



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



Evaluación y reducción de riesgos inducidos por el cambio climático en el Puerto de Gijón

Trabajo realizado por:

Patricia González-Lamuño Rubiera

Dirigido por:

Iñigo J. Losada Rodríguez

Alexandra Toimil Silva

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería
Caminos, Canales y Puertos**

Santander, octubre de 2016

TRABAJO FIN DE MASTER

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que me han guiado y que han colaborado para que este proyecto llegara a buen puerto.

En primer lugar quiero dar las gracias al profesor Iñigo Losada Rodríguez, por su dirección y orientación, pero sobre todo por darme la oportunidad de realizar este proyecto y de iniciarme en el mundo de la investigación.

Al profesor Pedro Díaz Simal, por todas sus aportaciones en materia económica y por estar siempre disponible para ayudar y proponer ideas.

A Gabo, por su paciencia para enseñar a utilizar un modelo desde cero, por toda la ayuda y conocimientos transmitidos y por enderezar algún camino mal planteado.

A Omar, Chisco y toda la planta 2, por estar siempre dispuestos a echar una mano.

No tengo palabras para Alexandra, por su dedicación a la hora de enseñar, guiar, animar, dar forma al proyecto, estar absolutamente siempre disponible para resolver “crisis” y transmitir un espíritu de trabajo formado a base de mucho esfuerzo y constancia.

Especial agradecimiento para la Autoridad Portuaria de Gijón, por su ayuda desinteresada no sólo a la hora de aportar información, sin la cual el proyecto estaría incompleto, sino por la gran amabilidad e interés mostrados desde el primer momento.

Contenido

Resumen.....	5
Abstract	9
Índice de figuras	13
Índice de tablas	15
1. Introducción	17
2. Descripción del puerto de estudio: Puerto de Gijón.....	21
2.1 Descripción Puerto de Gijón.....	24
2.2 Problemática del Puerto.....	28
3. Metodología propuesta.....	33
3.1 El puerto como un sistema de sistemas.....	33
3.2 Identificación de los subsistemas.....	34
3.3 Marco de riesgo y sus componentes.....	35
4. El Puerto de Gijón: Sistema en riesgo	38
4.1 Sistemas y subsistemas	38
4.2 Impactos y drivers	41
4.3 Horizontes temporales y RCPs	42
5. Evaluación de peligrosidad múltiple	46
5.1 Bases de datos, caracterización histórica y proyección de las dinámicas.....	46
5.2 Escenarios de cambio climático	48
6. Bases de datos de exposición y curvas de vulnerabilidad.....	51
6.1 Bases de datos de exposición.....	53
6.2 Caracterización de la vulnerabilidad	57
7. Caracterización de impactos	65
7.1 Inundación.....	65
7.2 Operatividad.....	90
7.3 Fiabilidad	108
8. Evaluación del riesgo y consecuencias.....	118
8.1 Riesgo de inundación	119
8.2 Riesgo de inoperatividad.....	121
8.3 Riesgo de inestabilidad de las infraestructuras.....	122
9. Adaptación al cambio climático	124
9.1 Identificación de los <i>hotspots</i>	124
9.2 Propuesta de alternativas	124
9.3 Selección de las alternativas: Análisis Multicriterio	125
9.4 Implementación de las alternativas	136

9.5 Propuesta de una estrategia de implementación	139
Conclusiones.....	142
Futuras líneas de investigación	143
Anexos	145
Modelo para la simulación de la inundación: RFSM-EDA	145
Modelo para el estudio de la agitación portuaria: MSP2D-SP	152
Bibliografía.....	157

Evaluación y reducción de riesgos inducidos por el cambio climático en el Puerto de Gijón

Alumno: Patricia González-Lamuño Rubiera

Directores: Iñigo J. Losada Rodríguez / Alexandra Toimil Silva

Titulación: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Lugar y fecha: Santander, octubre de 2016

Resumen

El calentamiento del planeta debido al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero, provocado por la actividad antrópica, está generando cambios en la frecuencia e intensidad de las inundaciones costeras y otros fenómenos meteorológicos extremos.

La inminencia del cambio climático hace necesario el desarrollo de estrategias de adaptación en las zonas de mayor exposición y vulnerabilidad. Los puertos son infraestructuras especialmente sensibles debido a su localización en la costa y a su larga vida útil, y los impactos potenciales debido al cambio climático repercutirán negativamente en la operatividad del puerto y, en consecuencia, en la actividad económica de la región.

En este proyecto se desarrolla una metodología para la evaluación y la reducción de riesgos inducidos por el cambio climático en puertos, tomando como modelo de aplicación el Puerto de Gijón, motor económico del Principado de Asturias. Para ello se utilizarán bases de datos de alta resolución y modelos numéricos que permiten simular los efectos del cambio climático y elaborar una propuesta de adaptación.

Palabras clave

Cambio climático, Puertos, Inundación costera, Agitación portuaria, Fiabilidad de las defensas, Aumento del nivel medio del mar, Simulación numérica, Adaptación

Introducción

El aumento del nivel medio del mar y el incremento de la intensidad de los temporales como consecuencia del cambio climático provocan daños en las infraestructuras portuarias y alteraciones en la operatividad del mismo.

Debido al carácter estático de los puertos, los efectos del cambio climático deben ser contemplados desde el diseño del puerto, de manera que puedan afrontar a largo plazo los impactos climáticos y adaptarse en base a su evolución.

1. Estudio del puerto

El Puerto de Gijón es un puerto marítimo situado en el norte de España y gestionado por la Autoridad Portuaria de Gijón. Esta localización le confiere oleajes de gran intensidad, principalmente provenientes del noroeste.

Es un puerto artificial generado a partir de terrenos ganados al mar y protegidos por un

dique exterior y dos cabos naturales. En su interior está formado por una serie de diques que minimizan la agitación interior, disponiendo de un total de 6,9 km de línea de atraque con calados de hasta 23 m, que le permiten albergar embarcaciones aptas para el transporte de mercancías.

Es un puerto granelero que tiene un papel fundamental en la actividad industrial del Principado de Asturias, suponiendo más del 11% PIB de la región. Está formado por un conjunto de terminales explotadas por empresas instaladas en el puerto mediante concesión, por la que abonan un canon en materia de ocupación y explotación.

Problemática del puerto

En febrero de 2014 tuvo lugar en la costa asturiana un temporal de gran magnitud y elevado periodo de retorno (que se tomará como temporal de cálculo), que ocasionó grandes daños estructurales en el puerto. El aumento del nivel medio del mar, de la intensidad de los

temporales y de las precipitaciones como consecuencia del cambio climático, previsiblemente incrementará el riesgo de inundación y de agitación portuaria y afectará a la estabilidad de las infraestructuras.

La vulnerabilidad actual del Puerto de Gijón se verá incrementada debido al cambio climático, siendo necesario contemplar la proyección de los impactos climáticos en el ciclo de vida de las infraestructuras e implementar una estrategia de adaptación que permita mantener el nivel de operatividad del puerto.

2. Metodología propuesta

El análisis de riesgo inducido por el cambio climático se ha enmarcado dentro de una metodología general de riesgo adoptada por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). El riesgo se determina como la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas como resultado de la peligrosidad (peligros concernientes al clima), la exposición (activos en riesgo) y la vulnerabilidad (susceptibilidad a sufrir daños).

Cuando un peligro se convierte en amenaza, el riesgo se materializa en impactos. El cambio climático no es un riesgo *per se*, sino que es la interacción entre los cambios en el clima y las amenazas derivadas con la vulnerabilidad, y es la exposición de los sistemas la que determina en cada momento el nivel de riesgo.

Escenarios de cambio climático planteados

En este trabajo se ha utilizado la proyección del cambio climático del IPCC del escenario RCP 8.5 a fin de siglo, que incluye un aumento en el nivel medio del mar de 0,45 a 0,82 m. Esta proyección de nivel del mar global ha sido regionalizada para las cuencas de todo el mundo por Slangen et al. (2014) en el periodo 2081-2100, siendo un aumento del nivel medio de 0,63 m el correspondiente a Gijón.

Con el objeto de simular los efectos del cambio climático se ha definido una serie de escenarios que combinan variaciones en el nivel medio del mar (proyección de Slangen y proyecciones hipotéticas de 1 y de 1,5 m), en la altura de ola (incremento de Hs de un 20%) y en la precipitación (supuesto de una lluvia intensa).

Los impactos del cambio climático que se van a valorar son los cambios en la operatividad (por agitación interior y por caudal de rebase), fiabilidad e inundación del puerto. Estos impactos son producidos por cambios en las dinámicas, entre las que se han considerado el nivel medio del mar, el oleaje, la marea meteorológica, la marea astronómica y la precipitación.

Con el objetivo de analizar los cambios experimentados por las dinámicas en los últimos años y de conocer su evolución en el tiempo se ha llevado a cabo una caracterización histórica de las dinámicas, a partir de bases de datos de alta resolución, y su proyección a 2100.

3. Exposición y vulnerabilidad

Se han generado bases de datos de exposición y curvas de vulnerabilidad del puerto, de manera que cuando se aplique un impacto sobre el puerto se pueda obtener el riesgo económico derivado del mismo.

Bases de datos de exposición

Mediante el análisis de la base de datos de la Autoridad Portuaria de Gijón se realizó una caracterización económica del puerto, distinguiendo por un lado el valor de las instalaciones (activos o *stock* capital) y por otro los flujos económicos. Como flujos se han considerado los ingresos anuales del puerto provenientes del cobro de las tasas y tarifas (ocupación, explotación, servicios, paso de embarcaciones, etc.).

Curvas de vulnerabilidad

Para evaluar el impacto de inundación, por un lado, se han generado curvas de daño basadas en las funciones del modelo Hazus, que relacionan el daño ocasionado en los activos en función de la cota de inundación; por otro lado, para medir el impacto sobre el flujo económico se han asignado días de inoperatividad en función de la cota de inundación.

Para establecer la vulnerabilidad del puerto y determinar el nivel de inoperatividad debido a la agitación interior, se han utilizado los umbrales de tiempos de inoperatividad aceptables establecidos por las Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM). Asimismo, se ha

utilizado la tabla de caudales máximos definida por Franco et al. (1994), donde los umbrales determinan el caudal máximo para mantener la seguridad funcional y estructural de las infraestructuras.

Por último, para definir la vulnerabilidad de las estructuras de protección se ha definido una relación entre el peso de las piezas necesario para mantener la estabilidad y la altura de ola.

4. Caracterización de los impactos y evaluación del riesgo

Una vez caracterizadas la exposición y la vulnerabilidad, se han definido los peligros a los que está sometido el puerto. Posteriormente la combinación de los tres elementos permitirá la evaluación de las consecuencias de los impactos y su cuantificación económica.

Inundación

Se ha estudiado la inundación producida por un evento extremo, simulando el temporal de febrero de 2014. El modelo numérico utilizado para simular la inundación en tierra ha sido el RFSM-EDA (*Rapid Flood Spreading Method – Explicit Diffusion wave with Acceleration term*), un modelo hidrodinámico bidimensional desarrollado inicialmente en HR Wallingford y diseñado para funcionar de manera eficiente en todas las escalas, proporcionando profundidades de agua sobre el terreno y velocidades con tiempos de ejecución cortos. El modelo está basado en el método de almacenamiento de celdas y responde a una aproximación difusiva de las *Shallow Water Equations*, incorporando asimismo el término de la aceleración local. Su algoritmo permite considerar rasgos característicos de la topografía, derivados de un Modelo Digital de Terreno.

Dado que se está estudiando un puerto, la variable de entrada que alimenta el modelo es el caudal que rebasa los diques y muelles. Este caudal se ha calculado con formulación semiempírica que transforma el oleaje propagado a pie de dique (desde el punto que recoge las bases de datos), en caudal de rebase.

Se han obtenido los mapas de inundación del puerto para distintos escenarios de inundación, tomando el temporal como escenario base. Estos mapas se han cruzado con los mapas de activos y

flujo económico, y después se han aplicado las curvas de vulnerabilidad, teniendo como resultado el daño efectivo provocado por la inundación, tanto al *stock* capital como al flujo.

Operatividad

La determinación del nivel de operatividad del puerto se ha realizado en base al análisis del régimen medio, estudiando la agitación interior asociada a la altura de ola y el caudal de rebase de los diques.

Para el estudio de agitación se ha utilizado el modelo MSP, que resuelve la forma elíptica de la ecuación de la pendiente suave, empleando para ello un esquema de elementos finitos. A partir de la propagación de una serie de casos monocromáticos el modelo MSP realiza una reconstrucción energética tomando como espectro de forzamiento el oleaje en la corona de la malla.

Para determinar el nivel de operatividad se han calculado los caudales de rebase del régimen medio mediante formulación semiempírica.

La agrupación de la rentabilidad de las terminales permite obtener la pérdida económica al año derivada del cierre de una zona por inoperatividad.

Se obtienen como resultado los mapas de operatividad en el interior del puerto, tanto para la agitación interior como para el caudal de rebase.

Fiabilidad

Se ha determinado el nivel de fiabilidad actual de las estructuras, y se ha calculado el peso que deberían tener o bien las piezas del manto exterior (diques en talud) o bien el peso de la estructura superior (diques verticales), para mantener el riesgo actual. El resultado es una curva que relaciona la variable del peso con la altura de ola incidente en cada escenario de cambio climático. Por último, se ha recalculado el precio por metro lineal de dique que costaría en cada escenario.

5. Adaptación al cambio climático

En base a los resultados obtenidos en el estudio de riesgo del puerto, se ha propuesto en las zonas con mayor prioridad de actuación una estrategia

de adaptación al cambio climático, formada por la evaluación de un conjunto de medidas posibles, el estudio del momento óptimo de implementación y el desarrollo de una estrategia de seguimiento.

Se han determinado dos *hotspots* y se ha seleccionado la mejor medida a adoptar en cada uno de ellos mediante un análisis multicriterio. Las alternativas seleccionadas por este método se han implementado en el Puerto de Gijón y se ha recalculado el riesgo producido por los impactos en los escenarios de cambio climático, comprobando la eficacia de las alternativas.

En función del coste de las medidas y de los daños producidos actualmente por los impactos se ha determinado el momento óptimo de implementación de las medidas.

Finalmente se ha propuesto un plan de seguimiento de la eficacia de las medidas adoptadas mediante un sistema de indicadores.

Conclusiones y futuras líneas de investigación

En este trabajo se ha propuesto y aplicado en el Puerto de Gijón, una metodología completa de evaluación y reducción de riesgos inducidos por el cambio climático. Las herramientas utilizadas han posibilitado la simulación de los efectos del cambio climático en varios escenarios y la elaboración de una propuesta de adaptación. La aplicación de la metodología ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

- Debido a la incertidumbre existente en la evolución de las dinámicas, es necesario valorar distintos escenarios y elaborar estrategias de adaptación que permitan contraponerse a todos los estados futuros posibles.
- La calidad de los resultados depende directamente de la resolución de las bases de datos y de la calidad de la información.

- Para que la simulación de un impacto se ajuste a la realidad es indispensable una correcta interpretación de los resultados, la validación de los mismos y la calibración del modelo numérico.
- El Puerto de Gijón no presenta problemas significativos de agitación interior o de inestabilidad de las estructuras, pero sí tiene un riesgo de inundación que se verá incrementado con el tiempo.
- Los efectos de los impactos climáticos sobre el puerto afectan a la actividad económica de la región.
- El Puerto de Gijón puede adaptarse fácilmente a la variación de las dinámicas climáticas y mantener su crecimiento económico.

Se pueden ampliar y mejorar los resultados obtenidos en este trabajo mediante la simulación de un mayor número de escenarios de cambio climático y la calibración ajustada del modelo de inundación.

El desarrollo de la metodología para el análisis del riesgo debido al cambio climático en el Puerto de Gijón responde a la necesidad de adaptación de los puertos ante la inminencia de los efectos del cambio climático.

Referencias

[1] Franco, L., de Gerloni, M., and van der Meer, J. (1994) Wave Overtopping on Vertical and Composite Breakwaters. *Coastal Engineering* 1994: pp. 1030-1045.

[2] Slangen A.B.A., Carson M., Katsman C.A., van de Wal R.S.W., Köhl A., Vermeersen L.L.A. (2014). Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124, pp. 317-332.

Climate change risk assessment and reduction in the Port of Gijón

Student: Patricia González-Lamuño Rubiera

Directors: Iñigo J. Losada Rodríguez / Alexandra Toimil Silva

Degree: MEng Civil Engineering

Place and date: Santander, October 2016

Abstract

Global warming due to increased concentrations of greenhouse gases, caused by human activity, is causing changes in the frequency and intensity of coastal flooding and other extreme weather events.

The imminence of climate change makes it necessary to develop adaptation strategies in the areas of greatest exposure and vulnerability. Ports are particularly sensitive infrastructure due to its location on the coast and its long life, and potential impacts due to climate change will adversely affect the operation of the port and therefore the economic activity in the region.

In this project a methodology for climate change risk assessment and reduction in ports is developed, taking the Port of Gijón as a model, economic engine of Asturias, a region in the North of Spain.

Key words

Climate change, Ports, Coastal flooding, Agitation at the port, Reliability of the defences, Sea-level rise, Numerical simulation, Adaptation

Introduction

The sea-level rise and the increase in the storm frequency, as a result of climate change, cause port delays and closes and damage to infrastructure, among other impacts.

Due to the static nature of the ports the effects of climate change should be considered from the design of the port so that they can meet long-term climate impacts and adapt based on their evolution.

1. Determination of the port

The Port of Gijón is a seaport located in northern Spain and managed by the Port Authority of Gijón. This location gives the port waves of high intensity, mainly from the Northwest.

It is an artificial port generated from reclaimed land and protected by an outer breakwater and two natural ends. Inside it consists of a series of dams that minimize inner agitation, having a total of 6.9km of berthing with drafts of up to 23m, allowing the accommodation of vessels suitable for the carriage of goods.

It is a bulk port that has a fundamental role in the industrial activity of Asturias, assuming more than 11%GDP of the region. It consists of a set of

terminals operated by concession companies, which pay a canon of occupation and exploitation.

Port issues

In February 2014 a storm of great magnitude and high return period (to be taken as extreme base scenario) took place in Asturias, causing major structural damage to the port. The sea-level rise and the increase of the intensity of storms and rainfall due to climate change will increase the risk of coastal flooding and port agitation and affect the stability of the infrastructure.

The current vulnerability of the Port of Gijón will be increased due to climate change, being necessary to consider the projection of climate impacts in the life cycle of infrastructure and implement an adaptation strategy for the maintenance of the operating level of the port.

2. Proposed methodology

Risk analysis due to climate change has been framed within a broader risk methodology adopted by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The risk is determined as the probability of an event and its negative consequences as a result of dangerousness (risks

concerning climate) occurs, exposure (assets at risk) and vulnerability (susceptibility to damage).

When a danger becomes a threat the risk materializes in impacts. Climate change is not a risk per se, but it is the interaction between changes in climate and stemming threats with the vulnerability, and the systems exposure determines at all times the level of risk.

Climate change scenarios posed

In this project it has been used the RCP 8.5 scenario of the IPCC as the projection of climate change. This scenario includes a sea-level rise of 0.45 to 0.82m. This projection of global sea level has been regionalized for the basins worldwide by Slangen et al. (2014) in the period from 2081 to 2100, being a sea-level rise of 0.63m the one corresponding to Gijón.

In order to simulate the effects of climate change it has been defined a series of scenarios that combines variations in mean sea level (with the Slangen projection and hypothetical projections of 1 and 1.5m), in wave height (H_s increase of 20%) and precipitation (assuming heavy rain).

The impacts of climate change to be assessed are the changes in the port operation (by agitation and overtopping flow), reliability and port flooding. These impacts are produced by changes in the dynamics, among which are considered the mean sea level, waves, weather tide, astronomical tide and precipitation.

In order to analyse the changes experienced in the dynamics in recent years and to know their evolution over time it has been carried out a historical characterization of the dynamics, from high resolution databases, and its projection to 2100.

3. Exposure and vulnerability

Exposure and vulnerability databases have been generated, so that when an impact is applied on the port, it can be obtained the economic risk derivative thereof.

Exposure databases

It has been made an economic characterization of the port by analysing the database of the Port Authority of Gijón, distinguishing between the value of the installations (assets) and the

economic flows. The annual income from the collection of port fees and charges (occupation, operations, services, etc.) have been the flows considered.

Vulnerability curves

To assess the impact of flooding damage curves based on the functions of Hazus have been generated, relating the damage in assets with the flood level. To measure the impact on economic flow inoperability days depending on the flood level have been allocated.

To determine the vulnerability of the port acceptable inoperability time thresholds established by the Recommendations for Marine Works (ROM) have been used in order to measure the level of inoperability due to agitation. Moreover, it has been used the maximum flow chart defined by Franco et al. (1994), where the thresholds determine the maximum flow rate to maintain the functional and structural infrastructure security.

Finally, to define the vulnerability of the structures it has been defined a relationship between the weight of the dike breakwater pieces needed to maintain stability and wave height.

4. Characterization of the impacts and risk assessment

Once the characterization of the exposure and vulnerability of the port has been made, the dangers to which is subject the port have been defined. Then the combination of the three elements will allow the assessment of the impact consequences and its economic quantification.

Port flooding

It has been studied the flooding caused by an extreme event, simulating the storm of February 2014. The numerical model used to simulate coastal flooding has been the RFSM-EDA (Rapid Flood Spreading Method – Explicit Diffusion wave with Acceleration term), a two dimensional hydrodynamic model initially developed in HR Wallingford and designed to run efficiently on all scales, providing water depths and velocity with short execution times. The model is based on the method of storage cells approach and it responds to a diffusive approximation of the Shallow Water Equations, also including the term of the

local acceleration. Its algorithm allows to consider topography features, derived from a Digital Terrain Model.

Since a port is being studied, the input variable that feeds the model is the flow that exceeds the docks and piers. This flow is calculated with semi empirical formulation that transforms the waves spread to foot dam in overtopping flow.

Port inundation maps for different flood scenarios have been obtained, taking the storm as the basis scenario. These maps have been crossed with the maps of assets and economic flow, and then vulnerability curves have been applied, resulting in effective damage caused by the flooding, both to the assets and the economic flow.

Operability

The determination of the level of operation of the port has been made based on the analysis of the maritime climate, studying the agitation associated with the wave height and the overtopping flow.

To the study of agitation the MSP model was used, which solves the elliptical form of the equation of the mild slope, employing a finite element scheme. From the propagation of a series of monochromatic cases the model reconstructs an energy spectrum taking as forcing the wave series in the crown mesh.

The calculation of the overtopping flow of the maritime climate by semi-empirical formulation makes it possible to determine the level of operation.

The profitability database of the terminals makes it possible to obtain the economic loss per year resulting from the closure of an area due to agitation or overtopping.

Reliability

It has been determined the current level of reliability of structures and calculated the weight that the pieces of the outer mantle (dock in slope) or the weight of the upper structure (vertical docks) should have to maintain the current risk. The results is a curve relating the weight with the incident wave height in each climate change scenario. It has then been

recalculated the cost per linear meter of dock at every stage.

5. Climate change adaptation

Based on the results obtained from the risk assessment, it has been proposed in areas with a higher priority for action a strategy of adaptation to climate change, formed by the evaluation of a set of possible alternatives, the study of optimal implementation timing and the development of a monitoring strategy.

Two hotspots have been identified and it has been selected the best action to take in each of them through a multi-criteria analysis. The alternatives selected by this method have been implemented in the Port of Gijon and the risk caused by impacts has been recalculated, providing the effectiveness of alternatives.

Depending on the cost of the measures and the currently damage caused by the impacts it has been determined the optimal implementation timing of the adaptation measures.

Finally, it has been proposed a plan to monitor the effectiveness of measures taken by a system of indicators.

Conclusions and future research

In this project it has been proposed and implemented in the Port of Gijon a complete risk assessment and reduction due to climate change. The tools used have enabled the simulation of the effects of the climate change on various scenarios and the development of a proposal for adaptation. The application of the methodology has allowed the following conclusions:

- Due to the uncertainty in the evolution of the dynamics it is necessary to evaluate different scenarios and develop adaptation strategies that allow us to face all possible future states
- The quality of the results depends directly on the databases resolution and the quality of the information.
- For the fitting with reality of the simulation of an impact it is indispensable to make a correct interpretation of the results, to validate them and to calibrate the numerical model.
- The Port of Gijon presents no problem due to agitation or instability of the structures

but has a flooding risk that will be increased over time.

- The effects of climate change impacts on the port affect the economic activity of the region.
- The Port of Gijon can easily adapt to the change of climate dynamics and sustain its economic growth.

The obtained results in this project can be expanded and improved by simulating a larger number of climate change scenarios and by better adjusting the flooding model.

The development of a methodology of risk assessment due to climate change responds to

the need to adapt ports due to the imminence of the effects of climate change.

References

[1] Franco, L., de Gerloni, M., and van der Meer, J. (1994) Wave Overtopping on Vertical and Composite Breakwaters. *Coastal Engineering* 1994: pp. 1030-1045.

[2] Slangen A.B.A., Carson M., Katsman C.A., van de Wal R.S.W., Köhl A., Vermeersen L.L.A. (2014). Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124, pp. 317-332.

Índice de figuras

Figura 1 - Impactos atribuidos al cambio climático.....	17
Figura 2 - Mapa de España, localización Gijón (www.adevaherranz.es).....	21
Figura 3 - Vista aérea del puerto del Musel (Autoridad Portuaria de Gijón)	21
Figura 4 - Identificación Cabo de Peñas y Cabo de Torres (Fuente: Google Earth).....	22
Figura 5 - Rosas de oleaje distribución direccional alturas de ola (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014)	23
Figura 6 - Ortofoto del Puerto de Gijón (Autoridad Portuaria de Gijón)	25
Figura 7 - Sección transversal de un dique en talud, Dique Torres (Díaz et al., 2007).....	26
Figura 8 - Sección transversal de un dique vertical, Dique Norte (Díaz et al., 2007)	26
Figura 9 - Vista aérea del puerto y situación de las principales concesionarias (Autoridad Portuaria de Gijón)	28
Figura 10 - Nube de contaminación de carbón en el Puerto de Gijón (El Comercio, 28 julio 2015).....	29
Figura 11 - Rebase dique del puerto del Musel (La Nueva España, 22 febrero 2014)	30
Figura 12 - Esquema de la cadena de suministro (Negron, 2013)	33
Figura 13 - Zonificación de un puerto en subsistemas.....	34
Figura 14 - Metodología de riesgo del IPCC	36
Figura 15 - Clasificación del Puerto de Gijón en subsistemas	39
Figura 16 - Redes de conexión del Puerto con el exterior (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014)	40
Figura 17 - Emisiones de CO2 antropógenas acumuladas desde 1870 (Fuente: IPCC).....	43
Figura 18 - Emisiones antropógenas de CO2 anuales (Fuente: IPCC)	43
Figura 19 - Cambio en la temperatura media global en superficie y elevación del nivel medio global del mar de 2006 a 2100 (Fuente: IPCC).....	44
Figura 20 - Aumento del nivel medio del mar a fin de siglo en la costa de Asturias (IH Cantabria)	47
Figura 21 - Periodo de retorno del temporal en Gijón (IH Cantabria)	49
Figura 22 - Clasificación del puerto según la actividad económica (Fuente propia).....	52
Figura 23 - Mapa de activos (euros por metro cuadrado) (Fuente propia)	54
Figura 24 - Mapa de flujo económico (euros/día por metro cuadrado) (Fuente propia)	55
Figura 25 - Inventario de funciones de daño de Hazus (Gopi Goteti, 2014)	57
Figura 26 - Curva de daño oficinas y otros edificios (Fuente propia).....	58
Figura 27- Curva de daño industria e instalaciones de graneles líquidos (Fuente propia)	58
Figura 28 - Curva de daño explanada de graneles sólidos (Fuente propia)	59
Figura 29 - Curva de daño terminal de contenedores (Fuente propia).....	60
Figura 30 - Curva de daño almacén de cereales (Fuente propia).....	60
Figura 31 - Curva de daño lonja, fábrica de hielo y almacenes (Fuente propia).....	61
Figura 32 - Curva de daño tinglados (Fuente propia).....	61
Figura 33 - Condicionantes límite de operación y tiempos de inoperatividad (ROM 3.1-99).....	62
Figura 34 - Caudales de rebase tolerables (l/s/m) (Franco et al. (1994)).....	63
Figura 35 - Relación entre el rebase y la variación del nivel medio (NU. CEPAL et al., 2012).....	63
Figura 36 – Esquema de Impact Zones y sus puntos de comunicación (Benwell et al., 2008)	66
Figura 37 - Esquema de una IZ y su IZ vecina, vista en planta y de perfil (Jamieson et al., 2012)	67
Figura 38 - Representación punto DOW (Fuente propia)	67
Figura 39 - Valor del Total Water Level los días 1 y 2 de febrero 2014 (Fuente propia)	68
Figura 40 - Modelo Digital del Terreno (Fuente propia)	70
Figura 41 - CORINE Land Cover en España (IGN).....	71
Figura 42 - Mapa usos del suelo (Fuente propia).....	72
Figura 43 - Zoom del dique en la malla de Impact Zones (Fuente propia).....	73

Figura 44 - Malla Impact Zones (Fuente propia)	74
Figura 45 - Representación del francobordo y del caudal de rebase (Fuente propia).....	76
Figura 46 - Malla computacional MSP (Proyecto SAMOA)	77
Figura 47 - Zoom malla computacional MSP (Proyecto SAMOA).....	77
Figura 48 - Puntos comprendidos dentro de un área (Fuente propia)	78
Figura 49 - Contorno de la malla y áreas de generación de resultados (Fuente propia)	79
Figura 50 - Mapa de inundación Escenario Base (Fuente propia).....	81
Figura 51 - Mapa isoalturas de ola 2 febrero 2014, 5:00 am	82
Figura 52 - Zoom de la escollera del Dique de la Osa (Fuente propia)	83
Figura 53 - Mapa de inundación Escenario 1 (Fuente propia)	84
Figura 54 - Mapa de inundación Escenario 2 (Fuente propia)	85
Figura 55 - Mapa de inundación Escenario 3 (Fuente propia)	86
Figura 56 - Mapa de inundación Escenario 4 (Fuente propia)	87
Figura 57 - Mapa de inundación Escenario 5 (Fuente propia)	88
Figura 58 - Mapa de inundación Escenario 6 (Fuente propia)	89
Figura 59 - Zonificación para el estudio de operatividad (Fuente propia)	91
Figura 60 - Coeficientes de propagación en el Puerto de Gijón	93
Figura 61 - Función de Distribución Acumulada de Hs.....	95
Figura 62 - CDF del régimen medio del periodo.....	98
Figura 63 - Caudales de rebase tolerables (l/s/m) (Franco et al. (1994)).....	100
Figura 64 - Mapa de operatividad Escenario Base (Fuente propia)	103
Figura 65 - Mapa de operatividad Escenario 1 (Fuente propia).....	104
Figura 66 - Mapa de operatividad Escenario 2 (Fuente propia).....	105
Figura 67 - Mapa de operatividad Escenario 3 (Fuente propia).....	106
Figura 68 - Mapa de operatividad Escenario 4 (Fuente propia).....	107
Figura 69 - Dique en talud y dique vertical (Fuente propia)	108
Figura 70 - Valores máximos función de estabilidad (Losada y Desiré (1985)).....	110
Figura 71 - Relación variación peso piezas y altura de ola Dique Torres (Fuente propia)	112
Figura 72 - Relación variación peso piezas y altura de ola Dique de Aboño (Fuente propia).....	112
Figura 73 - Presiones actuantes sobre un dique vertical (Goda 1985)	115
Figura 74 - Variación peso cajonero con el cambio climático (Fuente propia)	116
Figura 75 - Esquema procedimiento obtención daño producido por inundación (Fuente propia)	119
Figura 76 - Subsistemas del Puerto de Gijón (Fuente propia).....	120
Figura 77 - Comparación mancha de inundación antes y después de la adaptación: Escenario 4.....	137
Figura 78 - Comparación mancha de inundación antes y después de la adaptación: Escenario 5.....	137
Figura 79 - Momento óptimo de implementación medidas de adaptación	139
Figura 80 – Esquema de Impact Zones y sus puntos de comunicación (Benwell et al., 2008)	146
Figura 81 - Esquema de una IZ y su IZ vecina, vista en planta y de perfil (Gouldby et al., 2012)	147
Figura 82 - Esquema de una interfaz entre dos Impact Zones vecinas (Jamieson et al. 2012).....	148
Figura 83 - Malla computacional del MSP (Proyecto SAMOA).....	153
Figura 84 - Batimetría Puerto Gijón (Autoridad Portuaria Gijón)	154
Figura 85 – Malla computacional en bajamar (Proyecto SAMOA).....	154
Figura 86 - Coeficientes de reflexión utilizados en la malla MSP (Proyecto SAMOA).....	156

Índice de tablas

Tabla 1 – Régimen de vientos Puerto de Gijón (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014)	22
Tabla 2 - Características temporal T= 100 años (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014)	23
Tabla 3 - Características mareas (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014).....	24
Tabla 4 - Principales empresas en el Puerto de Gijón (Plan Sostenibilidad Puerto Gijón).....	27
Tabla 5 - Rentabilidad Puerto de Gijón por muelles (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014)	56
Tabla 6 - Relación entre la cota de inundación y el tiempo de inoperatividad.....	62
Tabla 7 - Clases usos del suelo Puerto de Gijón	71
Tabla 8 - Condiciones límites de operación y tiempos máximos de inoperatividad (Adaptación Tabla 8.1 de la ROM 3.1-99)	94
Tabla 9 - Tiempos de inoperatividad por agitación interior en el puerto	96
Tabla 10 - Umbrales del caudal de rebase en el Puerto de Gijón (Adaptado de Franco et al. (1994))	100
Tabla 11 - Tiempos de inoperatividad por un exceso de caudal de rebase	101
Tabla 12 - Agrupación daños inundación por subsistemas.....	120
Tabla 13 - Comparación daños producidos por inundación en los escenarios de cambio climático..	121
Tabla 14 - Riesgo inoperatividad por agitación y caudal de rebase.....	121
Tabla 15 - Precio por metro lineal de dique debido al cambio climático.....	122
Tabla 16 - Indicadores definidos para el análisis multicriterio.....	126
Tabla 17 - Coeficiente corrector para la consideración de sinergias entre variables - Aboño.....	130
Tabla 18 – Ponderación de las alternativas - Aboño	130
Tabla 19 - Puntuación final de las alternativas - Aboño.....	131
Tabla 20 - Coeficiente corrector para la consideración de sinergias entre variables - Muelle Norte.	135
Tabla 21 - Ponderación de las alternativas - Muelle Norte.....	135
Tabla 22 - Puntuación final de las alternativas - Muelle Norte.....	136
Tabla 23 - Medida eficiencia de las medidas en la reducción del daño	138
Tabla 24 - Disminución riesgo caudal de rebase en Aboño	138
Tabla 25 - Año de implementación en función del escenario de cambio climático	139
Tabla 26 - Indicadores para el plan de seguimiento de las alternativas	140
Tabla 27 - Características malla computacional MSP.....	155

1 – Introducción

1. Introducción

La influencia del ser humano sobre el clima ha desencadenado la aceleración de un fenómeno que afecta a los sistemas naturales y humanos, al contribuir al calentamiento global con el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. El cambio climático provoca cambios en la frecuencia, intensidad, extensión espacial, duración y momento esperado de fenómenos extremos meteorológicos y climáticos, derivándose de todo ello un clima excepcionalmente extremo (Rogelj et al., 2012).

Uno de los efectos más importantes del cambio climático es el aumento del nivel del mar, provocado fundamentalmente por el derretimiento de los glaciares y el efecto sobre ríos y lagos. Esta circunstancia se debe a que entre las regiones más afectadas por el cambio climático se encuentran las regiones polares, con impactos relevantes en glaciares. (Figura 1).

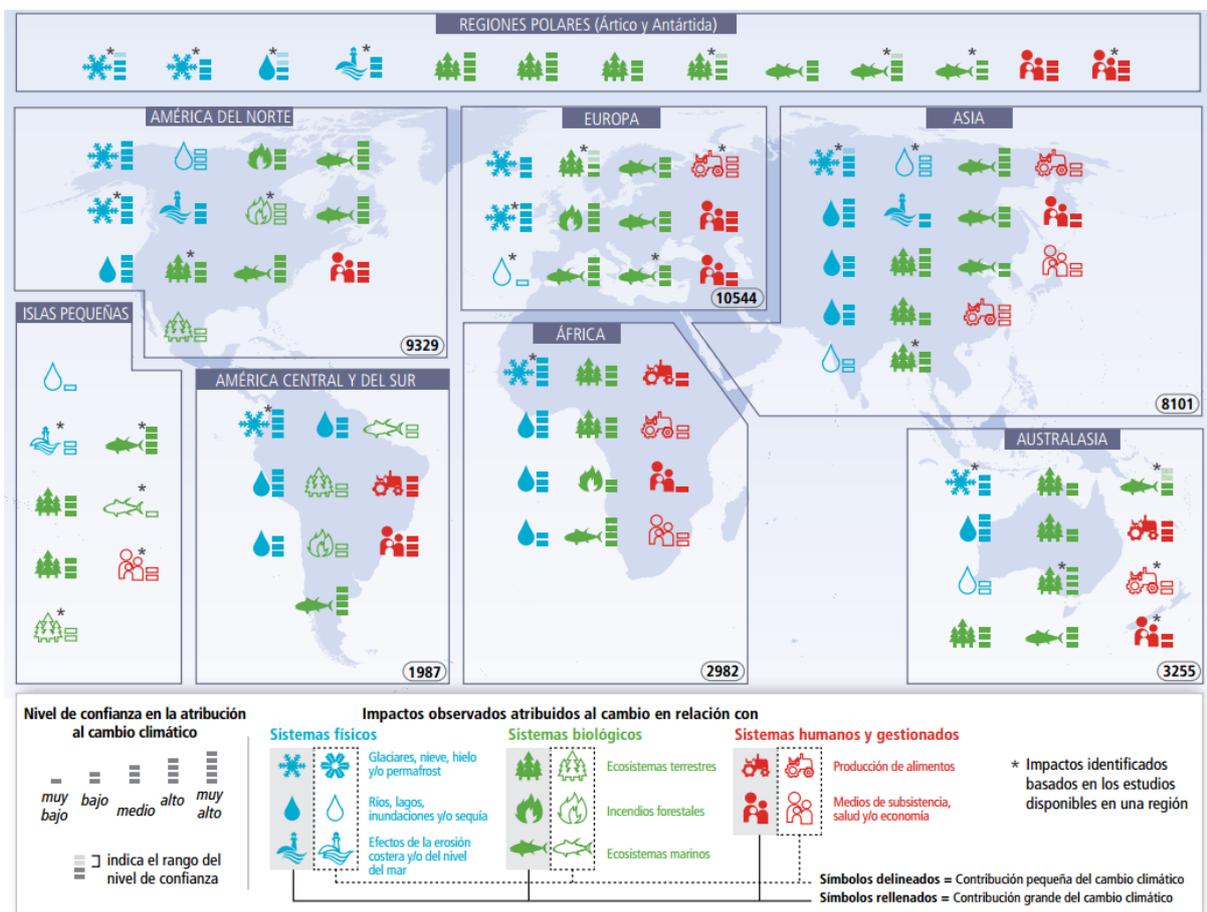


Figura 1 - Impactos atribuidos al cambio climático

Los cambios derivados del cambio climático son inminentes y es por ello que en el último tiempo ha venido cobrando fuerza la urgencia de desarrollar estrategias de adaptación. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) define adaptación como “El ajuste en los sistemas naturales o humanos como respuesta a estímulos climáticos actuales o esperados, o sus impactos, que reduce el daño causado y que potencia las oportunidades benéficas”. La falta de experiencia y la incertidumbre que rodea la toma de decisiones (debido a la falta de información, modelos utilizados y

efectividad de las medidas de adaptación), son dos de los impedimentos existentes en el desarrollo de este tipo de estrategias, por lo que en los marcos estratégicos se proponen cuatro etapas para orientar los pasos a seguir en la elaboración de una estrategia de adaptación: información y sensibilización; planificación y diseño; implementación y monitoreo, seguimiento y evaluación. En general las respuestas y decisiones encaminadas a la adaptación suelen ir dirigidas a aumentar la capacidad de adaptación o a desarrollar acciones para adaptarse y reducir la vulnerabilidad de los sistemas. La adaptación conlleva la mejora de los recursos y capacidades existentes para poder hacer frente a las condiciones climáticas variables y adversas, desarrollando por un lado estrategias que nos permitan enfrentarnos a las condiciones actuales, y por otro lado, estrategias que nos permitan contraponernos a los estados futuros (Losada et al., 2013).

En la actualidad, los procesos de desarrollo de inversión de infraestructura deben contemplar la proyección de los impactos climáticos dentro de los procedimientos que forman parte del ciclo de vida de las obras, e ir en búsqueda de metodologías que permitan evaluar alternativas de adaptación (Losada et al., 2013).

Los puertos son infraestructuras especialmente vulnerables al cambio climático debido a su larga vida útil, su localización en la costa, el manejo de productos sensibles a cambios climáticos, la vulnerabilidad de sus redes de conexión y la reducción de operatividad en caso de condiciones climáticas adversas (Stenek et al., 2011). Cambios como el aumento del nivel del mar o la intensidad de los temporales se traducen en impactos sobre las funciones del puerto, por lo que la necesidad de adaptación no viene dada solamente por la seguridad de la infraestructura sino también por la protección de las instalaciones y de las actividades económicas. La tecnología y construcción de las embarcaciones pueden ir desarrollándose con la evolución climática, pero un puerto es una infraestructura inmóvil que debe diseñarse de manera que pueda afrontar a largo plazo los impactos climáticos y su consecuente evolución. En el diseño del puerto se deberá garantizar la operatividad del mismo, para lo cual se deberán conocer las características y probabilidades de las condiciones climáticas extremas que puedan darse.

Así, la Asociación de Puertos Británicos identifica como impactos potenciales debidos al cambio climático en los puertos los siguientes puntos: los retrasos, el cierre de puertos, la no ocurrencia de actividades debido al riesgo de inundación y a condiciones climáticas adversas, daños en las infraestructuras y cambios en los procesos de sedimentación y en las mareas, transformando los canales de navegación y haciendo necesarias la realización de labores de mantenimiento. El efecto negativo que tienen estos impactos sobre la actividad económica del puerto puede llevar al declive de la región de influencia, por lo que en la estrategia de adaptación deben considerarse aspectos ligados al desarrollo económico de la población. Para poder asegurar el funcionamiento y la operatividad de los puertos estos deberán adaptar sus infraestructuras e instalaciones, elevando la altura de los diques o reorganizando la distribución de los elementos en función de su grado de exposición (Watson et al., 2010).

En el caso de que, debido al excesivo sobrecoste de las infraestructuras, se considere la opción de no adaptación del puerto para reducir los impactos extremos derivados del cambio climático, los días de operatividad del mismo se reducirán, aumentando el tiempo de espera de las embarcaciones e incrementándose el coste del transporte. Estas circunstancias pueden condicionar finalmente que las embarcaciones se decidan por otros puertos, provocando como ya se ha mencionado el declive económico del puerto y de la ciudad o región. Cada puerto tiene unas características y funciones distintas y por tanto una vulnerabilidad específica, por lo que las medidas de adaptación y su coste serán variables y específicas para cada puerto.

Desde el siglo pasado se ha ido generando una serie de evidencias relativas al cambio climático y al posible impacto sobre el planeta. En el año 1988 se crea el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), con la finalidad de proporcionar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. Desde el inicio han generado cinco informes de evaluación, que se han actualizado de acuerdo al conocimiento existente sobre el cambio climático.

En 2014 el IPCC finalizó el Quinto Informe de Evaluación, preparado por tres grupos de trabajo, que comprende bases físicas; impactos, adaptación y vulnerabilidad, y mitigación del cambio climático, además de un Informe de síntesis. Respecto a los informes anteriores, en el Quinto Informe se hace hincapié en la evaluación de los aspectos socioeconómicos del cambio climático y sus consecuencias para el desarrollo sostenible, los aspectos regionales, la gestión de riesgos y la elaboración de una respuesta mediante la adaptación y la mitigación.

La Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) entró en vigor en 1994 y su objetivo principal es el “impedir la interferencia peligrosa del ser humano en el sistema climático”. La primera adición al Protocolo de Montreal de 1987 (tratado multilateral sobre medio ambiente) fue el Protocolo de Kioto, que se aprobó en 1997. Los países que forman parte de la convención deben tener en cuenta el cambio climático en los asuntos relacionados con la agricultura, la industria, los recursos naturales y las actividades que afectan a los litorales marinos, además de establecer programas nacionales para frenar el cambio climático. La última iniciativa de la convención es el acuerdo de París, cuyo objetivo es “mostrar los compromisos y las asociaciones de ciudades, regiones, empresas y organizaciones de la sociedad civil, a menudo con los gobiernos, mediante las que se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y se construye resiliencia contra el cambio climático”.

Todos los países que forman parte de la convención han elaborado marcos de referencia para la evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, como es el caso del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) en España, que fue adoptado por el Consejo de Ministros en el año 2006. Además, los países desarrollados deben colaborar en la redacción de marcos estratégicos en los países en vías de desarrollo. El Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IH Cantabria) ha participado en la elaboración de estos marcos estratégicos de países como Chile o Colombia.

A pesar de tener en España un plan de adaptación, el seguimiento de los impactos producidos por el cambio climático en las infraestructuras costeras no está implementado en los informes anuales de los puertos. En países como Inglaterra se lleva incorporando este tipo de análisis en el estudio general de los puertos desde el año 2012, habiendo sido aprobada la elaboración de este tipo de informes en el año 2008 en el *Climate Change Act*.

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio sobre el Puerto de Gijón, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de modelos numéricos avanzados realizados por IH Cantabria, y siguiendo la estrategia de adaptación marcada por el IPCC, para implementar de manera pionera el cambio climático en la memoria anual del puerto. La importancia de estudiar el Puerto de Gijón radica en el papel estratégico que tiene en la economía del Principado de Asturias y en el desarrollo de la industria. El puerto busca convertirse en plataforma logística internacional a través de la ampliación de su horizonte de mercado, la diversificación de su actividad y la potenciación de la mercancía contaneirizada.

2 – Descripción del puerto de estudio

2. Descripción del puerto de estudio: Puerto de Gijón

Localización y dinámicas generales

El Puerto de Gijón es un puerto marítimo situado en la provincia de Asturias, en el norte de España, y gestionado por la Autoridad Portuaria de Gijón.



Figura 2 - Mapa de España, localización Gijón (www.adevaherranz.es)

Está formado por el puerto del Musel (longitud 5°41' oeste, latitud 43°34' norte) y por un puerto deportivo. El Musel es el puerto comercial de estudio, es un puerto exterior separado del casco urbano y dedicado a las actividades comerciales, pesqueras y de transporte de mercancías y de viajeros.



Figura 3 - Vista aérea del puerto del Musel (Autoridad Portuaria de Gijón)

Como se puede ver en la figura 4, el Musel está protegido por el Cabo de Torres y el Cabo de Peñas, al este del cual se sitúa el puerto. Estas infraestructuras naturales abrigan el puerto frente a los temporales procedentes del oeste y noroeste, pero no frente al oleaje procedente de otras direcciones dominantes, como son el nornoroeste o el norte (Díaz et al. 2007).



Figura 4 - Identificación Cabo de Peñas y Cabo de Torres (Fuente: Google Earth)

El puerto tiene un régimen de vientos dominante procedente del noroeste y vientos frecuentes que soplan del oeste y especialmente del suroeste en invierno y del noreste en verano.

Régimen de vientos	
Reinante	Dominante
W	NW
SW invierno	
NE verano	

Tabla 1 – Régimen de vientos Puerto de Gijón (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014)

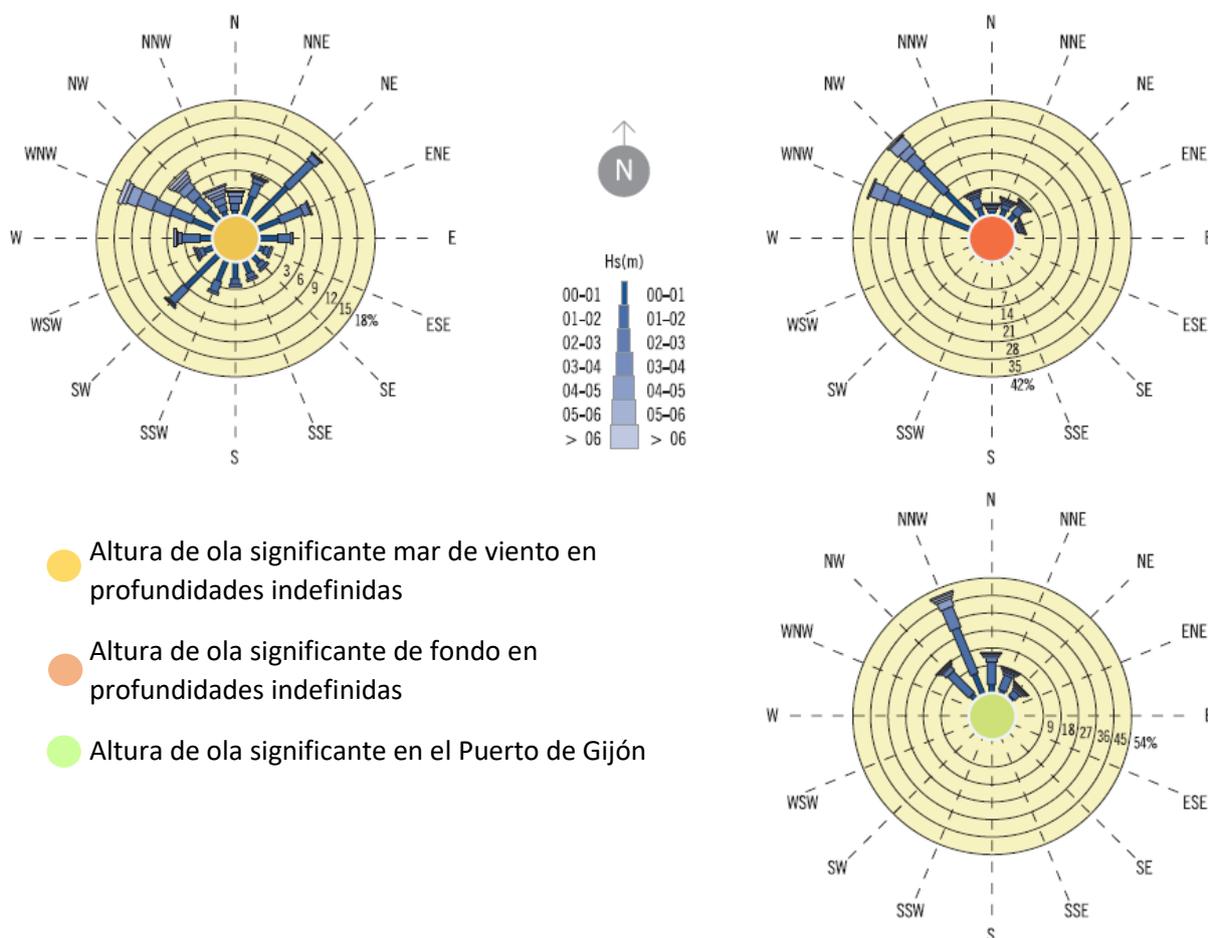
La localización del puerto en el Mar Cantábrico supone tener que hacer frente a grandes temporales, que serán de mayor o menor magnitud en función de la intensidad del viento, altura de ola, periodo y dirección del oleaje y carrera de marea, entre otros.

Régimen de temporales en aguas profundas o temporales teóricos

Las rosas de oleaje representan gráficamente la magnitud, frecuencia y dirección de las alturas de ola producidas en aguas profundas para un régimen de temporales.

Las mayores alturas de ola significativa producidas por mar de viento se generan en el noroeste, aunque es en el noreste, suroeste y noroeste donde se generan las olas con más frecuencia. Las mayores alturas de ola significativa de fondo se generan en el noroeste, con una frecuencia de aparición cercana al 42%.

La mayor altura de ola significativa en intensidad y frecuencia en el Puerto de Gijón se produce en el nornoroeste, con una aparición cercana al 54%.



- Altura de ola significativa mar de viento en profundidades indefinidas
- Altura de ola significativa de fondo en profundidades indefinidas
- Altura de ola significativa en el Puerto de Gijón

Figura 5 - Rosas de oleaje distribución direccional alturas de ola (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014)

Un temporal de gran magnitud puede asociarse a un periodo de retorno de 100 años, que en el Puerto de Gijón la altura de ola máxima llegaría a alcanzar los 17,55 metros:

Temporal con período de retorno de 100 años			
Fetch	Hmax = 1,8 Hs	Máxima longitud de ola	Ola significativa Hs
4.250 km	17,55 m	415 m	9,75 m

Tabla 2 - Características temporal T= 100 años (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014)

El Mar Cantábrico se caracteriza por tener una gran carrera de marea en comparación con el Mar Mediterráneo. Las mareas vivas incrementan la magnitud de los temporales, por lo que son una dinámica a tener especial consideración. En el Puerto de Gijón la máxima carrera de marea puede llegar a los 4.98 metros. La suma de las condiciones astronómicas causantes de las mareas forma la

pleamar máxima viva equinoccial (la PMVE es la marea más alta teórica) y la bajamar máxima viva equinoccial (la BMVE es la marea más baja teórica).

Mareas		
Máxima carrera de marea	Cota media de B.M.V.E. respecto al cero del puerto	Cota media de P.M.V.E. respecto al cero del puerto
4,98 m	+0,16 m	+5,40 m

Tabla 3 - Características mareas (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014)

Se va a utilizar como sistema de referencia el Nivel Medio del Mar en Alicante, que se encuentra 2.361 metros por encima del cero del puerto del Puerto de Gijón. El cero del puerto está definido por el propio puerto y coincide con la mínima bajamar. La corrección aplicada para pasar del nivel del mar local al NMMA ha sido de 0,35 metros.

2.1 Descripción Puerto de Gijón

El Puerto de Gijón es uno de los principales Puertos Marítimos del Arco Atlántico y el puerto líder en el movimiento de gráneles sólidos (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014). Juega un papel fundamental tanto en la economía de Gijón como en la del Principado, suponiendo la actividad económica del puerto más del 11% PIB de Asturias y generando un 7% de empleo. Está gestionado por la Autoridad Portuaria de Gijón (abarcando un dominio público de 4000 ha de aguas en zonas I y II portuarias y 422 ha de superficie terrestre), que a través de la promoción de su desarrollo empresarial e industrial, busca convertir el puerto en Plataforma Logística de la Cornisa Cantábrica a medio plazo y posicionarlo como un enclave referente en el Arco-Atlántico a medio-largo plazo (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014).

El Puerto de Gijón está conectado con más de 200 puertos de todo el mundo a través de una importante red de líneas regulares, dispone de rápidos accesos a las redes transeuropeas de transporte por carretera y es el puerto líder español en el movimiento de mercancías por FFCC. La Autovía del Mar conecta el Puerto de Gijón con el Puerto de Nantes-Saint Nazaire.

Como se puede ver en la figura 6 el Musel es un puerto artificial generado a partir de terrenos ganados al mar y protegidos por un dique exterior (Dique Norte, Contradique exterior y Dique Torres) de 4 km de longitud y, como se mencionaba en las dinámicas, por los Cabos de Torres y Peñas. Dispone de 6,9 km de línea de atraque con calados de hasta 23 m que le permiten albergar embarcaciones aptas para el transporte de mercancías. El Dique de Aboño protege la explanada de Aboño y el Dique de la Osa, el Dique Príncipe de Asturias y el Contradique contribuyen a la minimización de la agitación interior, además de albergar muelles en el caso de la Osa.

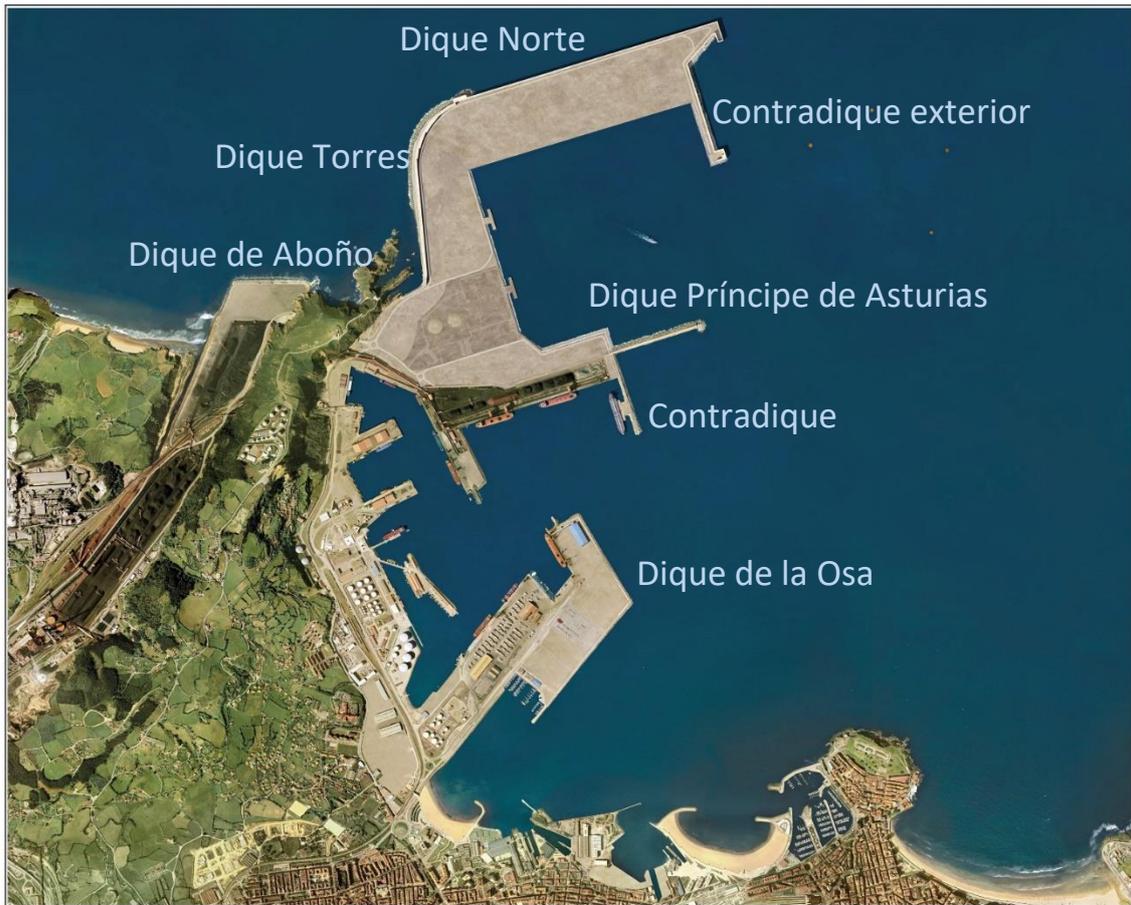


Figura 6 - Ortofoto del Puerto de Gijón (Autoridad Portuaria de Gijón)

El Dique de Aboño, el Dique Torres, el Dique Príncipe de Asturias, el Contradique y el Dique de la Osa son diques en talud cuyas secciones están formadas por mantos de todo-uno protegidos por mantos de escollera. El Dique Norte es un dique vertical formado en su totalidad por cajones protegidos por escollera y el Contradique exterior combina partes de dique en talud con cajones verticales en el extremo de la estructura.

A continuación se representan las secciones tipo de un dique en talud y un dique vertical, donde en cada estructura variará el tamaño de las piezas, espesor de las capas y dimensiones del cajón.

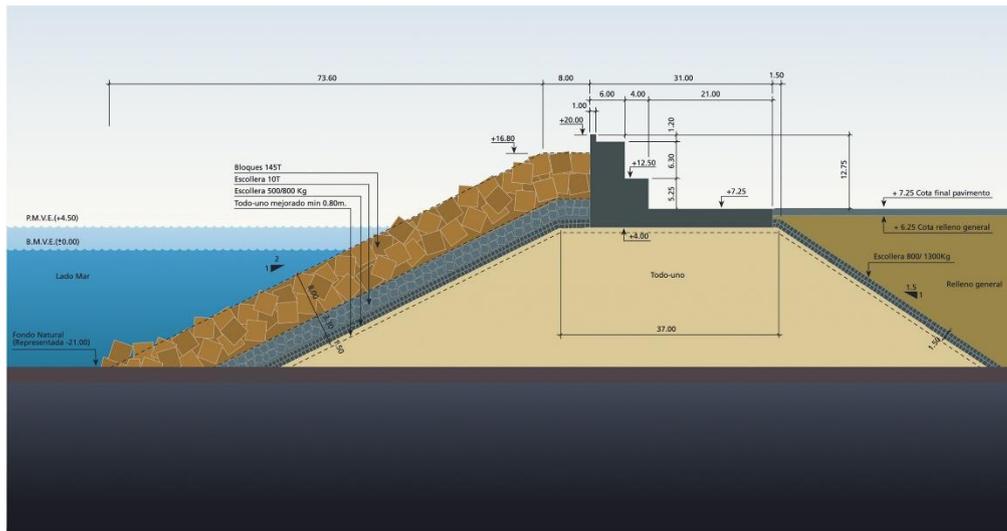


Figura 7 - Sección transversal de un dique en talud, Dique Torres (Díaz et al., 2007)

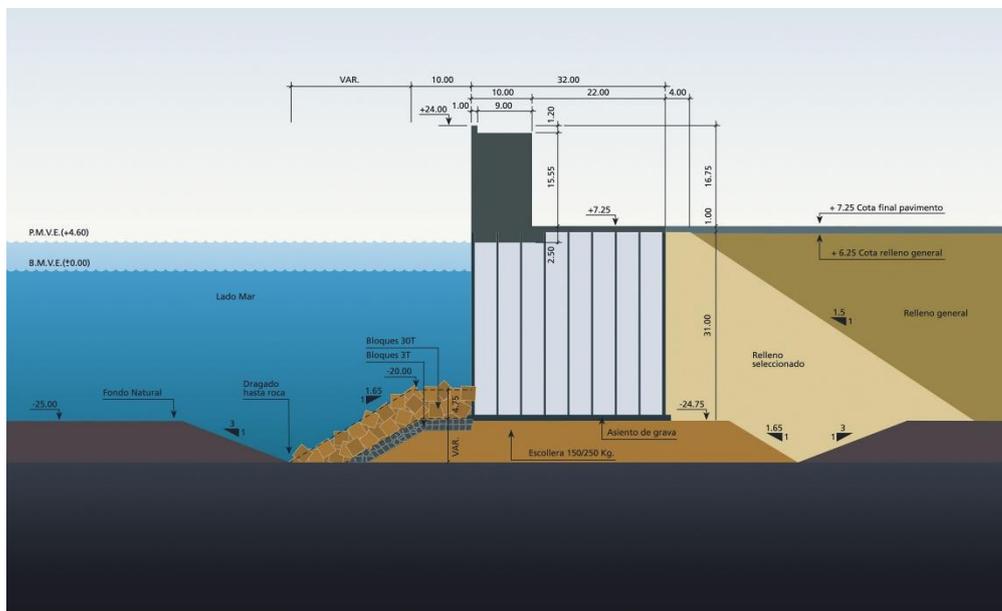


Figura 8 - Sección transversal de un dique vertical, Dique Norte (Díaz et al., 2007)

Explotación del Musel

El Puerto de Gijón está formado por un conjunto de terminales que albergan contenedores, gráneles sólidos, cereales, carga general, Ro-Ro, productos siderúrgicos, gráneles líquidos y pesca. Las terminales son explotadas por empresas, que se instalan en el puerto mediante concesión, por la que abonan un canon en materia de ocupación y explotación. En la tabla 4 se recogen las principales concesionarias del Musel, la mayoría dedicadas al almacenamiento y explotación de los gráneles sólidos, pero otras especializadas en gráneles líquidos, contenedores o mercancía general.

GRÁNELES SÓLIDOS	GRÁNELES LÍQUIDOS
Carbón y mineral de hierro	Butano y propano
1. E.B.H.I, SA (European Bulk Handling Installation, SA)	9. Repsol Butano, S.A.
Carbón	Asfalto
2. E.B.H.I, SA (European Bulk Handling Installation, SA)	10. CEPESA Comercial Petróleo, S.A.
3. García Munté Energía, S.L.	11. DITECPESA
Cemento	Gas Natural
4. S.A. Tudela Veguín	12. ENAGÁS, S.A.
5. Comercial Asturiana de Graneles, S.A.	Gasolina y gasóleo
Cereales	13. Petróleos Asturianos
6. Ceferino Ballesteros	14. C.L.H., S.A.
Almacenamiento y clasificación de carbones	15. Galp Distribution Oil España, S.A.U.
7. Bergé Marítima, S.L.	
8. Lissan Coal Company, S.A.	
	GENERAL
	16. Terminal de Contenedores de Gijón (TCG)
	17. ARCELOR MITTAL España, S.A.
	18. TERPOR, S.L.

Tabla 4 - Principales empresas en el Puerto de Gijón (Plan Sostenibilidad Puerto Gijón)

En la figura 9 se muestra una vista aérea del Puerto de Gijón con la ubicación de las principales empresas concesionarias mencionadas. Las localizaciones numeradas del 1 al 8 corresponden a las terminales especializadas en gráneles sólidos, como carbón, cemento y cereales, además de las instalaciones para el almacenamiento y clasificación de carbones. Las localizaciones numeradas del 9 al 15 son las terminales especializadas en gráneles líquidos y albergan el butano y propano, el gas natural y la gasolina y gasóleo. Por último, las localizaciones 16, 17 y 18 forman las terminales especializadas de mercancía general, donde se encuentra la Terminal de Contenedores, los productos siderúrgicos y las instalaciones de servicios necesarias para la Autopista del Mar.



Figura 9 - Vista aérea del puerto y situación de las principales concesionarias (Autoridad Portuaria de Gijón)

2.2 Problemática del Puerto

Cada puerto tiene una problemática distinta, en función de la localización, las condiciones climáticas, la magnitud de las infraestructuras y de la actividad económica. El Puerto de Gijón se caracteriza por estar afectado por dinámicas fuertes (olas grandes, fuertes vientos...), por tener una gran extensión terrestre y por su actividad económica granelera. La actividad económica del Puerto de Gijón está basada principalmente en el tráfico de mercancías, conectado con más de 200 puertos en todo el

mundo a través de una extensa red de líneas regulares, además de estar comunicado con las redes transeuropeas de transporte por carretera y con las líneas de ferrocarril que lo comunican con la Meseta.

El cambio climático puede afectar de forma significativa la eficiencia del puerto tanto en el suministro como en la capacidad de transporte de mercancías. Analizando de forma individual cada una de las variables afectadas por el cambio climático, vemos cómo al modificarse la temperatura o las precipitaciones en muchas regiones que comercian a través del puerto, se alteran las características climáticas de la zona, lo cual provoca un cambio en la producción o incluso desaparición del tipo de productos con los que comercia, como por ejemplo los cereales.

Por otro lado, cambios en el oleaje y en las corrientes pueden ocasionar la modificación de los canales de navegación del puerto, lo que hace necesario ejecutar operaciones de dragado para su mantenimiento. Asimismo, un aumento en la velocidad del viento afectará a la operatividad del puerto, siendo necesaria la interrupción de las operaciones con maquinaria e incluso el traslado de la misma en caso de superar los límites de velocidad establecidos. El viento provoca también la suspensión de actividades como el manejo de gráneles sólidos en caso de riesgo de contaminación de las instalaciones del puerto y de las regiones cercanas. Actualmente la nube de contaminación provocada por el carbón en días de fuerte viento alcanza al Concejo de Carreño, próximo al Puerto de Gijón.



Figura 10 - Nube de contaminación de carbón en el Puerto de Gijón (El Comercio, 28 julio 2015)

Por último, el incremento de la intensidad de los temporales, de las precipitaciones y principalmente el aumento del nivel del mar acentuará el riesgo de inundación del puerto, que entre todas sus zonas tendrá unas más expuestas que otras. Esto puede provocar la salida de los usuarios del puerto a otros puertos que resulten más fiables al ser las condiciones climáticas sean menos severas. Los temporales provocan congestiones y retrasos en el tráfico del puerto, desencadenando colas de espera de las embarcaciones e incluso la interrupción de las actividades de carga y descarga. Las aguas dentro del puerto deben ser lo suficientemente estables como para garantizar la seguridad y operatividad de las embarcaciones.

Entre 2005 y 2010 se realizó una ampliación del Puerto de Gijón con el fin de dotar al puerto de unas condiciones que le permitieran satisfacer las necesidades futuras. Actualmente el puerto tiene capacidad más que suficiente para responder a la demanda actual del tráfico de mercancías, además de contar con un amplio margen de crecimiento y evolución, disponiendo de amplias explanadas para la ubicación de futuras infraestructuras o para la ampliación de las instalaciones dedicadas a los gráneles.

Otro de los objetivos era el de proporcionar una protección extra al puerto frente a los temporales. Sin embargo, en febrero de 2014 tuvieron lugar una serie de temporales de magnitud muy superior a los habituales, con un periodo de retorno de 100 años, ocasionando daños estructurales en el puerto. La escollera del dique de protección de la explanada de Aboño sufrió graves daños, teniendo que ser reparada de emergencia para reemplazar la escollera. También se produjeron daños en el talud interior del dique este de la playa de Poniente, que si bien no forma parte de la estructura del puerto, forma parte de su área de influencia y depende de las dinámicas del puerto. (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014).



Figura 11 - Rebase dique del puerto del Musel (La Nueva España, 22 febrero 2014)

La inversión requerida para la ejecución de las obras de reparación debido a los graves temporales del 2014 superó el millón de euros. El Puerto de Gijón no puede asegurar una fiabilidad total de sus estructuras, ya que como se comentaba en la introducción es imposible garantizar una seguridad absoluta cuando se está trabajando en un ambiente de gran incertidumbre como es el cambio climático, pero en función del coste que se pueda asumir se alcanzará un grado de fiabilidad u otro. Los temporales del 2014 son sólo una muestra de los impactos que puede sufrir el puerto en el futuro, que se irán acentuando en intensidad y frecuencia.

El Puerto de Gijón tiene por tanto una problemática a día de hoy, como es la vulnerabilidad de las infraestructuras ante los temporales, el riesgo de inundación de las instalaciones, la interrupción de la operatividad del puerto en caso de condiciones meteorológicas adversas y la contaminación debido a los gránulos sólidos, que se verá incrementada debido al cambio climático. La evolución en el tiempo de las dinámicas que afectan al puerto nos lleva a contemplar la proyección de los impactos climáticos en los estudios del ciclo de vida de las obras, e implementar alternativas de adaptación que permitan la ejecución óptima de las actividades del puerto a lo largo de toda su vida útil.

En este trabajo se valorará la exposición y vulnerabilidad de las distintas regiones del puerto y se estudiará la evolución del riesgo de las mismas con el cambio climático.

3 – Metodología propuesta

3. Metodología propuesta

3.1 El puerto como un sistema de sistemas

Un puerto está constituido por un conjunto de instalaciones especializadas (terminales) que componen la interfase entre el transporte marítimo y los demás modos de transporte. Las terminales están formadas por infraestructuras, maquinaria y recursos humanos que hacen posible su correcto funcionamiento, y a su vez se dividen en diferentes subsistemas para el reparto de tareas. Por tanto podemos definir un puerto como un sistema compuesto por un conjunto de sistemas, cada uno de ellos con una función específica, que dentro de la cadena de suministro forma el nodo principal entre las redes de transporte terrestres y marítimas.

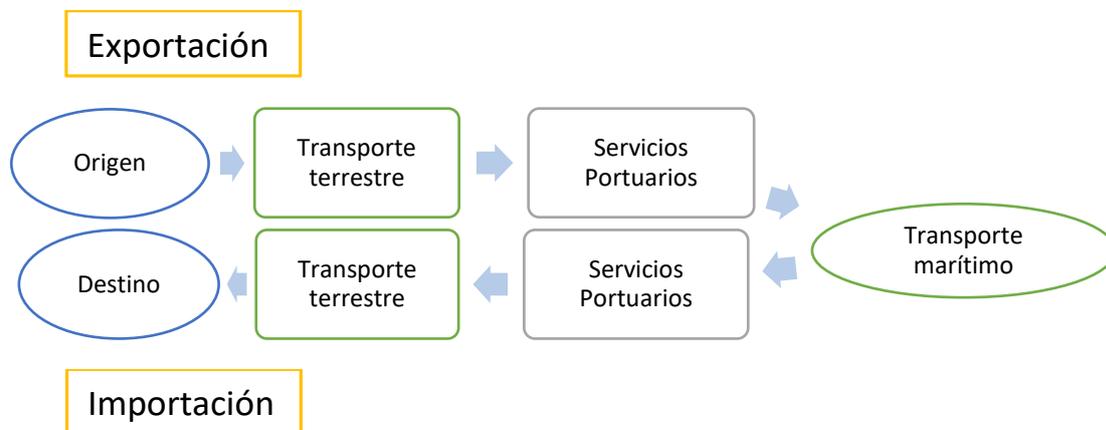


Figura 12 - Esquema de la cadena de suministro (Negron, 2013)

La cadena logística de una mercancía comienza en el lugar de producción de la materia prima y por medio del transporte terrestre llega hasta el puerto, donde los servicios portuarios generan valor agregado al producto mediante la agrupación y la desagrupación de cargas, el embalaje o el etiquetado, convirtiéndolo en un producto terminado que puede ser enviado a destino por medio del transporte marítimo (donde pasará una vez más por los servicios portuarios) o directamente por medio del transporte terrestre.

Todos los eslabones de la cadena deben funcionar de manera eficiente y, en lo que respecta al puerto, debe disponer de una capacidad suficiente para satisfacer la demanda de servicio, incluyendo infraestructuras y equipos, que le permitan llevar a cabo de manera eficiente la carga y descarga de las mercancías desde los barcos, proveer espacios adecuados para el almacenamiento de mercancías y tener conexiones terrestres suficientes para el movimiento de cargas desde y hacia el puerto.

Se pueden distinguir tres regiones claramente diferenciadas en el funcionamiento de un puerto (Losada et al., 2013):

- ✚ El sistema externo incluye condicionantes de mercado, las características de la demanda y la oferta, el flujo de mercancías y su tipo, las condicionantes del sistema portuario en relación al puerto.
- ✚ El puerto engloba las infraestructuras de protección, operaciones y transporte y las actividades derivadas del mismo.

- ✚ El *hinterland* es el área de influencia del puerto que incluye tanto las condiciones de mercado que definen la demanda y la oferta como las infraestructuras para el transporte de las mercancías.

Los efectos derivados del cambio climático producen impactos directos sobre el puerto, como los daños en infraestructuras, pero también inciden sobre el *hinterland*.

3.2 Identificación de los subsistemas

Las actividades que se realizan en un puerto necesitan unas instalaciones y unas condiciones de operatividad determinadas, por lo que para estudiar la influencia de las dinámicas sobre el puerto éste se pueden zonificar por actividades, formando un conjunto de subsistemas. En un puerto de carácter industrial como es el Puerto de Gijón se pueden encontrar los siguientes subsistemas, representados en la figura 13.

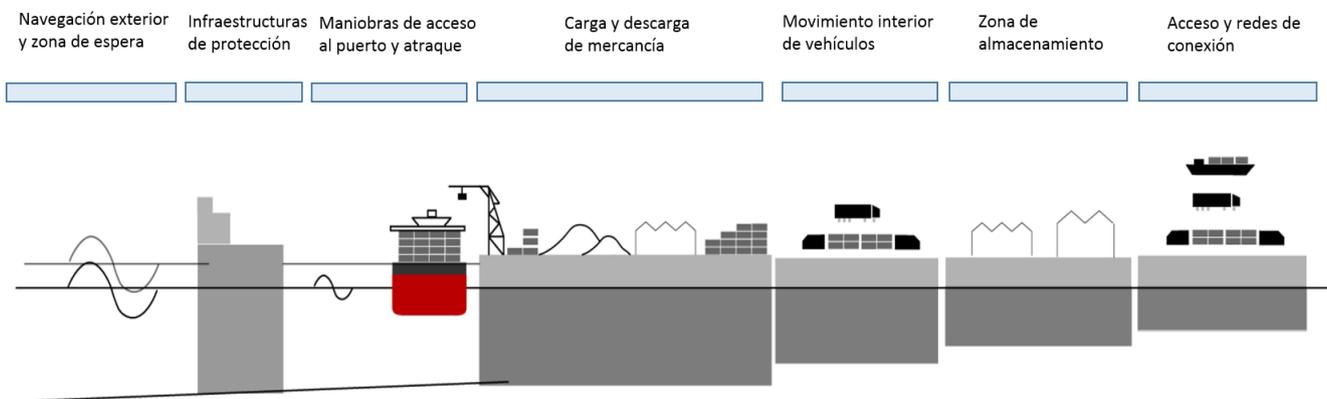


Figura 13 - Zonificación de un puerto en subsistemas

Los cambios en las variables climáticas y no climáticas como consecuencia del cambio climático se denominan *drivers* y son los que darán lugar a impactos sobre las infraestructuras y operaciones del puerto. Entre los *drivers climáticos* se encuentra el nivel del mar, el oleaje, el viento, la temperatura, la precipitación y la niebla, y entre los *drivers no climáticos* (que afectan al *hinterland* y a la zona portuaria) está el aumento de la temperatura, la subida del nivel del mar o la subsidencia.

Los impactos sobre el puerto dependerán del subsistema de estudio:

Para el área de navegación y zonas de espera, y la región de maniobras de acceso al puerto y atraque aquellos impactos que impidan la operatividad del puerto (fuerte oleaje, fuertes vientos y niveles extremos del mar) serán los que inhabiliten el subsistema, al no permitir el atraque o la realización de operaciones por parte de las embarcaciones. Las condiciones de tormenta, los cambios en la dirección de las dinámicas o los cambios potenciales en la costa son perjudiciales para las infraestructuras de protección, que ven mermada su capacidad de protección.

Las operaciones de carga y descarga de mercancías quedan inhabilitadas en caso de fuerte oleaje o fuertes vientos, que provocarían la ruina de la mercancía o la contaminación del puerto, además del daño en los equipos de carga y descarga.

Para el movimiento interior de vehículos por el puerto la inundación supone una interrupción de las vías de comunicación en el interior del puerto.

Las zonas de almacenamiento deberán tener unas condiciones mínimas que garanticen la conservación de la mercancía, por lo que no deben inundarse.

Por último, el subsistema de accesos y redes de conexión con el hinterland y con otros puertos puede verse afectado por varios impactos como las inundaciones o las precipitaciones extremas, provocando un corte en la cadena de suministro.

En base a la magnitud de los impactos sobre los subsistemas se podrán establecer una serie de medidas de adaptación al cambio climático. En el siguiente capítulo se identificarán los subsistemas del Puerto de Gijón y se estudiarán en los subsistemas más representativos.

3.3 Marco de riesgo y sus componentes

El análisis del riesgo que se va a plantear en este trabajo está enmarcado dentro de una metodología más general de riesgo adoptada por el IPCC (IPCC, 2014).

El riesgo se determina como la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas como resultado de la combinación de la peligrosidad, la exposición (personas, activos o ecosistemas en riesgo) y la vulnerabilidad (susceptibilidad a sufrir daños). El IPCC define el riesgo como la probabilidad de que, durante un período de tiempo, se produzcan alteraciones graves del funcionamiento normal de una comunidad o una sociedad debido a los fenómenos físicos peligrosos que interactúan con condiciones sociales vulnerables, dando lugar a efectos humanos, materiales, económicos o ambientales adversos generalizados que requieren una respuesta inmediata a la emergencia para satisfacer las necesidades humanas esenciales, y que pueden requerir apoyo externo para la recuperación.

El riesgo de los impactos relacionados con el clima viene dado por la interacción de los peligros concernientes al clima con la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas humanos y naturales. La exposición y la vulnerabilidad varían en el tiempo y el espacio y dependen de factores económicos, sociales, geográficos, demográficos, culturales, institucionales y ambientales.

La exposición incluye la presencia de personas, servicios, recursos ambientales, infraestructuras y bienes económicos, sociales o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente como consecuencia de un evento. La vulnerabilidad se refiere al grado al cual un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, haciendo referencia al contexto físico, social, económico y ambiental de una región. Dentro de la vulnerabilidad se puede definir la vulnerabilidad diferencial, que establece que en función de la salud, educación, etnia, religión, género y edad se tendrá un grado de vulnerabilidad distinto frente al riesgo. Esto conlleva por ejemplo que ante una amenaza climática un grupo marginado socialmente tenga un riesgo mayor que el resto de la población.

La figura 14 muestra el esquema de la metodología de riesgo propuesta por el IPCC, donde se interacciona el riesgo de los impactos relacionados con el clima con la interacción de los peligros conexos al clima y la exposición de los sistemas humanos y naturales. Los cambios en el sistema climático (cambios naturales o antropogénicos) y los procesos socioeconómicos (incluidas las medidas de adaptación y la mitigación) son impulsores de peligros, exposición y vulnerabilidad.

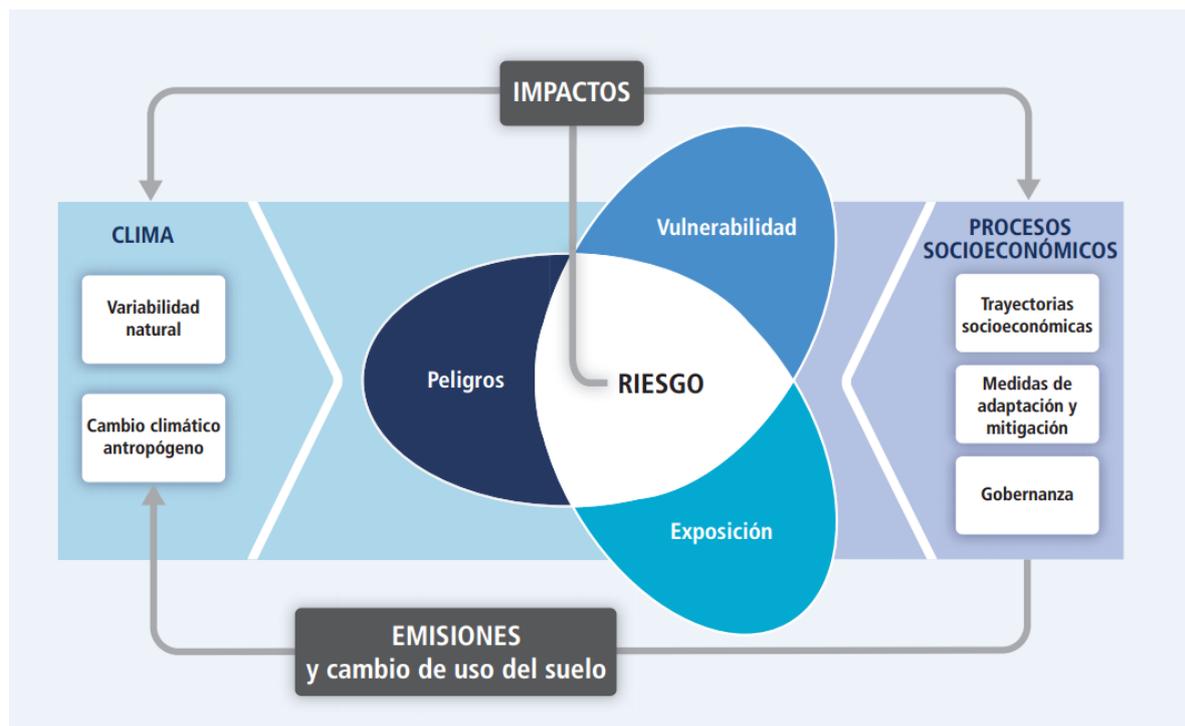


Figura 14 - Metodología de riesgo del IPCC

Cuando un peligro se convierte en amenaza el riesgo se materializa en impactos. Para saber cuándo una variable pasa a ser un peligro climático ésta se debe valorar en el sistema a analizar, ya que los valores de amenaza y peligro varían de una región a otra y dependen del fenómeno meteorológico.

En la metodología de riesgo del IPCC se propone una serie de criterios para ayudar a identificar el grado de vulnerabilidad de un sistema. La exposición de la sociedad, comunidad o ecosistema a un peligrosidad dada, la importancia del sistema vulnerable, la limitación del sistema para enfrentarse y adoptar estrategias de adaptación para reducir las amenazas derivadas del cambio climático, la persistencia de las condiciones de vulnerabilidad y grado de irreversibilidad de las consecuencias y la presencia de condiciones que hacen a la sociedad susceptible a la exposición acumulativa son algunos de los criterios que se pueden establecer para la identificación de los riesgos más relevantes, ya que el riesgo depende en la mayor parte de la capacidad de recuperación y adaptación de los sistemas. No obstante, también se tiene en cuenta la magnitud, frecuencia e intensidad de las amenazas.

Por último se destaca del marco de riesgo la percepción de riesgo de las personas ante un evento, que determinará sus respuestas y comportamiento. La sociedad debe estar informada de las posibles amenazas a las que está sometida, la causa y origen de las mismas y los riesgos que conllevan, para que en caso de aparición de un peligro climático sepan actuar y reducir su exposición y vulnerabilidad.

El cambio climático no es un riesgo *per se*, sino que es la interacción entre los cambios en el clima y las amenazas derivadas con la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas la que determina en cada momento el nivel de riesgo.

4 – El Puerto de Gijón: Sistema en riesgo

4. El Puerto de Gijón: Sistema en riesgo

4.1 Sistemas y subsistemas

El Puerto de Gijón es un puerto de carácter industrial especializado en el movimiento de mercancías, siendo el principal puerto granelero de norte de España. Es por ello que está formado por una red de conexión interior y exterior y un conjunto de instalaciones perfectamente equipadas que le permiten llevar a cabo con eficacia el manejo y transporte de gráneles sólidos y líquidos.

En el capítulo 3 se definía un puerto como un sistema de sistemas y se explicaba la zonificación del mismo en base a las actividades realizadas, formando los subsistemas del puerto. En el Puerto de Gijón se pueden identificar los subsistemas de Navegación exterior y zona de espera, Infraestructuras de protección, Maniobras de acceso al puerto y atraque y navegación interior, Carga y descarga de mercancía, Gestión de mercancía (incluye el procesado de mercancía), Movimiento interior de vehículos, Zona de almacenamiento, Zona de infraestructuras auxiliares, Redes de conexión de acceso y Redes de conexión interior. En la figura 15 se encuentra la representación gráfica de la clasificación del puerto en subsistemas.

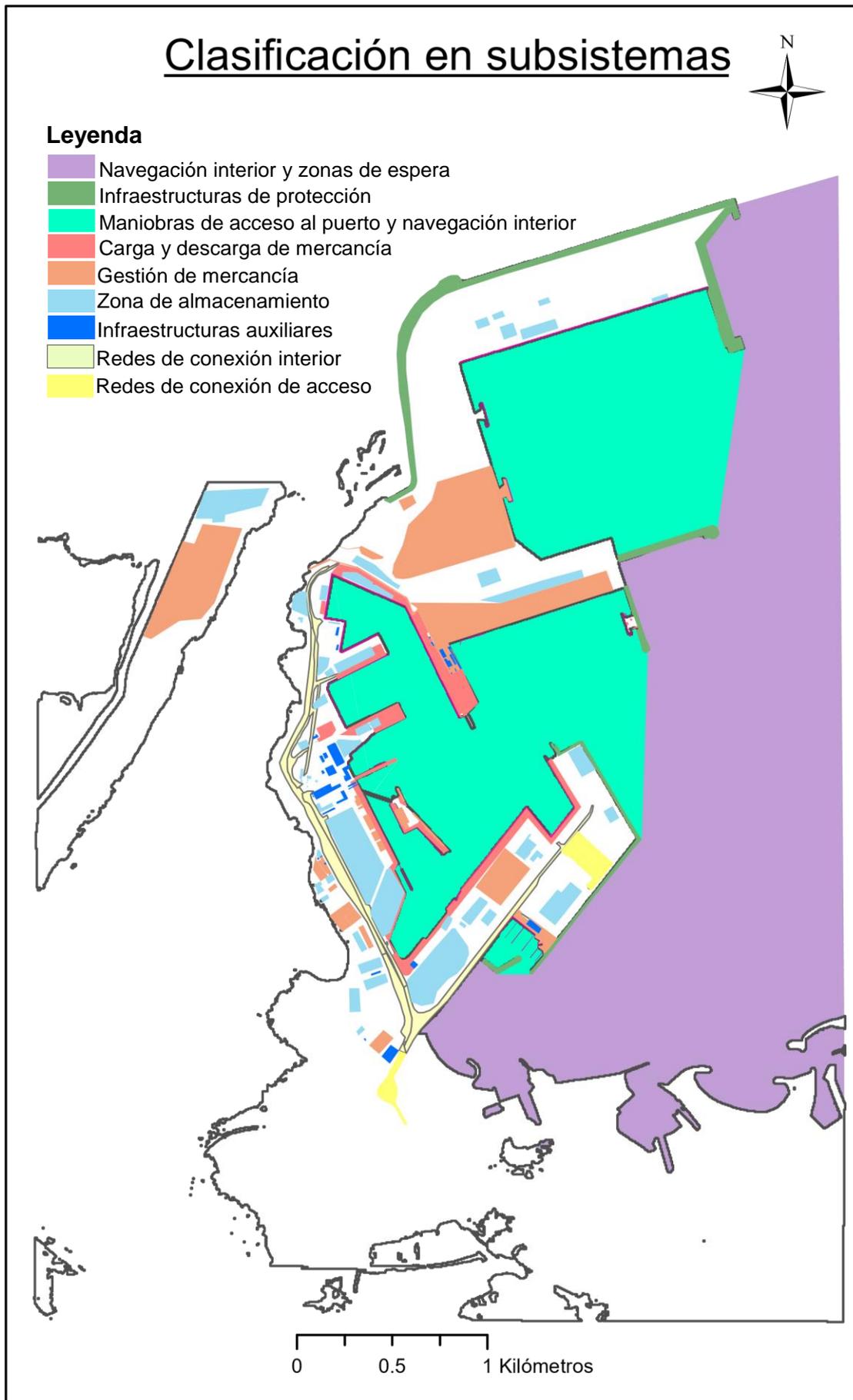


Figura 15 - Clasificación del Puerto de Gijón en subsistemas

Los subsistemas que abarquen zonas de navegación y accesos marítimos deberán garantizar la seguridad y estabilidad de las embarcaciones. El subsistema de infraestructuras de protección incluye el conjunto de diques y sus contradiques y diques de abrigo, que son el Dique Norte, el Dique Torres, el Dique Príncipe de Asturias, el Dique de la Osa y una serie de espigones más pequeños.

El **transporte de mercancías** constituye la actividad económica principal del puerto y está vinculado a los subsistemas de carga y descarga, gestión y almacenamiento de mercancía y movimiento de vehículos. Los subsistemas dedicados al manejo de mercancía tienen una vulnerabilidad especial debido a la posibilidad de ruina de la mercancía y de la maquinaria en caso de condiciones climáticas adversas. En el Musel están diferenciadas las zonas de carga y descarga, procesado y almacenamiento de gránulos sólidos y líquidos, disponiendo de instalaciones para el carbón y cereales por un lado e instalaciones para el petróleo por otro, por ejemplo. Los depósitos de almacenamiento pueden estar dispuestos en los muelles, donde también hay tinglados dedicados al almacenamiento temporal de mercancía, o en explanadas metidas un poco más adentro, a las que hay que acceder por las redes de conexión interior del puerto. La zona de infraestructuras auxiliares incluye el conjunto de instalaciones dedicadas a los servicios del puerto, tales como la Autoridad Portuaria, el Centro de Control, la Aduana, el Área de Servicios Logísticos, talleres de diversos tipos o la Capitanía Marítima.

Las **redes de conexión**, tanto del exterior con el puerto como de conexión interior del puerto, suponen el eslabón clave en la cadena de suministro, ya que una parada en la operatividad de las mismas implica la desconexión del puerto con sus clientes y la desconexión entre los distintos subsistemas del puerto (por ejemplo, transporte de la mercancía desde la zona de carga y descarga hasta la zona de almacenamiento). Engloban las redes de carretera y ferrocarril, que comunican tanto el interior del puerto como el puerto con el norte de España y la Meseta, y la Autovía del Mar, que comunica con Francia para el transporte de viajeros, además de la red marítima a la que pertenece el Puerto de Gijón, por la que está conectado con muchos puertos del mundo. En la figura 16 se encuentran esquematizadas todas las redes de conexión del Musel con el exterior.

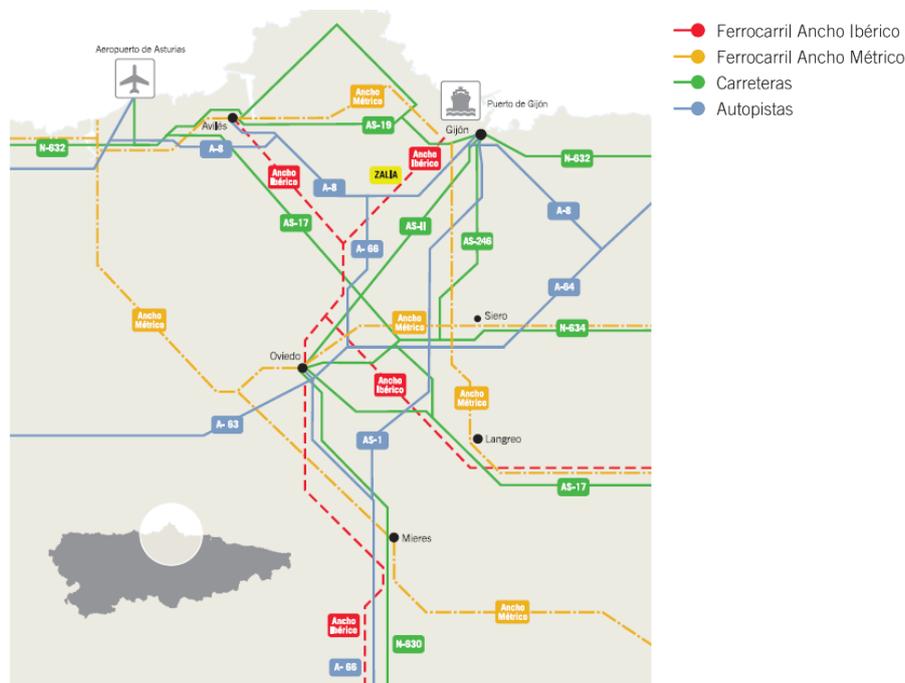


Figura 16 - Redes de conexión del Puerto con el exterior (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014)

4.2 Impactos y drivers

El cambio climático origina unos impactos que provocan la inundación del puerto, afectan a su operatividad y generan cambios en la rebasabilidad y estabilidad de las infraestructuras. En este apartado se identifican las consecuencias del cambio climático que afectan a cada uno de los subsistemas identificados y se describen las variables climáticas y no climáticas que los generan (*drivers*).

1. Navegación exterior y zonas de espera

Las variables climáticas que afectan a esta zona son el nivel medio del mar, la marea astronómica, la marea meteorológica, el oleaje, el viento, la niebla y la precipitación. Al estar fuera del puerto este subsistema está expuesto a las condiciones climáticas más adversas pero, como ya se ha mencionado, debe proporcionar igualmente una zona segura en la que las embarcaciones puedan esperar hasta que sea posible su acceso al puerto. Entre los impactos que provocan estas variables se encuentra la agitación portuaria, la variación del calado, el incremento en la velocidad del tiempo o la falta de visibilidad. La derivación de embarcaciones a otros puertos sería una medida bastante perjudicial para el puerto, ya que además de conllevar la derivación puntual de la actividad económica a la competencia, provocaría también la no elección del Puerto de Gijón en el futuro y sí la de otros puertos que garanticen la operatividad.

2. Infraestructuras de protección

Cambios en el nivel medio del mar, la marea astronómica, la marea meteorológica, el oleaje y el viento perjudican directamente a las infraestructuras del puerto y con ello al resto de subsistemas. La inundación y el rebase de las estructuras son los principales impactos, que pueden llegar a ocasionar la ruina de las infraestructuras.

3. Maniobras de acceso al puerto y atraque y navegación interior

Subsistema de características similares al de navegación exterior y zonas de espera, sólo que debe permitir la realización de las maniobras de acceso al puerto, el atraque de las embarcaciones y la navegación de las mismas por el puerto, asegurando su protección y estabilidad para luego poder llevar a cabo las actividades de carga y descarga de mercancía. Las variables que pueden afectar al interior del puerto son, como en el primer subsistema, el nivel medio del mar, la marea astronómica, la marea meteorológica, el oleaje, el viento y la precipitación, añadiendo ahora la temperatura del mar. Los impactos ocasionados que pueden perjudicar a las embarcaciones son agitación, cambios en el calado, formación de corrientes, incremento en la velocidad del viento y poca visibilidad.

4. Carga y descarga de mercancía

Las actividades relacionadas con la mercancía son más delicadas de lo que a priori se podría pensar, ya que para que se pueda llevar a cabo las embarcaciones tienen que estar en condiciones estables y no debe haber condiciones climáticas adversas que puedan arruinar la mercancía. Cambios en el nivel medio del mar, la marea astronómica, la marea meteorológica, el oleaje, el viento, la niebla, la precipitación y la temperatura atmosférica pueden provocar la inundación, rebase, agitación, viento elevado, poca visibilidad y grandes precipitaciones en las instalaciones y zona del puerto reservada para esta tarea, estropeando los cereales o provocando la contaminación del puerto por el esparcimiento de carbón, por ejemplo.

5. Gestión de mercancía

Cambios en el nivel medio del mar, la marea astronómica, la marea meteorológica, el oleaje, el viento, la niebla, la precipitación y la temperatura atmosférica pueden provocar los impactos de inundación, viento elevado, poca visibilidad y grandes precipitaciones que se traduzcan en un parón en la actividad para evitar la ruina de la mercancía.

6. Zona de almacenamiento

Subsistema determinante para la protección de la mercancía, puede ser afectado por cambios en el nivel medio del mar, en la marea astronómica, en la marea meteorológica, en el oleaje, en el viento, en la precipitación y en la temperatura atmosférica. Los impactos que se producirían serían de inundación, incremento de la intensidad del viento, contaminación debido al esparcimiento de la mercancía y precipitaciones abundantes. Las soluciones posibles serían aislar la zona de almacenamiento, recrecer la cota de la explanada e implantar sistemas de desagüe para proteger los muelles, tinglados y depósitos existentes en el puerto, tanto cubiertos como descubiertos.

7. Zona de infraestructuras auxiliares

Esta zona engloba los edificios ya enumerados como la Autoridad Portuaria, el Centro de Control, la Aduana, el Área de Servicios Logísticos, talleres de diversos tipos o la Capitanía Marítima. Las variables cuyos cambios pudieran afectar a este subsistema sería el nivel medio del mar, la marea astronómica, la marea meteorológica, el oleaje y la precipitación, provocando la inundación de las instalaciones y provocando daños estructurales.

8. Redes de conexión interior

Incluye las redes de carreteras y ferrocarril en el interior del puerto, que permiten el transporte de la mercancía y la entrada y salida de vehículos. El nivel medio del mar, la marea astronómica, la marea meteorológica, el oleaje, la niebla, la precipitación y la temperatura atmosférica pueden impedir el movimiento de los vehículos por el interior del puerto, al provocar la inundación, vientos grandes, poca visibilidad, contaminación y alta precipitación.

9. Redes de conexión de acceso

Este subsistema envuelve las redes de carretera, ferrocarril y marítima de acceso al puerto. Cambios en el nivel medio del mar, en la marea astronómica, en la marea meteorológica, en el oleaje, en la niebla, en la precipitación o en la temperatura atmosférica pueden provocar inundaciones, poca visibilidad, contaminación y grandes precipitaciones que impidan al puerto comunicarse con el exterior, provocando el cese de su actividad económica.

4.3 Horizontes temporales y RCPs

En este trabajo se han utilizado las proyecciones del cambio climático del IPCC, que son con las que trabaja la comunidad científica. El grupo propone unas proyecciones a fin de siglo basadas en los escenarios de Rutas Representativas de Concentración (RCPs) de Gases de Efecto Invernadero (GEIs). Los GEI dependen del tamaño de población, la actividad económica, el estilo de vida, el uso de la energía, los patrones de uso del suelo, la tecnología y la política climática.

En el Quinto Informe de evaluación el IPCC propone cuatro trayectorias de concentración representativas (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5) para la predicción de variables climáticas. Cada uno de ellos representa distintas evoluciones de las concentraciones de GEIs a lo largo del siglo XXI. El RCP 2.6 es el

escenario de mitigación más estricto, los RCP 4.5 y 6.0 son de carácter intermedio y el RCP 8.5 proyecta un escenario muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero. Según refleja el IPCC, existe una relación casi lineal sólida y continua entre las emisiones de CO₂ acumuladas y la proyección del cambio en la temperatura global hasta el año 2100 en las RCP, como se puede ver en las figuras 17 y 18.

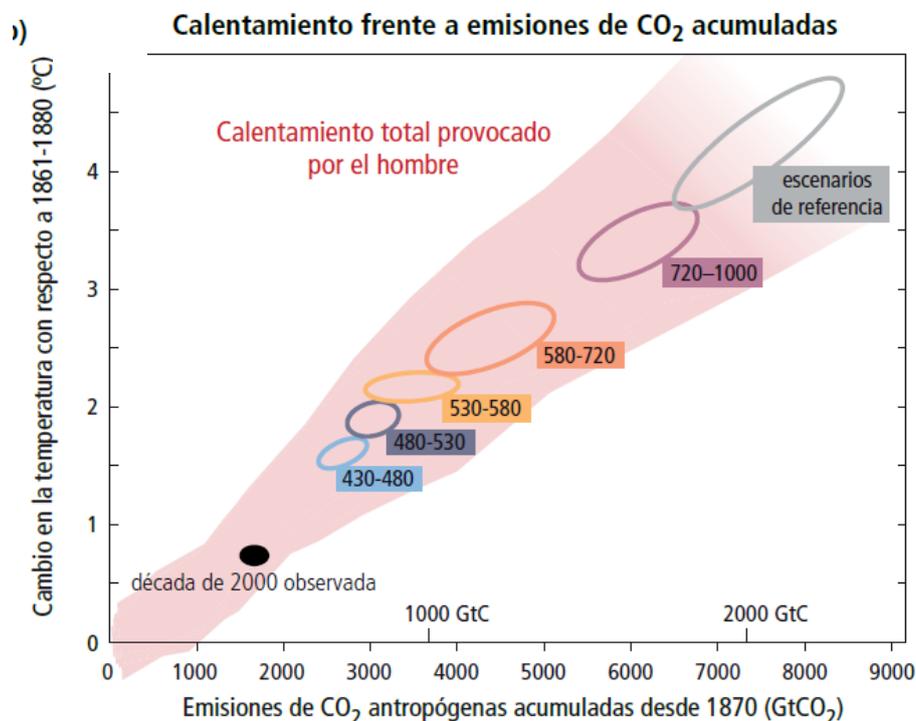


Figura 17 - Emisiones de CO₂ antropógenas acumuladas desde 1870 (Fuente: IPCC)

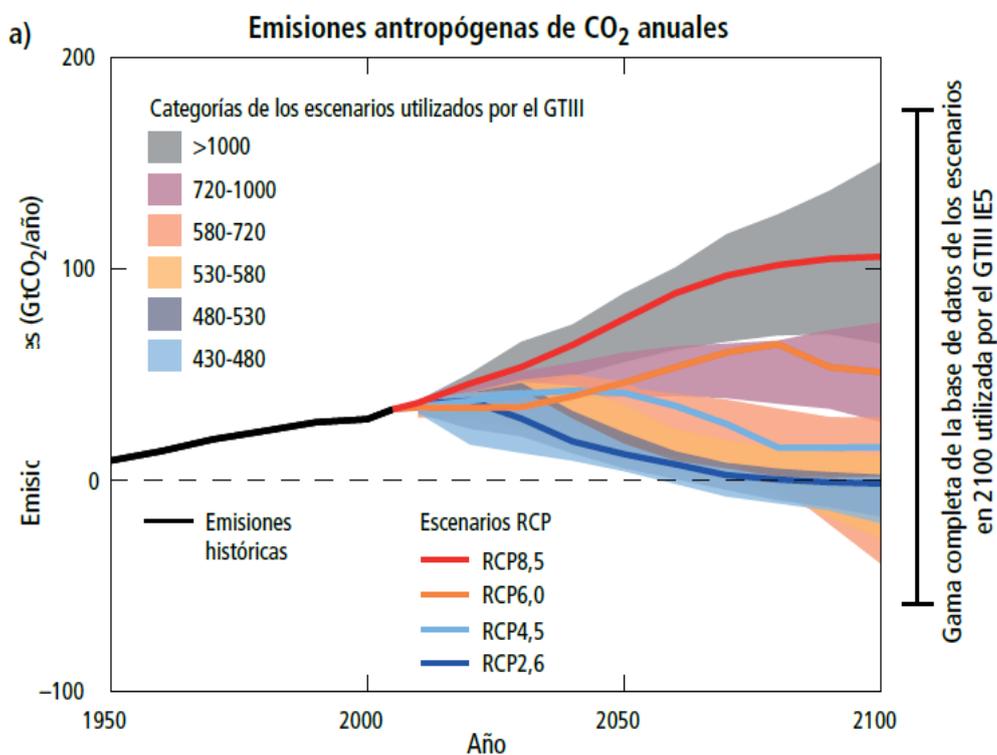


Figura 18 - Emisiones antropógenas de CO₂ anuales (Fuente: IPCC)

Para los cuatro escenarios las concentraciones atmosféricas de CO2 son más elevadas en 2100 que en la actualidad, y también para las cuatro proyecciones la temperatura de la superficie del planeta continuará aumentando. Como consecuencia de ello las olas de calor ocurrirán con mayor frecuencia, las precipitaciones aumentarán en intensidad y el nivel global del mar seguirá elevándose.

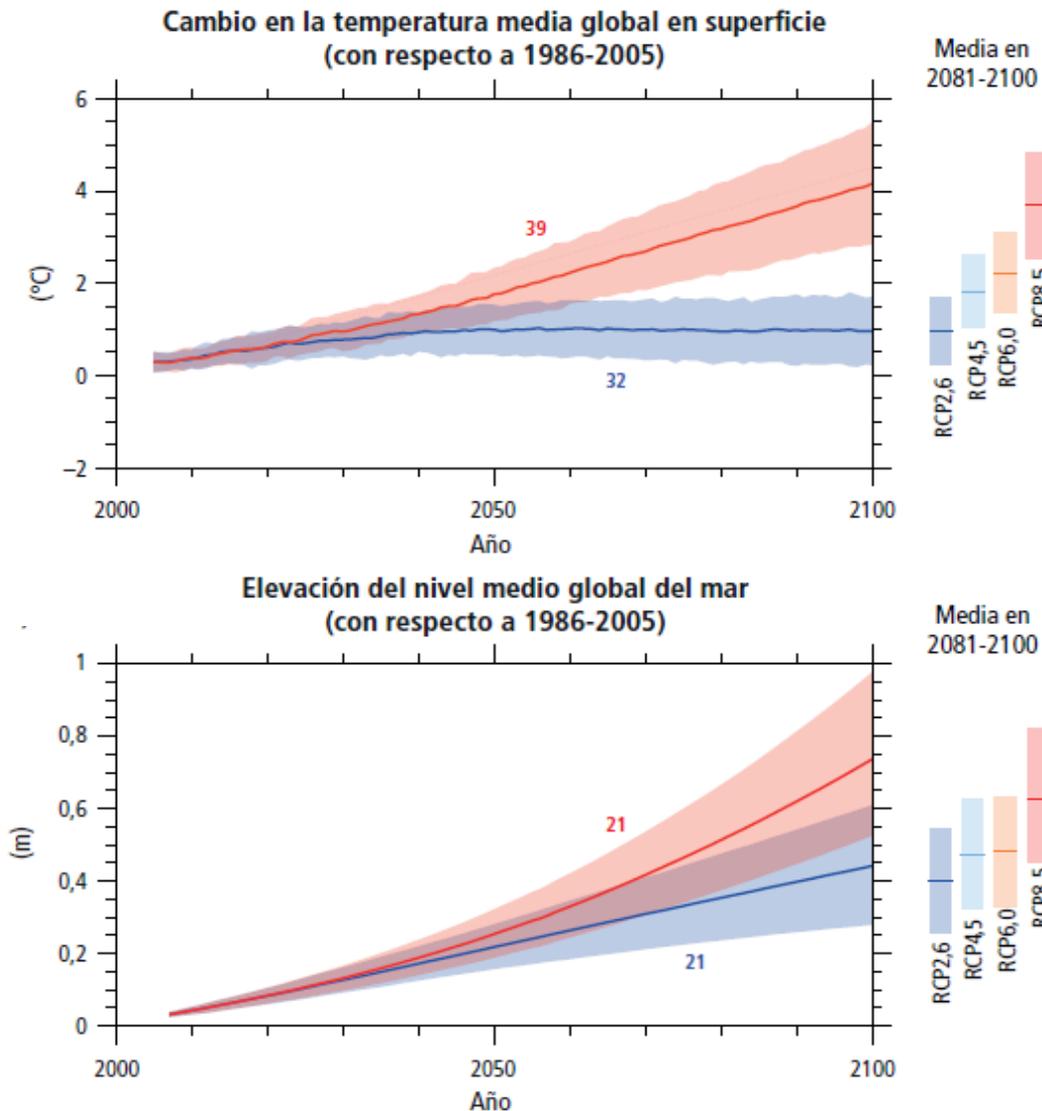


Figura 19 - Cambio en la temperatura media global en superficie y elevación del nivel medio global del mar de 2006 a 2100 (Fuente: IPCC)

Para este trabajo se va a utilizar el aumento del nivel medio del mar proyectado para el RCP 8.5 a fin de siglo. Las proyecciones para este escenario incluyen un aumento medio en la temperatura del planeta de 3,7º (de 2,6º a 4,8º) y un aumento medio en el nivel medio del mar de 0,45 a 0,82 metros (IPCC). Estas proyecciones de nivel del mar global han sido regionalizadas para las cuencas de todo el mundo por Slangen et al. (2014) en el periodo 2081-2100.

5 – Evaluación de peligrosidad múltiple

5. Evaluación de peligrosidad múltiple

La evaluación de riesgos por efectos meteorológicos y climáticos en el Puerto de Gijón nos lleva a analizar los impactos producidos, que son los cambios en la operatividad, fiabilidad e inundación del puerto. Estos impactos son producidos por cambios en las dinámicas, entre las que se han considerado el nivel medio del mar, el oleaje, la marea meteorológica, la marea astronómica y la precipitación.

Se ha llevado a cabo una caracterización histórica de las dinámicas, a partir de bases de datos de alta resolución, y su proyección a 2100. Por un lado, la recopilación de bases de datos históricos de las variables nos permite analizar los cambios que han experimentado en los últimos años y los impactos que han generado en la costa. Por otro lado, es necesario trabajar con proyecciones debido a la evolución en el tiempo de las amenazas producidas por las dinámicas.

5.1 Bases de datos, caracterización histórica y proyección de las dinámicas

Las dinámicas a estudiar se pueden clasificar en dinámicas meteo-oceanográficas y dinámicas hidro-meteorológicas. A continuación se especifican las bases de datos empleadas para su caracterización y las técnicas e instrumentos utilizados para su reconstrucción histórica y su proyección:

Dinámicas hidro-meteorológicas

Son las que intervienen en el ciclo hidrológico. Forma parte de estas dinámicas la precipitación, especialmente relevante en la región del Principado de Asturias y en la inundación de las zonas costeras junto con las dinámicas meteo-oceanográficas.

La base de datos de la **precipitación** pertenece al Principado y fue desarrollada dentro del marco del proyecto *Caracterización agroclimática de Asturias: elaboración de la cartografía agroclimática del Principado de Asturias*. Dispone de datos registrados durante el periodo 1970-2000 en Asturias, con una resolución de 1 km, obtenidos a partir de modelos de interpolación y regresión junto con datos de observaciones de AEMET y co-variables orográficas.

Las proyecciones de la precipitación forman parte de un proyecto de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) que consiste en la generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España a partir de la información de los modelos globales utilizados por el IPCC.

Dinámicas meteo-oceanográficas

El nivel del mar y el oleaje son las dinámicas meteo-oceanográficas consideradas. El nivel del mar es la altura que alcanza la superficie del mar a través del nivel medio del mar, la marea meteorológica y la marea astronómica, siendo el nivel medio del mar la variable más relevante para el estudio de inundación de la costa.

Para la caracterización histórica del nivel medio del mar se ha utilizado la base de datos de Church y White (2006), que incluye datos de nivel medio del mar global en el periodo 1870-2001, y datos procedentes del mareógrafo de Gijón, con datos desde 1992. De este análisis histórico del litoral asturiano se determina que el nivel medio del mar en Asturias ha aumentado 15 cm en los últimos 65 años.

Como ya se ha mencionado previamente, las proyecciones de nivel del mar global para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 a fin de siglo han sido regionalizadas para las cuencas de todo el mundo por Slangen et al. (2014). En la figura 20 se muestra la variabilidad espacial del aumento del nivel medio del mar a fin de siglo en la costa asturiana para el escenario más conservador y para el más extremista del IPCC. En la zona del Puerto de Gijón se puede considerar un aumento del nivel medio del mar de 0,63 metros, que será el utilizado para la construcción de escenarios de cambio climático.

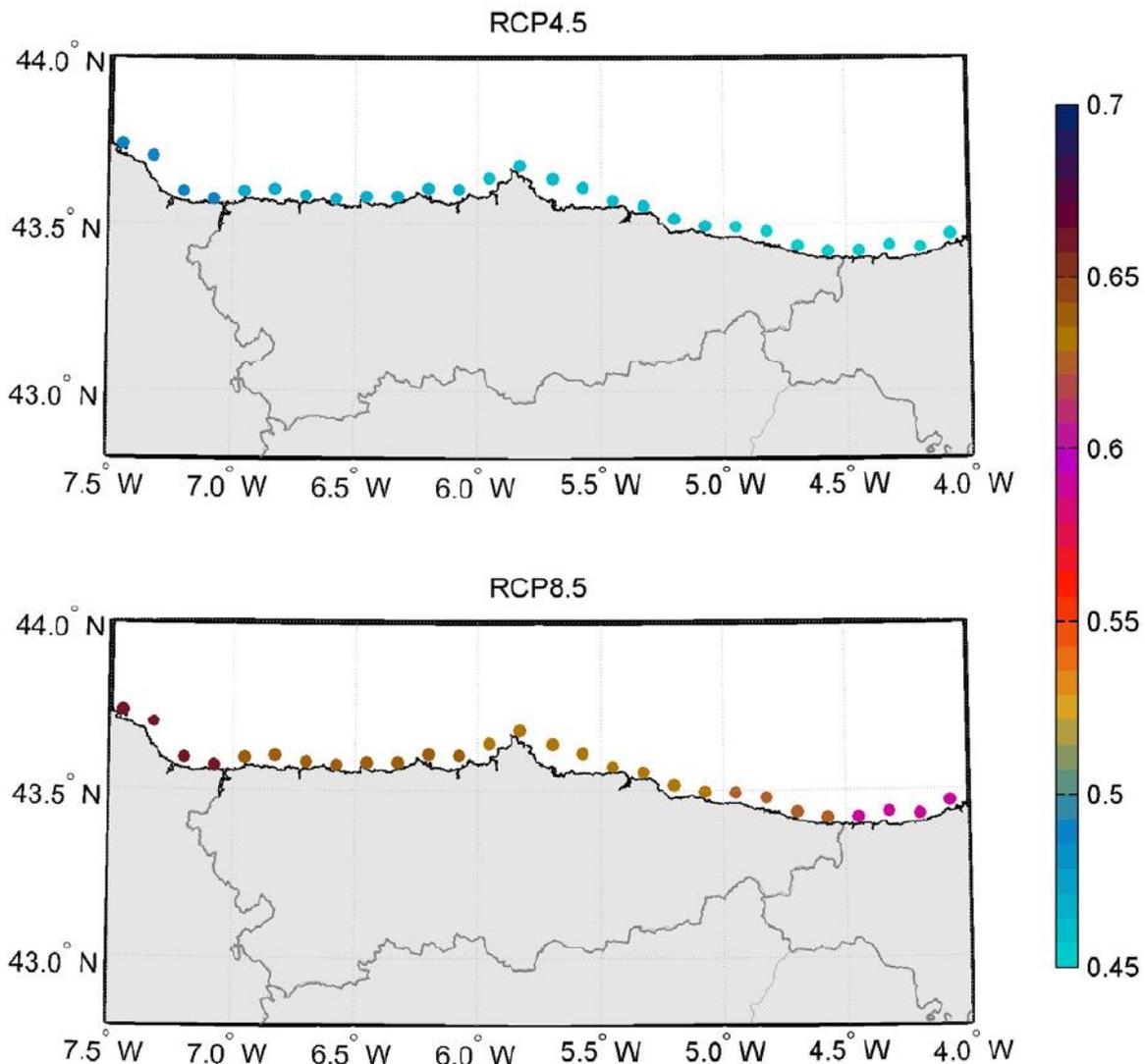


Figura 20 - Aumento del nivel medio del mar a fin de siglo en la costa de Asturias (IH Cantabria)

La marea astronómica ha sido caracterizada a partir de datos instrumentales del mareógrafo de Gijón y de la base de datos GOT (*Global Ocean Tides*) de IH Cantabria, obtenida de las componentes armónicas del modelo TPXO (modelo de mareas global de resolución espacial 0,25°). La caracterización de la marea meteorológica viene dada por datos pertenecientes a la base GOS 1.1 (Cid et al. 2014), que es un reanálisis de alta resolución de marea meteorológica realizado mediante el modelo *Regional Ocean Model System* (ROMS), con resolución espacial de 1/8° y base registrada de datos desde 1948.

El análisis histórico del oleaje se ha realizado a partir de la base de datos DOW (Camus et al., 2013), una base de datos numéricos de oleaje en aguas someras a lo largo de todo el litoral español que proporciona datos horarios de oleaje desde 1948 hasta 2014, con una resolución de 0,02°. En la propagación numérica se tiene en cuenta conjuntamente la variación espacial del oleaje en los

contornos de la malla y los campos de vientos. Las condiciones de contorno de oleaje provienen de los espectros de la base de datos de reanálisis GOW (Reguero et al., 2012), con resolución espacial en el Cantábrico de 0,1°, y los vientos proceden de la base de datos del reanálisis atmosférico global NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996), con una resolución espacial de 1,9° (Losada et al., 2016).

Las proyecciones del oleaje y de la marea meteorológica se obtienen mediante una sofisticada técnica de *downscaling* estadístico basado en tipos de tiempo. Utilizando esta técnica se relacionan los estados de la atmósfera y sus cambios con la respuesta marina local en forma de oleaje, marea meteorológica y temperatura superficial (Losada et al., 2016).

5.2 Escenarios de cambio climático

Con el objeto de simular numéricamente los efectos del cambio climático, se ha definido una serie de escenarios que combinan variaciones en el nivel medio del mar, en la altura de ola y en la precipitación.

Variación en el nivel medio del mar

La proyección del aumento del nivel medio del mar se ha hecho para el RCP8.5 a fin de siglo, utilizando la regionalización de Slangen et al. (2014) y teniendo un valor medio igual a 0,63 metros. Para la definición de escenarios menos conservadores se ha considerado un aumento de un metro y de un metro y medio.

Variación en la altura de ola

Si bien muchos estudios de cambio climático consideran que el aumento de la altura de ola es despreciable en comparación con el aumento del nivel medio de mar, se ha planteado como escenario futuro un aumento en un veinte por ciento de la altura de ola.

Precipitación

La precipitación solamente se ha incluido en un escenario de inundación, tomando como base un evento extremo. Así, se ha considerado una lluvia hipotética torrencial.

Definición de un evento extremo

El 2 de febrero de 2014 tuvo lugar en la cornisa cantábrica un temporal de características excepcionales debido a su alto periodo de retorno y a los estragos causados en la costa asturiana. Con el objeto de evaluar los daños causados por el temporal en el Principado de Asturias desde IH Cantabria se realizó una campaña de campo en la que analizó el grado de afección, se midió la extensión aproximada de la inundación en base a marcas de agua y testigos oculares y se tomaron fotos y vídeos para posteriormente crear una base de datos en Sistemas de Información Geográfica (SIG). El periodo de retorno del temporal fue de entre 20 y 200 años dependiendo del punto de la costa asturiana, llegando incluso a los 500 años.



Figura 21 - Periodo de retorno del temporal en Gijón (IH Cantabria)

En la figura 21 se representan los periodos de retorno en el puerto de Gijón para un temporal de iguales características que el que tuvo lugar el 2 de febrero de 2014 con un aumento del Nivel Medio del Mar de 1 metro.

Debido a las excepcionales características del temporal éste se puede tomar como escenario base en los impactos que tomen como referencia un evento extremo (Inundación y fiabilidad), generando los escenarios de cambio climático con las variaciones del nivel medio del mar y de la altura de ola sobre este escenario base. Para el estudio de la operatividad del puerto se utilizará el clima marítimo y se considerarán sobre él las variaciones de cambio climático.

6 – Bases de datos de exposición y curvas de vulnerabilidad

6. Bases de datos de exposición y curvas de vulnerabilidad

En este capítulo se van a generar las bases de datos de exposición y las curvas de vulnerabilidad del Puerto de Gijón, de manera que cuando se aplique un impacto sobre el puerto podamos obtener el riesgo económico derivado del mismo. Así se podrán cuantificar económicamente las consecuencias de la inundación de las terminales, la agitación portuaria, el rebase de las estructuras y la pérdida de estabilidad de las mismas.

El Puerto de Gijón funciona con la Autoridad Portuaria de Gijón como el órgano regulador de la actividad portuaria, que cede el espacio físico en régimen de concesiones a operadores privados. De este modo en la mayor parte del puerto son las empresas privadas las encargadas de desarrollar, sobre el espacio portuario, las instalaciones que necesiten para su actividad económica.

Las actividades económicas que se llevan a cabo en el Puerto de Gijón se pueden clasificar en siete grandes grupos:

- Explotación y almacenamiento de graneles sólidos: dada la condición de puerto granelero, las mayores extensiones del puerto están dedicadas a la explotación de terminales de graneles sólidos como carbón, clínker, escoria, minerales, cemento o cereales.
- Actividades industriales diversas: como la explotación de un taller mecánico.
- Tráfico de contenedores
- Tráfico de mercancía general: como el tráfico de productos siderúrgicos o de pulpa de remolacha.
- Transporte de pasajeros
- Pesca: incluye la lonja, la fábrica de hielo y varias cetáceas y viveros dedicados a la explotación del marisco y pescado.
- Explotación y almacenamiento de graneles líquidos: con importantes instalaciones dedicadas al petróleo o al gas natural, entre otros.

En la figura 22 se muestra un mapa de puerto zonificado según estas actividades económicas definidas. Según la actividad a realizar las empresas desarrollarán edificios de hostelería, almacenes, plantas industriales o explanadas para el almacenamiento de mercancía.

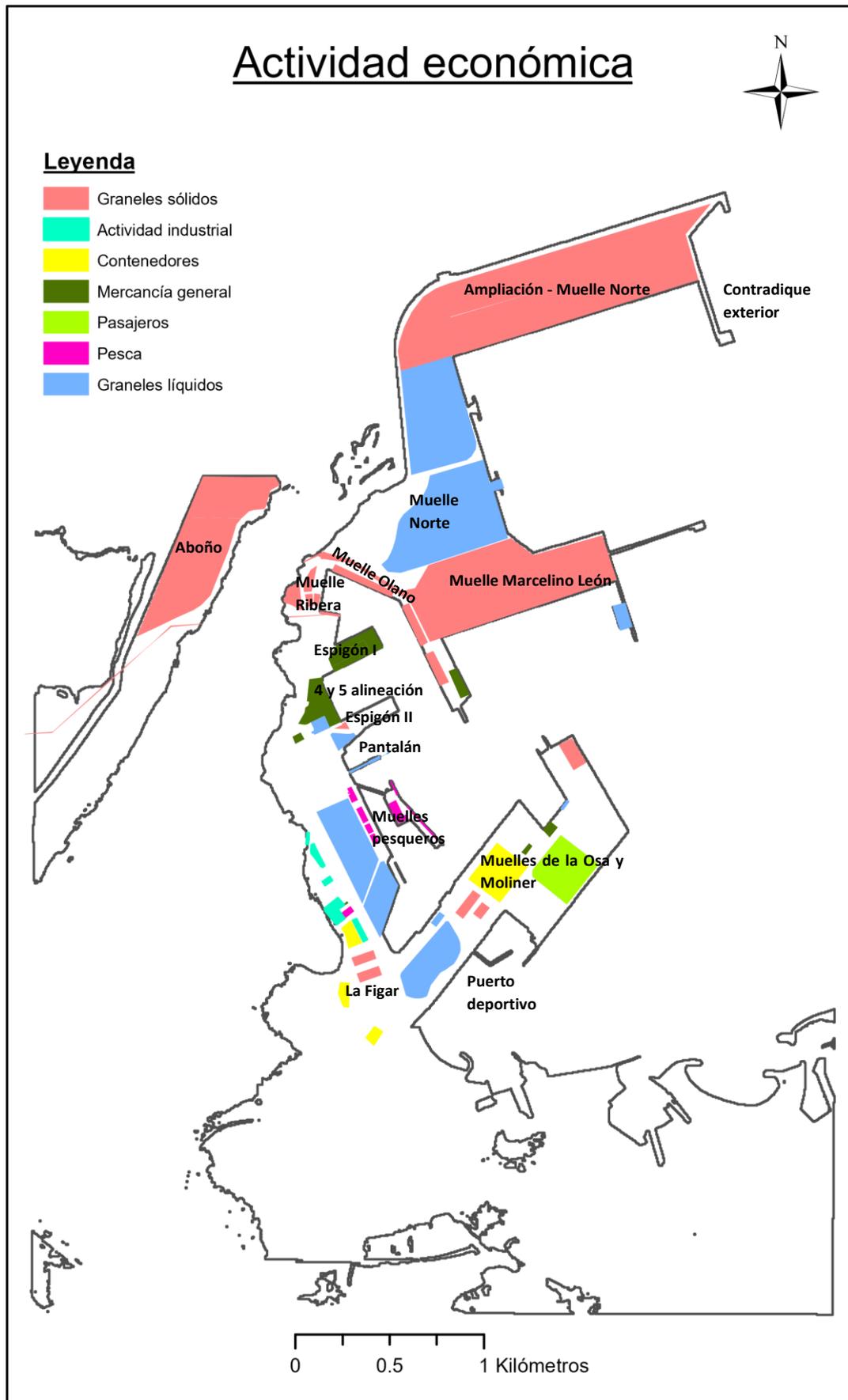


Figura 22 - Clasificación del puerto según la actividad económica (Fuente propia)

6.1 Bases de datos de exposición

La elaboración de las bases de datos de exposición se ha realizado en base a un estudio de los activos y de los flujos económicos del puerto. Dada la complejidad de la caracterización económica de un puerto de esta magnitud, la Autoridad Portuaria de Gijón facilitó el acceso a su propia base de datos para la obtención del valor de las instalaciones de las empresas concesionarias y de los flujos económicos. No toda la información recogida en la base de datos data del año 2015 así que los datos de años anteriores se han actualizado con la tasa de variación del IPC correspondiente.

El resultado es la definición económica del Puerto de Gijón a través de dos mapas, uno de activos o stock capital y otro de flujo económico, realizados con datos reales.

Mapa de activos

Para el análisis del riesgo de inundación es necesario conocer el daño que generaría en el puerto una cota de inundación dada, suponiendo que el impacto afecta a las instalaciones y no a las infraestructuras portuarias. Así, se ha realizado un mapa de todos los activos del puerto considerando solamente el valor de las instalaciones de las terminales. Los datos de stock capital de almacenes y otros edificios que no se encuentran en concesión se han completado con la Base Topográfica Nacional a escala 1:25.000 (BTN25), que se define como el conjunto de datos geográficos vectoriales de referencia de más detalle que cubren homogéneamente todo el ámbito del Estado.

En el mapa de activos (figura 23) cada m² tiene un valor unitario en euros, el valor de una zona será la suma de los valores unitarios que forman esa área.

Se va asumir que el estado de las instalaciones permanece invariable, es decir, no hay depreciación anual, por lo que el valor económico de las instalaciones y sus equipamientos va a ser en el horizonte a fin de siglo el valor inicial (recién construido). Por otro lado, se va a considerar un crecimiento anual del Musel de un 2%, que se tendrá en cuenta como un incremento del valor del puerto en los activos y en los flujos económicos en la evaluación del riesgo de los escenarios de cambio climático en el año 2100.

Mapa de flujo económico

La mayor fuente de ingresos en un puerto proviene del cobro de las tasas y tarifas, que pueden ir desde la tasa de ocupación del terreno hasta el cobro de servicios como ayuda a la navegación, uso de electricidad, manejo de grúas, etc. Dada la dificultad de asignación unitaria de varios flujos económicos a la superficie terrestre del puerto, como la tasa por embarcación, se ha considerado solamente el canon que las empresas concesionarias pagan al puerto, que incluye la tasa de ocupación y la tasa de explotación.

El mapa de flujo económico resultante (figura 24) contiene, al igual que el mapa de activos, un valor unitario por m², sólo que en este caso representa el valor en euros por m² y día.

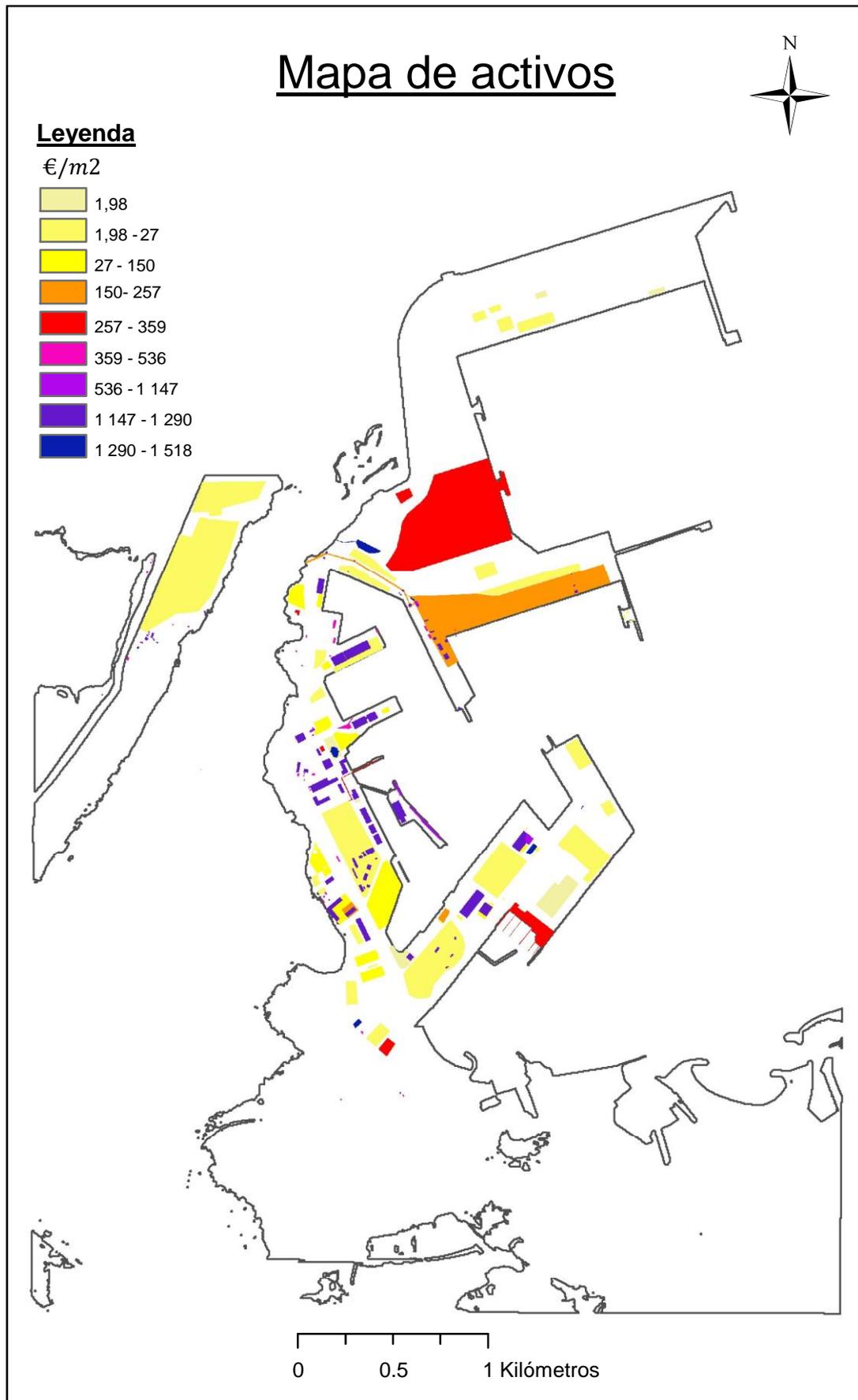


Figura 23 - Mapa de activos (euros por metro cuadrado) (Fuente propia)

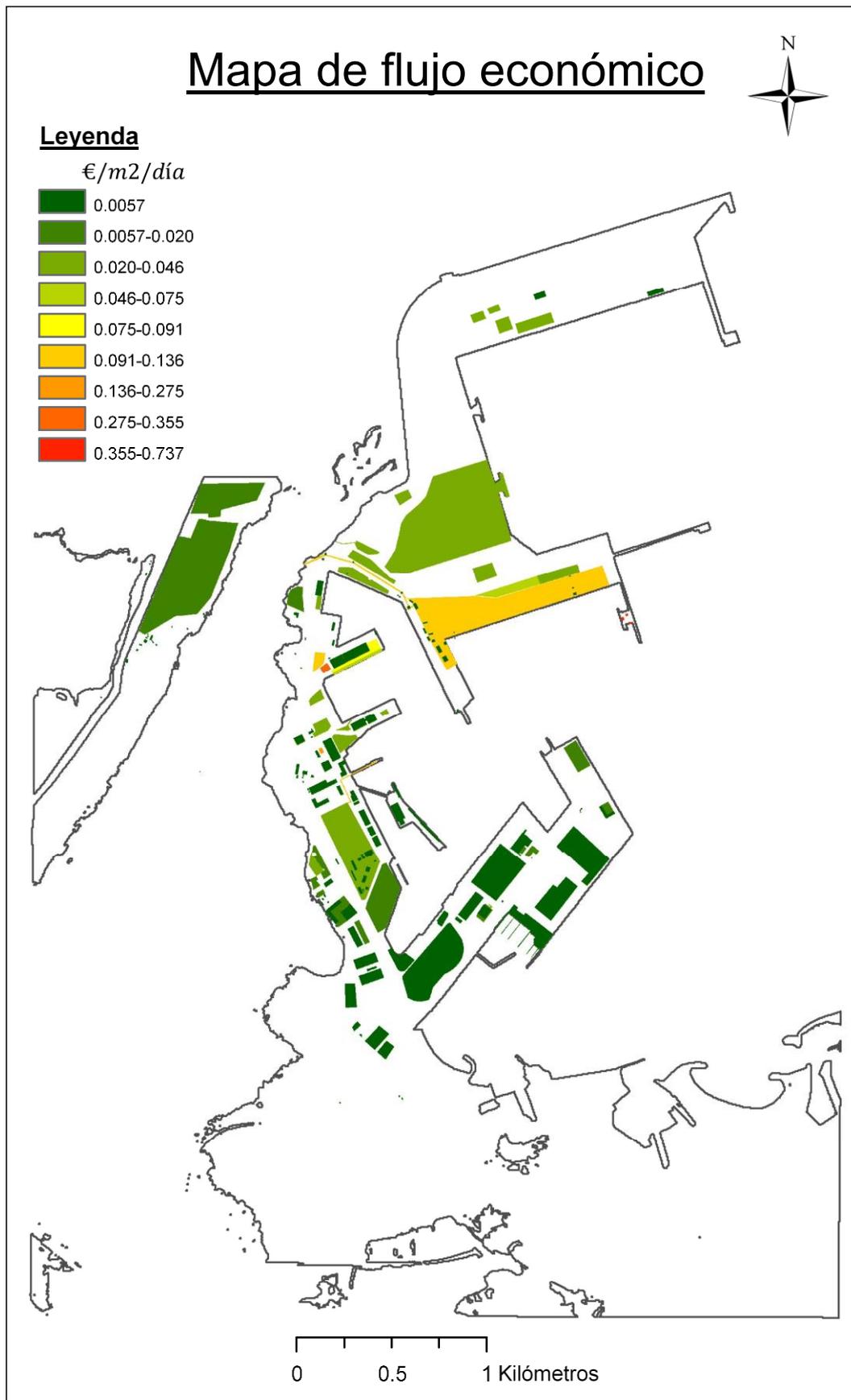


Figura 24 - Mapa de flujo económico (euros/día por metro cuadrado) (Fuente propia)

Agrupación de los ingresos por zonas

El impacto económico que supone el cierre de una zona se va a determinar a partir del total de ingresos que el Puerto de Gijón recibe de cada zona. Al contrario que en el mapa de flujo económico, donde solamente se recoge el flujo derivado de la tasa de ocupación y de actividad, en la tabla 5 se incluye la rentabilidad de los muelles y zonas principales del puerto (obtenida de la base de datos de la Autoridad Portuaria de Gijón), representando verdaderamente el impacto económico sufrido por el puerto con cada día de inoperatividad.

Estos ingresos incluyen todas las tasas y tarifas: tasa de señalización marítima, tasa buque, tasa pasaje, tasa mercancía, tasa pesca fresca, tasa embarcaciones deportivas, tasa mercancía en zona de tránsito, tasa aprovechamiento d.p. portuario, tasa ocupación privativa d.p. portuario, tarifa almacenaje, tarifa suministros, tarifa otros servicios, tarifa ferrocarril, tarifa alquiler de grúas, importes adicionales a tasas ocupación, tarifa recepción desechos, acuerdo comercial Aceralia y otros ingresos.

Muelles y zonas principales	Rentabilidad anual	Ingresos diarios €/m2/día
Muelle Marcelino León	21 721 319,39	59 510,46
Contradique exterior	124 204,45	340,29
Muelle Olano	1 828 313,43	5 009,08
Muelle Norte	120 555,69	330,29
Muelle de Ribera	964 040,08	2 641,21
Espigón I	599 568,87	1 642,65
4 y 5 alineación	173 902,00	476,44
Espigón II	590 739,76	1 618,47
Pantalán	1 170 826,02	3 207,74
Muelles pesqueros	839 959,50	2 301,26
La Figar	936 674,33	2 566,23
Muelles de La Osa y Moliner	5 292 557,95	14 500,16
Puerto deportivo	713 649,13	1 955,20
Aboño	1 685 673,69	4 618,28
Ampliación – Muelle Norte	832 470,52	2 280,74

Tabla 5 - Rentabilidad Puerto de Gijón por muelles (Autoridad Portuaria de Gijón, 2014)

Aunque en esta rentabilidad por zonas se vuelvan a incluir las tasas de ocupación y explotación, se va a utilizar para cuantificar económicamente la inoperatividad del puerto, mientras que la finalidad de los mapas es caracterizar la superficie terrestre portuaria para el estudio de los daños causados por una posible inundación en caso de temporal.

Valor de las infraestructuras

Se va a suponer un valor por metro lineal de infraestructura con el fin de poder determinar a posteriori el importe que supondría la actualización de las infraestructuras para adaptarse al cambio climático.

En base al valor y longitud del Dique de la Osa (cuyo valor aparece en las cuentas anuales del puerto), se va a suponer un valor por metro lineal para todos los diques en talud igual a 14.300 €/ml.

Al no disponer del valor del Dique Norte (único dique construido con cajones en su totalidad), se va a suponer un valor por metro lineal de dique vertical igual a 165.000 €/ml.

6.2 Caracterización de la vulnerabilidad

Una vez obtenidos los mapas de activos y flujos y la agrupación de ingresos por zonas, el puerto queda perfectamente caracterizado económicamente y se puede proceder a definir la vulnerabilidad.

La vulnerabilidad del puerto debido a la **cota de inundación** se va a determinar mediante curvas de daño, basadas en las funciones del modelo Hazus, distinguiendo por un lado entre el daño generado al continente y por otro el daño ocasionado al contenido.

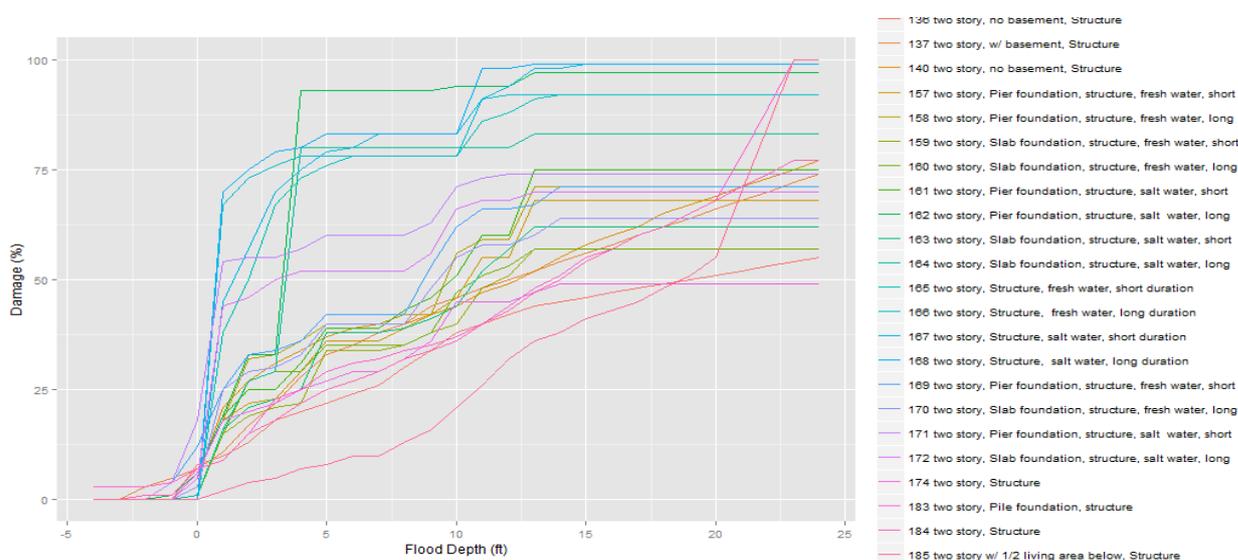


Figura 25 - Inventario de funciones de daño de Hazus (Gopi Goteti, 2014)

La magnitud del daño producido por una inundación varía en función de las características del elemento inundado, por lo que es necesario definir una curva de daño específica para cada uno de ellos.

En base a sus características las instalaciones del puerto se han clasificado en los siguientes grupos:

- Oficinas y otros edificios
Incluye los edificios de oficinas, servicios logísticos, control, aduana, Guardia Civil, Autoridad Portuaria, Capitanía Marítima, restaurantes y demás inmuebles similares características. Los daños generados en caso de inundación afectarán principalmente al contenido de los edificios (inmobiliario, ordenadores) y en menor medida a la estructura en sí (daños estéticos como el deterioro de las paredes).

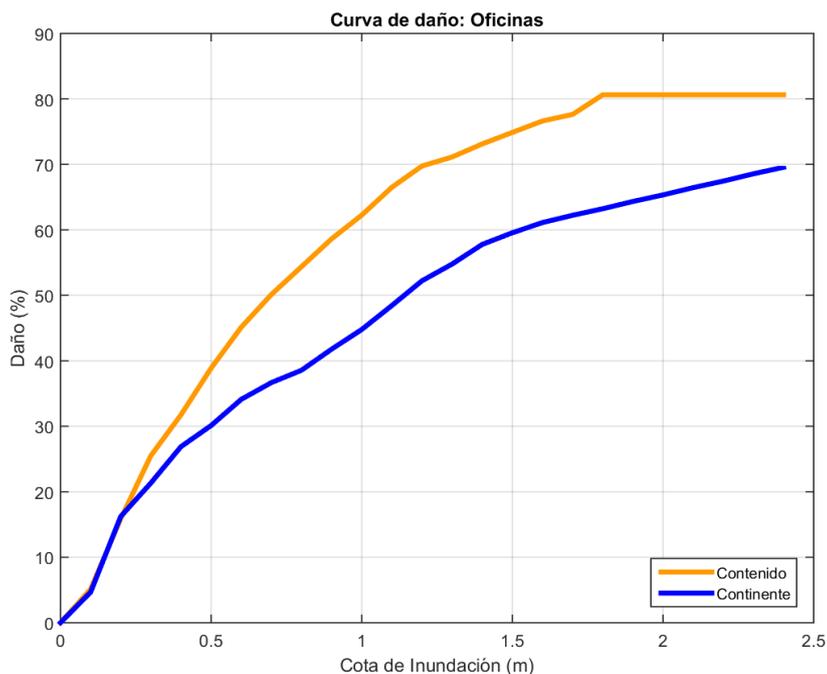


Figura 26 - Curva de daño oficinas y otros edificios (Fuente propia)

- Industria

Dentro de la curva de daños de industria se han incluido los depósitos y plantas petrolíferas, los talleres mecánicos y las instalaciones industriales de empresas asentadas en el puerto, como puede ser Railforja Asturiana. En general se tratarán de instalaciones dotadas de elementos estancos por lo que la mercancía, el contenido de las instalaciones, estará bastante protegida de las inundaciones. Al igual que en los edificios de oficinas, el agua no provocará daños estructurales.

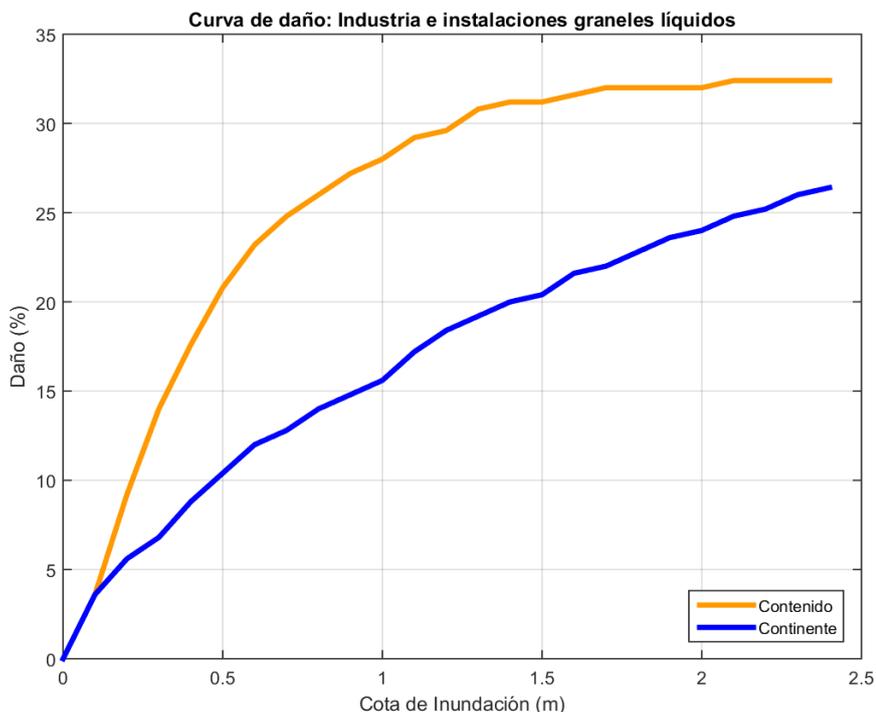


Figura 27- Curva de daño industria e instalaciones de graneles líquidos (Fuente propia)

- Explanada de carbón y otros graneles sólidos

Al tratarse el Musel de un puerto granelero, la mayor parte de las instalaciones están dedicadas al almacenamiento o manejo de graneles sólidos en grandes explanadas descubiertas. Se han definido estas zonas como muy vulnerables en caso de inundación, con la pérdida casi total de la mercancía para cotas de inundación a partir de 0,5 metros.

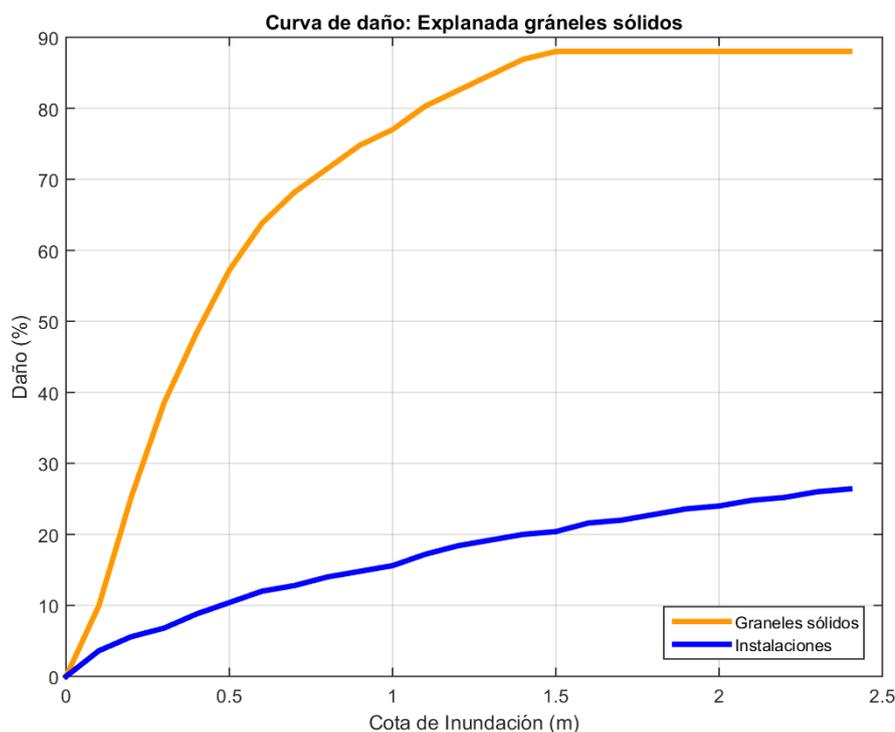


Figura 28 - Curva de daño explanada de graneles sólidos (Fuente propia)

- Terminal de contenedores

El Puerto de Gijón tiene un alto volumen de movimiento de contenedores, concentrándose principalmente en una terminal (Terminal de Contenedores de Gijón, T.C.G.). En ella se realizan las operaciones de carga, descarga y almacenamiento de los contenedores.

Para la estimación de la curva de daño se ha considerado que para una determinada cota de inundación (2 metros) el contenedor no aguanta la presión del agua y se abre, provocando el daño total del contenedor y la pérdida de todo el contenido (compuesto generalmente por graneles sólidos y alimentos). Inundaciones menores a 2 metros no generarán daño al contenedor y simplemente lo harán flotar o mover ligeramente de su sitio.

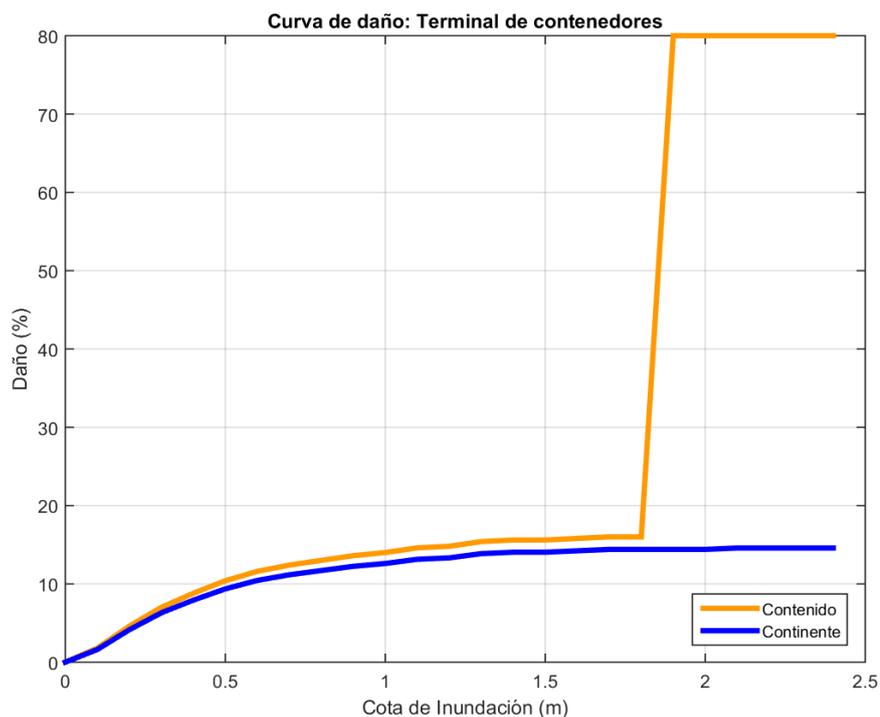


Figura 29 - Curva de daño terminal de contenedores (Fuente propia)

- Almacén de cereales

Los cereales son mercancía perecedera que necesita para su conservación un ambiente estable con unas características determinadas de humedad, temperatura y ventilación. Es por ello que la mínima inundación de este tipo de depósitos provoca la pérdida de toda la mercancía.

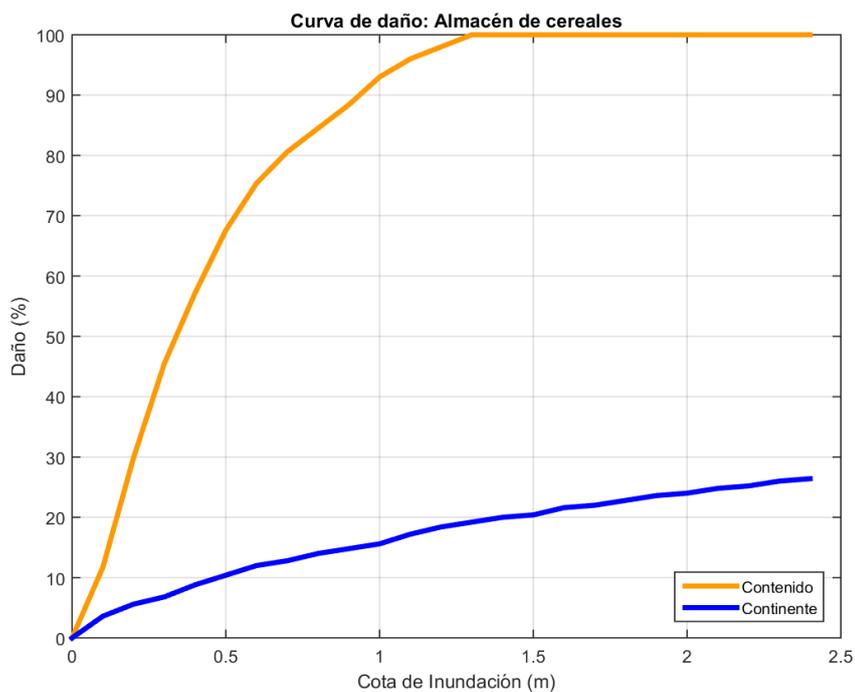


Figura 30 - Curva de daño almacén de cereales (Fuente propia)

- Lonja, fábrica de hielo y almacén de pescado y marisco
Incluye todas las instalaciones dedicadas a la actividad de la pesca, por lo que en caso de inundación y de corte de electricidad se produciría la ruina de la mercancía.

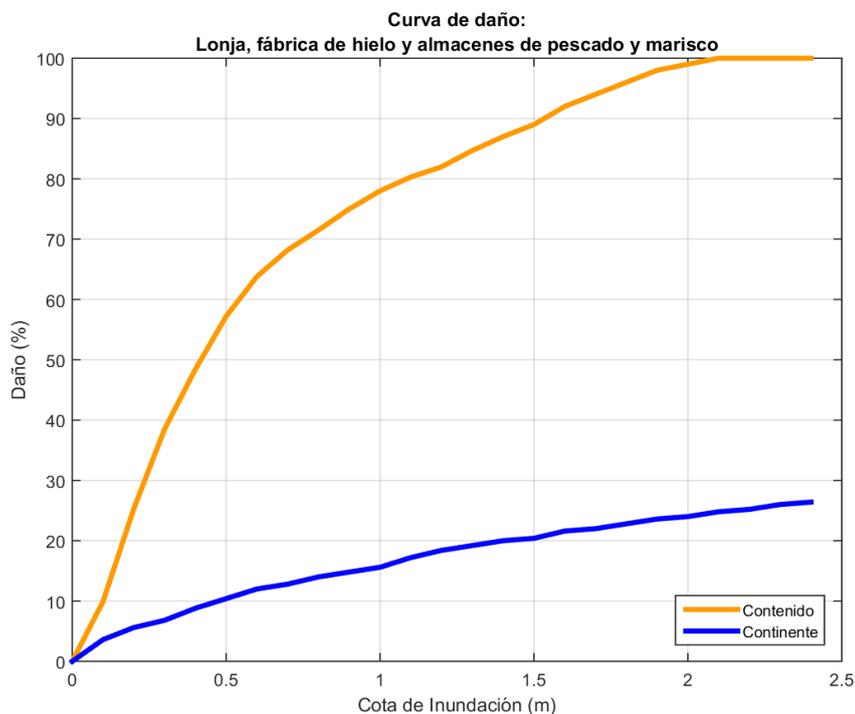


Figura 31 - Curva de daño lonja, fábrica de hielo y almacenes (Fuente propia)

- Tinglados
Instalaciones con uso variable, principalmente dedicados al almacenamiento de mercancía general.

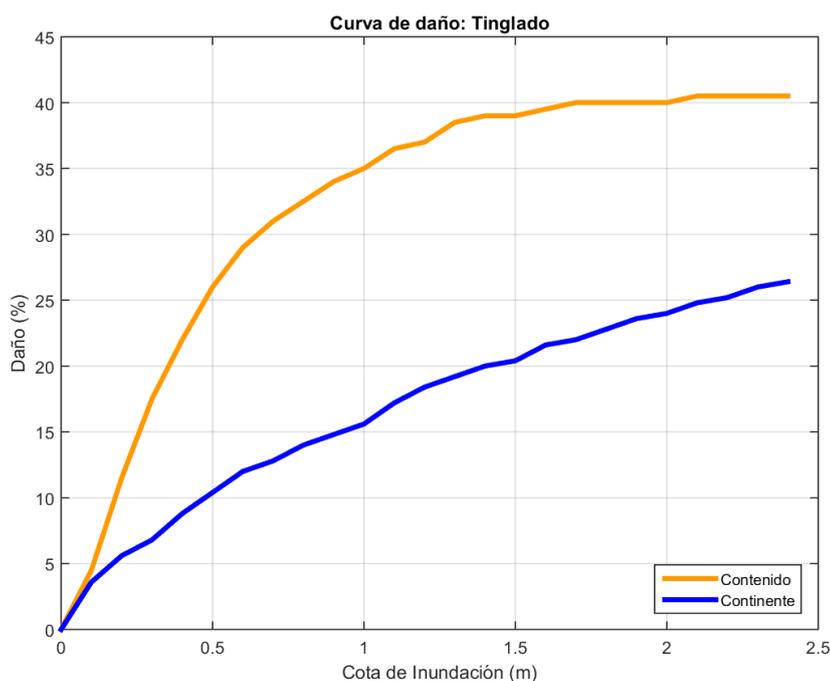


Figura 32 - Curva de daño tinglados (Fuente propia)

La vulnerabilidad del flujo económico dependerá de la cota de inundación, que determinará los días de inoperatividad necesarios para retomar la actividad normal de la terminal. Dado que las cotas de agua presentes en el puerto no van a estar entre 0,5 y 1 metros, se puede establecer la siguiente relación entre la cota de inundación y el tiempo de inoperatividad:

Cota de inundación	Tiempo de inoperatividad
≤0,5 m	2 días
0,5 ≤ h ≤ 1	4 días

Tabla 6 - Relación entre la cota de inundación y el tiempo de inoperatividad

Para la determinación de la vulnerabilidad del puerto debido a la **agitación interior** se utilizarán los umbrales de tiempos de inoperatividad aceptables establecidos por las Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM). Estos tiempos de inoperatividad se definirán con el número de veces que las dinámicas exceden los condicionantes límites establecidos por la ROM.

TABLA 8.2. TIEMPOS MEDIOS ACEPTABLES DE CIERRE DE UN AREA POR PRESENTARSE CONDICIONES CLIMATICAS ADVERSAS (SUPERIORES A LAS ESTABLECIDAS COMO LIMITES DE OPERACION PARA LOS BUQUES DE PROYECTO)		Velocidad absoluta del viento $V_{10,1 \text{ min}}$	Velocidad absoluta de la corriente $V_{c,1 \text{ min}}$	Altura de ola H_g
CARACTERISTICAS DEL AREA	Tiempos de inoperatividad en horas, por todos los conceptos ⁽¹⁾⁽²⁾			
A. Areas de buques en tránsito (accesos, vías de navegación, canales, bocanas, áreas de maniobras, etc.)				
1. Puertos de interés general				
— Areas abiertas a todo tipo de barcos	200 h. año 20 h. mes			
— Areas abiertas a Embarcaciones pesqueras y deportivas (3)	20 h. año 4 h. mes			
2. Puertos de refugio				
— Areas abiertas a todo tipo de barcos	300 h. año 30 h. mes			
— Areas abiertas a Embarcaciones pesqueras y deportivas (3)	20 h. año 4 h. mes			
3. Otros puertos	400 h. año 40 h. mes			
4. Terminales especializados				
— Pasajeros, Contenedores, Ferries y otros terminales que operen con líneas regulares	200 h. año 20 h. mes			
— Graneles de cualquier tipo y otros terminales que no operen con líneas regulares	600 h. año 60 h. mes			
B. Areas de buques en permanencia (Fondeaderos, amarraderos, dársenas, muelles, atraques, terminales, etc.)				
1. Puertos de cualquier tipo	40 h. año 20 h. mes			
2. Terminales especializados				
— Pasajeros, Contenedores, Ferries y otros terminales que operen con líneas regulares	200 h. año 20 h. mes			
— Graneles de cualquier tipo y otros terminales que no operen con líneas regulares	500 h. año 50 h. mes			
(1) Los tiempos de inoperatividad recogidos en esta tabla se refieren al Cierre del Area por cualquier concepto, ya sea por una variable climática no predecible con anticipación (vientos, oleajes, corrientes, mareas meteorológicas, faltas de visibilidad, etc.), como predecible con anticipación (mareas astronómicas, etc.). El cierre del área por nocturnidad no se contemplará a estos efectos valorándose tal como se indica en el texto.				
(2) Los requerimientos mínimos recogidos en esta Tabla están basados en un porcentaje de utilización del Area por los Buques de Proyecto del 30%, calculado sobre el tiempo útil total disponible (deducido por tanto el tiempo de cierre del Area por cualquier motivo: insuficiencia del nivel de agua, clima marítimo, nocturnidad, etc.). En el supuesto de que este porcentaje de utilización del área sea igual o inferior al 20%, podrán utilizarse valores del doble de los recogidos en la Tabla; asimismo si el porcentaje de utilización del área fuese igual o superior al 40% deberán utilizarse valores de la mitad de los recogidos en la Tabla, para valores intermedios podrá interpolarse linealmente.				
(3) Los tiempos de inoperatividad se calcularán para las Condiciones Límites de Operación correspondientes a los Buques de Proyecto de embarcaciones pesqueras y deportivas.				
		— Transportadores de Gases Licuados < 60.000 m ³ > 60.000 m ³	22 m/s 22 m/s	1.5 m/s 1.5 m/s
		— Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores — Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries — Transatlánticos y Cruceros (1) — Pesqueros de pesca fresca	22 m/s 22 m/s 22 m/s 22 m/s	1.5 m/s 1.5 m/s 1.5 m/s 1.5 m/s
		• Acciones en sentido transversal al muelle		
		— Petroleros < 30.000 TPM 30.000-200.000 TPM > 200.000 TPM	20 m/s 20 m/s 20 m/s	0.7 m/s 0.7 m/s 0.7 m/s
		— Graneleros Cargando Descargando	22 m/s 22 m/s	0.7 m/s 0.7 m/s
		— Transportadores de Gases Licuados < 60.000 m ³ > 60.000 m ³	16 m/s 16 m/s	0.5 m/s 0.5 m/s
		— Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores — Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries — Transatlánticos y Cruceros (1) — Pesqueros de pesca fresca	22 m/s 22 m/s 22 m/s 22 m/s	0.7 m/s 0.5 m/s 0.5 m/s 0.7 m/s
		3. Permanencia de buques en muelle		
		— Petroleros y Transportadores de Gases Licuados		
		• Acciones en sentido longitudinal al muelle • Acciones en sentido transversal al muelle	30 m/s 25 m/s	2.0 m/s 1.0 m/s
		— Transatlánticos y Cruceros (2)		
		• Acciones en sentido longitudinal al muelle • Acciones en sentido transversal al muelle	22 m/s 22 m/s	1.5 m/s 0.7 m/s
		— Embarcaciones deportivas (2)	22 m/s	1.5 m/s
		• Acciones en sentido longitudinal al muelle • Acciones en sentido transversal al muelle	22 m/s 22 m/s	1.5 m/s 0.7 m/s
		— Otro tipo de buques		
		Limitaciones impuestas por las cargas de diseño de los muelles		
	NOTAS:			
	$V_{10,1 \text{ min}}$	= Velocidad media del viento, correspondiente a 10 m de altura y ráfaga de 1 minuto.		
	$V_{c,1 \text{ min}}$	= Velocidad media de la corriente correspondiente a una profundidad del 50% del calado del buque, en un intervalo de 1 minuto.		
	H_g	= Altura de la ola significativa del oleaje (para estudios de mayor precisión se considerará la influencia del periodo).		
	Longitudinal	= Se entenderá que el viento, la corriente o el oleaje actúan longitudinalmente, cuando su dirección está comprendida en el sector de ± 45° con el eje longitudinal del buque.		
	Transversal	= Se entenderá que el viento, la corriente o el oleaje actúa longitudinalmente cuando su dirección está comprendida en el sector de ± 45° con el eje transversal del buque.		
	(1)	= Las condiciones se refieren al embarque y desembarque del pasajero.		
	(2)	= Las condiciones se refieren a los límites para mantener una habitabilidad aceptable con el pasaje a bordo		

Figura 33 - Condicionantes límite de operación y tiempos de inoperatividad (ROM 3.1-99)

La vulnerabilidad debido al **caudal de rebase** se definirá con la tabla de caudales máximos definida por Franco et al. (1994), donde los umbrales determinan el caudal máximo para mantener la seguridad funcional de vehículos, peatones y edificios, y la seguridad estructural de los muros y diques.

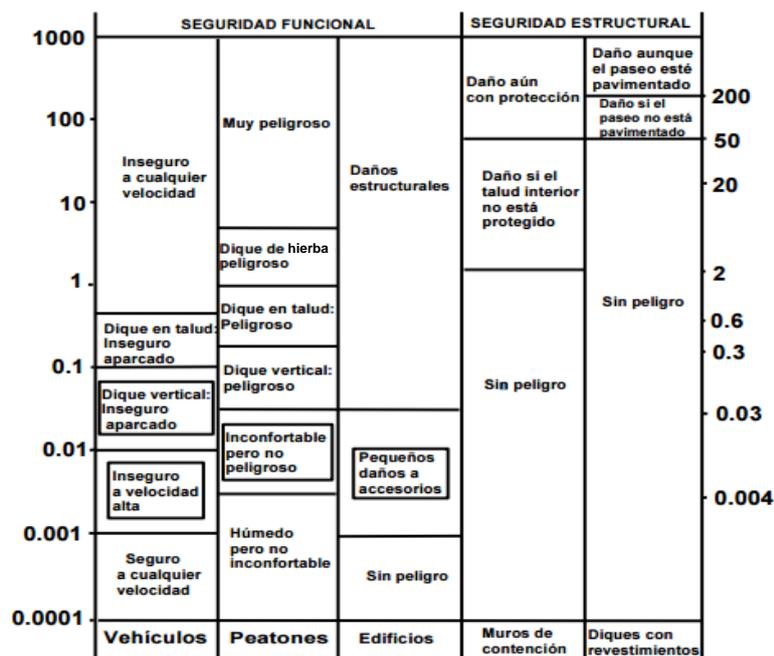


Figura 34 - Caudales de rebase tolerables (l/s/m) (Franco et al. (1994))

La vulnerabilidad de las **estructuras de protección** del puerto debido al cambio climático se va a definir mediante la relación entre el peso de los diques necesario para mantener la estabilidad y la altura de ola.

RELACIÓN ENTRE EL REBASE ADIMENSIONAL Y LA VARIACIÓN DEL NIVEL MEDIO ADIMENSIONALIZADO POR LA ALTURA DE OLA

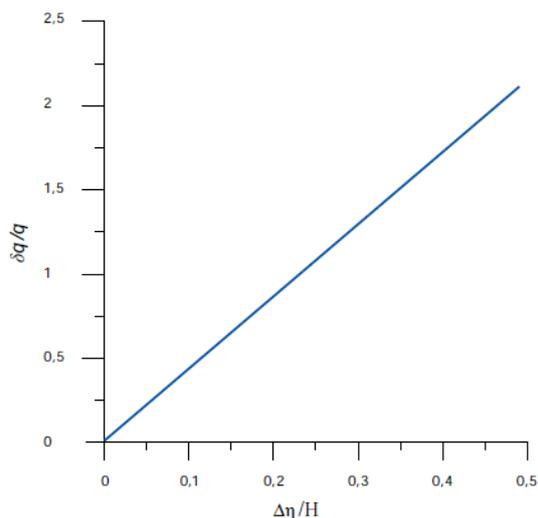


Figura 35 - Relación entre el rebase y la variación del nivel medio (NU. CEPAL et al., 2012)

7 – Caracterización de impactos

7. Caracterización de impactos

En el capítulo anterior se ha caracterizado la exposición y la vulnerabilidad del puerto, y en este apartado se van a definir los peligros a los que está sometido. La interacción de los tres elementos en el capítulo 8 permitirá la evaluación de las consecuencias de los impactos y su cuantificación en unidades monetarias, para la elaboración de una estrategia de gestión del riesgo ante eventos meteorológicos extremos y el cambio climático en el Puerto de Gijón.

El cambio climático origina unos impactos que provocan la inundación y la agitación interior del puerto y la desestabilización de las estructuras de protección, provocando daños en las instalaciones y la parada de actividad. En el caso del Musel las consecuencias son especialmente relevantes ya que supone uno de los principales motores económicos del Principado de Asturias.

Se va a proponer una metodología para el estudio de cada impacto bajo las hipótesis de los distintos escenarios de cambio climático.

7.1 Inundación

Se ha estudiado la inundación producida en el Puerto de Gijón por un evento extremo con un elevado periodo de retorno, que al combinarse con los escenarios de cambio climático (aumento del nivel medio del mar y de la altura de ola) provoca daños cada vez mayores.

El riesgo de inundación se puede caracterizar mediante los mapas de inundación, que representan gráficamente la mancha de inundación producida en el puerto para cada uno de los escenarios simulados. Tienen especial relevancia en los planes de ordenamiento urbanístico ya que, al identificar las áreas más propensas a riesgos, evitan la inversión y construcción en zonas sustancialmente inundables.

Previamente al desarrollo de la metodología propuesta de inundación se va a presentar de manera breve el modelo numérico empleado, con el fin de introducir los pre-procesos y las variables de entrada del modelo.

7.1.1 Simulación numérica de la inundación

El modelo numérico utilizado para simular la inundación en tierra ha sido el RFSM-EDA (*Rapid Flood Spreading Method - Explicit Diffusion wave with Acceleration term*), un modelo hidrodinámico bidimensional desarrollado inicialmente en HR Wallingford y diseñado para funcionar de manera eficiente en todas las escalas, proporcionando profundidades de agua sobre el terreno y velocidades con tiempos de ejecución cortos. El modelo está basado en el método de almacenamiento de celdas y responde a una aproximación difusiva de las *Shallow Water Equations* (SWE), incorporando asimismo el término de la aceleración local. Su algoritmo permite considerar rasgos característicos de la topografía, como crestas y puntos bajos, derivados de un Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta resolución, utilizando elementos computacionales relativamente grandes y por tanto empleando tiempos de ejecución pequeños pero con buena precisión (HR Wallingford, 2013).

Si bien en los anexos se adjunta una descripción extendida del modelo RFSM-EDA, de las hipótesis de partida y de las ecuaciones que lo gobiernan, se ha considerado necesario incluir una breve explicación del funcionamiento del modelo para permitir una interpretación correcta de los resultados obtenidos.

El algoritmo del modelo crea una malla irregular basada en la topografía y formada por las llamadas *Impact Zones* (IZs). A su vez las IZs están compuestas por un conjunto de celdas (*Impact Cells*) que drenan en el mismo punto bajo, denominado punto de acumulación. El punto más bajo de las *Impact Cells* fronterizas entre *Impact Zones* es el punto de comunicación, y es el punto a través del cual el agua fluye entre celdas. En la figura 36 se representan dos *Impact Zones* y sus puntos de comunicación y acumulación.

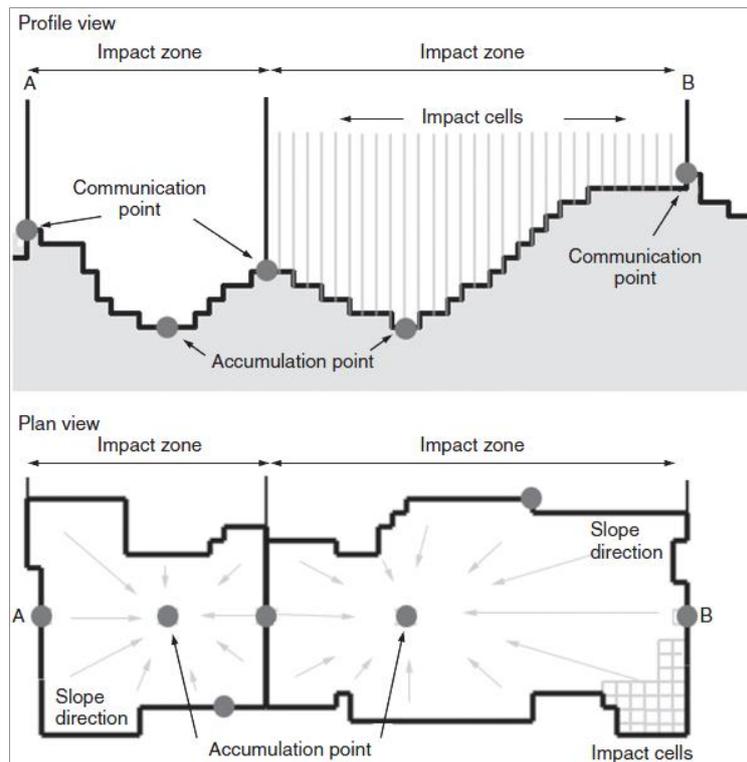


Figura 36 – Esquema de Impact Zones y sus puntos de comunicación (Benwell et al., 2008)

Durante la simulación hidráulica el modelo recibe volúmenes de descarga en la llanura de inundación a través de cada IZ costera, utilizando el nivel del mar total o el caudal de rebase como dinámicas forzadoras. Como estamos trabajando con un puerto, el modelo alimentará sus celdas con el caudal que rebasa los diques y muelles.

El agua recibida en las IZ costeras se descarga en sus IZ vecinas siguiendo el siguiente proceso: el volumen de agua en cada IZ se compara con el nivel de comunicación y si éste es alcanzado se calcula el volumen de agua sobrante, que es descargado en las IZ vecinas. El proceso se va repitiendo de manera que el volumen sobrante va disminuyendo hasta desaparecer, y es entonces cuando se obtiene la cota de agua inundada final, al ser constante el volumen de agua presente en cada IZ (Losada et al., 2016).

En la figura 37 se ilustra el paso de agua de una IZ a otra a través de la frontera de comunicación y el llenado de la IZ vecina desde el punto más bajo, el de acumulación.

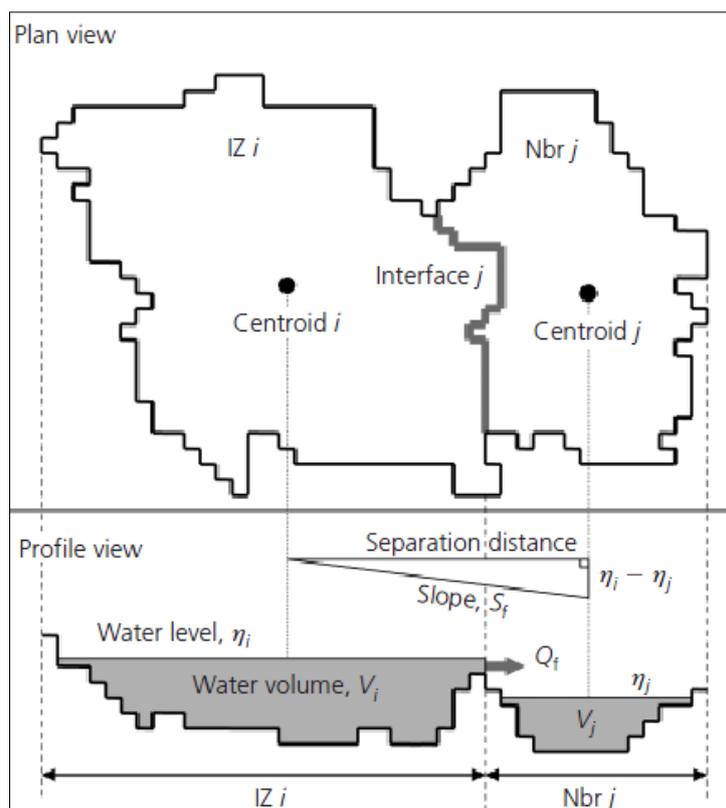


Figura 37 - Esquema de una IZ y su IZ vecina, vista en planta y de perfil (Jamieson et al., 2012)

7.1.2 Propuesta metodológica de inundación

La metodología de inundación propuesta y aplicada al Puerto de Gijón se estructura en cinco partes (I-V):

I. Recopilación y preparación de la información

a. Bases de datos disponibles

Las bases de datos DOW (*Downscaled Ocean Waves, Camus et al., 2013*) y GOS (*Global Ocean Surge, Cid et al., 2014*) y GOT (*Global Ocean Tide*), de IH Cantabria, forman el conjunto de bases de datos disponibles. La base de datos DOW es una base de datos de reanálisis de oleaje en aguas someras a lo largo de todo el litoral español, que proporciona datos horarios de oleaje desde 1948 hasta 2014. La base de datos GOS es una base de datos de reanálisis que proporciona la marea meteorológica a escala horaria de 67 años y GOT proporciona la marea astronómica en cualquier parte del mundo.



Figura 38 - Representación punto DOW (Fuente propia)

El punto representado en la figura 38 como punto DOW es el punto del que se tomarán las dinámicas que alimentarán el modelo, que deberán ser propagadas hasta la costa por un modelo de propagación del oleaje.

b. Definición del evento y los escenarios de cambio climático

Se ha tomado como escenario base el temporal de febrero de 2014 debido a su excepcionalidad, con un periodo de retorno de hasta 500 años e importantes daños producidos en la costa, y debido a la campaña de campo realizada por IH Cantabria tras el temporal para evaluar las consecuencias.

Se ha decidido ejecutar un intervalo de 12 horas de temporal y para poder seleccionar el intervalo con las dinámicas más fuertes se ha representado el valor de la cota de inundación (*Total Water Level*) del temporal desde las 12 del mediodía del 1 de febrero hasta las 10 de la noche del día 2.

El TWL responde a la suma de la marea meteorológica, la marea astronómica y la contribución del oleaje (el *set up*, que puede determinarse numéricamente o mediante formulación semiempírica).

Como se puede ver en la figura 39 la mayor cota de agua observada corresponde con las 5 de la mañana del 2 de febrero. Tomando este pico como referencia se define el intervalo de doce horas del temporal desde las 23:00 del día 1 de febrero hasta las 11:00 del día 2.

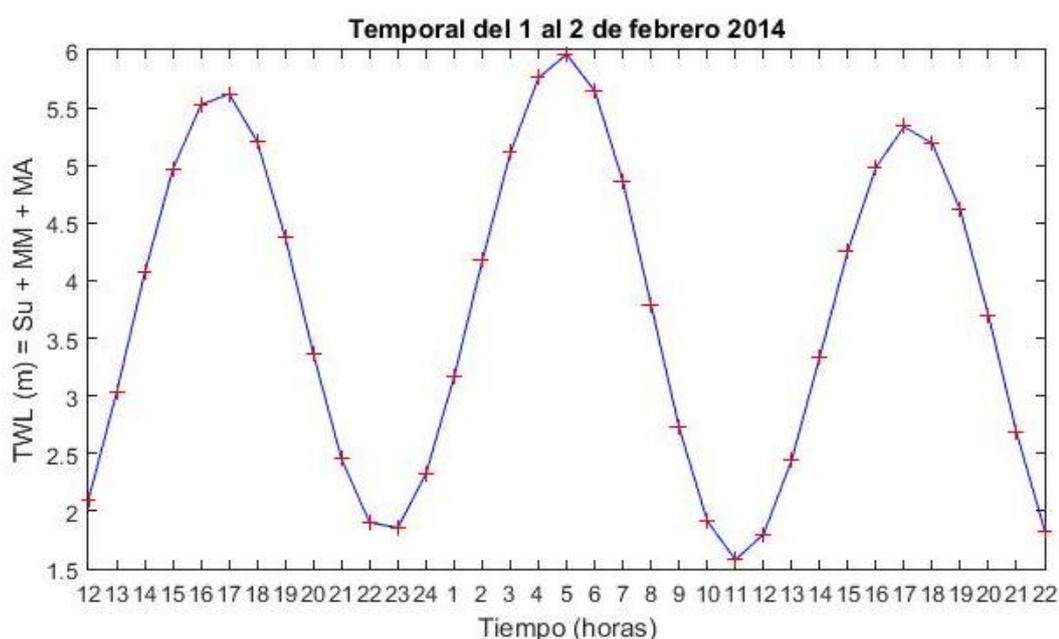


Figura 39 - Valor del Total Water Level los días 1 y 2 de febrero 2014 (Fuente propia)

Sobre este escenario base se plantean los distintos escenarios de cambio climático, que incluyen cambios en el nivel medio del mar, en la altura de ola significativa y en la precipitación. Los escenarios de inundación considerados son los siguientes:

- Escenario Base: constituido por las doce horas de temporal.
- Escenario 1: el temporal de cálculo considerando el aumento del nivel medio del mar estimado por Slangen 8.5, igual a 0,63 metros.
- Escenario 2: el temporal de cálculo incrementando en 1 metro el nivel medio del mar.

- Escenario 3: el temporal de cálculo considerando Slangen 8.5 y un aumento de la altura de ola significativa de un 20%.
- Escenario 4: el temporal de cálculo incrementando en 1 metro el nivel medio del mar 1 metro y aumento de la altura de ola significativa en un 20%.
- Escenario 5: el temporal de cálculo más el incremento del nivel medio del mar considerado por Slangen 8.5, un aumento de un 20% de la altura de ola significativa y una lluvia torrencial de 100 mm en las doce horas (agua caída equivalente a 100 litros por m²).

c. Preparación de la topografía

Debido a que el modelo numérico se sustenta en la topografía subyacente es fundamental que ésta tenga una calidad óptima, pues la calidad de los resultados depende directamente del nivel de resolución de la topografía. Para ello se ha empleado un modelo digital del terreno (MDT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) basado en datos LiDAR de 5 metros de resolución horizontal, y con el objetivo de tener las infraestructuras costeras del puerto lo mejor definidas posibles, éstas se han digitalizado a partir de planos proporcionados por el Servicio de Puertos e Infraestructuras de Transporte del Principado de Asturias. El resultado es un MDT (figura 40) donde el puerto y todas sus infraestructuras están perfectamente caracterizadas, que hace posible su uso para la formación de la malla de *Impact Zones* y la obtención de resultados de calidad.

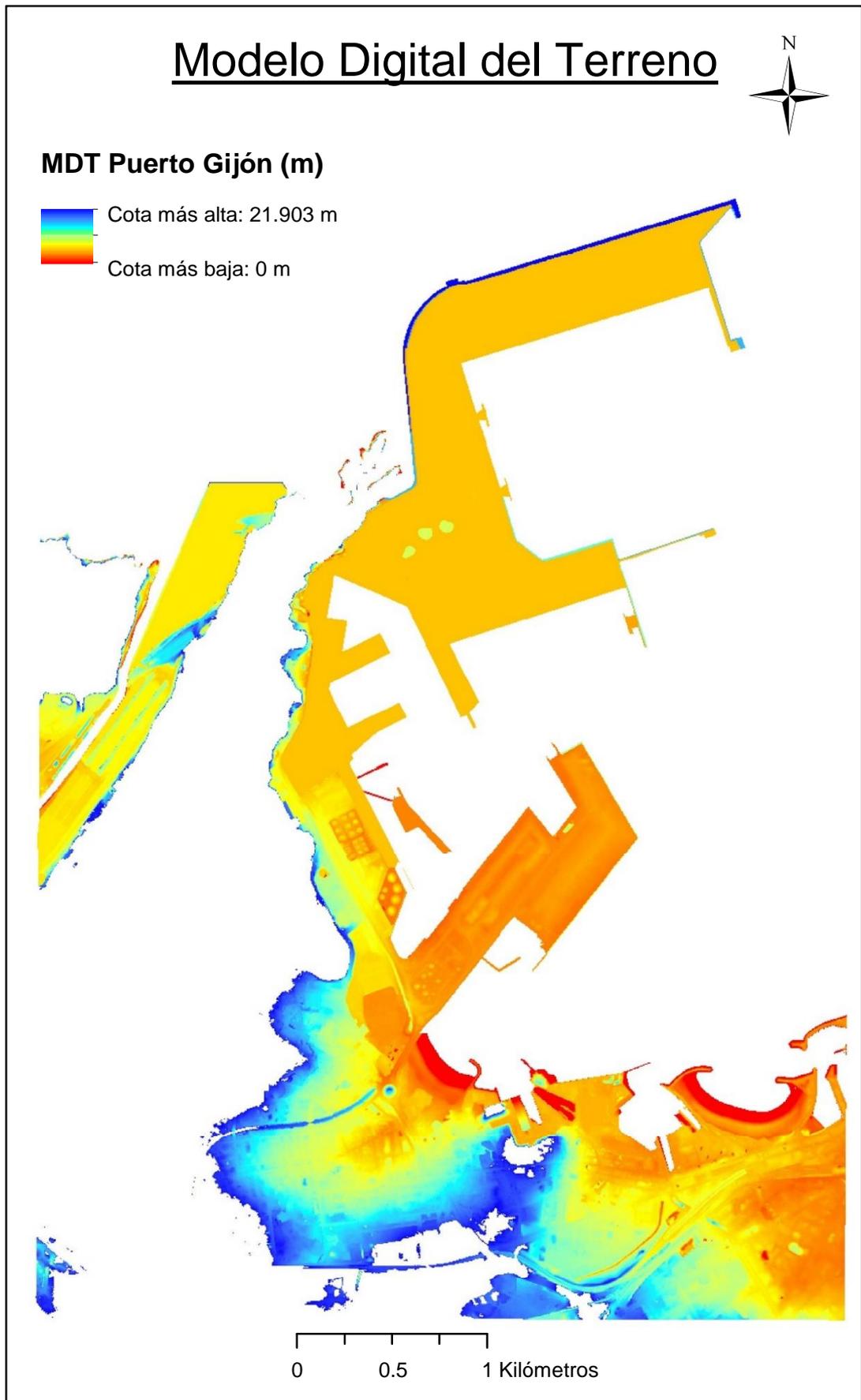


Figura 40 - Modelo Digital del Terreno (Fuente propia)

II. Determinación de los usos del suelo

El coeficiente de rugosidad del suelo influye en el comportamiento del modelo de inundación, ya que representa la influencia del paso del flujo de agua por el terreno, por lo que se ha asignado a cada celda del MDT un coeficiente de rugosidad de Manning asociado a los distintos tipos de suelo. La clasificación del suelo se ha establecido en base al CORINE Land Cover (CLC). El CLC es un proyecto que forma parte del programa de la Unión Europea CoORDination of INformation of the Environment (CORINE), “un proyecto experimental para la recopilación, la coordinación y la homogeneización de la información sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales en la Comunidad”. El proyecto CORINE Land Cover forma una base de datos europea de ocupación del suelo a escala 1:100.000, útil para el análisis territorial y la gestión de políticas europeas.



Figura 41 - CORINE Land Cover en España (IGN)

De esta manera, entre las múltiples categorías ofrecidas por el CLC, los usos del suelo del Puerto de Gijón y su entorno se han definido en seis clases. Si bien el mapa del uso del suelo del Musel podría ser caracterizado con tres clases, se presentan además los usos del suelo destinados a tejido urbano, instalaciones deportivas y vegetación escasa para completar el resto de elementos que aparecen en el mapa (alrededores del Musel).

Zona	Descripción	Coefficiente rugosidad de Manning 'n'
1 – Zonas portuarias	Muelles y terminales donde no hay nada construido encima	0,05
2 – Zonas en construcción	Depósito de gráneles sólidos	0,03
3 – Zonas industriales y comerciales	Industria, plantas petrolíferas, talleres, oficinas, almacenes	0,2
4 – Tejido urbano	Zona urbana de alrededores	0,15
5 – Instalaciones deportivas	Puerto deportivo	0,02
6 – Zonas con vegetación escasa	Rocas y pequeños acantilados	0,04

Tabla 7 - Clases usos del suelo Puerto de Gijón

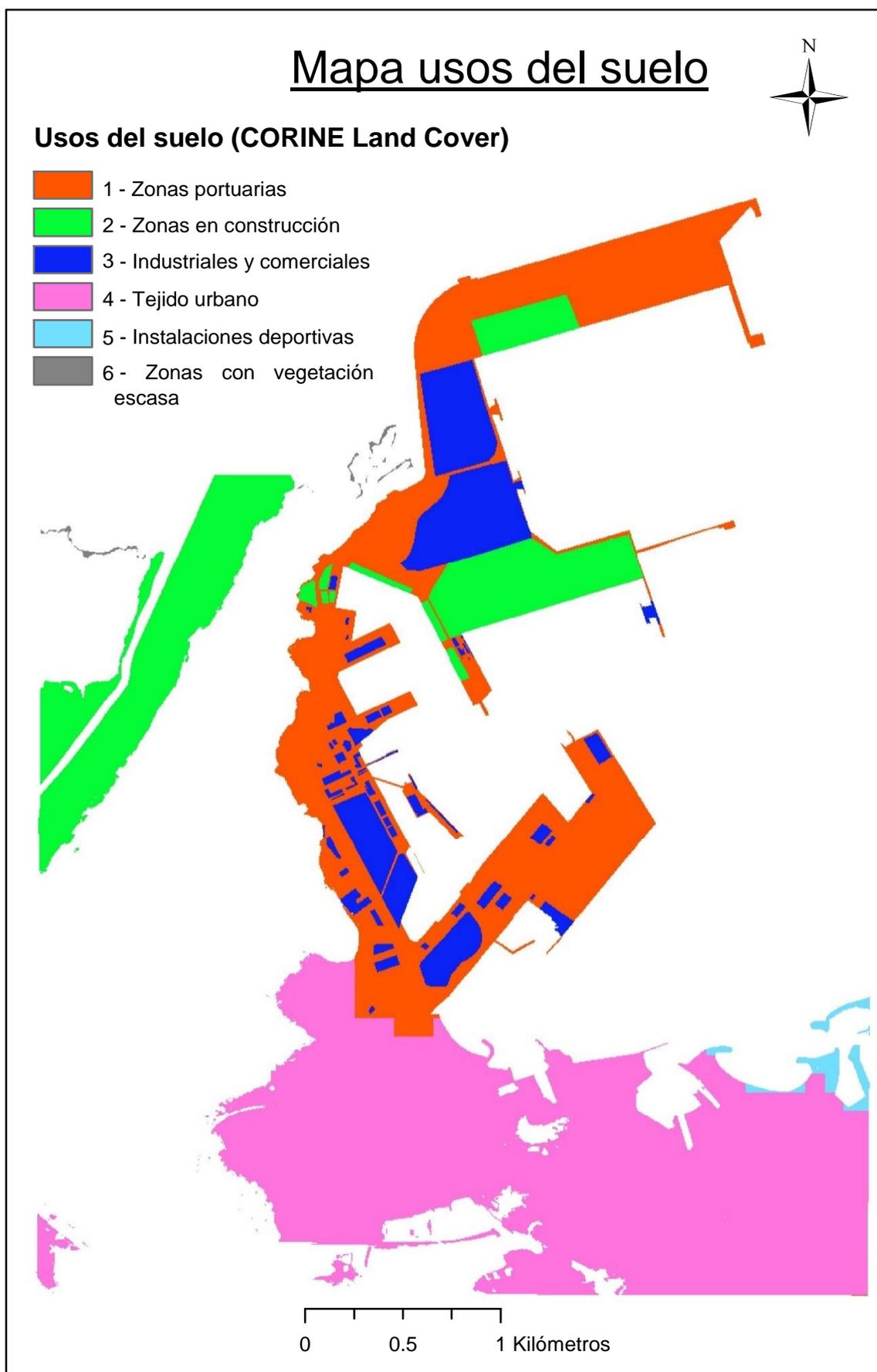


Figura 42 - Mapa usos del suelo (Fuente propia)

III. Preproceso del modelado de inundación

El pre proceso del RFSM-EDA consiste en la generación de la malla de *Impact Zones*. Como se explicaba en la introducción del modelo, el algoritmo crea una malla compuesta por IZs a partir de la topografía, y de ahí la importancia de tener un modelo digital del terreno con buena resolución, ya que al partir de una malla que se corresponde con la realidad también se corresponderán los resultados de la simulación.

Debido a la gran extensión del Puerto de Gijón se ha buscado tener un tamaño grande de las IZ para hacer la malla más manejable. El resultado son IZs con un tamaño medio de 7.500 m². La malla computacional formada por las IZ se presenta en la siguiente página y en ella se puede ver como la malla y las regiones (IZs) que forman la malla siguen perfectamente la topografía. En algunos casos las propias IZs presentan formas que respetan los rasgos topográficos más característicos, como los espaldones de los diques, formando IZ alargadas como se puede ver en este zoom ampliado de la malla en la figura 43:



Figura 43 - Zoom del dique en la malla de Impact Zones (Fuente propia)

La escollera de los diques se ha dejado fuera de la malla debido a las discrepancias que, tras ser comprobado en varias simulaciones, induce en el modelo. La inundación numérica comienza con la descarga del agua rebasada por encima de la estructura, y si se incluye la escollera dentro de la malla el modelo puede tomar como cota del espaldón del dique (que es la cota que se tiene en cuenta en el cálculo del rebase) una cota baja de la escollera. Esto supone simular un dique con una cota de espaldón que no le corresponde, provocando una inundación mucho mayor y completamente irrealista.

Una vez preparada la malla de las IZs (figura 44), el RFSM-EDA puede recibir los volúmenes de inundación en las IZs costeras, que es la variable principal de entrada del modelo.



Figura 44 - Malla Impact Zones (Fuente propia)

IV. Cálculo de las variables de entrada

El modelo RFSM-EDA tiene como inputs de entrada los volúmenes de inundación por unidad de tiempo en cada una de las IZs que forman la línea de costa del puerto. Como se explicaba en la introducción del modelo, dado que estamos trabajando con puertos, el modelo alimenta sus celdas con el caudal que rebasa los diques y muelles. Este caudal se va a calcular con formulación semiempírica, que transformará el oleaje propagado numéricamente a pie de dique en caudal de rebase.

a. Definición de la formulación semi-empírica

Para el cálculo de los volúmenes de descarga que alimentan el modelo de inundación se ha utilizado el “*Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*”, un manual para el cálculo del caudal de rebase que forma parte de un proyecto en el que participan la *Environmental Agency*, el *German Coastal Engineering Research Council* y el *Rijkswaterstaat, Netherlands Expertise Network on Flood Protection*. El manual recoge formulación semi-empírica para el cálculo del caudal de rebase de las infraestructuras costeras basada en métodos y datos de estudios de investigación de toda Europa.

La formulación escogida del manual para los diques en talud es la siguiente:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m_0}^3}} = 0.2 \exp\left(-2.3 \frac{R_c}{H_{m_0} \gamma_f \gamma_\beta}\right)$$

q – Caudal medio por unidad de longitud de dique ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

H_{m_0} – Altura de ola significativa a pie de dique (m)

R_c – Francobordo

γ_β – Factor corrector de incidencia oblicua de las olas

γ_f – Factor corrector de permeabilidad y rugosidad de la pendiente o no del talud

En los diques verticales se ha considerado la formulación para la tipología de sección vertical de Franco et al. (1999), donde el caudal de rebase se puede expresar a partir de la fórmula obtenida:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m_0}^3}} = 0.082 \cdot \exp\left(-3 \frac{R_c}{H_{m_0} \gamma_f \gamma_\beta}\right)$$

Con el fin de utilizar el caudal máximo para estar del lado de la seguridad se ha tomado la unidad como valor de los dos factores correctores para, siendo el equivalente a tomar una incidencia normal de las olas y un talud de hormigón con pendiente suave.

Por tanto, la formulación del caudal de rebase depende únicamente de dos parámetros, la altura de ola significativa (H_{m_0}) y el francobordo de la estructura (R_c). El francobordo (R_c) es la diferencia entre la cota de coronación de la estructura y el nivel del mar.

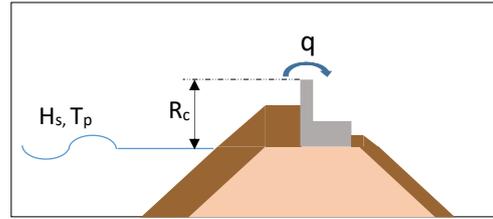


Figura 45 - Representación del francobordo y del caudal de rebase (Fuente propia)

Para conocer con exactitud el valor del francobordo la cota de los espaldones de los dique y la cota de los muelles fueron contrastadas con el *Atlas Diques de Abrigo en los Puertos de Interés General del Estado (Años 1986-2011)*.

b. Modelo MSP para la propagación del oleaje

El cálculo del caudal de rebase hace necesaria la propagación del oleaje a pie de dique desde el punto DOW seleccionado al comienzo de la metodología.

Debido a que posteriormente se va a realizar un estudio de agitación, que supone la interacción del oleaje con estructuras portuarias, es necesario modelar adecuadamente los fenómenos propios de la transformación del oleaje, considerando especialmente la reflexión del mismo ya que en el caso del puerto de Gijón, puede llegar a ser el proceso de transformación que impere dentro de las dársenas. Por lo tanto, se establece la utilización de un modelo que contemple la interacción onda-obstáculo. Por ello se ha utilizado el modelo MSP2D-SP desarrollado por IH Cantabria.

El modelo MSP resuelve la forma elíptica de la ecuación de la pendiente suave, empleando para ello un esquema de elementos finitos. El modelo incorpora la posibilidad de describir con detalle la reflexión en cada uno de los contornos e incorpora el efecto de la difracción, refracción, asomeramiento, rotura y disipación por fondo. El potencial que ofrece el modelo radica en la capacidad de analizar el efecto de la reflexión múltiple/parcial de un tren de olas en el interior del puerto, incluyendo todos los patrones de difracción producidos por los distintos muelles, espigones y diques.

El modelo trabaja con una malla adaptativa en elementos finitos triangulares no regulares. La malla permite optimizar los recursos que el modelo MSP requiere (memoria CPU), ya que los nodos y elementos de la malla en elementos finitos a ser generada, se adaptan a los contornos geométricos del puerto y a las cotas batimétricas correspondientes, concentrando de esta forma un mayor número de elementos para las zonas más someras del dominio y relajando la malla para las zonas más profundas.

Es importante asegurarse que la malla generada permita evaluar de forma adecuada el mínimo periodo de onda. Por otro lado, debe crearse un contorno abierto semicircular para el tratamiento especial de los contornos abiertos, y entrarán, como input del modelo, los coeficientes de reflexión, que deberán variar de una zona a otra de los contornos.

El coste computacional y la complejidad del proceso de elaboración y ejecución de la malla de propagación en una zona con una extensión igual al Puerto de Gijón son muy grandes. Es por ello que la malla de propagación utilizada forma parte del proyecto

SAMOA (Sistemas de Apoyo Meteorológico y Oceanográfico a las Autoridades Portuarias), un proyecto que desarrolla una metodología numérica para la predicción operacional de la agitación en una serie de puertos a lo largo del litoral español, entre los que se encuentra el Puerto de Gijón.

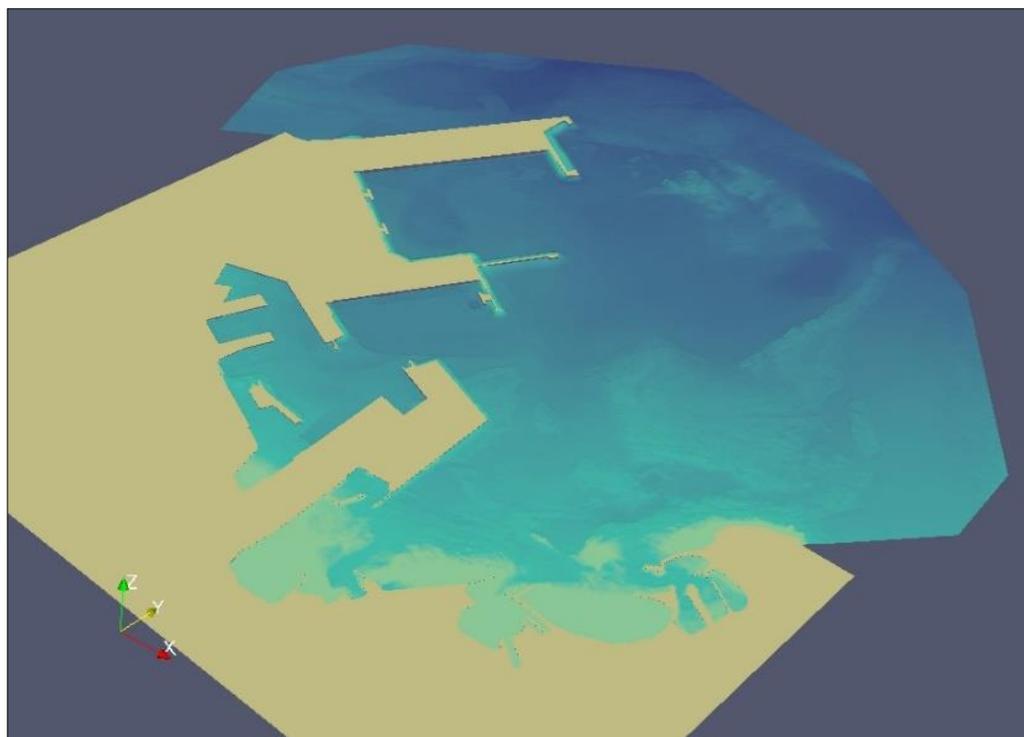


Figura 46 - Malla computacional MSP (Proyecto SAMOA)

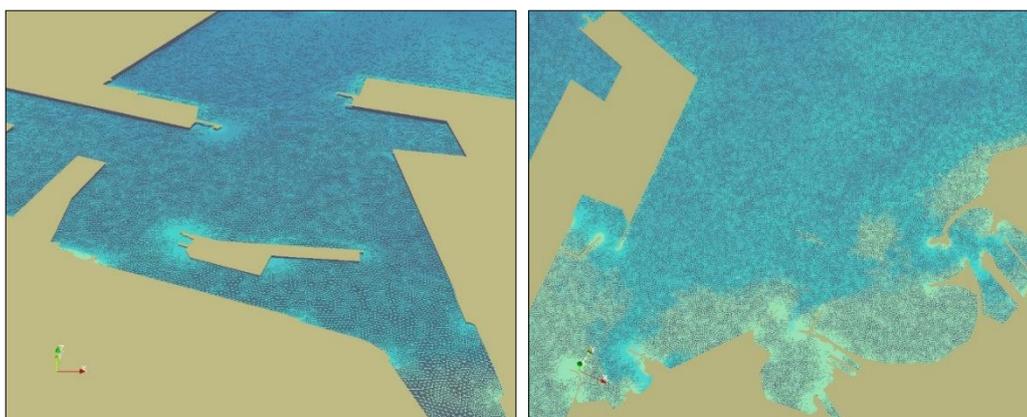


Figura 47 - Zoom malla computacional MSP (Proyecto SAMOA)

Una vez definida la malla computacional se propaga hasta el interior del puerto una serie de casos monocromáticos, considerando tres niveles de marea (bajamar = 0 m, pleamar = 5 m y super – pleamar = 7 m). A partir de los monocromáticos se realiza una reconstrucción energética tomando como espectro de forzamiento la serie DOW del intervalo de tiempo del temporal en la corona de la malla.

Como variables de salida del modelo se tienen las alturas de ola en el interior del puerto en todos los nodos de la malla, siendo posible el cálculo del caudal de rebase en la costa.

c. Obtención alturas de ola

Cada IZ costera ha sido alimentada con una serie temporal de doce caudales de rebase, que dependen del francobordo y de la altura de ola a pie de la estructura.

Se ha establecido un conjunto de áreas a lo largo de la línea costera del puerto con el fin de obtener la serie de alturas de ola significativa media a asignar a cada IZ para posteriormente calcular el caudal de rebase. El tamaño del área es importante puesto que definirá la altura de ola representativa de la zona. Se ha tomado un tamaño medio de área igual a 300 x 30 metros. La largura de 300 metros toma como referencia la eslora de un buque mercante y la anchura de 30 metros permite abarcar el número suficiente de nodos para que el resultado sea representativo (entre 3 y 5 filas de nodos).

Puntos contenidos dentro de una malla

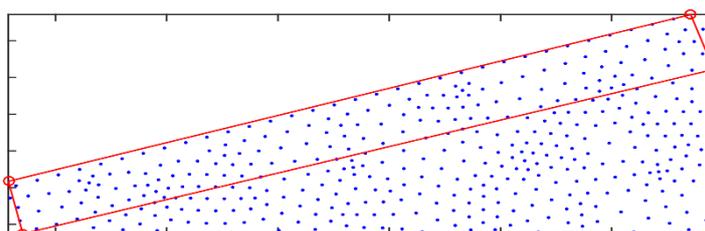


Figura 48 - Puntos comprendidos dentro de un área (Fuente propia)

En la figura 49 se encuentran representadas la malla y las áreas utilizadas para la obtención de los resultados. La malla recoge todo el puerto de Gijón a excepción del dique de Aboño y del dique Torres y al ser ésta una malla realizada dentro del marco de otro proyecto, el oleaje que alimenta estos dos diques se ha propagado desde los puntos DOW representados en verde, utilizando la formulación de Snell y asumiendo una batimetría recta y paralela. Por último, se asigna a cada *Impact Zone* el oleaje del área más cercana.



Figura 49 - Contorno de la malla y áreas de generación de resultados (Fuente propia)

Propagación de oleaje hasta los diques de Aboño y Torres asumiendo batimetría recta y paralela

Para la propagación se va a considerar que los diques de Aboño y Torres se encuentran en profundidades reducidas y los puntos DOW en profundidades intermedias.

La altura de ola propagada es igual a la altura de ola incidente multiplicada por los coeficientes de asomeramiento y de refracción:

$$H_2 = H_1 \cdot K_{sh} \cdot K_R$$

H_2 – Altura de ola propagada

H_1 – Altura de ola inicial

K_{sh} – Coeficiente de asomeramiento

K_R – Coeficiente de refracción

Basándonos en la teoría sinusoidal del oleaje, con la conservación del flujo de energía, y en la ley de Snell, asumiendo batimetría recta y paralela, para la obtención de los coeficientes, la expresión de propagación del oleaje queda:

$$H_2 = H_1 \sqrt{\frac{C_{g1}}{C_{g2}}} \sqrt{\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}}$$

C_{g1} – Velocidad de grupo del oleaje inicial

C_{g2} – Velocidad de grupo del oleaje propagado

$\cos\theta_1$ – Dirección del oleaje inicial $\cos\theta_2$ – Dirección del oleaje propagado

Ley de Snell y conservación del flujo de energía:

$$\frac{\sin\theta_1}{C_1} = \frac{\sin\theta_2}{C_2} = \text{constante}$$

Velocidad de grupo en profundidades intermedias: $C_{g1} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sin 2kh} \right) C_1$

Velocidad de grupo en profundidades reducidas: $C_{g2} = \sqrt{gh}$

k – Número de onda

h – Profundidad

V. Generación de resultados

De esta manera, propagando (desde el punto DOW) con el modelo MSP las doce horas de temporal de febrero de 2014 se obtiene el oleaje a pie de dique. Mediante la formulación del caudal de rebase se obtiene el volumen de descarga que el RFSM-EDA utiliza como input para inundar las IZs costeras, que cuando se llenan descargan el agua excedente a las IZs vecina, produciendo la mancha de inundación.

Después del temporal de febrero de 2014 IH Cantabria realizó una campaña de campo para evaluar los daños en la costa asturiana, en la que se midió la extensión de la mancha de inundación alcanzada, se tomaron fotos y vídeos y se crearon bases de datos e inventarios (Losada et al., 2016). En el Musel, cuyos diques son no rebasables, la campaña de campo se centró solamente en el inventario, que recoge daños en el dique de Aboño.

Se presentan al final de la metodología y para cada escenario planteado los mapas de inundación, resultado de la simulación de inundación realizada con el modelo RFSM-EDA.

Los mapas deben ser interpretados teniendo en cuenta el funcionamiento y las limitaciones del modelo RFSM-EDA. Debido a la importancia de calibración y validación de los modelos numéricos se han realizado a partir de los datos de la campaña de campo las calibraciones pertinentes, enfocadas principalmente a optimizar el modo de desagüe del modelo, que se tratará de explicar un poco más adelante.

Gracias a la campaña de campo y al inventario de daños se han podido validar los resultados del escenario base, viendo que efectivamente se corresponden con lo que tuvo lugar en 2014.

Discusión de los mapas de inundación

En la figura 50, que muestra el mapa de inundación del Escenario Base, se distinguen varias manchas de inundación, siendo las más significativas las pertenecientes al dique de Aboño, al muelle Marcelino León y a los diques de la Osa y Torres.

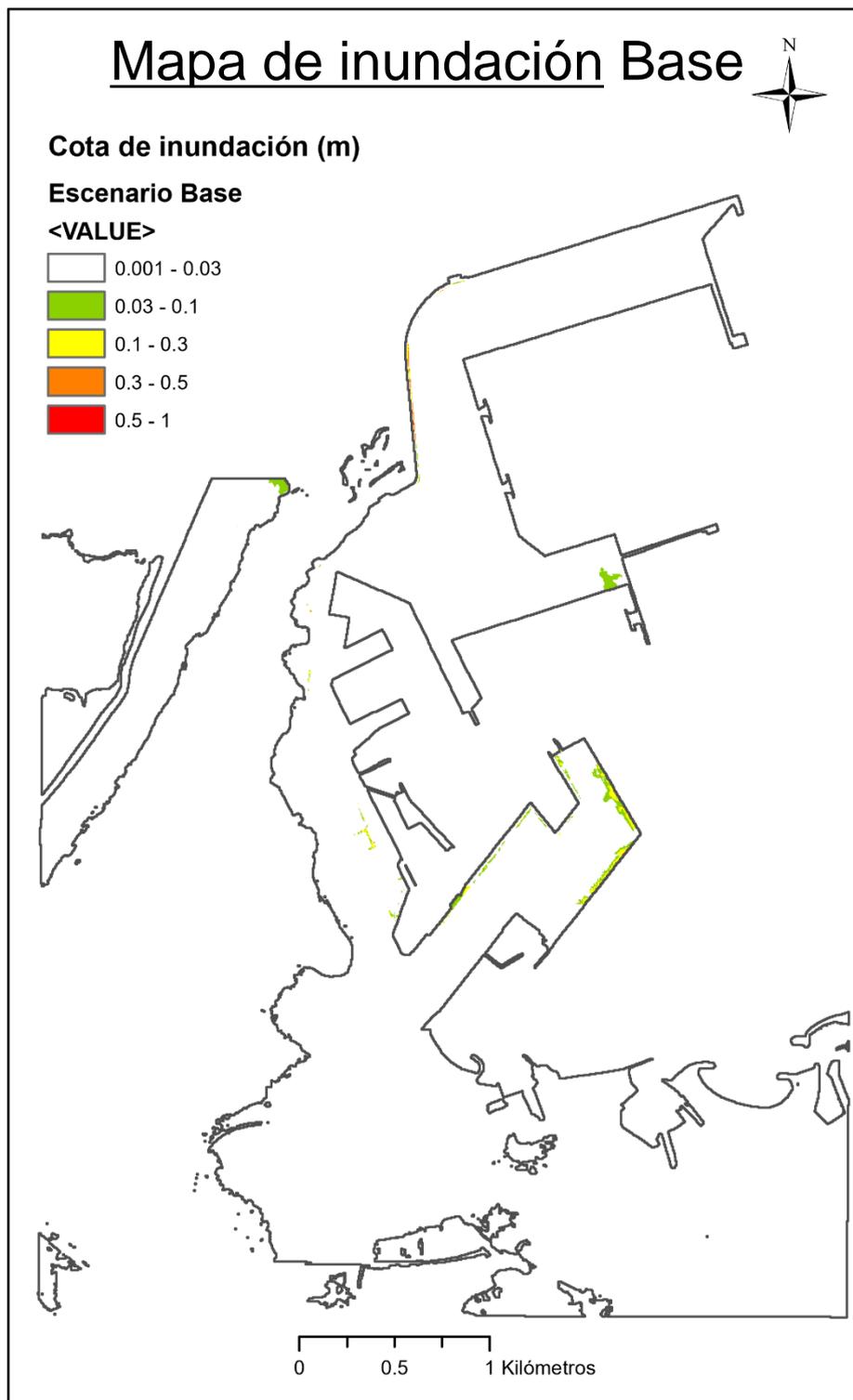


Figura 50 - Mapa de inundación Escenario Base (Fuente propia)

El temporal provocó daños registrados en el dique de Aboño, por tanto es coherente que exista mancha de inundación en la explanada. Sin embargo, los muelles Marcelino León y de la Osa son zonas protegidas, donde no se cuestiona la función de protección de las infraestructuras como causa del agua en el puerto debido a su carácter no rebasable.

La protección del puerto del oleaje exterior se puede ver reflejada en el mapa de isoalturas de ola de la figura 51 (se ha tomado el mapa de las 5 de la mañana, la hora punta). La altura de las olas que impactan contra los muelles es pequeña en comparación con otras zonas del puerto, el muelle se encuentra a una cota aproximada de 5 metros y el nivel del mar alcanza una cota máxima de 2.5 metros. Estas dinámicas generan en los muelles un caudal de rebase pequeño, por lo que no es admisible una mancha de inundación en los muelles debido al rebase u *overtopping* de los diques.

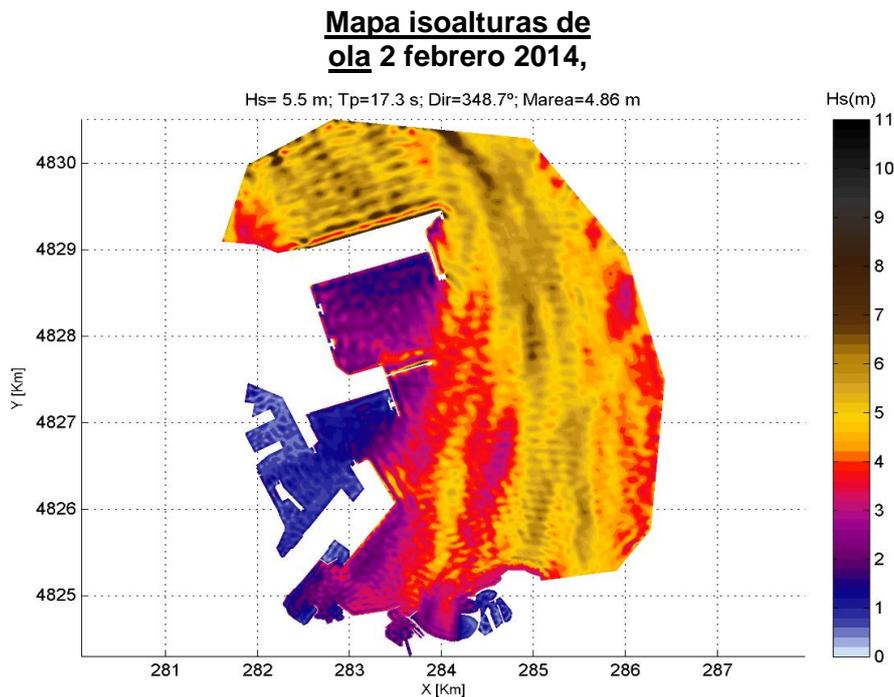


Figura 51 - Mapa isoalturas de ola 2 febrero 2014, 5:00 am

La justificación del agua en los muelles viene dada por la propia definición del concepto de caudal de rebase. El rebase es el transporte de una cantidad de agua sobre la coronación de una estructura. Este transporte se puede producir en forma de rebase de la masa de agua, debido a una cota de coronación por debajo del ascenso del oleaje, a la caída de masa de agua derivada del flujo vertical de impacto contra la estructura o a la salpicaduras de agua-espuma arrastradas por el viento hacia la zona protegida (*splash*) (NU. CEPAL et al., 2012). En aguas someras la velocidad de la ola es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad, y la parte baja de la ola avanza a una velocidad menor que la cresta de la ola debido a la pérdida de inercia por el rozamiento con el fondo. La mayor parte del frente de la ola adquiere una posición vertical, generándose un chorro de agua en la parte superior que envolviendo una masa de aire se precipita contra la base de la ola, originando una salpicadura.

Esta salpicadura en condiciones reales no supone ninguna mancha de inundación, pero el modelo numérico funciona de la siguiente manera cuando se encuentra con una superficie llana, como un muelle:

En el momento en que una gota de agua cae en una de estas planicies, donde los puntos de acumulación y de comunicación tienen la misma cota en todas las *Impact Zones*, ésta se propaga formando una gran mancha de inundación pero con una cota de agua muy pequeña. De esta manera, el modelo provoca que una pequeña salpicadura en uno de los muelles genere una amplia mancha de inundación.

La mancha de inundación que se acumula en el Dique de la Osa, y en las zonas más interiores del puerto son debidas a importante presencia de escollera, que pese haber sido recortada en la preparación del MDT no pudo ser limpiada del todo, provocando una notable mancha de inundación ya que el modelo toma como cota de coronación del dique una cota baja de la escollera.



Figura 52 - Zoom de la escollera del Dique de la Osa (Fuente propia)

Como se puede ver en las figuras 53, 54, 55, 56 y 57, correspondientes a progresivos escenarios de cambio climático, las manchas de inundación observadas en el mapa de inundación del Escenario Base (figura 50) van creciendo, siendo las evoluciones de la mancha en la explanada de Aboño y en el muelle Norte las más llamativas.

Comparando los mapas de inundación de los escenarios 1 y 2 (aumento del nivel medio del mar) con los escenarios 3 y 4 (aumento del nivel medio del mar y aumento de la altura de ola) se puede ver el efecto del *splash* anteriormente introducido. Mayores alturas de ola rompen antes y provocan mayor cantidad de salpicadura en el puerto.

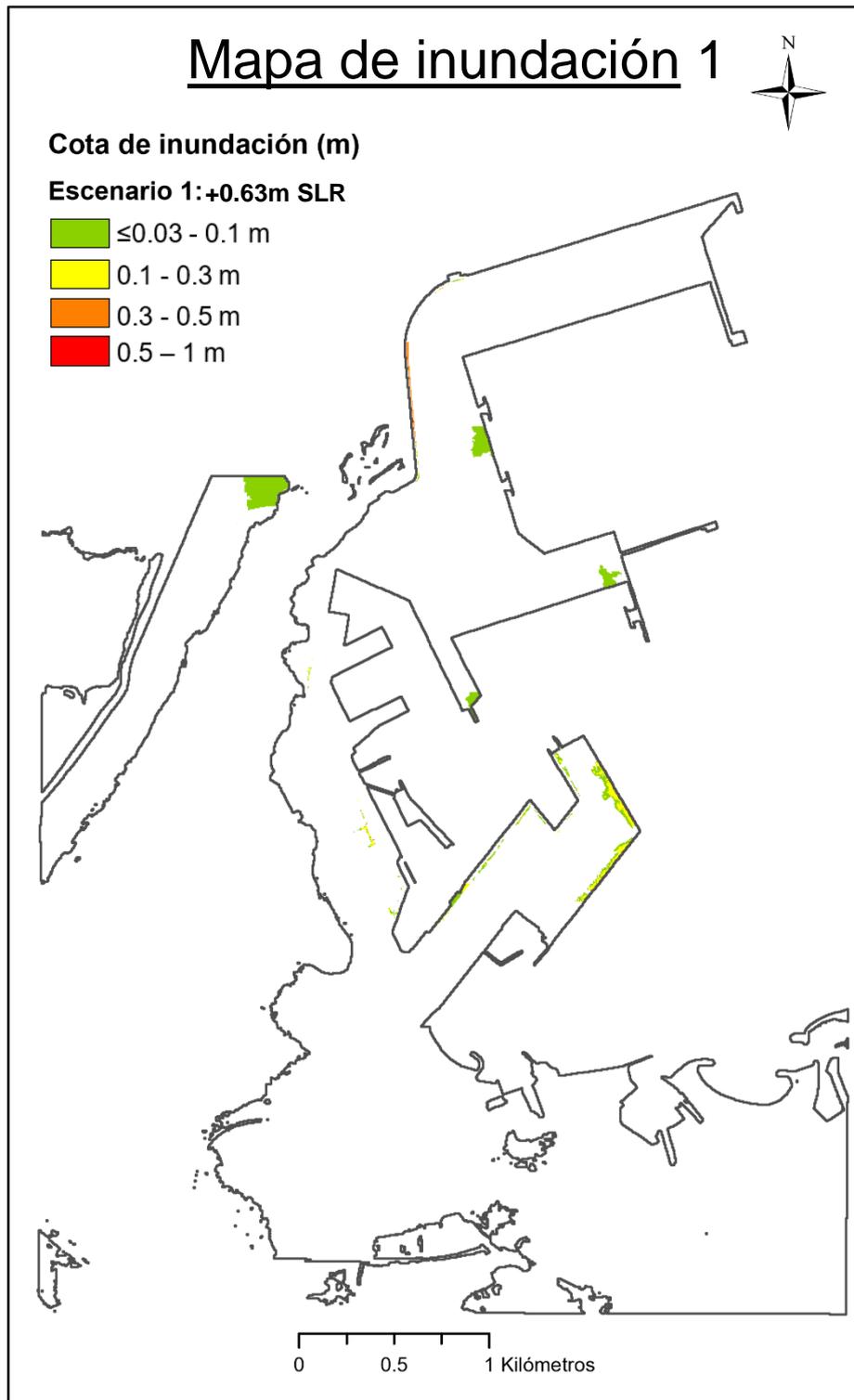


Figura 53 - Mapa de inundación Escenario 1 (Fuente propia)

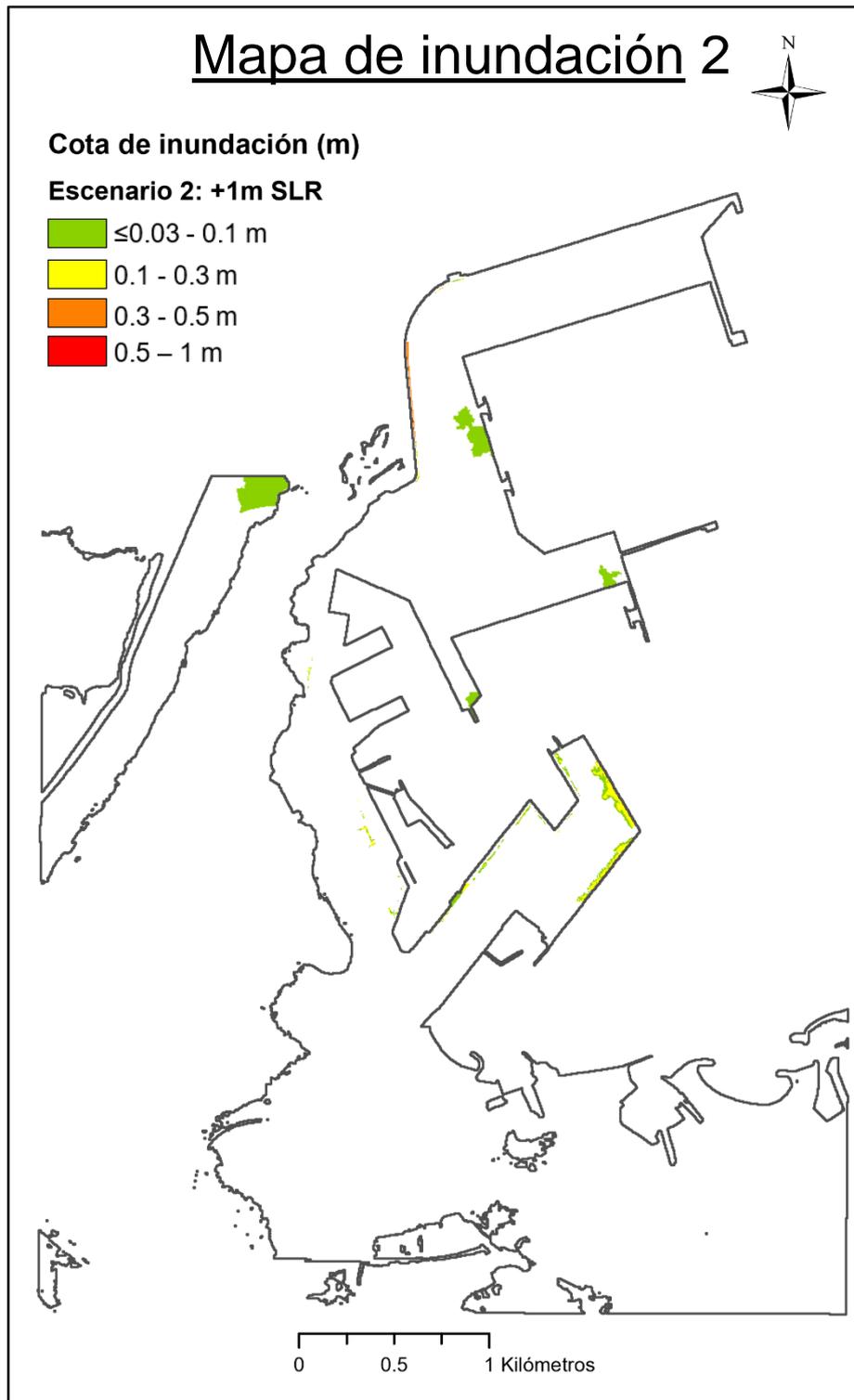


Figura 54 - Mapa de inundación Escenario 2 (Fuente propia)

Comienzan los resultados de inundación de los escenarios más extremos, incluyendo aumento de la altura de ola, gran aumento del nivel medio del mar o lluvia torrencial.

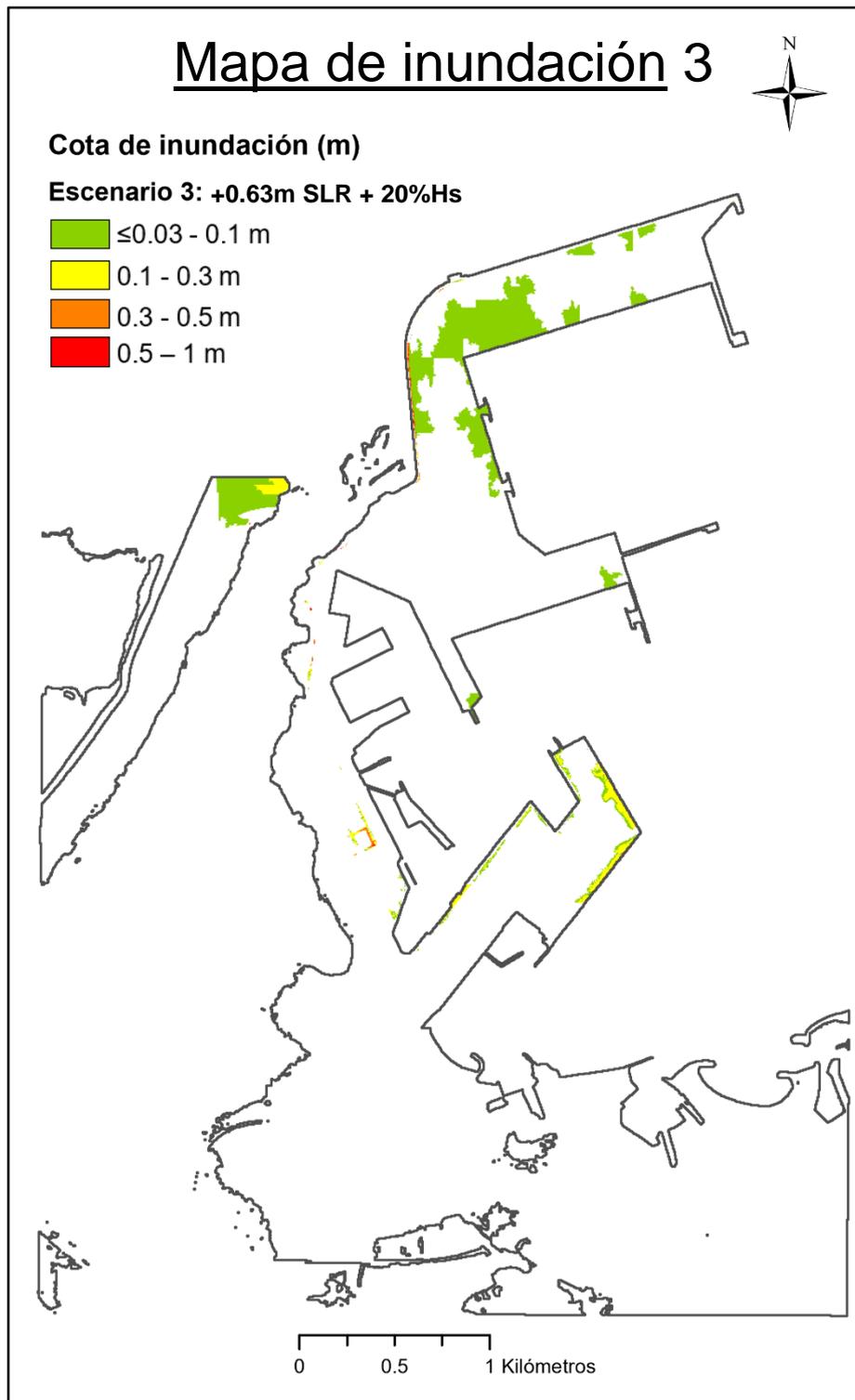


Figura 55 - Mapa de inundación Escenario 3 (Fuente propia)

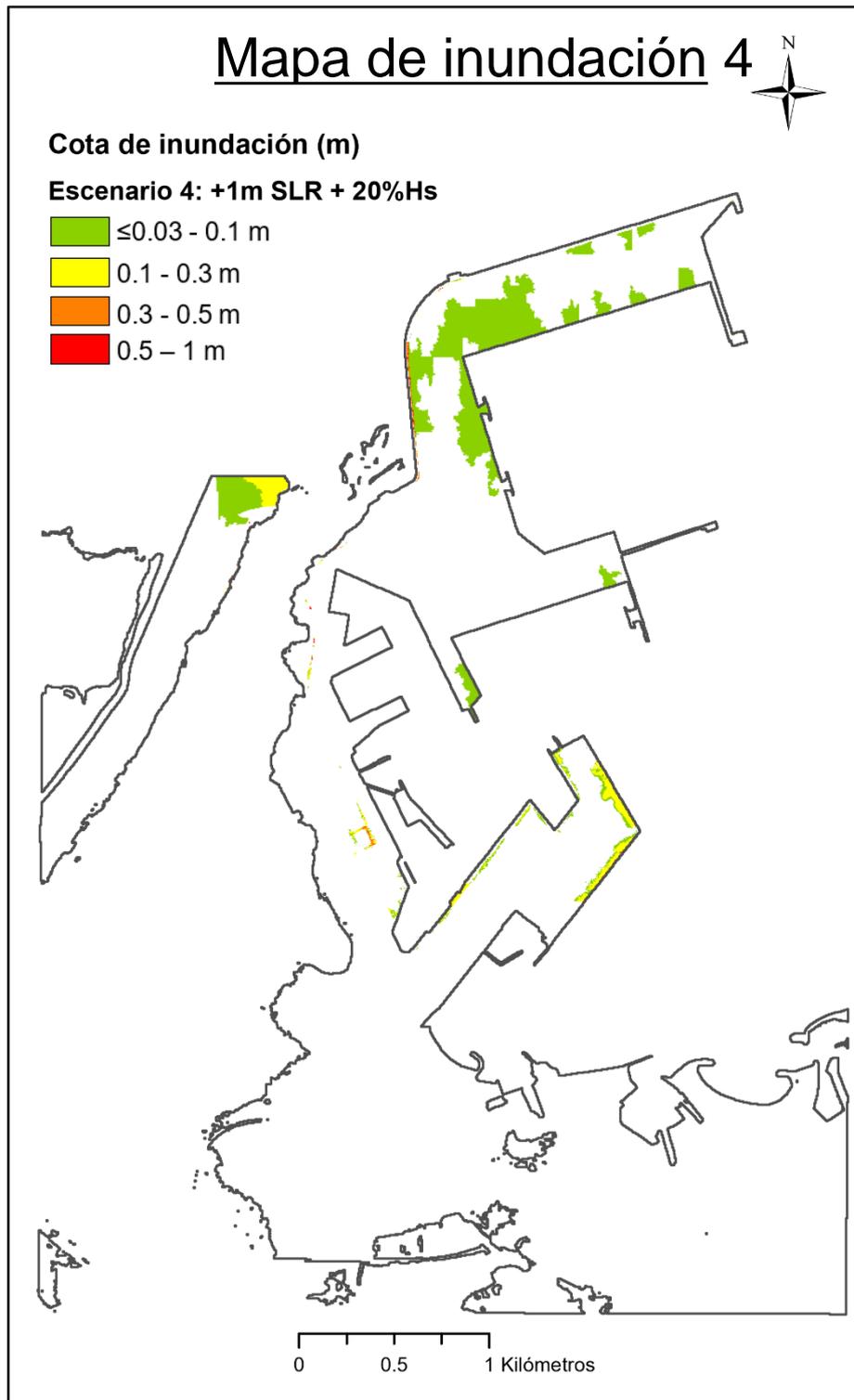


Figura 56 - Mapa de inundación Escenario 4 (Fuente propia)

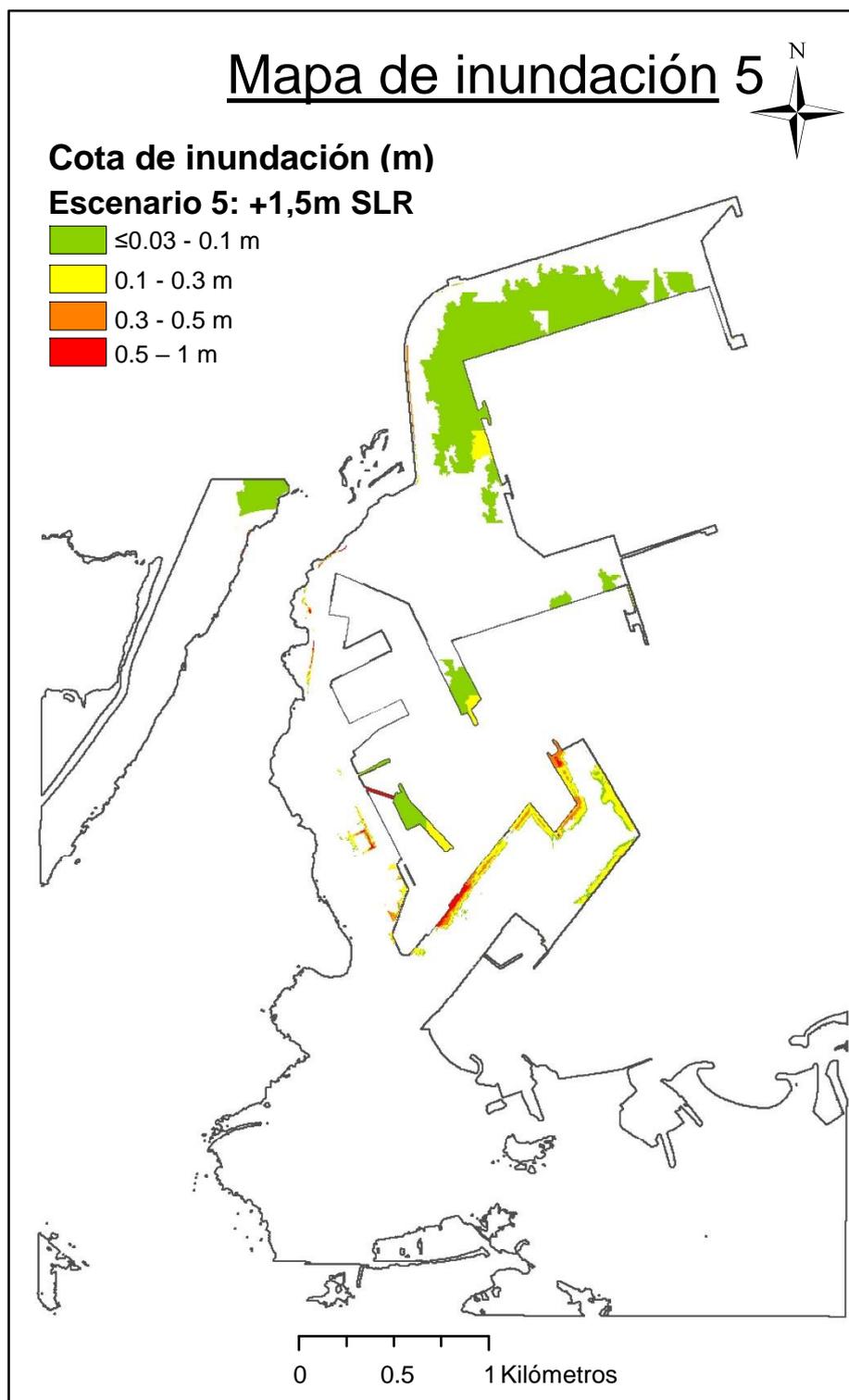


Figura 57 - Mapa de inundación Escenario 5 (Fuente propia)

En la figura 58, correspondiente al mapa de inundación del Escenario 6 (aumento del nivel medio del mar, aumento de la altura de ola y lluvia torrencial), se puede ver la manera de desaguar agua del modelo. A efectos del modelo RFSM-EDA la lluvia es una descarga de un caudal uniforme en todo el puerto. Al carecer la mayoría de las *Impact Zones* de un desagüe (es decir, todas las IZ que no forman parte de la línea de costa del puerto), el agua se acumula en ellas en las celdas con cotas más bajas.

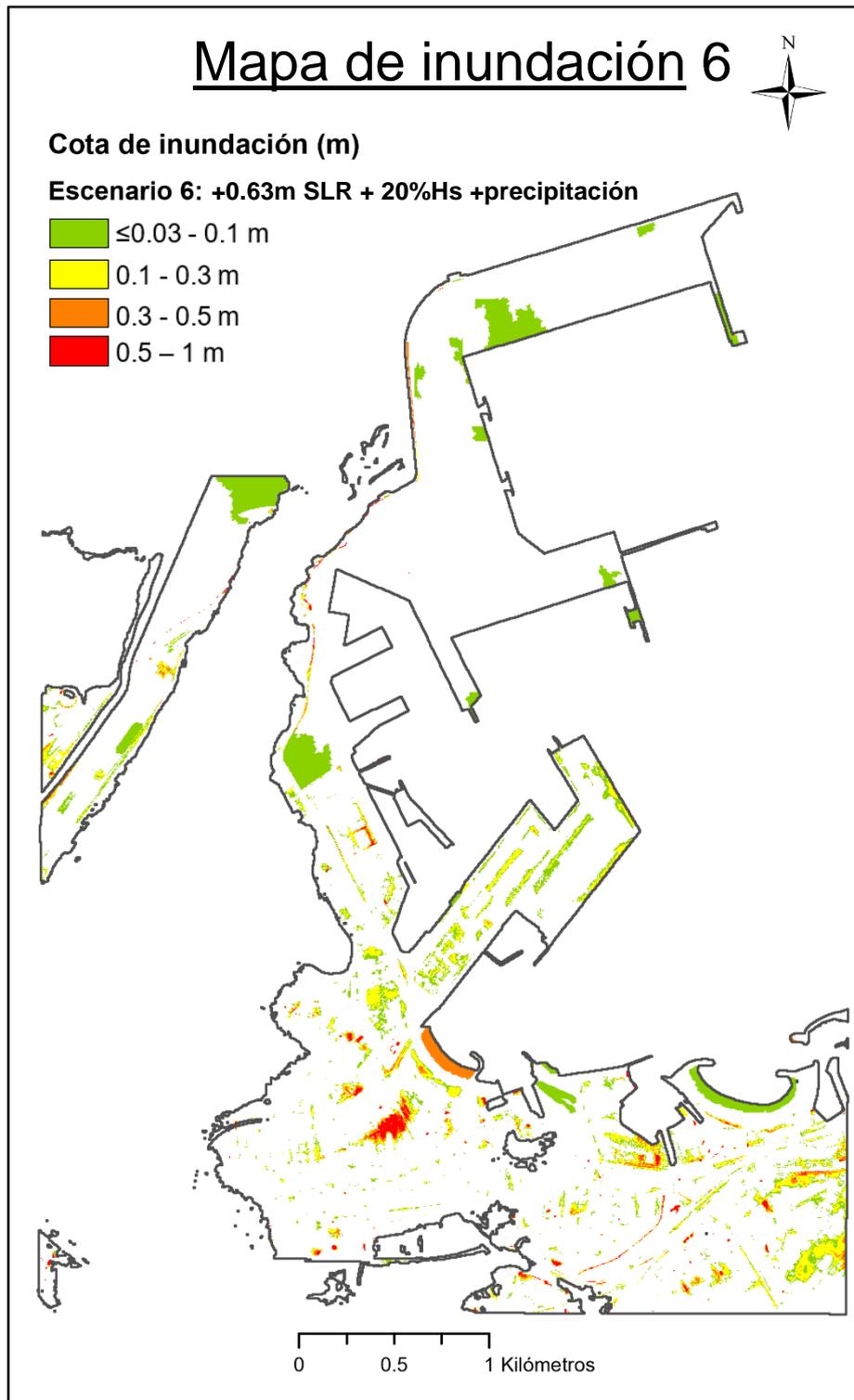


Figura 58 - Mapa de inundación Escenario 6 (Fuente propia)

7.2 Operatividad

El Puerto de Gijón debe garantizar, mediante las obras marítimas que lo componen, unos niveles mínimos de operatividad a las embarcaciones y a las instalaciones y equipos a los que da soporte.

La funcionalidad de las obras marítimas en los puertos tiene una doble función. Por un lado, generan un área abrigada con un sistema de obras e infraestructuras (muelles, dársenas, etc.) que posibilitan las actividades portuarias, que no podrían llevarse a cabo de otro modo. Por otro lado, otras obras (diques y contradiques) tienen como objetivo fundamental la defensa frente al oleaje incidente, de forma que protegen el área en el trasdós de la obra del efecto del oleaje (NU. CEPAL et al., 2012).

La determinación del nivel de operatividad del puerto se ha realizado en base al estudio del régimen medio y se ha tenido en cuenta la doble funcionalidad de las estructuras. Por una parte, se ha realizado un estudio de la agitación interior, asociada a la altura de ola, para conocer la operatividad en el interior del puerto. Por otra parte, se ha estimado el *overtopping* o caudal de rebase de los diques para cuantificar el nivel de protección que ejercen los mismos.

La importancia de realizar un estudio sobre el *overtopping* de las estructuras radica en el daño físico que puede producir a personas que trabajen en la zona abrigada o el daño provocado a vehículos e instalaciones, además de provocar transmisiones de oleaje indeseadas.

Los resultados de los estudios de agitación y *overtopping* permiten la obtención de las horas de inoperatividad anual del Puerto de Gijón y la visualización gráfica de las zonas operativas o no operativas en función del escenario de cambio climático planteado.

En la figura 59 se representan las zonas donde se va a realizar el estudio de agitación y se enumeran los diques donde se va a medir el caudal de rebase.

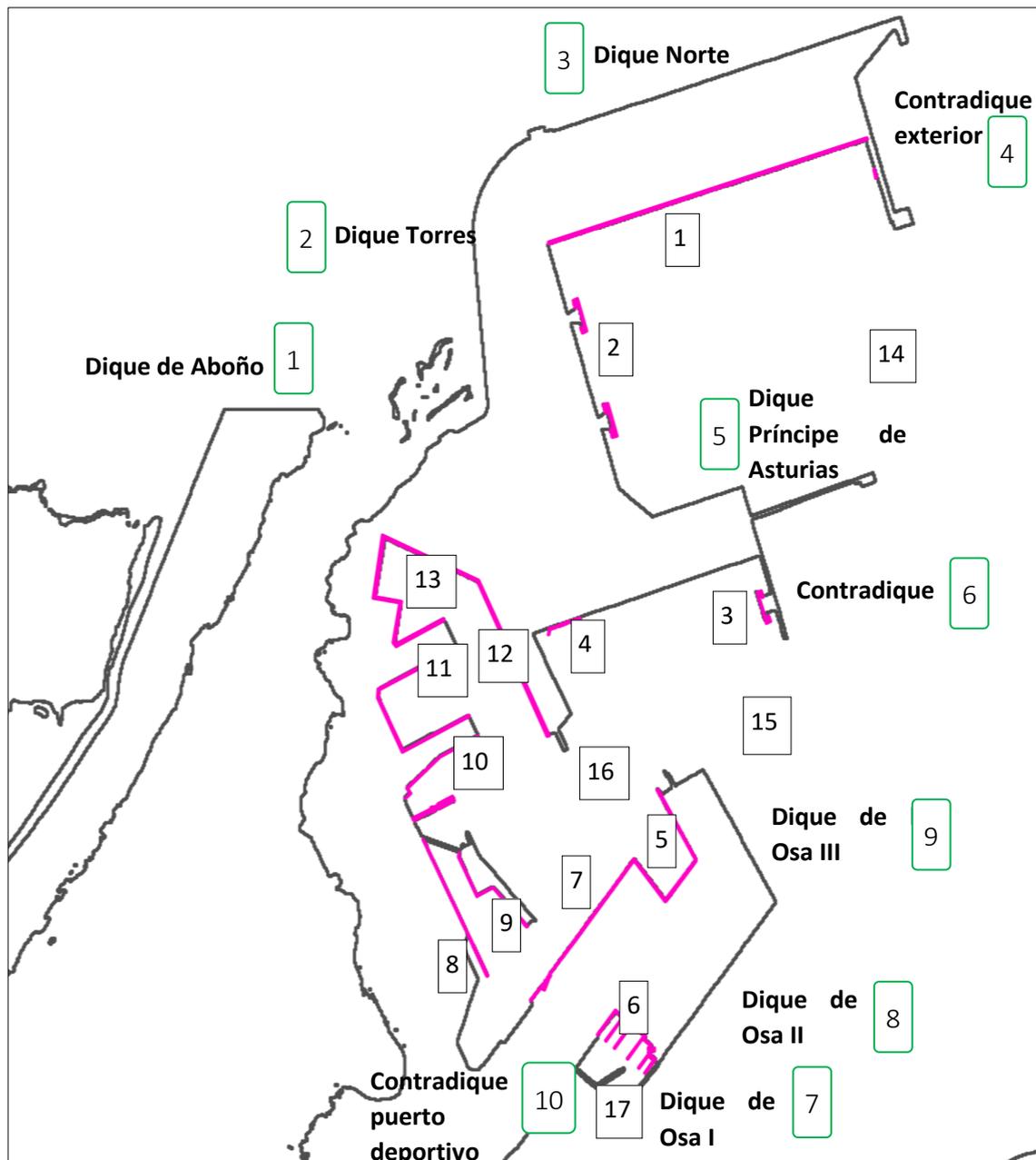


Figura 59 - Zonificación para el estudio de operatividad (Fuente propia)

7.1.3 Propuesta metodológica para el estudio de la agitación interior

I. Reconstrucción del clima marítimo

La caracterización del régimen medio se ha realizado a partir de la reconstrucción de series horarias de 60 años de oleaje, utilizando las bases de datos de IH Cantabria DOW, GOS y GOT en el mismo punto de reanálisis que en la metodología de inundación.

Con el fin de reducir el gran esfuerzo computacional que supone la propagación de todos los estados de mar, se aplica la metodología de autoselección, propagación y reconstrucción de estados de mar propuesta por Camus et al. (2011), que se desarrolla a continuación.

Definición de los escenarios

Los escenarios de cambio climático planteados para el estudio de agitación son:

- Escenario Base: clima marítimo en el interior del puerto.
- Escenario 1: aumento del nivel medio del mar estimado por Slangen 8.5, igual a 0,63 metros.
- Escenario 2: aumento del nivel medio del mar de 1 metro.
- Escenario 3: aumento del nivel medio del mar estimado por Slangen 8.5 y un aumento de la altura de ola significativa de un 20%.
- Escenario 4: aumento del nivel medio del mar de 1 metro y aumento de la altura de ola significativa en un 20%.

Selección y propagación de los casos

La serie horaria de 60 años de oleaje se reemplaza por un número reducido de estados de mar (200 en este trabajo), seleccionados por el algoritmo MDA (*Maximum Dissimilarity Algorithm*). Este algoritmo permite identificar aquellos estados de mar que representan el comportamiento medio y extremal del oleaje en cualquier punto, dando como resultado una selección de casos representativa de todo el conjunto de estados de mar.

Se propagan con el MSP los casos seleccionados para los tres niveles de marea (bajamar = 0 m, pleamar = 5 m y super-pleamar = 7m) y se obtienen los coeficientes de propagación.

La figura 60 es un mapa de agitación obtenido del MSP en el que se ha propagado una serie unitaria de alturas de ola con el fin de visualizar directamente el valor de los coeficientes de propagación del oleaje en el Puerto de Gijón. En ella se pueden observar los efectos de la difracción, refracción, asomeramiento, rotura y disipación por fondo sufridos por el oleaje. Se ve claramente la interacción del oleaje con las infraestructuras y la protección ofrecida por el puerto, disminuyendo la altura de ola en las zonas más interiores en más de un 90% respecto de la altura de ola en la bocana. También se reflejan perfectamente los efectos de la difracción en los extremos de los diques y contradiques.

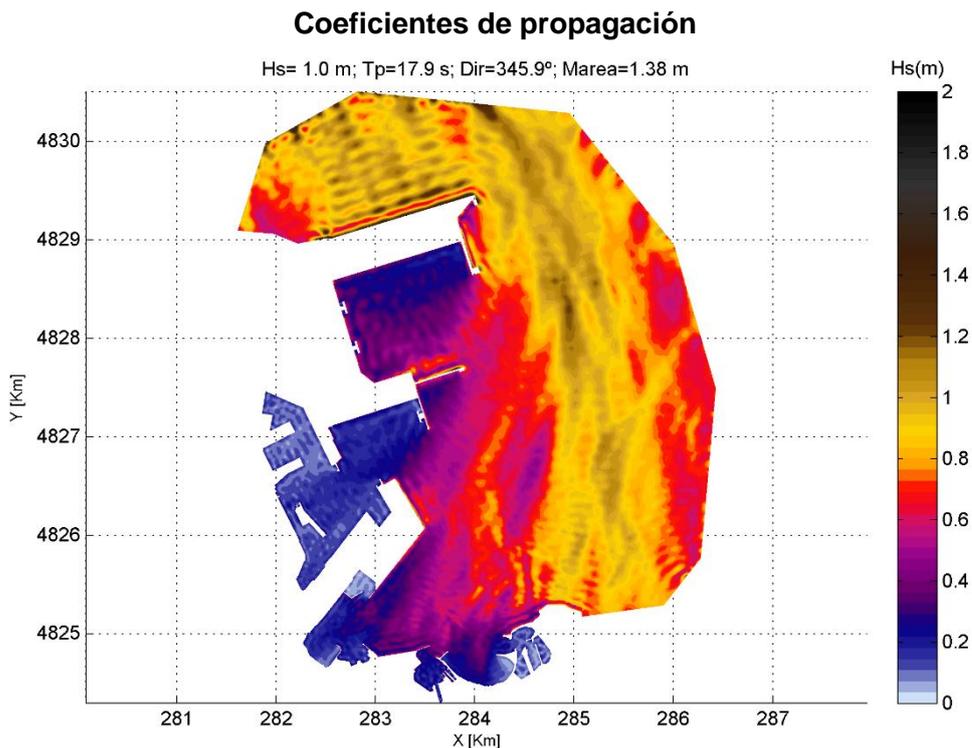


Figura 60 - Coeficientes de propagación en el Puerto de Gijón

Interpolación y reconstrucción

Se interpola el coeficiente de propagación para cada uno de los estados de mar registrados en el punto DOW, realizando una interpolación lineal en tres dimensiones (H_s , T_p , Dir) para cada nivel de marea.

El resultado es la reconstrucción del clima marítimo en el Puerto de Gijón. Ahora sí es posible realizar el estudio de agitación, al disponer de una serie horaria de estados de mar durante 60 años en el interior del puerto.

II. Determinación del nivel de operatividad

Para la determinación de la probabilidad de inoperatividad del puerto es necesario establecer los condicionantes límites de operación de los buques, tanto en los muelles como en las bocanas. Para el presente estudio se han utilizado las recomendaciones para obras marítimas empleadas en España. La ROM 3.1-99 establece los condicionantes límites de operación de buques en muelles y los tiempos de inoperatividad máximos aceptables.

En la tabla 8 se resumen las condiciones límites de operación para la altura de ola y los tiempos de inoperatividad aceptables utilizadas para la determinación de la probabilidad de inoperatividad de las zonas del puerto.

Área	Características del área	Altura de ola Hs Límite	Tiempos de inoperatividad en horas
1	Carga y descarga graneleros	1	500 h. año
2	Carga y descarga petroleros	2	500 h. año
3	Carga y descarga petroleros	2	500 h. año
4	Carga y descarga graneleros	1	500 h. año
5	Carga y descarga mercantes de carga general	1	200 h. año
6	Permanencia embarcaciones deportivas en muelle	0,4	40 h. año
7	Carga y descarga mercantes de carga general	1	200 h. año
8	Carga y descarga pesqueros de altura	1	40 h. año
9	Carga y descarga pesqueros de altura	1	40 h. año
10	Carga y descarga transportadores de Gases Licuados	1,2	500 h. año
11	Carga y descarga transportadores de Gases Licuados	1,2	500 h. año
12	Carga y descarga graneleros	1	500 h. año
13	Carga y descarga graneleros	1	500 h. año
14	Bocana	3	600 h. año
15	Bocana	3	200 h. año
16	Bocana	3	200 h. año
17	Bocana	3	200 h. año

Tabla 8 - Condiciones límites de operación y tiempos máximos de inoperatividad (Adaptación Tabla 8.1 de la ROM 3.1-99)

Estudio estadístico del régimen medio

El tiempo de inoperatividad (en horas al año) de un puerto es el número de veces que las condiciones de oleaje superan los umbrales límites de operación.

Para obtener la probabilidad de inoperatividad del régimen medio se ha determinado la función de distribución acumulada (CDF) de cada zona. De esta manera se tiene representada la probabilidad acumulada asociada con la distribución de las alturas de ola de la serie horaria de 60 años.

Para la representación de la CDF se ha empleado el módulo de Estadística Descriptiva de AMEVA (Análisis Matemático y Estadístico de Variables Ambientales). AMEVA es un software formado por un conjunto de funciones, que integra las diversas metodologías de análisis estadístico implementadas por los investigadores de IH Cantabria con el objeto de estudiar y caracterizar variables medioambientales.

De esta manera, introduciendo en AMEVA el valor de las alturas de ola del régimen medio podemos representar directamente su función de distribución acumulada para los distintos escenarios de cambio climático planteados, como se ilustra en la figura 61. La línea vertical roja es el umbral de altura de ola que le corresponde a la zona, el condicionante límite de operación.

La intersección del umbral con la función de distribución es directamente la probabilidad de que las alturas de ola del régimen medio sea menor que el umbral.

$$F(\text{umbral}) = P(Hs \leq \text{umbral})$$

El tiempo de inoperatividad sería la probabilidad de excedencia del umbral:

$$\text{tiempo inoperatividad} = 1 - P(Hs \leq \text{umbral})$$

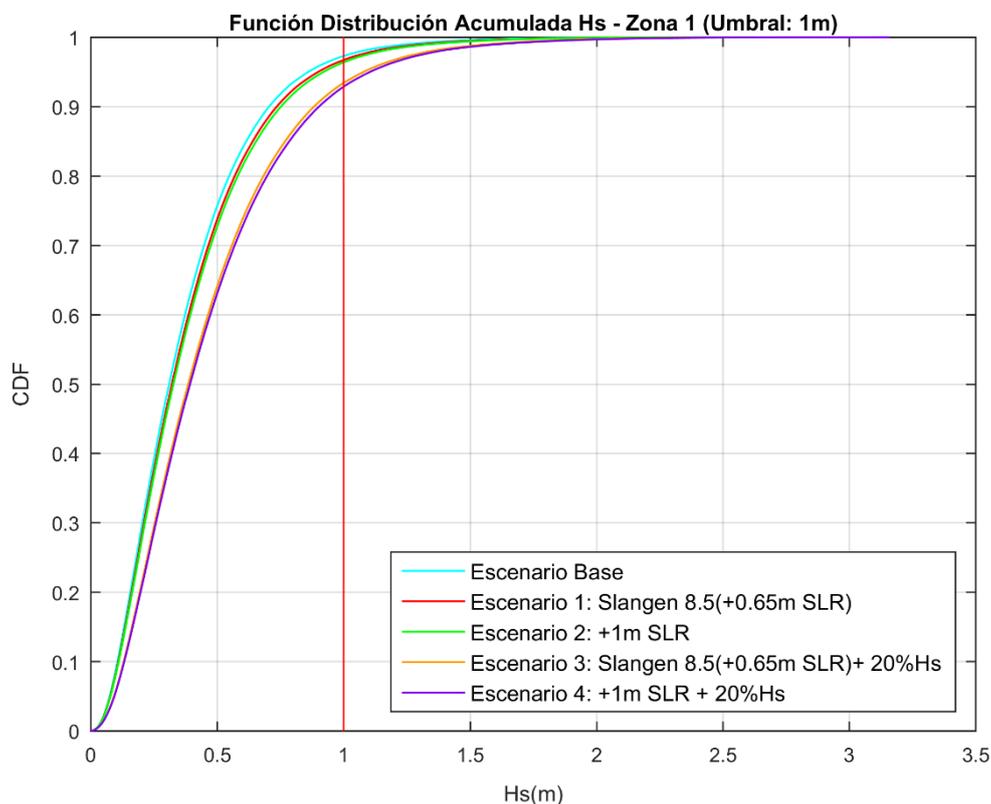


Figura 61 - Función de Distribución Acumulada de Hs

La tabla 9 recoge la probabilidad de que el Puerto de Gijón sea operativo en materia de agitación interior y las horas al año en que no es operativo, en base a los tiempos de inoperatividad anuales marcados por la ROM.

Área	Escenario Base		E1		E2		E3		E4	
	Prob	h/año	Prob	h/año	Prob	h/año	Prob	h/año	Prob	h/año
1	0,973	235,6	0,967	287,0	0,963	315,3	0,934	576,0	0,928	623,0
2	0,992	67,9	0,991	75,7	0,990	80,0	0,980	169,9	0,979	178,4
3	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
4	0,990	87,0	0,988	101,5	0,987	109,8	0,973	228,6	0,971	247,1
5	0,999	4,55	0,999	7,37	0,998	9,9	0,995	40,3	0,994	47,7
6	0,995	38,5	0,987	106,7	0,984	138,2	0,976	202,7	0,970	257,4
7	0,998	15,9	0,997	24,3	0,996	29,4	0,991	75,5	0,990	86,3
8	0,999	1,4	0,999	2,1	0,999	2,6	0,998	12,1	0,998	13,5
9	0,999	0,4	0,999	1,4	0,999	2,8	0,998	11,1	0,998	15,8
10	0,996	29,0	0,996	32,8	0,996	34,9	0,990	85,5	0,989	90,0
11	1	0	1	0	1	0	0,999	0,3	0,999	0,5
12	1	0	0,999	0,01	0,999	0,03	0,999	7,0	0,999	7,9
13	1	0	1	0	1	0	0,999	1,9	0,999	1,9
14	0,998	16,1	0,997	17,6	0,997	18,4	0,992	63,4	0,992	65,4
15	0,999	2,0	0,999	2,3	0,999	2,5	0,997	19,2	0,997	20,6
16	0,999	0,1	0,999	0,2	0,999	0,2	0,999	1,8	0,999	1,9
17	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Tabla 9 - Tiempos de inoperatividad por agitación interior en el puerto

7.1.4 Propuesta metodológica para el estudio del caudal de rebase

El estudio del *overtopping* o caudal de rebase del Puerto de Gijón se va a centrar en el rebase de los diques y contradiques principales, que fueron diseñados con carácter no rebasable y que permiten el tránsito de peatones y vehículos.

La estructura de la metodología propuesta para la evaluación del caudal de rebase es similar a la de agitación:

I. Reconstrucción del clima marítimo

Al tratarse de un estudio del régimen medio en el puerto es necesaria una reconstrucción del clima marítimo a pie de dique a partir de las series históricas situadas en el punto DOW. La reconstrucción a pie de dique se realiza siguiendo el mismo procedimiento utilizado para la reconstrucción de las dinámicas en el interior del puerto: metodología de autoselección, propagación y reconstrucción de estados de mar propuesta por Camus et al. (2011).

Definición de los escenarios

Los escenarios de cambio climático planteados para el estudio del caudal de rebase son:

- Escenario Base: clima marítimo en el interior del puerto.
- Escenario 1: aumento del nivel medio del mar estimado por Slangen 8.5, igual a 0,63 metros.
- Escenario 2: aumento del nivel medio del mar de 1 metro.
- Escenario 3: aumento del nivel medio del mar estimado por Slangen 8.5 y un aumento de la altura de ola significativa de un 20%.
- Escenario 4: aumento del nivel medio del mar de 1 metro y aumento de la altura de ola significativa en un 20%.

II. Cálculo del caudal de rebase

Una vez se dispone de las alturas de ola propagadas a pie de dique se puede calcular el caudal de rebase utilizando formulación semiempírica.

Caudal de rebase en los diques en talud:

Para los diques en talud (todos los analizados a excepción del dique Norte) se ha utilizado la formulación de Waal y van der Meer (1992). Estos autores utilizaron datos de Owen (1980) sobre taludes lisos, datos de Führbötter et al. (1989) y su propia base de datos para expresar el caudal medio de rebase adimensional, en función de la diferencia entre el run up y el francobordo, adimensionalizada con la altura de ola significativa.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m_0}^3}} = 8 \cdot 10^{-5} \cdot \exp\left(3.1 \frac{(R_{u2\%} - R_c)}{H_{m_0}}\right)$$

q – Caudal medio por unidad de longitud de dique (m³/s/m)

H_{m_0} – Altura de ola significativa (m)

R_c – Francobordo (diferencia entre la cota de coronación de la estructura y el nivel del mar) (m)

$R_{u2\%}$ – Ascenso sólo superado por el 2% de las olas del estado de mar (m)

Cálculo: $R_{u2\%}$

A partir de la formulación de Losada y Giménez-Curto (1981):

$$R_{u2\%} = H_{2\%} \cdot A_u \cdot (1 - e^{B_u I_{r0}})$$

- Valores de A_u, B_u para escollera clasificada:

$$A_u = 1.37$$

$$B_u = -0.6$$

- Número de Iribarren I_{r0}

$$I_{r0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_{m0}}{L_0}}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_{m0}}{\frac{g \cdot T_z^2}{2\pi}}}} = 6.022 \cdot H_{m0}^{-2}$$

$$\tan \alpha = \frac{2}{3}$$

$$T_z = \frac{T_p}{1.3} = \frac{9.4}{1.3} = 7.23$$

Se ha tomado como periodo de pico el correspondiente al cuantil 50% del régimen medio: $T_p = 9.4$

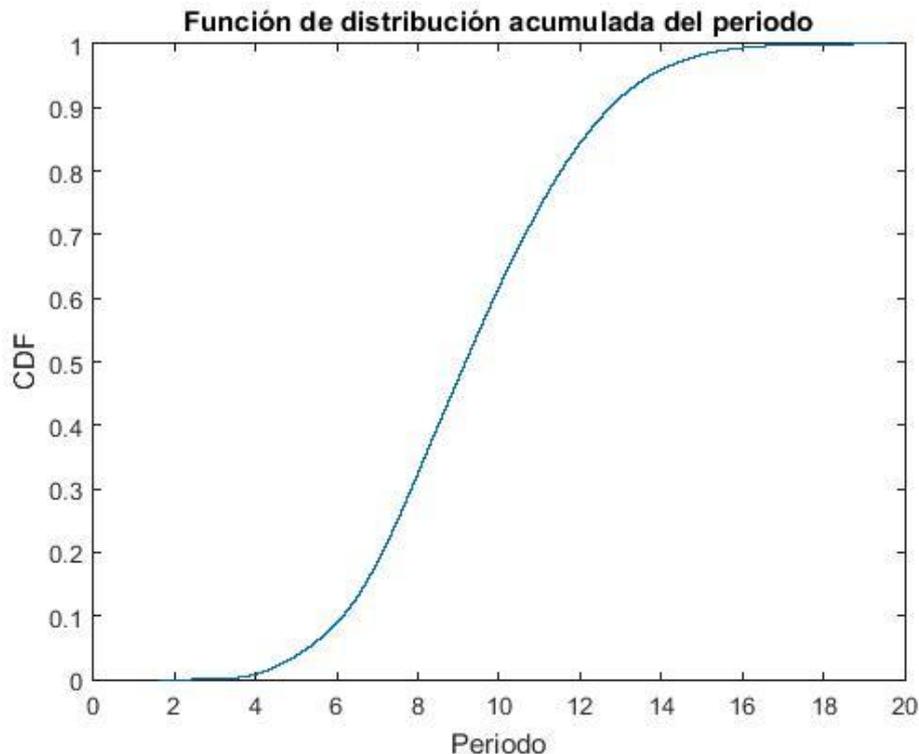


Figura 62 - CDF del régimen medio del periodo

- Simplificación de la formulación del $R_{u2\%}$ para la obtención de $H_{2\%}$: se asume una distribución Rayleigh como distribución de las alturas de ola del estado de mar:

$$\text{Prob}(H > H_{2\%}) = e^{-2\left(\frac{H_{2\%}}{H_{m0}}\right)^2} = 0.02$$

$$H_{2\%} = H_{m0} \sqrt{\frac{\text{Ln}(0.02)}{-2}} = 1.399 H_{m0}$$

$H_{2\%}$ – Altura de ola solamente superada el 2% de las veces

Resultando un valor de $R_{u2\%}$ igual a:

$$R_{u2\%} = 1.399H_{m_0} \cdot 1.37(1 - \exp(-0.6 \cdot 6.022 \cdot H_{m_0}^{-2}))$$

$R_{u2\%}$ – Run up solamente superado por el 2% de todo el registro de run up

Y una formulación del caudal de rebase igual a:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m_0}^3}} = 8 \cdot 10^{-5} \cdot \exp\left(3.1 \frac{(1.399H_{m_0} \cdot 1.37(1 - \exp(-0.6 \cdot 6.022 \cdot H_{m_0}^{-2})) - R_c)}{H_{m_0}}\right)$$

q – Caudal de rebase por unidad de longitud

R_c – Francobordo

Caudal de rebase en los diques verticales

En los diques verticales se ha considerado la formulación para la tipología de sección vertical de Franco et al. (1999), donde el caudal de rebase se puede expresar a partir de la fórmula obtenida:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m_0}^3}} = 0.082 \cdot \exp\left(-3 \frac{R_c}{H_{m_0}\gamma_f\gamma_\beta}\right)$$

Se ha tomado un valor igual a la unidad para los factores correctores de incidencia oblicua de las olas y de permeabilidad y rugosidad de la pendiente o no del talud.

III. Determinación del nivel de operatividad

En el estudio de agitación se utilizaban los condicionantes límites de operación de los buques para la determinación de la funcionalidad interior del puerto. Para la definición del umbral del caudal de rebase se ha utilizado la tabla de Franco et al. (1994).

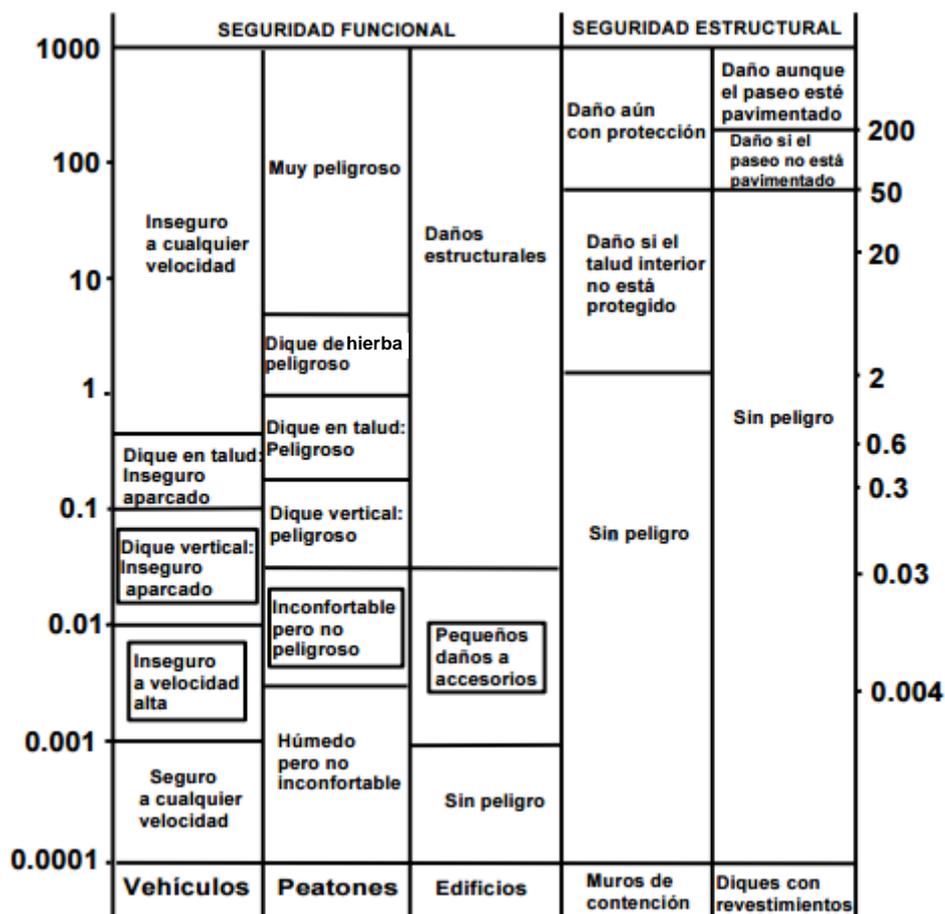


Figura 63 - Caudales de rebase tolerables (l/s/m) (Franco et al. (1994))

Los diques y contradiques del Puerto de Gijón son todos transitables, por vehículos en algún caso y por peatones en todos. Esta característica ha sido la referencia para la definición del caudal de rebase, además del tipo de dique (vertical o en talud).

En la tabla 10 se resumen los umbrales de caudal de rebase tomados en el Puerto de Gijón, tomados de la tabla de Franco et al. (1994). Para este estudio se ha considerado el umbral a partir de cual no es seguro el estacionamiento de los vehículos y el tránsito por el dique es peligroso para los peatones.

	Estructura	Tipo de dique	Transitable por:	Umbral (l/s/m)
1	Dique de Aboño	En talud	Vehículos	0,1
2	Dique Torres	En talud	Vehículos	0,1
3	Dique Norte	Vertical	Vehículos	0,01
4	Contradique exterior	En talud	Vehículos	0,1
5	Dique Príncipe de Asturias	En talud	Vehículos	0,1
6	Contradique	En talud	Vehículos	0,1
7	Dique de la Osa I	En talud	Peatones	0,3
8	Dique de la Osa II	En talud	Vehículos	0,1
9	Dique de la Osa III	En talud	Vehículos	0,1
10	Contradique puerto deportivo	En talud	Peatones	0,3

Tabla 10 - Umbrales del caudal de rebase en el Puerto de Gijón (Adaptado de Franco et al. (1994))

La tabla 11 recoge la probabilidad de que el Puerto de Gijón sea operativo en materia de caudal de rebase de sus estructuras y las horas al año en que no es operativo.

	Estructura	Escenario Base		E1		E2		E3		E4	
		Prob	h/año	Prob	h/año	Prob	h/año	Prob	h/año	Prob	h/año
1	Dique de Aboño	0,997	19,2	0,996	32,4	0,995	41,7	0,987	105,6	0,985	126,0
2	Dique Torres	1	0	1	0	1	0	0,999	0,056	0,999	0,06
3	Dique Norte	0,984	139,1	0,981	161,8	0,981	165,6	0,960	345,5	0,957	370,0
4	Contradique exterior	0,999	3,8	0,998	14,0	0,997	23,1	0,996	33,3	0,994	50,7
5	Dique Príncipe de Asturias	0,998	14,4	0,997	24,2	0,996	31,5	0,993	60,7	0,991	73,6
6	Contradique	0,999	1,5	0,999	6,5	0,998	11,5	0,997	20,9	0,996	32,0
7	Dique de la Osa I	0,995	37,9	0,986	115,5	0,977	199,4	0,975	218,4	0,958	361,5
8	Dique de la Osa II	0,995	36,8	0,991	72,7	0,988	102,0	0,982	156,2	0,975	214,2
9	Dique de la Osa III	0,994	46,8	0,987	111,6	0,980	172,8	0,973	235,5	0,960	349,6
10	Contradique puerto deportivo	0,992	69,9	0,972	245,1	0,947	458,1	0,953	408,7	0,919	703,4

Tabla 11 - Tiempos de inoperatividad por un exceso de caudal de rebase

Si se establece 175,2 horas (98%) como tiempo máximo de inoperatividad en un año debido a un caudal de rebase excesivo y tomando los resultados del estudio de agitación se obtienen como resultado las figuras 64, 65, 66, 67 y 68, que muestran los mapas de operatividad para los distintos escenarios de cambio climático.

Se observa como zona crítica de agitación y de caudal de rebase la zona correspondiente al pequeño puerto deportivo situado al sur del Musel, protegido por un tramo del Dique de la Osa y un contradique. Si bien la agitación en esta zona no es muy alta, se convierte en una zona vulnerable debido al bajo umbral determinado por la ROM para las embarcaciones deportivas.

En los escenarios conservadores de cambio climático no se observan más zonas críticas, pero en los escenarios más extremos la segunda zona más vulnerable después del puerto deportivo es el área

protegida por el Dique Norte. El Dique Norte es un dique vertical muy expuesto a las sollicitaciones del oleaje, por lo que se produce una reflexión grande de las olas, que provoca una lámina de agua por encima de la cota de coronación del dique, generando gran cantidad de caudal de rebase. La intensidad del impacto de las olas contra el dique generará una brusca rotura de las olas que generará gran cantidad de *splash*. La menor protección del Contradique Exterior ante dinámicas de gran intensidad generará cierta agitación en la zona.

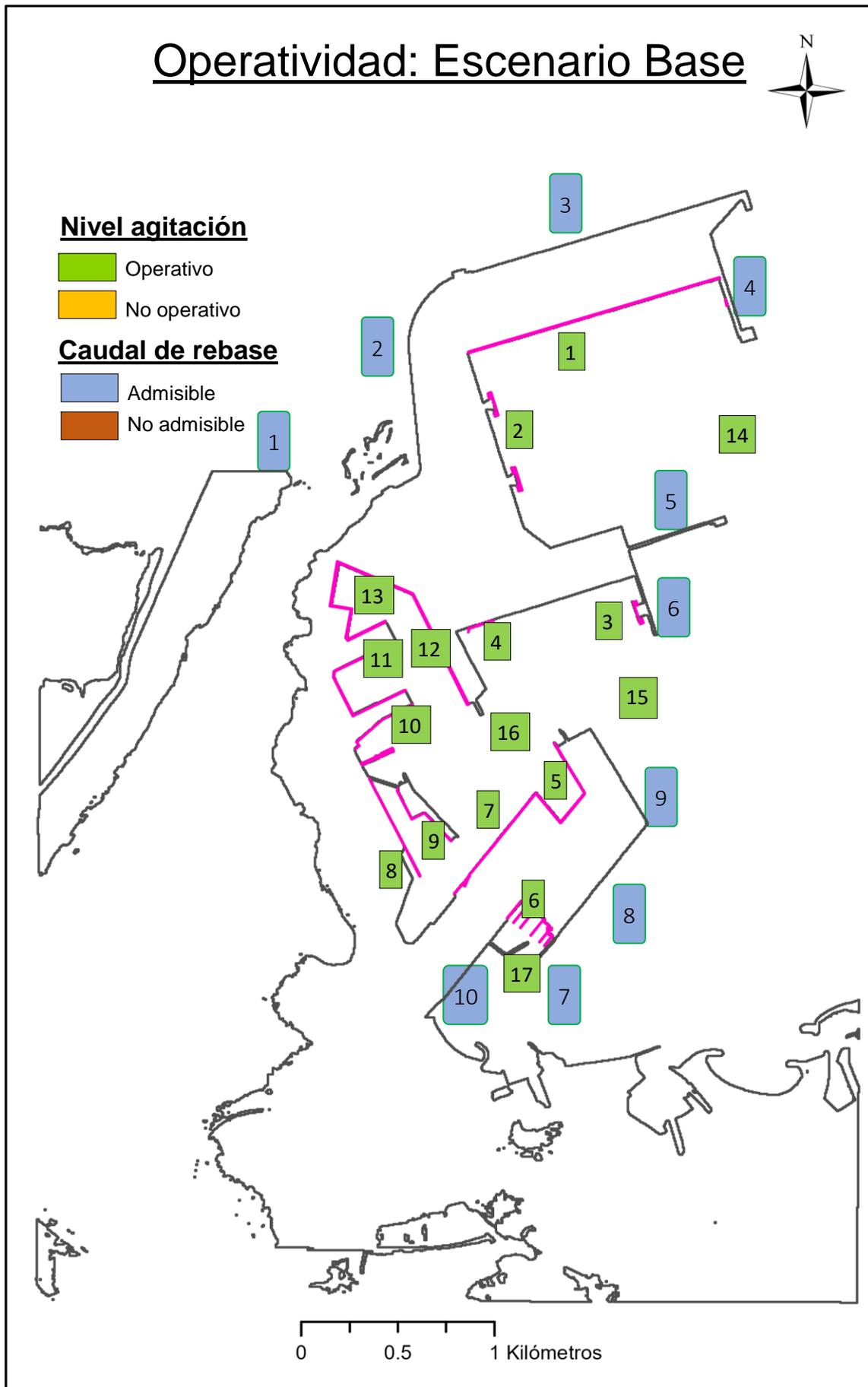


Figura 64 - Mapa de operatividad Escenario Base (Fuente propia)

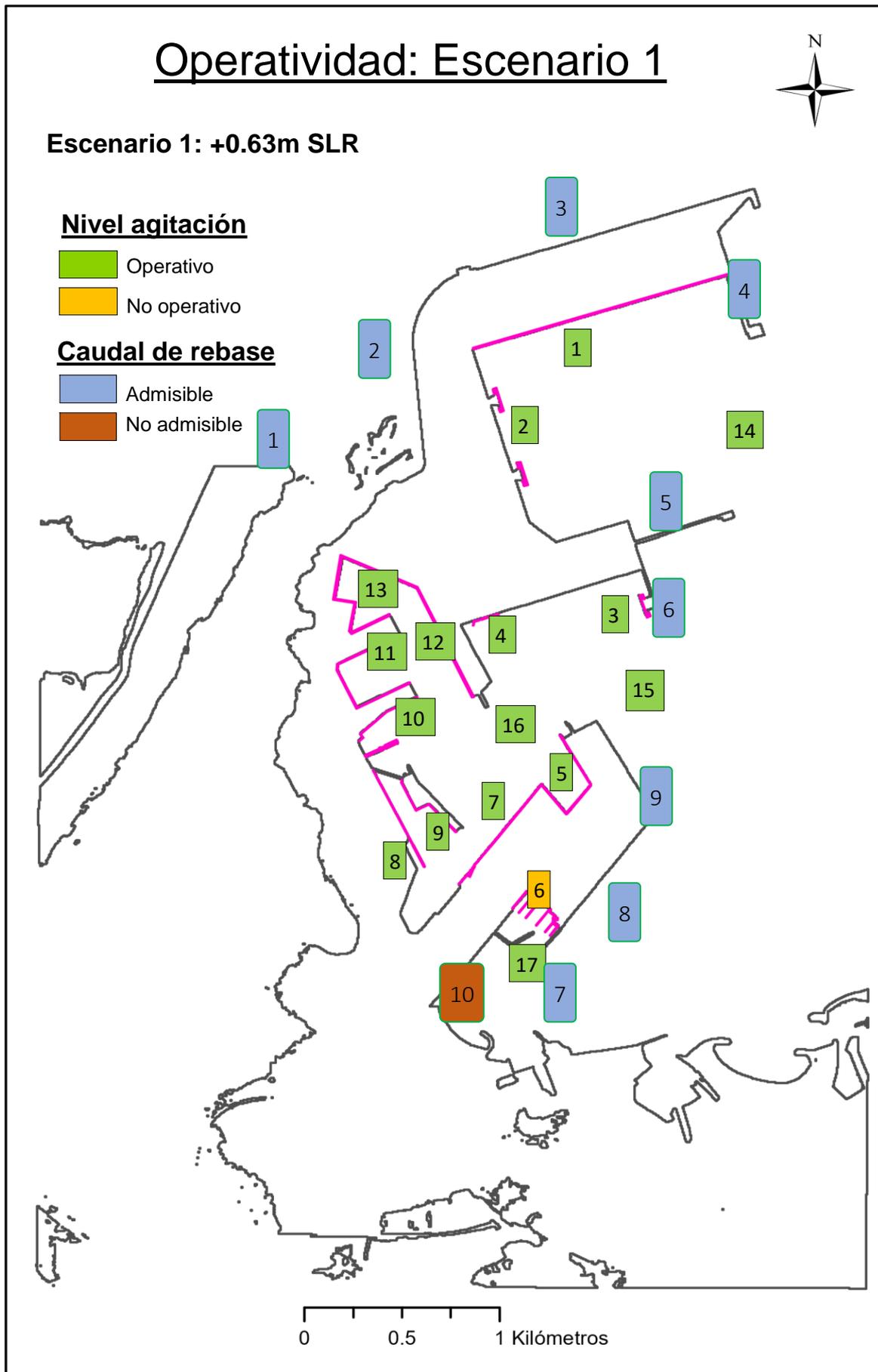


Figura 65 - Mapa de operatividad Escenario 1 (Fuente propia)

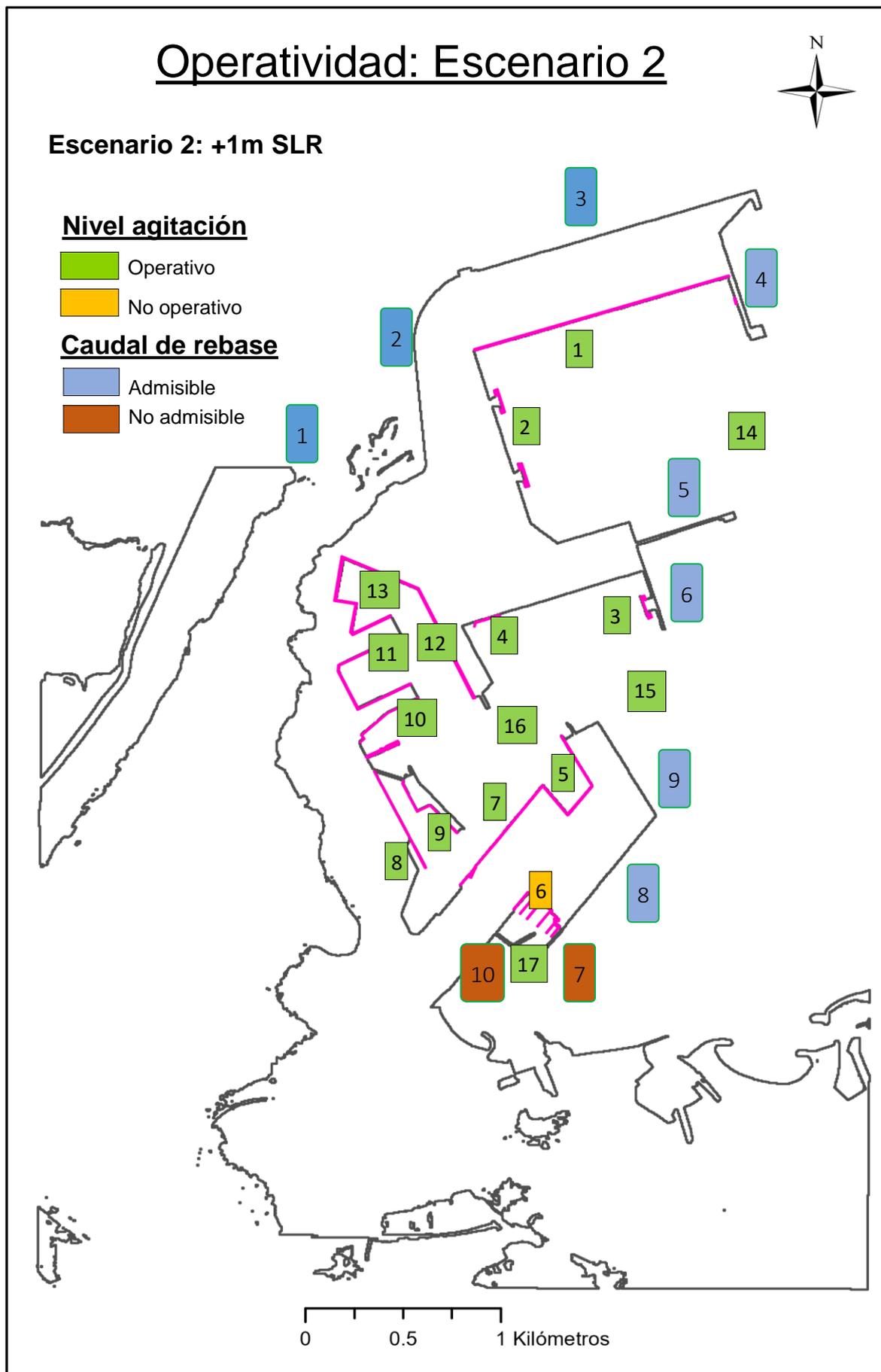


Figura 66 - Mapa de operatividad Escenario 2 (Fuente propia)

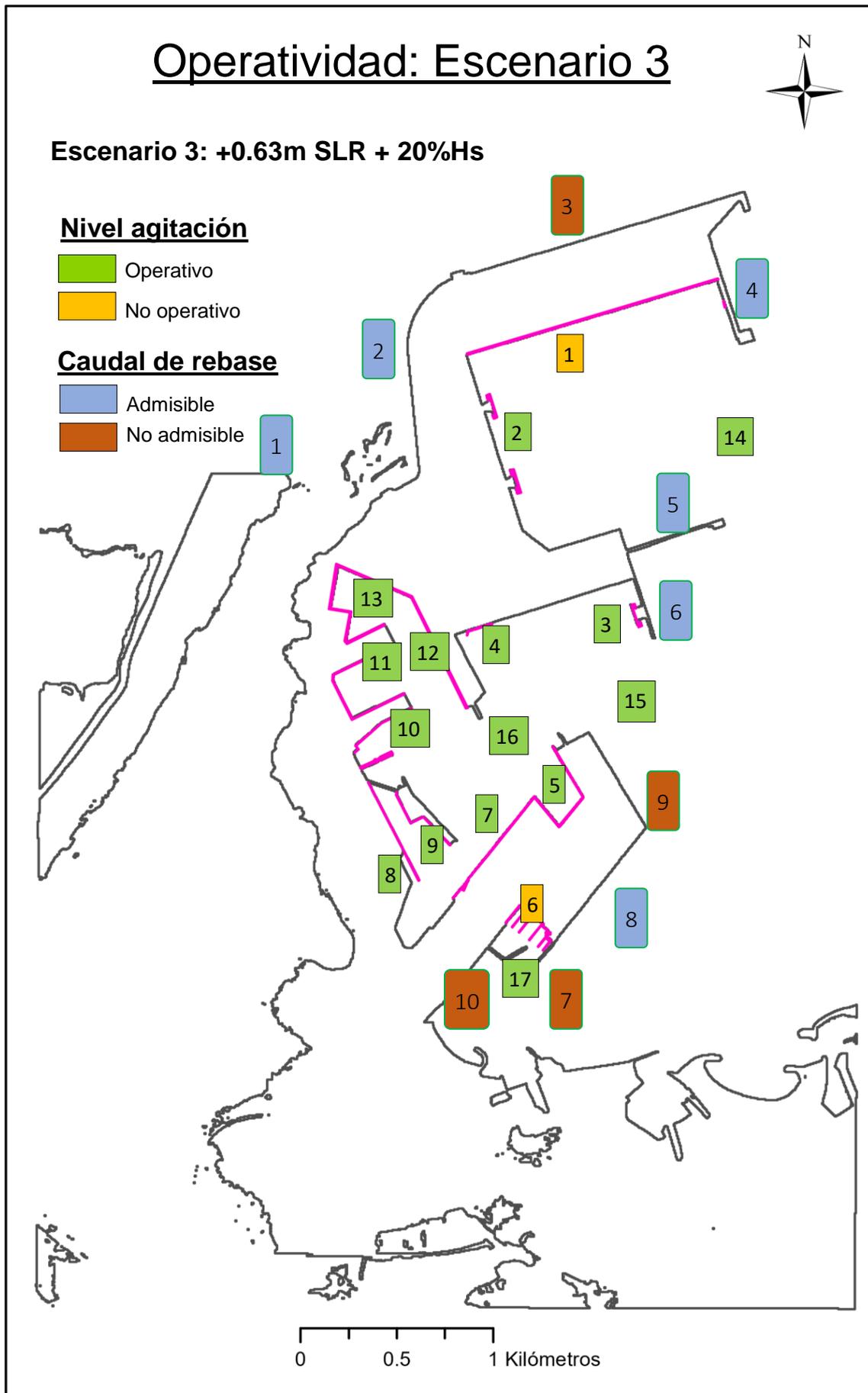


Figura 67 - Mapa de operatividad Escenario 3 (Fuente propia)

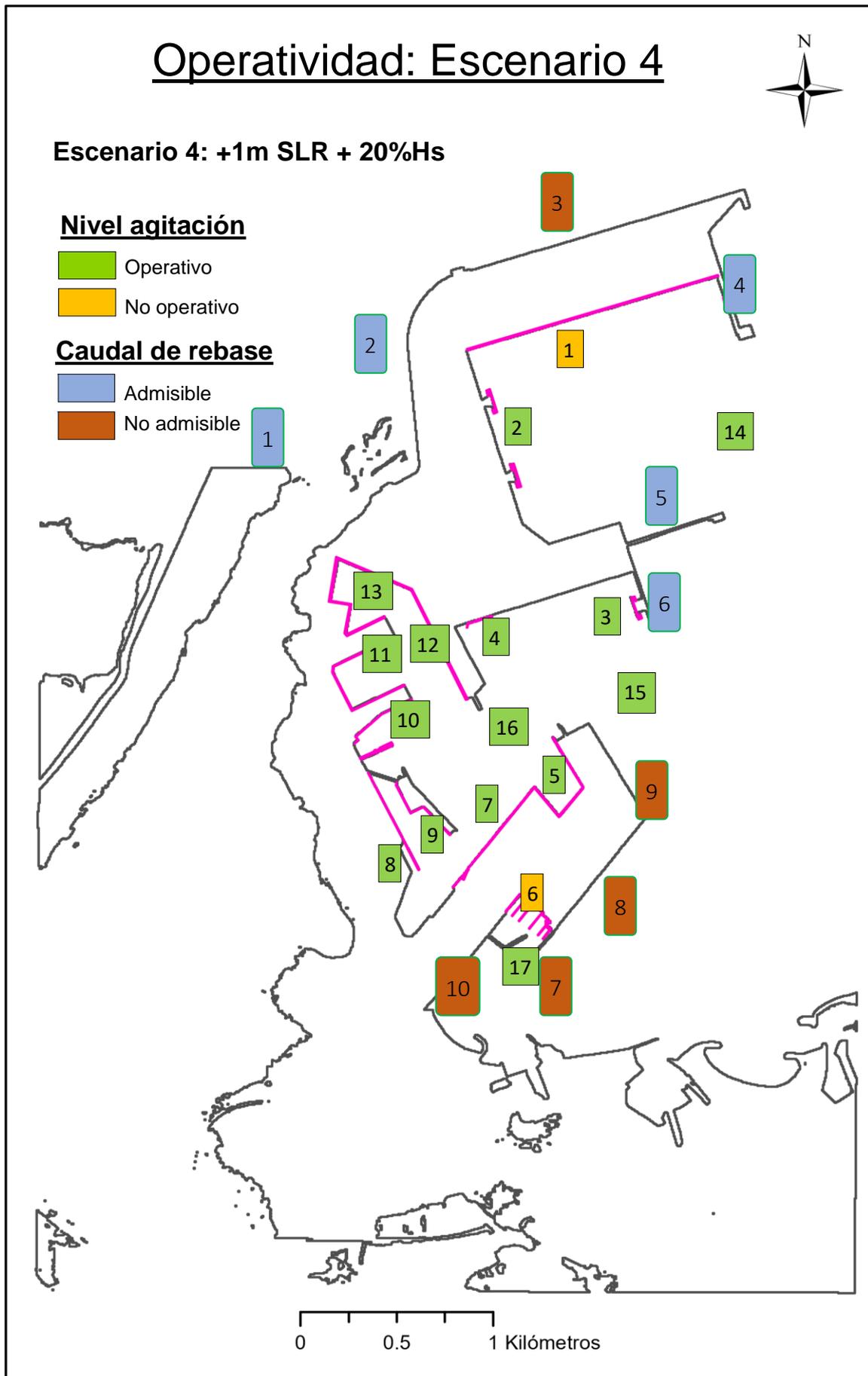


Figura 68 - Mapa de operatividad Escenario 4 (Fuente propia)

7.3 Fiabilidad

Este apartado cierra el capítulo 7 de definición de elementos en riesgo con la propuesta de una metodología para el estudio de la estabilidad de las infraestructuras de protección. La metodología tiene como objetivo analizar el efecto que el cambio climático podría suponer en la estabilidad de las estructuras, ya que un aumento del nivel del mar y en la altura de ola provocará una desestabilización de las mismas.

El procedimiento seguido ha sido determinar el nivel de fiabilidad actual de las estructuras y calcular el peso que deberían tener las piezas del manto exterior (diques en talud) o el peso de la estructura superior (diques verticales) para mantener el riesgo actual.

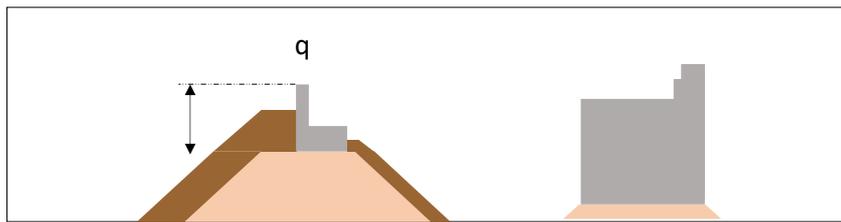


Figura 69 - Dique en talud y dique vertical (Fuente propia)

Las metodologías propuestas para el estudio de la fiabilidad de los diques se ha aplicado en las estructuras definidas en el *Atlas Diques de Abrigo en los Puertos de Interés General del Estado (Años 1986-2011)*, donde se recogen las dimensiones y peso de las piezas de las mismas.

7.2.1 Propuesta metodológica para el estudio de la fiabilidad de los diques en talud

Los diques de piezas sueltas son los más utilizados para la protección de puertos contra la acción del oleaje, disipando su energía por los procesos de rotura y fricción sobre y en el interior del macizo granular y por la transmisión de oleaje hacia la parte abrigada (Losada et al., 1994). El tipo y el peso de las piezas del manto principal son determinantes en la estabilidad de la estructura ante las solicitaciones del oleaje, y es por ello los efectos del cambio climático se van a evaluar a través del peso necesario de las piezas para cada escenario.

La propuesta metodológica para el estudio de la fiabilidad de los diques en talud se ha aplicado al Dique de Aboño, Dique Torres, Contradique exterior, Contradique Príncipe de Asturias y Dique de la Osa (en las estructuras formadas por tramos de dique en talud y tramos de dique vertical solamente se ha tomado el tramo principal, el del dique en talud, para el estudio de estabilidad).

I. Definición del evento y de los escenarios de cambio climático

Para llevar a cabo el estudio de estabilidad del dique se han considerado oleajes que pueden alcanzar los diques con una frecuencia de presentación baja (régimen extremal). Se ha definido el temporal de febrero de 2014 como temporal de cálculo para el análisis, utilizando el mismo intervalo de horas que para el estudio de inundación.

Temporal de cálculo

- Duración: 12 horas

- Periodo de pico, altura de ola y marea correspondientes al oleaje a pie de dique de las 5 am del 2 de febrero.

Los escenarios de cambio climático planteados para el estudio de estabilidad son:

- Escenario Base: temporal de febrero 2014.
- Escenario 1: aumento del nivel medio del mar estimado por Slangen 8.5, igual a 0,63 metros.
- Escenario 2: aumento del nivel medio del mar de 1 metro.
- Escenario 3: aumento del nivel medio del mar estimado por Slangen 8.5 y un aumento de la altura de ola significativa de un 20%.
- Escenario 4: aumento del nivel medio del mar de 1 metro y aumento de la altura de ola significativa en un 20%.

II. Determinación de la estabilidad actual

La estrategia seguida en la estabilidad de las estructuras ha sido mantener el riesgo actual, por lo que a continuación se calcula el riesgo de desplazamiento de las piezas del manto principal exterior, con las dimensiones iniciales de diseño, debido a fuerzas hidrodinámicas.

Utilizando la función de estabilidad:

$$\psi = \frac{W_{50}}{\rho_w \cdot g \cdot R \cdot H_{ic}^3}$$

Donde:

H_{ic} –Altura de ola de cálculo

W_{50} –Peso medio de las piezas del manto exterior

$$R = \frac{S_r}{(S_r - 1)^3}$$

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

ρ_w – Densidad del agua

ρ_s –Densidad de la pieza

Cálculo de H_{ic}

- a. Si en el temporal de cálculo llegan al dique más de 50 olas rotas $H_{ic} = H_b$

H_b es la altura de ola de rotura, que según el criterio de Goda:

$$H_b = 0.17L_0 \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-1.5\pi h_b}{L_0} (1 + 15(\tan\beta)^{\frac{4}{3}}) \right] \right\}$$

h_b – Profundidad de rotura

Cálculo del número de olas que llegan rotas al dique en el temporal de cálculo

$$T_z = \frac{T_p}{1.3}$$

T_z – Periodo medio

T_p – Periodo de pico

Número de olas del temporal de cálculo:

$$N = \frac{\text{Duración temporal}(h) \cdot 3600}{T_z}$$

N – Número de olas

Porcentaje de olas que llegan rotas al dique:

$$P(H_s > H_b) = \exp\left(-2 \left(\frac{H_b}{H_s}\right)^2\right)$$

Número de olas rotas en el temporal de cálculo:

$$N_{rotas} = N \cdot P(H_s > H_b)$$

- b. Si llegan menos de 50 olas rotas al dique $H_{ic} = H_{50}$

H_{50} es la altura media de las 50 mayores olas que alcanzan el dique en el periodo de tiempo en que se evalúa la estabilidad (duración del temporal de cálculo).

Se ha asumido que la distribución de alturas de ola individuales en el estado de mar es Rayleigh y la altura de ola H_{50} se ha obtenido a partir de los parámetros de altura de ola basados en esta distribución.

Se despeja la única incógnita de la función de estabilidad: ψ

$$\psi = \frac{W_{50}}{\rho_w \cdot g \cdot R \cdot H_{ic}^3}$$

Losada y Desiré (1985) establecieron los siguientes valores máximos de la función de estabilidad, ψ :

TIPO BLOQUE	axaxa			axax 1.5a			a x a x 2a		
	1.5	2.0	2.5	1.5	2.0	2.5	1.5	2.0	2.5
Inicio avería	0.060	0.047	0.043	—	—	0.084	0.120	—	0.116
Avería Iribarren	0.033	0.028	0.024	—	—	0.030	0.042	—	0.038
Destrucción	0.027	0.022	0.018	—	—	0.021	0.035	—	0.027

Figura 70 - Valores máximos función de estabilidad (Losada y Desiré (1985))

En el estudio de estabilidad propuesto en la metodología se busca mantener el riesgo actual de las estructuras, que será en todos los casos inferior al inicio de avería.

III. Análisis efectos del cambio climático

Una vez se tiene el valor de la función de estabilidad, se calcula el peso de las piezas necesario para mantener el riesgo actual, al variar la altura de ola de cálculo para los escenarios de cambio climático de incremento del nivel medio del mar y de la altura de ola.

Se puede asumir que todos los diques y contradiques del Puerto de Gijón se encuentran en profundidades indefinidas $\left(\frac{h}{L} > \frac{1}{20}\right)$, y en profundidades indefinidas la variación del nivel medio con respecto a la profundidad total es muy pequeña por lo que su efecto se considera despreciable. Por el contrario, los efectos provocados por la variación de la altura de ola no pueden ser despreciados, ya que la altura de ola de cálculo se obtiene a partir de la altura de ola de cálculo con un periodo de retorno dado. De esta manera, pequeñas variaciones en la

altura de ola pueden provocar grandes efectos que afecten a la estabilidad de los diques (NU. CEPAL et al., 2012).

Se va a suponer que la altura de ola de cálculo para un dique situado en profundidades indefinidas en el futuro será igual a la altura de cálculo actual más una perturbación, y que el peso de las piezas será igual al actual más una variación del mismo, en función de la magnitud de la perturbación sumada a la altura de cálculo (NU. CEPAL et al., 2012).

$$H_{ic,f} = H_{ic} + \delta H_{ic}$$

$$W_{50,f} = W_{50} + \delta W_{50}$$

$H_{ic,f}$ –Altura de ola de cálculo futura (m)

H_{ic} –Altura de ola de cálculo actual (m)

δH_{ic} –Variación de la altura de ola de cálculo (m)

$W_{50,f}$ –Peso medio de las piezas en el futuro (N)

W_{50} –Peso medio de las piezas actual (N)

δW_{50} –Variación de peso medio de las piezas (N)

Teniendo fijado el valor de la función de estabilidad, en un futuro el tamaño de las piezas del dique será:

$$W_{50} + \delta W_{50} = \psi \cdot \rho_w \cdot g \cdot R \cdot (H_{ic} + \delta H_{ic})^3$$

Aproximando la función potencial por un desarrollo en serie de Taylor y despreciando los términos de orden mayor que el orden 1 se obtiene:

$$W_{50} + \delta W_{50} = \psi \cdot \rho_w \cdot g \cdot R \cdot H_{ic}^3 \left(1 + 3 \frac{\delta H_{ic}}{H_{ic}} \right)$$

Adimensionando la ecuación al dividir todo por el peso actual de las piezas se obtiene:

$$\frac{\delta W_{50}}{W_{50}} = 3 \left(\frac{\delta H_{ic}}{H_{ic}} \right)$$

La fórmula a la que se llega relaciona la variación adimensional del peso de las piezas con la variación adimensional de la altura de ola. Es una relación lineal, donde la relación del peso de las piezas aumenta linealmente con la variación de la altura de ola (NU. CEPAL et al., 2012).

A continuación se representan las curvas que relacionan la variación adimensional del peso de las piezas con la variación de la altura de ola para los diferentes diques y contradiques del Puerto de Gijón (como se ha mencionado previamente, se han estudiado las estructuras caracterizadas en el Atlas de Puertos del Estado).

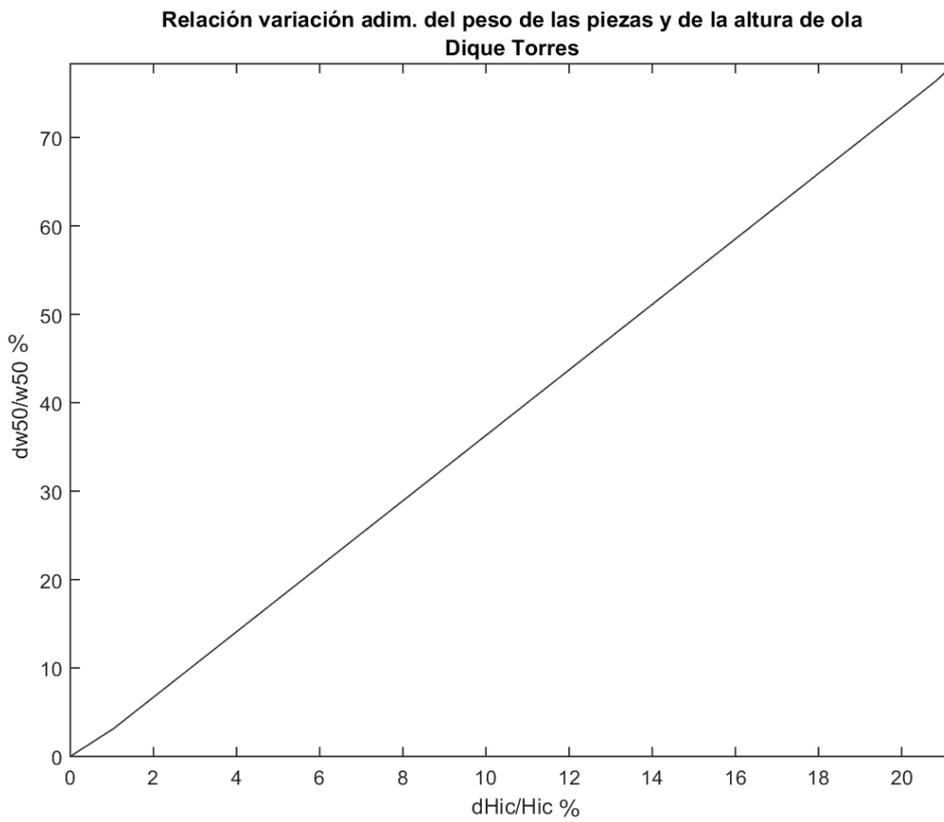


Figura 71 - Relación variación peso piezas y altura de ola Dique Torres (Fuente propia)

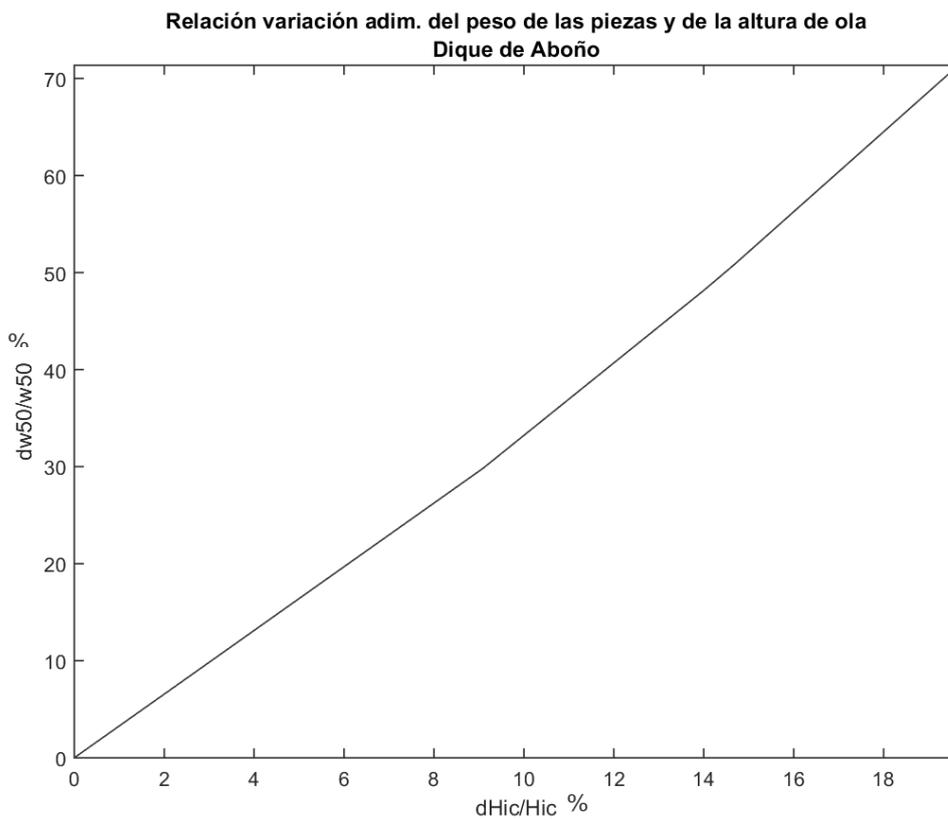


Figura 72 - Relación variación peso piezas y altura de ola Dique de Aboño (Fuente propia)

Se presentan solamente las curvas correspondientes al Dique Torres y al Dique de Aboño, ya que como se puede observar las dos gráficas son iguales. Las curvas que representan la relación entre la variación adimensional del peso de las piezas y la variación de la altura de ola son las mismas en todas las estructuras, ya que la variación de la altura de ola es la misma en todos los casos.

De las curvas se deduce que, por ejemplo, un aumento de la altura de ola en un 4% necesita un aumento del peso de las piezas del 10% para mantener el nivel de riesgo actual.

7.2.2 Propuesta metodológica para el estudio de la fiabilidad de los diques verticales

La rotura de la ola sobre paramentos verticales transmite unos esfuerzos muy importantes, por lo que este tipo de diques es más adecuado para calados grandes que para aquellos en los que se produce la rotura de la ola. Reflejan la energía del oleaje de manera casi total, por lo que su situación provocará gran agitación como consecuencia de la reflexión del oleaje.

El Dique Norte está es la única estructura del Puerto de Gijón formada en su totalidad por un dique vertical.

I. Definición del evento y de los escenarios de cambio climático

Al igual que se presentaba en el estudio de estabilidad de diques en talud, se ha considerado el temporal de cálculo de febrero de 2014 para evaluar la fiabilidad de los diques verticales.

Temporal de cálculo

- Duración: 12 horas
- Periodo de pico, altura de ola y marea correspondientes al oleaje a pie de dique de las 5 am del 2 de febrero.

Los escenarios de cambio climático planteados para el estudio de estabilidad de diques verticales son los mismos que los planteados para diques en talud:

- Escenario Base: temporal de febrero 2014.
- Escenario 1: aumento del nivel medio del mar estimado por Slangen 8.5, igual a 0,63 metros.
- Escenario 2: aumento del nivel medio del mar de 1 metro.
- Escenario 3: aumento del nivel medio del mar estimado por Slangen 8.5 y un aumento de la altura de ola significativa de un 20%.
- Escenario 4: aumento del nivel medio del mar de 1 metro y aumento de la altura de ola significativa en un 20%.

II. Determinación de la estabilidad actual

En los diques el talud el riesgo actual se definía con la función de estabilidad de las piezas. Los diques verticales están formados por cajones armados y su rotura tiene lugar principalmente por el deslizamiento o el vuelco del dique. El diseño pues debe asegurar unos coeficientes de seguridad al deslizamiento y al vuelco. El nivel de seguridad actual al deslizamiento y al vuelco es el riesgo a mantener de cara al cambio climático.

Si en los diques en talud se relacionaba el peso de las piezas del manto exterior con la altura de ola de cálculo, en los diques verticales se ha considerado la relación entre el peso de la

estructura de hormigón (cajón, espaldón...) con el conjunto de efectos del cambio climático (aumento del nivel medio del mar y de la altura de ola). Se trata de una relación muy simplificada, puesto que el único fin es determinar los efectos del cambio climático mediante un cálculo sencillo del dique.

Coefficientes al deslizamiento y al vuelco

El planteamiento estático del equilibrio del espaldón supone acciones constantes en el tiempo:

- Cálculo de las fuerzas máximas instantáneas actuantes contra la estructura.
- Cálculo de las fuerzas estabilizantes.

El sistema se considera rígido hasta el momento de avería, en el que se produce el deslizamiento o el vuelco. Los coeficientes de seguridad frente al deslizamiento y al vuelco se definen como:

$$C_{SD} = \frac{\mu \text{Peso} - \text{subpresiones}}{\Sigma \text{Fuerzas horizontales}}$$

$$C_{SV} = \frac{\text{Momento del peso}}{\Sigma \text{Momento de las fuerzas horizontales} + \text{Momento de las subpresiones}}$$

Se considera:

- El coeficiente de fricción entre el cajón y la banqueta de cimentación es: $\mu = 0,7$
- Incidencia del oleaje normal al dique

Cargas actuantes principales:

- A. Cargas exteriores: aplicadas sobre el frente expuesto del oleaje:
 - a. Carga hidráulica
 - b. Carga dinámica debida al oleaje
- B. Cargas inferiores: aplicadas sobre la cara protegida del dique:
 - a. Cargas hidrostáticas
 - b. Cargas dinámicas debidas al oleaje interior
- C. Subpresiones: aplicadas sobre la base del cajón
 - a. Cargas hidrostáticas
 - b. Cargas dinámicas debidas a los oleajes en ambos lados del cajón
- D. Peso

Método de Goda para el cálculo de las presiones

Se aplica el método de Goda (1985) para el cálculo de las presiones actuantes sobre el dique:

Máxima cota que alcanza el agua al impactar contra la pared: $\eta * = 0.75(1 + \cos\beta)H_1$

β – Ángulo de incidencia del oleaje

H_1 – Altura de ola de cálculo

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)(\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2\beta)\rho g H_1$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{L}\right)} \right]^2$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_1}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_1} \right\}$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \right]$$

h_b – Calado a una distancia $5H_1$ (5 veces la altura de ola significativa de cálculo)

La subpresión dinámica debida a la acción del oleaje se supone triangular, de valor p_u en el lado expuesto y cero en el abrigado:

$$p_u = \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) \alpha_1 \alpha_3 \rho g H_1$$

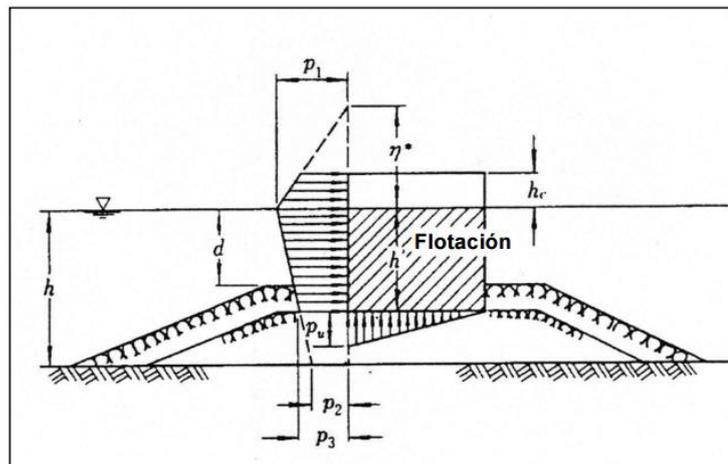


Figura 73 - Presiones actuantes sobre un dique vertical (Goda 1985)

III. Análisis efectos del cambio climático

Como se puede ver en el cálculo de los coeficientes y de las presiones actuantes sobre el dique la variación del nivel medio del mar y de la altura de ola no tienen una relación lineal con el peso del bloque de hormigón.

Se ha representado la variación de peso del bloque de hormigón necesaria para mantener el riesgo al deslizamiento y al vuelco actual para cada escenario de cambio climático planteado. Los escenarios 3 y 4 (de aumento de altura de ola) son los que desestabilizan en mayor manera al dique.

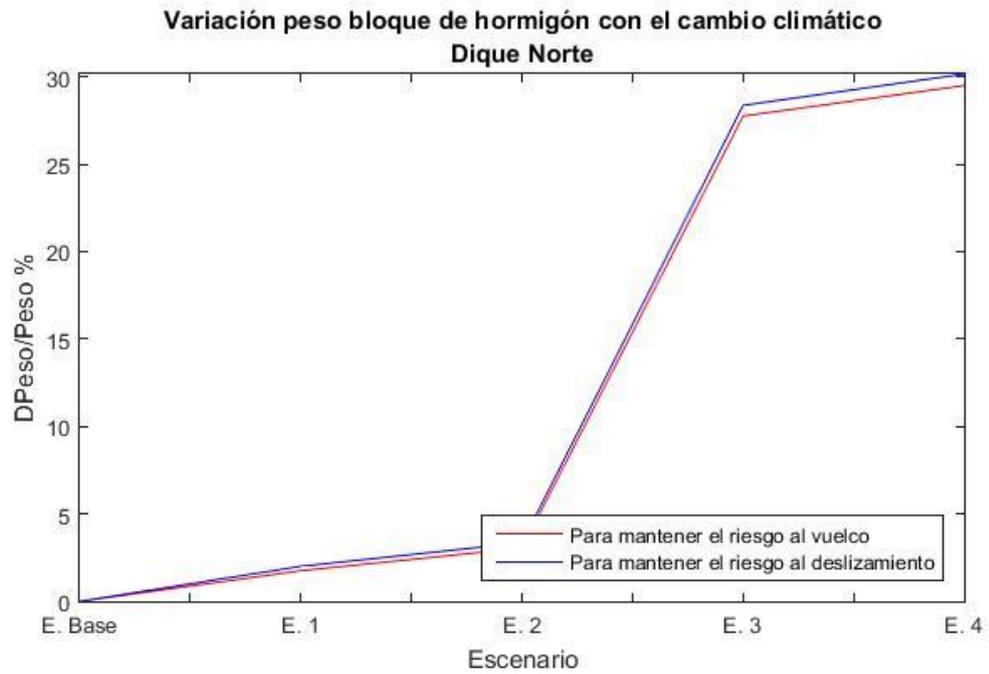


Figura 74 - Variación peso cajonero con el cambio climático (Fuente propia)

De esta manera, un aumento del nivel medio del mar de 1 m y de un 20% de la altura de ola (Escenario 4) conlleva dar un 30% de hormigón más a la estructura del dique vertical para mantener el nivel de seguridad al deslizamiento y al vuelco actual.

Se observa también que es mayor el riesgo al deslizamiento del dique que el riesgo al vuelco, ya que necesita un peso mayor.

8 – Evaluación del riesgo y consecuencias

8. Evaluación del riesgo y consecuencias

La evaluación de las consecuencias del riesgo de los impactos en los escenarios de cambio climático tiene el objetivo de valorar los futuros cambios y proponer medidas de adaptación que minimicen ese riesgo.

Con el fin de simular los efectos del cambio climático se ha simulado un conjunto de escenarios con horizonte temporal en el año 2100. Para poder valorizar las consecuencias económicas a fin de siglo se ha tomado una tasa de crecimiento del puerto del 2%, en base al crecimiento seguido en los últimos años, tomando como año base el año 2015. Esta tasa ha sido aplicada en el stock capital y en los flujos económicos del puerto (Losada et al., 2016).

$$V_{2100} = V_{2015}(1 + \alpha)^T$$

V_F – Valor del stock o flujo económico en el futuro, que en este estudio es 2100.

V_A – Valor del stock o flujo económico en el año base, que se ha tomado el año 2015.

T – Diferencia de años entre el año horizonte considerado y el año base.

α – Tasa de crecimiento considerada.

Para poder comparar los daños producidos en 2100 con los producidos actualmente es necesario aplicar una tasa de descuento para que los datos estén expresados en unidades monetarias constantes del presente pero teniendo en cuenta el impacto diferenciado entre distintos años. La tasa de descuento aplicada en este trabajo es de un 1%.

$$V_A = \frac{V_F}{(1 + \alpha)^T}$$

V_F – Valor del stock o flujo económico en el futuro, que en este estudio es 2100.

V_A – Valor del stock o flujo económico en el año base, que se ha tomado el año 2015.

T – Diferencia de años entre el año horizonte considerado y el año base.

α – Tasa de descuento considerada.

8.1 Riesgo de inundación

Para la evaluación del riesgo de inundación se han utilizado las bases de exposición, que se han cruzado con los impactos para finalmente aplicar las curvas o umbrales de vulnerabilidad.

Impacto de inundación en los activos

- I. Se ha realizado el cruce de capas entre el mapa de activos y la mancha de inundación. Esto nos da el daño máximo que se produciría en caso de inundación, es decir, la pérdida total de los activos.
- II. Para determinar el daño real producido (daño efectivo), se han aplicado las curvas de daño de cada elemento, obteniendo el daño producido para la cota de inundación de esa zona.

Impacto de inundación en el flujo

- I. Se realizado el cruce de capas entre el mapa de flujo y la mancha de inundación. Para la evaluación del impacto sobre el flujo se ha supuesto que se produce la pérdida total del flujo.
- II. En base a la relación entre el tiempo de inoperatividad y la cota de inundación se ha calculado la pérdida económica debido a la parada de la actividad.

Los resultados de los escenarios futuros han sido proyectados y descontados para poder realizar la comparación con los daños producidos en el año base, 2015.

La siguiente figura 75 muestra el esquema del procedimiento descrito para la obtención del riesgo de inundación en el puerto:

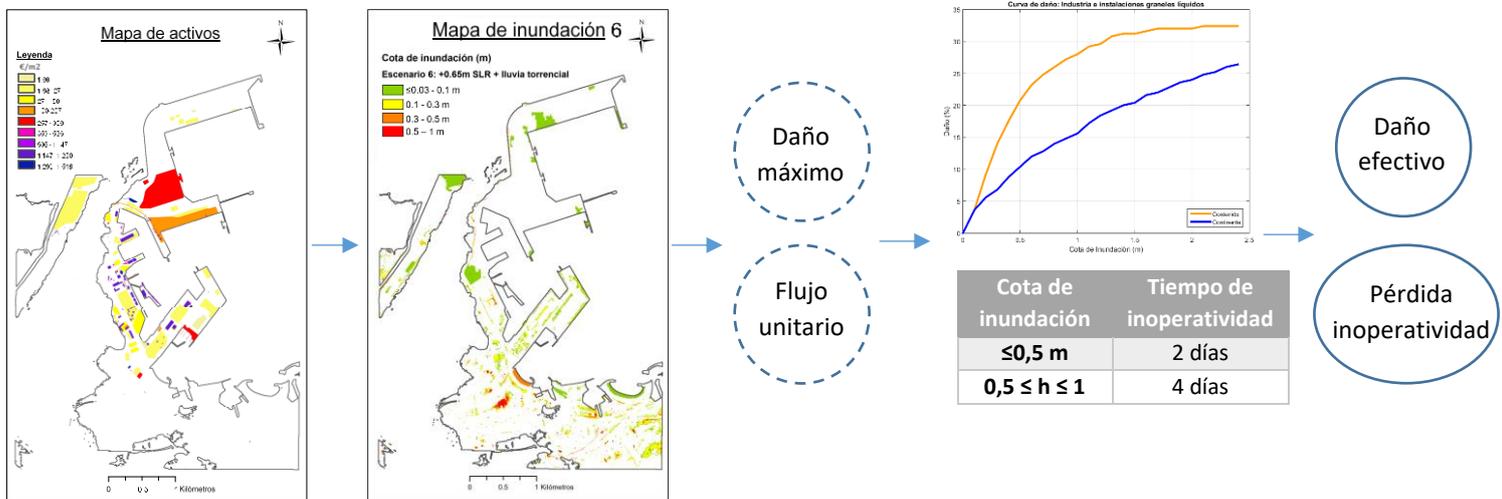


Figura 75 - Esquema procedimiento obtención daño producido por inundación (Fuente propia)

Anteriormente se ha clasificado el puerto en subsistemas (figura 76), en base a la actividad realizada en el puerto. Con el objetivo de conocer el subsistema crítico, en materia de riesgo de inundación, se han agrupado los daños de stock y la pérdida de actividad para cada escenario de cambio climático, en la tabla 12.

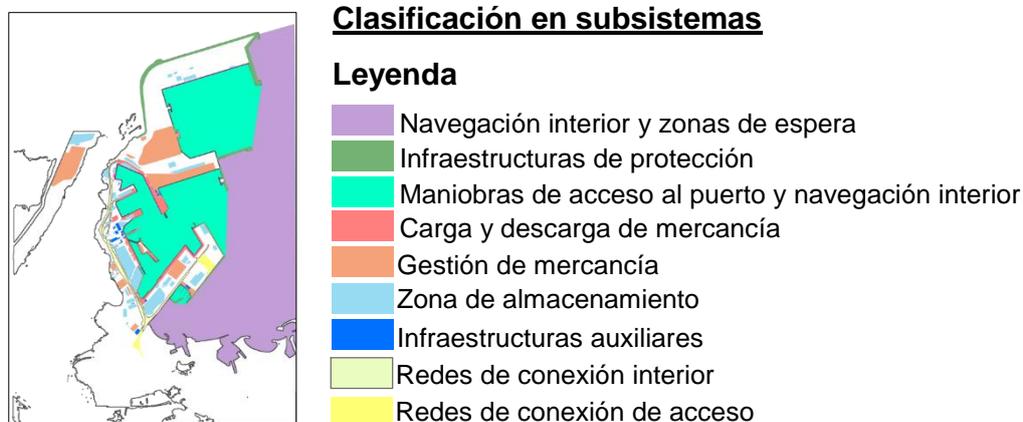


Figura 76 - Subsistemas del Puerto de Gijón (Fuente propia)

Activo: % de daño respecto del daño total Flujo: % pérdida económica respecto de la pérdida total	E0		E1		E2		E3		E4		E5		E6	
	Activo	Flujo												
Carga y descarga de mercancía	0,14%	0,00%	0,15%	0,00%	0,17%	0,00%	0,08%	0,00%	0,08%	0,00%	0,41%	1,94%	0,58%	2,24%
Gestión de mercancía	95,21%	86,11%	95,64%	90,78%	95,43%	86,20%	97,51%	88,47%	97,59%	88,96%	95,17%	84,67%	67,57%	85,23%
Zona de almacenamiento	3,99%	13,87%	3,48%	9,20%	3,68%	13,78%	2,14%	11,52%	2,05%	11,02%	4,12%	13,16%	9,38%	12,23%
Redes de conexión de acceso	0,65%	0,02%	0,73%	0,02%	0,71%	0,02%	0,27%	0,02%	0,28%	0,02%	0,21%	0,01%	0,10%	0,02%
Zona de infraestructuras auxiliares	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,22%	22,37%	0,29%

Tabla 12 - Agrupación daños inundación por subsistemas

El subsistema con mayor porcentaje de daño respecto del total y mayor porcentaje de pérdida económica respecto del total flujo económico perdido es el de *Gestión de Mercancía*, que alberga principalmente los parques de explotación y manejo de graneles sólidos y las plantas de graneles líquidos, que son las terminales con mayor valor y flujo económico.

Para la comparación del daño producido en los distintos escenarios se recoge en la tabla 13 el total de los daños en activos y en flujo económico:

	ESCENARIO	Daño efectivo	Flujo efectivo
E0	Escenario Base	312 195,36 €	18 697,80 €/año
E1	SLR +0,63m (Slangen et al. 2014)	767 066,62 €	43 216,49 €/año
E2	SLR +1m	773 671,05 €	43 381,11 €/año
E3	SLR +0,63m + 20%Hs	3 523 887,35 €	79 632,65 €/año
E4	SLR +1m + 20%Hs	3 846 836,50 €	80 636,05 €/año
E5	SLR +1,5m	6 839 938,39 €	100 176,73 €/año
E6	SLR +0,63m + 20%Hs + lluvia torrencial	8 475 108,33 €	128 954,56 €/año

Tabla 13 - Comparación daños producidos por inundación en los escenarios de cambio climático

Lógicamente, a medida que se intensifican los efectos del cambio climático (mayor aumento de nivel medio del mar, altura de ola o precipitación), el daño efectivo y el flujo perdido por inoperatividad es mayor.

8.2 Riesgo de inoperatividad

El riesgo de inoperatividad del puerto se ha calculado de manera muy conservadora, ya que se ha determinado la pérdida económica que sufre el puerto debido a la inoperatividad de una zona debido a la agitación interior más la inoperatividad debida a un excesivo caudal de rebase. En base a los días de inoperatividad determinados en el capítulo 7 y suponiendo el estado actual del puerto, el flujo económico al año que no ingresaría el puerto debido al cierre de la terminal en los escenarios de cambio climático es el siguiente:

Muelles y zonas principales	€/día	E1 SLR +0,63 m	E2 SLR +1 m	E3 SLR +0,63 m + 20%Hs	E4 SLR +1 m + 20%Hs
Muelles de La Osa y Moliner	14 500,16			142101	340536,25
Puerto deportivo	1 955,20	28630	64775	67571	107702
Ampliación – Muelle Norte	2 280,74			87557	94331

Tabla 14 - Riesgo inoperatividad por agitación y caudal de rebase

Los valores más objetivos corresponden a la zona del puerto deportivo y al Muelle Norte, ya que para el caso de la inoperatividad de la Osa, que se produce por un exceso de caudal de rebase, se ha considerado la rentabilidad anual del Muelle de la Osa y del Muelle Moliner al carecer de los datos desagregados para el Muelle de la Osa, resultando en una pérdida económica anual que se produciría en caso de cierre de las dos terminales, no solamente del Muelle de la Osa.

8.3 Riesgo de inestabilidad de las infraestructuras

Mediante el precio por metro lineal de dique establecido en el capítulo 6 de bases de datos de exposición y vulnerabilidad y las curvas que relacionan la variación del peso de las piezas o de la estructura de hormigón en relación a la variación de la altura de ola incidente se ha recalculado el precio por metro lineal de dique que costaría en cada escenario

Estructura	Variación peso piezas %				Coste por metro lineal de dique (euros/ml)			
	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
Dique de Aboño	29,85	48,15	50,80	71,35	18567,99	21185,98	21564,36	24503,02
Dique Torres	2,08	3,20	76,39	78,34	14597,27	14758,17	25223,87	25501,92
Contradique exterior	18,51	29,00	33,89	47,64	16947,40	18446,67	19146,86	21112,21
Contradique Príncipe de Asturias	1,71	3,84	63,74	68,71	14543,93	14848,81	23415,25	24125,54
Dique de la Osa	12,31	18,49	61,92	74,02	16059,63	16944,64	23154,03	24884,39
Dique Norte	2,01	3,34	28,37	30,16	168316,50	170502,75	211810,50	214764,00

Tabla 15 - Precio por metro lineal de dique debido al cambio climático

9 – Adaptación al cambio climático

9. Adaptación al cambio climático

Para concluir la metodología de análisis de riesgo en el Puerto de Gijón se va a proponer una estrategia de adaptación al cambio climático, formada por la evaluación de un conjunto de alternativas posibles, el estudio del momento óptimo de implementación y el desarrollo de una estrategia de seguimiento.

9.1 Identificación de los *hotspots*

Se han definido los escenarios de riesgo de cambio climático y se han evaluado las consecuencias económicamente. A la hora de establecer una estrategia de adaptación, con alternativas que mantengan o reduzcan el riesgo actual, es necesario definir primero las zonas con mayor prioridad de actuación.

El Puerto de Gijón no presenta un gran riesgo de agitación interior o de un excesivo caudal de rebase pero sí presenta actualmente un cierto riesgo de inundación, que se ve incrementado en los escenarios simulados de cambio climático.

En el estudio de inundación del Puerto de Gijón se modelizó un temporal de muy alta intensidad y baja frecuencia que tuvo lugar en febrero de 2014 en la costa asturiana. Con los resultados obtenidos y la validación basada en la campaña de campo del IH Cantabria se determinó la explanada de Aboño como la principal zona afectada por la inundación, tanto actualmente como en escenarios de cambio climático. En los escenarios de cambio climático donde se consideraba un aumento de la altura de ola se producía la inundación de la mayor parte del muelle Norte, especialmente en la zona de la Ampliación.

9.2 Propuesta de alternativas

Alternativas para disminuir el riesgo de inundación de la explanada de Aboño

1. Construcción de un dique exento frente al Dique de Aboño

La alternativa consiste en la construcción de 400 metros lineales (misma longitud que el tramo de dique a proteger) de dique de abrigo vertical exento, en calados comprendidos entre 15 y 20 metros, formados por cajones de hormigón armado con puntal variable. La construcción de la infraestructura tiene como finalidad la disipación de energía y por tanto la disminución de las alturas de ola que llegan a pie de dique.

2. Recrecimiento del espaldón y refuerzo del manto principal del dique

Recrecimiento del espaldón del dique según secciones tipo mediante hormigón armado y en masa y refuerzo del manto exterior mediante la colocación de bloques cúbicos de hormigón de alta densidad de 90 toneladas. El recrecimiento será de 2 metros, alcanzando la cota +16 metros (según el cero del puerto). El objetivo de la alternativa es el de reforzar el Dique de Aboño para garantizar su estabilidad frente al oleaje incidente y reducir su rebasabilidad.

3. Limitación de la actividad en la explanada de Aboño

Esta alternativa propone la limitación de la actividad en la zona superior de la explanada de Aboño y el traslado del parque de explotación de graneles sólidos a una zona menos expuesta. Esta alternativa incluye la instalación de un nuevo parque de graneles sólidos para evitar perjudicar a la actual empresa concesionaria del área expuesto a la inundación.

Alternativas para disminuir el riesgo de inundación en el Muelle Norte

1. Recrecimiento del Dique Torres y del Dique Norte

Recrecimiento de las defensas que albergan el Muelle Norte, con el fin de alcanzar una cota de coronación que permita disminuir la tasa de rebase esperable en el temporal del diseño y así evitar la inundación del muelle. El recrecido se realizará según secciones tipo mediante hormigón armado y en masa y se aplicará en 2.400 metros lineales, correspondientes a la zona más exterior del puerto, y será de 1 metro, que permitirá llegar a la cota +25 metros (según el cero del puerto).

2. Recrecimiento de la explanada del muelle Norte

Recrecimiento de la propia explanada del muelle para evitar las salpicaduras consecuencia de la rotura de las olas en los taludes interiores del puerto. Para ello se realizará un recrecido de 1 metro mediante secciones tipo de hormigón armado y en masa en la zona expuesta al oleaje y un relleno de tierras y pedraplén en el resto de la explanada.

3. Sistema de desagüe

Dotación a la explanada de una pendiente transversal al cantil del muelle, de manera que toda la escorrentía superficial (salpicaduras, aguas pluviales) sea vertida directamente al mar. La pendiente se realizará mediante un relleno progresivo de la explanada y será, tal y como establece la ROM 4.1-99, como mínimo del 0,5% y no superará el 1,25% en ningún punto donde pueda haber mercancía almacenada.

9.3 Selección de las alternativas: Análisis Multicriterio

La selección de las alternativas se va a realizar mediante dos análisis multicriterio, uno para la elección de la medida a implementar en Aboño y otro para la elección de la medida a tomar en la zona de la Ampliación.

Para realizar el análisis multicriterio es necesario definir una serie de indicadores y asignar un peso relativo a cada uno, en función de su trascendencia. Posteriormente se puntuará cada alternativa según cada indicador. Con la suma de las calificaciones de manera ponderada se llegará a la solución a adoptar.

Indicador	Descripción	Definición	Peso relativo
1	Probabilidad de logro de los objetivos	Grado de solución del problema	30
2	Coste monetario	Coste de ejecución de la alternativa	25
3	Flexibilidad de la medida	Grado en que la medida se puede adaptar al cambio climático.	15
4	Beneficios adicionales	Beneficios adicionales derivados de la implantación de la alternativa, como la protección frente a otro impacto.	10
5	Impactos sobre el ecosistema	Grado de uso de recursos naturales para la implantación de la medida.	10
6	Aceptación social	Grado de aceptación de la alternativa por parte de la sociedad de Gijón.	10

Tabla 16 - Indicadores definidos para el análisis multicriterio

9.3.1 Estudio alternativas Aboño

Valoración asignada a los indicadores para cada alternativa

1. Probabilidad de logro de los objetivos

Probabilidad de disminución de la inundación en la explanada de Aboño, con el objetivo de evitar el daño de las instalaciones del parque de explotación y almacenamiento de graneles sólidos.

Dique exento

La presencia del dique creará una zona abrigada que provocará la disminución de las alturas de ola que llegan al Dique de Aboño, garantizando que no se produzca el rebase del mismo.

Recrecimiento espaldón

El recrecimiento del espaldón no disminuirá las alturas de ola que llegan a pie de dique pero sí impedirá que la mayoría de ellas rebasen la cota de coronación, evitando la inundación de la explanada.

Limitación actividades

Esta alternativa no va al foco del problema sino que busca una solución, como es el traslado de los activos expuestos a una zona menos vulnerable, por lo que el objetivo principal sí se cumple.

Indicador 1: probabilidad de logro de los objetivos		
Dique exento	Recrecimiento espaldón	Limitación actividades
1	0,75	0,5

2. Coste monetario

Se ha asignado 1 a la alternativa más económica y 0 a la de mayor importe. Para la alternativa de coste intermedio se ha interpolado entre el presupuesto de las otras dos.

Dique exento

La construcción de 400 metros lineales (misma longitud que el tramo de dique a proteger) de dique de abrigo vertical exento, en calados comprendidos entre 15 y 20 metros, formados por cajones de hormigón armado con puntal variable, supone un presupuesto estimado de ejecución de 25.000.000 €.

Recrecimiento espaldón

Recrecido mediante encofrado deslizante del espaldón existente en los tramos 2, 3 y 4 del Dique de Aboño para alcanzar una cota de coronación que permita disminuir la tasa de rebase esperable en el temporal del diseño. El recrecido será de 1 metro para alcanzar la cota +15 metros. También se realizará el refuerzo del mato exterior mediante la colocación de bloques de hormigón de alta densidad.

El presupuesto estimado de ejecución es de 7.000.000 €.

Limitación actividades

Limitación de actividad en la zona del trasdós del Dique de Aboño para evitar la inundación de instalaciones y zonas de almacenamiento de graneles sólidos. Para ello se construirá un parque de almacenamiento, manipulación y distribución de graneles sólidos en otro terreno disponible en el puerto, incluyendo el equipamiento del parque (máquina combinada, cintas y torres de transferencia, elementos de instrumentación y control, etc.).

El presupuesto estimado es de 18.0000.000 €.

Indicador 2: coste monetario		
Dique exento	Recrecimiento espaldón	Limitación actividades
0	1	0,4

3. Flexibilidad de la medida

Valoración de la flexibilidad de la alternativa según su adaptabilidad al cambio climático, de manera que para una variación de las dinámicas la alternativa pueda adaptarse para seguir manteniendo la protección actual. En la escala utilizada, 1 supone una total adaptabilidad de la alternativa al cambio climático.

Dique exento

Esta alternativa no es flexible desde el punto de vista económico. En un dique exento es bastante más barato tener en cuenta el efecto del cambio climático a priori, en el proyecto constructivo, que recrecer el espaldón una vez que el efecto del cambio climático sea efectivo, debido a las dificultades constructivas.

Recrecimiento espaldón

El recrecimiento del espaldón puede realizarse de manera incremental en función de la variación de las dinámicas por efecto del cambio climático. Por tanto, la alternativa sí es flexible pero la adaptación de la misma se realiza de manera artificial, incrementando poco a poco el espaldón.

Limitación actividades

La limitación de las actividades en la zona afectada y el traslado a una zona menos vulnerable soluciona el problema de inundación en esa área concreta, pero en caso de variación de las dinámicas, puede suponer la inundación de la nueva zona.

Indicador 3: flexibilidad de la medida		
Dique exento	Recrecimiento espaldón	Limitación actividades
0	0,75	0

4. Beneficios adicionales

Puntuación de la alternativa según el número de beneficios adicionales derivados de su implantación.

Dique exento

El principal beneficio adicional derivado de la construcción de un dique exento es su capacidad de control de la erosión, reteniendo sedimento en su trasdós. La presencia de un dique exento delante de una playa contribuye a su regeneración, pero los efectos del dique en la situación de estudio, delante del Dique de Aboño, carecen de utilidad, resultando una construcción poco económica debido al no aprovechamiento de todo su potencial.

Recrecimiento espaldón

El recrecimiento del espaldón supone, además de la minimización de la inundación al impedir el rebase de olas de gran intensidad, la disminución del riesgo de inoperatividad por exceso de caudal de rebase.

Limitación actividades

La limitación de las actividades en la zona afectada y el traslado a una zona menos vulnerable soluciona el problema de inundación en esa área concreta, pero en caso de inundación de la nueva zona como consecuencia de la variación de las dinámicas, implica un nuevo traslado de las instalaciones.

Indicador 4: beneficios adicionales		
Dique exento	Recrecimiento espaldón	Limitación actividades
0	0,5	0

5. Impactos sobre el ecosistema

Valoración del uso de los recursos naturales necesarios para la implantación de la alternativa y el impacto ambiental que ésta produce. La puntuación 0 supone el máximo impacto ambiental.

Dique exento

La construcción de un dique exento supone, además del uso de grandes cantidades de hormigón, la introducción en el ecosistema de un elemento artificial de grandes dimensiones que provoca cambios en el transporte de sedimentos y en el sistema de corrientes, generando gran impacto en el hábitat.

Recrecimiento espaldón

El recrecimiento del espaldón supone la introducción de hormigón en un sistema artificial existente, que es el Dique de Aboño, por tanto no se añade un nuevo impacto sobre el ecosistema. La construcción de un espaldón más alto va a generar mayor reflexión del oleaje, aumentando la agitación en la zona exterior del dique.

Limitación actividades

El traslado y construcción de un nuevo parque de explotación de graneles sólidos implica la contaminación de una nueva zona.

Indicador 5: impactos sobre el ecosistema		
Dique exento	Recrecimiento espaldón	Limitación actividades
0	0,5	0,5

6. Aceptación social

Las obras de Ampliación del Puerto de Gijón provocaron gran descontento entre los ciudadanos debido al gran impacto visual generado por la construcción de las nuevas infraestructuras. Es por ello que es preferible una alternativa que no genere más impacto estético.

Dique exento

El dique exento supone la construcción de una nueva infraestructura, con gran impacto visual.

Recrecimiento espaldón

El recrecimiento del espaldón si genera un mayor impacto visual que el producido por el dique actual, pero el impacto es mínimo en comparación con una nueva infraestructura.

Limitación actividades

La consecuencia de la limitación de la actividad y su traslado a otra zona, la construcción del parque de explotación, genera un impacto visual mayor que el generado por el recrecimiento, ya que determina el carácter industrial de la zona.

Indicador 6: aceptación social		
Dique exento	Recrecimiento espaldón	Limitación actividades
0	0,75	0,5

Valoración de posibles sinergias

La corrección de los pesos relativos de los indicadores en función de la alternativa permite tener en consideración las posibles sinergias, positivas o negativas, existentes entre los indicadores considerados.

Dique exento

Como se ha subrayado anteriormente, una propuesta constructiva de esta magnitud supone el rechazo social total, no por el coste sino por el impacto estético. Esto implica que el indicador

de aceptación social tenga un mayor peso que el considerado inicialmente, y el coste y la probabilidad de logro un menor peso.

Recrecimiento espaldón

La reducción del riesgo de inundación debido al recrecimiento del espaldón tiene relación directa con otro impacto, que es la disminución del riesgo de inoperatividad de la explanada debido a un excesivo caudal de rebase. Esta relación positiva entre impactos aumenta el peso de los beneficios adicionales que supone la implantación de esta alternativa.

Limitación actividades

La limitación de actividad en la principal zona afectada de la explanada de Aboño supone dejar sin utilidad una zona de gran extensión. Es por ello que se considera que la alternativa lleva implícitas unas consecuencias que incrementan su coste más allá del presupuesto propuesto.

Indicador	Descripción	Coeficiente corrector		
		Dique exento	Recrecimiento espaldón	Limitación actividades
1	Probabilidad de logro de los objetivos	0,8	-	-
2	Coste monetario	0,8	-	0,8
3	Flexibilidad de la medida	-	-	-
4	Beneficios adicionales	-	1,3	-
5	Impactos sobre el ecosistema	-	-	-
6	Aceptación social	1,2	-	-

Tabla 17 - Coeficiente corrector para la consideración de sinergias entre variables - Aboño

Valoración final de las alternativas

Finalmente se realiza la ponderación, aplicación del coeficiente corrector y suma de la puntuación de las alternativas y se llega a la solución a adoptar:

Indicador	Peso	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
		Valor	Corrección	Puntuación final	Valor	Corrección	Puntuación final	Valor	Corrección	Puntuación final
1	30	1	0,8	24	0,75	-	22,5	0,5	-	15
2	25	0	0,8	0	1	-	25	0,4	0,8	8
3	15	0	-	0	0,75	-	11,25	0	-	0
4	10	0	-	0	0,5	1,3	6,5	0	-	0
5	10	0	-	0	0,5	-	5	0,5	-	5
6	10	0	1,2	0	0,75	-	7,5	0,5	-	5

Tabla 18 – Ponderación de las alternativas - Aboño

La alternativa a implementar en el Puerto de Gijón para la minimización del riesgo de inundación en la explanada de Aboño es la 2) Recrecimiento del espaldón del Dique de Aboño y refuerzo del manto exterior.

Alternativa		Puntuación
1	Dique exento situado frente el Dique de Aboño	24
2	Recrecimiento espaldón Dique de Aboño	77,75
3	Limitación de las actividades en la explanada de Aboño	33

Tabla 19 - Puntuación final de las alternativas - Aboño

9.3.2 Estudio alternativas Muelle Norte

Valoración asignada a los indicadores para cada alternativa

1. Probabilidad de logro de los objetivos

Valoración de la probabilidad de disminución de la inundación del Muelle Norte, que evitaría daños en las zonas de almacenamiento de graneles sólidos y en las instalaciones de graneles líquidos situadas en el mismo.

Recrecimiento diques

El recrecimiento suficiente de los diques evitará el rebase de la mayor parte de las olas que lleguen a pie de dique, evitando la llegada de salpicaduras a la explanada.

Recrecimiento explanada

El recrecimiento de la explanada no evitará las salpicaduras provenientes de los diques pero sí las derivadas de la rotura de las olas contra los diques interiores del muelle.

Sistema de desagüe

La dotación al muelle de un sistema de desagüe no evita las salpicaduras de agua pero la recirculación de la escorrentía superficial favorece la no acumulación de agua en la explanada y reduce los posibles daños causados por el agua.

Indicador 1: probabilidad de logro de los objetivos		
Recrecimiento diques	Recrecimiento explanada	Sistema de desagüe
1	0,5	0,75

2. Coste monetario

Se ha asignado 1 a la alternativa más económica y 0 a la de mayor importe. Para la alternativa de coste intermedio se ha interpolado entre el presupuesto de las otras dos.

Recrecimiento diques

El recrecimiento de 2.400 metros lineales de dique y el refuerzo de la escollera en la zona del Dique Torres supone un presupuesto estimado de ejecución de 15.000.000 €.

Recrecimiento explanada

El recrecimiento con hormigón de los 2.500 metros lineales de muelle expuestos al oleaje y el posterior relleno de tierras y pedraplén tiene un presupuesto estimado de ejecución de 12.000.000 €.

Sistema de desagüe

El presupuesto estimado del relleno de 1.000.000 m² de explanada para la dotación de una pendiente transversal al cantil del muelle es de 2.000.000 €.

Indicador 2: coste monetario		
Recrecimiento diques	Recrecimiento explanada	Sistema de desagüe
0	0,23	1

3. Flexibilidad de la medida

Valoración de la flexibilidad de la alternativa según su adaptabilidad al cambio climático, de manera que para una variación de las dinámicas la alternativa pueda adaptarse para seguir manteniendo la protección actual. En la escala utilizada, 1 supone una total adaptabilidad de la alternativa al cambio climático.

Recrecimiento diques

El recrecimiento del espaldón puede realizarse de manera incremental en función de cómo vayan variando las dinámicas por efecto del cambio climático.

Recrecimiento explanada

Al igual que el recrecimiento del espaldón de los diques, el recrecimiento de la explanada también puede realizarse de manera incremental para adaptarse a los nuevos impactos producidos por el cambio climático.

Sistema de desagüe

El sistema de desagüe es una medida de rápida implantación que sí puede realizarse de manera incremental, manteniendo al principio una pendiente suave de la explanada y con cierto margen para incrementarla si como consecuencia del cambio climático se produce una mayor acumulación de agua en el Muelle Norte.

Indicador 3: flexibilidad de la medida		
Recrecimiento diques	Recrecimiento explanada	Sistema de desagüe
0,75	0,75	1

4. Beneficios adicionales

Puntuación de la alternativa según el número de beneficios adicionales derivados de su implantación.

Recrecimiento diques

El recrecimiento de los diques, al igual que en el Dique de Aboño, reduce el riesgo de inoperatividad causado por un caudal de rebase excesivo.

Recrecimiento explanada

Aprovechando las obras de recrecimiento de la explanada se pueden disponer contornos disipativos que disminuyan el riesgo de agitación en la dársena del muelle.

Sistema de desagüe

En las zonas dedicadas al almacenamiento de graneles sólidos se podrá recircular el agua contaminada mediante la realización de surcos que desemboquen en una zona controlada, evitando la contaminación del mar.

Indicador 4: beneficios adicionales		
Recrecimiento diques	Recrecimiento explanada	Sistema de desagüe
0,5	0,75	0,5

5. Impactos sobre el ecosistema

Valoración del uso de los recursos naturales necesarios para la implantación de la alternativa y el impacto ambiental que ésta produce. La puntuación 0 supone el máximo impacto ambiental.

Recrecimiento diques

Entre los impactos sobre el ecosistema derivados del recrecimiento de los diques se encuentra, además del consumo de recursos naturales, la generación de una reflexión mayor del oleaje, aumentando la agitación en la zona exterior del dique.

Recrecimiento explanada

El recrecimiento de la explanada y la dotación al muelle de contornos más disipativos no tiene mayor impacto ambiental que el derivado de las obras y el uso de recursos naturales para la construcción de las mismas.

Sistema de desagüe

Como se mencionaba en los beneficios adicionales derivados de la implantación de esta medida, la correcta recirculación de las aguas contaminadas evita la contaminación del agua del mar.

Indicador 5: impactos sobre el ecosistema		
Recrecimiento diques	Recrecimiento explanada	Sistema de desagüe
0	0,25	1

6. Aceptación social

Nivel de aceptación social basada en el impacto visual de las alternativas.

Recrecimiento diques

El impacto visual derivado del recrecimiento de un metro de dique no es muy grande.

Recrecimiento explanada

El impacto visual derivado del recrecimiento de la explanada es mínimo.

Sistema de desagüe

No supone ninguna obra constructiva ni un impacto visual apreciable

Indicador 6: aceptación social		
Recrecimiento diques	Recrecimiento explanada	Sistema de desagüe
0,5	0,75	1

Valoración de posibles sinergias

La corrección de los pesos relativos de los indicadores en función de la alternativa permite tener en consideración las posibles sinergias, positivas o negativas, existentes entre los indicadores considerados.

Recrecimiento diques

La reducción del tiempo de inoperatividad del muelle debido a la reducción del caudal de rebase permite reconsiderar la alternativa como opción a pesar de ser la opción de mayor coste, ya que para el escenario de cambio climático que supone un aumento de nivel medio del mar de 1 metro, se supera el umbral aceptable de rebasabilidad.

Recrecimiento explanada

La reducción del riesgo de agitación en esta zona es interesante, ya que para el escenario de cambio climático en el que se supone un aumento del nivel medio del mar de 0,63 metros y un aumento en un 20% de la altura de ola una parte del Muelle Norte es inoperativo.

Sistema de desagüe

El Puerto de Gijón es un puerto que ha supuesto un gran impacto sobre el ecosistema debido a su carácter industrial y a sus grandes dimensiones. La dotación de un sistema de desagüe y la correcta gestión de las aguas contaminadas hacen que los indicadores ambientales, de aceptación social y de beneficios adicionales tengan un mayor peso que el indicado inicialmente.

Indicador	Descripción	Coeficiente corrector		
		Recrecimiento diques	Recrecimiento explanada	Sistema de desagüe
1	Probabilidad de logro de los objetivos	-	-	-
2	Coste monetario	-	-	-
3	Flexibilidad de la medida	-	-	-
4	Beneficios adicionales	1,2	1,5	1,2
5	Impactos sobre el ecosistema	-	-	1,2
6	Aceptación social	-	-	1,2

Tabla 20 - Coeficiente corrector para la consideración de sinergias entre variables - Muelle Norte

Valoración final de las alternativas

Finalmente se realiza la ponderación, aplicación del coeficiente corrector y suma de la puntuación de las alternativas y se llega a la solución a adoptar:

Indicador	Peso	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
		Valor	Corrección	Puntuación final	Valor	Corrección	Puntuación final	Valor	Corrección	Puntuación final
1	30	1	-	30	0,5	-	15	0,75	-	22,5
2	25	0	-	0	0,23	-	5,75	1	-	25
3	15	0,75	-	11,25	0,75	-	11,25	1	-	15
4	10	0,5	1,2	6	0,75	1,5	11,25	0,5	1,2	6
5	10	0	-	0	0,25	-	2,5	1	1,2	12
6	10	0,5	-	5	0,25	-	2,5	1	1,2	12

Tabla 21 - Ponderación de las alternativas - Muelle Norte

La alternativa a implementar en el Puerto de Gijón para la minimización del riesgo de inundación en el Muelle Norte es la 3) Dotación de un sistema de desagüe al Muelle Norte.

Alternativa		Puntuación
1	Recrecimiento diques	52,25
2	Recrecimiento explanada	48,25
3	Sistema de desagüe	92,5

Tabla 22 - Puntuación final de las alternativas - Muelle Norte

9.4 Implementación de las alternativas

Se han implementado a la vez las dos alternativas seleccionadas mediante los análisis multicriterio, ya que corresponden a zonas independientes del puerto. Dado que en el estudio del riesgo se identificaba el subsistema de *Gestión de mercancía* como el mayor afectado por la inundación, se ha implementado además otra medida, consistente en la mejora del mantenimiento de las instalaciones dedicadas a la gestión de mercancía. Para ello se ha reducido la pendiente de las curvas de daño y se ha optimizado el tiempo de inoperatividad causado por una cota de inundación menor a 0,5 metros a 1 día, y el tiempo causado por una cota de entre 0,5 y 1 metros a 2 días.

En las siguientes figuras 77 y 78 se puede ver la mancha de inundación producida en la explanada de Aboño y en el Muelle Norte en la situación actual (rojo) y encima la mancha de inundación con las medidas de adaptación implementadas (azul). Todas las manchas rojas que se ven son manchas de inundación que ya no existen gracias a las alternativas adoptadas. Se puede ver cómo sigue existiendo inundación en la zona del Muelle Norte expuesta al oleaje, pero no es debido al mal funcionamiento de las medidas adoptadas sino al funcionamiento del modelo, que acumula agua en el contorno de entrada.

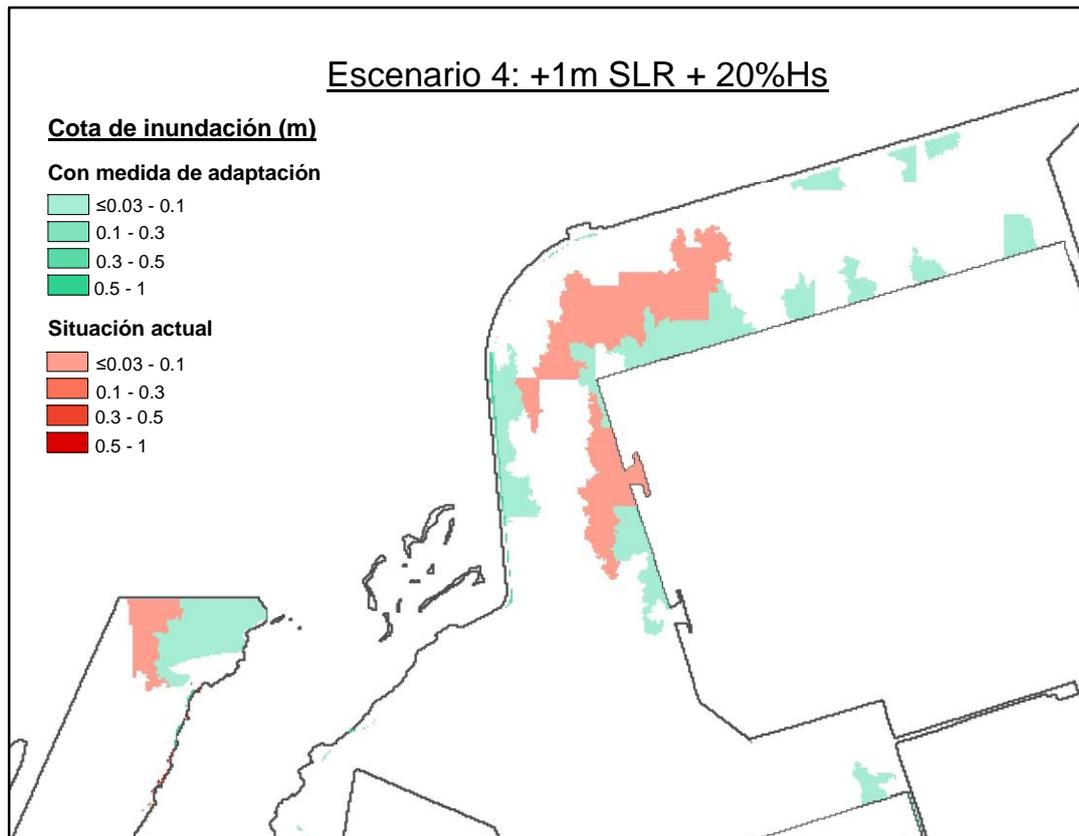


Figura 77 - Comparación mancha de inundación antes y después de la adaptación: Escenario 4

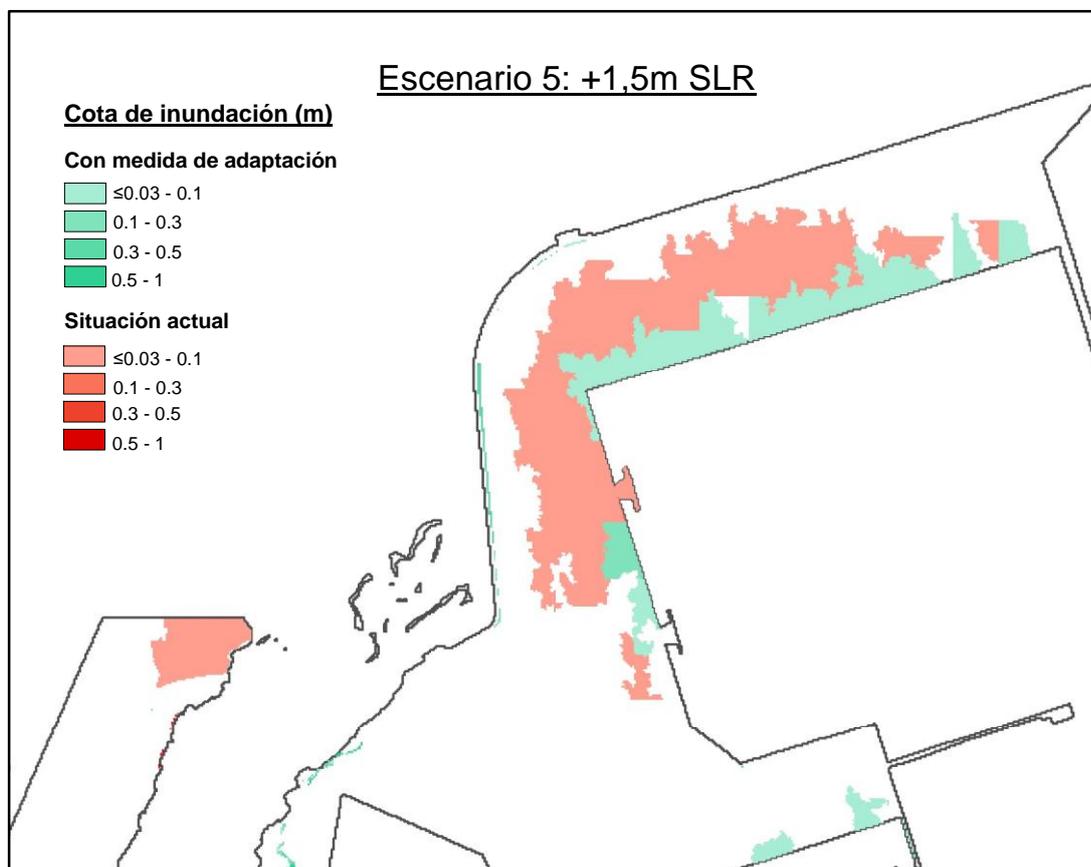


Figura 78 - Comparación mancha de inundación antes y después de la adaptación: Escenario 5

Se ha realizado de nuevo un estudio de riesgo de la inundación para poder comparar la efectividad de las medidas adoptadas:

En la tabla 23 se recogen en las dos primeras columnas los daños producidos por la inundación del temporal de diseño para una situación del Puerto de Gijón donde las alternativas han sido implementadas. En las dos segundas columnas (%) se muestra el porcentaje de daño reducido con la adopción de las medidas.

Se puede observar cómo la implementación de las medidas es más eficaz para los escenarios más extremos y cómo con la mejora del mantenimiento de las instalaciones el daño producido en el escenario que incluye la lluvia torrencial se decremента considerablemente.

	ESCENARIO	Daño efectivo adaptación	Flujo efectivo adaptación	% Reducción de daño activos	% Reducción de daño flujo
E0	Base	226 169,25 €	8 952,16 €	27,56%	52,12%
E1	SLR +0,63m (Slangen et al., 2014)	555 619,26 €	20 921,51 €	27,57%	51,59%
E2	SLR +1m	597 516,00 €	20 917,73 €	22,77%	51,78%
E3	SLR +0,63m + 20%Hs	1 064 083,05 €	32 448,55 €	69,80%	59,25%
E4	SLR +1m + 20%Hs	1 165 912,62 €	32 501,22 €	69,69%	59,69%
E5	SLR +1,5m	2 866 145,86 €	41 755,77 €	58,10%	58,32%
E6	SLR +0,63m + 20%Hs + lluvia torrencial	2 495 880,49 €	61 992,08 €	70,55%	51,93%

Tabla 23 - Medida eficiencia de las medidas en la reducción del daño

El recrecimiento del dique de Aboño tenía como beneficio adicional la mejora de la operatividad en la explanada debido al caudal de rebase. Se ha realizado un análisis del nuevo caudal de rebase para comprobar que efectivamente, reduce hasta en un 98% la inoperatividad inicial del dique.

Estructura	Escenario Base	E1		E2		E3		E4			
		Prob	h/año	Prob	h/año	Prob	h/año	Prob	h/año		
Dique de Aboño	Situación actual	0,997	19,2	0,996	32,4	0,995	41,7	0,987	105,6	0,985	126,0
	Adaptación	0,999	0,22	0,999	0,63	0,999	0,97	0,999	8,7	0,998	11,17
	Reducción inoperatividad	98 %		98 %		97 %		91 %		91 %	

Tabla 24 - Disminución riesgo caudal de rebase en Aboño

9.5 Propuesta de una estrategia de implementación

Una vez establecida la propuesta de adaptación al cambio climático, es necesario determinar una estrategia de implementación, definiendo el momento óptimo de actuación y el plan de seguimiento.

Momento óptimo implementación de las alternativas

Se ha realizado un análisis sencillo para determinar el momento óptimo de implementación de las alternativas. Se ha asumido una adopción simultánea de las medidas ya que el escenario de cambio climático será el mismo en todas las zonas del puerto y por tanto las dos alternativas serán necesarias.

En base al coste de ejecución de las alternativas y a los daños producidos actualmente por la inundación se representan las curvas siguientes. El coste considerado es igual a 9.000.000 €, igual a la suma del coste de las dos alternativas.

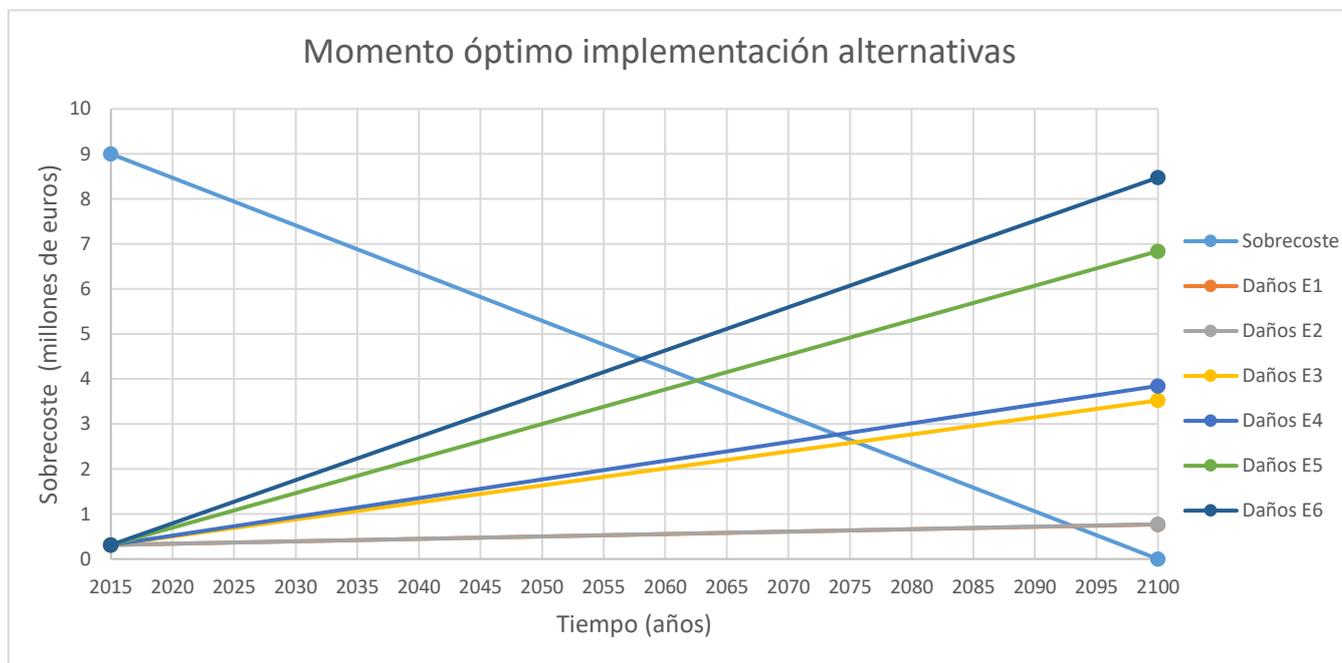


Figura 79 - Momento óptimo de implementación medidas de adaptación

En función del escenario de cambio climático considerado el momento óptimo de implementación será antes (en los escenarios más extremos) o después (en los escenarios más conservadores). De esta manera se tiene que el momento óptimo de adopción de la medida aproximado en cada escenario es el siguiente:

Escenario	E6	E5	E4	E3	E2	E1
Momento óptimo implementación	2058	2063	2074	2076	2093	2093

Tabla 25 - Año de implementación en función del escenario de cambio climático

La curva tiene en cuenta los daños producidos sin la implementación de las medidas, siendo por tanto un análisis muy grosero. Por ejemplo, en el caso del escenario 6 (SLR +0,63 m, 20%*Hs*, lluvia torrencial)

los daños eran muy altos hasta que fue considerada la mejora del mantenimiento de las instalaciones, que se redujeron considerablemente.

Plan de seguimiento

La estrategia de adaptación no estaría completa sin un plan de seguimiento, cuyo objetivo es obtener información acerca de la eficacia y la evolución en el entorno de la implementación de las medidas propuestas.

La evaluación del seguimiento se establecerá a través del desarrollo de sistemas de indicadores, que se puntuarán según el valor medido, el valor esperado y el grado de cumplimiento. Para las medidas de adaptación propuestas en el Puerto de Gijón se plantean por ejemplo los siguientes indicadores, donde el valor esperado y el grado de cumplimiento dependerán de la zona del puerto:

Indicador	Valor medido	Valor esperado	Grado de cumplimiento
Superficie de suelo afectada por la inundación	-	< 50 % de la superficie total	-
Cota de agua alcanzada	-	< 0,5 m	-
Nivel de agitación portuaria	-	En función de la zona, menor que el umbral de inoperatividad máximo establecido por la ROM	-
Caudal máximo de rebase	-		-

Tabla 26 - Indicadores para el plan de seguimiento de las alternativas

Se propone incluir este seguimiento en los informes anuales del puerto. Se rellenará un inventario del estilo de la tabla 26, donde se compararán los valores medidos con los valores esperados, evaluando el grado de cumplimiento de las alternativas. En función del grado de cumplimiento se irán adaptando las medidas adoptadas para mantener la protección del puerto frente al cambio climático.

Conclusiones y futuras líneas de investigación

Conclusiones

Los puertos son infraestructuras especialmente vulnerables al cambio climático debido a su larga vida útil y su localización en la costa, siendo susceptibles a la elevación del nivel medio del mar y los cambios en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones. El papel que desempeñan los puertos en la economía de los países hace necesario el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático. Dado su carácter estático los efectos del cambio climático deben ser tenidos en cuenta desde el diseño del puerto, de manera que puedan afrontar a largo plazo los impactos climáticos y su consecuente evolución.

En este trabajo se ha propuesto y aplicado en el Puerto de Gijón una metodología completa de análisis de riesgo inducido por el cambio climático, enmarcada dentro de la metodología de riesgo adoptada por el IPCC. Se han utilizado bases de datos de alta resolución y sofisticados modelos numéricos que han posibilitado la simulación de los efectos del cambio climático en varios escenarios y la elaboración de una propuesta de adaptación. La aplicación de la metodología desarrollada ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

- La incertidumbre presente en la evolución de las dinámicas hace necesario el estudio de adaptación bajo distintos escenarios para poder desarrollar estrategias que nos permitan contraponernos a todos los estados futuros posibles.
- La calidad de los resultados depende directamente de la resolución de las bases de datos y del pre-tratamiento de la información.
- Para que la simulación de un impacto se ajuste a la realidad es indispensable una correcta interpretación de los resultados, la validación de los mismos y la calibración del modelo numérico.
- Tanto actualmente como en los escenarios conservadores del cambio climático el Puerto de Gijón no presenta problemas de agitación interior o de inestabilidad de las estructuras pero sí tiene un riesgo actual de inundación, que se verá incrementado en las próximas décadas.
- Los efectos de los impactos climáticos no sólo tienen consecuencias económicas directas sobre el puerto, sino que pueden afectar a la competitividad del mismo y, en el caso de Gijón, hacer perder su papel estratégico en el norte de la Península.
- El Puerto de Gijón puede adaptarse fácilmente a la variación de las dinámicas climáticas y así mantener el crecimiento del principal motor económico del Principado de Asturias.

Futuras líneas de investigación

En este trabajo se han manejado varias variables del cambio climático y se han combinado para definir posibles escenarios, pero se podía haber manejado un abanico más amplio que cubriera progresivamente todas las opciones.

El uso del modelo RFSM-EDA en este trabajo para el modelado de la inundación ha estado sujeto a varias limitaciones debido a la pequeña escala en la que se trabajaba, desconociendo el comportamiento del modelo en ciertas ocasiones. Con las calibraciones adecuadas la herramienta numérica puede ajustar los resultados de manera mucho más realista.

El desarrollo de una metodología para el análisis del riesgo en el Puerto de Gijón ante eventos meteorológicos extremos y el cambio climático responde a la necesidad de adaptación de los puertos ante la inminencia de los efectos del cambio climático. Todos los puertos deberán incorporar a corto plazo este tipo de metodologías en sus estudios generales, tal y como llevan haciendo desde 2012 países como Inglaterra.

Anexos

Anexos

Modelo para la simulación de la inundación: RFSM-EDA

El modelo numérico utilizado para simular la inundación en tierra ha sido el RFSM-EDA (*Rapid Flood Spreading Method - Explicit Diffusion wave with Acceleration term*), un modelo hidrodinámico bidimensional desarrollado inicialmente en HR Wallingford y diseñado para funcionar de manera eficiente en todas las escalas, proporcionando profundidades de agua sobre el terreno y velocidades con tiempos de ejecución cortos. Su algoritmo permite tener en cuenta rasgos característicos de la topografía como las crestas y los puntos bajos derivados de un Modelo Digital del Terreno (MDT) de alta resolución, utilizando elementos computacionalmente grandes.

El modelo incorpora las siguientes hipótesis de partida:

- El dominio puede ser dividido en depresiones topográficas discretas e hidráulicamente consistentes, llamadas Impact Zones (IZs).
- La cota de la superficie del agua en cada IZ es constante.
- La relación entre la cota de la superficie de agua y el volumen en una IZ puede ser definido por una relación no-histerética.
- El flujo entre dos IZs adyacentes se calcula linealmente a lo largo de la interfaz entre ellas, independientemente del resto de vecindades.
- La interfaz puede ser caracterizada mediante una relación nivel-anchura, donde se asume que la anchura aumenta cuando lo hace el nivel.

Preproceso

AccData es la herramienta utilizada en el pre-proceso para el análisis topográfico de la llanura de inundación. Mediante la entrada de la topografía en forma de MDT y el área inundable de estudio, el algoritmo identifica las características topográficas más relevantes y las guarda y utiliza para la creación de la malla computacional del RFSM-EDA. Esta malla está formada por una serie de polígonos, conocidos como Impact Zones (IZs), y al estar basada en la topografía real tiene una forma irregular. A su vez las IZs están compuestas por un conjunto de celdas (*Impact Cells*) que drenan en el mismo punto bajo, denominado Punto de Acumulación.

El proceso comienza con la identificación de los puntos bajos del MDT. Cuando se localiza un punto alto, las Impact Cells situadas entre el Punto de Acumulación y el punto alto se asignan al Punto de Acumulación. Todas las Impact Cells asignadas al mismo Punto de Acumulación forman una Impact Zone.

Las interfaces entre las IZs son puntos altos de la topografía. El punto más bajo de cada interfaz entre las IZs es Punto de Comunicación, y es el punto a través del cual el agua fluye entre celdas. En la figura 80 se representan dos *Impact Zones* y sus puntos de Comunicación y Acumulación.

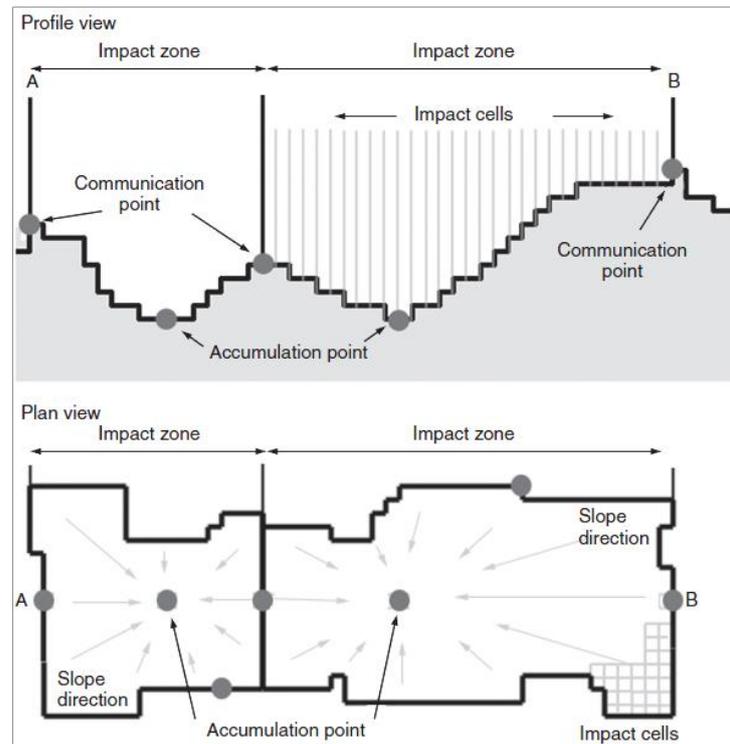


Figura 80 – Esquema de Impact Zones y sus puntos de comunicación (Benwell et al., 2008)

Además de establecer la geometría de las IZs, el algoritmo detalla la representación de la topografía a través de los contornos entre las Impact Cells. También calcula las características que incluyen la conectividad de las IZs y la relación de volumen/nivel para cada IZ. Toda esta información se guarda en tablas CSV en una base de datos SQL con fines de verificación y posterior ejecución.

AccData permite al usuario controlar las características de la malla computacional, dando la posibilidad de ajustar el tamaño mínimo y máximo de las IZs hasta que alcancen formas y tamaños similares, y permite la creación automática de las tablas de la malla en la base de datos.

Simulación hidráulica

Durante la simulación hidráulica el modelo recibe volúmenes de descarga en la llanura de inundación a través de cada IZ costera, utilizando el nivel del mar total o el caudal de rebase como dinámicas forzadoras. Como estamos trabajando con un puerto, el modelo alimentará sus celdas con el caudal que rebasa los diques y muelles.

El agua recibida en las IZ costeras se descarga en sus IZ vecinas siguiendo el siguiente proceso: el volumen de agua en cada IZ se compara con el nivel de comunicación y si éste es alcanzado se calcula el volumen de agua sobrante, que es descargado en las IZ vecinas. El proceso se va repitiendo de manera que el volumen sobrante va disminuyendo hasta desaparecer, y es entonces cuando se obtiene la cota de agua inundada final, al ser constante el volumen de agua presente en cada IZ (Losada Rodríguez, y otros, 2016).

En la figura 81 se ilustra el paso de agua de una IZ a otra a través de la frontera de comunicación y el llenado de la IZ vecina desde el punto más bajo, el de acumulación.

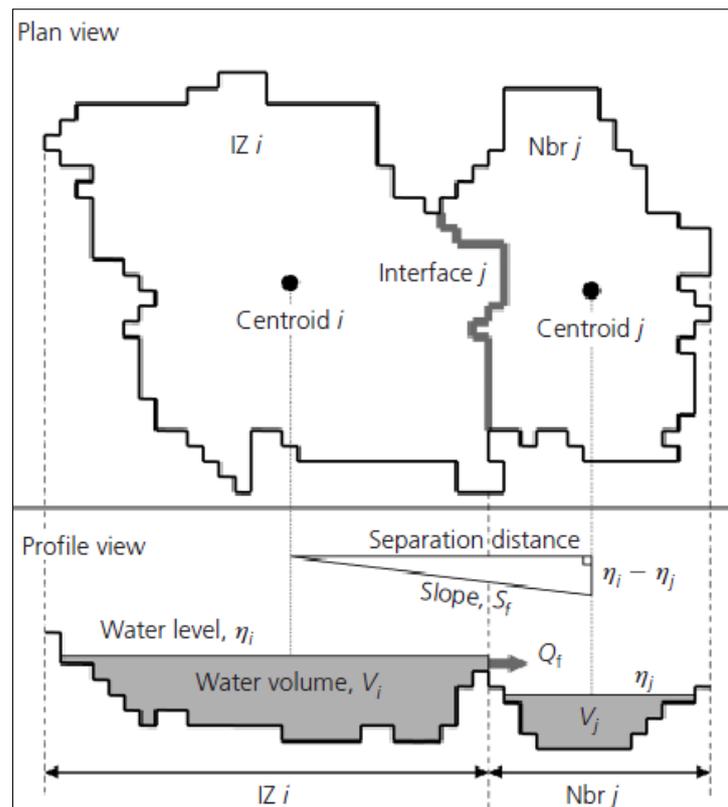


Figura 81 - Esquema de una IZ y su IZ vecina, vista en planta y de perfil (Gouldby et al., 2012)

Método numérico

El RFSM-EDA es un modelo basado en el método de almacenamiento de celdas y responde a una aproximación difusiva de las *Shallow Water Equations* (SWE). Difiere de los modelos simplificados de onda difusiva al incorporar un término adicional, la aceleración local, que proporciona estabilidad y tiempos más rápidos de ejecución (Bates et al. 2010).

Ecuaciones de gobierno

La simulación comienza con las ecuaciones en 1-D de Saint Venant, la inercia advectiva se considera despreciable y las ecuaciones se discretizan semi-implícitamente pero se muestran de manera explícita.

El caudal entre dos IZs se determina como la suma de los caudales calculados para cada celda, p, en la interfaz. Esto evita los cambios bruscos que se pueden producir en el radio hidráulico en caso de simular la inundación en un terreno topográficamente complejo.

El caudal entre dos IZs se calcula utilizando la ecuación del momento:

$$Q_f^{t+\Delta t} = \sum_p \frac{(Q_p^t - g\Delta t A_p^t \cdot S_f^t)}{1 + g\Delta t n^2 |Q_p^t| / A_p^t (R_p^t)^{4/3}}$$

Donde:

Q_f – Es el caudal en la interfaz (m^3/s)

Q_p – Es el caudal que atraviesa la pared de una celda (m^3/s)

Δt – Es el paso de tiempo (s)

g – Es la aceleración gravitacional

A_p – Es el área de la pared de la celda

R_p – Es el radio hidráulico de la celda, que incluye la fricción vertical y horizontal (m)

n – Es el coeficiente de Manning

S_f – Es la pendiente de la superficie de agua, calculada como la diferencia entre el nivel de agua en la IZ y el nivel de agua en la IZ adyacente, dividida entre la distancia entre los centroides.

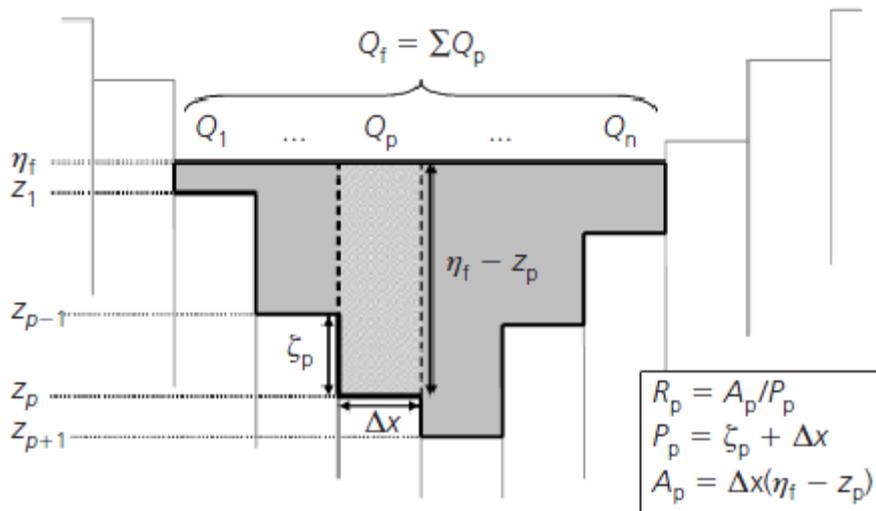


Figura 82 - Esquema de una interfaz entre dos Impact Zones vecinas (Jamieson et al. 2012)

La figura 82 muestra un esquema de la interfaz entre dos Impact Zones vecinas. El color gris representa el agua que inunda la interfaz y el cuadrado resaltado con línea discontinua representa la pared de cálculo que corresponde a una celda.

La simulación avanza con la aplicación de la ecuación de la continuidad (ley de conservación de la masa) en cada IZ:

$$V_i^{t+\Delta t} = V_i^t + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^n Q_j^{t+\Delta t}$$

Donde:

V_i – Es el volumen en cada IZ

n – Es el conjunto de IZs vecinas.

Los volúmenes luego se convierten en nivel de agua en la IZ mediante la relación definida anteriormente en las tablas creadas durante el pre-proceso.

Estabilidad numérica

La estabilidad del modelo, y por tanto su paso de tiempo adaptado, está sujeta a la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) (Guniot y Soares – Frazao, 2006), que se cumple asegurando que el dominio de dependencia entre las interfaces de una IZ no supere el área de la IZ.

No se puede utilizar un paso de tiempo arbitrario grande ya que no está permitido que fluya más de un espacio en la cuadrícula dentro de un espacio de tiempo.

El máximo paso de tiempo permitido, $\Delta t_{m\acute{a}x}$, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\Delta t_{m\acute{a}x} = \alpha_{min} \frac{A_i^t}{\sum_j w_f \max(|u_i^t| + c_i^t, |u_j^t| + c_j^t)}$$

Donde:

α – Es el parámetro utilizado en el paso de tiempo

A_i – Es el área de la IZ (m²)

w_f – Es el ancho de la interfaz (m)

u_i – Es la magnitud del vector de velocidad de la IZ (M/s)

c_i – Es la celeridad de la onda (m/s) dada por \sqrt{gh} , donde h es la profundidad de agua de la IZ.

Resultados de salida

Los resultados del modelo se guardan las siguientes tablas, que incluyen información relativa a los parámetros más importantes de los que depende el caudal, como el nivel de agua o la velocidad.

- *tusrRun*: contiene la lista y la descripción de las pruebas simuladas.
- *tusrResultsIZMax*: guarda los valores máximos del Nivel de Agua (m), la Profundidad (m, medida desde el punto más bajo de la IZ), la Descarga (m³/s, la descarga media a través de la IZ), la Velocidad (m/s, velocidad media a través de la IZ) y el Hazard to Life (un indicador del peligro de la inundación, con una escala del 0 al 20) recogidos durante la simulación en cada IZ.
- *tusrResultsIZTemp*: contiene los parámetros más importantes del caudal en cada IZ para un paso de tiempo (*SaveTimeStep*), como el Volumen (m³), el Nivel de agua (m), la magnitud de la Velocidad (m/s) y la Dirección de la Velocidad (en grados), donde 0 es Este, 90 es Norte, 180 es Oeste y 270 es Sur.
- *tusrResultsIntfMax*: almacena los resultados de la interfaz situada entre dos IZs vecinas. Los parámetros guardados son: el valor máximo del Nivel de Agua (m), la Descarga (m³/s), la Velocidad (m/s) y el Volumen Total transferido a través de la interfaz hacia delante y hacia atrás. Es direccional, así que una velocidad o una descarga positiva significa que el agua va de la IZ a su vecina, y una velocidad o una descarga negativa implica que el agua va de la IZ vecina a la IZ. El volumen neto transferido es la diferencia de estos dos volúmenes.
- *tusrResultsIntfTemp*: almacena los valores temporales del Nivel de Agua (m), la Descarga (m³/s) y la Velocidad (m/s) a través de la interfaz entre los IZs vecinas, donde se especifica direccionalmente de la misma manera que en los resultados máximos.

Estos resultados se guardan para las IZs y para las interfaces entre las IZs, para valores temporales y máximos.

Aplicación del RFSM-EDA

El RFSM-EDA se ha aplicado en el Puerto de Gijón para la simulación de una inundación debido a un temporal de cálculo. Como se mencionaba anteriormente, al tratarse de un puerto la variable de entrada del modelo ha sido el caudal de rebase de las estructuras del puerto. A continuación se presenta el cálculo de las variables de entrada y se enumeran brevemente las mejoras inducidas en las variables de entrada del pre-proceso, siempre con el objetivo de ajustar los resultados obtenidos a la realidad y solucionar posibles incoherencias generadas por el modelo.

Cálculo de las variables de entrada

El caudal de rebase ha sido calculado con formulación semi-empírica que transforma el oleaje propagado a pie de dique en caudal de rebase.

Se ha utilizado el “*Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*”, un manual para el cálculo del caudal de rebase que forma parte de un proyecto en el que participan la *Environmental Agency*, el *German Coastal Engineering Research Council* y el *Rijkswaterstaat, Netherlands Expertise Network on Flood Protection*. El manual recoge formulación semi-empírica para el cálculo del caudal de rebase de las infraestructuras costeras basada en métodos y datos de estudios de investigación de toda Europa.

La formulación escogida del manual para los diques en talud es la siguiente:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m_0}^3}} = 0.2 \exp\left(-2.3 \frac{R_c}{H_{m_0} \gamma_f \gamma_\beta}\right)$$

q – Caudal medio por unidad de longitud de dique ($m^3/s/m$)

H_{m_0} – Altura de ola significativa a pie de dique (m)

R_c – Francobordo

γ_β – Factor corrector de incidencia oblicua de las olas

γ_f – Factor corrector de permeabilidad y rugosidad de la pendiente o no del talud

En los diques verticales se ha considerado la formulación para la tipología de sección vertical de Franco et al. (1999), donde el caudal de rebase se puede expresar a partir de la fórmula obtenida:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m_0}^3}} = 0.082 \cdot \exp\left(-3 \frac{R_c}{H_{m_0} \gamma_f \gamma_\beta}\right)$$

Con el fin de utilizar el caudal máximo para estar del lado de la seguridad se ha tomado la unidad como valor de los dos factores correctores para, siendo el equivalente a tomar una incidencia normal de las olas y un talud de hormigón con pendiente suave.

Por tanto, la formulación del caudal de rebase depende únicamente de dos parámetros, la altura de ola significativa (H_{m_0}) y el francobordo de la estructura (R_c). El francobordo (R_c) es la diferencia entre la cota de coronación de la estructura y el nivel del mar.

Para conocer con exactitud el valor del francobordo la cota de los espaldones de los dique y la cota de los muelles fueron contrastadas con el *Atlas Diques de Abrigo en los Puertos de Interés General del Estado (Años 1986-2011)*.

Mejora de las variables de entrada del pre-proceso

Dado que el modelo numérico se sustenta en la topografía subyacente es fundamental que ésta tenga una calidad óptima, pues la calidad de los resultados depende directamente del nivel de resolución de la topografía. Para ello se ha empleado un modelo digital del terreno (MDT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) basado en datos LiDAR de 5 metros de resolución horizontal, y con el objetivo de tener las infraestructuras costeras del puerto lo mejor definidas posibles, éstas se han digitalizado a partir de planos proporcionados por el Servicio de Puertos e Infraestructuras de Transporte del Principado de Asturias. El resultado es un MDT donde el puerto y todas sus infraestructuras están perfectamente caracterizadas, que hace posible su uso para la formación de la malla de Impact Zones y la obtención de resultados de calidad.

Se ha procurado limpiar del MDT todas las escolleras de las infraestructuras del puerto, ya que se comprobó que inducía a resultados erróneos del modelo. La simulación de la inundación comienza con la descarga de agua rebasada por encima de la estructura a las IZs costeras, y la presencia de la escollera era para el modelo igual a la estructura. Esto implicaba que la cota de coronación del dique se situaba en la escollera, provocando un caudal de rebase irreal.

Al tratarse de un puerto formado por infraestructuras grandes, perfectamente definidas en el MDT gracias a la digitalización de las mismas, en la formación de la malla computacional se observaron errores en el balance de masas, que puede provocar una mancha de inundación mayor de la realmente producida. Esto era debido a que dependiendo del tamaño de la IZ ésta se formaba siguiendo la forma del espaldón de los diques, generando un polígono muy alargado con una forma y tamaño muy distinto del resto de IZs, provocando un balance de masas muy grande. El tamaño máximo y mínimo de las IZs se calibró buscando hacer cero el balance de masas y cuidando que las IZs tuvieran tamaños similares. El resultado fueron IZs con un tamaño medio de 7.500 m², donde si bien alguna IZ seguía la forma del espaldón y generaba un polígono alargado, el balance de masas obtenido era 0.

Por último, se llevaron a cabo diversas calibraciones en la malla computacional para subsanar el problema de desagüe del modelo en puertos, ya que acumula agua y no desagua del todo en las IZs costeras, las IZs de entrada de las variables. Para ello se calibraron las celdas de entrada y salida de agua del modelo.

Validación de los resultados del modelo

La calibración del modelo para la correcta obtención de los resultados fue posible gracias al registro existente de daños del temporal, tanto de la campaña de campo realizada por IH Cantabria en la costa asturiana como del inventario de la propia Autoridad Portuaria de Gijón.

Modelo para el estudio de la agitación portuaria: MSP2D-SP

El modelo numérico utilizado para el estudio de la agitación portuaria ha sido el MSP2D-SP, un modelo desarrollado por IH Cantabria que se basa en la aproximación elíptica de las ecuaciones de la pendiente suave, propuestas originalmente por Berkhoff (1972), empleando para ello un esquema de elementos finitos. Estas ecuaciones resuelven el flujo oscilatorio dentro de geometrías portuarias complejas y sobre batimetrías reales, teniendo en cuenta forzamientos monocromáticos e irregulares de oleaje multidireccional.

El MSP resuelve los patrones estacionarios de propagación de oleaje y las ondas largas, su transformación, reflexión y agitación, dentro de dominios numéricos con contornos complejos, sobre batimetrías reales, a través de la utilización de mallas adaptativas en elementos finitos y resolviendo los patrones bidimensionales de velocidades, superficie libre y altura de ola, considerando los procesos de asomeramiento, refracción, difracción, reflexión parcial y radiación del oleaje hacia el exterior del puerto. El potencial que ofrece el modelo radica en la capacidad de analizar el efecto de la reflexión múltiple/parcial de un tren de olas en el interior del puerto, incluyendo todos los patrones de difracción producidos por los distintos muelles, espigones y diques.

En este trabajo se han propagado un total de 528 oleajes monocromáticos para cada nivel del mar (bajamar, pleamar y superpleamar), siendo el resultado de la combinación de periodos que van de 4 a 19 segundos cada 1 segundo y direcciones que van de 6,54 a 361,54 cada 5 grados.

Aplicaciones del MSP

El modelo ha sido aplicado en proyectos nacionales e internacionales de diversa naturaleza, como en estudios de agitación en puertos reales, prediseño y diseño de nuevas instalaciones portuarias, estudios lineales de resonancia en puertos, estudios de operatividad y gestión portuaria o diseño de sistemas operacionales de ayuda a la construcción y explotación portuaria, entre otros muchos.

Ecuaciones de gobierno

La ecuación de la pendiente suave, la *mild slope*, fue introducida por Berkhoff (1972) para estudiar la propagación de ondas sobre fondos suavemente variables. El modelo MSP fue desarrollado para la resolución completa de esta ecuación. La ecuación de la pendiente suave se puede presentar separada en dos ecuaciones:

$$k^2 - |\nabla S|^2 + \frac{\nabla \cdot C C_g \nabla A}{C C_g A} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \left(C_g A^2 \sigma \frac{\nabla S}{|\nabla S|} \right) = \nabla \left(\frac{E}{C_g \sigma} \right) = 0 \quad (2)$$

En la primera ecuación (1) la primera componente nos da el número de onda real, VS , en función del número de onda k obtenido de la ecuación de la dispersión, más un término corrector debido a la difracción, resultante de los gradientes locales de amplitud y celeridad de la onda. La segunda ecuación (2), es la conservación de la acción de la onda (Losada et al., 1995).

El modelo MSP basado en la ecuación de la pendiente suave es una ecuación 2-D y debe ser resuelta con unas apropiadas condiciones de contorno debido a su carácter elíptico. El dominio de interés debe ser discretizado y resuelto simultáneamente y el tamaño de los elementos tiene que cumplir una definición de entre 10 y 15 nodos para la mínima longitud de onda a ser simulada. Esto hace que el coste computacional del modelo sea elevado, especialmente para las dimensiones de malla a ser evaluadas en este estudio, por lo que se decidió utilizar una malla para resolver oleajes de períodos

superiores a 3 segundos. Cabe mencionar que esta hipótesis de separación de la energía espectral en el umbral de 3 segundos es adecuada, ya que si miramos la clasificación frecuencial de las ondas de superficie en la zona de estudio, el rango propuesto se encuadra prácticamente la totalidad de la energía asociada a cada uno de los espectros de cada uno de los estados de mar horarios de la serie DOW.

Generación de la malla computacional

El modelo MSP trabaja con una malla adaptativa en elementos finitos triangulares no regulares que permite optimizar los recursos que el modelo MSP requiere (memoria CPU), ya que los nodos y elementos de la malla en elementos finitos a ser generada, se adaptan a los contornos geométricos del puerto y a las cotas batimétricas correspondientes, concentrando de esta forma un mayor número de elementos para las zonas más someras del dominio y relajando la malla para las zonas más profundas. Es importante asegurarse que la malla generada permita evaluar de forma adecuada el mínimo periodo de onda. Por otro lado, debe crearse un contorno abierto semicircular para el tratamiento especial de los contornos abiertos, y entrarán, como input del modelo, los coeficientes de reflexión, que deberán variar de una zona a otra de los contornos.

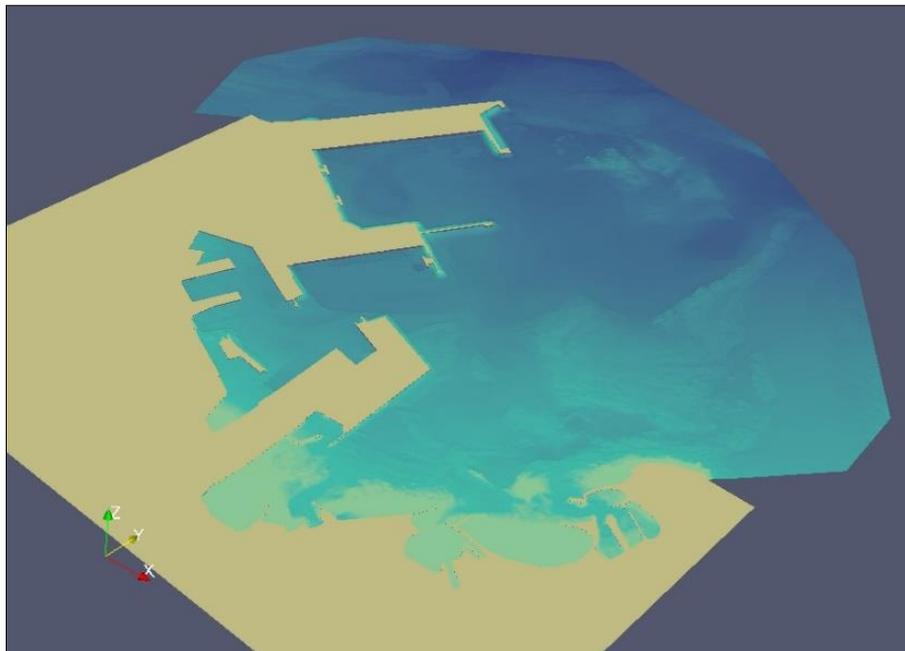


Figura 83 - Malla computacional del MSP (Proyecto SAMOA)

En este apartado se muestran los pasos ordenados a seguir para un diseño adecuado de los dominios numéricos que representaran las geometrías del puerto de Gijón considerando tres diferentes niveles del mar para su propagación.

Los dominios numéricos deben obedecer a las solicitudes propias de los modelos a ser aplicados en este estudio, por lo que para iniciar con el trabajo de construcción los dominios computacionales, en primer lugar se deben tener en cuenta las cotas batimétricas en las zonas exteriores e interiores al puerto de Gijón.

Uno de los objetivos fundamentales del estudio de agitación portuaria para el Puerto de Gijón, es el poder contar con un catálogo de estados de mar suficientemente extenso, para poder evaluar adecuadamente los regímenes de agitación por onda corta dentro de las dársenas portuarias. Debido a que el estudio de agitación supone la interacción del oleaje con estructuras portuarias, será necesario modelar adecuadamente los fenómenos propios de la transformación del oleaje, considerando especialmente la reflexión del mismo que en el caso del puerto de Gijón, puede llegar a ser el proceso de transformación que impere dentro de las dársenas. Por lo tanto, se establece la utilización de un modelo que contemple la interacción onda-obstáculo, utilizando para ello el modelo MSP.

Dentro del diseño de los dominios computacionales, se debe tener en cuenta los criterios de eficiencia numérica y de optimización de recursos, para de esta forma poder contar con un catálogo extenso de casos de agitación portuaria. A la hora de aplicar los modelos numéricos, un condicionante importante es el tiempo computacional. Es necesario llegar a un equilibrio entre la resolución necesaria exigida al modelo para obtener resultados satisfactorios y las limitaciones computacionales, ya que será necesario obtener los resultados en un tiempo adecuado.

La zona de estudio en el Puerto de Gijón es amplia, y debido a los requerimientos computacionales, la malla que se ha utilizado sirve para resolver la agitación del oleaje con períodos superiores a los 3 segundos, por lo que no se tiene en cuenta la energía espectral para frecuencias superiores. Sin embargo, esta limitante en la energía frecuencia del espectro se considera adecuada ya que la energía de los espectros del oleaje asociada a frecuencias inferiores se puede considerar despreciable.

Debido al elevado coste computacional de la malla se ha utilizado una malla ya existente y perteneciente al proyecto SAMOA (Sistemas de Apoyo Meteorológico y Oceanográfico a las Autoridades Portuarias), un proyecto que desarrolla una metodología numérica para la predicción operacional de la agitación en una serie de puertos a lo largo del litoral español, entre los que se encuentra el Puerto de Gijón.

En la tabla 27 se muestran el número de nodos y elementos obtenidos las mallas en elemento finito diseñadas para el modelo MSP. Cabe mencionar que el tamaño de las mallas considerado en el estudio se mantiene constante para cada una de los niveles del mar, ya que ha decidido trabajar con una malla base (nodos y elementos) más restrictiva (bajamar) para posteriormente adoptar cada una de ellas las cotas batimétricas correspondientes a cada uno de los tres niveles del mar.

Nodos	Elementos
356747	707244

Tabla 27 - Características malla computacional MSP

Como se ha mencionado anteriormente, los contornos numéricos que definen a los puertos, requieren establecer el coeficiente de reflexión parcial en función de la tipología de cada estructura que representan. Para el caso del Puerto de Gijón, dichos coeficientes se han determinado siguiendo las recomendaciones del documento: “Metodología de trabajo y recomendaciones prácticas para el estudio de agitación y resonancia en puertos”, redactado por el GIOC (2005).

La figura 86 muestra los coeficientes numéricos de reflexión consideradas para el Puerto de Gijón. Los valores aproximados del coeficiente de reflexión son de 1 para diques verticales de 0,45 y 0,5 para las escolleras de protección y algunos muelles.

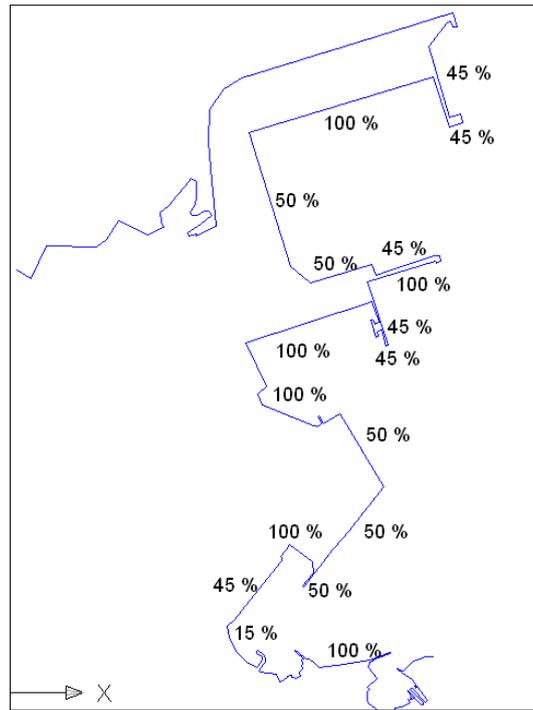


Figura 86 - Coeficientes de reflexión utilizados en la malla MSP (Proyecto SAMOA)

Bibliografía

Atlas Diques de Abrigo en los Puertos de Interés General del Estado (Años 1986-2011) - Puertos del Estado, Gobierno de España.

Autoridad Portuaria de Gijón (2014). Memoria Anual Puerto Gijón - Principado de Asturias, España.

Autoridad Portuaria de Gijón (2013). Memoria Puerto de Gijón - Principado de Asturias, España.

Autoridad Portuaria de Gijón (2016).www.puertogijon.es.

Ayuntamiento de Gijón. Plan Estratégico de Gijón 2002-2012.

Camus P., Méndez F.J., Medina R. and A.S. Cofiño (2011). Analysis of Clustering and Selection Algorithm

Camus P., Mendez F.J., Medina R., Tomas A., Izaguirre C. (2013). High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas, Coastal Engineering, Vol. 72, pp 56-68.

Cid, A., Castanedo, S., Abascal, A. J., Menéndez, M., & Medina, R. (2014). A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: the GOS dataset. Climate Dynamics. doi:10.1007/s00382-013-2041-0.

Church, J. A., and N. J. White (2006). A 20th century acceleration in global sea-level rise, Geophysical Research Letters, 33, L01602.s for the Study of Multivariate Wave Climate. Coastal Engineering 58(6):453-462.

De Waal J.P. and van der Meer J.W. (1992). Wave run-up and overtopping on coastal structures. Coastal Engineering Proceedings.

Díaz-Hernandez G., Lara J.L., Álvarez-Fanjul E., Medina R., Gómez M., Tomas A., Losada I.J., Rodríguez B. and Fernández F. (2005). Módulo 3, Previsión de la Agitación en las Autoridades Portuarias - Proyecto SAMOA. XIII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos.

Díaz J.L., de Riestra M. and Moyano J. (2007). Ampliación del Puerto de Gijón. V Congreso Nacional de la Ingeniería Civil.

Franco L., de Gerloni M. and van der Meer J.W. (1994). Wave Overtopping on Vertical and Composite Breakwaters. Proceedings 24th International Conference on Coastal Engineering, ASCE,1030- 1045.

Franco, L. and Cavani, A. (1999). Overtopping response of core-locs, tetrapods and antifer cubes. Proc. Coastal Structures '99, A.A. Balkema, Rotterdam (1999), pp. 383–387 ISBN 90 5809 092 2.

Führböter A., Sparboom U. and Witte H.H. (1989). Großer Wellenkanal Hannover: Versuchsergebnisse über den Wellenauflauf auf glatten und rauhen Deichböschungen mit der Neigung - Archive for Research and Technology on the North Sea and Baltic Coast.

Gopi Goteti, 2014. R Package: Hazus. Damage functions from FEMA'S HAZUS software for use in modeling financial losses from natural disasters. Version 0.1.

Gouldby B., Sayers P., Mulet-Martí J. and Benwell D. (2008). A methodology for regional-scale flood risk assessment. Water Management 161(3):169-182.

HR Wallingford (2013). Guidance for the use of RFSM-EDA and AccData.

IPCC (2014). Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Jamieson S.R., Lhomme J., Wright G. and Gouldby B. (2012). A highly efficient 2D flood modelling with subelement topography. *Proceedings of the ICE - Water Management*, Vol. 165, No. 10, 01.11.2012, p. 581 - 595.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G, Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., and Joseph D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–471.

Losada I.J., Medina R., Losada M.A. and Vidal C. (1995). Modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos. *Proyectos y Construcción de Playas Artificiales y Regeneración de Playas*. Universidad de Cantabria.

Losada I.J., Toimil A. and Díaz P. (2016). Asistencia técnica a la elaboración de un estudio sobre la adaptación al Cambio Climático de la Costa del Principado de Asturias.

Losada I.J., Izaguirre C., González B., Sampedro A.T. and Fernández F. (2013). Metodología propuesta para la inclusión del cambio climático en la planificación de la infraestructura: Aplicación a puertos. In *Marco estratégico para la adaptación de la infraestructura al Cambio Climático* (pp. 77-104).

Magaña V. (2013). *Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático-México DF*: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

Negron E.F. (2013). *La Cadena de Suministro y su relación con los Terminales Marítimos*. Informativo Marítimo Portuario.

NU. CEPAL and IH Cantabria (2012). *Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: efectos teóricos*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe

Owen M.W. (1980). *Design of seawalls allowing for wave overtopping*. Hydraulics Research Station, Report No. EX 924.

Puertos del Estado (2007). *Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y áreas de Flotación (ROM 3.1-99)*.

Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H. and van der Meer, J.W. (2007). *EurOtop — Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, 2007*. Environment Agency (UK), Expertise Netwerk Waterkeren (NL), Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (DE)

Reguero, B. G., Menéndez, M., Méndez, F. J., Mínguez, R., & Losada, I. J. (2012). A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering*, 65, 38-55.

Rogelj J., Meinshausen M. and Knutti R. (2012). Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change* 2(4), 248-253.

Rogers P. (1997). Engineering design and uncertainties related to climate change. *Climatic Change* 37, 229-242.

Slangen A.B.A., Carson M., Katsman C.A., van de Wal R.S.W., Köhl A., Vermeersen L.L.A. (2014). Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124, pp. 317-332.

Stenek V. (2011). Climate risk and business: ports - terminal marítimo Muelles el Bosque Cartagena, Colombia. World Bank Group.

Vidal C., Losada M.A., Medina R. and Losada I.J. (1994) Análisis de la estabilidad de diques rompeolas. Universidad de Cantabria.

Watson R. and Wright P. (2010). Shipping in MCCIP Annual Report Card 2010-11, MCCIP-Science Review, 6pp.