



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



LOS SISTEMAS NATURALES COMO ALTERNATIVA PARA LA PROTECCIÓN DE LA COSTA

Trabajo realizado por:

Patricia González-Lamuño Rubiera

Dirigido:

Iñigo Losada Rodríguez

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Santander, julio de 2014

TRABAJO FIN DE GRADO

Índice

Resumen.....	3
Palabras clave.....	4
Abstract.....	4
Key words.....	5
1 Introducción.....	6
2 Erosión e inundación, impactos naturales.....	9
2.1 Determinación de la sensibilidad ambiental de la costa.....	12
3 Procesos naturales que controlan la protección de la costa.....	14
Reflexión.....	17
Refracción.....	17
Difracción.....	18
Asomeramiento por el fondo (<i>shoaling</i>).....	18
Rotura de la ola.....	18
4 Medidas para la protección de las regiones costeras.....	19
5 Biomecánica de los sistemas naturales.....	24
Sistemas físicos.....	24
5.1 Conservación o restauración frente a implantación.....	30
6 Mecánica de los sistemas artificiales.....	32
7 Eco-ingeniería.....	33
8 Metodología de proyecto.....	38
9 Simulación avanzada de los procesos de disipación del oleaje.....	45
10 Análisis económico comparativo.....	58
11 Conclusiones y líneas de futuro.....	63
12 Referencias.....	67
12.1 Recursos bibliográficos y direcciones web.....	69
12.2 Relación de tablas, figuras e ilustraciones.....	70
13 Anexos.....	71

Resumen

Este trabajo es una aproximación, desde el punto de vista de la ingeniería, al papel que pueden jugar los sistemas naturales en la defensa y protección de la costa como alternativa a los sistemas artificiales, ante la amenaza de eventos naturales extremos y de los procesos de cambio climático. Se resume el estado del arte sobre los impactos naturales debidos a los fenómenos de erosión e inundación que afectan a la costa, así como los procesos de mitigación de los impactos de las diferentes dinámicas costeras. Se plantean distintas alternativas de protección natural basadas en los diferentes ecosistemas costeros, destacando los aspectos biomecánicos que los distinguen de los sistemas artificiales. Asimismo, se introduce el concepto de eco-ingeniería, presentando los programas y proyectos más actuales relacionados con la protección de la costa. Desde el punto de vista metodológico se exponen los puntos críticos que deben ser tenidos en cuenta en un proyecto de análisis de los sistemas de protección natural.

Con el objetivo de respaldar o refutar el argumento del trabajo, hemos realizado una serie de modelizaciones matemáticas, con una de las herramienta numéricas más avanzadas del momento, para tratar de demostrar la viabilidad de los ecosistemas como sistemas efectivos de protección de la costa ante un evento extremo, y comparándolas con una respuesta equivalente a la de los sistemas artificiales. Se ha realizado una simulación numérica de un conjunto de estados de mar y condiciones de nivel del mar impactando sobre una playa, con dos sistemas de protección alternativos, uno natural y otro artificial, analizando su respuesta. Se ha procedido a realizar un análisis económico comparativo entre la propuesta natural y la artificial, comparando los costes de restauración de un ecosistema y la relación coste-beneficio, considerando los beneficios añadidos proporcionados por el ecosistema, frente al análisis del coste de construcción de una estructura.

Tras la revisión del estado del arte, el análisis detallado de los proyectos de ingeniería en curso y los datos derivados de las simulaciones y del análisis económico, disponemos de argumentos que nos permiten defender la propuesta de los sistemas naturales como un sistema efectivo de defensa de la costa de los impactos naturales. La capacidad natural de adaptación de los ecosistemas nos proporciona además un sistema dinámico que evolucionará con las condiciones del entorno que imponga el cambio climático. No obstante, a pesar de la coherencia y viabilidad de la propuesta, se exponen los inconvenientes de la alternativa, como

son la actual falta de información, la imposibilidad de predicción de comportamiento de los ecosistemas a largo plazo y la necesidad de una mayor inversión en la investigación de estos aspectos.

Palabras clave

Protección de la costa - Ecosistema - Pradera submarina - Cambio climático - Sistema artificial - Modelo matemático

Abstract

In this report the role that natural systems can play in coastal protection as an alternative to the artificial systems against climate change and extreme events is presented from an engineering perspective. For this purpose the review of the state of art is conducted, considering the main natural impacts, erosion and flooding, affecting the coast. The physical processes contributing to the mitigation of the impacts and the characteristics of the natural systems controlling coastal protection are presented, making special emphasis on the biomechanics of the relevant ecosystems, and stressing out the characteristics that distinguish them from the artificial systems. The concept of eco-engineering is introduced, as well as the current projects and programs related with coastal protection. Moreover, the key points that should be considered in a study of the natural protection systems are presented.

In order to sustain the main hypothesis behind this work, we have conducted a series of mathematical models, using one of the most advanced numerical model in the field, in order to prove the feasibility of ecosystems as effective coastal protection systems to extreme coastal dynamics and climate change impacts, having an equivalent efficiency to the one expected from equivalent artificial systems.

Several numerical simulations of different sea states and water level conditions impacting on beach have been prepared, considering two alternative protection systems, a natural and an artificial one. A comparative economic analysis between the natural and the artificial solutions has been made, comparing the restoration costs of an ecosystem and the cost-benefit analysis derived from the added benefits provided by the ecosystems, besides analyzing the construction cost of an infrastructure.

After the revision of the state of art, the presentation of real projects, existing or currently undergoing, the numerical simulations and the economic analyses carried out, we have sufficient basis to defend the proposal of promoting coastal ecosystems as a protection alternative against extreme and climate change impacts. The natural adaptive capacity of the ecosystems provides us with a dynamic system which will evolve with the environmental conditions that the climate change will impose. Besides the coherence and viability of the proposal, we underline the drawbacks of this alternative, namely: the lack of information and insufficient experience, the unpredictability of the ecosystem's long term behavior and the need of further research investment.

Key words

Coastal protection - Ecosystem - Sea grass - Climate change - Artificial system - Numerical Model

1 Introducción

Desde los comienzos del ser humano en la Tierra, se ha buscado siempre el lugar idóneo para el asentamiento y desarrollo de la población. La costa reúne las mejores características de un lugar para ser habitado, ya que supone la interacción del medio acuático, de la atmósfera, del medio terrestre y de la acción del hombre. Su valor reside en los beneficios naturales y económicos que aportan los ecosistemas que alberga, como son, entre otros, los procesos ecológicos, la transformación de energía, el almacenamiento y transferencia de minerales y energía en la cadena alimentaria, los ciclos biogeoquímicos, la mineralización de materia orgánica en suelos y sedimentos y la regulación del sistema climático (1).

Es por ello que las zonas costeras son regiones altamente habitadas y con una gran actividad económica y cualquier amenaza sobre ellas supone un daño importante para la sociedad. Su deterioro implicaría la destrucción de infraestructuras, la pérdida de vidas humanas y la desaparición del patrimonio ambiental. Actualmente las regiones costeras delimitan 170.000 km en 20 de los 27 estados miembro de la Unión Europea (1). En el siguiente mapa podemos ver reflejada gráficamente la densidad de población de la costa europea, siendo mayor en los países del sur, pero estando la zona norte de la costa habitada igualmente (2).

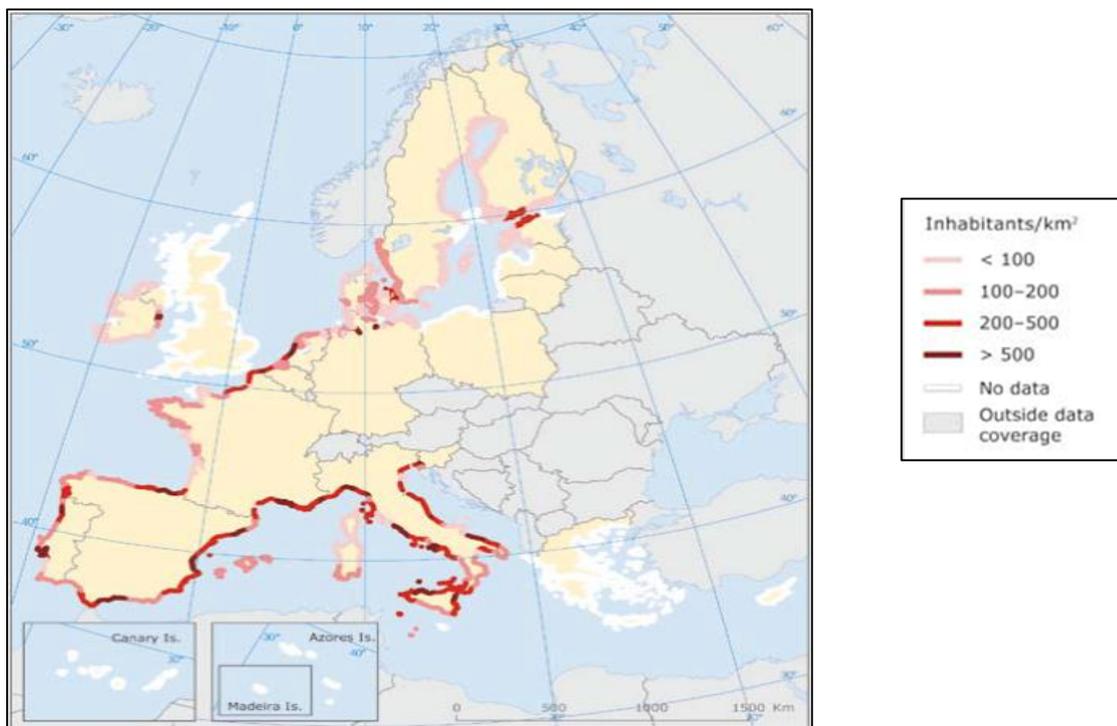


Ilustración 1 - Densidad de población de la costa europea (2)

La costa está afectada por los procesos de erosión e inundación y son estas acciones las que han condicionado la fisonomía costera actual. Estos impactos naturales han modelizado el paisaje desde el principio de los tiempos, habiendo mantenido un equilibrio natural de forma permanente. No obstante, con la introducción de cambios en los ecosistemas y la construcción de estructuras artificiales de la mano del hombre, este equilibrio no siempre está presente, acentuándose la magnitud de los fenómenos naturales que actúan frente a la costa, con un ecosistema incapaz de absorberlos en toda su intensidad. Fruto de este desequilibrio se producen los *tsunamis* o los huracanes, que son dinámicas naturales de características e intensidades extremas y que ocasionan a su paso destrozos económicos importantes.

Además de los impactos directos producidos por la acción de la mano del hombre, problemas globales y que están fuera de nuestro alcance juegan un papel importante en la gestión de las zonas costeras. Hablamos del cambio climático, un fenómeno natural en el curso cíclico de la Tierra pero acelerado a causa de la mala utilización de los recursos por parte del ser humano. Una de sus principales consecuencias es el calentamiento de la Tierra y por tanto el deshielo de los glaciares, el aumento del nivel del mar y la acentuación de la magnitud de las dinámicas naturales. El incremento del nivel del mar de entre 20 y 80 cm para finales del siglo XXI (1) supone una amenaza inminente de inundación para varias grandes ciudades, no sólo de Europa sino del mundo entero. Nuevamente podemos visualizar gráficamente estas amenazas, estando representadas en el gráfico siguiente las quince ciudades del mundo con mayor peligro de inundación, aportando los datos de población amenazada a día de hoy y en 2070 con unas predicciones basadas en los cambios socio-económicos y en las consecuencias del cambio climático (2).

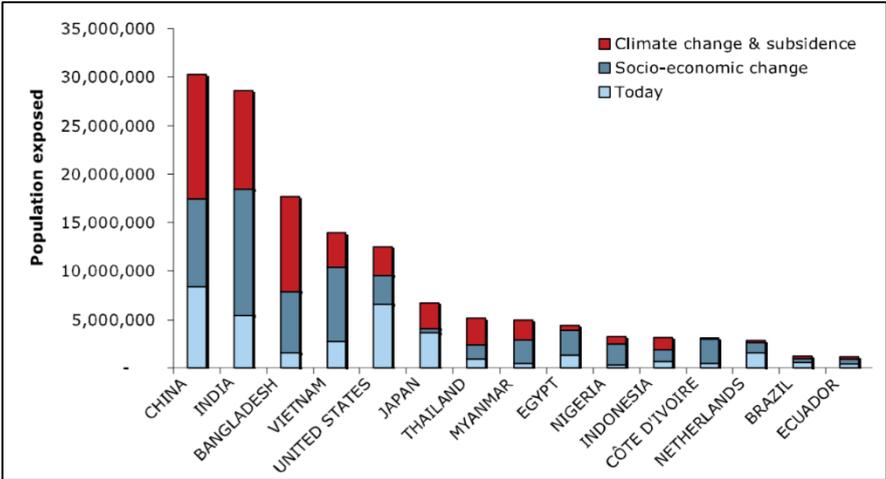


Ilustración 2 – Las quince ciudades del mundo con mayor peligro de inundación, a día de hoy y en 2070 (2)

Por todas estas razones resulta innegable la necesidad de establecer estrategias que disminuyan las amenazas en la costa; que puedan evolucionar en función de los efectos del cambio climático y que no provoquen su acentuación, sino la minimización de dichos efectos. Por tanto, las alternativas basadas en estructuras artificiales que tradicionalmente se han venido proponiendo como solución para la protección de la costa frente a los impactos por fenómenos naturales, a la vista de los conocimientos actuales requiere, al menos, adaptarse a la evolución de las nuevas condiciones climáticas. Estos sistemas artificiales suponen, en el mejor de los casos, la respuesta ideal para las condiciones en las que fueron diseñadas, tanto desde el punto de vista funcional como de su integridad estructural. Sin embargo, los cambios que se proyectan en el clima marítimo a largo plazo hacen que los diseños originales puedan dejar de satisfacer las condiciones para las que fueron proyectados.

Cada vez somos más conscientes de las limitaciones del planeta y de las consecuencias que conllevan nuestras acciones sobre el medio ambiente. A partir de un desarrollo sostenible, podremos manejar el alcance de nuestras acciones y valorar las posibles consecuencias de las mismas, estando de nuestra mano el minimizarlas. Se necesita, por tanto, elaborar un enfoque renovado en el mundo de la ingeniería que vaya ligado a una nueva forma de pensar, en el que las obras de ingeniería formen parte de soluciones integradas y en el que se establezca un equilibrio entre los aspectos sociales, económicos y medioambientales.

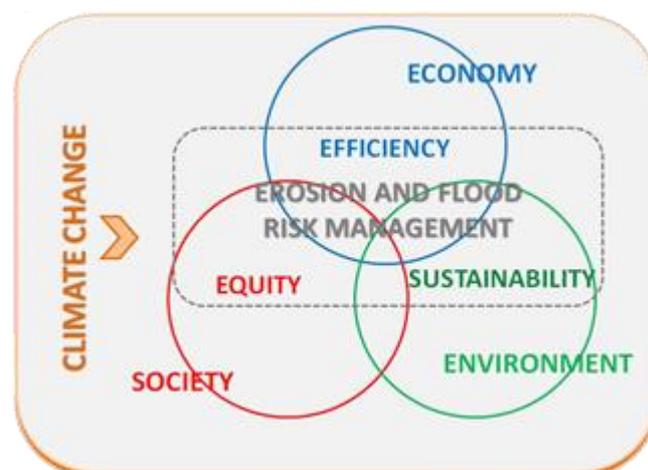


Ilustración 3- Modelo de una estrategia sostenible (Programa Theseus)

Una de las estrategias más innovadoras que ha empezado a explorarse durante los últimos años para hacer frente a los eventos extremos y al cambio climático es la utilización de los

servicios y funciones de protección de la costa que proveen los sistemas naturales como alternativa frente a los sistemas artificiales tradicionales o una combinación de los mismos. Podemos incluir esta propuesta dentro de lo que conocemos como eco-ingeniería, que viene a ser el enfoque innovador de la ingeniería que acabamos de mencionar. La base de la estrategia de la eco-ingeniería es utilizar la naturaleza como defensa natural de sus propios ataques y emplear técnicas avanzadas ingenieriles que distorsionen lo mínimo posible el medio ambiente en el caso de que la protección proporcionada por la naturaleza no fuese suficiente.

No obstante, el hecho de que esta estrategia sea reciente implica una implantación de manera progresiva en el mundo de la ingeniería y supone enfrentarse a la falta de información y de experiencia que pueden proporcionar proyectos realizados con anterioridad. Por ello se ha comenzado con pequeños proyectos piloto, minuciosamente estudiados y controlados, así como con la modelización del ecosistema para la predicción de su respuesta y la escala de intensidad de los impactos externos, que permitirán evolucionar poco a poco a proyectos de mayor escala.

2 Erosión e inundación, impactos naturales

Como ya hemos mencionado, los procesos de erosión e inundación son impactos en la costa que, generalmente, actúan de manera conjunta, afectando a las zonas costeras y en el caso de no ser mitigados suponiendo una amenaza potencial para la población y el patrimonio.

El proceso de inundación se caracteriza a través del concepto de cota de inundación, que es la máxima elevación que alcanza el mar en la costa por el efecto conjunto de las variables que intervienen en el nivel del mar. Es un fenómeno aleatorio producto de la interacción de los diferentes procesos que tienen lugar debido a la dinámica marina (3).

Dentro de este parámetro podemos diferenciar: el nivel medio del mar, la marea astronómica, la marea meteorológica y el *run-up* producido por las olas. El nivel medio es el resultado del volumen de agua del ciclo integral del agua en la Tierra que puede encontrarse en los océanos (nivel de referencia, Figura 5). Su variación es a largo plazo y puede variar por expansión térmica debido al calentamiento global o por la aportación de nuevos volúmenes de agua producto de la pérdida de masas de hielo en el continente. La marea astronómica es

provocada por las fuerzas gravitatorias ejercidas por sistema Tierra-Luna-Sol. La marea meteorológica abarca los cambios del nivel del mar a causa del viento y las variaciones de presión atmosférica. Por último, el *run-up* es el alcance máximo del oleaje cuando éste rompe sobre el talud de las playas. Todos ellos tienen una alta variabilidad geográfica. Además, están relacionados entre sí (tipo de oleaje, tipo de batimetría, nivel de la marea) y, salvo la marea astronómica que tiene un carácter prácticamente determinista, el resto deben caracterizarse como variables aleatorias, debiendo asociar a las mismas una determinada probabilidad o función de distribución (4). Aunque se produzca en ocasiones puntuales, hay que tener también en cuenta el aumento de la cota de inundación provocado por los *tsunamis* que aunque no es de origen climático como las anteriores, es también una fuente de elevada peligrosidad en la costa y que, por tanto, requiere ser considerada a la hora de plantear sistemas de protección de la costa. Se presentan gráficamente a continuación la definición de cota de inundación y de *run-up*:

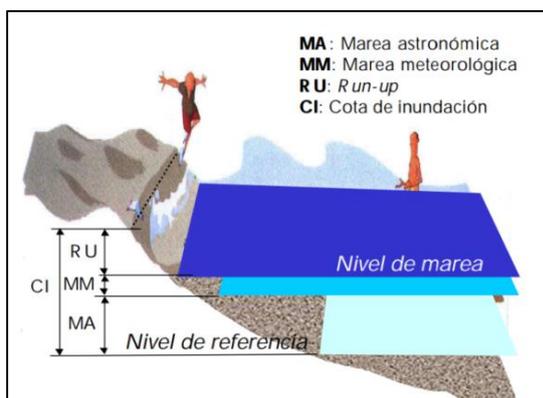


Ilustración 5 – Cota de inundación (1)

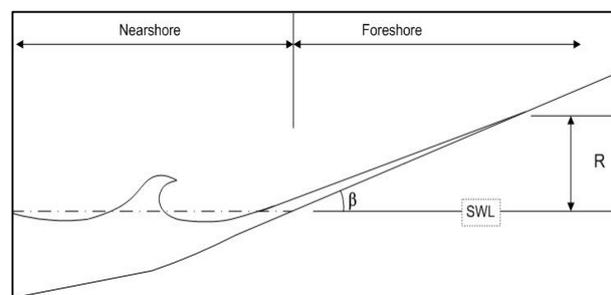


Ilustración 4 – Definición de *run-up* (5)

Estudiando los factores componentes de la cota de inundación podremos saber el nivel extremo que puede alcanzar el oleaje. El *run-up* suele ser utilizado como parámetro de referencia en el estudio y diseño de la costa, siendo lo más habitual tomar el valor de *run-up* medio o el *run-up* del 2%, que es el valor de *run-up* máximo alcanzado para un intervalo de confianza del 98%.

La erosión es un proceso a largo plazo, pero no por ello representa una menor amenaza que la inundación. Es la pérdida progresiva de territorio debido a procesos naturales como las olas, el viento o las mareas, el nivel medio del mar o la sedimentación, estando íntimamente ligado

con el proceso de inundación. Son las dinámicas las que ponen el sedimento en suspensión y luego lo transportan para generar zonas de erosión y acumulación, provocando cambios transitorios o permanentes en la morfología de la costa.

Podemos diferenciar las causas que producen la erosión de la costa en naturales y en antrópicas, estas últimas debidas a la acción del hombre. Entre las causas naturales se encuentran (6):

- La acción de las olas, que al romper y disipar su energía al llegar a la costa, trasladan los sedimentos.
- El viento, que además de generar las olas es el causante de la erosión eólica, especialmente importante para los sistemas dunares.
- Las mareas, que contribuyen a aumentar la energía de las olas y la cota de inundación en pleamar.
- Las corrientes en la zona de rompientes ya que producen el transporte de sedimentos.
- Las tormentas, aumentan el nivel del mar y la energía de las olas, provocando daños en infraestructuras y produciendo el retroceso de las playas.
- Eventos catastróficos como los *tsunamis*, que generan dinámicas naturales de características extremas e impredecibles.
- Movimientos de tierra como la subsidencia.
- Aumento del nivel medio del mar.

Muchas de las actuaciones del hombre en la zona costera asociadas generalmente a la planificación territorial o al desarrollo socioeconómico para la explotación de los recursos costeros, rompen el equilibrio natural de la costa e inducen episodios de erosión que pueden llegar a ser permanentes o magnifican procesos de erosión natural de manera exponencial. Entre las causas antrópicas tenemos las operaciones de dragado, la construcción de puertos, rompeolas, escolleras y diques, la reconstrucción artificial de las playas, la destrucción de ecosistemas naturales, la retención de sedimentos como consecuencia de la construcción de infraestructuras, entre muchas otras.

La erosión continuada de la costa puede desembocar en la desaparición o el traslado forzoso de comunidades costeras hacia regiones tierra adentro.

2.1 Determinación de la sensibilidad ambiental de la costa

Al hacer una evaluación cuantitativa y cualitativa o la predicción de los daños y consecuencias derivadas de los impactos producidos por la inundación y la erosión deberemos estudiar el grado de vulnerabilidad de la zona afectada. Es decir, según el tipo de zona en la que nos encontremos, la protección de la costa deberá ser mayor o menor y a la hora de establecer prioridades de protección, una zona habitada no podrá ser comparada con una zona deshabitada, por ejemplo. Asimismo, las características físicas de la zona son también esenciales puesto que, por ejemplo, un acantilado es mucho menos sensible a los efectos de la inundación que un delta cuya característica fundamental es su baja cota comparado con el nivel del mar.

Para determinar la sensibilidad ambiental de la costa, la NOAA *Ocean Service (National Oceanic and Atmospheric Administration)* propone su diferenciación según el tipo de línea de costa, la caracterización biológica y ecológica del ecosistema y los recursos de uso humano.

1. El tipo de línea de costa viene dado por la altura de la misma (el comportamiento de un acantilado difiere largamente del que presenta una marisma), la exposición al oleaje, el tipo de sustrato que la forma (el índice de porosidad determina el grado de disipación de energía del oleaje, como veremos más adelante) y el grado de sensibilidad biológica (tendencia a desarrollar distintos tipos de hábitat). A continuación presentamos los tipos de línea de costa existentes (7).

CÓDIGO DE SENSIBILIDAD	GRADO DE EXPOSICIÓN	SENSIBILIDAD AMBIENTAL DE LA LÍNEA DE COSTA	TIPOS DE COSTA SEGÚN GRADO DE COHESIÓN, ALTURA Y FORMA
1-A	Exposición directa al oleaje	Acantilados	Acantilados y costas altas expuestas 1
1-B		Costas artificiales	
1-C		Costas altas con depósitos de derrubios en la base	Costas rocosas con presencia de bloques. Estructuras artificiales (incluye rompeolas artificiales) 2
2		Costas rocosas bajas	
3-A		Playas de grano fino y medio	Costas rocosas bajas con posibilidad de intercalación de depósitos de materiales no consolidados 3
3-B		Escarpes y costas "nip", alternancia de eolianitas y materiales no consolidados	
4		Playas de arena gruesa	Playas de arena 4
5		Playas mixtas de arena y guijarros	
6-A		Playas de gravas, guijarros, cantos	Playas de gravas, guijarros y cantos rodados 5
6-B		Costas rocosas bajas con presencia de bloques y rompeolas artificiales	
7-A	Baja exposición al oleaje	Costas rocosas	Costas rocosas y costas formadas por materiales consolidados en zonas de baja energía. Estructuras artificiales 6
7-B		Costas artificiales	
7-C		Costas rocosas bajas con presencia de bloques y rompeolas artificiales	Costas rocosas con depósitos de derrubios, y depósitos no consolidados en zonas de baja energía (incluye rompeolas artificiales) 7
7-D		Costas rocosas altas con presencia de derrubios en la base	
8	Ambas	Zonas costeras y riberas en contacto o presencia de albuferas y marismas	Costas con presencia o proximidad de albuferas y zonas húmedas 8

Ilustración 6 – Tipos de línea de costa (7)

- La caracterización biológica y ecológica de la costa identifica las regiones más vulnerables desde el ámbito Internacional (Patrimonio de la Humanidad), el Europeo (Lugar de Interés Comunitario y Zonas de Especial Protección para las aves) hasta el Estatal y Autonómico (Parque Nacional, Parque Natural, reserva Natural, Monumento Natural, Paraje Natural, Área Natural de Especial Interés, Área Rural de Interés Paisajístico y Reserva Marina). Cada zona protegida se registrará por un marco jurídico característico y se deberán cumplir unos requisitos de protección y de gestión determinados (7).

3. Si bien una región puede carecer de especial valor ecológico, su interés puede residir en los recursos de uso humano que disponga, encontrándose entre ellos infraestructuras como aeropuertos, bases militares o puertos, áreas de valor histórico-cultural como yacimientos arqueológicos, servicios como estaciones de repostaje o piscifactorías.

A partir de estos criterios que nos permiten determinar el grado de vulnerabilidad de la costa podremos priorizar las regiones más afectadas por la inundación y la erosión y diferenciaremos aquellas zonas donde no sea posible la interacción del ecosistema con estructuras artificiales. Para ello, será necesario evaluar previamente cuál será la peligrosidad asociada a cada dinámica inductora de los impactos de inundación o erosión y entender los procesos que intervienen en los mecanismos de protección que pueden implementarse con el fin de mitigar los riesgos.

3 Procesos naturales que controlan la protección de la costa

Todo sistema, ya sea natural o artificial, deberá ser capaz de proteger a la población y a las construcciones existentes frente a los impactos procedentes de eventos externos naturales, tales como el viento o el oleaje, actuando como elementos de protección que contribuyen a reducir la intensidad de la energía con la que actúan el conjunto de fuerzas inducidas por los procesos naturales, que son las que controlan su equilibrio y buen funcionamiento. A este conjunto de procesos es lo que conocemos como dinámica natural.

Podríamos definir dos situaciones para la dinámica natural. Por un lado, las condiciones medias con las que se pueden caracterizar las mareas o los distintos tipos de oleaje. Por otro lado, las condiciones extremas que acontecen sólo en situaciones puntuales y cuyas características sobrepasan en magnitud a las de las condiciones medias. Estas diferentes condiciones conllevan que los sistemas de protección deben mantener su función en cualquiera de las dinámicas naturales, incluyendo las situaciones extremas.

Consideramos la siguiente clasificación de las dinámicas naturales, en función de las fuentes de energía que pueden actuar sobre el océano (8):

Tipo de oleaje	Fuente de energía	Periodo de la ola	Longitud de la onda
Mar de fondo	Cizalladura del viento, acción de la gravedad	< 30 s	200 m
Tsunami	Terremotos, deslizamientos de tierra, erupciones volcánicas	10 min – 2 horas	20 – 300 km
Mareas	Fuerza gravitatoria de la luna y la Tierra y de la rotación de la Tierra	12 – 24 horas	10.000 km
Marejada	Variaciones del viento y de la presión atmosférica	1 – 3 días	100-200 m
Olas internas	Tormentas, corrientes marinas, cambios en la temperatura y la salinidad del agua	4 min – 24 h	100-200 m

Tabla 1 - Tipos de oleaje según la fuente de energía (8)

Como se puede ver en la tabla, las dinámicas se pueden caracterizar a través de una serie de parámetros comunes a todas pero con valores diferenciados. El periodo representa el intervalo de tiempo entre dos puntos iguales de la superficie de una onda mientras que la longitud de onda responde a la distancia entre dos puntos iguales. Vemos, por ejemplo, que mientras el oleaje se caracteriza por periodos de decenas de segundos y centenares de metros, la marea astronómica tiene un periodo de horas y longitudes de onda de miles de kilómetros. La diferencia esencial entre una y otra dinámicas reside en las fuerzas generadoras, el viento para el oleaje y las fuerzas inducidas por el sistema Tierra-Luna-Sol para el segundo.

Dentro de las dinámicas anteriores, la más energética es la correspondiente al oleaje y, por tanto, es el proceso principal para el que se diseñan las protecciones costeras. Su intensidad se caracteriza a través del parámetro de altura de ola. Por tratarse de un proceso aleatorio, el oleaje se caracteriza a través de los estados de mar que generalmente se identifica con una hora. Durante esa hora, se asume que los parámetros estadísticos del oleaje pueden considerarse cuasi-estacionarios, por lo que con un solo parámetro de altura de ola, periodo y dirección se identifica un conjunto de entre 200 a 400 olas.

A medida que el oleaje, así como las otras ondas que figuran en la tabla se acerca a la costa, sufren una serie de procesos de transformación que modifican su altura y dirección y, en algunas ocasiones, su periodo.

Las olas comienzan a notar el efecto del fondo cuando la profundidad es aproximadamente la mitad de su longitud de onda y se llega a la rotura de la ola cuando la altura de las mismas alcanza un séptimo de la longitud de onda. Por tanto, comparando las características de las olas de un tsunami con las de un mar de fondo, sabemos que una ola del mar de fondo romperá seguramente antes de llegar a la costa, llevando a la disipación de la mayor parte de la energía que le ha sido transmitida del viento. Sin embargo, las ondas mucho más largas como marea meteorológica, tsunamis y marea astronómica, dada la magnitud de la longitud de onda, disipan la energía con mucha más dificultad por lo que pueden introducirse tierra adentro provocando importantes inundaciones (9).

Como se ha dicho anteriormente, la mayor parte de los sistemas de protección se diseñan para hacer frente al oleaje y, por ello, en este trabajo se ha centrado todo el esfuerzo a entender los procesos de interacción del oleaje con sistemas artificiales y naturales. Su caracterización y en las simulaciones numéricas realizadas se ha tomado como principal referencia para la medida de la disipación de energía la altura de ola significativa. La altura de ola significativa es un parámetro representativo del estado de mar definido como la media aritmética del tercio de olas más altas registradas en el estado de mar. Este valor es representativo de la altura de ola visualmente percibida por el hombre. Usaremos la altura de ola significativa para comparar la disipación de energía por parte de un sistema natural y un sistema artificial ante distintos estados de mar y condiciones de nivel dado que la energía de las olas es proporcional a la altura de ola al cuadrado.

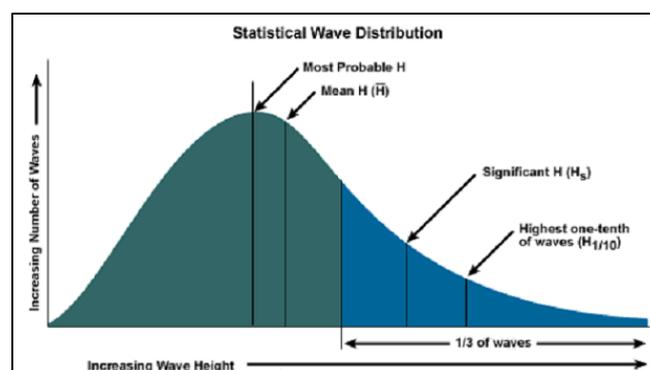


Ilustración 7 - Altura de ola significativa

Dado que los sistemas naturales y artificiales de protección se encuentran situados en la costa, es necesario entender los distintos procesos físicos de modificación de la energía del oleaje por efecto de la batimetría y los contornos de la costa. Entre ellos se encuentran los fenómenos de reflexión, refracción y difracción, así como el asomeramiento por el fondo y la rotura de la ola. Dependiendo de las características de los sistemas de protección (tanto natural como artificial), los sistemas harán uso de estos diferentes procesos para modificar y disipar la energía, siendo lo más habitual encontrar una combinación de varios procesos.

Reflexión: se produce con el choque de la ola contra un obstáculo o barrera vertical; siendo la ola reflejada con muy poca pérdida de energía. Si el tren de ondas es regular, la suma de las ondas incidente y reflejada origina una ola estacionaria, en la que se anulan mutuamente los movimientos horizontales de las partículas debidas a las ondas incidentes y reflejadas, permaneciendo sólo el movimiento vertical de altura doble y, por lo tanto, de energía doble a la incidente. La resultante será la superposición de las dos olas, incidente y reflejada (10).

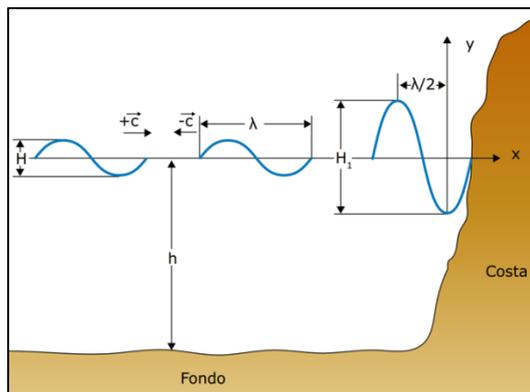


Ilustración 9 - Fenómeno de reflexión (10)

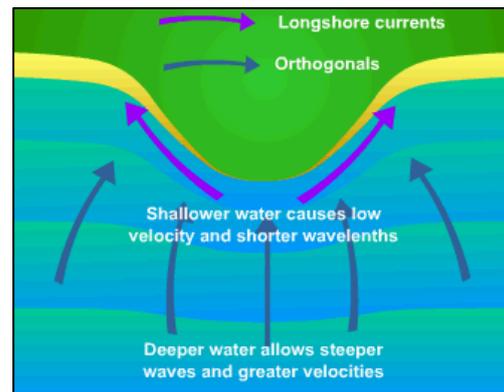


Ilustración 8 – Fenómeno de refracción (11)

Refracción: es el cambio en la dirección de propagación que sufre el oleaje al acercarse a la costa como consecuencia de las diferencias de profundidad a lo largo del frente de onda (11). Una profundidad mayor del fondo da lugar a mayores celeridades del frente dando lugar a la modificación del mismo con respecto a las zonas más someras.

Difracción: en el caso de tener una barrera como obstáculo, la difracción es la dispersión de la energía del oleaje a sotavento de la misma, permitiendo la aparición de pequeños sistemas de olas en aguas protegidas el obstáculo (11).



Ilustración 10 - Fenómeno de difracción (11)

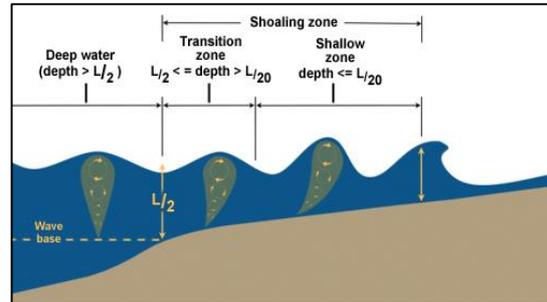


Ilustración 11 - Asomeramiento por el fondo

Asomeramiento por el fondo (shoaling): a causa de la influencia de la pendiente y la rugosidad del fondo sobre el oleaje se produce una variación en la altura de la ola. Mientras que la velocidad del oleaje y la longitud de la onda disminuyen, la altura de la ola aumenta y el periodo permanece constante.

Rotura de la ola: se produce cuando la altura de la ola aumenta de tal manera que la velocidad de avance de las partículas del fluido excede la velocidad de avance de la ola (10). Esto ocurre cuando la altura y forma de la ola deja de ser compatible con el fondo, con una relación aproximada entre la altura de la ola y la profundidad del agua igual a 0.8.

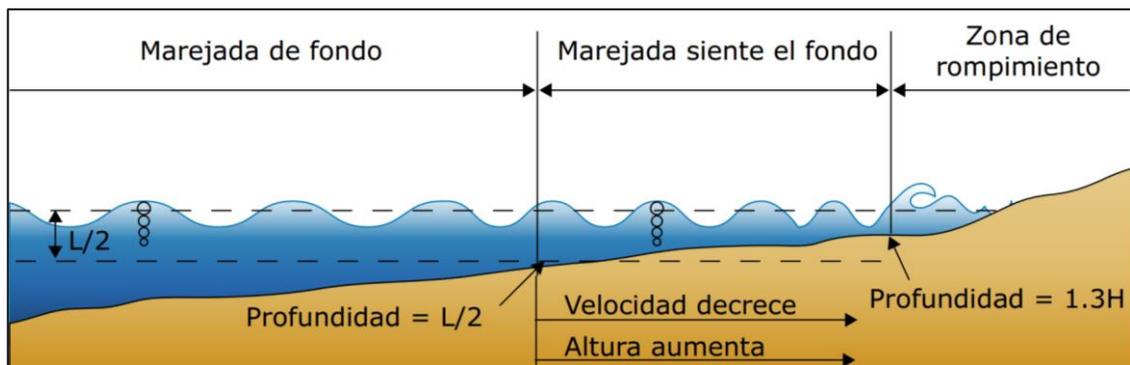


Ilustración 12 - Fenómeno de rotura de la ola

Por ejemplo, la presencia de un muro vertical en la costa produce la reflexión del oleaje incidente con casi una nula disipación de energía. Sin embargo, un dique sumergido produce un aumento de la ola por asomeramiento hasta la rotura generando una gran disipación.

Finalmente, un dique exento produce difracción reduciendo la altura de ola en la zona protegida por el mismo lo que favorece la sedimentación.

4 Medidas para la protección de las regiones costeras

Como soluciones frente al peligro causado por las dinámicas naturales en la costa podemos encontrar tres líneas de trabajo diferentes (12):

1. Introducir cambios en los modelos de ordenamiento y desarrollo del territorio costero, con lo que se reduce la exposición y vulnerabilidad ante los riesgos de la dinámica marina.
2. Desarrollar un sistema eficaz de aviso de amenazas y de implantación de estrategias de actuación frente a ellas que reduzcan el riesgo, fundamentalmente ante eventos extremos.
3. Tomar medidas de defensa mediante la introducción de estructuras que reduzcan el riesgo de impactos en la población e infraestructuras existentes en la costa.

Dentro de esta última se pueden considerar sistemas de protección, que pueden ser naturales o artificiales y que deberán reducir la intensidad de la energía con la que impactan las dinámicas naturales contra la costa. Como ya mencionamos en la introducción del trabajo, la necesidad de un enfoque innovador, dinámico y respetuoso con el medio ambiente hace que los sistemas artificiales como sistema de defensa de la costa estén en estado de revisión.

La costa está regida por los fenómenos de erosión e inundación y es la naturaleza quien consigue un equilibrio natural, coexistiendo con estos procesos. Esta estabilidad natural puede ser explicada muy claramente a través del transporte de sedimentos. La erosión continuada de la costa (a causa del viento, oleaje) provoca la pérdida del material del que está formada la costa. No obstante, es el propio oleaje el que, de manera natural, restablece el sedimento y mantiene la línea de costa. La pérdida de este equilibrio natural (que muchas veces provoca un comportamiento impredecible para la línea de costa y los ecosistemas

asociados) se produce con los cambios en la costa introducidos por el hombre, con la construcción de infraestructuras o la ganancia de terreno al mar, que muchas veces puede representar una solución local pero con importantes impactos negativos en otras zonas y para los ecosistemas. La introducción de sistemas artificiales en el ecosistema puede provocar su degradación y destrucción, rompiendo procesos naturales como es la retención de sedimentos. Con los sistemas artificiales lo que se presenta como una solución a un problema, puede en muchos casos, revelarse como una acentuación de los efectos de la erosión y la inundación y por tanto una aceleración en el proceso de destrucción de la costa.

La presentación de los sistemas naturales como alternativa frente a los sistemas artificiales constituye una adaptación de la naturaleza a nuestras necesidades. Sin embargo, esta alternativa debe ser realista, debiendo sostenerse sobre una base científica sólida y ofrecer una respuesta ante las dinámicas naturales al menos igual de efectiva que la demostrada a lo largo de los años por los sistemas artificiales. Es además necesario alcanzar un conocimiento profundo del ecosistema, incluyendo el estudio de los servicios que presta, sus capacidades y limitaciones para afrontar las dinámicas naturales a las que se ve sometido. Como ya hemos señalado, en el caso de que el ecosistema carezca de las capacidades necesarias para poder cumplir con el grado de protección de la costa necesaria, se puede combinar con técnicas ingenieriles que lo ayuden a alcanzar el nivel de exigencia requerida, formando una alternativa natural apoyada en técnicas artificiales avanzadas.

La propuesta de los sistemas naturales como alternativa frente a los sistemas artificiales se basa en que constituyen un sistema de protección que además de cumplir con su función, aportan varios beneficios añadidos que son muy relevantes a la hora de considerar las consecuencias originadas en el entorno por el cambio climático.

Los sistemas naturales son sistemas dinámicos, caracterizados por una capacidad de adaptación que les permite ir creciendo y fortaleciéndose con el paso del tiempo, pudiendo incluso hacer frente al aumento del nivel del mar mediante la retención de sedimentos (13), al contrario que los sistemas artificiales, que son sistemas estáticos que solamente pueden cumplir la función para las condiciones para las que fueron diseñados y con unas capacidades de protección que se van mermando con el paso del tiempo, necesitando labores de

mantenimiento para poder mantener el grado de defensa de la costa. Si sobredimensionamos las estructuras para que puedan hacer frente a una intensidad elevada del oleaje aparte de aumentar de manera desproporcionada el coste, pueden intensificar la magnitud de los impactos externos al aumentar, por ejemplo, el tamaño de las olas cuando se reflejan en la estructura, aumentando por tanto la capacidad de erosión del oleaje (14).

Como ejemplo citamos las situaciones de un arrecife de moluscos y de un dique, el primero con el paso del tiempo irá formando una estructura física cada vez más sólida y resistente, mientras que el segundo se irá deteriorando con el tiempo, llegando a ser inservible en el caso de carecer de las labores de mantenimiento requeridas.

Entre los beneficios añadidos que nos puede aportar la naturaleza se encuentran también la mejora de calidad del agua, la proliferación de la pesca, la eliminación de carbono de la atmósfera (muy importante ya que favorece la supervivencia de algunos ecosistemas), la conservación de la naturaleza, la creación de paisajes naturales y el mantenimiento de la superficie del territorio mediante la sedimentación. Si bien el coste inicial de mantenimiento de los ecosistemas puede ser grande, se considera como una inversión a largo plazo que se recuperará con el paso del tiempo (13), obteniendo incluso grandes beneficios económicos.

La superficie disponible para el sistema de defensa de la costa es un inconveniente que afecta a los sistemas naturales, ya que para un correcto desarrollo de sus capacidades y de su proliferación necesitan un espacio grande, en comparación con las estructuras artificiales que necesitan un espacio reducido. Mostramos a continuación un gráfico en el que se representa, a nivel europeo, el porcentaje de superficie de costa destruido de varios ecosistemas y el porcentaje de superficie ocupado por infraestructuras, ganadería o cultivos, considerados como un ecosistema degradado (15).

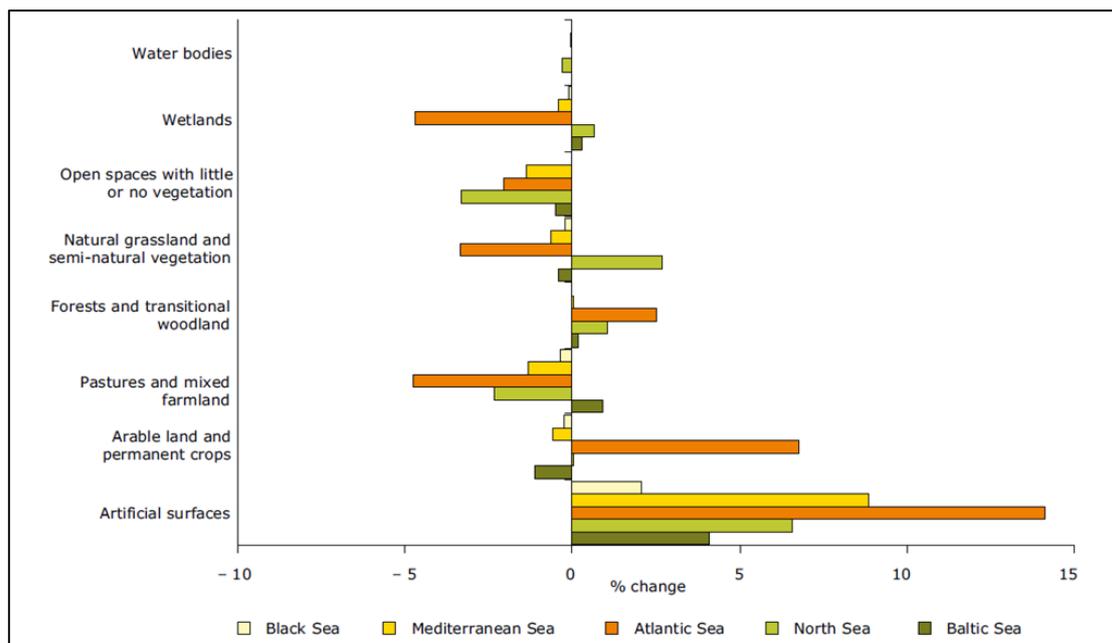


Ilustración 13 - Cambios en el uso de la tierra en la costa europea en un radio de 0 – 10 km (15)

Otra diferencia esencial radica en que, en general, solamente los países desarrollados tienen acceso a los recursos necesarios para poder desarrollar soluciones basadas en sistemas artificiales lo que además tiende a que las soluciones basadas en sistemas naturales no han sido consideradas suficientemente. En los países en vías de desarrollo, por un lado, la falta de medios ha llevado a que exista una importante concienciación sobre el rol que los ecosistemas juegan como elemento de protección pero, por otro lado, existen iniciativas por las que la población ha contribuido a un importante deterioro de los ecosistemas, ya sea por la implantación de iniciativas tendentes a la explotación de recursos o con el fin de erradicar enfermedades ocasionadas por mosquitos en grandes extensiones de humedales..

Presentamos de manera comparativa y resumida los puntos fuertes y las limitaciones de los sistemas artificiales y naturales (13):

Variable afectada	Sistemas artificiales	Sistemas naturales
Protección de la costa	Atenúan y disipan parte de energía del oleaje	
Capacidad de adaptación	Limitada, sistema estático	Buena, sistema dinámico
Protección del hábitat	Degradación o destrucción	Conservación o restauración
Acumulación de sedimentos	Rotura del equilibrio del proceso de sedimentos	Sostenida

Afectación a la superficie del territorio	Disminución debido a la erosión, el drenaje del suelo y extracción de agua y gas	Mantenimiento del territorio a partir de los procesos de sedimentación
Propagación del oleaje en un estuario o delta	La destrucción de humedales supone la eliminación de barreras frente a las dinámicas naturales	La restauración de humedales favorece la fricción, disminuyendo los impactos del oleaje
Mantenimiento a largo plazo	Alto coste de mantenimiento	Los ecosistemas son autosuficientes
Valoración coste – beneficio	Moderada	Alta, los ecosistemas aportan beneficios añadidos
Calidad del agua	Puede ser degradada a causa de la acumulación de materia orgánica y crecimiento de algas tóxicas	Mejorada y sostenida gracias a los procesos internos del ecosistema
Cantidad de carbono de la atmósfera	Nula	Abundante
Proliferación de la pesca	Reducida, se destruye el hábitat de los peces	Mejorada, se mejora el hábitat de los peces y bivalvos gracias a la restauración de corales y humedales
Creación de espacios recreativos	Impacto visual a causa de la infraestructura	Positivo
Espacio requerido	Moderado	Alto
Dificultad de construcción de la estructura de defensa	Moderada	Alta debido a las dinámicas naturales y su variabilidad
Experiencia previa	Numerosa experiencia, resultados de éxitos y fracasos	Limitada, se requiere una inversión en investigación
Aprobación por parte de los gestores y de la sociedad	Ampliamente aceptada	Aceptada hasta ahora en Europa y Estados Unidos y no en los países en desarrollo
Amenazas para la salud	Ninguna	Los humedales con aguas estancadas pueden favorecer la aparición de mosquitos y la propagación de enfermedades

Tabla 2 - Comparación ventajas e inconvenientes de los sistemas naturales y artificiales (13)

5 Biomecánica de los sistemas naturales

A lo largo de este documento hemos expuesto las características y beneficios de los sistemas naturales; a continuación pasamos a definir los diferentes tipos de sistemas naturales, considerando varias categorías, en función de la manera en que realizan la protección de la costa: los sistemas físicos, los sistemas físico-biogénicos y los sistemas bióticos (1). Remarcamos una vez más la capacidad de adaptación de estos ecosistemas a los impactos producidos por el cambio climático, que mantendrá las capacidades de protección de los sistemas.

Sistemas físicos identificados como aquellos ecosistemas dominados por los procesos físicos frente a los bióticos (1). Entre ellos se encuentran las playas, los puntales, las islas barrera, los sistemas dunares o los arrecifes y lajas rocosas, todos largamente apreciados como zonas recreativas.

Constituyen importantes reservas de arena para otros sistemas arenosos, además de ser la base de ecosistemas como las praderas submarinas y favorecer la aparición de moluscos (ampliando el grado de protección que los sistemas arenosos proporcionan a la costa) (16).



Ilustración 15 – Ejemplo de una playa



Ilustración 14 - Conchas en una playa

Estos sistemas disipan la energía de las dinámicas naturales mediante la rotura de la ola y la fricción del oleaje con la rugosidad del fondo marino y dependiendo del tipo de dinámica (marea, oleaje de tormenta...) podrán hacerlo de manera parcial o total. Son considerados como estructuras flexibles, ya que como respuesta al oleaje, las playas adaptan sus perfiles dependiendo de las características del impacto. Ante un oleaje fuerte, las playas estrechan sus perfiles (la parte de “arena seca” de la playa”) dejando la mayor parte de la arena bajo el agua, ensanchándolo y recuperando su anchura inicial cuando ha estado expuesta un cierto tiempo

a un oleaje más suave (17). De esta manera, las olas más grandes fuertes romperán antes y el alcance del run-up del oleaje provocará que la arena de la playa se traslade al principio de la playa, actuando ésta como una estructura de defensa muro resistente activa «móvil». Es por ello que si se preservan de manera correcta, pueden llegar a mitigar los efectos del aumento del nivel del mar y de las tormentas, que como consecuencia del cambio climático cada vez serán más frecuentes. No obstante, estos sistemas han sido y son muy explotados por el hombre, siendo utilizada la costa como área industrial, recreativa y urbanística y habiendo construido numerosas infraestructuras, en un principio para la protección de la costa, pero que han producido cambios en los procesos y estructuras naturales de las playas.

El concepto que se utiliza ahora de “reducción de la costa” representa la pérdida de territorio costero a causa de estas dos amenazas, la subida del nivel del mar y de la acción del hombre, y si bien se ha intentado hacer una predicción de cómo será la línea de costa en unos años, las dinámicas naturales y los procesos de sedimentación son bastante impredecibles.

Los **sistemas físico-biogénicos** son aquellos en los que los procesos bióticos son los procesos dominantes que generan el sustrato físico necesario para generar la protección (1).

Un ejemplo representativo de este tipo de ecosistema es el arrecife de coral, donde la estructura que forman los pólipos es la que ejerce el papel de protección de la zona costera, absorbiendo la mayor parte de la fuerza de las olas.



Ilustración 17 - Coral



Ilustración 16 - Arrecife de coral

Actúan como una barrera natural frente al oleaje mediante los procesos de rotura, fricción y propagación del oleaje a través de ellos. Esta barrera provoca cambios en la profundidad del fondo, ocasionando por tanto cambios en la altura y dirección del oleaje (mediante los procesos de disipación que ya hemos mencionado, como la difracción o la refracción) (1).

Dependiendo del grado de salud y las características físicas y ecológicas de los arrecifes, pueden llegar a absorber el 70-90% de la energía de las olas generadas por el viento en condiciones normales de oleaje (18). El daño que el oleaje pueda causar a este pequeño ecosistema es restaurado y regenerado por él mismo, aunque si el coral es sometido a fuerzas mayores de las que pueda soportar, no podrá crecer con la suficiente rapidez y poco a poco se irá erosionando y quedándose a merced de las olas. Los arrecifes de coral favorecen la aparición de nuevos ecosistemas, en parte gracias a la variedad de nutrientes que son traídos por las olas, y debido a la alta diversidad de organismos forman un recurso natural para la pesca. Constituyen una fuente natural de sedimentos, provenientes de los esqueletos calcáreos del propio coral y de los esqueletos del resto de organismos que habitan en el arrecife, sedimentos que luego pasarán a formar parte de las playas existentes en las proximidades del mismo. Las zonas de aguas tranquilas y protegidas que se forman en la zona más cercana a la costa son utilizadas por pescadores y barcos cargueros.

Por muchos servicios que nos pueden aportar estos ecosistemas, se encuentran en declive y a pesar de ser una especie protegida, se necesita invertir en ellos para favorecer su restauración. El 30% de los arrecifes se encuentran dañados y se espera que se haya perdido el 60% de ellos para 2030 (18). Las causas de la destrucción son debidas a la contaminación del agua, métodos destructivos de pesca y daños derivados de un turismo masivo, entre otros. La degradación de los arrecifes de coral puede tener consecuencias económicas (reducción del turismo y de la pesca) en un radio de varios kilómetros, además de restar protección a la costa, favoreciendo su erosión y destrucción debido a tormentas y fenómenos naturales.

Finalmente, los **sistemas bióticos** son aquellos en los que los procesos físicos y biológicos son igual de importantes en el proceso de protección de los ecosistemas. Tenemos los manglares, las praderas submarinas, los humedales y los bosques costeros como ejemplos de estos sistemas, siendo en todos ellos determinante para el grado de protección de la costa que puedan proporcionar la tipología, la geometría, y la densidad de la vegetación, así como los procesos de retención de sedimento o de fijación del sustrato (1).

Los manglares comparten con los corales el hecho de estar en peligro (un 35 % han sido destruidos) y el de cubrir una pequeña extensión del planeta, de gran importancia para las

economías de los países formados por islas, ya que suelen depender de la pesca y del turismo (18). Los manglares aprovechan las zonas tranquilas para su proliferación, originándose muchas veces al abrigo de los corales; es usual encontrar ecosistemas con más combinaciones de sistemas naturales, como los campos de posidonia frente a las playas (1). Forman un ecosistema de transición entre la tierra y el mar, protegiendo la costa con árboles y arbustos que crecen por debajo del nivel máximo de algunas mareas, pudiéndose adaptar a distintos grados de salinidad del agua. Gracias a su red extensa de raíces aéreas, forman una barrera natural frente al oleaje, además de favorecer el depósito de sedimento y la diversidad biológica mediante la captura de cangrejos y peces, que sirven de alimento para otras especies. No sólo se expanden a través de las raíces, sino que se componen de una densa estructura de ramas que sirve para reducir la velocidad del viento, disminuyendo por tanto la energía de las olas de viento. La densidad y la edad del bosque de manglares determinarán el grado de protección que puedan aportar, formando estructuras más sólidas y ramificadas a mayor edad y densidad, pudiendo resultar dañados a causa de los impactos del viento y del oleaje en caso contrario. Si bien existe evidencia de disipación de energía de huracanes y tsunamis por parte de los manglares, un bosque de manglares en mal estado podría acentuar los efectos de las dinámicas naturales.



Ilustración 18 - Manglar



Ilustración 19 – Raíces aéreas de los manglares

Las praderas submarinas, formadas por miles de plantas, son el ecosistema vegetal acuático protegido más grande de Europa, pudiéndose encontrar tanto en el mar Mediterráneo como en el océano Atlántico. Las plantas cuentan con la singularidad de ser la única especie de plantas con flor adaptadas a vivir totalmente sumergidas, pudiéndose desarrollar en profundidades entre los 0 y 60 metros, ya que necesitan al menos un 11 % de luz solar que incide en la superficie del mar.

Se caracterizan por una gran adaptabilidad al entorno, siendo por tanto importantes frente al cambio climático.



Ilustración 20 – Campos de Posidonia



Ilustración 21 – Esquema planta de Posidonia

Como ecosistema, fomentan la diversidad biológica, el transporte de sedimentos y nutrientes, la transferencia trófica con otros hábitats (como los humedales o los arrecifes) y sirven de fuente de alimento y cobijo para algunas especies. Modifican el hábitat en el que se encuentran, reteniendo las partículas en suspensión del agua, mejorando su transparencia y calidad, siendo indicadores de buena calidad ambiental del agua. Atenúan la energía del oleaje a través de la disipación de las olas por rotura o fricción y reflejan parte de la energía de las mismas en dirección offshore.



Ilustración 22 - Atenuación del oleaje mediante praderas submarinas

En general, el grado de protección que pueden ofrecer a la costa a través de estos procesos es bajo, en comparación con los resultados que se pueden obtener con sistemas naturales como los arrecifes o las playas, siendo su mejor característica la capacidad de estabilización de una zona marina a través de la sedimentación, reduciendo la erosión de la costa. Su eficiencia depende mayoritariamente de las características de las plantas, tales como la rigidez, la biomasa, la densidad, la morfología o la longitud de las hojas. La densidad de las

plantas disminuye exponencialmente con la profundidad y exponencialmente con la turbidez del agua (19), por lo que estos dos factores actuarán como condiciones límite de crecimiento y por tanto del grado de protección.

Los campos de posidonia son una de las muchas especies que pueden formar praderas submarinas. Se desarrollan sólo en el Mediterráneo y constituyen la especie más longeva del planeta. Además de formar regiones de gran belleza, son el hábitat preferente de muchas especies protegidas (como la nacra), la progresiva erosión de los moluscos habitantes de las praderas produce arena de gran calidad. Se estima que cada año se incorporan a las praderas submarinas españolas un millón de toneladas de materia orgánica refractaria, actuando como una reserva o sumidero de CO_2 a largo plazo (19).

Los humedales son zonas de transición entre la tierra y el mar, compartiendo características de ambas regiones. El nivel freático se encuentra cerca de la superficie, pero sólo se encuentran inundados cada cierto tiempo, por agua salada proveniente de las mareas en el caso de las marismas, que son humedales situados en la costa. Se extienden en grandes superficies muy vegetadas y el agua está compuesta por una gran cantidad de materia orgánica en suspensión.



Ilustración 24 - Marisma



Ilustración 23 - Humedal

Son conocidos por su capacidad de protección frente a la erosión y las inundaciones causados por los huracanes y tormentas, actuando como una zona de disipación y frenado del oleaje a través de la fricción con el fondo, impidiendo el crecimiento del oleaje. Una vez más, gracias a la retención de sedimentos por parte de la vegetación, se produce la estabilización de la zona y la disminución de la profundidad marina. La extensión y la densidad de vegetación marcarán el grado de protección de la costa.

5.1 Conservación o restauración frente a implantación

Como resultado de vivir el hombre por encima de las posibilidades de los ecosistemas se produce la pérdida y la degradación progresiva de los mismos, que como ya hemos mencionado, tiene como una de las principales consecuencias el aumento de desastres naturales como las inundaciones, aumentando las amenazas a la costa.

Al analizar una región para valorar el grado de protección de la costa que pueda proporcionar, nos podemos encontrar bien con un ecosistema en perfectas condiciones, bien con un ecosistema dañado, que ofrece una protección por debajo de sus posibilidades. En el caso del ecosistema en buenas condiciones, la labor a realizar es la de su conservación. Una conservación efectiva de los ecosistemas es la solución más barata y la solución óptima en relación a la protección del ecosistema de las dinámicas naturales, costando desde decenas hasta cientos de euros por hectárea. Sin embargo, los únicos ecosistemas que se encuentran bien conservados son las zonas protegidas, que representan solamente un 6% de la costa de la Tierra (20). El aproximadamente 90% de los ecosistemas costeros restante ha sido modificado o degradado por causa del hombre, por lo que los esfuerzos de protección de los ecosistemas se concentran en las labores de restauración o de implantación.

La restauración de un ecosistema consiste en restablecer las características, servicios, capacidades y biodiversidad que tenía el mismo antes de ser degradado. Entre los servicios que suponen beneficios añadidos para la sociedad están la capacidad de protección de la costa, de eliminación de carbono de la atmósfera o de la mejora de la calidad del agua. El coste de restauración de una región puede llegar hasta cientos de miles de euros por hectárea, habiendo sin embargo una proporción coste-beneficio de entre 3 y 75 (en comparación con la pérdida del ecosistema), siendo por tanto una inversión beneficiosa a largo plazo (20). Un ecosistema recién restaurado no puede compararse en características y valor del ecosistema original, así que la pregunta es, ¿por qué está el ecosistema dañado en primer lugar? Si la causa de la degradación de un ecosistema es por los efectos de las dinámicas naturales, se puede estudiar la implantación de soluciones provisionales basadas en ingeniería hasta que la restauración del ecosistema haya finalizado, permitiendo a la vegetación desarrollarse completamente.

Desde el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) recomiendan una serie de pautas a evitar a la hora de realizar un proyecto de restauración:

1. Proponerse metas poco realistas a lo largo del proceso de restauración.
2. Realizar una restauración no apropiada o llevarla a cabo de manera parcial, originando un ecosistema con las capacidades y servicios mermados en relación al ecosistema original.
3. Plantación de especies no nativas inintencionadamente.
4. Falta de supervisión de los resultados de la implantación.
5. La no inclusión de los procesos de recuperación de los ecosistemas en los presupuestos de la región.

Para realizar una correcta restauración es necesario priorizar las zonas más dañadas, realizar una aproximación de la magnitud de la zona a regenerar, efectuar un seguimiento a largo plazo del ecosistema para garantizar su regeneración y utilizar resultados de experiencias anteriores para asegurar el éxito de la operación, entre otros. Datos obtenidos de proyectos realizados por la UNEP a lo largo del mundo revelan que entre el 25 y el 44% de las características y los servicios de los ecosistemas son regenerados mediante la restauración.



Ilustración 25 - Restauración de manglares (Building with Nature for coastal resilience)

La implantación es la introducción de especies en un ecosistema costero que carece de las capacidades de protección, favoreciendo la generación de un nuevo hábitat que sí cumpla con las características de defensa. Cada ecosistema tiene una respuesta distinta a este proceso, y un problema derivado es la posibilidad potencial de que la especie se convierta en invasora, destrozando el ecosistema original y sus cadenas tróficas. Bajo las mismas condiciones físicas, un hábitat puede presentar varios comportamientos distintos, con especies y procesos diferentes. Por ejemplo, una llanura puede estar totalmente ocupada por sedimentos, perjudicando el desarrollo del bentos u ocupada por praderas submarinas o bosques de manglares, enriqueciendo el ecosistema. Estos distintos estados dinámicos del ecosistema son el resultado de *feedbacks* estabilizadores, que provocan un rechazo frente a los cambios de estado y que no facilitan la supervivencia de nuevos individuos, siendo muy difícil la implantación de especies no nativas en estos ecosistemas.

No obstante, la implantación puede ser valorada como una segunda oportunidad de cara a un ecosistema. Si se valora la implantación de especies en un ecosistema será necesario hacer un estudio exhaustivo y, al igual que con la restauración, comparar con resultados de experiencias anteriores realizadas con éxito en regiones semejantes (21).

Asimismo, al hacer el estudio del ecosistema dañado se deberán analizar las especies, ya que en el caso de los Campos de Posidonia, que como ya hemos dicho las plantas pueden llegar a tener miles de años, la implantación de estas plantas es inviable y sólo se plantea su conservación.

6 Mecánica de los sistemas artificiales

Entre los sistemas artificiales que se encuentran cerca de la línea de costa se encuentran los arrecifes sumergidos, que a su vez pueden ser porosos o impermeables; los rompeolas, estructuras sumergidas o emergidas, sostenidas o no por pilotes; y por último las vegetaciones artificiales. El objetivo de estos sistemas es el de disipar la energía del oleaje para proteger la costa, sirviéndose para ello de los fenómenos mencionados previamente, como son la reflexión del oleaje, la fricción o la rotura, entre otros. La reconstrucción de las playas mediante el rellenado artificial de arena, la construcción de taludes, o la generación de dunas artificiales son ejemplos de sistemas artificiales situados en la costa, pudiendo protegerla del

oleaje y de las tormentas. Si antes se mencionaban la densidad o la longitud de las plantas como actores que condicionan el grado de protección de los sistemas naturales, entre los parámetros que limitan la protección de la costa en el caso de las soluciones artificiales se encuentran el tamaño del grano de arena, la pendiente y la altura de la estructura, la rugosidad de la superficie o las características porosas del material.

Los sistemas artificiales son diseñados para unas condiciones climáticas y de oleaje determinadas, siendo usual utilizar un periodo de retorno de la altura de ola significativa de diseño igual a 100 años. El coste de construcción de estos sistemas no es muy alto, pero son necesarias labores de mantenimiento cada cierto tiempo y si las condiciones iniciales de diseño cambian, lógicamente el diseño inicial puede no ser el ideal para las nuevas condiciones.

7 Eco-ingeniería

La eco-ingeniería o ingeniería híbrida se presenta como una propuesta que engloba las ventajas de los sistemas naturales y de los artificiales a la hora de considerar las opciones y recursos para la protección de la costa. Es una manera de trabajar con la naturaleza, en vez de contra ella, combinando técnicas ingenieriles con procesos naturales de los ecosistemas, resultando en una solución que hace formar parte a la naturaleza en el desarrollo de la sociedad (14). Para ejemplificar esta propuesta describimos un ecosistema dañado de manglares situado en la costa, por lo que el sistema carece de su capacidad protectora. La ingeniería híbrida propondría en esta situación la instauración artificial de un bosque de bambú o material de características similares. El oleaje tendrá que atravesarlo al llegar a la costa, disminuyendo su energía de impacto conforme va atravesando el bosque. De esta manera, se reducirá el impacto de la erosión e inundación de la costa y el ecosistema original podrá ir poco a poco restaurando sus capacidades de protección, restaurándose al mismo tiempo el bosque de manglares original. Las técnicas ingenieriles se utilizan para desarrollar un modelo que simule el ecosistema natural, durante el tiempo necesario que necesite la naturaleza para su recuperación.

La ingeniería híbrida es la base de la estrategia de protección de la costa de los Países Bajos. Con el fin de proteger a la población e infraestructuras holandesas han creado EcoShape, a través del consorcio entre administraciones públicas, instituciones científicas y empresas privadas. El programa de EcoShape se denomina *Building with Nature Programme* y busca rellenar el vacío de información que existe sobre este campo, haciendo un estudio de todas las características y procesos de los ecosistemas y recopilando todos los conocimientos existentes hasta ahora. Además, mediante el desarrollo de reglas de diseño y normas medioambientales y poniendo práctica en pequeños proyectos los sistemas naturales como alternativa frente a los artificiales se espera la aprobación social, cuestionable en algunos países.

Actualmente la costa de los Países Bajos se encuentra muy erosionada debido al cada vez menor aporte de sedimento por parte de los ríos, del hundimiento progresivo del terreno y de la subida del nivel del mar. Tiene por tanto serios problemas a corto plazo, que pueden ocasionar la inundación total de la zona.

Entre las soluciones que tradicionalmente han llevado a cabo para combatir las inundaciones y la carencia de sedimentos se encuentran la construcción de grandes infraestructuras y la reposición de grandes cantidades de volúmenes de arena. No obstante, como consecuencia del cambio climático y del aumento del nivel del mar, estos problemas se irán acentuando con el tiempo y llegará un momento en que el coste de estas soluciones artificiales sea inasumible. Para la implementación de los sistemas naturales, como mencionamos al principio del trabajo, se propone como estrategia el comenzar con pequeños proyectos piloto, minuciosamente estudiados y controlados, así como la modelización del ecosistema para la predicción de su actuación y la escala de intensidad de los impactos externos para poco a poco poder evolucionar a proyectos de mayor magnitud

Entre los diversos proyectos del programa de EcoShape para el mantenimiento costero se encuentran los siguientes:

1. Regeneración concentrada (motor de arena *Delfland*): teniendo en cuenta cómo afectan el viento y el oleaje al equilibrio del proceso de sedimentos, la idea es depositar una gran cantidad de arena en un lugar para que gradualmente el viento y el oleaje la redistribuyan a lo largo de la costa. A partir de este depósito de sedimento, se favorece la creación de un hábitat natural para los animales de la zona.

2. Creación de arrecifes artificiales de moluscos en estuarios, formados por gaviones rellenos de conchas de ostras muertas para que luego las larvas de los moluscos fijen unas conchas con otras, formando una estructura sólida.



Ilustración 26 - Arrecife artificial de moluscos (EcoShape)



Ilustración 27 - Vista aérea de marismas (Building with Nature for coastal resilience)

3. Regeneración de hábitats destruidos por causa del dragado del fondo marino: simulación de diseño natural del fondo, favoreciendo su recolonización.
4. Protección de humedales, favoreciendo que se desarrolle la capacidad de disipación de energía del oleaje.

El programa no sólo se centra en la costa holandesa, sino que promueve estrategias en zonas tropicales a través de un convenio con Singapur. Las dos propuestas más interesantes son el programa de recuperación de terrenos del mar mediante el estudio de los arrecifes de coral, praderas submarinas y manglares y el estudio de la adaptación de la naturaleza a las infraestructuras existentes, siendo esta última una solución al problema de falta de espacio que condiciona a los ecosistemas. Desde el punto de vista tradicional de la ingeniería, si no hay suficiente espacio para el correcto desarrollo de los sistemas naturales sólo puede llevarse a cabo una propuesta con una infraestructura artificial, pero desde EcoShape se propone una solución híbrida mediante la colonización de la estructura, para poder seguir beneficiándonos de las ventajas que nos ofrece la naturaleza.

El programa de *Building with Nature* es pionero en la puesta en marcha de proyectos de eco-ingeniería como soluciones reales a problemas actuales y son por tanto los que marcan el ritmo de evolución y los interrogantes existentes hasta ahora, derivados de la falta de experiencia en este nuevo campo de la ingeniería. Todos los proyectos realizados hasta ahora

son los primeros en ponerse en práctica, por lo que no se cuenta con el respaldo de los resultados de proyectos anteriores.

Entre los principales interrogantes se encuentra el tiempo que tarda un ecosistema en recuperarse o uno nuevo en establecerse (algunos ecosistemas pueden tardar miles de años en desarrollarse totalmente, como los campos de Posidonia, por lo que no son ecosistemas que puedan ser simulados en el laboratorio) y la estabilidad de las infraestructuras artificiales en función del material utilizado y la respuestas y desarrollo del hábitat.

Sin embargo, a pesar de la corta experiencia, EcoShape ha definido desde los resultados obtenidos de sus proyectos varios ecosistemas como garantía de éxito al trabajar con la naturaleza, como son las costas arenosas, los estuarios, los mares tropicales, los mares poco profundos y los deltas.

Otra estrategia para la protección de la costa de los Países Bajos es el Programa Delta, que mediante la colaboración del gobierno nacional, provincial y municipal holandés y comisiones de agua garantiza la protección de la costa holandesa ante las dinámicas naturales del agua. Su estrategia se basa en una investigación continua del delta, para poder evitar catástrofes naturales que provoquen la inundación de las poblaciones cercanas, y en la búsqueda de una solución al problema de abastecimiento de agua. Todas las estrategias del programa tienen en cuenta los posibles cambios en el nivel del mar y en las condiciones climáticas, siendo una de sus premisas la necesidad de estar preparados en todo momento y tener recursos para manejar los impactos naturales.

Las investigaciones y medidas derivadas del Programa Delta son incluidas dentro del Plan Nacional de Agua del país y puestas en marcha en los programas de estudio de infraestructuras costeras y de los sistemas de protección de la costa, formando una parte activa dentro de EcoShape. En la última versión del programa (Programa Delta 2014) entre las conclusiones presentadas se encontraban, entre muchas otras, la necesidad de estudio de la gestión de los desastres naturales y de refuerzo de los diques y una propuesta de gestión de la arena de las playas basada en la conservación de territorio.

Por último presentamos una gran apuesta para la ingeniería de costas, como es el proyecto THESEUS (*Innovative Technologies for Safer European Coasts in a Changing Climate*). Es un proyecto fundado por la Comisión Europea y formado por la alianza entre 31 institutos y universidades, encontrándose la Universidad de Cantabria entre ellas. El objetivo es el de desarrollar durante cuatro años (empezando en 2009) una metodología que incluya una evaluación del riesgo, estrategias de defensa de los procesos de erosión e inundación que garantice la protección de la costa manteniendo el buen estado de los ecosistemas y la posterior aplicación de las estrategias. Para ello están llevando a cabo diversos proyectos de estudio que poco a poco aporten experiencia y resultados en este ámbito.

La finalidad de la evaluación del riesgo es desarrollar herramientas que estimen los posibles escenarios de riesgo por causa del cambio climático, aportar información sobre la vulnerabilidad y resistencia de los sistemas de defensa y evaluar los daños económicos y sociales derivados de las inundaciones. El propósito de las estrategias de defensa es el de analizar las últimas propuestas de medidas de defensa, proponer soluciones innovadoras que minimicen los impactos ambientales, evaluar los sistemas naturales como alternativa a los sistemas artificiales y desarrollar políticas sociales y planes de recuperación de catástrofes naturales. Por último, definir la aplicación de estas estrategias tiene como objetivos establecer pautas para una correcta implantación de las alternativas, desarrollar y “guías” de selección de la solución más adecuada y estrechar la cooperación internacional para poder actuar conjuntamente para en la toma de soluciones para la protección de la costa.

Entre los proyectos desarrollados por THESEUS se encuentra el estudio y seguimiento de “El Puntal” de la bahía de Santander, una masa de arena que se extiende a lo largo de 2.5 km y situada en el interior de la bahía, mitigando la energía del oleaje.

El Puntal muestra dos tipos de respuesta al oleaje del mar Cantábrico distintos, habiendo desarrollado en la parte este y central una playa de pendiente suave que mitiga el oleaje gracias al asomeramiento con el fondo y una playa de pendiente fuerte en la parte oeste, que mitiga el oleaje mediante la reflexión.



Ilustración 28 - El Puntal de Santander



Ilustración 29 - Terreno ganado al mar

La expansión de la ciudad de Santander hacia el mar hace dos siglos y el dragado del canal de navegación produjo cambios en las mareas que han afectado al Puntal desde entonces, modificando su estructura y provocando inundaciones periódicas que lo van erosionando poco a poco. THESEUS ha equipado a la bahía de cámaras que registran los niveles de la línea de costa, de inundación y del run-up producido en las infraestructuras de la zona. Esta información es utilizada para verificar las predicciones hechas mediante simulaciones y para el seguimiento de los sistemas de defensa de los impactos naturales implantados en la bahía, entre los que se encuentran la restauración de los bancos de arena del Puntal y de las playas de la zona.

8 Metodología de proyecto

El objetivo que se defiende en este trabajo es el del éxito de los sistemas naturales para la protección de la costa, pero éste dependerá de las condiciones del ecosistema, que favorecerá o no la viabilidad de esta alternativa.

El proyecto THESEUS propone una serie pautas a seguir para llegar a una correcta elección de la solución para la protección de la costa:

1. Recoger información sobre las alternativas existentes, de resultados de proyectos anteriores y de los métodos de mitigación de las dinámicas naturales y hacer una valoración del riesgo en la zona de estudio en el escenario actual, en escenarios futuros derivados del cambio climático y del aumento de las dinámicas extremas y valorar la vulnerabilidad de la zona.
2. Desarrollar propuestas innovadoras de defensa de la costa que incluyan varios procesos de defensa y predecir los resultados mediante modelos numéricos.
3. Valorar las capacidades de protección de los sistemas naturales y la posibilidad de gestión y restauración de los ecosistemas. Analizar las características del ecosistema y predecir los impactos en el mismo derivados de la implantación del sistema de defensa.
4. Evaluar las consecuencias de los impactos naturales a nivel social y económico y en la rapidez de recuperación, estableciendo programas de evacuación y de la posterior actuación.
5. Identificar las opciones de mitigación de las dinámicas existentes y valorar la respuesta de los proceso ante distintas magnitudes de impacto. Seleccionar la estrategia de defensa y valorar el uso de tecnologías que no tengan consecuencias sobre el medio ambiente.
6. Difusión del proyecto.
7. Coordinación del trabajo, obtención de la financiación y gestión legal del proyecto.

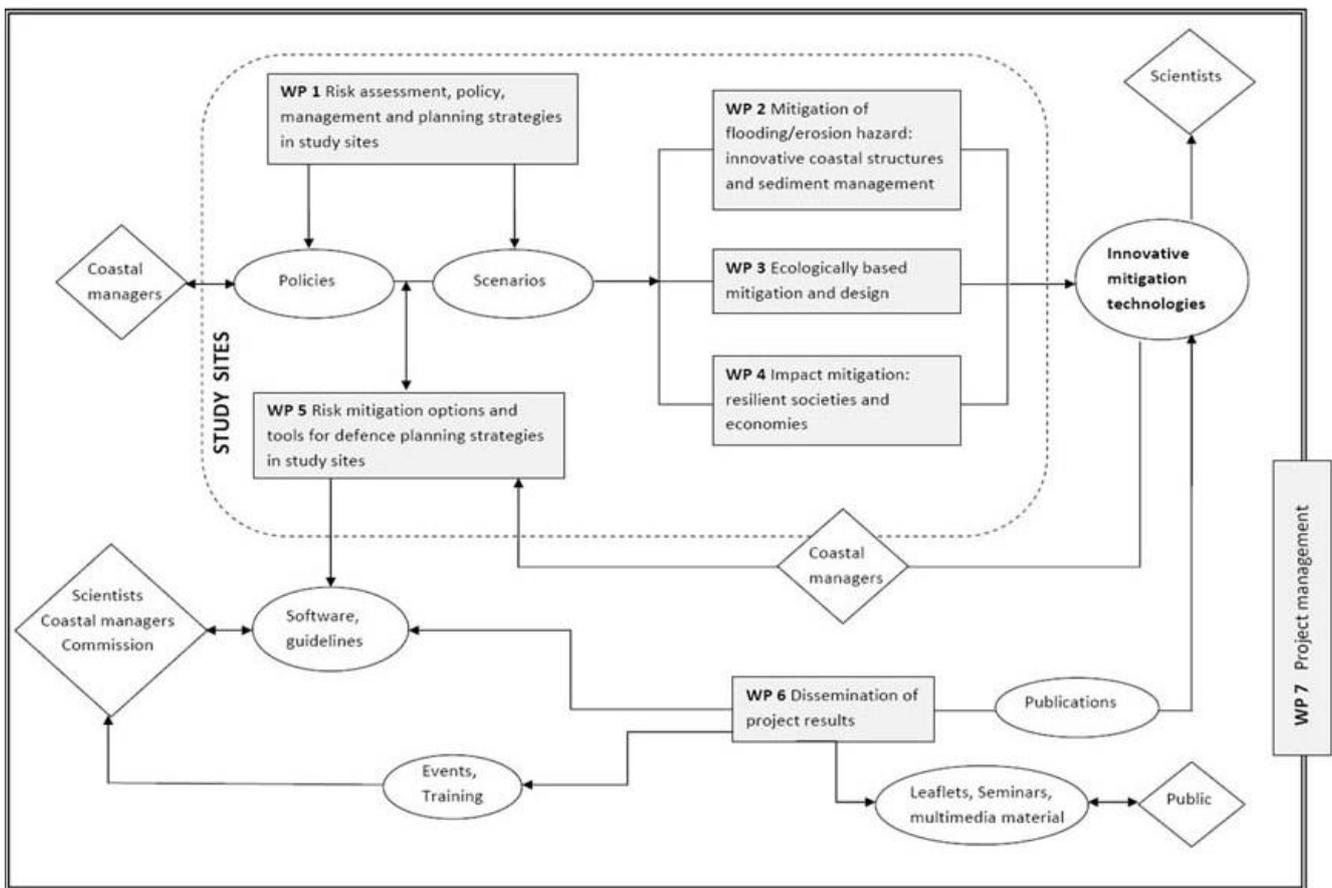


Ilustración 30 - Metodología de proyecto (THESEUS)

Para determinar si un ecosistema está capacitado para participar en las labores de protección, es necesario evaluar el comportamiento del mismo en condiciones de temporal y la continuidad del rendimiento del ecosistema en un terminado horizonte de tiempo, que deberá ser al menos igual a la vida útil de la infraestructura equivalente (22). Entre los factores que determinan el valor de los ecosistemas para la protección de la costa se encuentran aquellos que influyen en los procesos de atenuación de las olas, minimización del riesgo de inundación y sedimentación. Como cada ecosistema atenúa la energía del oleaje de una manera, cada uno dependerá de distintos factores. En las praderas submarinas los parámetros determinantes en el grado de protección son la densidad y altura del conjunto de plantas, características naturales condicionadas por el entorno y la estación, mientras que los corales al ser estructuras físicas más resistentes no están tan influenciados y presentan un comportamiento más regular. Dependiendo de la región las estaciones (invierno, verano, otoño y primavera) afectarán más o menos a las características de la vegetación, pudiendo

llegar a reducir total o parcialmente las estructuras de las plantas en el invierno de las zonas con temperaturas cambiantes. Durante estos periodos la vegetación no dispondrá de la estructura necesaria para garantizar la protección de la costa pero estará presente igualmente a través de los procesos de sedimentación y regulación del fondo marino, atenuando las dinámicas del oleaje. Resultados provenientes de diferentes estudios reflejan que los ecosistemas rígidos son más eficientes que los flexibles en la atenuación del oleaje y que cuanto más por encima del nivel del mar y más cerca esté el sistema natural de la costa, mayor será el grado de protección de la misma (22). Los ecosistemas flexibles como las praderas submarinas se doblan bajo las corrientes, perdiendo efectividad frente a los ecosistemas rígidos, que permanecen estables. Un sistema situado en la zona alta de las mareas (más cercano a la costa) reduce más energía que uno situado en la zona baja pero esto no significa que estos últimos no protejan la costa; sin su presencia las dinámicas naturales llegarían a los ecosistemas de la zona alta con una intensidad demasiado grande para ser asimilada.

La protección de la costa ofrecida por los ecosistemas variará con la magnitud de la dinámica natural y en función del tipo de sistema natural. Cada ecosistema reacciona de una manera distinta al ser intensificada la energía del oleaje, pudiendo llegar incluso a aumentar los efectos de la misma. En situaciones fuertes de oleaje sistemas naturales como las praderas submarinas no disipan energía alguna, por lo que al realizar el estudio de la región se deberán tener en cuenta las hidrodinámicas naturales presentes.

Por tanto, para que un sistema natural proporcione protección a la costa deberá mantener la cantidad de vegetación durante todo el año (para garantizar la disipación del oleaje) o en su defecto, mantener la suficiente vegetación para poder estabilizar el fondo marino (22).

La cantidad de espacio disponible en la región costera a analizar también es un parámetro decisivo, ya que a mayor intensidad del oleaje se necesita una mayor superficie de sistema natural.

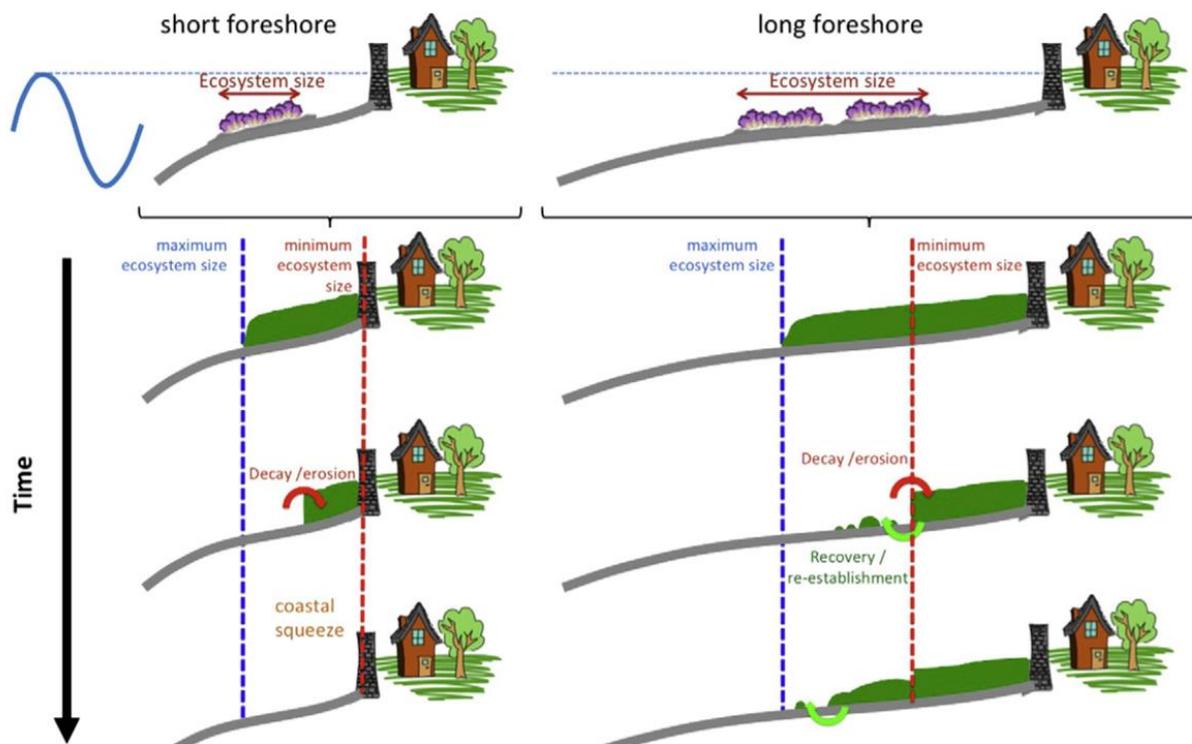


Ilustración 31 – Comparación consecuencias a largo plazo según la superficie disponible de costa (22)

Como refleja la figura, la superficie de la costa condiciona el tamaño del sistema natural y por tanto el grado de protección de la costa. En una costa de gran superficie el sistema natural tiene espacio para desarrollarse completamente, pudiendo hacer frente a las dinámicas naturales de manera efectiva, proporcionando a la costa un grado de protección óptimo y una erosión del sistema de índice bajo. Sin embargo, para un espacio de desarrollo reducido, el ecosistema se desarrolla a medias, proporcionando un grado de protección bajo y presentando poca defensa frente a la erosión causada por las dinámicas, por lo que el sistema se degrada rápidamente.

Estamos valorando los sistemas naturales como alternativa frente a los sistemas artificiales, por lo que además de proporcionar un grado de protección de la costa igual o mayor, deben garantizarlo a largo plazo, al igual que hacen las infraestructuras. Los sistemas artificiales son estructuras diseñadas como permanentes durante su vida útil, y por tanto son diseñados para ser fiables durante la misma (fijada normalmente en 20-50 años) y para un oleaje de diseño

caracterizado por un periodo de retorno determinados a partir de datos existentes (condiciones climáticas e hidrológicas, características ecológicas...). Asimismo se puede integrar en su diseño cómo van a cambiar dichas condiciones debido al cambio climático mediante el uso de proyecciones climáticas.

Como ya hemos mencionado, los ecosistemas son sistemas dinámicos, capaces de adaptarse progresivamente a unas condiciones cambiantes del entorno. Un aumento del nivel del mar debido al cambio climático condicionará los sistemas naturales, ya que al aumentar la profundidad del agua muchos ecosistemas se verán afectados y aquellos que necesiten de pequeñas profundidades deberán “migrar” hacia la costa si disponen del espacio suficiente o regular el fondo marino mediante la sedimentación, manteniendo el calado del agua constante. Un aumento en la frecuencia y en la magnitud de las tormentas es otra consecuencia derivada del cambio climático, por lo que se producirán más eventos con dinámicas extremas con mayor frecuencia. Al carecer de la capacidad de predicción de las características de estos sucesos y de la respuesta a ellos de los ecosistemas se toma como referencia para garantizar el desarrollo continuado de los ecosistemas el tiempo necesario que necesitan para su recuperación después de ser expuestos a una dinámica extrema. Este concepto es conocido como “*Critical Slowing Down*” e indica que el tiempo que necesita un ecosistema para recuperarse es inversamente proporcional al estado de salud del sistema, por lo que para un mayor tiempo de recuperación mayor es el estado de declive del ecosistema (22).

Sin embargo el hombre puede introducir cambios futuros en la estructura de los ecosistemas, cambios a los que no se pueda adaptar y por tanto no sea capaz de cumplir con la protección requerida de la costa. Parece razonable deducir que, a pesar de la incertidumbre existente en el desarrollo de los ecosistemas, estos se adaptarán a las diferentes características del entorno si cuentan con el espacio y el tiempo necesarios y no se han introducido cambios que rompan la estructura del ecosistema.

Si la región costera carece de las características necesarias para el desarrollo de un sistema natural, ya sea por la falta de espacio o por la magnitud de las dinámicas naturales, la posibilidad de una alternativa basada en la ingeniería híbrida está presente. Como ya hemos representado con ejemplos en el apartado reservado a la eco-ingeniería, las soluciones de

ingeniería convencional pueden ser implementadas permanente o temporalmente como solución a la imposibilidad de usar un sistema natural o como ayuda al desarrollo de los ecosistemas, protegiéndolos de las dinámicas naturales de gran intensidad hasta que el sistema alcance el estado de madurez necesario.

Al valorar la posibilidad de introducir cambios artificiales en el ecosistema deben ser estudiados los hábitats existentes originalmente, ya que al implantarse una estructura de materiales distintos a los existentes en el ecosistema y al afectar a las características hidrodinámicas del entorno la supervivencia de las especies puede verse perjudicada. Las infraestructuras reducen la transición suave existente entre las aguas costeras y las aguas más profundas de decenas a unos pocos metros, provocando la desaparición de especies, ya que aquellas especies habituadas a una pendiente suave del fondo no sobreviven en aguas sometidas a dinámicas más fuertes. Sin embargo, las estructuras pueden verse colonizadas de manera involuntaria, ocasionando una vez más cambios en el ecosistema original. La invasión indirecta de las estructuras puede ser evitada alejando los sistemas artificiales de puertos y rutas frecuentadas, además de evitar la construcción excesiva de infraestructuras y potenciar el movimiento de las corrientes en las zonas más cercanas a la costa del sistema artificial (23). Para procurar perjudicar al ecosistema original lo mínimo posible las características del sistema artificial deben ser análogas a las del hábitat natural. La infraestructura debe estar constituida por materiales existentes en la región y debe mimetizarse en el entorno dentro de lo posible. Se incluirán en el proceso constructivo de la estructura artificial las imperfecciones y depresiones naturales de las rocas de la zona, ya que en estos detalles suelen proliferar comunidades de especies. Las zonas más ricas en biodiversidad son aquellas situadas cerca de la costa, en la zona intermareal baja, por lo que se preferirá situar la infraestructura en esta zona (23).

Por último, toda infraestructura está condicionada a las labores de mantenimiento, que suponen interferir en el equilibrio del ecosistema con el sistema artificial cada cierto tiempo y con un coste determinado, por lo que al hacer el estudio de implantación del sistema en el ecosistema estos procesos a largo plazo se deberán tener en cuenta los mismos criterios que en la construcción de la estructura.

9 Simulación avanzada de los procesos de disipación del oleaje

Para poder fundamentar los argumentos defendidos a lo largo del trabajo a favor del uso de los sistemas naturales como elementos de protección de la costa alternativos o compatibles con estructuras convencionales, hemos modelizado varias situaciones de oleaje en las que se ha estudiado la disipación de la energía de los sistemas naturales y artificiales y en las que se han modificado distintos parámetros para poder deducir aquellos factores que influyen más en los procesos de protección de la costa.

El programa utilizado ha sido el IH-2VOF (*Volume Of Fluid*), un programa desarrollado y por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria que permite simular la interacción del oleaje con estructuras artificiales y naturales ante diferentes condiciones de oleaje y nivel. El modelo numérico resuelve las ecuaciones bidimensionales de Navier-Stokes promediadas según Reynolds para resolver la turbulencia. Asimismo, el modelo incluye la solución del flujo en un medio poroso, necesario para resolver la interacción del oleaje con un dique de materiales sueltos.

El flujo en el medio poroso se calcula mediante la resolución de las VARANS (*Volume-Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes*), que viene de la integración de las ecuaciones de Navier-Stokes con el promedio de Reynolds (RANS) en un volumen de poros determinado. El tamaño del volumen medio es más grande que el tamaño característico de un poro pero más pequeño que la escala característica de longitud del flujo. Esto facilita la simulación del flujo a través de un medio permeable sin tener que caracterizar geométricamente cada una de las piedras que lo componen.

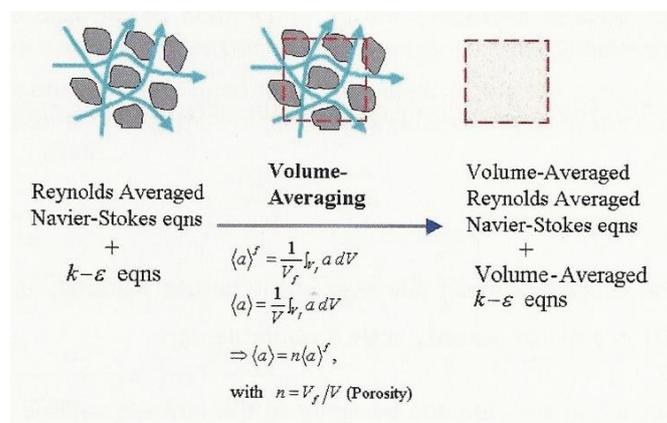


Ilustración 32- Aproximación del medio poroso (Manual del Ih-2VOF)

Para cuantificar el flujo en el medio poroso se define el número de Reynolds del poro:

$$Re_p = \frac{D_{50}|U|}{\nu}$$

Donde D_{50} es el diámetro medio equivalente del material poroso, ν es la viscosidad cinemática del fluido y $|U|$ es la velocidad alrededor del poro.

En el anexo se encuentran los extractos del Manual del IH-2VOF que contienen el desarrollo matemático utilizado por el modelo.

Este modelo es uno de los más avanzado para esta aplicación dado que resuelve las ecuaciones generales de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento sin tener que hacer uso de las simplificaciones necesarias para aplicar modelos basados en teoría de ondas. Esto últimos se basan en teoría de flujo potencial por lo que la rotura y la fricción del oleaje con los diferentes medios debe simularse de manera empírica mediante formulaciones paramétricas obtenidas en laboratorio. Dado que la interacción del oleaje con sistemas de defensa naturales y artificiales está dominada por la disipación debida a la fricción y la rotura, IH2-VOF, aunque es más complejo, reduce considerablemente las hipótesis simplificativas favoreciendo unos resultados mucho más realistas y con clara aplicación al diseño.

El objetivo de las simulaciones realizadas es evaluar en qué condiciones los sistemas naturales pueden cumplir con la función de defensa de la costa de manera equivalente a un sistema artificial. Para ello hemos representado una playa con dos posibles sistemas de defensa, un sistema natural formado por una pradera submarina y un sistema artificial formado por un dique, de características geométricas equivalentes al ecosistema.

Se han caracterizado distintas situaciones del oleaje para poder estudiar la respuesta de los sistemas ante varias dinámicas naturales:

1. Variación de la altura de ola significativa para un mismo periodo del oleaje.
2. Variación de la altura de ola significativa y del periodo del oleaje.
3. Variación de la densidad del conjunto de plantas de la pradera submarina, variando también las características del sistema artificial.
4. Variación de altura de la pradera submarina y del dique.

Con ello, no sólo se han considerado diferentes estados de mar sino también el efecto que la geometría de las estructuras y praderas y sus condiciones intrínsecas tienen sobre la propagación del oleaje.

Se ha elegido el ecosistema de las praderas submarinas como sistema natural de referencia al ser considerado como una opción viable, tanto en términos de crecimiento como de restauración. Forman una estructura flexible, por lo que como ya hemos mencionado en casos extremos de oleaje puede que no cumplan con la eficacia requerida. Los parámetros que condicionan este sistema y que son introducidos dentro del programa para su representación son la anchura de la planta, la densidad del conjunto de plantas, la longitud y la altura del sistema (modelo en dos dimensiones) y el coeficiente de arrastre.

El coeficiente de arrastre es un número adimensional que, para nuestro caso de estudio, cuantifica la resistencia que ofrece una planta al flujo. Varía en función de la velocidad, la dirección del flujo, la posición y tamaño de la planta y la densidad y viscosidad del agua. Vamos a suponer que el coeficiente de arrastre depende solamente de la velocidad, la viscosidad cinemática y la escala de longitud característica de la planta, quedando el coeficiente en función del número de Reynolds, calibrado según (24), siendo éste un parámetro importante ya que define el comportamiento del fluido y la transición del flujo laminar al turbulento.

$$C_d = \alpha + \left(\frac{\gamma}{Re}\right)^\beta \quad C_d = 0.87 + \left(\frac{2200}{Re}\right)^{0.88}$$

Donde α es el coeficiente lineal de fricción y β el coeficiente no lineal, dependiendo ambos del diámetro equivalente medio del medio poroso y de la porosidad.

El número de Reynolds de la vegetación depende de la anchura de la planta b (que fijaremos en 0.01 m), de la viscosidad cinemática del agua ($\nu = 10^{-6} \frac{m^2}{s}$) y de la velocidad característica de la ola, u_c , que es calculada en función de la teoría de ondas.

$$Re = \frac{bu_c}{\nu}$$

Donde H_s es la altura significativa de la ola

T el periodo del oleaje

$$u_c = \frac{\pi H_s \cos(kl_s)}{T \sin(kh)}$$

h el calado

l_s la altura de la planta

b la anchura de la planta

k un parámetro en función de todas las variables

El dique sumergido diseñado tiene un área equivalente a la superficie ocupada por la vegetación (hablamos siempre de la sección transversal, al ser un modelo en dos dimensiones) y son las características del medio poroso las que varían para ser equivalentes a la vegetación. Los parámetros del medio poroso están caracterizados por los coeficientes lineal y no lineal de fricción, la porosidad, el diámetro medio equivalente del medio poroso y el coeficiente de masa añadida, que experimentalmente es la masa añadida dividida por la masa total de fluido desplazada por la superficie propulsora.

La batimetría de la playa tiene una longitud de 200 metros, una pendiente de 1:30 y un calado igual a 5 metros.

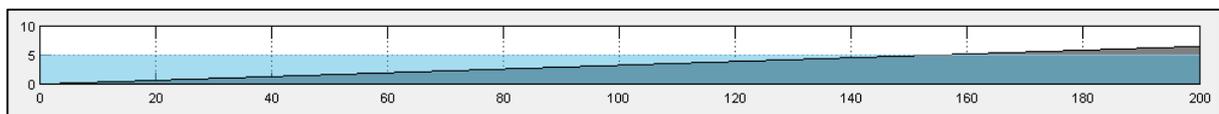


Ilustración 33 - Batimetría de la playa

La precisión del programa depende de la malla que sea impuesta para discretizar la batimetría de la playa. Como a mayor precisión, mayor duración de la ejecución del modelo (del orden de 3 días por simulación), las mallas se han diseñado en función de la altura de ola, necesitando más precisión un modelo con una altura de ola igual a 0.2 que un modelo con 2 m de ola.



Ilustración 34 - Mallaje del modelo

Para poder cuantificar la disipación de energía del oleaje para cada sistema de defensa hemos representado la altura de ola significativa a lo largo de la playa, utilizando sensores cada 15 metros (para x igual a 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180 y 195 metros).

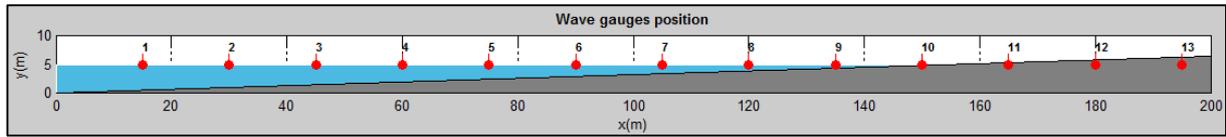


Ilustración 35 - Representación de los sensores

Podemos obtener la altura que tiene la ola a lo largo de los 2000 segundos que dura la simulación (3600 segundos es el tiempo que tarda una ola en cubrir un ciclo completo, por lo que se consideró que 2000 segundos cubren un intervalo de tiempo representativo) en aquellos puntos en los que está situado un sensor.

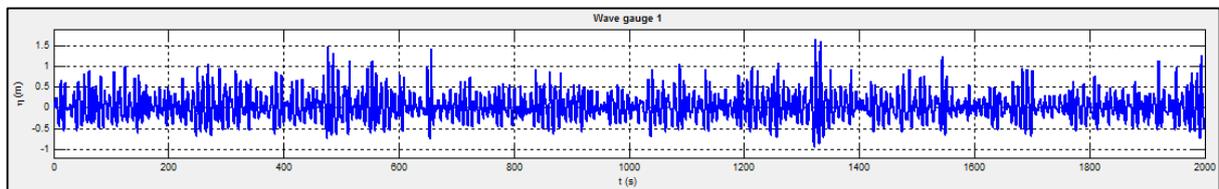


Ilustración 36 - Variación de la altura de ola a lo largo de la simulación

Como ya hemos mencionado, el parámetro usado como referencia para la medida de la disipación de energía es el de la altura de ola significativa, definida como la media aritmética del tercio de olas más altas registradas en el muestreo. El programa nos devuelve todas las alturas de la ola en un documento de texto, por lo que para interpretar los resultados hemos utilizado el programa de cálculo Matlab, que al introducir todos los datos y mediante la programación de varias funciones nos permite obtener de manera directa la altura de ola significativa para cada sensor.

El programa simula un sistema de vegetación en el modelo pero todavía no está diseñado gráficamente para ello, por lo que la definición de los parámetros del sistema natural se precisa directamente en el input del modelo, introduciendo los factores antes enumerados del coeficiente de arrastre, la anchura de la planta, la densidad del conjunto de plantas, la longitud y la altura del sistema.

Sin embargo sí podemos ilustrar gráficamente la estructura del dique en la batimetría de la playa, quedando definido el sistema natural al hacer la malla del modelo.

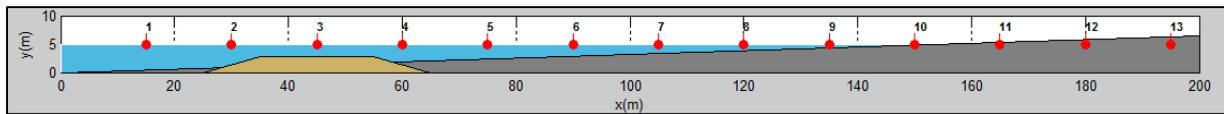


Ilustración 38 - Sensores en el dique



Ilustración 37 - Malla del dique

Las dimensiones del dique dependen de las dimensiones tomadas para el conjunto de la vegetación pero la pendiente considerada en la estructura artificial será de 3:10.



Ilustración 40 – Geometría del dique



Ilustración 39 – Geometría de la vegetación

Al realizar el estudio de vulnerabilidad de una playa se analiza el grado de protección que se necesita para poder defender a la población y a las infraestructuras de las dinámicas naturales. Para poder conocer primero la dispersión del oleaje generada por la playa hemos generado el modelo sin ningún sistema de defensa, por lo que la disipación de la energía del oleaje existente es debido a la rotura sobre la pendiente de la batimetría, ya que la playa modelo ha sido diseñada como un obstáculo, sin tener en cuenta su rugosidad.

En esta primera situación se analiza la respuesta de la playa ante un oleaje con un periodo de 8 segundos y unas alturas de ola de 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 y 2 metros.

Debido a la gran disipación de la dinámica natural por rotura el oleaje que llega a la playa es muy limitado dando lugar a un run-up pequeño en la playa. No obstante el objetivo de estas representaciones no es el de garantizar la seguridad de esta playa en concreto, sino el de comparar la defensa ejercida por los ecosistemas y las infraestructuras, para poder dar valorar la posibilidad de utilizar los sistemas naturales en la protección de cualquier costa.

Para ello, analizamos primero el efecto de la variación del oleaje en función del periodo y de la altura de ola calculando el porcentaje de altura disipado por la vegetación en comparación con la producida por la playa. El recuadro naranja dispuesto entre los 30 y los 60 metros del eje horizontal de la costa representa la vegetación, un rectángulo de dimensiones 30 por 3 y con una densidad de 760 plantas por metro cuadrado (se consideró establecer una densidad importante para que el sistema natural pudiera hacer frente al oleaje con las alturas de ola altas).

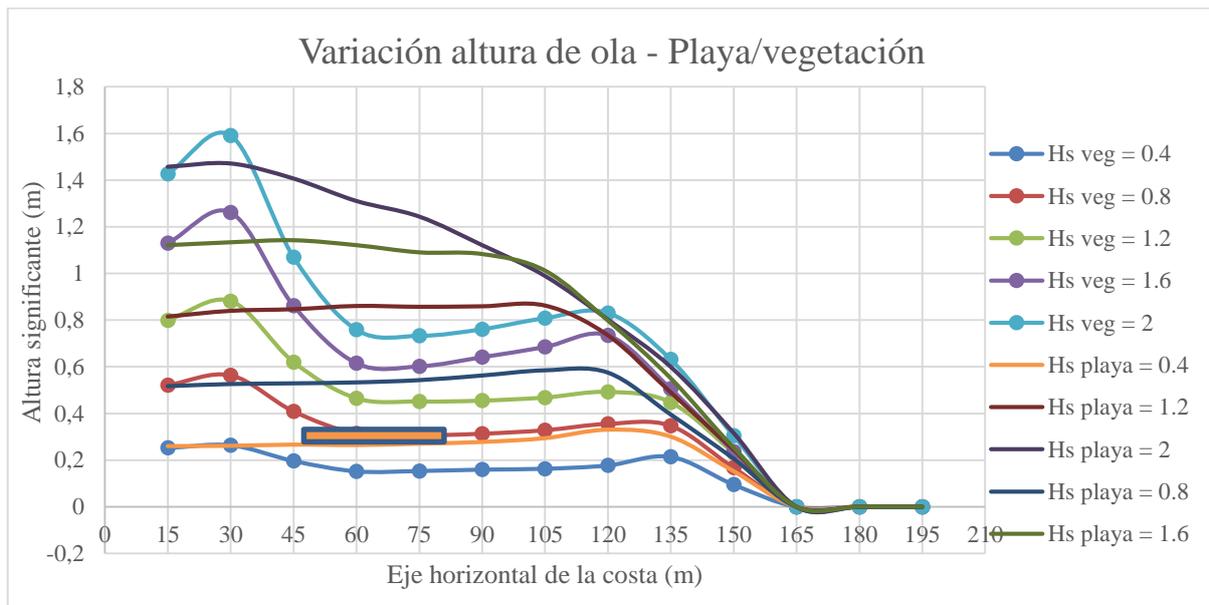


Gráfico 2 - Comparación vegetación y playa de la variación del oleaje

Se pueden diferenciar perfectamente los dos tipos de respuesta, siendo la divergencia entre las alturas de ola de las dos situaciones más grande para los casos más extremos.

Para los casos con presencia de la vegetación se comprueba que el campo de posidonia funciona como un filtro para el oleaje. Cuando el oleaje llega al borde de la vegetación se asomera ligeramente en todos los casos produciendo un aumento de la altura de ola que provoca inmediatamente un gran gradiente de disipación como suma del efecto de la rotura y de la fricción con el campo de vegetación. Las olas que salen del campo de vegetación se

siguen propagando hacia la costa con una altura prácticamente constante hasta que alcanzan el límite de rotura impuesto por la relación altura de ola-profundidad.

El siguiente gráfico de columnas acumula los porcentajes de disipación de la altura de ola significativa por parte de la vegetación en comparación con las alturas disipadas por la playa, representando los cinco casos de altura de ola significativa estudiados para cada sensor, empezando por la altura de ola igual a 0.4 m a la izquierda del gráfico con el azul oscuro y terminando a la derecha con la altura de ola igual a 2 m en azul claro.

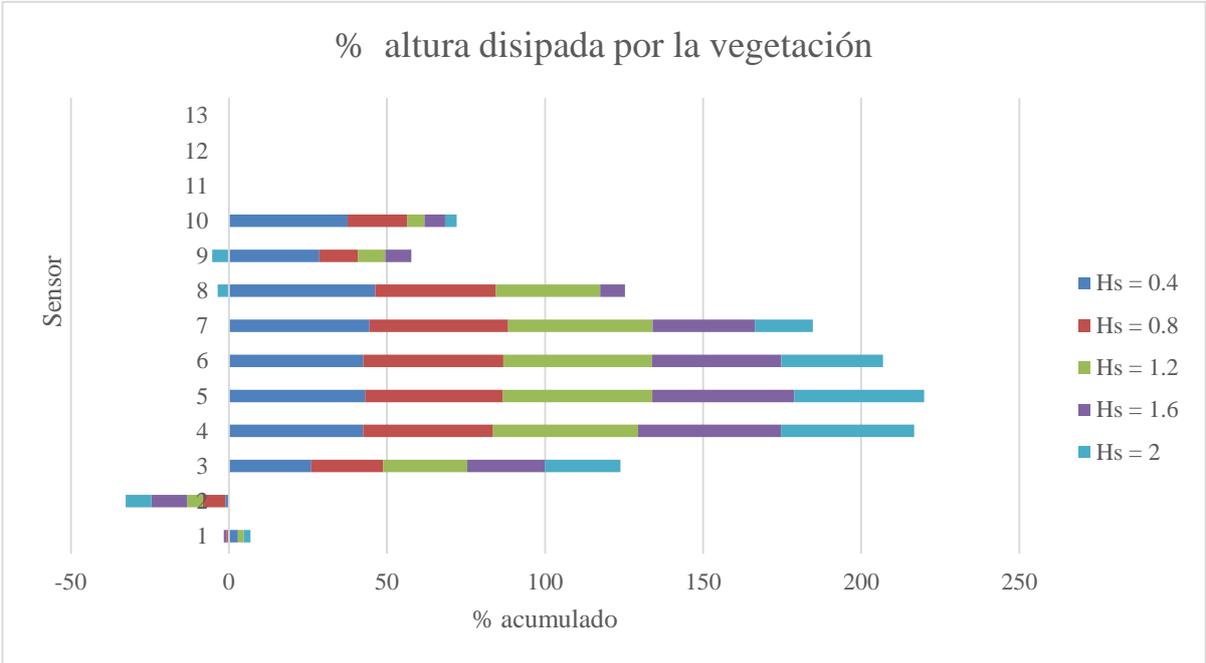


Gráfico 3 - Porcentaje acumulado de la disipación ejercida por la vegetación

Observamos que es en el segundo sensor (para x de la playa = 30) el único momento en el que no se disipa energía, produciéndose el primer contacto del oleaje con la vegetación y por tanto aumentando un poco la altura de las olas como consecuencia del obstáculo, que reduce el área transversal disponible. A lo largo de la playa la altura de ola disipada gracias al sistema natural es entorno a un 40 %, reduciéndose este porcentaje al 10-20 % a medida que la altura de las olas va disminuyendo y la altura de la batimetría aumentando y por tanto aproximándose el momento de rotura de las olas.

En el siguiente gráfico se compara la respuesta de la vegetación y la del dique ante la variación de las alturas significantes para un mismo periodo ($T = 8$ segundos), mismo caso que los mostrados anteriormente para el modelo de la playa sola o playa y vegetación. Aquí el recuadro naranja dispuesto entre los 30 y los 60 metros del eje horizontal de la costa representa el sistema de defensa, la vegetación con las características y geometría antes mencionadas y el dique un trapecio de base superior e inferior igual a 20 y 40 metros, respectivamente. Las líneas con marcadores pertenecen a la variación de altura de ola de la pradera submarina y las líneas simples conciernen al dique artificial.

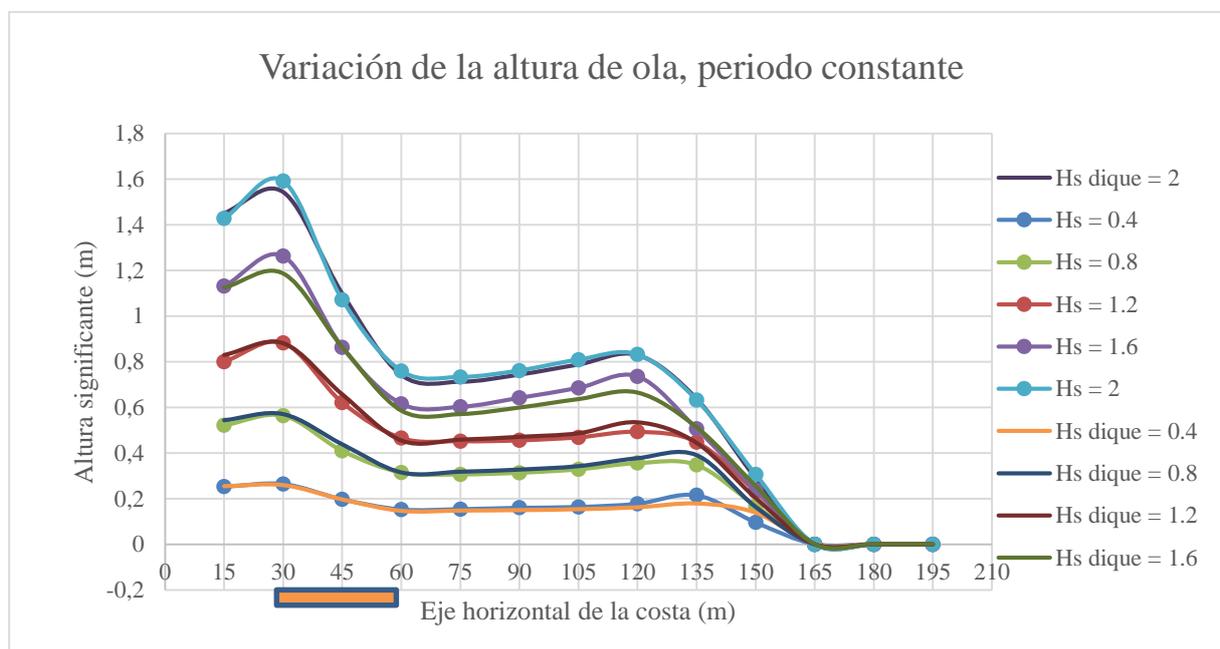


Gráfico 4 - Variación del oleaje en función de la altura de ola para la situación de dique o de vegetación

La mayor disipación de energía del oleaje se da cuando la altura de ola es igual a 2 metros, siendo de las situaciones propuestas la más “extrema”. Con la disminución de la altura de ola significativa se va produciendo una homogeneización progresiva del oleaje a lo largo de la batimetría, como mencionábamos antes para el caso de la playa. Del gráfico podemos remarcar el hecho de que el sistema natural de defensa reduce la energía del oleaje a la mitad, quedando reflejado en la altura de las olas para x a partir de 60 metros, que es donde se acaba la vegetación. Así, una altura de ola inicial de 2 metros es reducida a 0.7 metros y posteriormente condicionada por la reducción del calado, que lleva a la rotura.

El gráfico a continuación muestra el segundo caso estudiado, la disipación del oleaje causada por el dique y la pradera submarina para cinco situaciones en función de un periodo y una altura de ola distintos. Se han considerado cinco periodos entre 5, 6, 7, 8 y 9 segundos y cinco alturas de ola respectivas de 0.425, 0.65, 0.875, 1.1 y 1.325 metros. La pradera submarina tiene de dimensiones 3 por 30 metros y una densidad de 360 plantas por metro cuadrado.

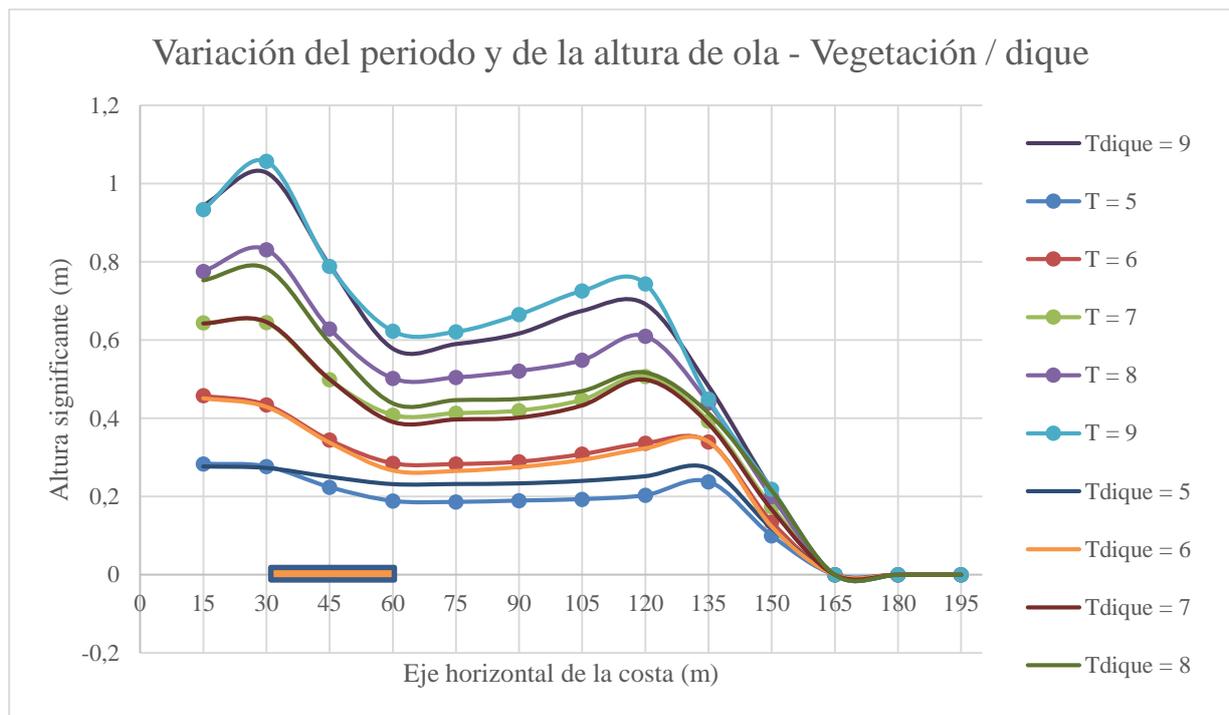


Gráfico 5 - Variación del oleaje en función del periodo y la altura de ola para la situación de dique o de vegetación

Las respuestas obtenidas son similares a las recogidas del caso de tener un mismo periodo y cambiar la altura de ola significativa del oleaje. Para este gráfico, podemos observar la semejanza de los resultados entre las situaciones, teniendo incluso una respuesta equivalente para los casos de los periodos de 6 y 7 segundos. Para el periodo de 5 segundos se puede apreciar una disipación del oleaje más eficaz en el sistema natural, proporcionando el dique una minoración mayor del oleaje para los periodos de 8 y 9 segundos.

El tercer caso estudiado supone la variación de la densidad de la población, con unos valores entre 1000 y 100 plantas por metro cuadrado. Las praderas submarinas son un ecosistema que depende de las características físicas de las plantas que las forman para determinar el

grado de protección que pueden ofrecer. Para una mayor densidad del conjunto de plantas, el oleaje estará sometido a una fricción mayor, por lo que se disipará más cantidad de energía. Si bien en el gráfico para las alturas del dique está indicado el valor de la densidad, para el dique se han impuesto valores porosos equivalentes a cada densidad, la leyenda tiene ese formato para simplificar la lectura.

En esta situación se ha fijado un oleaje de periodo igual a 6 segundos y una altura de ola significativa igual a 1.5 metros, manteniendo las dimensiones de la vegetación y del dique de los dos casos anteriores, de 3 por 30 metros el sistema natural y de 20 y 40 metros las bases del dique.

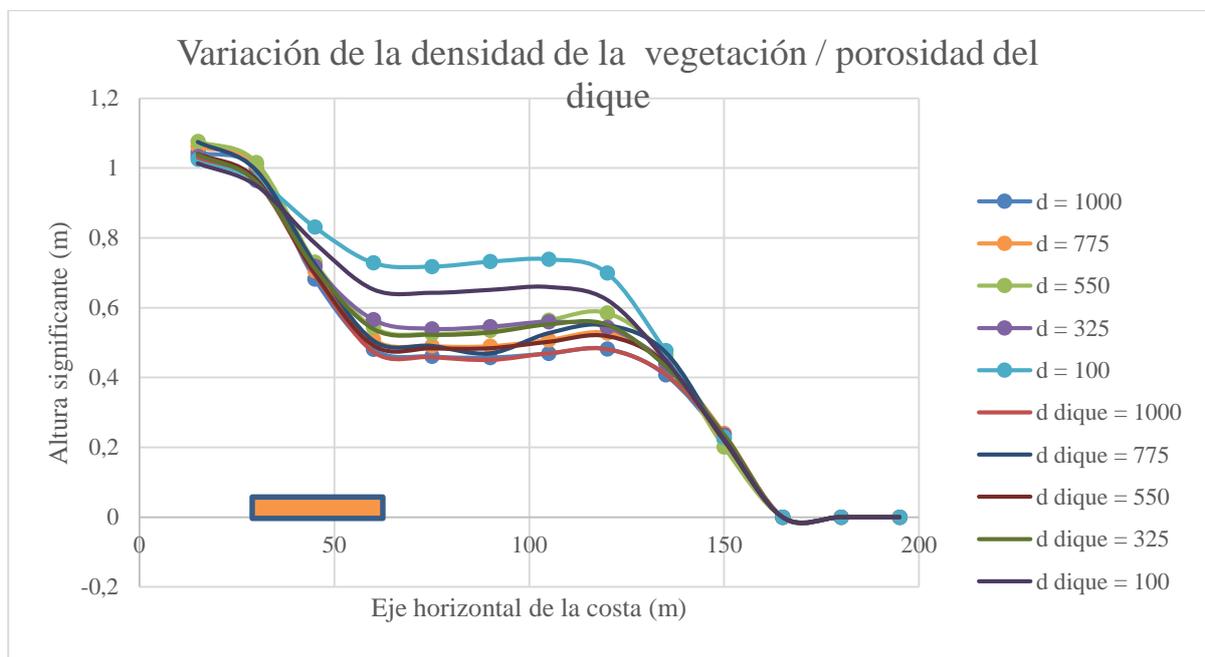


Gráfico 6 - Variación del oleaje en función de densidad o porosidad para la situación de dique o de vegetación

Los resultados obtenidos reflejan una reducida disipación del oleaje para una densidad de 100 plantas por metro cuadrado en comparación con las otras densidades, teniendo el dique una mejor respuesta para esta densidad. Un valor de densidad habitual en las praderas submarinas es de 360 plantas por metro cuadrado, por lo que 100 es un valor bastante bajo. Por lo demás, sí se observa una disminución mayor del oleaje para las densidades superiores pero la diferencia no es especialmente significativa, por lo que de este caso podríamos concluir que el valor ideal medio de densidad de una vegetación, que produce una buena fricción, no tiene por qué ser un valor alto en extremo.

Finalmente presentamos los resultados del cuarto caso, cinco situaciones con el mismo oleaje pero variando la altura de la vegetación, desde 0.5 hasta 5 metros, para una densidad de 550 plantas por metro cuadrado y para el caso del dique, estableciendo la misma variación de altura que la vegetación y variando el área para establecer la equivalencia de superficies. Consideramos que es el caso que aporta mayor disparidad entre los resultados, ya que en las situaciones anteriores la respuesta era parecida entre ellas. Para el caso más extremo, con una altura del sistema igual al calado (5m), la respuesta del sistema natural es claramente superior a la del dique, pudiendo ser explicada por una de las consecuencias que origina un dique de grandes dimensiones, como es la acentuación del oleaje. Remarcamos el hecho de que cuanto más larga sea la planta (altura del conjunto), mayor angulosidad se produce en la representación gráfica de los resultados.

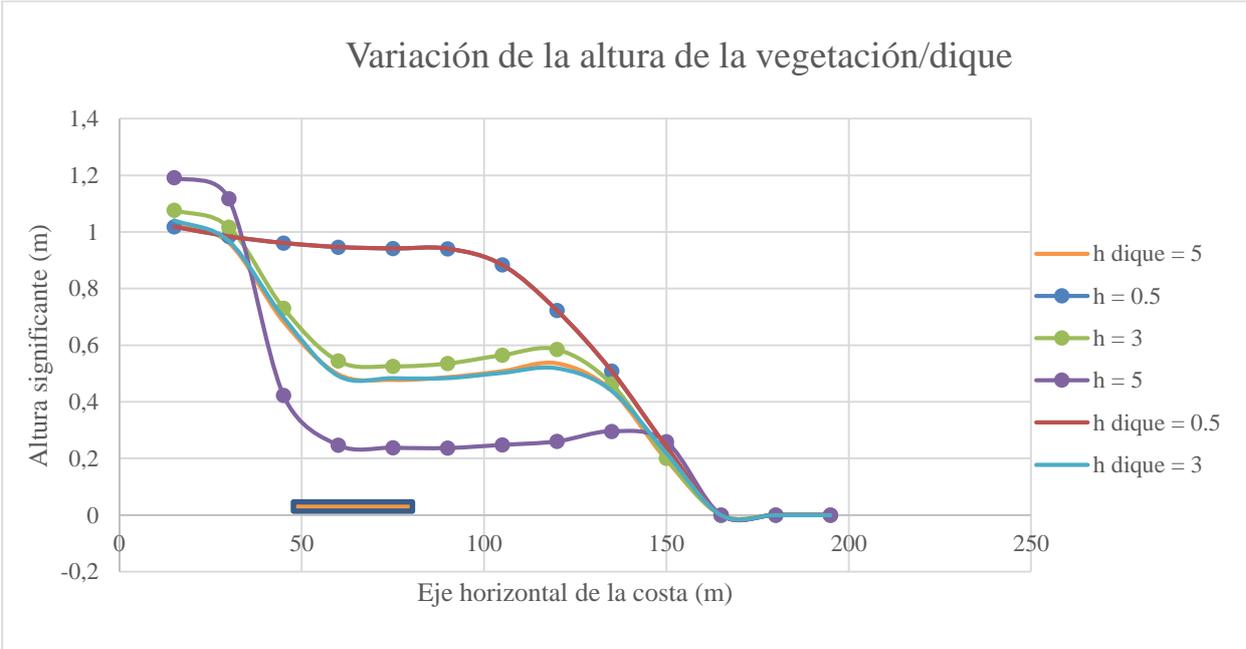


Gráfico 7- Variación del oleaje en función de la altura del dique o de la vegetación

Por tanto, del análisis numérico realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las praderas de vegetación contribuyen a disipar la energía del oleaje incidente con valores que, en algunas circunstancias, puede llegar a ser hasta un 70% del oleaje incidente.
- En función de la posición relativa de la pradera con respecto a la costa, en general, la vegetación funciona como un primer filtro que reduce la altura de ola por la acción conjunta de la fricción y la rotura. Las olas que abandonan la pradera en dirección a la costa se mantienen o asomeran ligeramente hasta que llegan a la rotura por efecto del fondo. Esto redundará en que el *run-up* sobre la playa y la altura de ola se vean reducidos de forma significativa, reduciendo los riesgos de inundación y erosión en la costa.
- Los parámetros fundamentales que controlan el nivel de disipación alcanzado son: la anchura del campo de vegetación, su altura con respecto a la columna de agua, la densidad de plantas y sus características biomecánicas (elasticidad, etc.).
- A mayor anchura, altura con respecto al calado y densidad de plantas, la reducción de altura de ola alcanzada es mayor.
- Los campos de algas o vegetación con características geométricas semejantes a las de un dique artificial de escollera, pueden provocar el mismo efecto, siempre y cuando las características y tamaño de la escollera generen una pérdida de carga equivalente a la debida a las características biomecánicas de la vegetación.
- Si estas características no son equivalentes será necesario extender la anchura o incrementar la altura del campo de vegetación para generar un efecto equivalente al de un dique.

10 Análisis económico comparativo

A lo largo de este trabajo se ha subrayado el uso de los sistemas naturales para la protección de la costa. Ha quedado patente que es una alternativa sólida frente a las soluciones artificiales tradicionales y se ha remarcado la restauración de los ecosistemas como opción más lógica para conseguir la regeneración de los hábitats. Mediante los ejemplos

representados numéricamente hemos simulado la respuesta de un sistema natural y un sistema artificial ante diversas condiciones de oleaje, comprobando que podemos disipar con la misma eficacia la energía de las dinámicas naturales de manera natural.

Los ecosistemas como sistema de defensa de la costa es una solución que si bien ya se ha puesto en marcha en varios países a través de diversos proyectos, todavía se encuentra en la fase inicial de investigación y por tanto quedan muchas lagunas de conocimiento. Hasta ahora las soluciones basadas en ecosistemas han tenido un papel muy limitado dentro de los presupuestos de los países, siendo considerados como un recurso económico en el mejor de los casos, y si de verdad se quiere usar el máximo potencial de los sistemas naturales para la protección de la costa, deberán ser considerados en las cuentas y en la toma de decisiones de cada país. Los ecosistemas juegan un papel importante en la mitigación de las catástrofes naturales y su destrucción o degradación acentuaría los efectos o incluso provocar nuevos desastres (20), afectando directamente a la economía.

A pesar de que el interés por los servicios de protección de la costa es reciente, sí disponemos de algunos datos derivados de las consecuencias ocasionadas por catástrofes naturales. Los humedales aportan una protección importante frente a los huracanes, estimada entre 250 y 51.000 USD por hectárea y año y una defensa frente a las tormentas de 23-32 billones de USD al año. Este valor de los humedales se incrementará a medida que aumente la frecuencia e intensidad de los huracanes como consecuencia del cambio climático.

El valor de protección frente a las tormentas de los manglares está estimado en 30 USD por familia, frente a los 153-74 USD por familia en caso de no existir ninguna protección. La plantación y protección de 12.000 hectáreas de manglares supone 1,1 millones de USD y el ahorro de 7,3 millones derivados de las operaciones anuales de mantenimiento de un dique con capacidades de protección equivalentes (20). Se estima que cada metro cuadrado de arrecife de coral protege propiedades por un valor de 47.000 USD (1).

La TEEB (*The Economics of Ecosystems and Biodiversity*) es una iniciativa global formada con el propósito de remarcar los beneficios aportados por los ecosistemas, recogiendo en artículos resultados económicos derivados de proyectos que plasman en números los argumentos a favor de los ecosistemas.

En el informe de la TEEB dedicado al agua y a los humedales encontramos unos valores estimados de los servicios aportados por cinco grandes ecosistemas (25):

Entre los servicios de aprovisionamiento se encuentran el aporte de nutrientes y agua y el aporte de recursos genéticos, medicinales y ornamentales; los servicios de regulación engloban la influencia en la regulación climática, la moderación de eventos extremos, la regulación del oleaje, la mejora de la calidad del agua, la prevención de la erosión y el control biológico, entre otros; por servicios de hábitat se entiende la protección del ciclo de la vida y de la biodiversidad genéticamente hablando; por último, los servicios culturales recogen valores estéticos y recreativos del ecosistema así como valor a nivel educativo y científico.

Ecosistema	Servicio	Número estimado	Valor mínimo (USD/ha)	Valor máximo (USD/ha)
Arrecife de coral	Aprovisionamiento	33	6	20.892
	Regulación	17	8	33.640
	Hábitat	8	0	56.137
	Cultural	43	0	1.084.809
	Total	101	14	1.195.478
Ecosistema de costa (estuarios, conjunto de rocas...)	Aprovisionamiento	19	1	7.549
	Regulación	4	170	30.451
	Hábitat	2	77	164
	Cultural	7	0	41.416
	Total	32	248	79.580
Manglares	Aprovisionamiento	35	44	8.289
	Regulación	26	1.914	135.361
	Hábitat	38	27	69.795
	Cultural	13	10	2.904
	Total	112	1.995	215.349
Humedales	Aprovisionamiento	34	2	9.709
	Regulación	30	321	23.018
	Hábitat	9	10	3.471
	Cultural	13	648	8.399
	Total	86	981	44.597
Ríos y lagos	Aprovisionamiento	5	1.169	5.776
	Regulación	2	305	4.978
	Hábitat	0	0	0
	Cultural	5	305	2.733
	Total	12	1.779	13.487

Tabla 3 - Valor de los ecosistemas en función de sus servicios (25)

En el informe dedicado al cambio climático se da un paso más y se reflejan los resultados económicos sobre la restauración de nueve grandes ecosistemas, en los que se tienen en cuenta además del coste de los procesos de restauración, los beneficios proporcionados a largo plazo por los ecosistemas, pudiendo estimar relaciones beneficio – coste y tasas de rentabilidad. Si bien ha pasado un tiempo desde entonces (informe presentado en 2009) podemos usar los datos como referencia aproximada para poder tener una idea de la magnitud de los análisis económicos (26).

Ecosistema	Coste restauración (USD/ ha)	Beneficios anuales (USD/ha)	Valor actual neto de los beneficios en 40 años (USD/ ha)	Tasa interna rentabilidad	Relación beneficio - coste
Arrecife de coral	542.500	129.200	1.166.000	7	2,8
Costa	232.700	73.900	935.400	11	4,4
Manglares	2.880	4.290	86.900	40	26,4
Humedales	33.000	14.200	171.300	12	5,4
Lagos/ríos	4.000	3..800	69.700	27	15,5
Bosques tropicales	3.450	7000	148.700	50	37,3
Otros bosques	2.390	1..620	26.300	20	10,3
Matorrales	990	1571	32.180	42	28,4
Praderas	260	1.010	22.600	79	75,1

Tabla 4 - Coste de restauración y relación beneficio-coste (26)

De los datos presentados podemos obtener información importante que servirá como condicionante en la elección del sistema natural a utilizar como método de defensa de la costa. Podemos ver que los ecosistemas más rentables son los bosques tropicales, las praderas y los manglares, siendo el coste de restauración más bajo que los beneficios anuales que se podrían obtener. En el caso de los arrecifes de coral el coste de restauración es muy alto, por lo que económicamente es más rentable la conservación que la restauración de arrecifes degradados. Además, para realizar la estimación de la tasa de rentabilidad y la relación coste-beneficio hay que tener en cuenta otros parámetros, como son la rapidez de crecimiento del ecosistema o la extensión global del mismo. Un arrecife de coral, como ya hemos mencionado varias veces, es una especie protegida que actúa como una medida de defensa sólida y que tiene un ritmo de crecimiento muy lento (entre 3 mm y 1 cm o entre 10 y 20 cm al año, según

el tipo de coral), por lo que tenemos un segundo argumento que respalda la conservación a la restauración o implantación. Pueden cumplir con la función de disipación del oleaje pero a nivel secundario, no son considerados como un sistema de defensa protagonista. Los manglares son una alternativa razonable ya que tienen un ritmo alto de crecimiento, siendo vulnerables solamente el primer año, hasta que se consigue la consistencia de su estructura y puede hacer frente al oleaje.

Esquematizamos a continuación el coste de una serie de rompeolas, dato económico que representa el coste de construcción de la infraestructura o una labor de mantenimiento importante, que podríamos considerar como la equivalente artificial a los ecosistemas que hemos presentado anteriormente, para poder comparar el coste económico de ambas propuestas (27). Los costes corresponden a países en los que se han llevado a cabo iniciativas comparables con sistemas naturales.

Situación	Longitud (m)	Año	Coste original (USD)	Coste en 2012 (USD)	Coste por metro lineal (USD/m)
Sri Lanka	16.000	1994	13.400.000	20.759.511	1.297
Maldivas	1	1997	10.000	14.305	14.305
Haleiwa, Hawai	58	1975	150.000	640.132	11.037
Hilo, Hawai	3.073	1946	1.500.000	17.661.077	5.747
Kalaupapa, Hawai	35	1967	95.000	653.037	18.658
Kawaihae, Hawai	808	1973	6.000.000	31.026.216	38.399
Manele, Hawai	143	1965	742.850	5.414.410	37.863
Nawiliwili, Hawai	152	1959	1.000.000	7.889.828	51.907
Pohoiki, Hawai	27	1979	335.500	1.061.003	39.296
Auasi, Samoa	206	1981	1.166.300	2.945.825	14.300
Aunuu, Samoa	27	1981	2.018.400	5.098.048	188.817
Tau, Samoa	88	1981	2.020.400	5.103.099	57.990
Agana, Guam	221	1977	1.220.550	4.624.273	20.924
Sungai, Malasia	1	2008	428	456	456
Corea	3.000	2010	124.000.000	130.561.214	43.520
Nakhon Si Thammarat, Tailandia	40	2012	180.950	180.950	4524

Tabla 5 - Coste de construcción de un rompeolas (27)

Como podemos ver, el estudio económico de los ecosistemas se valora en coste por superficie, mientras que para las infraestructuras el valor se representa en coste por metro lineal. Con estos datos se pretende dar una visión general de lo que supone una propuesta u otra en

términos económicos, que en el mundo de la ingeniería es el factor principal que marca la elección de la alternativa.

Al realizarse el proyecto de diseño de una estructura se tiene en cuenta el coste de construcción así como los posibles costes de mantenimiento a lo largo de los años, para un periodo de vida determinado. Ya hemos remarcado el hecho de que una infraestructura es un sistema estático, va a cumplir con las funciones para las que está diseñado para unas condiciones determinadas. Los sistemas naturales tienen un coste de restauración alto pero una vez que alcanzan el estado de salud y madurez originales además de cumplir con las funciones de protección tienen una serie de beneficios económicos añadidos de aprovisionamiento, hábitat, regulación y culturales. La incertidumbre proveniente de los efectos que tendrá en cambio climático en los ecosistemas nos anima a buscar soluciones que puedan adaptarse a unas condiciones del entorno cambiantes.

Por tanto, se puede concluir que aunque el retorno de la inversión para soluciones naturales es a más largo plazo, los rendimientos obtenidos por la inversión son altamente competitivos con soluciones artificiales, especialmente si se consideran los otros servicios obtenidos de los sistemas naturales.

11 Conclusiones y líneas de futuro

Se prevé que para 2050 la mitad de la población mundial vivirá en deltas y zonas costeras, por lo que los problemas que afecten a estas regiones amenazarán de manera directa a la sociedad. El cambio climático y las consecuencias que origina son una realidad, por lo que las decisiones tomadas en el mundo de la ingeniería además de solucionar los problemas deben ser capaces de proteger a la población a medida que vayan cambiando las condiciones climáticas y de las dinámicas costeras.

Utilizar soluciones naturales para conseguir nuestros propósitos es trabajar con la naturaleza de manera que tanto la sociedad como el medio ambiente salgan beneficiados. A lo largo de este trabajo hemos descrito los procesos naturales que mitigan la intensidad de las dinámicas naturales y los principales ecosistemas que utilizan estos procesos para cumplir con la función de protección de la costa. La elección del sistema natural depende de las características y

estado del ecosistema y como hemos remarcado, de no ser viable la utilización de un sistema natural existen otras posibilidades en las que intervienen técnicas ingenieriles que también son beneficiosas para el medio ambiente.

Hemos realizado un análisis numérico de un sistema de defensa natural de vegetación, tomando las praderas submarinas como ecosistema de referencia al ser considerado como una opción viable, tanto en términos de crecimiento como de restauración. Dado que este sistema vegetal forma una estructura flexible, tal y como hemos discutido, en casos extremos de oleaje puede que no cumplan con la eficacia requerida.

Las conclusiones más relevantes de este análisis reflejan que las praderas de vegetación contribuyen a disipar la energía del oleaje incidente con valores que, en algunas circunstancias, puede llegar a ser hasta un 70% del oleaje incidente. En función de la posición relativa de la pradera con respecto a la costa, en general, la vegetación funcionaría como un primer filtro que reduce la altura de ola por la acción conjunta de la fricción y la rotura. Las olas que abandonan la pradera en dirección a la costa se mantienen o asombran ligeramente hasta que llegan a la rotura por efecto del fondo. Esto redundaría en que el *run-up* sobre la playa y la altura de ola se vean reducidos de forma significativa, minimizando los riesgos de inundación y erosión en la costa. Existen diferentes parámetros que controlan el nivel de disipación alcanzado, entre las que destacaríamos la anchura del campo de vegetación, su altura con respecto a la columna de agua, la densidad de plantas y sus características biomecánicas (elasticidad, etc.).

Los campos de algas o vegetación con características geométricas semejantes a las de un dique artificial de escollera, pueden provocar el mismo efecto, siempre y cuando las características y tamaño de la escollera generen una pérdida de carga equivalente a la debida a las características biomecánicas de la vegetación.

No obstante, la principal limitación de la propuesta del sistema de defensa vegetal es la capacidad limitada de predicción del comportamiento a largo plazo de los ecosistemas. Al no disponer en la actualidad de la experiencia necesaria, carecemos de información que permita anticipar la respuesta de los ecosistemas a distintas situaciones de dinámicas naturales. Los sistemas artificiales han sido siempre la solución a los problemas de la sociedad, y gracias a la observación y a los proyectos realizados a lo largo del tiempo, podemos conocer la capacidad

de respuesta de las infraestructuras, anticipando su comportamiento e incluso reconociendo situaciones insostenibles.

Cada ecosistema tiene un comportamiento distinto, lo que hace necesario el desarrollo de diferentes modelos de referencia, con características e intervalos de tiempo específicos para cada sistema natural. Este campo pertenece a las ciencias biológicas, y a medida que se vaya profundizando en el conocimiento de los ecosistemas se podrá evolucionar en su uso como sistema de defensa de la costa.

Desde el punto de vista de análisis económico, puede concluirse que aunque el retorno de la inversión para soluciones naturales es a más largo plazo, los rendimientos obtenidos por la inversión son altamente competitivos con soluciones artificiales, especialmente si se consideran los otros servicios obtenidos de los sistemas naturales. Quiere esto decir que las soluciones basadas en sistemas naturales no son sólo eficientes técnicamente sino que también pueden ser competitivas económicamente.

Por último, señalar que queda mucho por trabajar en el tema de la aceptación de la propuesta por parte de la sociedad. Somos conscientes de la fiabilidad de las estructuras artificiales y nos sentimos protegidos por ellas. Si bien suponen un impacto ambiental visual, son tan comunes que estamos acostumbrados a vivir con ellas. Para que los sistemas naturales sean aceptados pública y políticamente, volvemos a resaltar la necesidad de inversión en investigación. En varios países donde se ha puesto en marcha la alternativa de los sistemas naturales ha quedado patente que la aceptación pública depende de gran manera de la manera en que los científicos creadores de la propuesta se comuniquen con la sociedad, de la transparencia y de la fiabilidad de la información. En gran manera influye el apoyo que los gobiernos y las altas instituciones aporten a la comunidad científica. Además, no hay que olvidar las diferencias existentes entre los países desarrollados y los países en vías de desarrollo. No es casualidad que los sistemas hayan sido puestos en marcha tan sólo en Europa y en Estados Unidos. ¿Acaso sólo las zonas costeras de estas regiones tienen problemas? Al contrario, por poner un ejemplo, es en Asia y en América del Sur donde tienen que luchar cada día contra enormes inundaciones e importantes terremotos. Como en tantas otras cosas, los más necesitados son siempre los que menos recursos tienen. Desde el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) recomiendan una serie de pautas a evitar a la hora de realizar un proyecto de restauración, proponiendo además, la utilización de los procesos de recuperación

de los ecosistemas como solución frente a problemas sociales como la pobreza o la falta de puestos de trabajo.

Hemos demostrado la eficacia de los ecosistemas como sistema de defensa de la costa, los servicios añadidos que nos proporcionan y la viabilidad económica de la propuesta. Los sistemas naturales son una alternativa sólida frente a los sistemas artificiales, especialmente si consideramos las consecuencias futuras del cambio climático, ya que la dinámica intrínseca de los ecosistemas les permite adaptarse a los diferentes escenarios.

12 Referencias

1. **Losada, I. J.** (2009) El papel de los ecosistemas marinos en la protección de la línea de costa. En: El Papel de los Ecosistemas Marinos en la Provisión de Bienes y Servicios a la Sociedad. Carlos M. Duarte (ed). V Debate sobre Biología de la Conservación Fundación BBVA-Estación de Investigación Costera del Faro de Cap Salines. Madrid 2009.
2. **Nicholls R.J., Hanson S., Hallegatte S., Herweijer C., Patmore, Muir-Wood, Corfee-Morlot J. & Chateau J.** (2007) Ranking of the world's cities most exposed to coastal flooding today and in the future. En: Ranking Port Cities with High Exposure and Vulnerability to Climate Extremes: Exposure Estimates. OECD Environmental Working Paper.
3. **Martínez Gallo, J.C.** (2010) Propuesta metodológica para la estimación de la cota de inundación de la zona costera del Caribe colombiano. Maestría thesis. Universidad Nacional de Colombia.
4. **GIOC.** (2002) Atlas de inundación del litoral peninsular español. Documento complementario. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria.
5. **Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A. & Sallenger A.H.** (2006) Empirical parameterization of setup, swash, and runup. Coastal Engineering, 53(7).
6. **Clarck, J.R.** (1995) Coastal Zone Management Handbook. CRC Press, 1995.
7. **SOCIB (Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System). SIAS Division.** Sensibilidad ambiental de la costa 2012.
8. **Emery W.J.** (2003) Ocean Circulation. Water Types and Water Masses. Elsevier Science Ltd.
9. **F.Balseiro, C.** (2014). Diferencias entre un tsunami y el mar de fondo. En: 4 gotas.
10. Comunidad eduambiental. Energía del oleaje. Capítulo 22.
11. **Piloto, Y.A.** (2011). Expresiones basicas para la transformacion del oleaje. En: Revista Estudiantil Nacional de Ingeniería y Arquitectura, Vol. 2.
12. **Mclvor, A.L., Möller, I., Spencer, T. and Spalding. M.** (2012) Reduction of wind and swell waves by mangroves. Natural Coastal Protection Series: Report 1. Cambridge Coastal Research Unit Working Paper 40. Published by The Nature Conservancy and Wetlands International.
13. **Temmerman S., Meire P., Bouma T.J., Herman P.M.J., Ysebaert T. & De Vriend H.J.** (2013) Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. Nature, Vol. 504.
14. **Tonneijck PhD F., van Eijk P.** (2013) Restoring tropical mud coasts. Building with nature for coastal resilience.
15. **European Environment Agency** (2006) The changing faces of Europe's coastal areas. European Environment Agency Report número 6.
16. **Hanley M.E., Hoggart S.P.G., Simmonds D.J., Bichot A., Colangelo M.A., Bozzeda F., Heurtefeux H., Ondiviela B., Ostrowski R., Recio M., Trude R., Zawadzka-Kahlau E. & Thompson R.C.** (2014) Shifting sands? Coastal protection by sand banks, beaches and dunes. Coastal Engineering Vol. 87.
17. **Ley Vega de Seoane C., Fernández Gallego J.B. & Pascual Vidal C.** (2007) Manual de restauracion de dunas costeras. Dirección General de Costas. Ministerio de Medio Ambiente.

- 18. Wells S., Ravilious C. & Corcoran E.** (2006) In the Front Line: Shoreline Protection and Other Ecosystem Services from Mangroves and Coral Reefs. UNEP World Conservation Monitoring Centre.
- 19. Junta de Andalucía** (2011) Proyecto LIFE+ posidonia. Las praderas de Posidonia Oceanica.
- 20. Nellemann C., Corcoran E. (eds)** (2010) Dead planet, living planet. Biodiversity and ecosystem restoration for sustainable development. A Rapid Response Assessment. UNEP (United Nations Environment Programme), GRID-Arendal.
- 21. Vitousek P.M., D'Antonio C.M., Loope L.L., Rejmánek M. & Westbrooks R.** (1997) Introduced species: a significant component of human-caused global change. *New Zealand Journal of Ecology*, Vol. 21.
- 22. Bouma T.J., van Belzen J., Balke T., Zhu Z., Airoidi L., Blight A.J., Davies A.J., Galvan C., Hawkins S.J., Hoggart S.P.G, Lara J.L., Losada I.J., Maza M., Ondiviela B., Skov M.V. y otros.** (2014) Identifying knowledge gaps hampering application of intertidal habitats in coastal protection. En: Opportunities & steps to take. *Coastal Engineering*, Vol. 87.
- 23. Firth L.B., Thompson R.C., Bohn K., Abbiati M., Airoidi L., Bouma T.J., Bozzeda F., Ceccherelli V.U., Colangelo M.A., Evans A., Ferrario F., Hanley M.E., Hinz H., Hoggart S.P.G., Jackson J.E., Moore P., Morgan E.H., Perkol-Finkel S., Skov M.W., Strain E.M., van Belzen J. & Hawkins S.J.** (2014) Between a rock and a hard place. En: Environmental and engineering considerations when designing coastal defence structures. *Coastal Engineering*, Vol. 87.
- 24. Maza M., Lara J.L. & Losada I.J.** (2013) A coupled model of submerged vegetation under oscillatory flow using Navier-Stokes equations. *Coastal Engineering*, Vol. 80.
- 25. Russi D., ten Brink P., Farmer A., Badura T., Coates D., Förster J., Kumar R. and Davidson N.** (2013) TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands).
- 26. TEEB** (2009) Climate Issues Update.
- 27. Ferrario F., Beck M.W., Storlazzi C. D., Micheli F., Shepard C. C. & Airoidi L.** (2014) The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, Vol. 5.
- 28. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (2002) Environmental Sensitivity Index Guidelines. Version 3.0. U.S. Department of Commerce.**
- 29. US Army Corps of Engineers** (2013) Coastal Risk Reduction and Resilience. CWTS 2013-3. Washington, DC: Directorate of Civil Works, US Army Corps of Engineers.
- 30. Ondiviela B., Losada I.J., Lara J. L., Maza M., Galván C., Bouma T. J. & van Belzen J.** (2014) The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate. *Coastal Engineering*, Vol. 87.
- 31. Borsje B. W., van Wesenbeeck B. K., Dekker F., Paalvast P., Bouma T. J., van Katwijk M. M., de Vries M. B.** (2011) How ecological engineering can serve in coastal protection. *Ecological Engineering*, Vol. 37.
- 32. Duarte C. M., Losada I. J., Hendricks I. E., Mazarrasa I. & Marbà N. (2013)** The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, Vol. 3.

12.1 Recursos bibliográficos y direcciones web



Instituto de Hidráulica Ambiental

Formulación matemática del modelo IH-2VOF, utilizando el manual del IH-2VOF *Course*.

<http://www.ihcantabria.com/>



THESEUS (Innovative technologies for safer European coasts in a changing climate)

<http://www.theseusproject.eu/>



Building with Nature Programme

<http://www.ecoshape.nl/>

12.2 Relación de tablas, figuras e ilustraciones

Tabla 1 - Tipos de oleaje según la fuente de energía (8)	15
Tabla 2 - Comparación ventajas e inconvenientes de los sistemas naturales y artificiales (13)	23
Tabla 3 - Valor de los ecosistemas en función de sus servicios (25).....	60
Tabla 4 - Coste de restauración y relación beneficio-coste (26).....	61
Tabla 5 - Coste de construcción de un rompeolas (27).....	62
Ilustración 1 - Densidad de población de la costa europea (2).....	6
Ilustración 2 – Las quince ciudades del mundo con mayor peligro de inundación, a día de hoy y en 2070 (2).....	7
Ilustración 3- Modelo de una estrategia sostenible (Programa Theseus)	8
Ilustración 4 – Definición de <i>run-up</i> (5).....	10
Ilustración 5 – Cota de inundación (1)	10
Ilustración 6 – Tipos de línea de costa (7).....	13
Ilustración 7 - Altura de ola significativa.....	16
Ilustración 9 – Fenómeno de refracción (11).....	17
Ilustración 8 - Fenómeno de reflexión (10).....	17
Ilustración 10 - Fenómeno de difracción (11)	18
Ilustración 11 - Asomeramiento por el fondo.....	18
Ilustración 12 - Fenómeno de rotura de la ola.....	18
Ilustración 13 - Cambios en el uso de la tierra en la costa europea en un radio de 0 – 10 km (15)	22
Ilustración 14 - Conchas en una playa.....	24
Ilustración 15 – Ejemplo de una playa	24
Ilustración 16 - Arrecife de coral	25
Ilustración 17 - Coral	25
Ilustración 18 - Manglar	27
Ilustración 19 – Raíces aéreas de los manglares.....	27
Ilustración 20 – Campos de Posidonia	28
Ilustración 21 – Esquema planta de Posidonia	28
Ilustración 22 - Atenuación del oleaje mediante praderas submarinas	28
Ilustración 23 - Humedal	29
Ilustración 24 - Marisma	29
Ilustración 25 - Restauración de manglares (Building with Nature for coastal resilience).....	31
Ilustración 26 - Arrecife artificial de moluscos (EcoShape).....	35
Ilustración 27 - Vista aérea de marismas (Building with Nature for coastal resilience).....	35
Ilustración 28 - El Puntal de Santander	38

Ilustración 29 - Terreno ganado al mar	38
Ilustración 30 - Metodología de proyecto (THESEUS).....	40
Ilustración 31 – Comparación consecuencias a largo plazo según la superficie disponible de costa (22).....	42
Ilustración 32- Aproximación del medio poroso (Manual del Ih-2VOF)	45
Ilustración 33 - Batimetría de la playa	48
Ilustración 34 - Mallaje del modelo.....	48
Ilustración 35 - Representación de los sensores.....	49
Ilustración 36 - Variación de la altura de ola a lo largo de la simulación.....	49
Ilustración 37 - Mallaje del dique.....	50
Ilustración 38 - Sensores en el dique	50
Ilustración 39 – Geometría de la vegetación	50
Ilustración 40 – Geometría del dique.....	50
 Figura 1 - Esquema de la condición de rotura de la ola.....	 51

13 Anexos

Tablas correspondientes a los gráficos de altura de ola significativa de todas las situaciones simuladas en el trabajo

		Situación 1: variación altura de la ola														
Sensor	xi	Vegetación					Dique					Playa				
1	15	0,25	0,52	0,80	1,13	1,43	0,25	0,54	0,83	1,12	1,45	0,26	0,52	0,81	1,12	1,46
2	30	0,26	0,56	0,88	1,26	1,59	0,26	0,57	0,88	1,19	1,54	0,26	0,53	0,84	1,13	1,47
3	45	0,20	0,41	0,62	0,86	1,07	0,20	0,44	0,66	0,86	1,10	0,27	0,53	0,85	1,14	1,41
4	60	0,15	0,31	0,47	0,62	0,76	0,15	0,31	0,45	0,58	0,74	0,26	0,53	0,86	1,12	1,31
5	75	0,15	0,31	0,45	0,60	0,73	0,15	0,32	0,46	0,57	0,71	0,27	0,54	0,86	1,09	1,24
6	90	0,16	0,31	0,46	0,64	0,76	0,15	0,33	0,47	0,60	0,74	0,28	0,56	0,86	1,08	1,12
7	105	0,16	0,33	0,47	0,68	0,81	0,15	0,34	0,49	0,64	0,79	0,29	0,59	0,86	1,01	0,99
8	120	0,18	0,36	0,49	0,74	0,83	0,16	0,38	0,53	0,66	0,83	0,33	0,58	0,73	0,80	0,80
9	135	0,21	0,35	0,45	0,51	0,63	0,18	0,39	0,44	0,51	0,64	0,30	0,40	0,49	0,55	0,60
10	150	0,10	0,17	0,23	0,24	0,31	0,14	0,16	0,20	0,25	0,29	0,15	0,21	0,24	0,25	0,32
11	165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	195	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

		Situación 2: variación período y altura de la ola									
Sensor	xi	Vegetación					Dique				
1	15	0,28	0,46	0,64	0,78	0,93	0,28	0,45	0,64	0,75	0,94
2	30	0,28	0,43	0,65	0,83	1,06	0,27	0,43	0,65	0,78	1,03
3	45	0,22	0,34	0,50	0,63	0,79	0,25	0,34	0,50	0,59	0,79
4	60	0,19	0,29	0,41	0,50	0,62	0,23	0,27	0,39	0,44	0,58
5	75	0,19	0,28	0,41	0,50	0,62	0,23	0,27	0,40	0,45	0,59
6	90	0,19	0,29	0,42	0,52	0,67	0,23	0,28	0,40	0,45	0,62
7	105	0,19	0,31	0,45	0,55	0,73	0,24	0,29	0,43	0,47	0,67
8	120	0,20	0,34	0,51	0,61	0,74	0,25	0,32	0,50	0,52	0,69
9	135	0,24	0,34	0,39	0,44	0,45	0,27	0,34	0,39	0,41	0,48
10	150	0,10	0,13	0,17	0,20	0,22	0,12	0,12	0,17	0,22	0,22
11	165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	195	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

		Situación 3: variación de la densidad/porosidad									
Sensor	xi	Vegetación					Dique				
1	15	1,05	1,06	1,08	1,03	1,02	1,03	1,08	1,04	1,04	1,01
2	30	1,00	1,01	1,02	0,96	0,97	0,96	0,99	0,97	0,96	0,95
3	45	0,68	0,71	0,73	0,72	0,83	0,69	0,73	0,70	0,71	0,79
4	60	0,48	0,51	0,54	0,57	0,73	0,47	0,51	0,49	0,54	0,65
5	75	0,46	0,49	0,53	0,54	0,72	0,46	0,49	0,48	0,52	0,64
6	90	0,46	0,49	0,54	0,55	0,73	0,45	0,47	0,48	0,53	0,65
7	105	0,47	0,51	0,56	0,56	0,74	0,47	0,53	0,50	0,55	0,66
8	120	0,48	0,53	0,58	0,54	0,70	0,48	0,55	0,52	0,55	0,62
9	135	0,41	0,45	0,46	0,44	0,48	0,41	0,47	0,44	0,43	0,45
10	150	0,22	0,24	0,20	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,24	0,22
11	165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	195	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Situación 4: variación de la altura del sistema de defensa							
Sensor	xi	Vegetación			Dique		
1	15	1,02	1,08	1,19	1,02	1,04	1,02
2	30	0,98	1,02	1,12	0,98	0,97	0,96
3	45	0,96	0,73	0,42	0,96	0,70	0,68
4	60	0,95	0,54	0,25	0,95	0,49	0,50
5	75	0,94	0,53	0,24	0,94	0,48	0,48
6	90	0,94	0,54	0,24	0,94	0,48	0,49
7	105	0,88	0,56	0,25	0,88	0,50	0,51
8	120	0,72	0,58	0,26	0,72	0,52	0,54
9	135	0,51	0,46	0,30	0,51	0,44	0,44
10	150	0,24	0,20	0,26	0,24	0,22	0,20
11	165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	195	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Formulación matemática del modelo IH-2VOF

2. MATHEMATICAL FORMULATION

2.1. Fluid domain governing equations: the Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations

The IH-2VOF model solves the two-dimensional Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations, based on the assumptions described hereon. In a turbulent flow, the instantaneous velocity field u_i and pressure field p can be split into two parts, the ensemble-averaged (mean) velocity and pressure components, \bar{u}_i and \bar{p} , and the turbulent velocity and pressure fluctuations, u'_i and p' :

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad p = \bar{p} + p', \quad (1)$$

where $i = 1, 2$ for a bidimensional flow. In the present document, unless otherwise stated, the ensemble-averaged velocity \bar{u}_i will be referred to as the mean velocity for simplicity. Applying the former decomposition to the Navier-Stokes equations and assuming incompressible fluid, the RANS equations are derived:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (3)$$

where ρ is the density of the fluid, g_i is the i th component of the gravitational acceleration and $\bar{\tau}_{ij}$ is the mean viscous stress tensor. For a Newtonian fluid,

$$\bar{\tau}_{ij} = 2\mu \bar{\sigma}_{ij} \quad (4)$$

with μ being the molecular viscosity and

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

the rate of strain tensor of the mean flow.

In the momentum equation (3), the Reynolds stress tensor:

$$R_{ij} = \rho \overline{(u'_i u'_j)} \quad (6)$$

represents the influence of the turbulence fluctuations on the mean flow field and requires a closure hypothesis.

In the present model aimed at calculating complicated flows under breaking waves, the Reynolds stress term in equation (3) is closed with a second-order model. A summary of several closure models can be found in Jaw and Chen (1998), including the one implemented in IH-2VOF. In the IH-2VOF model, the Reynolds stress tensor is assumed to be related to the strain rate of the mean flow through the algebraic nonlinear $k-\varepsilon$ model (Shih *et al.*, 1996; Lin and Liu, 1998):

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - C_d \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left[C_1 \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) + C_2 \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) + C_3 \left(\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (7)$$

in which C_d , C_1 , C_2 , and C_3 are empirical coefficients, δ_{ij} is the Kronecker delta and k is the turbulent kinetic energy defined as:

$$k = \frac{1}{2} \overline{(u'_i u'_i)} \quad (8)$$

The dissipation rate of the turbulent kinetic energy is defined as:

$$\varepsilon = \overline{v \left(\partial u'_i / \partial x_j \right)^2} \quad (9)$$

where $v = \mu / \rho$ is the molecular kinematic viscosity.

One can note that the condition:

$$C_1 = C_2 = C_3 = 0 \quad (10)$$

in equation (7) leads to the conventional linear (isotropic) eddy viscosity model for the Reynolds stresses closure:

$$\overline{u'_i u'_j} = -2\nu \overline{\sigma_{ij}} + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (11)$$

with ν_t is the eddy viscosity expressed as:

$$\nu_t = C_d(k^2/\varepsilon) \quad (12)$$

Contrary to the conventional eddy viscosity models as expressed by equation (12), valid for the description of isotropic-eddy-viscosity turbulent flows, the nonlinear Reynolds stress model implemented in IH-2VOF and expressed by equation (7) can be applied to general anisotropic turbulent flows.

The values for the coefficients C_2 and C_3 are obtained from experimental results on turbulent shear flow by Champagne *et al.* (1970). The C_1 coefficient is deduced from the assumption by Shih *et al.* (1996): $C_1 = 2C_3$. A value for C_d is finally proposed by Rodi (1980). The values for the whole set of coefficients are summarised as follows:

$$C_d = 0.09, \quad C_1 = 0.0054, \quad C_2 = -0.0171, \quad C_3 = 0.0027 \quad (13)$$

However, considering constant values for these coefficients may lead under some extreme circumstances to inconsistent physical situations in equation (7), such as negative turbulence energy or infinite nonlinear contributions. Hence, modified expressions for the empirical coefficients have been implemented in the IH-2VOF model:

$$C_d = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{7.4 + S_{\max}} \right), \quad C_1 = \frac{1}{185.2 + D_{\max}^2}, \quad (14)$$

$$C_2 = -\frac{1}{58.5 + D_{\max}^2}, \quad C_3 = \frac{1}{370.4 + D_{\max}^2},$$

where

$$S_{\max} = \frac{k}{\varepsilon} \max \left[\left| \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right| \right] \quad (\text{indices not summed}) \quad (15)$$

and

$$D_{\max} = \frac{k}{\varepsilon} \max \left[\left| \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right| \right] \quad (16)$$

One may note that all coefficients take their originally proposed values when S_{\max} and D_{\max} are zero.

The governing equations for k and ε are (Rodi, 1980; Lin and Liu, 1998):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - (\overline{u'_i u'_j}) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} v_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (18)$$

where σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$, and $C_{2\varepsilon}$ are empirical coefficients. In equation (17), the first and second terms of the left-hand side represent convection and diffusion respectively. The second and third terms of the right-hand side represent production and dissipation of kinetic turbulent energy respectively. The Reynolds stress only appears as the turbulence production term. The empirical coefficients in equation (18) have been determined by performing many simple experiments. Recommended values for these coefficients are (Rodi, 1980 ; Lin and Liu, 1998):

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (19)$$

As outlined by Lin and Liu (1998), the RANS equations along with the $k-\varepsilon$ transport equations using the former values for the empirical coefficients were found to adequately simulate many complex turbulent flows.

2.2 Governing equations for flow in porous media : the Volume-Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes (VARANS) equations

The main assumption of the IH-2VOF model consists in considering that the RANS equations coupled with an appropriate turbulence model (in the present case, the $k-\varepsilon$ model) can adequately describe the flow field in the porous media. Given the complex structure of porous materials, the direct resolution of the intrinsic flow field inside the pores is still not practical. Consequently, to make the fluid/porous structure interaction modelling easier, a volume-averaging process has been applied to the RANS and the k and ε equations.

The flow in porous media is obtained in the IH-2VOF model through the resolution of the Volume-Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes (VARANS) equations, see Hsu *et al.* (2002) for the complete mathematical formulation. These equations are derived by integration of the RANS equations over a control volume. The size of the averaging volume is chosen much larger than the characteristic pore size (microscopic scale) but much smaller than the characteristic length scale of the flow, i.e. the scale of the spatial variation of the physical variables in the fluid domain (macroscopic scale). See Figure 1 or a schematic representation of the mathematical approach.

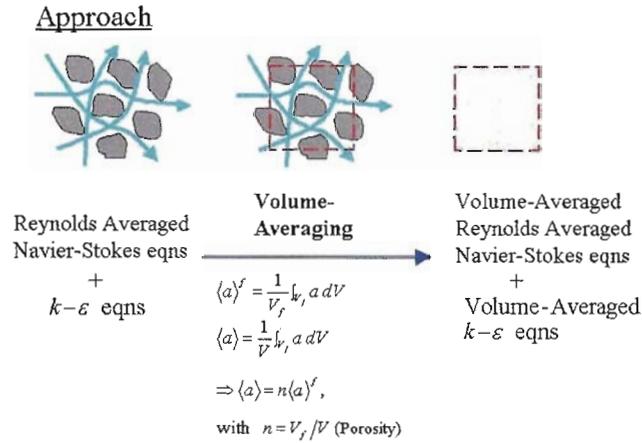


Figure 1. Sketch of the volume-averaging process for resolution of the porous flow.

The mathematical process of volume averaging of a certain quantity “ a ” is defined by the following expression:

$$\langle a \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_f} a dV \quad (20)$$

where “ $\langle \rangle$ ” denotes the intrinsic volume averaging, V is the total averaging volume, V_f is the volume in V which is occupied by the fluid phase and $\langle a \rangle$ is the averaged magnitude. The intrinsic averaging operator defined by equation (20) can be related to the Darcy’s volume averaging operator defined as follows:

$$\langle a \rangle_D = \frac{1}{V} \int_{V_f} a dV \quad (21)$$

through the simple relationship:

$$\langle a \rangle_D = n \langle a \rangle \quad (22)$$

Where

$$n = \frac{V_f}{V} \quad (23)$$

is the porosity and is assumed for simplicity to be a constant in the present model. In terms of velocity, $\langle a \rangle_D$ would be the seepage velocity and $\langle a \rangle$ the filtration velocity. Hereafter, unless specified, volume averaging will be understood as intrinsic volume averaging, as defined by expression (20).

To quantify the flow within the porous medium, the pore Reynolds number is defined as:

$$Re_\rho = \frac{D_{50}|U|}{\nu} \quad (24)$$

where D_{50} is the equivalent mean diameter of the porous material, ν is the fluid kinematic viscosity and $|U|$ is a typical velocity scale around the pore.

The VARANS equations are obtained by applying the intrinsic volume average to the RANS equations. The ensemble averaged velocity of the RANS equations is assumed to be:

$$\bar{u}_i = \langle \bar{u}_i \rangle + \bar{u}_i'' \quad (25)$$

where $\langle \bar{u}_i \rangle$ is the ensemble-volume averaged velocity field and \bar{u}_i'' is the fluctuation with respect to volume averaging, in other words the residual velocity field between ensemble-volume averaging and ensemble averaging.

Applying this decomposition to the equations of continuity (2) and momentum conservation (3), we obtain:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{P} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle \bar{u}_i' u_j' \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{\tau}_{ij} \rangle}{\partial x_j} + g_i \\ & - \frac{\partial \langle \bar{u}_i'' \bar{u}_j'' \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{\text{int}}} \left[-\overline{u_i' u_j'} - \frac{\bar{P}}{\rho} \delta_{ij} + \frac{\bar{\tau}_{ij}}{\rho} \right] n_j dA \end{aligned} \quad (27)$$

A_{int} is the total fluid-solid interface and n_j the j th component of the unit vector pointing normally outward from the fluid to solid phase. The last term in equation (27) accounts for the jump at the interface and represents the interfacial momentum transfer between the fluid phase and the solid skeleton. This term is crucial in the modelling of the flow in porous media. The previous term in equation (27) is the residual stress due to volume averaging: it results from the volume averaging of the convective term $\overline{u_i u_j}$ as:

$$\langle \overline{u_i u_j} \rangle = \langle \overline{u_i} \rangle \langle \overline{u_j} \rangle + \langle \overline{u_i'' u_j''} \rangle \quad (28)$$

analogously to the stress term in the Reynolds decomposition of the product $u_i u_j$. These last two terms are unclosed and need to be modelled. Inside the porous media, these terms are modelled collectively using the Forchheimer's relationship with the inclusion of unsteady effects (Liu *et al.*, 1999a):

$$\begin{aligned} & - \frac{\partial \langle \overline{u_i'' u_j''} \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{int}} \left[-\overline{u_i' u_j'} - \frac{\overline{P}}{\rho} \delta_{ij} + \frac{\overline{\tau_{ij}}}{\rho} \right] n_j dA = \\ & - \left[\frac{\alpha \nu (1-n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \overline{u_i} \rangle + \frac{\beta (1-n)}{n D_{50}} \sqrt{\langle \overline{u_1} \rangle^2 + \langle \overline{u_2} \rangle^2} \langle \overline{u_i} \rangle + c_A \frac{\partial \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial t} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

where c_A is the added mass coefficient and α and β two empirical coefficients associated with the linear and nonlinear drag force respectively. The third term of the right-hand side of equation 29 accounts for the inertial effect.

The precise descriptions of the c_A , α and β coefficients are still not fully understood. They depend a priori on the pore Reynolds number and flow directions. In their recent study of wave motions and turbulent flows in front of a composite breakwater using the IH-2VOF model, Hsu *et al.* (2002) propose the following values for these coefficients, based on previous works by van Gent (1994), Liu *et al.* (1999a) or Nield and Bejan (1999):

$$c_A = 0.34 \frac{1-n}{n}, \quad \alpha = 200, \quad \beta = 1.1 \quad (30)$$

Moreover, coefficients α and β can be written in terms of the porous material properties based on empirical approximations. Recently, Lara *et al.* (2012) has resented a methodology to estimate α and β coefficients to transient flows, such as solitary waves. According to Sollit and Cross (1976), Forchheimer relationship can be written in terms of the permeability coefficient (K_p), a porous drag coefficient (C_f) and the seepage velocity as follows:

$$F_{porous_drag} = \frac{\nu}{K_p} \overline{u_i} + \frac{C_f}{\sqrt{K_p}} \overline{u_i} |\overline{u}| \quad (31)$$

According to McDougal (1993), permeability coefficient (K_p) can be related with nominal diameter and porosity:

$$K_p (m^2) = 1.643 \cdot 10^7 \left(\frac{D_{50} (mm)}{10} \right)^{1.57} \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (32)$$

Moreover, the non-linear drag force coefficient C_f is evaluated following Arbbhthiramar and Dinoy (1973):

$$C_f = 100 \left(D_{50}(m) \sqrt{\frac{n}{K_p}} \right)^{1.5} \quad (33)$$

Using a correspondence between the extended Forchheimer relationship and equations (31) and (32), coefficients α and β can be written in terms of the nominal diameter (in m) and porosity as:

$$\alpha = 4409.22 \cdot D_{50}^{0.43} \quad \text{and} \quad \beta = 12.27 \cdot \frac{n^3}{(1-n)^{1.5}} D_{50}^{-0.1075} \quad (34)$$

In case, periodic waves (either regular or random) are used in the simulations, a dynamics non-linear drag parameter, β , is considered following van Getn (1995):

$$\beta = \beta_0 \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right), \quad \text{where } KC = \frac{UT}{nD_{50}} \quad (35)$$

where KC is the Keulegan-Carpenter number, U is a representative velocity, T is a representative wave period. At any time step, the value of β is dynamically updated according the maximum velocity calculated within the porous media. The value of the representative period corresponds to the wave period for regular waves and the mean period for random waves.

Finally, given the former closure expression for the residual stress term due to volume averaging and the momentum transfer at the interface of equation (26), the complete VARANS equations (26) and (27) can be rewritten as:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (36)$$

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\langle \bar{u}_j \rangle}{1+c_A} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho(1+c_A)} \left[-\frac{\partial \langle \bar{P} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_j} + \rho g_i \right] \quad (37)$$

$$- \frac{1}{1+c_A} \left[\frac{\alpha \nu (1-n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \bar{u}_i \rangle + \frac{\beta (1-n)}{n D_{50}^2} \sqrt{\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2} \langle \bar{u}_i \rangle \right]$$

In the free fluid region, i.e. with $n=1$ and $c_A=0$, the VARANS equations obviously return to the original RANS equations.

The volume-averaged Reynolds stress is closed using an assumption similar to Shih *et al.* (1996):

$$\begin{aligned}
 \langle u'_i u'_j \rangle = & \frac{2}{3} \langle k \rangle \delta_{ij} - \langle v_i \rangle \left(\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_i} \right) \\
 & \left. \begin{aligned}
 & C_1 \left(\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle \bar{u}_k \rangle}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) + \\
 & - \frac{\langle k \rangle^3}{\langle \varepsilon \rangle^2} + C_2 \left(\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) + \\
 & C_3 \left(\frac{\partial \langle \bar{u}_k \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle \bar{u}_k \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_k} \delta_{ij} \right)
 \end{aligned} \right\} \quad (38)
 \end{aligned}$$

where $\langle v_i \rangle$ is the volume-averaged eddy viscosity, $\langle k \rangle$ is the volume-averaged turbulence kinetic energy and $\langle \varepsilon \rangle$ is the volume-averaged turbulent dissipation rate.

Similarly to the $k - \varepsilon$ model, the volume-averaged eddy viscosity is expressed as:

$$\langle v_i \rangle = C_D \frac{\langle k \rangle^2}{\langle \varepsilon \rangle} \quad (39)$$

with C_D a coefficient depending on the local strain rate.

Equations (38) and (39) can be regarded as the result of a first-order approximation of the volume averaging of the original nonlinear eddy viscosity model expressed by equations (7) and (12). Any higher correlations related to the volume averaging process have been ignored.

The governing equations for the turbulence in the porous media can be similarly obtained by taking the volume averaging of the standard k and ε equations. The balance equations for the volume-averaged turbulent kinetic energy $\langle k \rangle$ and its dissipation rate $\langle \varepsilon \rangle$ can then be written as:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle k \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} &= \langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial x_j} \right] - \langle \varepsilon \rangle \\ &+ \left\langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}_i''}{\partial x_j} \right\rangle + \frac{1}{V_f} \int_{A_{int}} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} n_j dA - \frac{\partial}{\partial x_j} \langle \bar{u}_j'' k'' \rangle \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} &= C_{1\varepsilon} \frac{\langle \varepsilon \rangle}{\langle k \rangle} \langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial x_j} \right] \\ &- C_{2\varepsilon} \frac{\langle \varepsilon \rangle^2}{\langle k \rangle} + C_{1\varepsilon} \frac{\langle \varepsilon \rangle}{\langle k \rangle} \left\langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}_i''}{\partial x_j} \right\rangle + \frac{1}{V_f} \int_{A_{int}} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} n_j dA - \frac{\partial}{\partial x_j} \langle \bar{u}_j'' \varepsilon'' \rangle \end{aligned} \quad (41)$$

in which the following decompositions related to volume averaging have been assumed:

$$k = \langle k \rangle + k'' \quad (42)$$

$$\varepsilon = \langle \varepsilon \rangle + \varepsilon'' \quad (43)$$

$$\bar{u}'_i \bar{u}'_j = \langle \bar{u}'_i \bar{u}'_j \rangle + \bar{u}'_i \bar{u}'_j'' \quad (44)$$

In both (40) and (41) equations, the fourth term on the right-hand side represents an additional source term due to volume averaging. These terms describe the effects of turbulence at a scale smaller than the volume-averaging scale, for instance the turbulence generation in the wake region around the solid skeleton in high pore Reynolds number conditions.

The fifth term represents the interfacial exchange of turbulence and is viewed as an additional source or sink of turbulence due to the presence of solid materials. These two terms are modelled collectively according to Nakayama and Kuwahara (1999), substituted by ε_∞ in the $\langle k \rangle$ transport equation, and by the term:

$$C_{2\infty} \frac{\varepsilon_\infty^2}{k_\infty} \quad (45)$$

in the $\langle \varepsilon \rangle$ transport equation.

The last term in both $\langle k \rangle$ and $\langle \varepsilon \rangle$ equations is the additional diffusion term due to the volume averaging and can be combined with the existing diffusion terms in the $\langle k \rangle$ and $\langle \varepsilon \rangle$ equations. The overall effect can be modelled by adjusting the values of σ_k and σ_ε . However, due to a lack of experimental information, the values of σ_k and σ_ε are kept unchanged in the IH-2VOF model. Therefore, equations (40) and (41) can be rewritten as:

$$\frac{\partial \langle k \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle k \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} = \langle \bar{u}_i \bar{u}_j' \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial x_j} \right] - \langle \varepsilon \rangle + \varepsilon_\infty \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} &= C_{1\varepsilon} \frac{\langle \varepsilon \rangle}{\langle k \rangle} \langle \bar{u}_i \bar{u}_j' \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial x_j} \right] \\ &- C_{2\varepsilon} \frac{\langle \varepsilon \rangle^2}{\langle k \rangle} + C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon_\infty^2}{k_\infty} \end{aligned} \quad (47)$$

The values of the closure coefficients, due to a lack of information here again, are kept the same as those proposed by the standard $k-\varepsilon$ model equations and the nonlinear eddy viscosity model.

Expressions for the small-scale turbulence terms k_∞ and ε_∞ have been proposed by Nakayama and Kuwahara (1999), resulting from numerical simulations of flow passing an array of square rods for pore Reynolds numbers between 10^5 and 10^7 . The work by Nakayama and Kuwahara (1999) for this range of Re_p values led to the following closure forms:

$$\varepsilon_\infty = 39.0(1-n)^{2.5} n^2 \left(\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2 \right)^{1.5} \frac{1}{D_{50}} \quad (48)$$

$$k_\infty = 3.7(1-n)n^{1.5} \left(\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2 \right) \quad (49)$$

To date, no work on the effect of the small-scale turbulence and expressions of ε_∞ and k_∞ for small values of the pore Reynolds number is available in the literature. However, it can be verified that the small-scale turbulence represented by equations (48) and (49) has a negligible effect when the pore Reynolds number becomes small. Equations (48) and (49) are thus expected to be still applicable in low pore Reynolds number conditions.