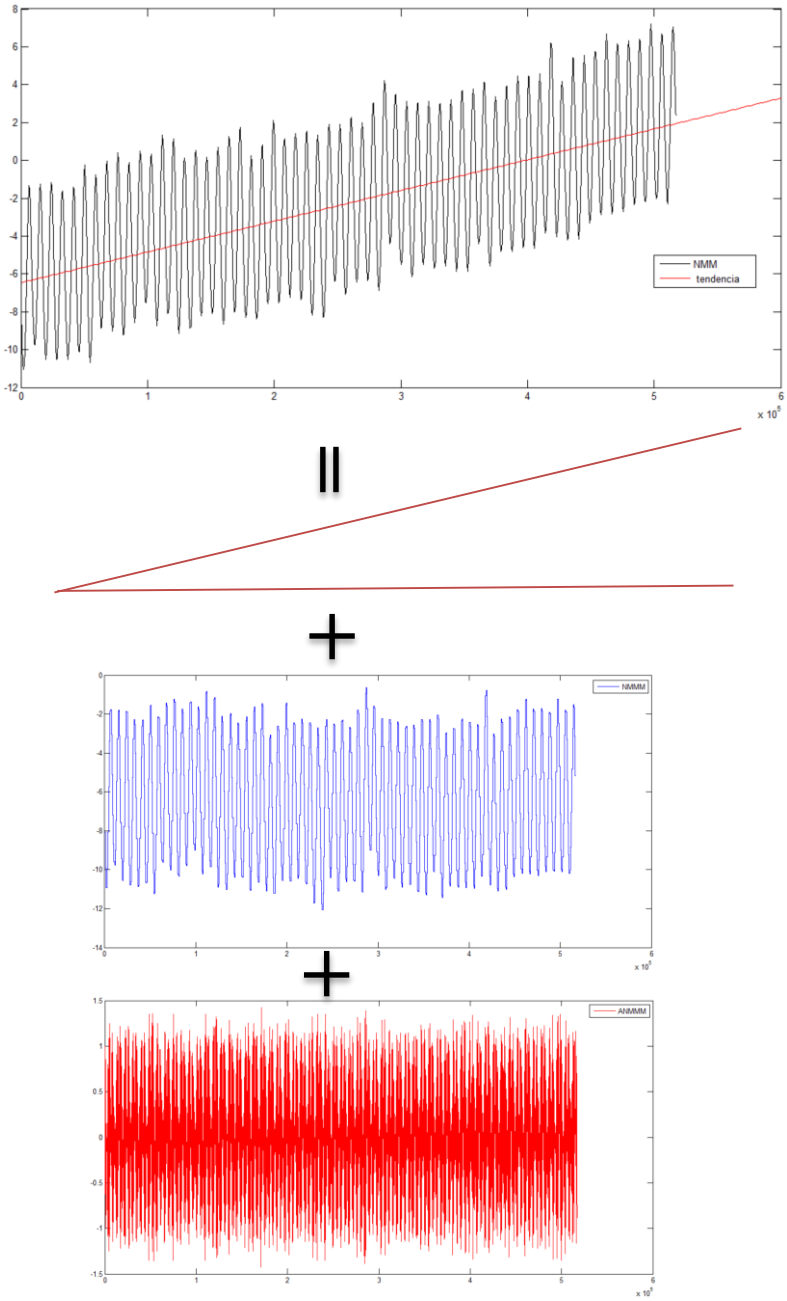

Figura 8: Esquema de las componentes del nivel medio del mar.

3.3.2 Análisis de datos

Con la base de datos aportada, para calcular la cota de inundación debemos obtener cada una de las variables que vamos a analizar por separado y en la misma secuencia temporal, en este caso del 1 de Enero de 1950 al 31 de Diciembre del 2008, 59 años.

Estas variables son: la altura de ola (H_s), la marea meteorológica (MM), la marea astronómica (MA), el nivel medio del mar mensual (NMMM), las anomalías del nivel medio del mar mensual (ANMMM) y el nivel de referencia en Alicante (NR).

A partir de los datos del nivel del mar, y ajustando la tendencia de los datos, se puede obtener NMMM, haciendo una media entre los valores de cada mes, y ANMMM, sustrayendo a cada nivel diario del mar, la media del nivel del mar del mes que le corresponde, para hacerse notar cualquier valor muy alejado de la media.

Una vez calculadas las cotas de inundación de todos los puntos y de las 517200 horas de la serie temporal analizada, se procederá a elegir las cotas máximas de inundación anuales de cada punto para realizar un análisis de extremos sobre estos valores, pero primero se obtendrá una media de los valores de las 5 variables de la dinámica costera correspondientes a estas cotas máximas del punto analizado, que serán representativos del mismo , $\alpha(H_s), \beta(MM), \gamma(MA), \delta(NMMM), \varepsilon(ANMMM)$.

3.3.2.1 GEV (Generalized Extreme Value)

El teorema de Fisher-Tippett demuestra que si F ∈ MDA (G) entonces G pertenece a alguna de las familias de distribuciones que engloba la Función Generalizada de Extremos, GEV.

La función de distribución de la GEV puede escribirse mediante:

$$G(x)=\begin{cases}\exp\left\{-\left[1+\xi\left(\dfrac{x-\mu}{\psi}\right)\right]_{+}^{-1/\xi}\right\} & \xi\neq 0\\ \exp\left\{-\exp\left[-\left(\dfrac{x-\mu}{\psi}\right)\right]\right\} & \xi=0\end{cases}$$

La función de densidad se define mediante:

$$g(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{\psi}\left[1+\xi\left(\dfrac{x-\mu}{\psi}\right)\right]_+^{-(1+1/\xi)}\exp\left\{-\left[1+\xi\left(\dfrac{x-\mu}{\psi}\right)\right]_+^{-1/\xi}\right\} & \text{si } \xi\neq 0\\ \dfrac{1}{\psi}\exp\left(-\dfrac{x-\mu}{\psi}\right)\cdot\exp\left[-\exp\left(-\dfrac{x-\mu}{\psi}\right)\right] & \text{si } \xi=0\end{cases}$$

donde $[a]+$ implica el max(a,0), $-\infty<\mu<\infty$ es el parámetro de localización, $\psi>0$ es el parámetro de escala y ξ es el parámetro de forma.

- El parámetro de localización representa los valores medios de la variable aleatoria *x* y especifica la posición de la probabilidad de no excedencia exp(-1).
- El parámetro de escala controla la dispersión de la unidad de medida dentro del rango de la distribución de forma que cambiando el mismo se logra contraer o expandir la distribución a lo largo del eje horizontal.
- El parámetro de forma condiciona un tipo diferente de distribución, la expresión para $\xi\neq 0$ engloba dos familias de distribución: Fréchet para el caso de $\xi>0$ y Weibull para el caso de $\xi<0$, mientras que el caso para $\xi=0$ se obtiene a partir del límite de la ecuación definida para Fréchet/Weibull cuando $\xi\to 0$, definiendo la familia de distribuciones tipo Gumbel.

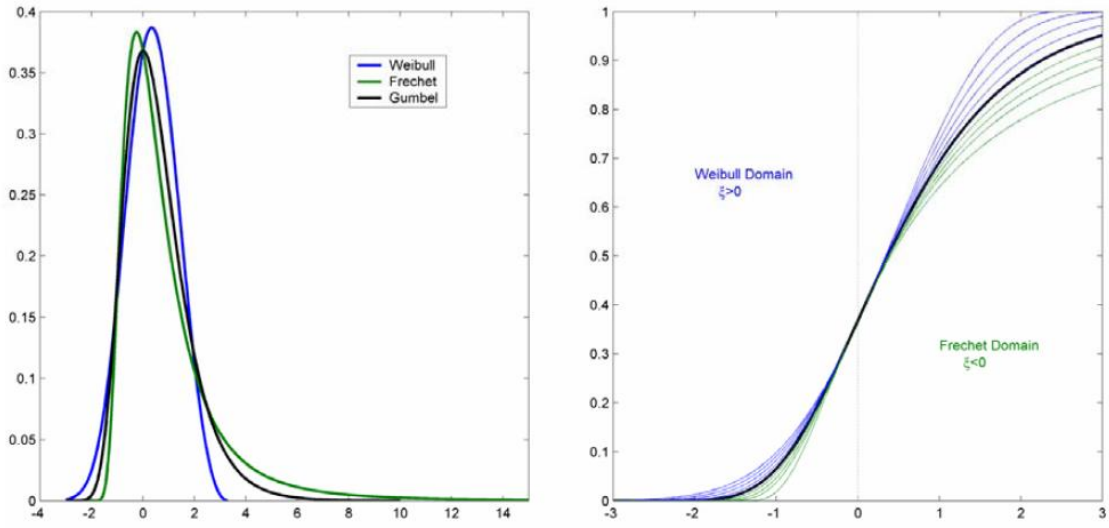

Figura 9: Funciones de densidad y de distribución de la GEV para distintos tipos de parámetros de forma.

Los tres tipos de familias que se presentan en el teorema de Fisher-Tippett tienen distinto comportamiento de la cola de la función de distribución. Comúnmente se denominan *colas acotadas* para el caso de Weibull, *colas ligeras* para el caso de Gumbel y *colas pesadas* si es Fréchet. Una característica en aplicaciones con variables geofísicas es que el tipo Weibull de colas limitadas suele darse cuando las condiciones de contorno explican un valor máximo lógico (por límites físicos, por ejemplo).

La generalización de los tres tipos en la función de distribución escrita anteriormente hace que en aplicaciones reales el comportamiento de los valores extremos pueda adaptarse a un rango mayor.

El desarrollo planteado está pensado para trabajar con datos estructurados en bloques de secuencias de observaciones de longitud N: $M\ n = \max\{X1,...,Xn\}$, de forma que los valores extremos que se utilizarán para ajustar a la GEV será una serie de máximos de bloque tal que $\{Mn,1,...,Mn,m\}$. El caso más común es definir los bloques de forma que se correspondan con un periodo de tiempo. El bloque de tiempo más usual para variables geofísicas es el máximo anual (figura 10), en el que n será el número de observaciones en un año y m el número total de años de que se dispone (método de máximo anual, MMA).

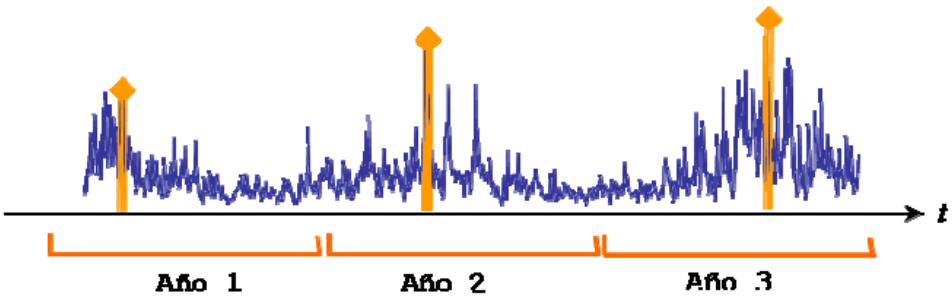

Figura 10: Definición de valores máximos mediante MMA.

Tras este análisis se obtuvieron los tres parámetros característicos, μ (localización), ψ (escala), ξ (forma) para el conjunto de cotas de inundación máximas anuales de cada punto analizado, por lo que cada uno está representado por 8 parámetros únicos.

3.3.2.2 Agrupamiento: algoritmo k-medias (KMA)

La técnica de agrupamiento de KMA divide el espacio de datos en un número de grupos, cada uno definido por un centroide y formado por los datos cercanos a ese centroide. Dada una base de datos de vectores con n dimensiones $X=(x_1, x_2,\ldots,x_n)$, donde N es el número total de datos y n es la dimensión de cada vector, KMA se aplica para obtener M grupos definidos por un prototipo o centroide $v_k=(v_{1k},\ldots,v_{nk})$ de la misma dimensión de los datos originales, siendo k=1,…M. El procedimiento de esta clasificación empieza con una inicialización aleatoria de los centroides $(v_1,v_2,\ldots,v_M)$. En cada iteración r, los datos cercanos a cada centroide son identificados y el centroide se redefine como la media de los datos correspondientes.

En este trabajo los vectores analizados son de 8 o 12 dimensiones dependiendo del escenario analizado; los parámetros de la dinámica marina de cada punto de la costa coinciden con los valores medios de $\alpha(H_s), \beta(MM), \gamma(MA), \delta(NMMM), \varepsilon(ANMMM)$, los parámetros de la distribución de extremos coinciden con μ (localización), ψ (escala), ξ (forma) y los datos de exposición utilizados son el % de playas, % de acantilados, % de estructuras de protección y % de ecotopos de transición.

Todos los valores antes de realizarse la clasificación deben normalizarse de tal forma que a cada parámetro se le asigna la misma importancia para la distribución.

La normalización se lleva a cabo según la siguiente fórmula: $x_i = \frac{x-x_{min}}{x_{max}-x_{min}}$

Los análisis se han realizado usando MATLAB (versión R2011a), los datos se han distribuido en 10 grupos, cuyos centroides que definen las características de cada grupo se han desnormalizado al acabar la clasificación.

4 RESULTADOS

El primer escenario analiza 423 puntos, y sólo analiza los parámetros que influyen en la cota de inundación y su distribución, es decir, clasifica los grupos en función de 8 variables.

La clasificación del Escenario 1 es la que se muestra en las figuras 11 y 12:

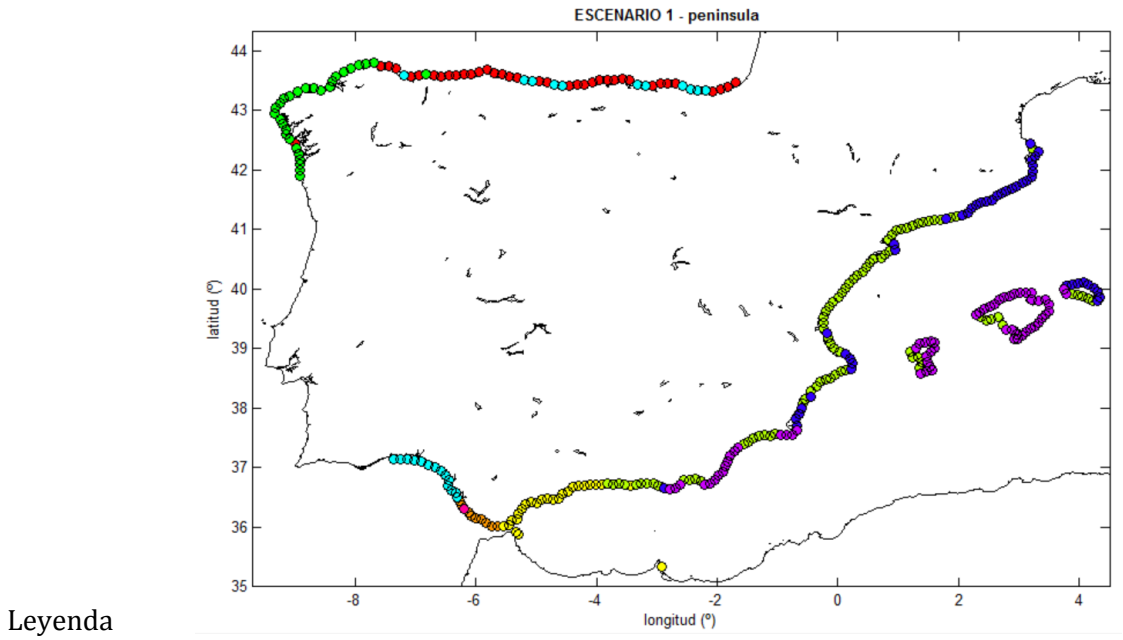

Figura 11: resultados del Escenario 1 - península

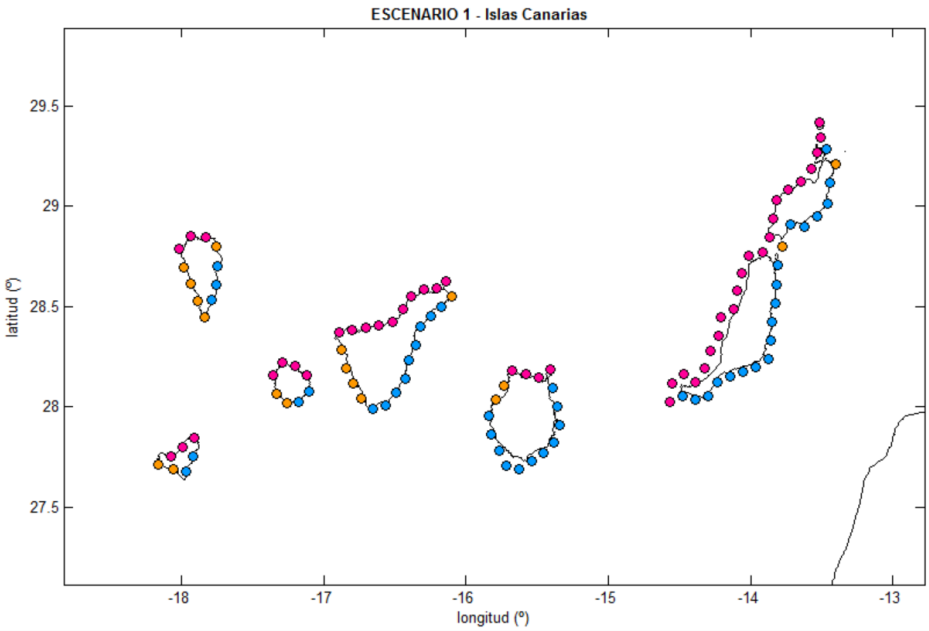

Figura 12: resultados del Escenario 1 – Islas Canarias

CLASIFICACIÓN ESCENARIO 1 – centroides KMA										
Grupos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
$\alpha(H_s)$	0,3783	0,4527	0,7163	0,8125	0,4921	0,2975	0,2019	0,8974	0,9247	0,5343
$\beta(MM)$	0,0746	0,1244	0,3575	0,6212	0,1101	0,1569	0,0530	0,3481	0,2636	0,0296
$\gamma(MA)$	0,5665	0,4988	0,1892	0,0444	0,4173	0,6134	0,7905	0,0176	0,0346	0,4375
$\delta(NMMM)$	0,0395	0,4550	0,6525	0,6322	0,0398	0,1420	0,3934	0,4568	0,6555	0,3150
$\varepsilon(ANMMM)$	0,0237	0,1491	0,1987	0,6248	0,0081	0,0656	0,1563	0,4733	0,5590	0,0983
μ (localización)	0,8486	0,4002	0,1986	0,1103	0,9235	0,6684	0,3334	0,2205	0,1333	0,5351
ψ (escala)	0,5009	0,3370	0,2569	0,3340	0,7414	0,3440	0,0686	0,5089	0,3035	0,4486
ξ (forma)	0,5232	0,3264	0,5848	0,4228	0,2606	0,6379	0,5256	0,4410	0,6338	0,5425

Tabla 1: resultados del agrupamiento KMA: centroides del Escenario 1

El segundo escenario analizado, consta de 220 puntos con parámetros de dinámica marina, de distribución de extremos y de posición, es decir 12 variables.

La clasificación del Escenario 2 es la siguiente:

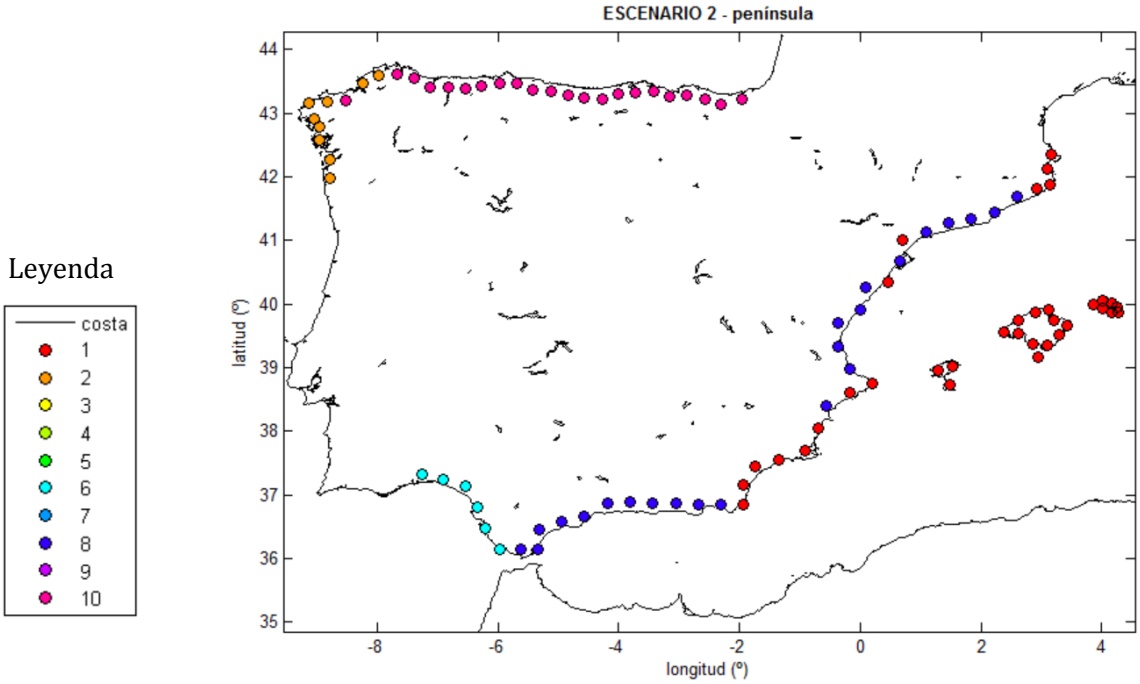

Figura 13: resultados del Escenario 2 – península

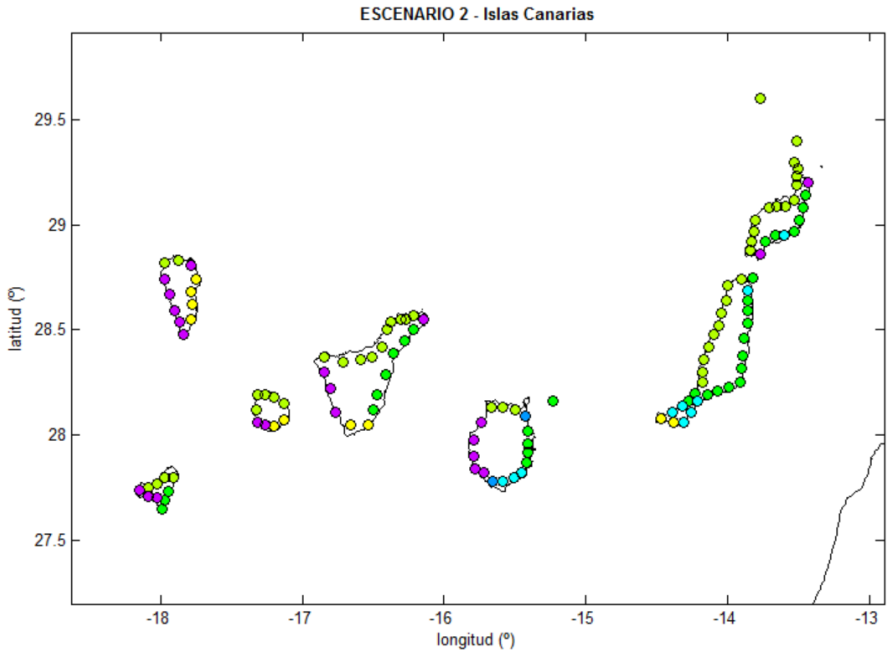

Figura 14: resultados del Escenario 2 – Islas Canarias.

CLASIFICACIÓN ESCENARIO 2 – centroides KMA										
Grupos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
$\alpha(H_s)$	0,8999	0,4884	0,2857	0,5346	0,1620	0,2328	0,2629	0,7676	0,4208	0,3627
$\beta(MM)$	0,3513	0,1270	0,0840	0,0278	0,0424	0,1136	0,0485	0,5549	0,0528	0,0696
$\gamma(MA)$	0,0327	0,4171	0,7029	0,4378	0,8376	0,7190	0,7238	0,0954	0,5566	0,5618
$\delta(NMMM)$	0,6252	0,0466	0,4485	0,3162	0,3575	0,3076	0,4018	0,5894	0,4965	0,0494
$\varepsilon(ANMMM)$	0,5592	0,0071	0,1935	0,0937	0,1367	0,1163	0,1784	0,4810	0,1470	0,0268
μ (localización)	0,1518	0,9142	0,3109	0,5421	0,3417	0,4244	0,3486	0,1485	0,3973	0,8234
ψ (escala)	0,3703	0,7189	0,1066	0,4582	0,0394	0,1971	0,0840	0,3340	0,3215	0,4529
ξ (forma)	0,5492	0,3037	0,8805	0,5406	0,4083	0,5460	0,6047	0,4363	0,3136	0,5453
% playas	0,7441	0,9544	0,0404	0,0581	0,0446	0,2364	0,0179	0,6848	0,0388	0,9832
% acantilados	0,1135	0,1195	0,1045	0,0776	0,0855	0,7732	0,1468	0,6783	0,0397	0,1020
% estructuras protección	0,1767	0,4357	0,0354	0,0247	0,0234	0,0748	0,0205	0,1619	0,0296	0,1463
% ecotopos transición	0,0112	0,0292	0,0368	0,0053	0,0223	0,0070	0,8592	0,0616	0,0000	0,0244

Tabla 2: resultados del agrupamiento KMA: centroides del Escenario 2

5 DISCUSIÓN

Las características que definen los grupos de la clasificación sobre el Escenario 1 se encuentran en la siguiente tabla:

CLASIFICACIÓN ESCENARIO 1 – características										
Grupos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
$\alpha(H_s)$	0,5901	0,5321	0,8485	0,4187	0,9432	0,2690	0,3869	0,9427	0,8890	0,4779
$\beta(MM)$	0,0263	0,0406	0,1641	0,0352	0,0881	0,0309	0,0584	0,0720	0,1073	0,0549
$\gamma(MA)$	0,4536	0,4542	0,0654	0,4724	0,0576	0,7846	0,4234	0,0954	0,1011	0,6128
$\delta(NMMM)$	0,0416	0,0215	0,0589	0,0213	0,0515	0,0473	0,0569	0,0654	0,0709	0,0362
$\varepsilon(ANMMM)$	0,0019	0,0009	0,0075	0,0011	0,0059	0,0025	0,0026	0,0058	0,0074	0,0018
μ (localización)	2,6099	3,8941	1,2201	3,6405	1,5465	1,9102	1,9308	1,2935	1,1087	2,6648
ψ (escala)	0,2307	0,3317	0,2124	0,2300	0,2576	0,0824	0,1890	0,1735	0,1593	0,1822
ξ (forma)	-0,0449	-0,2244	-0,1305	0,0127	-0,1108	-0,0536	-0,1656	0,0513	-0,1144	-0,0645

Tabla 3: características de los grupos del Escenario 1.

Los grupos característicos presentes en la vertiente atlántica son el 1, 5, 6 y en menor medida el 2.

- En el Cantábrico, predomina el grupo 1 cuyos efectos importantes a la hora de establecer la cota de inundación son la altura de ola, y la marea astronómica. En Santander, la marea astronómica puede llegar a los 5 metros y la altura de ola entre 2 - 4 metros.
- En el área más expuesta al océano, en la zona gallega, predomina el grupo 5, con un elemento claramente predominante en las cotas de inundación, la altura de ola, puesto que las dimensiones del océano Atlántico entre el Cantábrico y Terranova (Canadá) sumadas a la dirección de los vientos dominantes del noroeste generados por las borrascas noratlánticas dan lugar a los oleajes de gran intensidad que azotan las costas de Galicia y el Cantábrico.

- En el golfo de Cádiz, la dinámica marina que interviene en las cotas de inundación queda representada por el grupo 6. La variable más importante de este grupo es la marea astronómica, y las alturas de ola son reducidas ya que el golfo de Cádiz está protegido por el Cabo de San Vicente frente a los oleajes energéticos del noroeste y las borrascas noratlánticas. En verano, los vientos de levante generan oleajes de corto período que llegan a las costas de Huelva con dirección sureste; en zonas particulares del Cantábrico también aparece el grupo 6, por lo que podría parecer contradictorio las bajas alturas de ola, sin embargo por ejemplo, en el Golfo de Vizcaya la reducida extensión del golfo entre sus márgenes cantábrica y francesa no posibilita la existencia de grandes olas del noreste.
- El grupo 2, presente en la parte atlántica del estrecho y en la parte suroeste del archipiélago, tiene características con una posible similitud al resto de grupos puesto que sona altura de ola y la marea astronómica las que predominan en la cota de inundación, sin embargo, los valores son mucho menos extremos por su posición respecto a los vientos del noroeste que generan el fuerte oleaje, pero tienen en cuenta su exposición al océano Atlántico. Una variación más significativa con el resto de grupos se puede notar en el parámetro de localización, con valores que doblan al resto.

En la vertiente mediterránea los grupos que predominan son el 3, 4 ,8 y 9.

- Las características de las dinámicas marinas en el Mediterráneo son muy diferentes a las del Atlántico. El grupo 8, presente en la costa Brava, en Girona, y al norte de las islas de Menorca y Mallorca representa la zona más energética del Mediterráneo, ya que en invierno suelen sufrir los temporales del noreste asociados a vientos fuertes del Mistral, por esto este grupo presenta alturas de ola elevadas, mientras que las mareas astronómica pasan desapercibidas. Sin embargo, la marea meteorológica, asociada a eventos de bajas presiones y fuertes vientos toma una gran importancia, llegando a acumularse 1 m de agua en la costa.

  En esta área se han dado casos de inundaciones tanto por alturas de ola grandes (1997), como por grandes acumulaciones de agua por marea meteorológica debidas al viento y las bajas presiones (2001).

- El grupo 9 presente en la zona norte, este y sur de las islas de Mallorca e Ibiza al igual que en las partes más expuestas de la costa blanca y de Almería, en el cabo de palos en Cartagena, y el cabo de gata en Almería, se caracteriza por una marea meteorológica importante, y una gran altura de ola, muy parecido con el grupo 8.
- El grupo 3, presente al comienzo del mar Mediterráneo, tiene una marea astronómica especialmente baja debido a que es un mar confinado, y es poca la masa de agua que penetra a través del Estrecho de Gibraltar cada 12 horas.
- En las Islas Canarias, hay una marcada zonificación norte-sur, y los grupos 7 y 10 son los representantes. Las características del oleaje están condicionadas por la situación, la proximidad del continente africano y el apantallamiento de unas islas sobre otras, generan que en la parte este de las islas, predomine el grupo 7, con un oleaje más suave que el grupo 10, predominante en la zona oeste. Los oleajes dominantes proceden del noroeste en invierno, generados por las tormentas extratropicales del Atlántico Norte, con elevadas alturas de ola entre 2 y 4 metros, y del noreste, que se corresponden con oleajes con poca altura de ola debidos a la acción de los vientos alisios característicos de la primavera y el verano. La marea astronómica está en torno a 1 m con valores máximos de 2,5 y 3 metros, aunque la sobreelevación del mar generada por la marea meteorológica en algunos casos puede llegar a valores parecidos a la astronómica.

Las características de las variables del Escenario 2 se encuentran en la siguiente tabla:

CLASIFICACIÓN ESCENARIO 2 – características										
Grupos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
$\alpha(H_s)$	0,9439	0,5475	0,3523	0,5920	0,6332	0,3014	0,3303	0,8164	0,4824	0,4264
$\beta(MM)$	0,0897	0,0454	0,0370	0,0259	0,0287	0,0428	0,0299	0,1299	0,0308	0,0341
$\gamma(MA)$	0,5728	0,4325	0,7001	0,4519	0,8261	0,7151	0,7197	0,1313	0,5631	0,5679
$\delta(NMMM)$	0,0642	0,0218	0,0512	0,0415	0,0446	0,0409	0,0478	0,0615	0,0547	0,0220
$\varepsilon(ANMMM)$	0,0069	0,0009	0,0029	0,0018	0,0023	0,0021	0,0027	0,0060	0,0024	0,0011
μ (localización)	1,2960	3,9203	1,8436	2,6396	1,9498	2,2343	1,9735	1,2846	2,1413	3,6080
ψ (escala)	0,2017	0,3387	0,0981	0,2363	0,0717	0,1337	0,0892	0,1875	0,1826	0,2342
ξ (forma)	-0,0391	-0,2157	0,1993	-0,0453	-0,1405	-0,0414	0,0008	-0,1203	-0,2086	-0,0419
% playas	39,5254	42,8822	28,2940	28,5775	28,3615	31,4225	27,9350	38,5787	28,2695	43,3414
% acantilados	11,3463	11,9489	10,4490	7,7577	8,5473	77,3244	14,6750	67,8317	3,9714	10,1986
% estructuras protección	51,7800	121,5033	13,7520	10,8767	10,5255	24,3556	9,7450	47,8052	12,1795	43,5959
% ecotopos transición	0,6251	1,6311	2,0600	0,2990	1,2482	0,3938	48,0700	3,4483	0,0000	1,3655

Tabla 4: características de los grupos del Escenario 2.

En este análisis se han introducido las variables de la exposición en el litoral español.

- En la zona norte, los grupos característicos son el 2 y el 10. Al ser una zona muy expuesta a un fuerte oleaje proveniente de las borrascas del noroeste atlántico, requiere muchas estructuras de protección para evitar las inundaciones costeras. En ambos grupos, se puede ver que el porcentaje de playas es grande y actúan como protección natural ante las inundaciones, ya que son las encargadas de disipar el oleaje, probablemente por esto, los valores del primer escenario no varían mucho añadiendo la exposición.

- En el golfo de Cádiz, se representa con el grupo 6, el gran número de acantilados hacen que la cota de inundación en esas zonas sea irrelevante, y los km de playa de la zona actúan junto a las estructuras de protección previenen las inundaciones debidas a la marea astronómica.
- Los grupos 1 y 8 representan la vertiente mediterránea, y tienen valores de estructuras de protección muy altos debido al alto riesgo de inundación de estas áreas, ya que tanto las alturas de ola como la alta marea meteorológica provocan inundaciones problemáticas.
- En las islas, la clasificación queda representada por los grupos, 4 en la zona noroeste, 5 en la zona este y 9 en el suroeste. Estos grupos se caracterizan por tener pocas estructuras de protección, y bastantes extensiones de playa pero no de acantilados. La clara zonificación es debido a la dinámica costera que afecta al archipiélago comentada en los resultados anteriores.

  También encontramos áreas de los grupos, 3, 6 y 7. Son zonas con bajas altura de ola, y con un gran porcentaje de acantilados o playas, que combaten el efecto de la marea astronómica que afecta al archipiélago.

6 CONCLUSIÓN

Del presente análisis podemos admitir que:

- Conocer las variables principales que influyen en la cota de inundación de un lugar es fundamental para diseñar las estructuras de protección necesarias y más apropiadas.
- Conociendo las variables del clima y la dinámica marina futuras (semanas), podemos prever las zonas que sufrirán daños por inundación, y por lo tanto alertar y proteger para minimizar los daños.
- Con esta metodología y datos del litoral europeo, se puede clasificar por zonas la costa de Europa según las variables del nivel del mar y la dinámica costera que más influyen en una situación de inundación costera.

En próximos trabajos, como la *"Evaluación del impacto climático sobre los sistemas costeros de Europa"* encargado por el JRC, será necesario introducir datos de vulnerabilidad para poder estimar el riesgo de inundación costera en términos monetarios. De esta manera, se podrá realizar un análisis más en profundidad, sobre la problemática derivada de las inundaciones.

7 AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mi directora Sonia Castanedo y co-director Fernando Méndez por conseguir interesarme en la ingeniería de costas y darme la oportunidad de participar en este proyecto, a Alba Cid por su ayuda y dedicación. Especialmente quiero agradecer a Ana Rueda por su supervisión durante todo el proyecto, por todo el tiempo que ha invertido en mí, su apoyo e interés incondicional y su ayuda, sin la cual no habría podido llegar hasta el final en este proyecto. No me olvido de mi familia y amigos, quienes han confiado en mí y me han apoyado todos los momentos durante la carrera.

8 BIBLIOGRAFÍA

[1] A. Tomas, R. Medina, F. J. Méndez, F. F. Jaime, O. F. Castellanos, P. Higuera, F. Fernandez, R. Minguez, G. Diaz-Hernandez, J. L. Lara y M. D. Ortiz, «Metodología para la elaboración de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación costera en españa (iOLE)».

[2] E. G. Sevillano, «Los científicos urgen a España a reforzar su defensa frente al mar,» *El País,* 31 Marzo 2014.

[3] M. Segura Ramos, «La costa española pierde capacidad de defensa ante el cambio climático,» *La Vanguardia,* 4 Junio 2014.

[4] R. Medina, «Riesgo de inundación costera en el litoral español,» de *IX Jornadas Nacionales y VII Internacionales sobre Naturaleza y Medio Ambiente*, Santander, 2013.

[5] I. J. Losada, «Impactos del cambio climático en la costa española,» de *Ciclo: El clima que viene. Fundación Juan March*.

[6] Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas , Atlas de inundación del litoral peninsular español, Universidad de Cantabria.

[7] R. G. Dean y T. L. Walton Jr., «Wave setup - A State of Art Review,» Florida Department of Environmental Protection, Bureau of Beaches and Coastal Systems, 2008.

[8] I. J. Losada Rodríguez, C. Izaguirre Lasa y P. Díaz Simal, «Cambio Climático en la Costa Española».

[9] M. d. M. Ambiente, «Estrategia para la sostenibilidad de la costa de España,» 2007.

[10] I. d. H. A. d. l. U. d. Cantabria, Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. Dináminas, tendencias y variabilidad climática., Naciones Unidas, 2011.

[11] P. Camus, F. J. Méndez, R. Medina y A. S. Cofiño, «Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate,» Elsevier B.V., 2011.

[12] S. Castanedo, F. J. Méndez, R. Medina y A. J. Abascal, «Long-term tidal level distribution using a wave-by-wave approach,» Elsevier, 2007.

[13] W. L. Martinez y A. R. Martinez, Computational statistics handbook with MATLAB, Chapman & Hall/CRC, 2002.

[14] C. Fernández de la Hoz, «Coastal waters classification based on physical attributes along the mediterranean sea. Application to biodiversity conservation and climate change.,» Universidad de Cantabria, Santander, 2014.

[15] R. Medina y F. J. Méndez, «Inundación costera originada por la dinámica marina,» 2006.

[16] «Modelo estacionario de valores extremos - Distribución Generalizada de Extremos».

[17] A. Ibáñez Rosales, «Análisis estadístico de valores extremos y aplicaciones,» 2011.