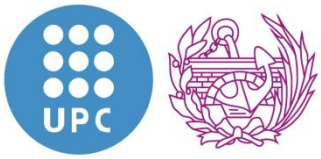

Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

VULNERABILIDAD FÍSICA DE LA COSTA CATALANA A DIFERENTES AGENTES

Autor/a

Marina Martí López

Tutor/a

Tutor: José Antonio Jiménez Quintana

Co-tutora: Eva Bosom Garcia

Departament

711- Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

Intensificació

Enginyeria Marítima

Data

17 d'Octubre de 2011

Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona
UPC BARCELONATECH

Enginyeria de Camins, Canals i Ports
Universitat Politècnica de Catalunya

Vulnerabilidad física de la costa catalana a diferentes agentes

Autora: Marina Martí López
Tutor: José Antonio Jiménez Quintana
Co-Tutora: Eva Bosom Garcia

Barcelona, 17 d'Octubre de 2011

RESUMEN

Vulnerabilidad Física de la Costa Catalana a Diferentes Agentes
Autora: Marina Martí López
Tutor: José Antonio Jiménez Quintana
Co-tutora: Eva Bosom Garcia

El sistema costero es un sistema muy dinámico que experimenta continuos cambios geomorfológicos ligados a múltiples factores como el clima de oleaje, cambios en el nivel del mar o subsidencia. Constituye, además, una zona de especial atractivo para el establecimiento de la población y el desarrollo de diversas actividades humanas, ya sean económicas, industriales o de ocio.

La costa de Cataluña, al noreste de España, es un ejemplo de la confluencia de sistemas sociales, económicos y naturales. Más de la mitad de la población de Cataluña reside en las comarcas costeras, población que, durante los meses de verano, aumenta todavía más debido a la afluencia de turistas en busca de sol y playa. La costa catalana tiene además zonas de gran interés ecológico como el Delta del Ebro, una de las zonas húmedas más importantes del Mediterráneo.

Sin embargo, esta costa se ve afectada por procesos erosivos ligados al transporte longitudinal de sedimentos, así como episodios de erosión e inundación debidos al impacto de temporales, que disminuyen la superficie útil de playa. Estos procesos han motivado numerosas operaciones de alimentación artificial de playas, a menudo acompañadas por la construcción de espigones o diques.

Además de los problemas actuales en el litoral catalán, también se esperan impactos potenciales de erosión e inundación debidos al fenómeno del cambio climático y su efecto sobre la subida del nivel del mar.

Durante los últimos años, en muchas costas de todo el mundo, ya se han realizado estudios de vulnerabilidad al cambio climático mediante diversas metodologías. La elaboración de estos estudios se considera, cada vez más, una herramienta fundamental para la gestión y planificación de la zona costera. Así, por ejemplo, el recientemente firmado Protocolo relativo a la Gestión Integrada de las Zonas Costeras del Mediterráneo recomienda a los países llevar a cabo estudios de vulnerabilidad para hacer frente a los diversos riesgos costeros.

En esta tesina se ha desarrollado una nueva metodología para el cálculo de la vulnerabilidad costera a múltiples agentes. Los procesos estudiados son: erosión a

medio plazo, erosión e inundación debido al impacto de temporales y erosión e inundación debido a la subida del nivel del mar.

En un primer lugar se calcula, de forma separada, la vulnerabilidad a cada uno de los procesos mediante índices de vulnerabilidad costera que varían de 1 a 5 y se dividen en 5 clases cualitativas de vulnerabilidad (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta).

A continuación, se proponen y discuten diversos métodos de agregación y cuantificación de la vulnerabilidad global de la costa. El método finalmente escogido consiste en evaluar la vulnerabilidad a erosión e inundación de la costa, mediante dos índices de vulnerabilidad con variación de 0 a 1 y divididos también en 5 clases cualitativas. La vulnerabilidad global se evalúa de forma cualitativa a partir de los resultados obtenidos para la vulnerabilidad a erosión e inundación de la costa.

Los diversos métodos son aplicados en 246 Km del litoral catalán que corresponden al litoral formado por material sedimentario no consolidado (playas). Los resultados obtenidos se representan gráficamente mediante un sistema de información geográfica (SIG) para su visualización sobre el territorio.

Palabras clave: Vulnerabilidad, Erosión, Inundación, Cambio climático, Playa, Cataluña

ABSTRACT

Physical Vulnerability of the Catalan Coastline to Multiple Hazards
Author: Marina Martí López
Supervisor: José Antonio Jiménez Quintana
Co-supervisor: Eva Bosom Garcia

The coastal system is a very dynamic system that undergoes continuous geomorphological changes due to multiple factors such as wave climate, sea level change and subsidence. It is also a particularly attractive area for the establishment of settlements and the development of various human activities, whether economic, industrial or leisure.

The coast of Catalonia, north-eastern Spain, is an example of the confluence of social, economic and natural systems. More than half the population of Catalonia reside on the coastal regions. During summer, the population of the area increases further due to the influx of tourists seeking sun and sand. The Catalan coast also has areas of great ecological interest such as the Ebro Delta, one of the most important wetland areas in the Mediterranean.

However, this coast is affected by erosion processes linked to the longitudinal transport of sediments, as well as episodes of erosion and inundation due to the impact of storms, which reduce the serviceable surface of beaches. These processes have led numerous operations of artificial nourishment in beaches, often accompanied by the construction of breakwaters.

In addition to the current problems in the Catalan coast, it is also expected potential impacts of erosion and inundation due to climate change phenomenon and its effect on sea level rise.

Over the last few years, in many coastlines around the world, vulnerability assessments to climate change have been already carried out through different methodologies. The implementation of these assessments is increasingly considered an essential tool for coastal planning and management. For instance, the recently signed Protocol on Integrated Coastal Zone Management in the Mediterranean recommends countries to undertake vulnerability assessments to address coastal hazards.

In this dissertation, a new methodology for the assessment of coastal vulnerability to multiple hazards has been developed. The considered processes are: medium-term erosion, erosion and inundation due to the impact of storms, and erosion and inundation due to sea level rise.

Firstly, the vulnerability to each hazard is separately calculated by using a coastal vulnerability index ranging from 1 to 5 and divided into five qualitative vulnerability classes (very low, low, moderate, high and very high).

Then, different methods of aggregating and quantifying the overall coastal vulnerability are proposed and discussed. The chosen methodology is to assess the vulnerability to erosion and inundation using two vulnerability indexes ranging from 0 to 1 and also divided into five qualitative classes. The overall coastal vulnerability is qualitatively assessed from the obtained results for the vulnerability to erosion and inundation.

All the proposed methods are applied to 246 Km of the Catalan coastline consisting of unconsolidated sedimentary material (beaches). The results are plotted using a geographic information system (GIS) for display on the territory.

Keywords: Vulnerability, Erosion, Inundation, Climate change, Beach, Catalonia

ÍNDICE

ÍNDICE i

LISTA DE FIGURAS iii

LISTA DE TABLAS vii

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Motivación 1
1.2. Objetivos 2
1.3. Estructura 3

CAPÍTULO 2. DEFINICIÓN DE VULNERABILIDAD COSTERA 5
2.1. Introducción 5
2.2. La vulnerabilidad desde diversas disciplinas 6
2.3. Dos interpretaciones de la vulnerabilidad al cambio climático 6
2.4. Definición propuesta 8

CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA VULNERABILIDAD COSTERA 11
3.1. Introducción 11
3.2. Coastal Vulnerability Index 14

3.2.1. Descripción 14
3.2.2. Variables 15
3.2.3. Escala tiempo-espacio 15
3.2.4. Cuantificación 17
3.2.5. Fórmula de evaluación 21
3.2.6. Aplicación a la costa catalana 22
3.2.7. Discusión 25
3.3. Catalan Vulnerability Index 26
3.3.1. Descripción y marco general 26
3.3.2. Índices de vulnerabilidad parcial 28
3.3.3. Índices de vulnerabilidad global 45

CAPÍTULO 4. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS 59
4.1. Área de estudio 59
4.2. Datos 61
4.2.1. Introducción 61
4.2.2. Datos referentes a los agentes 62
4.2.3. Datos referentes al sistema 63

CAPÍTULO 5. RESULTADOS 69
5.1. Introducción 69
5.2. Coastal Vulnerability Index 70
5.3. Catalan Vulnerability Index 72
5.3.1. Vulnerabilidad parcial 74
5.3.2. Vulnerabilidad global 88

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN 113
6.1. Coastal Vulnerability Index 113
6.2. Catalan Vulnerability Index 117
6.2.1. Vulnerabilidad parcial 117
6.2.2. Vulnerabilidad global 124

CAPÍTULO 7. RESUMEN Y CONCLUSIONES 131

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS 137

ANEJO A-0

LISTA DE FIGURAS

3.1. Representación de las escalas espaciales a las que actúan las diversas variables del CVI. Zona 1: rango mareal y movimientos verticales (RSLR); 2: clima de oleaje (altura de ola); 3: relieve, litología y geomorfología y 4: desplazamiento de la línea de orilla y pendiente costera *16*

3.2. Zonificación transversal de una playa según su función recreativa *31*

3.3. Ley de los índices de vulnerabilidad parcial absolutos a erosión costera a medio plazo y erosión debida a RSLR para el caso del litoral catalán *32*

3.4. Ley de los índices de vulnerabilidad parcial relativos a erosión costera a medio plazo y erosión debida a RSLR *33*

3.5. Representación de la regla de Bruun para el impacto de erosión costera debido a la subida relativa del nivel mar *34*

3.6. Limitaciones de los terrenos contiguos a la ribera del mar por razones de protección del dominio público marítimo-terrestre *37*

3.7. Ley del índice de vulnerabilidad parcial a inundación debida a RSLR para el litoral catalán *37*

3.8. Esquematización de los impactos costeros inducidos por temporales *39*

3.9. Sectores de oleaje en la costa catalana y emplazamiento de nodos HIPOCAS y boyas de oleaje *42*

3.10. Ley del Índice de Vulnerabilidad Parcial a la Erosión Inducida por Temporales *44*

3.11. Ley del Índice de Vulnerabilidad Parcial a Inundación Inducida por Temporales *45*

3.12. Ley del Índice de Vulnerabilidad Global para el indicador V..... 51
3.13. Ley del Índice de Vulnerabilidad a Inundación para el indicador propuesto VI..... 54
3.14. Ley del Índice de Vulnerabilidad a Erosión para el indicador propuesto VE..... 57
3.15. Índice de vulnerabilidad global según combinación de IVE e IVI..... 58
4.1. Localización de Cataluña. Provincias y comarcas con fachada marítima..... 60
4.2. Cala Tamariua, Girona..... 61
4.3. Playa de Vilafortuny, Tarragona..... 61
4.4. Mapa batimétrico de la costa catalana. Determinación de las amplitudes del perfil activo de las playas de la zona de Cambrils..... 67
4.5. Determinación de la pendiente emergida de la Cala de l'Estany Podrit y la playa de Rifà en Tarragona..... 67
5.1. Porcentaje de tramos en cada una de las 4 categorías de vulnerabilidad consideradas en el CVI según las clasificaciones propuestas para la costa Pacífica y Atlántica de EEUU..... 71
5.2. Vulnerabilidad a múltiples agentes de la costa de Cataluña mediante el método del CVI y según la clasificación para la costa Pacífica de EEUU..... 73
5.3. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para los diversos índices y escenarios de vulnerabilidad a erosión a la subida relativa del nivel del mar..... 76
5.4. Vulnerabilidad a erosión por RSLR según $IVEs_a$ (índice absoluto) en el escenario 3 de la costa de Cataluña..... 77
5.5. Vulnerabilidad a erosión por RSLR según $IVEs_r$ (índice relativo) en el escenario 3 de la costa de Cataluña..... 78
5.6. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para el índice de vulnerabilidad a inundación a la subida del nivel del mar en los escenarios 1, 2 y 3..... 79
5.7. Vulnerabilidad a inundación por RSLR según IVIs en el escenario 3 de la costa de Cataluña..... 80
5.8. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para los índices de vulnerabilidad a erosión a medio plazo (absoluto y relativo)..... 81
5.9. Vulnerabilidad a erosión a medio plazo según $IVEm_a$ (índice absoluto) de la costa de Cataluña..... 82
5.10. Vulnerabilidad a erosión a medio plazo según $IVEm_r$ (índice relativo) de la costa de Cataluña..... 83
5.11. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para el índice de vulnerabilidad a erosión por temporales..... 84
5.12. Vulnerabilidad a erosión por temporales según IVEt de la costa de Cataluña..... 85

5.13. Porcentaje de tramos en cada una de las categorías de vulnerabilidad consideradas para el índice de vulnerabilidad a inundación por temporales 86

5.14. Vulnerabilidad a inundación por temporales según IVIt de la costa de Cataluña..... 87

5.15. Porcentaje de tramos en cada una de las categorías de vulnerabilidad consideradas para los índices de vulnerabilidad global en CatVI (asumiendo escenario 3 de RSLR).. 90

5.16. Vulnerabilidad global de la costa de la provincia de Barcelona según IV_{a3} (absoluto) e IV_{r3} (relativo) con el método de los cuartiles..... 91

5.17. Vulnerabilidad global de la costa de la provincia de Barcelona según IV_{a3} (absoluto) e IV_{r3} (relativo) con el método de la función 92

5.18. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para los índices de vulnerabilidad a erosión e inundación en CatVI-2..... 94

5.19. Vulnerabilidad a erosión de la costa de Cataluña según IVE_{a3} (índice de vulnerabilidad a erosión absoluto en escenario 3 de RSLR)..... 97

5.20. Vulnerabilidad a erosión de la costa de Cataluña según IVE_{r3} (índice de vulnerabilidad a erosión relativo en escenario 3 de RSLR) 99

5.21. Vulnerabilidad a inundación de la costa de Cataluña según IVI_3 (índice de vulnerabilidad a inundación en escenario 3 de RSLR)..... 101

5.22. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para los índices de vulnerabilidad global en CatVI-2 (asumiendo escenario 3 de RSLR)..... 103

5.23. Vulnerabilidad de la costa de la provincia de Barcelona según IV_{a3} (absoluto) e IV_{r3} (relativo) utilizando la media..... 104

5.24. Vulnerabilidad de la costa de la provincia de Barcelona según IV_{a3} (absoluto) e IV_{r3} (relativo) utilizando el máximo..... 105

5.25. Vulnerabilidad de la costa de Cataluña según IV_{a3} (absoluto) utilizando el método cualitativo 107

5.26. Vulnerabilidad de la costa de Cataluña según IV_{r3} (relativo) utilizando el método cualitativo 109

6.1. Gráfico de percentiles para el CVI calculado con la clasificación del Atlántico..... 114

6.2. Gráfico de percentiles para el CVI calculado con la clasificación del Pacífico..... 114

6.3. Gráfico comparativo de la vulnerabilidad relativa de la costa catalana con el CVI (clasificación del Pacífico) y el IV_{a3} calculado mediante el método de los cuartiles.... 125

6.4. Gráfica de percentiles para el índice IVa3 obtenido con el método de los cuartiles..... 126

6.5. Gráfico comparativo de la vulnerabilidad de la costa catalana según el IV_{a3} con el método de los cuartiles y el método de la función..... 126

6.6. Gráfico comparativo del número de tramos (tamaño de las burbujas) perteneciente a cada una de las clases de vulnerabilidad para el índice IV_{a3} cualitativo respecto los índices IV_{a3} media (azul) y IV_{a3} máximo (rojo) *130*

7.1. Vulnerabilidad global de la provincia de Barcelona según el índice IV_{a3} cualitativo *133*

7.2. Kilómetros de playa del litoral catalán en cada categoría de vulnerabilidad según los diversos índices de vulnerabilidad a los diversos procesos costeros analizados *134*

7.3. Kilómetros de playa del litoral catalán en cada una de las categorías de vulnerabilidad global según el índice IV_{a3} cualitativo *136*

LISTA DE TABLAS

2.1. Dos interpretaciones del término vulnerabilidad en la literatura del cambio climático.... 9

3.1. Siete pasos de la "Common Methodology"..... 12

3.2. Comparación de la clasificación de vulnerabilidad usada por Gornitz et al, 1991 (indicado como Gornitz) y las clasificaciones propuestas por Thieler y Hammar-Klose, 2001 para la Costa Pacífica (indicada como USGS1) y para la Costa Atlántica y del Golfo de Méjico (indicada como USGS2)..... 18

3.3. Sensibilidad de las diversas fórmulas de CVI a cambios de clasificación de una a tres de las variables constituyentes..... 22

3.4. Nomenclatura de los indicadores e índices de vulnerabilidad parciales asociados a cada uno de los procesos considerados en el nuevo método desarrollado 28

3.5. Ancho orientativo (m) de las diversas zonas en que puede ser dividida una playa según su uso recreativo..... 31

3.6. Saturación puntual de usuarios para playas mediterráneas de uso masivo..... 31

3.7. Tipos de playas del litoral catalán según tamaño de grano y pendiente costera asociada a cada una de ellas..... 42

3.8. Valor del índice de vulnerabilidad asociado a Geomorfología y Rango mareal 47

3.9. Combinaciones de los índices de vulnerabilidad parcial para la obtención del indicador de vulnerabilidad integrada V..... 48

3.10. Clase de Vulnerabilidad Global según el valor del indicador propuesto V..... 51

3.11. Combinaciones de los índices de vulnerabilidad parcial para la obtención del indicador de vulnerabilidad a inundación VI 53

3.12. Clase de Vulnerabilidad a Inundación según el valor del indicador propuesto VI..... 54

3.13. Valores del coeficiente f_{geo} para la obtención del indicador de vulnerabilidad a erosión VE..... 55

3.14. Combinaciones de los índices de vulnerabilidad parcial para la obtención del indicador de vulnerabilidad a erosión VE 56

3.15. Clase de Vulnerabilidad a Erosión según el valor del indicador propuesto VE 57

5.1. Resumen de resultados del indicador de vulnerabilidad global (V) con CatVI-1 89

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La costa es un sistema muy dinámico que experimenta continuos cambios geomorfológicos a diferentes escalas temporales y espaciales, inducidos por los procesos generados por múltiples agentes como el clima de oleaje, nivel del mar, subsidencia, etc.

Además, históricamente, ha sido una zona muy atractiva para el establecimiento de población por distintas razones biológicas, culturales, económicas y geográficas (Valiela, 2006). Este hecho, unido con el gran incremento de población experimentado en el siglo XX, ha provocado una mayor utilización y presión de los recursos costeros en este último siglo. Small y Nicholls (2003) estiman que el 23% de la población mundial vive a menos de 100km de la línea de orilla y a menos de 100m sobre el nivel del mar, y que la densidad de población en las regiones costeras es aproximadamente 2,5 veces superior a la media global.

Las regiones costeras no solamente tienen mayor densidad de población sino que además soportan muchas de las actividades económicas, incluido el turismo. En este sentido, España y dentro de ella Cataluña constituyen un destino turístico tradicional en Europa, basado principalmente en el modelo de sol y playa (Aguiló et al, 2005). En el año 2010, por ejemplo, Cataluña fue el primer destino turístico del estado español, sector que contribuyó en cerca del

11% del PIB de esta comunidad. Dentro de ella, el destino principal, a parte de la ciudad de Barcelona, fue la zona costera, que agrupó casi el 50% de los turistas extranjeros que visitaron Cataluña (Generalitat de Catalunya, 2010).

Así pues, la franja costera es una zona de vital importancia, ya que en ella confluyen sistemas naturales, sociales y económicos. Esta zona requiere, por tanto, de una buena gestión y planificación para asegurar su buen estado tanto presente como futuro.

El cambio climático y, especialmente, su efecto sobre la subida del nivel del mar, representan para estos sistemas una amenaza más a los procesos erosivos y de inundación que actualmente ya sufren estas zonas. Todo ello ha motivado un creciente interés por conocer la vulnerabilidad de estos sistemas a los procesos litorales presentes en la actualidad y también a estos nuevos daños generados por el cambio climático.

Un ejemplo de la importancia de incluir estudios de vulnerabilidad en las políticas de gestión de las áreas costeras se encuentra en el Protocolo relativo a la gestión integrada de las zonas costeras del Mediterráneo (PAP/RAC, 2007), firmado en 2008 y ratificado por España en 2010. En el artículo 22 de este protocolo, referente a los riesgos naturales que afectan a la zona costera, se especifica que:

> *"En el marco de las estrategias nacionales de gestión integrada de las zonas costeras, las Partes elaborarán políticas de prevención de los riesgos naturales. Con este fin, efectuarán, en lo que respecta a las zonas costeras, evaluaciones de la vulnerabilidad y de los riesgos […]"*

Por lo tanto, se considera que la evaluación de la vulnerabilidad costera a los procesos litorales actuales e inducidos por la futura subida del nivel del mar es una herramienta clave para la gestión y planificación de la zona costera que, tal y como ha sido descrito, constituye uno de los principales activos en el caso de España y más concretamente, de Cataluña.

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta tesina es calcular la vulnerabilidad física de la costa catalana a los diversos procesos litorales que actúan en ella, a una escala temporal adecuada a cada uno de los procesos que se consideren.

Para conseguir este objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Revisar los distintos enfoques del término vulnerabilidad aplicado a los sistemas costeros
- Revisar críticamente metodologías de cálculo de la vulnerabilidad costera
- Desarrollar, en base al resultado anterior, una serie de índices que permitan calcular la vulnerabilidad costera a los principales procesos litorales
- Desarrollar un índice de vulnerabilidad al efecto integrado de múltiples agentes (los considerados en el objetivo anterior) que permita conocer la vulnerabilidad total de la zona costera
- Calcular la vulnerabilidad del litoral catalán mediante la aplicación de los índices desarrollados anteriormente
- Identificar los procesos litorales que generan mayor vulnerabilidad y sectorizar la costa

1.3. Estructura

Estos objetivos han sido cubiertos de forma progresiva a lo largo de esta tesina mediante ocho capítulos que se describen a continuación.

En el capítulo 1 se introduce el tema a tratar en esta tesina y se justifica el interés en su realización.

El capítulo 2 versa sobre los diversos enfoques y definiciones del término vulnerabilidad, prestando especial atención a su aplicación a los sistemas costeros, y se establece la definición utilizada en esta tesina.

El capítulo 3 trata sobre metodologías de cálculo de la vulnerabilidad costera. En el apartado 3.1 se revisan diversas metodologías existentes actualmente, en el apartado 3.2 se analiza en detalle el método del CVI y finalmente, en el apartado 3.3, se desarrolla un nuevo procedimiento de cálculo de la vulnerabilidad costera, tanto al efecto individual de los diversos procesos como al efecto integrado de todos ellos.

En el capítulo 4 se realiza una descripción del área a estudiar (la costa catalana) y se indican los datos necesarios para poder aplicar las metodologías expuestas en los apartados 3.2 y 3.3.

En el capítulo 5 se presentan los resultados de aplicar dichas metodologías y en el capítulo 6 se realiza una discusión de estos resultados.

Las conclusiones de la tesina se presentan en el capítulo 7 y finalmente, en el capítulo 8 se listan las referencias bibliográficas.

CAPITULO 2
DEFINICIÓN DE VULNERABILIDAD COSTERA

2.1. Introducción

La noción de vulnerabilidad ha emergido como un concepto fundamental para la comprensión y la gestión de los medios costeros. Sin embargo, un importante grado de conflicto ha aparecido asociado al uso de este término (McFadden y Green, 2007).

Las diferentes comunidades académicas han desarrollado diversas conceptualizaciones de la vulnerabilidad, e incluso dentro de estas comunidades existen diferentes definiciones. A menudo, las conceptualizaciones existentes resultan imprecisas cuando se trata de ponerlas en práctica para la evaluación de la vulnerabilidad, porque sus componentes son conceptos muy generales o que permanecen sin definir y porque no explican las relaciones funcionales entre ellos (Hinkel y Klein, 2007).

Además, la diversidad de conceptualizaciones y su imprecisión ha dado lugar también a una diversidad de enfoques metodológicos para evaluar la vulnerabilidad. Estas metodologías son cada vez más complejas y han pasado de enfatizar los impactos a dar una mayor importancia a la capacidad de adaptación del sistema (Füssel y Klein, 2006).

2.2. La vulnerabilidad desde diversas disciplinas

Muchos estudios de vulnerabilidad en la zona costera se han basado en los tradicionales puntos de vista científicos físicos o sociales sobre la naturaleza del cambio y el valor de los recursos. (McFadden y Green, 2007)

Desde la perspectiva de las ciencias sociales, la vulnerabilidad está principalmente condicionada por las poblaciones pasadas, presentes y futuras y sus patrones de asentamiento, así como la riqueza agregada y per cápita de la región (McFadden y Green, 2007). En este tipo de enfoque, la componente biofísica, frecuentemente considerada como la exposición o medida del peligro, está formalmente fuera de la definición del término.

En ingeniería, el concepto de vulnerabilidad esta mayoritariamente vinculado a objetos físicos (casas, vehículos, etc.), por lo que en términos cuantitativos, la vulnerabilidad se asocia con el grado de daño estructural que resulta de un suceso (de Bruijn et al., en prensa).

Sin embargo, para el ecologista, la vulnerabilidad está relacionada con la biodiversidad (Holling, 1973). El concepto de resiliencia ha entrado en el análisis de vulnerabilidad desde esta área para caracterizar la capacidad de un sistema de recuperarse a un estado de referencia después de una perturbación y la capacidad para mantener ciertas estructuras y funciones a pesar de las perturbaciones (Turner et al., 2003).

De forma similar, desde una perspectiva geomorfológica, el análisis de vulnerabilidad está estrechamente relacionado con periodos de relajación, que reflejan el tiempo necesario para que un sistema costero se ajuste morfológicamente a un cambio y logre una forma de equilibrio. Examinar el balance entre tiempos de relajación y periodos de retorno de sucesos perturbadores permite determinar el grado en que un sistema requiere intervención antes de que ocurra una pérdida de equilibrio (Pethick y Crooks, 2000).

2.3. Dos interpretaciones de la vulnerabilidad al cambio climático

Además de los distintos enfoques del término vulnerabilidad dados por los expertos de los diversos campos, las definiciones de vulnerabilidad en la literatura del cambio climático tienden a caer en dos categorías (ver Tabla 2.1).

Por una parte, la vulnerabilidad puede ser comprendida en términos del daño potencial causado por un evento climático. Ésta perspectiva es la recogida en el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Third Assessment Report (TAR), dónde el término vulnerabilidad se define como "*el grado en que un sistema es susceptible o incapaz de enfrentarse a efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y sus extremos. La vulnerabilidad es una función del carácter, magnitud y tasa de variación climática a que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación*" (IPCC, 2001, p.995).

Ésta vulnerabilidad combinada, en función del riesgo, la exposición y la sensibilidad, puede ser denominada "vulnerabilidad biofísica" (Brooks, 2003), ya que éste término indica tanto la componente física asociada a la naturaleza del peligro y sus impactos físicos de primer orden, como la componente biológica o social asociada a las propiedades del sistema afectado, que actúan amplificando o reduciendo el daño resultante de estos impactos de primer orden.

En éste caso, el estudio de la vulnerabilidad es el **punto final** de una serie de análisis, empezando por las proyecciones de tendencias de emisión futuras, pasando por el desarrollo de escenarios climáticos y de allí a los estudios de impacto biofísico y la identificación de opciones de adaptación. Finalmente, cualquier consecuencia residual define niveles de vulnerabilidad. Es decir, el nivel de vulnerabilidad está determinado por las consecuencias adversas que permanecen después del proceso de adaptación que ha tenido lugar y, como tal, proporciona un medio conveniente de resumir el impacto neto del problema climático (Kelly y Adger, 2000).

Por otro lado, el término vulnerabilidad se considera a veces como el **punto de partida** para los análisis de impacto. De hecho, tal y como apuntan Kelly y Adger (2000), la palabra vulnerabilidad deriva del latín tardío *vulnerabilis*, término usado por los romanos para describir el estado de un soldado yaciendo herido en el campo de batalla, es decir, ya malherido y por tanto en riesgo de nuevos ataques. En este sentido clásico del término, la vulnerabilidad se define principalmente por el daño anterior (la herida ya existente) y no por el futuro (cualquier otro ataque). Por analogía, entonces, la vulnerabilidad a un peligro natural está determinada principalmente por la situación existente en el sistema antes de encontrarse con el suceso, es decir, por su capacidad para responder a ese peligro.

Aunque en este enfoque, la vulnerabilidad no depende de la intensidad del peligro o su probabilidad de ocurrencia, la vulnerabilidad depende del tipo de peligro al que el sistema analizado se encuentra expuesto, ya que ciertas propiedades del sistema lo harán más vulnerable a unos peligros que a otros. Por tanto, la vulnerabilidad debe estar siempre vinculada a un

peligro específico o una serie de peligros, por lo que vulnerabilidad y exposición permanecen inseparables (Kelly & Adger, 2000).

Esta concepción de la vulnerabilidad ha surgido de los estudios de los factores estructurales que hacen a las sociedades humanas y las comunidades susceptibles a daños por riesgos externos. Para muchos de los sistemas humanos, la vulnerabilidad vista como una propiedad inherente del sistema, derivada de sus características internas, puede denominarse "vulnerabilidad social". En los sistemas no humanos o en los que el término social no es aplicable, se puede usar el concepto "vulnerabilidad inherente" (Brooks, 2003).

En esta formulación, es la interacción del riesgo con la vulnerabilidad social la que produce unas consecuencias, generalmente medidas en términos de daño físico y económico o mortalidad humana. Por tanto, la vulnerabilidad social puede ser entendida como uno de los determinantes de la vulnerabilidad biofísica.

2.4. Definición propuesta

En esta tesina el término vulnerabilidad se define y evalúa desde una perspectiva geomorfológica, es decir, solamente incluye el daño físico que experimenta el sistema costero. En esta definición no se engloban los impactos a nivel social, cultural, ecológico o económico, entre otros, producidos en la zona costera.

Asimismo, dado que es el valor/resultado integrado el punto final del análisis, la vulnerabilidad no se identifica con la susceptibilidad del sistema a unos ciertos impactos, sino que se consistiría en el resultado combinado de la magnitud del agente inductor (hazard), la sensibilidad del sistema y la capacidad de respuesta de este.

Así pues, en esta tesina, el término vulnerabilidad puede definirse como el potencial del sistema costero a ser dañado por los distintos agentes que se consideren, y se cuantifica mediante la diferencia entre el impacto producido por los procesos que actúan en el litoral y la capacidad de adaptación que tiene el sistema.

	Perspectiva Punto Final	**Perspectiva Punto de Partida**
Raíz del problema	Cambio climático	Vulnerabilidad social
Contexto político	Mitigación, compensación y adaptación técnica al cambio climático	Adaptación social, desarrollo sostenible
Cuestión política ilustrativa	¿Cuáles son los beneficios de la mitigación del cambio climático?	¿Cómo se puede reducir la vulnerabilidad de las sociedades a los peligros climáticos?
Cuestión investigadora ilustrativa	¿Cuáles son los impactos netos esperables del cambio climático en las diversas regiones?	¿Por qué los peligros climáticos afectan a algunos grupos más que a otros?
Vulnerabilidad y capacidad adaptativa	La capacidad adaptativa determina la vulnerabilidad	La vulnerabilidad determina la capacidad adaptativa
Referencia de la capacidad adaptativa	Adaptación al cambio climático futuro	Adaptación a la variabilidad climática actual
Punto inicial del análisis	Escenarios de peligros climáticos futuros	Vulnerabilidad actual a los estímulos climáticos
Disciplina principal	Ciencias naturales	Ciencias sociales
Significado de vulnerabilidad	Daño neto esperado para un nivel dado de cambio climático global	Susceptibilidad al cambio y variabilidad climática determinada por factores socioeconómicos

Tabla 2.1. Dos interpretaciones del término vulnerabilidad en la literatura del cambio climático (Füssel, 2007)

CAPITULO 3
MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA VULNERABILIDAD COSTERA

3.1. Introducción

El concepto de vulnerabilidad aplicado a los sistemas costeros ha aparecido ligado al fenómeno del cambio climático, especialmente en cuanto al efecto de la subida acelerada del nivel del mar sobre las costas. Así, a partir de los años 90, empezaron a desarrollarse todo un conjunto de directrices sobre cómo evaluar la vulnerabilidad de la zona costera a larga escala tanto a nivel espacial como de los procesos analizados.

Una de las primeras metodologías desarrolladas con más éxito fue la llamada **Common Methodology**, desarrollada en 1991 por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) y que propone la evaluación de la vulnerabilidad costera mediante la aplicación de siete pasos (Tabla 3.1). Esta propuesta está especialmente diseñada para la realización de estudios preliminares, con el fin de identificar las zonas que requieren una actuación prioritaria y proporcionar una primera aproximación de la viabilidad y el coste de las distintas opciones de respuesta (IPCC CZMS, 1992). Aunque su aplicación ha presentado dificultades en algunos casos, debido a la gran cantidad de datos requeridos o la poca efectividad a la hora de identificar las mejores opciones de respuesta, la Common Methodology ha contribuido en el conocimiento

de las consecuencias del cambio climático en la zona costera, favoreciendo la consideración de una visión a largo plazo en la gestión de los recursos costeros. Debido a su buena acogida, el IPCC extendió esta metodología a otros sistemas, no costeros, publicando en 1994 el Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations (Carter et al, 1994). También a finales de los años 90, se crea el proyecto europeo **SURVAS** (Synthesis and Upscaling of Sea-level Rise Vulnerability Assessment Studies) con el objetivo de desarrollar y aplicar una nueva metodología común a partir de análisis de vulnerabilidad costera a escala regional (de la Vega-Leinert et al, 2000). Sin embargo, tal y como indican Hinkel y Klein (2007), el proyecto no fue del todo exitoso debido a la variedad de metodologías, escenarios y hipótesis realizadas en los diversos estudios de vulnerabilidad analizados. Así, en 2004, se funda un nuevo proyecto europeo, llamado **DINAS-COAST** (Dynamic and Interactive Assessment of National, Regional and Global Vulnerability of Coastal Zones to Sea-level Rise), con el fin de desarrollar una nueva herramienta para la evaluación de la vulnerabilidad costera a la subida del nivel del mar desde escalas sub-nacionales a escalas globales (Hinkel y Klein, 2009). Esta herramienta (DIVA tool) contiene una base de datos mundial de factores biofísicos y socio-económicos, distintos escenarios socio-económicos y de subida del nivel del mar, un conjunto de algoritmos para la evaluación de los impactos y los costes de adaptación, y una interfaz gráfica de usuario que permite escoger distintos escenarios y estrategias de adaptación, para así comparar los resultados obtenidos.

Pasos de la "Common Methodology"
1. Delinear el caso de estudio y especificar las condiciones de contorno para la subida del nivel del mar
2. Inventario de las características del área de estudio
3. Identificar los factores relevantes para el desarrollo
4. Evaluar los cambios físicos y la respuesta del sistema natural
5. Formular estrategias de respuesta y evaluar sus costes y efectos
6. Evaluar el perfil de vulnerabilidad y interpretar los resultados
7. Identificar las acciones pertinentes para desarrollar planes de gestión integrada de la zona costera a largo plazo

Tabla 3.1. Siete pasos de la "Common Methodology" (modificado de IPCC CZMS, 1992)

Paralelamente a los desarrollos de las escuelas y organismos europeos, en los Estados Unidos también se propusieron diversas metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad costera a los efectos inducidos por el cambio climático. En este sentido, cabe destacar el **Coastal Vulnerability Index** (CVI), un índice que evalúa la vulnerabilidad costera inducida, principalmente, por la subida del nivel del mar. Este índice, desarrollado por Gornitz y Kanciruk

(1989) y adaptado posteriormente por el USGS (United States Geological Survey), ha sido ampliamente aplicado y adaptado en multitud de estudios. Además, en este trabajo, el CVI constituye el punto de partida para el desarrollo de una nueva metodología, motivo por el cual éste índice es descrito en más detalle en un próximo apartado. Junto con el CVI, también se han desarrollado otras herramientas como el simulador **SimClim** (Simulator of Climate Change Risks and Adaptation Initiatives) que, además de generar diversos escenarios de subida del nivel del mar, permite obtener los impactos de erosión e inundación generados en la zona costera (CLIMsystems, 2011).

También en Australia, debido a las dificultades de aplicación de la IPCC Common Methodology, surgieron otras aproximaciones al estudio de la vulnerabilidad en la zona costera. Así, Kay y Waterman (1993) propusieron una nueva metodología a nivel nacional, que, sin embargo, también presentó dificultades en aquellos estados australianos que intentaron aplicarla (Victoria y South Australia). En Harvey y Woodroffe (2008) puede verse una revisión de las metodologías desarrolladas por la escuela australiana a escala nacional y también regional.

Cuando se trata de la evaluación de la vulnerabilidad costera a escalas espaciales menores, las herramientas disponibles son bastante más limitadas. Algunos estudios aplican las metodologías desarrolladas para gran escala sin incorporar el conocimiento más detallado del que se dispone a escalas menores. Por ejemplo, el mismo USGS en colaboración con la dirección de recursos geológicos del National Park Service (NPS), empezó en 2001 a evaluar la vulnerabilidad de los Parques Nacionales costeros de EEUU aplicando el método del CVI. Algunas de estas unidades tienen longitudes de costa de menos de 50km y sin embargo se utiliza un método que fue originalmente desarrollado para evaluar la vulnerabilidad de toda la costa de EEUU (Thieler et al, 2002).

Además, muchos de los estudios a esta escala, aunque pueden utilizar el término vulnerabilidad, en realidad lo que evalúan es el riesgo asociado generalmente a un solo agente, que muchas veces se trata de tormentas y huracanes dado la asociación existente entre riesgo y desastres naturales. En este sentido, cabe destacar los estudios realizados por el FEMA (Federal Emergency Management Agency), organismo que en 1997 publicó la primera edición de la herramienta **HAZUS**, que permite estimar el impacto físico, social y económico de huracanes y otros agentes. En cuanto a tormentas, existen multitud de aproximaciones para este agente, especialmente para el impacto de erosión en playas y dunas. En Judge et al (2003) puede verse una revisión de diversos de estos métodos, así como el desarrollo de un nuevo parámetro para evaluar la vulnerabilidad de dunas al impacto de erosión inducido por temporales.

En España, existen algunos trabajos de evaluación de la vulnerabilidad a erosión costera, aunque, como ya ha sido comentado, en algunos casos más que de estudios de vulnerabilidad se trata de estudios de riesgo o sensibilidad. Cabe citar los trabajos de Málvarez García et al (2000), en el que se formula un índice de sensibilidad costera a partir de seis indicadores (cuatro variables físicas y dos variables antropogénicas), y Domínguez et al (2005), en el que se desarrolla un indicador cualitativo de "vulnerabilidad" que relaciona tasa de erosión con tipo de uso del suelo. Este indicador fue posteriormente utilizado por Anfuso y Martínez del Pozo (2008) y Rangel-Buitrago y Anfuso (2009) para evaluar la vulnerabilidad de tramos costeros de Italia y Colombia, respectivamente.

También en España, destacan los trabajos de Mendoza y Jiménez (2004, 2006, 2009), en los que se desarrolla y se aplica a nivel regional un índice de vulnerabilidad a los impactos de erosión e inundación inducidos por la acción de temporales. Más recientemente, Bosom y Jiménez (2011) han desarrollando un nuevo índice de vulnerabilidad costera a estos mismos impactos a partir de la probabilidad de ocurrencia de un temporal, índice que se aplica en el presente trabajo.

Por último, indicar que los trabajos y herramientas revisados aquí evalúan principalmente la vulnerabilidad del medio natural, considerando solamente variables físicas representativas de los agentes y el sistema estudiado. Sin embargo, últimamente se ha reconocido la importancia de incorporar variables socio-económicas a estos estudios. Así, por ejemplo, en McLaughlin et al (2002) se propone la incorporación de este tipo de variables en el cálculo de la vulnerabilidad a erosión debida al oleaje en Irlanda del Norte. Para ello se elabora un sub-índice de vulnerabilidad socio-económica que incluye seis variables: población, patrimonio cultural, carreteras, ferrocarriles, uso del sol e "interés de conservación".

3.2. Coastal Vulnerability Index

3.2.1. Descripción

El Coastal Vulnerability Index (CVI) es uno de los métodos más utilizados para el cálculo de la vulnerabilidad costera ante los cambios físicos derivados, principalmente, de la subida del nivel del mar. El método consiste en calcular, en cada una de las unidades costeras en que se divide la zona de estudio, un índice de vulnerabilidad costera, que se obtiene mediante la combinación de las puntuaciones asignadas a diversas variables. En base a los valores obtenidos para este índice, la costa se divide en cuatro categorías -baja, moderada, alta y muy alta vulnerabilidad-, lo que permite conocer de forma rápida y sencilla las zonas más vulnerables de la costa en estudio.

Esta metodología fue desarrollada y aplicada en los trabajos de Gornitz y Kanciruk (1989), Gornitz y White (1989) y Gornitz el al. (1991, 1994, 1997) con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad integrada a erosión e inundación de la costa de Estados Unidos. Posteriormente, el USGS (United States Geological Survey) realizó una modificación de este índice para evaluar de forma diferenciada la vulnerabilidad en la costa Pacífica, Atlántica i del Golfo de Méjico (Thieler y Hammar-Klose, 1999, 2000a, 2000b). Ambas propuestas han sido aplicadas y adaptadas en multitud de estudios de vulnerabilidad, llevados a cabo en costas de todo el mundo (Kokot et al, 2004; Doukakis, 2005; Abuodha y Woodroffe, 2007; Ojeda Zújar et al, 2008).

3.2.2. Variables

Éste método fue desarrollado teniendo en cuenta siete variables características del riesgo a erosión e inundación de la zona costera. Algunas de estas variables representan a los agentes inductores de los impactos de inundación y/o erosión, mientras que otras representan a características del sistema que modulan dichos impactos. Las variables consideradas son: relieve (elevación), litología, geomorfología, movimientos verticales (cambios relativos del nivel del mar), cambios horizontales de la línea de orilla (erosión y acreción), rango mareal y altura de ola. Posteriormente, en la adaptación realizada por el USGS, se consideraron seis variables en lugar de siete, ya que se eliminaron las variables de relieve y litología y se introdujo la variable pendiente costera. Los demás factores fueron conservados aunque, en algunos casos, se modificó su interpretación.

3.2.3. Escala tiempo-espacio

En cuanto a la escala temporal, los factores referentes al sistema (relieve, litología, pendiente costera y geomorfología) se consideran de forma invariable a lo largo del tiempo y por tanto pueden considerarse como factores estacionarios.

Las variables características de los agentes, en cambio, presentan diversas escalas temporales. Los movimientos verticales (cambios relativos del nivel del mar) son un fenómeno de largo plazo, ya que su magnitud es muy baja y se requiere de la acción acumulada en el tiempo para que su efecto sea visible (alrededor de 100 años). Los cambios horizontales de la línea de orilla (erosión y acreción) tienen una magnitud variable aunque, normalmente, sus efectos se hacen notar a medio plazo (entorno a unos 10 años). La altura de ola, que se utiliza como sustituto de la energía del oleaje, es un indicador de la erosión a corto plazo (episódica) que se produce por

la acción de temporales. Finalmente, la marea actúa como agente modulador de los demás agentes, produciéndose la acción combinada con ellos y generando impactos que se notarían en las diversas escalas temporales (corto, medio y largo plazo).

Por lo tanto, el plazo en que actúan los diversos factores constituyentes del CVI es muy variado, característica que, sin embargo, no es tenida en cuenta a la hora de integrarlos. El resultado obtenido, por tanto, permite conocer cómo de vulnerable es la zona pero no el plazo temporal en el que se producirían los posibles impactos.

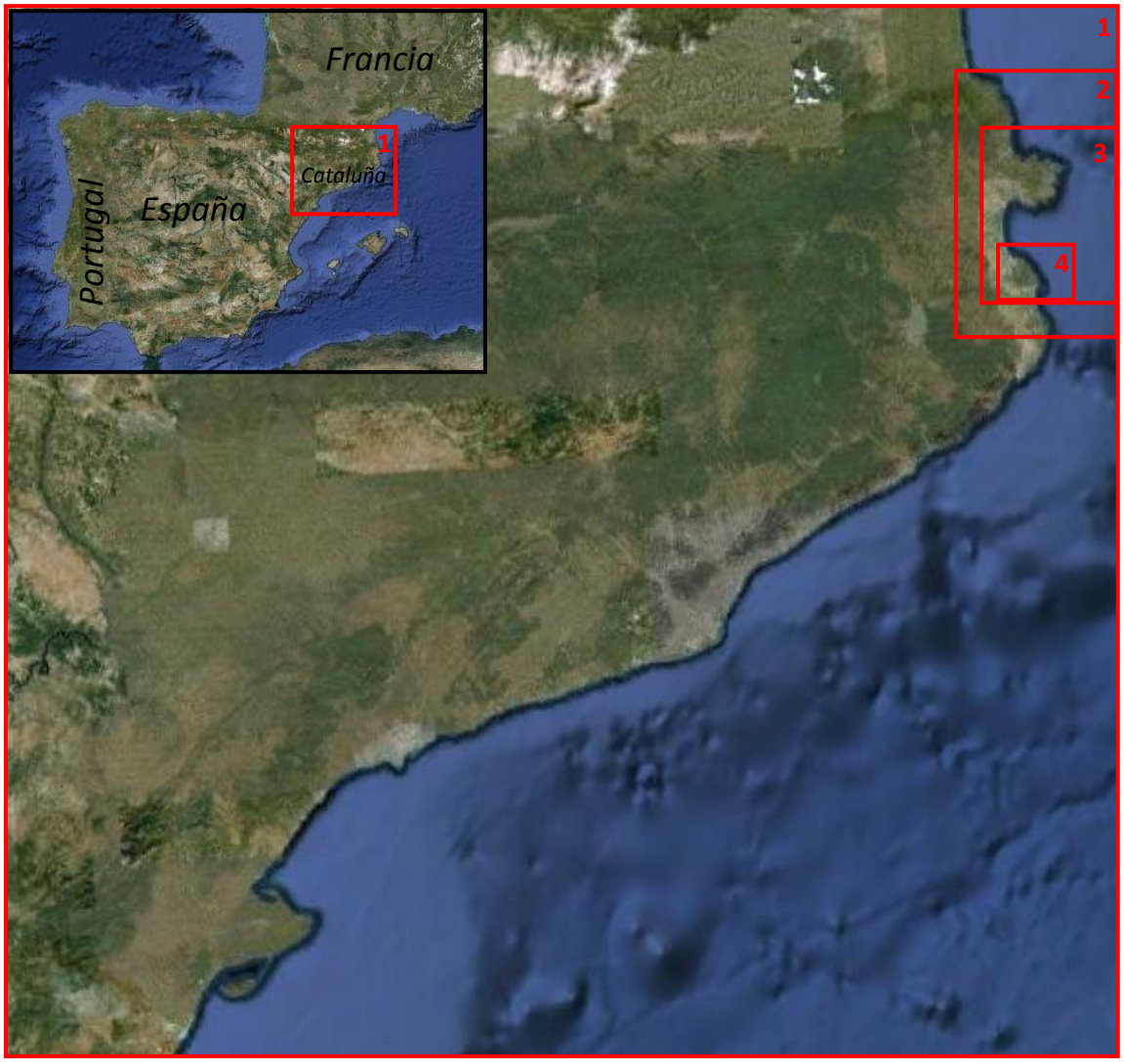

Figura 3.1. Representación de las escalas espaciales a las que actúan las diversas variables del CVI. Zona 1: rango mareal y movimientos verticales (RSLR); 2: clima de oleaje (altura de ola); 3: relieve, litología y geomorfología y 4: desplazamiento de la línea de orilla y pendiente costera (Google Earth)

En cuanto a la escala espacial, también existe una gran variabilidad entre los factores considerados. Mientras los movimientos verticales y el rango mareal presentan variaciones a nivel regional, otras variables como relieve, litología, y geomorfología varían a una escala local. Las variaciones en la altura de ola dependen de la situación de la costa analizada y los patrones de viento, produciéndose generalmente a una escala media (en la costa catalana podría considerarse de alrededor de 50 Km). Por último, los cambios horizontales de la línea de orilla y la pendiente costera son los que presentan una mayor variabilidad, ya que varían a nivel playa (ver Figura 3.1 para mejor comprensión de las escalas espaciales).

Así pues, esta metodología está indicada para estudios a escala nacional, ya que algunas de las variables no presentan variaciones en escalas menores y, por tanto, aunque contribuirían en el valor de la vulnerabilidad total, no aportarían información sobre la vulnerabilidad relativa de un punto respecto a otro de la costa.

3.2.4. Cuantificación

Tal y como se indica en Gornitz et al (1991), debido a la presencia de variables cuantitativas, así como cualitativas, con diferentes escalas y unidades, para poder integrar todas las variables en un mismo índice, se decidió asignar a cada una de ellas una graduación de 1 a 5, en la que el valor 5 representa la clase con mayor vulnerabilidad. Esta graduación se realiza de acuerdo con el efecto positivo o negativo que cada factor tiene sobre los impactos de erosión y/o inundación, según corresponda.

Inicialmente, la graduación propuesta fue la misma para toda la costa de Estados Unidos, pero posteriormente, en los estudios de Thieler y Hammar-Klose (1999, 2000a, 2000b), se propusieron dos clasificaciones distintas según el tramo de costa estadounidense en el que se desea calcular la vulnerabilidad. De este modo la clasificación podía ajustarse mejor a la variabilidad de los diversos factores en cada una de las costas. Así pues, aunque algunas variables se gradúan de igual modo en las dos clasificaciones, otras presentan una graduación para la costa Pacífica y otra para las costas Atlántica y del Golfo de Méjico (ver Tabla 3.2).

Variable	Estudio	Muy baja 1	Baja 2	Moderada 3	Alta 4	Muy alta 5
Litología	**Gornitz**	Plutónicas Volcánicas (lava) Metamórficas de grado medio-alto	Metamórficas de bajo grado Areniscas y conglomerados (bien cementados)	Mayoría de rocas sedimentarias	Material sedimentario no consolidado de grano grueso y/o mal clasificado	Material sedimentario no consolidado de grano fino Cenizas volcánicas
Geomorfología	**Gornitz**	Acantilados rocosos Fiordos	Acantilados medianos Costas indentadas	Acantilados bajos Glaciares Salinas Arrecifes de coral Manglares	Playas (guijarros) Estuarios Lagunas Llanuras aluviales	Playas barrera Playas (arena) Marismas Deltas
	USGS1 y 2	Acantilados rocosos Fiordos	Acantilados medianos Costas indentadas	Acantilados bajos Glaciares Llanuras aluviales	Playas de cantos rodados Estuarios Lagunas	Playas barrera Playas (arena) Marismas Deltas Salinas Arrecifes de coral Manglares
Pendiente costera (%)	**USGS1**	> 1,9	1,3 a 1,9	0,9 a 1,3	0,6 a 0,9	< 0,6
	USGS2	> 0,115	0,055 a 0,115	0,035 a 0,055	0,022 a 0,035	< 0,022
Relieve (m)	**Gornitz**	>30,1	20,1 a 30,0	10,1 a 20,0	5,1 a 10,0	0 a 5,0
RSLR (mm/año)	**Gornitz**	≤ -1,1	-1,0 a 0,99	1,0 a 2,0	2,1 a 4,0	≥ 4,1
	USGS1	< -1,21	-1,21 a 0,1	0,1 a 1,24	1,24 a 1,36	> 1,36
	USGS2	< 1,8	1,8 a 2,5	2,5 a 3,0	3,0 a 3,4	> 3,4
Evolución costera (m/año)	**Gornitz y USGS1 y 2**	≥ 2,1	1,0 a 2,0	-1,0 a +1,0	-1,1 a -2,0	≤ -2,0
Rango mareal (m)	**Gornitz**	≤ 0,99	1,0 a 1,9	2,0 a 4,0	4,1 a 6,0	≥ 6,1
	USGS1 y 2	> 6,0	4,1 a 6,0	2,0 a 4,0	1,0 a 1,9	< 1,0
Altura de ola (m)	**Gornitz**	0 a 2,9	3,0 a 4,9	5,0 a 5,9	6,0 a 6,9	≥ 7,0
	USGS1	< 1,1	1,1 a 2,0	2,0 a 2,25	2,25 a 2,60	> 2,60
	USGS2	< 0,55	0,55 a 0,85	0,85 a 1,05	1,05 a 1,25	> 1,25

Tabla 3.2. Comparación de la clasificación de vulnerabilidad usada por Gornitz et al, 1991 (indicado como Gornitz) y las clasificaciones propuestas por Thieler y Hammar-Klose, 2001 para la Costa Pacífica (indicada como USGS1) y para la Costa Atlántica y del Golfo de Méjico (indicada como USGS2)

Las dos variables cualitativas, **litología** y **geomorfología**, están relacionadas con el riesgo a erosión y, en consecuencia, son clasificadas según su efecto sobre este riesgo. Los tipos de roca y las formaciones costeras que presentan una mayor resistencia a la erosión, se sitúan en la zona de muy baja y baja vulnerabilidad, mientras que, a medida que su resistencia a este impacto disminuye, la vulnerabilidad asociada aumenta. En el caso de geomorfología, la clasificación considerada por el USGS es ligeramente diferente a la propuesta inicialmente, ya que, por ejemplo, salinas, arrecifes de coral y manglares pasan de vulnerabilidad moderada a muy alta.

La **pendiente costera** está relacionada con la vulnerabilidad a inundación y la potencial rapidez en el retroceso de la línea de orilla. De este modo, pendientes costeras bajas tienen una mayor vulnerabilidad ya que, en caso de inundación por subida del nivel del mar, el área afectada por el suceso y la rapidez de retroceso de la línea de costa serían mayores. Cabe notar que esta variable presenta una clasificación distinta en la costa Pacífica con respecto a la clasificación en las costas Atlántica y del Golfo de Méjico, ya que, como ha sido comentado, las escalas se adecuaron a las características de cada una de las costas de Estados Unidos.

En cuanto a **relieve** y **movimiento vertical** (RSLR), estos dos factores son considerados en Gornitz et al (1991) como los factores principales del riesgo a inundación. Para el caso de relieve, se establece que la franja situada a menos de 5m de altitud sobre el nivel actual del mar se encuentra expuesta a un riesgo elevado de inundación, ya que pueden presentarse mareas meteorológicas fuertes que actúen en combinación con la marea astronómica. Este riesgo disminuye progresivamente a medida que la elevación media de la zona aumenta. Por otro lado, los cambios del nivel del mar tienen en cuenta tanto la componente eustática (tendencia global) como la componente regional. Según Gornitz y White (1989), el valor a considerar para la tendencia global de ascenso del nivel del mar se encuentra entre 1,0 y 2,0 mm/año, rango que se utiliza para definir la clase de vulnerabilidad moderada. Mayores subidas relativas del nivel del mar, debidas normalmente a la subsidencia de la zona, reciben mayores valores de vulnerabilidad, mientras que menores subidas y bajadas relativas del nivel del mar, habitualmente debidas al levantamiento terrestre, reciben valores de vulnerabilidad menores. Sin embargo, en la adaptación del USGS, los rangos para la subida relativa del nivel del mar se ajustan a las condiciones de cada una de las costas en estudio. En la costa Pacífica, las zonas que experimentan un descenso relativo del nivel del mar se incluyen en las categorías de muy baja y baja vulnerabilidad, y a medida que la subida relativa del nivel del mar aumenta también aumenta la vulnerabilidad. En las costas Atlántica y del Golfo de Méjico, en cambio, la subida relativa del nivel del mar se gradúa usando el valor de la componente eustática (1,8 mm/año, Douglas, 1991) como muy baja vulnerabilidad, aumentando la vulnerabilidad a medida que aumenta el RSLR.

El **desplazamiento de la línea de orilla** es la única variable que, en vez de medir el efecto positivo o negativo de un agente o característica del sistema sobre la vulnerabilidad a erosión o inundación, es la propia medida del impacto. Es decir, la evolución de la línea de orilla es una medida del impacto erosivo producido en ésta. Cuando la tasa de evolución es positiva hablamos de acreción mientras que si la tasa es negativa se trata de erosión. En la clasificación de esta variable se asume que cuando la tasa de evolución se halla entre -1,0 y +1,0 m/año, la zona es estable y recibe un grado moderado de vulnerabilidad. Cuanto mayor es la erosión, es

decir, el impacto erosivo, la vulnerabilidad aumenta, mientras que si existe acreción, el impacto es menor y también lo es la vulnerabilidad.

El **rango mareal** estaba inicialmente graduado de modo que las costas micromareales (rangos mareales < 2,0m) recibían baja vulnerabilidad mientras que las costas macromareales (rangos mareales > 4,0m) tenían alta vulnerabilidad. El motivo de esta clasificación se debe a que un mayor rango mareal delimita una zona intermareal más amplia, susceptible a inundación debida a la acción combinada de marea y subida relativa del nivel del mar. Además, según Pethick (1984), la velocidad de las corrientes de marea en un estuario es proporcional al rango mareal y, por tanto, considerando constantes los demás factores, un mayor rango mareal generaría corrientes más fuertes, capaces de movilizar y transportar mayor volumen de sedimento. Así pues, las costas macromareales presentarían mayor riesgo tanto a nivel de erosión como de inundación. Sin embargo, en la adaptación del USGS se invierte esta clasificación, considerando que las costas micromareales tienen alta vulnerabilidad mientras que las costas macromareales tienen baja vulnerabilidad. El motivo de esta modificación se basa en la influencia potencial de los temporales en la evolución costera y sus impactos en relación con el rango mareal. En costas micromareales el nivel del mar se sitúa siempre cerca del nivel de pleamar y, por tanto, siempre cerca de una posible inundación por la acción de temporales. En costas con rangos mareales amplios, en cambio, existe una cierta probabilidad de que el temporal ocurra en estados de nivel del mar bajos, reduciéndose el riesgo de inundación. Además, en costas micromareales el impacto del oleaje sobre la costa se produce en una pequeña zona, produciendo una mayor erosión de esta. En cambio, en el caso de costas macromareales, la zona de rotura del oleaje es mayor y en consecuencia se reduce la erosión (Rosen, 1977). Con este razonamiento, por tanto, las costas macromareales presentan un menor riesgo tanto a inundación como erosión.

Por último, la **altura de ola** se usa como sustituto de la energía del oleaje, dado que la energía de ola es proporcional al cuadrado de la altura de ola ($E = 1\ \ 8\ \rho g H^2$). La energía del oleaje es el mecanismo encargado del transporte sedimentario, por tanto cuanto mayor es la energía del oleaje (altura de ola), mayor capacidad de movilizar y transportar sedimentos y mayor vulnerabilidad. En los trabajos de Gornitz esta altura es la altura de ola significante máxima, mientras que en los trabajos de Thieler y Hammar-Klose se trata de la altura de ola significante media, motivo por el cual el rango de alturas se reduce, ya que el promedio presenta valores mucho menores que la máxima.

3.2.5. Fórmula de evaluación

Las variables anteriormente descritas y cuantificadas pueden ser combinadas para producir un índice que identifique las zonas costeras que presentan una mayor vulnerabilidad a inundación y erosión. Sin embargo, tal y como se hace notar en Gornitz et al (1997), es posible que para algunos tramos costeros no todas las variables sean conocidas y, en consecuencia, el índice de vulnerabilidad obtenido en estas zonas infravalore la vulnerabilidad real. Con el objetivo de minimizar este error, diferentes métodos de integración fueron testados en 93 segmentos costeros seleccionados al azar, de los cuales, seis fórmulas fueron consideradas adecuadas cuando el número de factores no conocidos es menor a tres.

Las seis fórmulas consideradas originalmente para el Coastal Vulnerability Index (CVI) son:

$$CVI_1 = \sqrt{x_1 * x_2 * x_3 * \ldots * x_n} \quad n \qquad [3.1]$$

$$CVI_2 = \sqrt{x_1 * x_2 * 1\ 2\ x_3 + x_4\ * x_5 * 1\ 2\ x_6 + x_7} \quad n-2 \qquad [3.2]$$

$$CVI_3 = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \cdots + x_n^2} \quad n \qquad [3.3]$$

$$CVI_4 = \sqrt{x_1 * x_2 * x_3 * \ldots * x_n} \quad 5^{n-4} \qquad [3.4]$$

$$CVI_5 = CVI_1^{\ 1\ 2} \qquad [3.5]$$

$$CVI_6 = 4x_1 + 4x_2 + 2\ x_3 + x_4\ + 4x_5 + 2\ x_6 + x_7 \qquad [3.6]$$

Donde

n = numero de variables presentes
x_1 = relieve
x_2 = movimiento vertical
x_3 = litología
x_4 = geomorfología
x_5 = desplazamiento de la línea de orilla
x_6 = altura de ola
x_7 = rango mareal

Además, en Gornitz et al (1997), se realizó un estudio de la sensibilidad de cada una de las fórmulas propuestas a errores de clasificación en las variables integrantes. Para ello, de una a tres variables fueron reclasificadas de muy alta (5) a muy baja vulnerabilidad (1), manteniendo las demás variables con un valor fijo de muy alta vulnerabilidad. La sensibilidad se calculó como el porcentaje de cambio respecto al valor original del CVI (todos los factores con valor 5), de manera que cuanto mayor es el porcentaje de cambio, mayor es la sensibilidad del índice. Los resultados mostraron que los índices más adecuados eran el CVI_5 y CVI_6, ya que las fórmulas del CVI_1, CVI_2 y CVI_4 son muy sensibles a errores de clasificación de las variables, mientras que el CVI_3 es muy insensible (ver Tabla 3.3).

Concretamente la fórmula del CVI_5 fue usada en Gornitz et al (1991) y fue también la fórmula propuesta en la adaptación del CVI por parte del USGS. En consecuencia, cuando se habla de la fórmula de evaluación del Coastal Vulnerability Index, la fórmula asociada es la del CVI_5 (Ecuación 3.5).

Una vez obtenidos los valores del CVI en cada uno de los tramos en los que se divide la zona de estudio, normalmente estos se clasifican en 4 clases de vulnerabilidad según los cuartiles de la serie. Así pues, los valores del CVI inferiores al primer cuartil reciben vulnerabilidad baja, valores entre el primer y el segundo cuartil son considerados con vulnerabilidad moderada, entre el segundo y el tercer cuartil tienen vulnerabilidad alta y valores superiores al tercer cuartil reciben vulnerabilidad muy alta.

CVI	**Numero de variables modificadas**		
	1	**2**	**3**
$\boldsymbol{CVI_1}$	80	96	99
$\boldsymbol{CVI_2}$	80	96	99
$\boldsymbol{CVI_3}$	14	27	41
$\boldsymbol{CVI_4}$	80	96	99
$\boldsymbol{CVI_5}$	56	80	81
$\boldsymbol{CVI_6}$	16	32	48

Tabla 3.3. Sensibilidad de las diversas fórmulas de CVI a cambios de clasificación de una a tres de las variables constituyentes (Gornitz et al, 1997)

3.2.6. Aplicación a la costa catalana

Tal y como ha sido indicado anteriormente, este método fue desarrollado para evaluar la vulnerabilidad costera en Estados Unidos, aunque ha sido aplicado también en otros países

como Grecia (Doukakis, 2005), Argentina (Kokot et al, 2004), Australia (Abuodha y Woodroffe, 2007) y también España (Ojeda Zújar et al, 2008). En algunos de los trabajos, el CVI ha sido ligeramente modificado, cambiando algunas de las variables constituyentes o adaptando algunas de las escalas de clasificación de acuerdo con las características de la zona en cuestión.

En el caso de la costa catalana, creemos que se debería modificar alguna variable y adaptar la graduación con el objetivo de ajustar el índice a las características locales, obteniendo, de este modo, un sistema de clasificación que refleje adecuadamente la vulnerabilidad relativa de la costa catalana.

A continuación se especifica cómo se podrían adaptar y/o reescalar las diversas variables en el caso de la costa catalana con el fin de calcular el Coastal Vulnerability Index.

En el caso de las variables **geomorfología**, **rango mareal** y **evolución costera**, se considera que el sistema de clasificación usado por el USGS es apropiado también para la costa catalana y, por tanto, podría ser mantenido.

En el caso del **oleaje** en la costa catalana, este se encuentra caracterizado gracias a una red de boyas, situadas a profundidades de entre 45 y 90m y en funcionamiento desde finales de la década de los 80, que permite caracterizar adecuadamente el oleaje por zonas. Así, se pueden establecer 5 grandes sectores, en los que las condiciones del oleaje pueden ser consideradas homogéneas. Cada uno de estas zonas es caracterizada por una boya, lo que permite conocer la altura de ola significate media en cada uno de ellas. Los valores de esta variable en los cinco sectores en los que se ha dividido la costa catalana se encuentran entre 0,61 y 0,87m. En la metodología propuesta por el USGS, se distinguen dos clasificaciones para la altura de ola media significante según la costa de Estados Unidos que se pretende estudiar. Si se considera la clasificación para la costa Pacífica, los cinco valores en la costa catalana pertenecerían a la categoría de muy baja vulnerabilidad, mientras que si se considera la clasificación para la costa Atlántica, cuatro de los valores tendrían baja vulnerabilidad y uno de ellos vulnerabilidad moderada. Así pues, aplicando el estándar desarrollado para Estados Unidos ninguna de las dos graduaciones parece representar de forma adecuada la variabilidad de este agente en la costa catalana y, en todos los casos, da una vulnerabilidad baja que no necesariamente se corresponde con la realidad teniendo en cuenta los efectos del impacto de algunos temporales en la costa. Por ello sería recomendable formular una nueva escala que permita reflejar estas variaciones para así poder evaluar también la variación de la vulnerabilidad.

En lo que refiere a **pendiente costera**, en la aplicación del Coastal Vulnerability Index a los Parques Nacionales costeros de Estados Unidos (Pendleton et al, 2004), el cálculo de la pendiente regional se realiza mediante una matriz numérica de elevaciones que se extiende tanto hacia el interior de la costa como hacia mar adentro. En Ojeda Zújar et al, 2008, donde se aplica la metodología del CVI para calcular la vulnerabilidad de la costa de Andalucía, se encuentra que el cálculo de esta variable tal y como se propone originalmente presenta el problema de una falta de detalle a la hora de identificar pequeñas marismas, deltas, valles, etc., motivo por el cual se sustituye la variable pendiente por una nueva variable llamada "índice topográfico". Este índice se calcula también a partir de una matriz de elevaciones, pero en vez de calcular la pendiente media en un radio prefijado, se consideran rectángulos perpendiculares a la línea de costa, de ancho fijo pero longitud variable, determinada por los terrenos emergidos con altitud inferior a una determinada cota. De estos rectángulos se obtienen tres variables (distancia, pendiente media y altura media) que son combinadas para obtener la nueva variable de "índice topográfico". En el caso de la costa catalana, al no utilizar un modelo digital del terreno, ninguna de las dos propuestas es aplicable de forma directa y por ello se propone una nueva forma de calcular la variable pendiente costera.

Ya que tanto la pendiente tierra adentro como mar adentro son participes de los impactos de inundación y erosión, se considera que la variable de pendiente costera debe contener información de ambas, tal y como se hace en el CVI. En el caso de la costa andaluza, la nueva variable índice topográfico solo tiene en cuenta la pendiente de la zona emergida, por lo que no se considera el método más adecuado de caracterizar la sensibilidad de la costa. Sin embargo, sí que se encuentra más acertado su razonamiento a la hora de definir la zona de cálculo de la pendiente a partir de una cota prefijada en vez de en una distancia determinada, ya que la subida relativa del nivel del mar viene definida también como una magnitud vertical.

Así pues, teniendo en cuenta las anteriores reflexiones, la pendiente costera en la costa catalana podría ser calculada como la media aritmética de la pendiente "emergida" y la pendiente "sumergida", ambas obtenidas sobre la perpendicular a la costa. Para la pendiente sumergida se utilizaría la distancia hasta la batimétrica de -10m (profundidad de cierre aproximadamente) y para la pendiente emergida se utilizaría la altimétrica de +5m, ya que, según las predicciones del IPCC, la subida del nivel del mar en el próximo siglo se situará entre 0,18 y 0,59m, por lo que no es necesario considerar altitudes de más de 5m. En dicho caso, las playas de la costa catalana presentarían pendientes de entre 0,1 y 29,4%, rango mucho más amplio al contemplado en las graduaciones del USGS, motivo por el cual también debería ajustarse una nueva escala para la graduación de esta variable, que reflejase adecuadamente las variaciones de pendiente de la costa catalana.

Por último, en cuanto a la variable de **RSLR**, toda la costa catalana presentaría la misma subida relativa del nivel del mar, a excepción de la zona del Delta del Ebro, dónde se registran valores de subsidencia de entorno a 1,75 mm/año (Somoza et al, 1998). Debido a que esta variable se mantiene prácticamente constante a lo largo de toda la costa, su consideración no tendría apenas influencia en la vulnerabilidad relativa pero sí en el valor absoluto de ésta. Por tanto, se considera que la escala más apropiada es la propuesta en Gornitz et al (1991), ya que tiene en cuenta todo el posible rango de valores de esta variable, situando el valor global de la subida del nivel del mar en la clase de vulnerabilidad moderada. Sin embargo, cabe indicar que los últimos estudios realizados por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), sitúan la subida del nivel del mar entorno a los 1,8 y 5,9mm/año hasta el año 2100, según sea el escenario considerado (Meehl et al, 2007). Así pues, existe una incertidumbre en el valor de la componente eustática de la subida del nivel del mar, que conlleva que el valor considerado para definir la clase de vulnerabilidad moderada pueda no ser el más adecuado.

3.2.7. Discusión

En términos generales, el Coastal Vulnerability Index constituye un buen método de evaluación de la vulnerabilidad integrada (inundación y erosión) de la costa, ya que tiene en cuenta los procesos principales que actúan en el litoral y también la capacidad de adaptación de la costa. Sin embargo, aunque los agentes inductores de vulnerabilidad considerados son suficientes, la respuesta del sistema podría ser mejorada considerando más variables como ancho de playa, altura de berma, etc.

Asimismo, aunque el criterio de clasificación de los diversos agentes es correcto, porque representa adecuadamente su influencia en los impactos de erosión e inundación (para el rango mareal se considera más apropiado usar el razonamiento del USGS), tal vez sería más acertado graduar los impactos inducidos por cada uno de esos agentes. De este modo, por ejemplo, en lugar de clasificar el movimiento vertical en cada segmento costero (el agente), podría clasificarse la distancia inundable en cada uno de esos segmentos (el impacto). Además, eso permitiría integrar en cada uno de los impactos inducidos por los diversos agentes, la capacidad de respuesta del sistema. En el ejemplo anterior, al calcular la distancia inundable (impacto), podría introducirse el ancho de la playa (respuesta) y así graduar impacto y respuesta de forma conjunta en vez de separada. Así pues, para cada impacto asociado a un agente, se establecería una graduación de las consecuencias residuales que produce ese impacto en el sistema, después de que el proceso de adaptación haya tenido lugar.

Por último, así como el índice desarrollado inicialmente presenta una única clasificación de las variables para las diversas zonas costeras de Estados Unidos, en la adaptación realizada por el USGS, se pueden distinguir dos tipos de variables: variables "absolutas" (geomorfología, rango mareal y evolución costera), cuyos rangos de clasificación permanecen constantes sea cual sea la costa analizada, y variables "relativas" (subida relativa del nivel del mar, pendiente costera y altura de ola significante), cuyos rangos de clasificación varían según sea la zona costera de estudio. Debido a la existencia de estas variables "relativas", los resultados obtenidos no permiten conocer la vulnerabilidad absoluta de la zona costera, así como tampoco comparar los valores de vulnerabilidad obtenidos en distintas zonas. Recordando la Tabla 3.2, donde pueden verse las clasificaciones usadas en Hammar-Klose y Thieler (2001) para las distintas costas de EEUU, podemos comprender estas 2 implicaciones de la no "universalidad" en la cuantificación del CVI. Por una parte, la clasificación de la costa este es distinta a la de la costa oeste, por tanto los resultados obtenidos en estas dos zonas no pueden ser comparados entre sí, con lo cual no podemos conocer qué zonas costeras de EEUU son más vulnerables. Por otra parte, el sistema de clasificación de las variables "relativas" difiere de una zona a otra porque se realiza en función del valor de la variable en la propia costa analizada. Esto implica que, dado un valor de esta variable, sólo podemos saber si tiene alta o baja vulnerabilidad con respecto a la costa estudiada (vulnerabilidad relativa) pero no si es o no vulnerable (vulnerabilidad absoluta). Por ejemplo, una pendiente costera de 0,3% sería muy vulnerable (valor 5) en la costa atlántica y muy poco vulnerable (valor 1) en la costa pacífica, pero no podemos saber si la pendiente 0,3% es o no vulnerable en términos absolutos.

Por lo tanto, aunque la aplicación de este método proporciona resultados razonables a la hora de identificar o priorizar zonas a lo largo de la costa en términos de su respuesta potencial a los agentes considerados, debería incorporarse el mayor conocimiento que se tiene de los procesos litorales para definir una metodología que permita valorar la vulnerabilidad de una forma más cuantitativa.

3.3. Catalan Vulnerability Index

3.3.1. Descripción y marco general

El Catalan Vulnerability Index (CatVI) es el índice propuesto y desarrollado en este trabajo para evaluar la vulnerabilidad de la costa catalana debido a la acción integrada de múltiples agentes. En este desarrollo la vulnerabilidad se define como el potencial del sistema costero a ser dañado

y se cuantifica mediante la diferencia entre el impacto producido por los procesos que actúan en el litoral y la capacidad de adaptación que tiene el sistema.

Dada la complejidad de la dinámica costera, para el desarrollo del CatVI se asume que los distintos procesos que actúan en el litoral pueden ser aislados y analizados de forma separada, cuantificando la vulnerabilidad asociada a cada uno de ellos, para ser combinados posteriormente y obtener la vulnerabilidad global de la zona. Los procesos considerados son:

- Erosión a medio plazo debido a gradientes en el transporte longitudinal de sedimentos
- Erosión a largo plazo debido a la subida relativa del nivel del mar
- Inundación a largo plazo debido a la subida relativa del nivel del mar
- Erosión a corto plazo inducida por el impacto de temporales
- Inundación a corto plazo inducida por el impacto de temporales

Así pues, primero de todo, para cada uno de los procesos litorales considerados en el análisis, se definen uno o más indicadores de vulnerabilidad, variables intermedias que reproducen de forma simplificada el proceso a analizar y que incluyen tanto el agente impulsor como las características costeras que definen la respuesta.

A continuación, a cada uno de los indicadores de vulnerabilidad propuestos se le asocia una ley de vulnerabilidad con variación lineal que permite obtener el índice de vulnerabilidad parcial correspondiente. Este índice cuantifica el potencial de un tramo costero a ser dañado por el proceso litoral considerado en cada caso. Su rango de variación se encuentra entre 1,0 y 5,0 y se divide en cinco clases cualitativas de vulnerabilidad.

Finalmente, se definen indicadores de vulnerabilidad global que consisten en fórmulas de agregación de los diversos índices de vulnerabilidad parcial con el objetivo de reflejar la interactuación de los diversos procesos en la zona costera. La vulnerabilidad global o integrada se determina a partir de estos indicadores, ya sea de forma cualitativa (mediante rangos), o de forma cuantitativa (desarrollando leyes de vulnerabilidad global). En el caso de una evaluación cuantitativa, el rango de variación de los índices de vulnerabilidad global desarrollados es de 0,0 a 1,0.

Debe señalarse que los indicadores de vulnerabilidad parcial desarrollados pueden ser evaluados para más de una situación o "escenario", lo que genera la obtención de diversos valores tanto para ese índice como para el posterior índice de vulnerabilidad global. En el caso de este estudio, y tal como se verá más adelante, la evaluación de los indicadores ha sido realizada para

una sola situación, a excepción de los procesos inducidos por la subida relativa del nivel del mar, cuya vulnerabilidad ha sido evaluada para tres escenarios distintos. Esto se ha hecho por simplicidad aunque en el caso de disponer de múltiples escenarios se puede aplicar para cada uno de ellos.

Cabe notar también, que aunque esta metodología ha sido desarrollada con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad de las playas del litoral catalán, puede ser fácilmente adaptada a otras geomorfologías y zonas litorales. De hecho, a lo largo del desarrollo, se destacan aquellas hipótesis específicas para la geomorfología y litoral considerados, a la vez que se formulan recomendaciones para su adaptación a otras condiciones (distinta geomorfología, rango mareal, funciones de la zona costera, etc.).

3.3.2. Índices de vulnerabilidad parcial

Son los índices que cuantifican el potencial de un tramo costero a ser dañado por cada uno de los procesos litorales considerados en el análisis. Su rango de variación se ha establecido entre 1,0 y 5,0 y se divide en cinco clases equiespaciadas: vulnerabilidad muy baja (cuando el índice de vulnerabilidad parcial se encuentra entre 1,0 y 1,7), vulnerabilidad baja (de 1,8 a 2,5), vulnerabilidad moderada (entre 2,6 y 3,3), vulnerabilidad alta (de 3,4 a 4,1) y vulnerabilidad muy alta (entre 4,2 y 5,0).

Aunque se analizan cinco procesos litorales, para algunos de ellos se define más de un indicador, por lo que el total de índices desarrollados en este trabajo es de siete. La nomenclatura de indicadores e índices propuestos para cada proceso se muestra en la Tabla 3.4.

Procesos Litorales	Indicadores	Índices de Vulnerabilidad Parcial
Erosión a medio plazo	Em_a	$IVEm_a$
	Em_r	$IVEm_r$
Erosión por RSLR	Es_a (1, 2 y 3)	$IVEs_a$ (1, 2 y 3)
	Es_r (1, 2 y 3)	$IVEs_r$ (1, 2 y 3)
Inundación por RSLR	Is (1, 2 y 3)	IVIs (1, 2 y 3)
Erosión por temporales	Et	IVEt
Inundación por temporales	It	IVIt

Tabla 3.4. Nomenclatura de los indicadores e índices de vulnerabilidad parciales asociados a cada uno de los procesos considerados en el nuevo método desarrollado

Índices de vulnerabilidad parcial a erosión costera a medio plazo

Se trata de cuantificar la vulnerabilidad al retroceso de la línea de orilla a medio plazo debido generalmente a gradientes en el transporte longitudinal de sedimentos. Estos gradientes suelen estar inducidos por la acción humana (construcción de puertos y otras obras transversales), aunque también existen gradientes de origen "natural" (cambios de orientación de la línea de orilla).

Para la erosión costera a medio plazo se definen dos indicadores de vulnerabilidad atendiendo a dos posibles criterios de evaluación:

$$Em_a = W\ t\ = W_0 + \alpha t \qquad [3.7]$$

$$Em_r = W(t)/W_0 = (W_0 + \alpha t)\ \ W_0 \qquad [3.8]$$

Donde W_0 es el ancho medio de playa actual, α es la tasa de evolución costera, t es el tiempo de proyección considerado para este agente y $W(t)$ es el ancho medio de playa en el tiempo de proyección.

Como se puede ver, ambos indicadores incluyen la magnitud del impacto, que en este caso sería el retroceso o avance de la línea de orilla (αt), y la capacidad de respuesta del sistema, en este caso el ancho de playa (W_0).

En el primer indicador [3.7], la evaluación de la vulnerabilidad se realiza en términos absolutos, ya que se cuantifica la capacidad del recurso para cumplir las funciones de la zona costera. Debido a que las funciones de la costa varían según la región o el país, los criterios para definir la ley de vulnerabilidad asociada a este indicador deben ser definidos por los diversos gestores de la zona costera y, en consecuencia, esta ley no es "universal".

En este trabajo se propone que la ley de vulnerabilidad sea definida en base a aquella función de la zona costera que requiera una mayor cantidad del recurso, asociando un valor de vulnerabilidad baja (2) cuando el recurso en el tiempo de proyección sea suficiente para cumplir esa función y una vulnerabilidad muy alta (5) cuando se produzca una situación de "colapso".

En el caso del litoral catalán, la función principal de la costa es la recreativa (además de la de protección, para la cual el ancho de playa necesario es menor). Según MOP (1970), considerando la función recreativa, las playas pueden dividirse transversalmente en cuatro

zonas: zona activa o de inmersión, es la zona de transición entre la playa emergida y la sumergida; zona de descanso, es el área donde se sitúa la mayor parte de usuarios; zona de servicio, donde se colocan las instalaciones para los usuarios; y zona de seguridad, existente en playas relativamente anchas y que actúa como área de transición entre la zona de descanso y la zona de servicios (Figura 3.2). El ancho de cada una de estas zonas depende de las dimensiones de la playa, siendo los valores presentados en la Tabla 3.5 valores orientativos para los casos de playas anchas y playas estrechas. Aunque el ancho de la zona de descanso podría aumentar a la vez que lo hace el número de usuarios, en la práctica, estos prefieren concentrarse cerca de la orilla, hasta distancias de entre 30 y 40m, tal y como se puede ver en esta misma tabla. Así pues, aunque el ancho de playa fuese superior, la zona de descanso no aumentaría sino que los usuarios se concentrarían de modo que la densidad de carga (m^2 de playa por usuario) disminuiría progresivamente hasta alcanzar un valor intolerable para estos.

Así pues, se considera que un ancho de playa de 40m es suficiente para cumplir con la función recreativa y, por este motivo, se le asigna baja vulnerabilidad:

$$Em_a = 40m \rightarrow IVEm_a = 2 \qquad [3.9]$$

Para establecer la situación de colapso, se tiene en cuenta el estudio realizado por Yepes (1999), dónde se proponen una serie de valores de saturación puntual de usuarios para playas mediterráneas de uso masivo, según la capacidad de carga de la zona activa y de reposo (Tabla 3.6). De acuerdo con este estudio, la situación de colapso (o intolerable) se produciría cuando la densidad de carga fuese menor a $2m^2$/usuario. Teniendo en cuenta que en Alemany (1984), se encuentra que la densidad de carga media del litoral catalán, considerando una franja de utilización masiva de 30m, es de $7{,}7m^2$/usuario (excluyendo las playas del Delta del Ebro), podría considerarse que la situación de colapso en el litoral catalán se daría cuando el ancho de playa fuese inferior a 8m. En el caso que nos ocupa, y adoptando una posición conservadora, se establece que la situación de colapso se produce cuando el ancho de playa es menor o igual a 10m:

$$Em_a = 10m \rightarrow IVEm_a = 5 \qquad [3.10]$$

Aplicando estas dos condiciones, se obtiene, para la costa catalana, la ley del índice de vulnerabilidad parcial absoluto asociada al impacto de erosión costera a medio plazo ($IVEm_a$) (Figura 3.3).

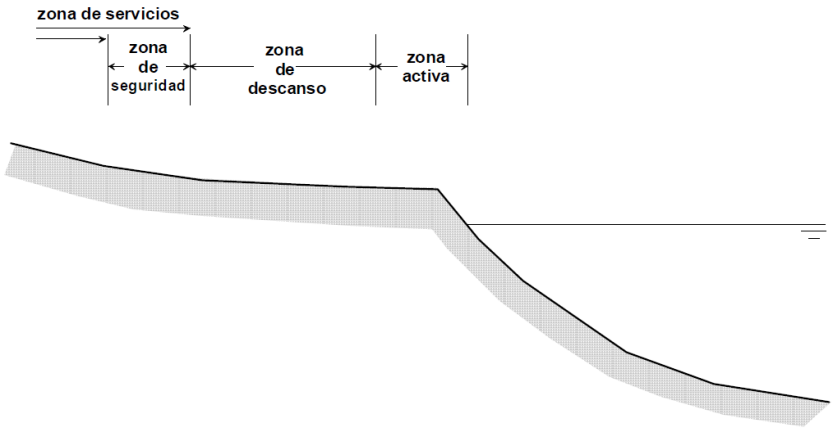

Figura 3.2. Zonificación transversal de una playa según su función recreativa (Valdemoro, 2005)

Zonas	Playas anchas (> 50m)	Playas estrechas (< 50m)
Activa	15	10
Descanso	25	20
Seguridad	10	10
Servicio	Variable	Resto

Tabla 3.5. Ancho orientativo (m) de las diversas zonas en que puede ser dividida una playa según su uso recreativo (Valdemoro y Jiménez, 2006)

Capacidad de carga (m^2/usuario)	Saturación puntual
< 2	Intolerable
3	Saturación
4	Aceptable
5	Confortable
> 10	Muy confortable

Tabla 3.6. Saturación puntual de usuarios para playas mediterráneas de uso masivo (Yepes, 1999)

En el segundo indicador [3.8], la evaluación de la vulnerabilidad se efectúa en términos relativos, ya que no se mide el recurso existente, sino la variación de este recurso en un tiempo determinado. Al tratarse de un indicador que muestra la tendencia evolutiva del sistema, sí se puede definir una ley de vulnerabilidad con carácter "universal" (aplicable a todas las zonas costeras). Para el desarrollo de dicha función, se considera que cuando la playa se encuentra en

"equilibrio", es decir, el ancho de playa en el tiempo de proyección es el mismo al inicial, la vulnerabilidad es moderada:

$$Em_r = 1 \rightarrow IVEm_r = 3 \qquad [3.11]$$

mientras que si el recurso disponible en el tiempo de proyección considerado es de sólo el 50% del recurso inicial, la vulnerabilidad de la zona es muy alta:

$$Em_r = 0{,}5 \rightarrow IVEm_r = 5 \qquad [3.12]$$

Aplicando estos dos criterios se obtiene la ley del índice de vulnerabilidad parcial relativo al impacto de erosión costera a medio plazo ($IVEm_r$) (Figura 3.4).

En ambos casos, el gestor debe fijar el tiempo de proyección en el que se evalúa el ancho de playa, y por tanto la vulnerabilidad, teniendo en cuenta la intensidad del agente. En el caso que nos ocupa se ha tomado un valor de 10 años, lo que se adecua a la escala temporal del agente considerado. Sin embargo, este horizonte temporal es de libre elección de tal forma que puede ser seleccionado en función de la zona a analizar en cuestión.

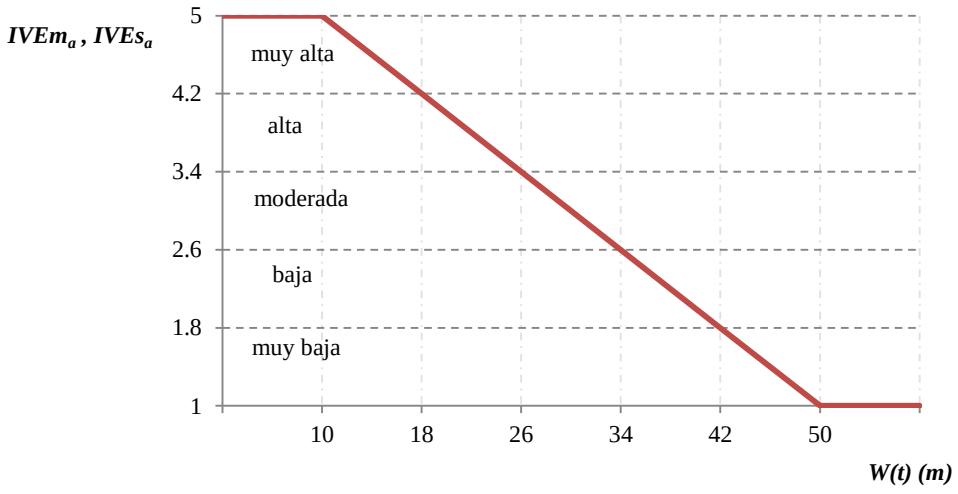

Figura 3.3. Ley de los índices de vulnerabilidad parcial absolutos a erosión costera a medio plazo y erosión debida a RSLR para el caso del litoral catalán

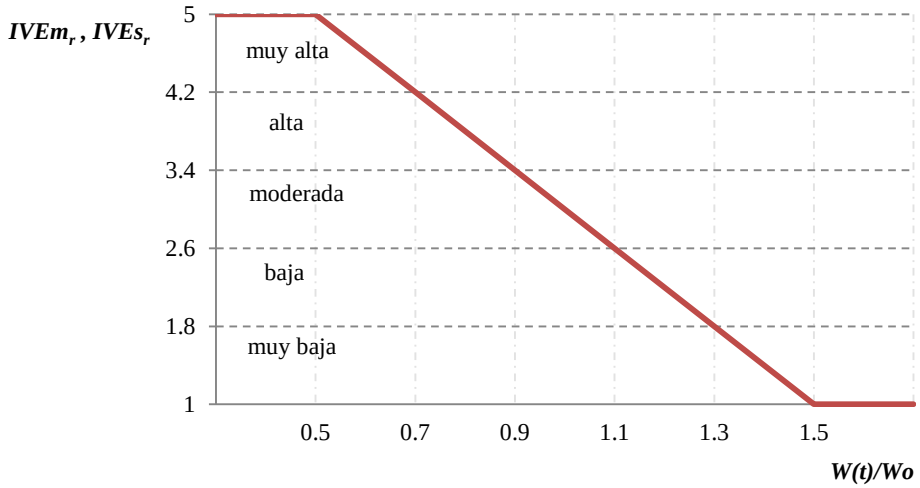

Figura 3.4 Ley de los índices de vulnerabilidad parcial relativos a erosión costera a medio plazo y erosión debida a RSLR

Índices de Vulnerabilidad Parcial a erosión por RSLR

Se trata de cuantificar la vulnerabilidad al retroceso de la línea de orilla a largo plazo inducido por la subida relativa del nivel del mar (subida eustática de origen climático y subsidencia).

La evaluación de la vulnerabilidad a erosión debida a RSLR se hace de forma análoga al caso de la erosión costera a medio plazo. Por una parte, se desarrolla un indicador en términos absolutos (Es_a), que viene definido por el ancho de playa en el tiempo de proyección ($W(t)$), y por otro, un indicador en términos relativos (Es_r), definido por el ancho de playa en el tiempo de proyección respecto al ancho de playa inicial ($W(t)/W_0$). Las funciones de vulnerabilidad asociadas, que nos permiten obtener los índices de vulnerabilidad a erosión por RSLR absoluto y relativo ($IVEs_a$, $IVEs_r$), son las mismas que las desarrolladas para la erosión costera a medio plazo (Figuras 3.3 y 3.4).

En este caso, el cálculo del ancho de playa para el tiempo de proyección se realiza de acuerdo con Bruun (1954), donde se desarrolla una metodología para la evaluación de la erosión producida en una playa debido a la subida relativa del nivel del mar. Este modelo supone que, debido a la subida del nivel del mar, el perfil de playa activa responde tendiendo a mantener su forma de equilibrio con respecto al nivel del mar, de tal forma que sufre un desplazamiento hacia tierra (erosión) y hacia arriba, depositándose los sedimentos en la zona litoral inmediata hacia el mar, hasta producirse una elevación del fondo igual a la elevación del nivel del mar (Figura 3.5). Así pues, a largo plazo y considerando un ancho de playa suficientemente grande,

la playa se reconstruiría bajo las nuevas condiciones siempre y cuando exista material suficiente y espacio de acomodación. Normalmente, la existencia de infraestructuras en la parte trasera de la playa limita la capacidad de reconstrucción de esta, reduciendo o perdiendo completamente la playa debido al retroceso producido.

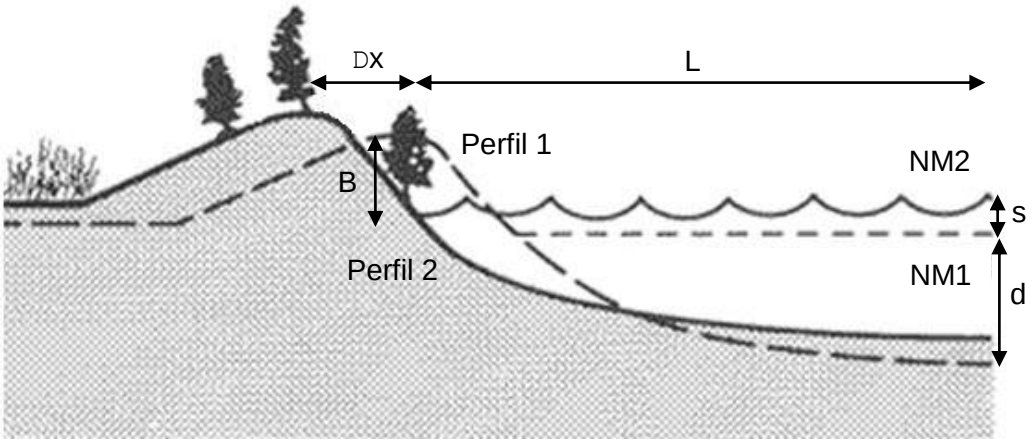

Figura 3.5. Representación de la regla de Bruun para el impacto de erosión costera debido a la subida relativa del nivel mar (modificado de Titus, 1990)

Así pues, el ancho de playa para el tiempo de proyección se calcula como:

$$W\ t\ = W_0 - \Delta x \qquad [3.13]$$

Donde W_0 es el ancho medio de playa actual y Δx se evalúa de acuerdo con Bruun (1954):

$$\Delta x = s\ \ \frac{L}{B+d} \qquad [3.14]$$

Siendo,

Δx el retroceso causado por la elevación del nivel del mar
s la subida del nivel del mar
L ancho del perfil activo (hasta la profundidad activa)
B la altura de berma
d la profundidad de cierre (límite de la profundidad del perfil activo)

Igual que en el caso de erosión costera a medio plazo, los indicadores propuestos para la evaluación de la vulnerabilidad a erosión por RSLR tienen en cuenta tanto la magnitud del impacto, en este caso el retroceso de la línea de orilla debido a la subida del nivel del mar (Dx), como la capacidad de respuesta del sistema, el ancho de playa. Además en el cálculo del impacto no sólo interviene la intensidad del agente (la subida del nivel del mar de valor s), sino que también intervienen las características del sistema, ya que, tal y como se observa en la Figura 3.5, el cociente $L\ \ (B+d)$ equivale al inverso de la pendiente sumergida. En el caso de este trabajo, se ha utilizado la pendiente hasta cota -10m.

Al igual que en el índice anterior, para evaluar la vulnerabilidad frente a RSLR, el gestor debe escoger el tiempo de proyección adecuado para este agente, tiempo en el que debe fijar el valor de la subida del nivel del mar. En este trabajo, se propone un tiempo de proyección de 100 años, dado que este agente tiene una magnitud muy baja y por tanto es un proceso de muy largo plazo. En cuanto al valor de la subida del nivel del mar, se utilizan las predicciones del IPCC, organismo según el cual la subida del nivel del mar será de entre 1,8 y 5,9 mm/año hasta el año 2100 (Meehl et al, 2007). Aquí este intervalo ha sido discretizado en tres valores, creando tres escenarios posibles: escenario 1 con RSLR=1,8mm/año, escenario 2 con RSLR= 3,8mm/año y escenario 3 con RSLR= 5,9mm/año.

Con estas consideraciones, en cada playa del litoral catalán, se han obtenido los dos indicadores de vulnerabilidad propuestos (Es_a y Es_r) para cada uno de los tres escenarios definidos, obteniendo de este modo, seis índices de vulnerabilidad parcial a erosión por RSLR:

- $IVEs_{a1}$: IV a erosión por RSLR absoluto en escenario 1
- $IVEs_{a2}$: IV a erosión por RSLR absoluto en escenario 2
- $IVEs_{a3}$: IV a erosión por RSLR absoluto en escenario 3
- $IVEs_{r1}$: IV a erosión por RSLR relativo en escenario 1
- $IVEs_{r2}$: IV a erosión por RSLR relativo en escenario 2
- $IVEs_{r3}$: IV a erosión por RSLR relativo en escenario 3

Índice de Vulnerabilidad Parcial a inundación por RSLR

En términos generales, se trata de definir un indicador que evalúe la vulnerabilidad del sistema a la penetración tierra adentro de la lámina de agua debido a la subida relativa del nivel del mar

(impacto), teniendo en cuenta la capacidad de adaptación del sistema. Para ello, se propone el siguiente indicador:

$$Is = {}^{s}\ p - W_0 \qquad [3.15]$$

donde,

s = subida del nivel del mar en el tiempo de proyección considerado
p = pendiente emergida
W_0 = ancho medio de playa actual

Con este indicador se consigue combinar el impacto de inundación por RSLR, representado por *s/p*, con la respuesta del sistema, representada por el ancho de playa actual. Además, el impacto depende tanto de la magnitud del agente (*s*) como de las características del sistema (*p*).

Si bien el indicador propuesto puede ser utilizado a nivel global, ya que reproduce de forma adecuada el proceso litoral de interés, la asociación de una ley de vulnerabilidad depende de la zona costera en estudio, ya que un mismo valor del indicador puede no tener las mismas implicaciones /consecuencias en la parte trasera de la playa, según cuál sea la regulación del suelo en esa zona. Es decir, las limitaciones de uso en los terrenos contiguos a la ribera del mar son específicas de cada región o país y, ya que la ley de vulnerabilidad debería ser definida en base a estas limitaciones, esta ley será distinta en cada zona.

Para el caso del litoral catalán, la definición de la ley de vulnerabilidad asociada al impacto de inundación por RSLR se ha realizado de acuerdo con la Ley de Costas (BOE, 1988). Dicha ley establece una zona de servidumbre de protección, medida tierra adentro desde el límite interior de la ribera del mar, que varía de los 20m (para los suelos urbanos y urbanizables programados con Plan Parcial aprobado a la entrada en vigor de la ley) a los 100m (para los otros casos), ampliable hasta 200m cuando se considere necesario (Figura 3.6).

De acuerdo con los valores establecidos en esta ley para la zona de servidumbre, se propone asignar vulnerabilidad muy baja al caso en que la inundación de la zona de servidumbre llegue a los 20m y vulnerabilidad muy alta cuando llegue a los 100m. Cabe notar que para el valor de muy alta vulnerabilidad se ha escogido el límite de 100m en vez de 200m ya que este último solo se considera en algunas ocasiones.

Así pues, los criterios para definir la ley de variación del índice de vulnerabilidad a inundación por RSLR (Figura 3.7) se pueden escribir como:

$$^{s}{}_{p} = W_0 + 20m \rightarrow IVIs = 1 \qquad [3.16]$$

$$^{s}{}_{p} = W_0 + 100m \rightarrow IVIs = 5 \qquad [3.17]$$

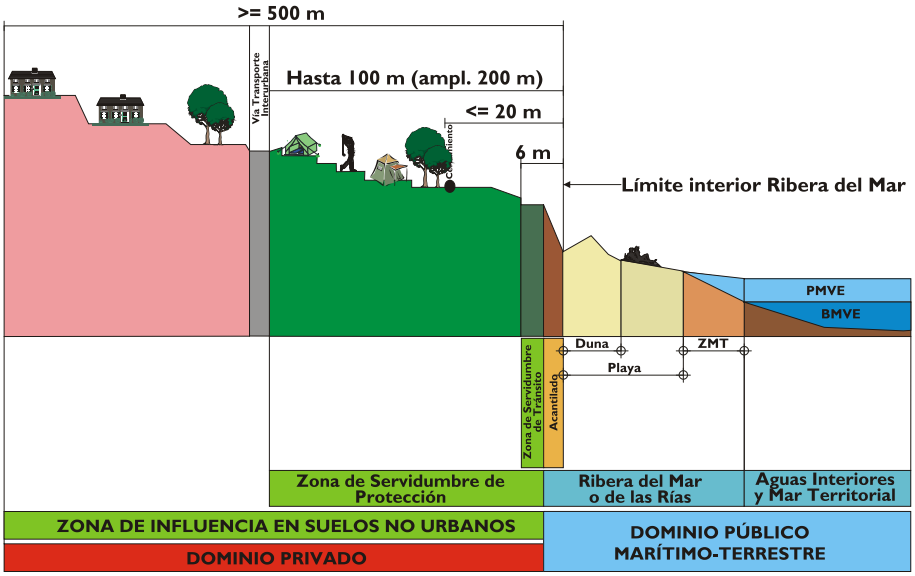

Figura 3.6. Limitaciones de los terrenos contiguos a la ribera del mar por razones de protección del dominio público marítimo-terrestre (Ministerio de Medio Ambiente)

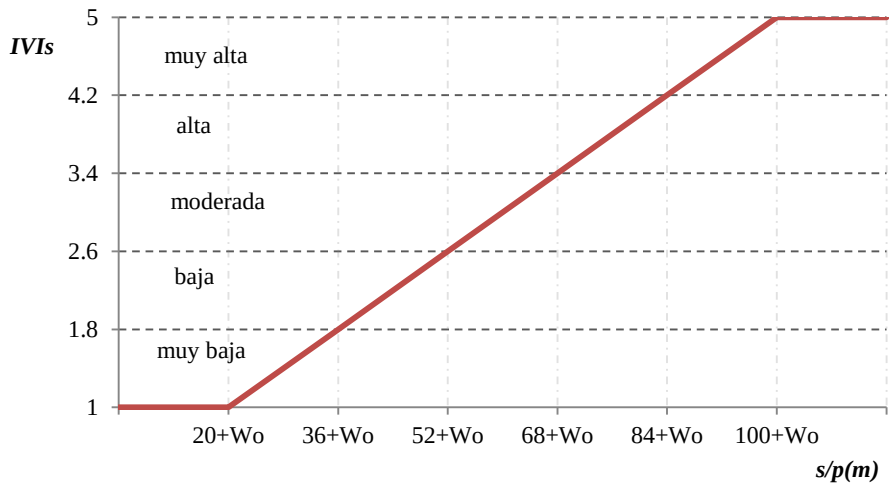

Figura 3.7. Ley del índice de vulnerabilidad parcial a inundación debida a RSLR para el litoral catalán

En el caso de la evaluación de la vulnerabilidad a inundación por RSLR, el gestor deberá asumir el mismo tiempo de proyección y magnitud de la subida del nivel que los considerados en el caso de la erosión debida a este mismo agente. Tal y como ha sido indicado con anterioridad, en este trabajo esto equivale a un tiempo de proyección de 100 años y la consideración de tres escenarios (1,8mm/año; 3,8mm/año y 5,9mm/año). De este modo, se han obtenido tres índices de vulnerabilidad parcial a este impacto, $IVIs_1$, $IVIs_2$ e $IVIs_3$ correspondientes a los tres escenarios de RSLR. La pendiente costera media de la zona ha sido calculada hasta la cota +5m, ya que se ha supuesto que la inundación no afecta a zonas con mayor altitud.

Índices de Vulnerabilidad Parcial a Erosión e Inundación inducida por temporales

De igual modo que en la subida relativa del nivel del mar, en el caso del impacto de temporales los procesos inducidos más comunes en la costa son la erosión e inundación. Además, debido a que la intensidad de estos dos procesos depende de distintas características costeras y distintas propiedades del temporal, estos pueden ser analizados individualmente.

La caracterización de la vulnerabilidad a erosión e inundación por impacto de temporales se ha realizado en base al trabajo de Bosom y Jiménez (2011), en el que se desarrolla una metodología para evaluar de forma separada dichas vulnerabilidades, mediante la utilización de distribuciones probabilísticas extremales de los impactos inducidos para distintos sectores costeros y tipos de playas. Esta aproximación permite comparar la variación espacial de la intensidad del impacto dada una **probabilidad de ocurrencia** e identificar objetivamente las zonas más vulnerables en términos de erosión e inundación. Por lo tanto, con este método no se calcula la vulnerabilidad de todas las playas a un mismo temporal, sino al temporal asociado a una probabilidad de ocurrencia en cada playa. En este trabajo la probabilidad de ocurrencia ha sido escogida igual para todo el litoral estudiado, pero podría considerarse variable según la importancia/valor de la zona en cada caso, definiendo probabilidades de ocurrencia distintas en las diversas playas, comparando finalmente vulnerabilidades asociadas a diferentes probabilidades.

Los parámetros usados para caracterizar los impactos de erosión e inundación inducidos por el temporal son, respectivamente, el volumen potencial de sedimento erosionado de la playa, DV, y el remonte, Ru (Figura 3.8). Aunque la inundación costera es causada generalmente por una combinación de niveles del mar altos (marea astronómica más marea meteorológica) y la acción del oleaje, el parámetro usado en Bosom y Jiménez (2011) para caracterizar el impacto de inundación hace referencia solamente al segundo (remonte), ya que, aunque la marea

meteorológica no es un fenómeno raro en la costa catalana, su magnitud es muy inferior al valor del remonte inducido por el oleaje (Mendoza y Jiménez, 2008).

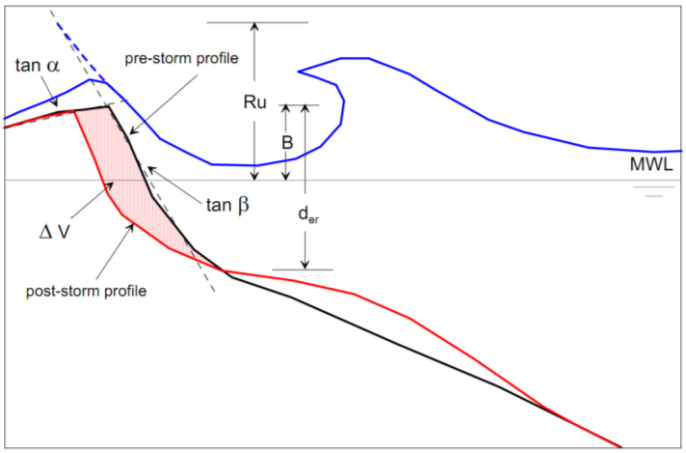

Figura 3.8. Esquematización de los impactos costeros inducidos por temporales (Bosom y Jiménez, 2011)

El volumen de sedimento erosionable se calcula usando el modelo propuesto por Mendoza y Jiménez (2006):

$$\Delta V = 2{,}9\ JA\tau\ + 6{,}73 = \ 2{,}9\quad D - D_{eq}\ ^{0{,}5} \tan\beta\ \ \tau\ + 6{,}73 \qquad [3.18]$$

Donde:

JA es un parámetro que caracteriza los cambios en el perfil de la playa propuesto por Jiménez et al. (1993)

τ es la duración de la tormenta

$D = H\quad w_f T\ $ es el parámetro de Dean

D_{eq} es el valor del parámetro de Dean en situación de equilibrio (2,7 en aguas profundas)

$\tan\beta$ es la pendiente del estrán

H es la altura de ola (aquí altura de ola significante)

w_f es la velocidad de caída del sedimento

T es el periodo de ola (aquí periodo de pico)

Por otra parte, el remonte inducido por el oleaje en el pico de la tormenta se calcula usando el modelo de Stockdon et al. (2006) dado por:

$$Ru_{2\%} = 1{,}1 \quad 0{,}35 \tan\beta \ H_s L_0 \ ^{1\ 2} + \frac{H_s L_0 \ 0{,}563 \tan\beta^2 + 0{,}004 \ ^{1\ 2}}{2} \qquad [3.19]$$

Donde:

H_s es la altura de ola significante en aguas profundas
L_0 es la longitud de ola en aguas profundas asociada a T_p (periodo de pico)
$\tan\beta$ es la pendiente del estrán

Posteriormente, ya que con frecuencia el perfil de la playa presenta un cambio en la pendiente, siendo en la parte interior ($\tan\alpha$) más suave que en la exterior ($\tan\beta$), se aplica el factor de corrección propuesto por van der Meer y Janssen (1995) dado por:

$$\gamma = \tan\alpha \quad \tan\beta \qquad [3.20]$$

tomando solamente los valores comprendidos entre 0,6 y 1. El valor final del remonte es, por tanto, el obtenido de aplicar el factor de corrección gamma al valor del remonte propuesto por Stockdon et al (2006).

En cuanto al cálculo de los impactos de erosión e inundación, la metodología propuesta por Bosom y Jiménez (2011) y su aplicación al litoral catalán sigue los siguientes pasos:

1. Dividir la zona costera a estudiar en sectores donde las condiciones del oleaje puedan considerarse relativamente homogéneas para definir la magnitud del impacto. En el caso del litoral catalán, la costa se divide en 5 sectores caracterizados por sendas boyas: Roses, Palamós, Tordera, Llobregat i Ebre (Figura 3.9).

2. Agrupar las playas en diferentes clases según sean sus propiedades geomorfológicas para tener en cuenta la contribución del sistema al valor del impacto. Las playas son agrupadas según el tamaño de sedimento y, posteriormente, para cada clase, se calcula la pendiente representativa como la media de las pendientes de las playas incluidas en cada grupo. Para la costa catalana se definen 6 tipos de playas (Tabla 3.7).

3. Construir una serie temporal de tormentas para cada sector a partir de los datos de oleaje disponibles en cada uno de ellos. En Bosom y Jiménez (2011), la serie temporal se obtiene con el método del máximo anual cubriendo un periodo de 50 años (de 1958 a 2008).

4. Construir para cada sector y tipo de playa la serie temporal de los parámetros propuestos para caracterizar los impactos inducidos por la acción del temporal (volumen de sedimento erosionable y remonte). Para la costa catalana esto resulta en 30 (5 sectores x 6 tipos de playa) series temporales para la erosión y otras 30 para el remonte.

5. Ajustar a cada una de las series temporales obtenidas en el paso 4 una distribución probabilística extremal. En Bosom y Jiménez (2011) se utiliza la función Weibull tri-paramétrica y la función Gumbel.

6. Fijar la probabilidad de ocurrencia (R) del agente según sea la importancia/valor de la zona y estimar el periodo de retorno (Tr) en un cierto tiempo de proyección (L). La relación entre estas tres variables se expresa según Borgman (1963) como:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^{L} \qquad [3.21]$$

   En la mayor parte de playas del litoral catalán, el fallo de la playa en cuanto a su función protectora no es probable que cause pérdidas humanas y sólo repercute económicamente a un nivel bajo y medio, lo que según Puertos del Estado (1990) corresponde con una probabilidad máxima admisible (R) de 0,5 y 0,3 respectivamente. En cuanto al periodo de proyección (L), se escoge un tiempo de 10 años, igual que el elegido para la erosión a medio plazo. Con estos valores se obtiene un periodo de retorno (Tr) de 15 y 28,5 años respectivamente, por lo que escogemos un periodo de retorno de 25 años para calcular la intensidad del impacto en toda la zona costera.

7. Para cada playa, que pertenece a un tipo de playa y un sector determinados, calcular el valor de los parámetros característicos de erosión (DV) e inundación (Ru) para el periodo de retorno establecido en el apartado 6. En el caso de la costa catalana, esto equivale a 30 valores para el volumen erosionado y 30 para el remonte.

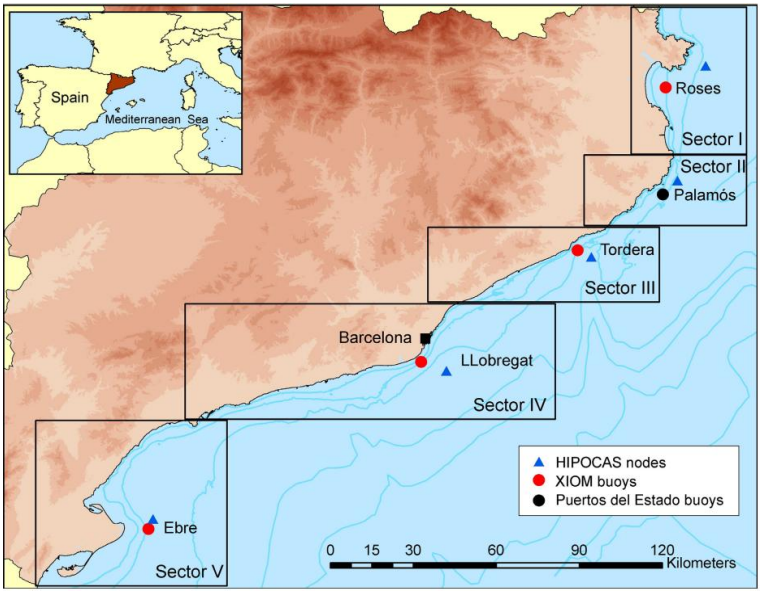

Figura 3.9. Sectores de oleaje en la costa catalana y emplazamiento de nodos HIPOCAS y boyas de oleaje (Bosom y Jiménez, 2011)

Tipo de playa	Rango d_{50} (mm)	Pendiente del perfil
I	0,1-0,4	0,090
II	0,4-0,7	0,146
III	0,7-1,0	0,156
IV	1,0-1,3	0,179
V	1,3-1,6	0,171
VI	≥1,6	0,164

Tabla 3.7. Tipos de playas del litoral catalán según tamaño de grano y pendiente costera asociada a cada una de ellas (Bosom y Jiménez, 2011)

Una vez se ha obtenido el valor de estos parámetros, característicos de los impactos (erosión e inundación) inducidos por la acción de un temporal (de periodo de retorno Tr), el siguiente paso es definir los indicadores de vulnerabilidad para dichos impactos, incluyendo la capacidad del sistema costero a hacerles frente.

Tal y como se propone en Bosom y Jiménez (2011), la capacidad de respuesta del sistema a los impactos de inundación y erosión se caracteriza mediante la altura de duna o berma y el ancho medio de playa, respectivamente. Por tanto, los indicadores de vulnerabilidad utilizados son:

$It = Ru \;\; B$ para inundación [3.22]

$Et = \Delta x \;\; W_0$ para erosión [3.23]

Donde

Ru es el remonte inducido por el oleaje
B es la altura de duna o berma máxima
D*x* es el retroceso de la línea de orilla debido al impacto del temporal
W_0 es el ancho medio de playa actual

En primera aproximación, el valor del retroceso de la línea de orilla puede ser obtenido dividiendo el volumen de sedimento erosionable (DV) por la altura de la parte erosionable del perfil (d_{er}) (Figura 3.8). En este estudio, d_{er} se considera igual a la altura de berma más una profundidad de 1,5m. Este último es un valor representativo escogido teniendo en cuenta los valores observados en diversos perfiles de playa en simulaciones con el programa SBEACH.

Una vez definidos los indicadores de vulnerabilidad, solo queda definir la ley de vulnerabilidad asociada a dichos indicadores. En este trabajo se usan las mismas leyes propuestas por Bosom y Jiménez (2011), con la única diferencia que aquí la escala de variación de vulnerabilidad es de 1 a 5 en vez de 0 a 1.

En el caso de vulnerabilidad a erosión, el valor máximo de vulnerabilidad ocurre cuando el ancho de playa medio (W_0) es igual al retroceso de la línea de orilla (Δx) más un ancho de playa mínimo (W_{min}), es decir:

$W_0 = W_{min} + \Delta x \;\; \rightarrow IVEt = 5$ [3.24]

Este ancho mínimo se define como el ancho necesario para mantener operativa la playa y/o evitar la exposición directa de la zona costera. Este valor debe ser fijado por el gestor en cada caso y, en este trabajo, se considera igual a 5m, ya que es el mínimo necesario para que la maquinaria de obra pueda operar después del impacto de un temporal.

A su vez, el valor mínimo de vulnerabilidad a erosión corresponde a la situación en que el ancho medio de la playa es igual al ancho mínimo de playa más α veces el retroceso de la línea de orilla, es decir:

$W_0 = W_{min} + \alpha\Delta x \rightarrow IVEt = 1$ [3.25]

Donde α puede ser interpretado como un factor de seguridad y debe ser seleccionado en función del clima de oleaje de la zona. En este trabajo se usa $\alpha = 3$.

Reordenando las ecuaciones anteriores, se obtiene la ley del índice de vulnerabilidad parcial a erosión por temporales de la Figura 3.10.

Para la obtención de la ley del índice de vulnerabilidad parcial a inundación por temporales (Figura 3.11), se considera que el valor máximo ocurre cuando el remonte excede la altura de berma en un valor de 2 metros, mientras que el valor mínimo ocurre cuando el remonte es la mitad de la altura de berma:

$$Ru = B + 2 \rightarrow IVIt = 5 \qquad [3.26]$$

$$Ru = B \;\; 2 \rightarrow IVIt = 1 \qquad [3.27]$$

Estos valores fueron fijados arbitrariamente en función de la zona de estudio y en el primer caso, representa condiciones de inundación con un volumen importante de agua. En otras zonas costeras estos valores pueden ser modificados según las características particulares del lugar.

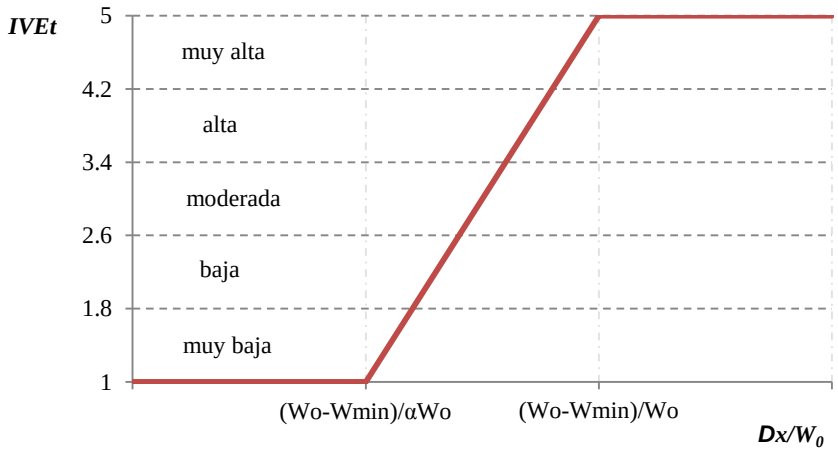

Figura 3.10. Ley del Índice de Vulnerabilidad Parcial a la Erosión Inducida por Temporales

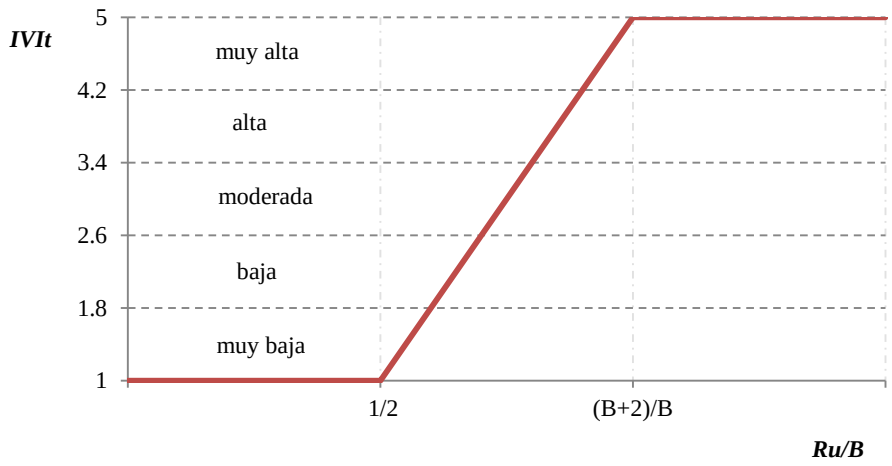

Figura 3.11. Ley del Índice de Vulnerabilidad Parcial a Inundación Inducida por Temporales

Tal y como ya ha sido indicado anteriormente, el parámetro utilizado aquí para caracterizar el impacto de inundación (remonte) hace referencia solamente a la acción del oleaje sobre la costa, y no tiene en cuenta el posible impacto de inundación producido por un estado de mar alto debido a la combinación de marea astronómica y meteorológica. Esto se explica porque en la costa catalana estos dos fenómenos tienen una magnitud considerablemente inferior al remonte inducido por la acción del oleaje. Sin embargo, en otras zonas costeras, estos efectos pueden no ser despreciables. En el caso de mares con marea, una forma sencilla de incorporar el posible estado elevado del nivel del mar, sería caracterizando la capacidad de respuesta de la playa, es decir la altura de berma o duna, con respecto al nivel de pleamar en vez del nivel medio del mar como ha sido calculado aquí.

En cuanto al impacto de erosión por la acción de temporales en mares con marea, debería considerarse una formulación que además de tener en cuenta las características del perfil y el temporal, incorporase los efectos de este agente, ya que la fórmula de Mendoza y Jiménez (2006) fue desarrollada para la costa Mediterránea y por tanto no tiene en cuenta este factor.

3.3.3. Índices de vulnerabilidad global

Índices que cuantifican el potencial de un tramo costero a ser dañado por la acción integrada de múltiples agentes. Se desarrollan a partir de la definición de indicadores de vulnerabilidad global en los que se combinan los diversos índices de vulnerabilidad parcial para reflejar la interactuación de los diversos procesos costeros.

A continuación, se proponen dos fórmulas de agregación distintas, para las cuales, a su vez, se definen diversos métodos de obtención del índice de vulnerabilidad global.

CatVI-1:

En esta primera propuesta se trata de desarrollar un indicador de vulnerabilidad global análogo al utilizado en el Coastal Vulnerability Index que incluya los índices de vulnerabilidad parcial propuestos en este trabajo. Para ello, se sustituyen las variables de evolución costera, RSLR, altura de ola y pendiente costera, por los índices de vulnerabilidad parcial desarrollados para erosión a medio plazo, erosión e inundación debida a RSLR y erosión e inundación inducida por temporales. Sin embargo, se conservan las variables de geomorfología y rango mareal, ya que, aunque no se consideran generadoras de un impacto, sí tienen la capacidad de modular la vulnerabilidad generada por los demás agentes y por este motivo deben ser incluidas en el estudio de vulnerabilidad. Debido a que los índices de vulnerabilidad parcial desarrollados en este trabajo se corresponden con el caso de geomorfología playa y costa micromareal, estas dos variables son conservadas con el fin de extender esta metodología a otras condiciones mareales y geomorfológicas.

De este modo, el indicador de vulnerabilidad integrada puede escribirse como:

$$V = \sqrt{\frac{IVEm*IVEs*IVIs*IVEt*IVIt*IVG*IVM}{7}} \qquad [3.28]$$

Donde,

IVEm = Índice de vulnerabilidad parcial a erosión a medio plazo
IVEs = Índice de vulnerabilidad parcial a erosión por RSLR
IVIs = Índice de vulnerabilidad parcial a inundación por RSLR
IVEt = Índice de vulnerabilidad parcial a erosión por temporal
IVIt = Índice de vulnerabilidad parcial a inundación por temporal
IVG = Índice de vulnerabilidad asociado a geomorfología
IVM = Índice de vulnerabilidad asociado a marea

Los índices de "vulnerabilidad" asociados a geomorfología y marea no son más que una graduación de 1 a 5 de estas variables, tal y como se propone por el USGS para el método del CVI (Hammar-Klose y Thieler, 2001). La variable de geomorfología se clasifica de forma cualitativa, asociando una mayor vulnerabilidad a aquellas formaciones que presentan una

menor resistencia a la erosión, mientras que el rango mareal se clasifica de modo que las costas micromareales presentan mayor vulnerabilidad que las costas macromareales (Tabla 3.8).

El razonamiento utilizado por el USGS para la graduación del rango mareal se corresponde a la influencia de este en el impacto de inundación por temporales (ver apartado 3.2.4) aunque, de acuerdo con el índice de vulnerabilidad a este impacto propuesto en este trabajo, esta clasificación debería ser invertida. En dicho índice de vulnerabilidad, los parámetros característicos del impacto y la respuesta son el remonte inducido por el oleaje y la altura de duna o berma, respectivamente. Tal y como ya ha sido indicado, la caracterización del impacto por medio del valor del remonte es válida en la costa catalana porque tanto marea astronómica como marea meteorológica tienen valores muy inferiores al remonte. Sin embargo, en mares con marea, además del efecto del oleaje, debe considerarse la posibilidad de que este actúe en situación de pleamar, lo que produciría la penetración de un volumen de agua mayor. Por ello, en los casos de costas mareales, la altura de duna o berma debería ser medida con respecto al nivel de pleamar en vez del nivel de mar medio, para calcular la capacidad de respuesta del sistema en la situación más desfavorable, que sería la situación de pleamar. Lógicamente, la capacidad de respuesta quedaría reducida por lo que, ante un mismo impacto, la vulnerabilidad sería mayor. Así pues, cuanto mayor fuese el rango mareal, menor sería la capacidad de respuesta de la playa y mayor sería su vulnerabilidad.

Aun así, aquí se continua utilizando la graduación propuesta por el USGS ya que el objetivo en este primer método de agregación consiste en elaborar una propuesta análoga a la del CVI y además, si se considera el efecto de la marea en el impacto de erosión, esta clasificación sería válida pues, como ya ha sido indicado, un mayor rango mareal reduce la erosión producida en la costa (Rosen, 1977).

	IVG* e *IVM				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
Geomorfología	Acantilados rocosos Fiordos	Acantilados medianos Costas indentadas	Acantilados bajos Glaciares Llanuras aluviales	Playas de cantos rodados Estuarios Lagunas	Playas barrera Playas (arena) Marismas Deltas Salinas Arrecifes de coral Manglares
Rango mareal	> 6,0	4,1 a 6,0	2,0 a 4,0	1,0 a 1,9	< 1,0

Tabla 3.8. Valor del índice de vulnerabilidad asociado a Geomorfología y Rango mareal

Ya que en el caso de erosión costera a medio plazo y erosión debida a RSLR se han desarrollado dos índices (absoluto y relativo), y debido a la consideración de tres escenarios de RSLR para la evaluación de la vulnerabilidad a inundación y erosión inducida por este agente, a la hora de obtener el indicador de vulnerabilidad integrada, pueden darse seis combinaciones, obteniendo, por tanto, seis valores del indicador de vulnerabilidad: V_{a1}, V_{a2}, V_{a3}, V_{r1}, V_{r2} y V_{r3} (Tabla 3.9)

	IVG	***IVM***	***IVEm***		***IVEs***						***IVIs***			***IVEt***	***IVIt***
	IVG	***IVM***	$IVEm_a$	$IVEm_r$	$IVEs_{a1}$	$IVEs_{a2}$	$IVEs_{a3}$	$IVEs_{r1}$	$IVEs_{r2}$	$IVEs_{r3}$	$IVIs_1$	$IVIs_2$	$IVIs_3$	***IVEt***	***IVIt***
V_{a1}	x	x	x		x						x			x	x
V_{a2}	x	x	x			x						x		x	x
V_{a3}	x	x	x				x						x	x	x
V_{r1}	x	x		x				x			x			x	x
V_{r2}	x	x		x					x			x		x	x
V_{r3}	x	x		x						x			x	x	x

Tabla 3.9. Combinaciones de los índices de vulnerabilidad parcial para la obtención del indicador de vulnerabilidad integrada V.

Una vez definidos y obtenidos los indicadores de vulnerabilidad integrada, debe proponerse un método de asignación de la vulnerabilidad global con respecto al valor del indicador obtenido. Para este indicador se proponen dos métodos de asignación de la vulnerabilidad:

1. Método de los cuartiles

   Este método es el mismo utilizado en el Coastal Vulnerability Index. Se trata de calcular el indicador de vulnerabilidad en cada uno de los tramos costeros en los que ha sido dividido el litoral y agrupar estos valores en cuatro clases de vulnerabilidad global definidas a partir de los cuartiles de la serie: vulnerabilidad baja (por debajo del primer cuartil), vulnerabilidad moderada (entre el primer y el segundo cuartil), vulnerabilidad alta (entre segundo y el tercer cuartil) y vulnerabilidad muy alta (por encima del tercer cuartil).

   Debido a que las clases de vulnerabilidad están definidas a partir de los cuartiles de la serie, estas clases son específicas de cada una de esas series y de cada una de las zonas costeras aplicadas, motivo por el cual constituye un método relativo.

2. Método de la función

Se trata de desarrollar un método de asignación de la vulnerabilidad global que, a diferencia del anterior, no dependa ni de los valores del indicador obtenidos en cada caso ni de la costa analizada.

Para ello se define una ley de vulnerabilidad integrada que cubre todo el rango de posibles valores del indicador, es decir $\overline{1\ 7}$, $\overline{5^7\ 7}$, mediante la cual, a cada valor del indicador en un tramo costero le corresponde un valor del índice de vulnerabilidad global (*IV*), independiente al valor del indicador en los otros tramos. Esta ley (Figura 3.12) es la misma para todas las zonas costeras y se define con variación lineal entre dos puntos en los cuales se fija la vulnerabilidad.

El índice de vulnerabilidad global se define de 0,0 a 1,0 y se divide en cinco clases cualitativas de vulnerabilidad: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

Los límites que se establecen para obtener la ley de vulnerabilidad son:

$$V = \frac{\overline{5^2}}{7} = 1{,}89 \rightarrow IV = 0 \qquad [3.29]$$

$$V = \frac{\overline{5^5}}{7} = 21{,}13 \rightarrow IV = 1 \qquad [3.30]$$

La consideración de estos límites viene determinada principalmente por la inclusión de los factores de geomorfología y marea en el indicador propuesto. Este indicador consiste en una combinación de 7 índices, de los cuales 5 representan impactos mientras que los otros 2 representan la modulación de estos impactos. Esto, sin embargo, no queda reflejado en el indicador ya que todas las variables son integradas de igual modo, lo cual puede producir alguna incongruencia si la ley de vulnerabilidad asociada no tiene en cuenta este hecho.

El principal problema que se puede encontrar es el caso de una costa en la que la vulnerabilidad a todos los impactos considerados es muy baja. En este caso el indicador de vulnerabilidad dependería del valor de los índices asociados a geomorfología y marea y, si la ley se desarrollase con variación lineal en este rango, entonces la

vulnerabilidad también dependería de estos dos factores. Sin embargo, si la vulnerabilidad a los impactos es muy baja, lo que se podría asimilar a una situación en que "no" hay impacto, entonces las variables moduladoras no tienen ninguna influencia, y por tanto, independientemente del valor de estas, la vulnerabilidad global de la costa debería ser muy baja. Así pues, se propone que cuando los índices asociados a los impactos valgan 1, la vulnerabilidad sea mínima, es decir 0. Para ello se define el límite inferior de la Ecuación 3.29 para la variación lineal de la ley de vulnerabilidad.

En el caso que el valor del indicador sea el propuesto para el límite inferior, pero este valor no se corresponda con la situación descrita anteriormente, este límite continuaría siendo razonable. Supongamos que $V = \overline{\frac{5^2}{7}}$, donde 2 de los 5 índices referentes a impactos son máximos mientras que todos los demás factores, incluidos geomorfología y marea, son mínimos. Si solamente dos de los cinco impactos son máximos y además las variables de geomorfología y marea reducen esa vulnerabilidad (ya que valen 1), entonces también es aceptable decir que la vulnerabilidad es mínima.

Por otra parte se propone que el límite superior para la variación lineal de la ley de vulnerabilidad se sitúe en el valor del indicador cuando 5 de los 7 índices de vulnerabilidad incluidos son máximos, tal y como se escribe en la Ecuación 3.30. Esta situación podría corresponder a que todos los índices asociados a impactos valgan 5 mientras que los índices asociados a geomorfología y marea valgan 1. En este caso, se considera que la vulnerabilidad de la costa debería ser máxima dado que, aunque se reduzca la vulnerabilidad a los diversos impactos gracias a unas condiciones geomorfológicas y mareales favorables, debe considerase el efecto agregado de los diversos impactos y, en este caso, todos ellos presentarían valores elevados.

Este límite sería razonable también para otras combinaciones de los índices integrantes del indicador de vulnerabilidad global, como, por ejemplo, cuando los factores de geomorfología y marea son máximos. En este caso, 3 de los 5 índices de vulnerabilidad parcial a los diversos impactos también serían máximos, lo que resultaría en una vulnerabilidad elevada a los impactos junto con una geomorfología y rango mareal desfavorables, por lo que también resulta acertado asignar una muy alta vulnerabilidad.

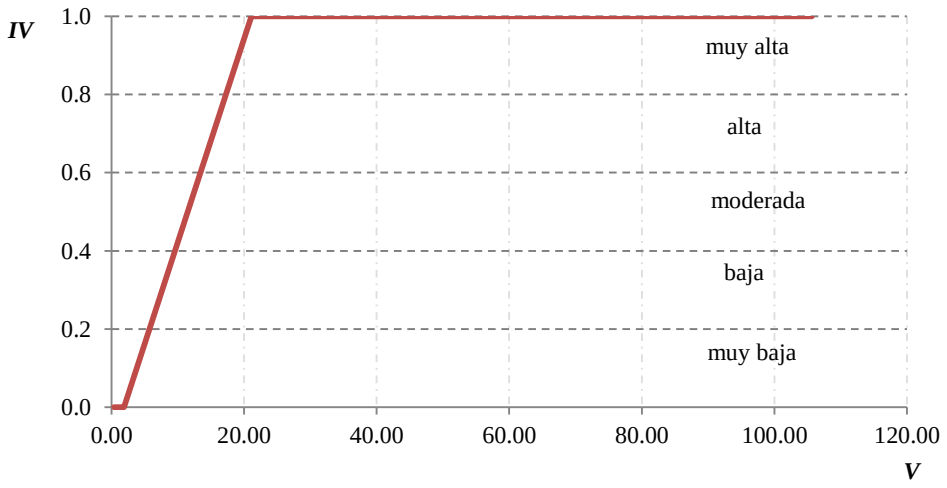

Figura 3.12. Ley del Índice de Vulnerabilidad Global para el indicador V

Teniendo en cuenta que el índice de vulnerabilidad global se divide en cinco clases cualitativas para facilitar la interpretación posterior de los resultados obtenidos, la ley desarrollada divide también el indicador de vulnerabilidad integrada en cinco grupos, permitiendo conocer la clase de vulnerabilidad una vez es conocido el valor del indicador (ver Tabla 3.10).

	MB	**B**	**M**	**A**	**MA**
V	< 5,74	5,74-9,58	9,58-13,43	13,43-17,28	> 17,28

Tabla 3.10. Clase de Vulnerabilidad Global según el valor del indicador propuesto V

CatVI-2:

Consiste en calcular primero la vulnerabilidad de la zona costera a erosión e inundación de forma separada y posteriormente combinar estas dos vulnerabilidades para obtener la vulnerabilidad global de la zona. Para ello se desarrolla un índice de vulnerabilidad a erosión y otro a inundación, a partir de los cuales se obtiene la vulnerabilidad global según tres métodos propuestos.

A continuación se presenta la metodología propuesta para la obtención de estos índices.

1. Índice de vulnerabilidad a inundación

Índice que cuantifica el potencial de un tramo costero a ser dañado por el impacto de inundación generado por los diversos procesos litorales. Se obtiene mediante la definición de un indicador de vulnerabilidad a inundación, en el que se integran los diversos procesos generadores de este impacto, y la posterior asignación de una ley de vulnerabilidad.

El método de agregación propuesto para el indicador de vulnerabilidad a inundación es análogo al utilizado en el Coastal Vulnerability Index, pero integrando solamente los procesos que generan inundación, es decir:

$$VI = \sqrt{\frac{IVIs * IVIt}{2}} \qquad [3.31]$$

Donde

IVIs = índice de vulnerabilidad parcial a inundación por RSLR
IVIt = índice de vulnerabilidad parcial a inundación por temporal

Cabe notar que en este indicador no es necesario incluir ningún factor específico de geomorfología, ya que esta no tiene influencia sobre el impacto de inundación, ni tampoco de marea, ya que, como ha sido explicado anteriormente, el efecto de esta variable sobre el impacto de inundación puede ser fácilmente incluido en el índice de vulnerabilidad a inundación por temporal (ver apartado 3.3.2).

Debido a la consideración de tres escenarios de la subida del nivel del mar, existen tres índices de vulnerabilidad parcial a inundación por este agente, lo que genera tres posibles valores del indicador de vulnerabilidad a inundación (Tabla 3.11).

Una vez ha sido definido el indicador, se desarrolla una ley de vulnerabilidad que cubre todo el rango de posibles valores de este, es decir $\sqrt{1\ 2}$, $\sqrt{5^2\ 2}$, mediante la cual a cada valor del indicador en un tramo costero le corresponde un valor del índice de vulnerabilidad a inundación (*IVI*). Esta ley (Figura 3.13) se define con variación lineal entre dos puntos en los cuales se fija la vulnerabilidad.

	IVIs			***IVIt***
	$IVIs_1$	***$IVIs_2$***	***$IVIs_3$***	***IVIt***
VI_1	x			x
VI_2		x		x
VI_3			x	x

Tabla 3.11. Combinaciones de los índices de vulnerabilidad parcial para la obtención del indicador de vulnerabilidad a inundación VI

El índice de vulnerabilidad a inundación obtenido varía de 0,0 a 1,0 y se divide en cinco clases cualitativas de vulnerabilidad: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

Los límites establecidos para calcular la ley de vulnerabilidad son:

$$VI = \overline{\frac{1}{2}} = 0{,}71 \rightarrow IVI = 0 \qquad [3.32]$$

$$VI = \overline{\frac{3*5}{2}} = 2{,}74 \rightarrow IVI = 1 \qquad [3.33]$$

El límite inferior se corresponde al mínimo valor del indicador, en el que tanto el índice de vulnerabilidad a inundación por RSLR como por temporales vale 1. El límite superior, en cambio, no se sitúa en el máximo valor del indicador, ya que se considera que la costa presenta muy alta vulnerabilidad antes de que ambos factores integrantes (*IVIs y IVIt*) valgan 5. Así pues, se considera que cuando la vulnerabilidad a inundación a uno de los agentes es muy alta (5) y la vulnerabilidad a inundación al otro agente es moderada (3), la costa ya presenta muy alta vulnerabilidad a inundación y, por este motivo, se le asigna vulnerabilidad máxima (1).

Teniendo en cuenta que el índice de vulnerabilidad a inundación se divide en cinco clases cualitativas para facilitar la interpretación posterior de los resultados, la ley desarrollada divide también el indicador de vulnerabilidad a inundación (*VI*) en cinco grupos, lo que permite conocer la clase de vulnerabilidad una vez es conocido el valor del indicador (ver Tabla 3.12).

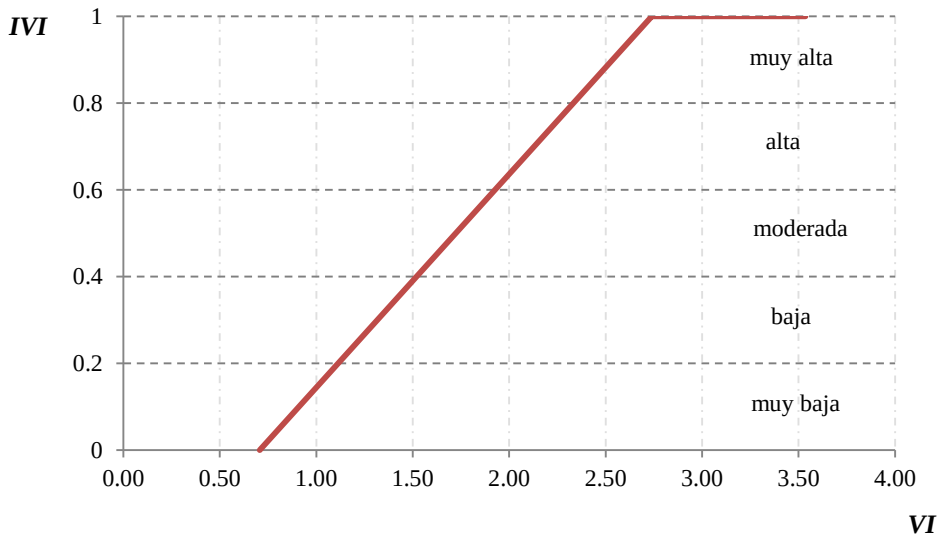

Figura 3.13. Ley del Índice de Vulnerabilidad a Inundación para el indicador propuesto VI

	MB	B	M	A	MA
VI	< 1,11	1,11-1,52	1,52-1,93	1,93-2,33	> 2,33

Tabla 3.12. Clase de Vulnerabilidad a Inundación según el valor del indicador propuesto VI

2. Índice de vulnerabilidad a erosión

Índice que cuantifica el potencial de un tramo costero a ser dañado por el impacto de erosión generado por los diversos procesos litorales. Se obtiene mediante la definición de un indicador de vulnerabilidad a erosión, en el que se integran los diversos procesos generadores de erosión, y la posterior asignación de una ley de vulnerabilidad.

El método de agregación propuesto para el indicador de vulnerabilidad a erosión es similar al propuesto para inundación, con la diferencia que en este caso sí debe incorporarse un factor de geomorfología que tenga en cuenta el posible efecto de esta sobre el impacto de erosión, ya que los diversos índices de vulnerabilidad parcial a erosión desarrollados son específicos para playas. Para el efecto de la marea en erosión en cambio, no es necesario definir un nuevo factor ya que este efecto puede ser considerado en el índice de vulnerabilidad a erosión por temporales (ver apartado 3.3.2).

Así pues, el indicador de vulnerabilidad a erosión propuesto es:

$$VE = \varphi_{geo} * \frac{\overline{IVEm * IVEs * IVEt}}{3} \quad [3.34]$$

Donde,

f_{geo} = Factor de geomorfología
IVEm = Índice de vulnerabilidad parcial a erosión a medio plazo
IVEs = Índice de vulnerabilidad parcial a erosión por RSLR
IVEt = Índice de vulnerabilidad parcial a erosión por temporal

Para la definición del factor de geomorfología se utiliza una graduación similar a la propuesta en el CVI. En el caso de geomorfología playa, ya que los índices de vulnerabilidad parcial desarrollados evalúan la erosión "real" de la costa y por tanto no sería necesario incluir ninguna variable adicional, el factor de geomorfología vale 1. En cambio, en geomorfologías más resistentes a la erosión, donde la erosión "real" sería menor a la ocurrida en el caso de una playa y, por tanto, menor a la calculada por los diversos índices de vulnerabilidad, el factor de geomorfología tiene un valor inferior a 1. En la Tabla 3.13 puede verse la graduación propuesta para este factor.

Ya que en el caso de erosión costera a medio plazo y erosión debida a RSLR se han desarrollado dos índices (absoluto y relativo), y debido a la consideración de tres escenarios de RSLR para la evaluación de la vulnerabilidad a inundación y erosión inducida por este agente, a la hora de obtener el indicador de vulnerabilidad a erosión, pueden darse seis combinaciones, representadas en la Tabla 3.14, obteniendo, por tanto, seis valores del indicador de vulnerabilidad a erosión: VE_{a1}, VE_{a2}, VE_{a3}, VE_{r1}, VE_{r2} y VE_{r3}.

	f_{geo}				
	0,2	**0,4**	**0,6**	**0,8**	**1,0**
Geomorfología	Acantilados rocosos Fiordos	Acantilados medianos Costas indentadas	Acantilados bajos Glaciares Llanuras aluviales	Playas de cantos rodados Estuarios Lagunas	Playas barrera Playas (arena) Marismas Deltas Salinas Arrecifes de coral Manglares

Tabla 3.13. Valores del coeficiente f_{geo} para la obtención del indicador de vulnerabilidad a erosión VE

	IVEm		***IVEs***						***IVEt***
	$IVEm_a$	$IVEm_r$	$IVEs_{a1}$	$IVEs_{a2}$	$IVEs_{a3}$	$IVEs_{r1}$	$IVEs_{r2}$	$IVEs_{r3}$	***IVEt***
VE_{a1}	x		x						x
VE_{a2}	x			x					x
VE_{a3}	x				x				x
VE_{r1}		x				x			x
VE_{r2}		x					x		x
VE_{r3}		x						x	x

Tabla 3.14. Combinaciones de los índices de vulnerabilidad parcial para la obtención del indicador de vulnerabilidad a erosión VE

Una vez definido el indicador de vulnerabilidad a erosión, se desarrolla una ley de vulnerabilidad mediante la cual a cada valor del indicador en un tramo costero le corresponde un valor del índice de vulnerabilidad a erosión (*IVE*). Esta ley se define con variación lineal entre dos puntos en los cuales se fija la vulnerabilidad.

El índice de vulnerabilidad obtenido varía de 0 a 1 y se divide en cinco clases cualitativas de vulnerabilidad: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

Los límites establecidos para calcular la ley de vulnerabilidad a erosión (Figura 3.14) son los siguientes:

$$VE = \overline{\frac{1}{3}} = 0{,}58 \rightarrow IVE = 0 \qquad [3.35]$$

$$VE = \overline{\frac{5^2}{3}} = 2{,}89 \rightarrow IVE = 1 \qquad [3.36]$$

De igual modo que en el caso de inundación, en este caso, el límite inferior de la ley de vulnerabilidad corresponde a la situación en que todos los índices de vulnerabilidad parcial a erosión son mínimos (1). El límite superior tampoco se define a partir del máximo valor del indicador de erosión sino con un valor inferior en el que se considera que la costa ya presenta muy alta vulnerabilidad. Este valor corresponde al caso en que la costa analizada tenga muy alta vulnerabilidad (5) a dos de los tres agentes considerados.

Estos límites han sido establecidos sin tener en cuenta el factor de geomorfología (o considerando que este vale 1), ya que como todos los índices han sido desarrollados a partir y para analizar playas, la ley de vulnerabilidad también es definida para esta geomorfología. Sin embargo, esta ley es la misma para todas las geomorfologías, ya que la influencia de este factor ya queda incluida en el indicador y, por tanto no es necesario modificar la ley de vulnerabilidad asociada a este. Así pues, con los mismos valores de los índices de vulnerabilidad parcial a erosión, si la geomorfología es otra más resistente, el valor del indicador será menor y por tanto la vulnerabilidad también será menor (o igual si se encuentra en el tramo constante de la ley).

Teniendo en cuenta que el índice de vulnerabilidad a erosión se divide en cinco clases cualitativas, la ley desarrollada divide también el indicador de vulnerabilidad a erosión en cinco grupos, permitiendo conocer la clase de vulnerabilidad una vez es conocido el valor del indicador (ver Tabla 3.15).

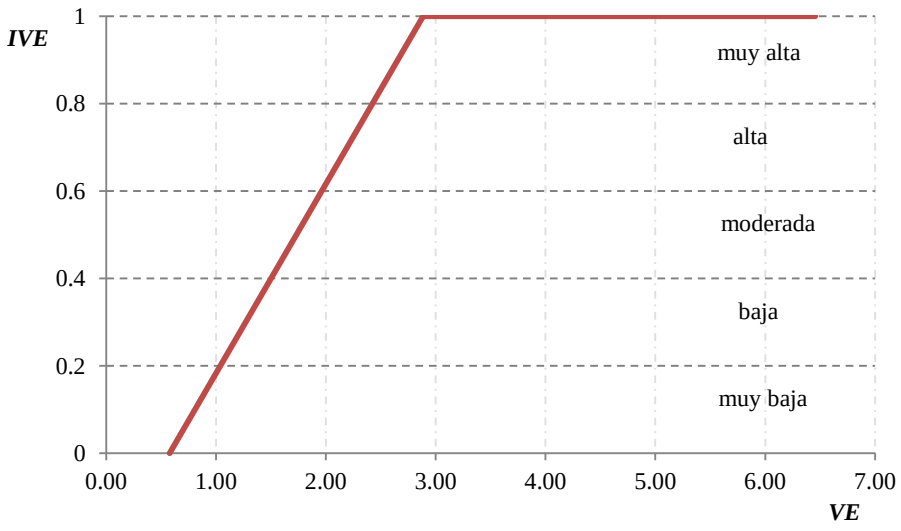

Figura 3.14. Ley del Índice de Vulnerabilidad a Erosión para el indicador propuesto VE

	MB	**B**	**M**	**A**	**MA**
VE	< 1,04	1,04-1,50	1,50-1,96	1,96-2,42	> 2,42

Tabla 3.15. Clase de Vulnerabilidad a Erosión según el valor del indicador propuesto VE

3. Índice de Vulnerabilidad integrada

El índice de vulnerabilidad integrada (*IV*) cuantifica el potencial de un tramo costero a ser dañado por los impactos de erosión e inundación generados por los diversos procesos litorales. Este índice se obtiene a partir de los índices de vulnerabilidad a erosión e inundación desarrollados en los pasos 1 y 2 según tres propuestas:

a. Media de los índices de vulnerabilidad a erosión e inundación:

$$IV = \frac{IVE+IVI}{2} \qquad [3.37]$$

b. Máximo de los índices de vulnerabilidad a erosión e inundación:

$$IV = máx \;\; IVE, IVI \qquad [3.38]$$

c. Según la combinación de *IVE* e *IVI*

Se trata de un método cualitativo de agregación, en el que la categoría de vulnerabilidad global se obtiene según la combinación de categorías de los índices de vulnerabilidad de inundación y erosión (ver Figura 3.15).

IVE\IVI	MB(1)	B(2)	M(3)	A(4)	MA(6)
MB(1)	MB(2)	B(3)	B(4)	M(5)	A(7)
B(2)	B(3)	B(4)	M(5)	M(6)	A(8)
M(3)	B(4)	M(5)	M(6)	A(7)	MA(9)
A(4)	M(5)	M(6)	A(7)	A(8)	MA(10)
MA(6)	A(7)	A(8)	MA(9)	MA(10)	MA(12)

Figura 3.15. Índice de vulnerabilidad global según combinación de IVE e IVI

CAPÍTULO 4
ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

4.1. Área de estudio

Cataluña se encuentra situada en el extremo nordeste de España (ver Figura 4.1.) y se divide administrativamente en 4 provincias, 41 comarcas y 946 municipios. Tiene aproximadamente una superficie de 32000 Km^2 y alrededor de 7,5 millones de habitantes, siendo la densidad media de población de unos 235 habitantes/km^2 (Idescat, 2010). Sin embargo, la distribución de la población de Cataluña es muy irregular. Sólo la comarca del Barcelonés, con capital Barcelona, concentra al 30% de la población y tiene una densidad de más de 15500 habitantes/km^2. Además, las 12 comarcas con fachada marítima, entre las cuales se encuentra el Barcelonés, concentran, en sólo un 23% de la superficie de Cataluña, al 63% de la población de ésta, siendo la densidad de población unas 3 veces superior a la media. En vista de estos datos, se puede concluir que la mayor parte de población de Cataluña se encuentra localizada en la zona litoral, donde además está situado el principal foco de población.

En cuanto a su litoral, Cataluña tiene una longitud de costa de 870 km[1], de los cuales 362,6 km pertenecen a la provincia de Girona, 199,2 km se encuentran en la provincia de Barcelona y los 308,2 km restantes pertenecen a la provincia de Tarragona (Idescat). La costa catalana está compuesta por una gran variedad de ambientes geomorfológicos, que van desde los acantilados típicos de la Costa Brava, en la zona más septentrional, a costas sedimentarias muy bajas como las del Delta del Ebro, en la zona más meridional. (ver Figuras 4.2 y 4.3)

De toda esta longitud de costa, en este estudio se analiza una extensión de unos 246 km que corresponden a aquellas zonas del litoral formadas por material sedimentario no consolidado, es decir, las playas. De acuerdo con Jiménez et al. (2011), la playa "media" del litoral catalán se caracteriza por tener un ancho medio de unos 37m, un sedimento de tamaño grueso (0,7mm), una pendiente elevada (0,12) y una altura de berma de unos 1,9m. Las playas más anchas se encuentran en la provincia de Barcelona, mientras que las playas con un ancho medio menor (32m) se encuentran en Girona. En Tarragona, donde se encuentran las playas de sedimento más fino (0,4mm), la playa media tendría una altura de berma de unos 1,5m y una pendiente inferior a 0,1.

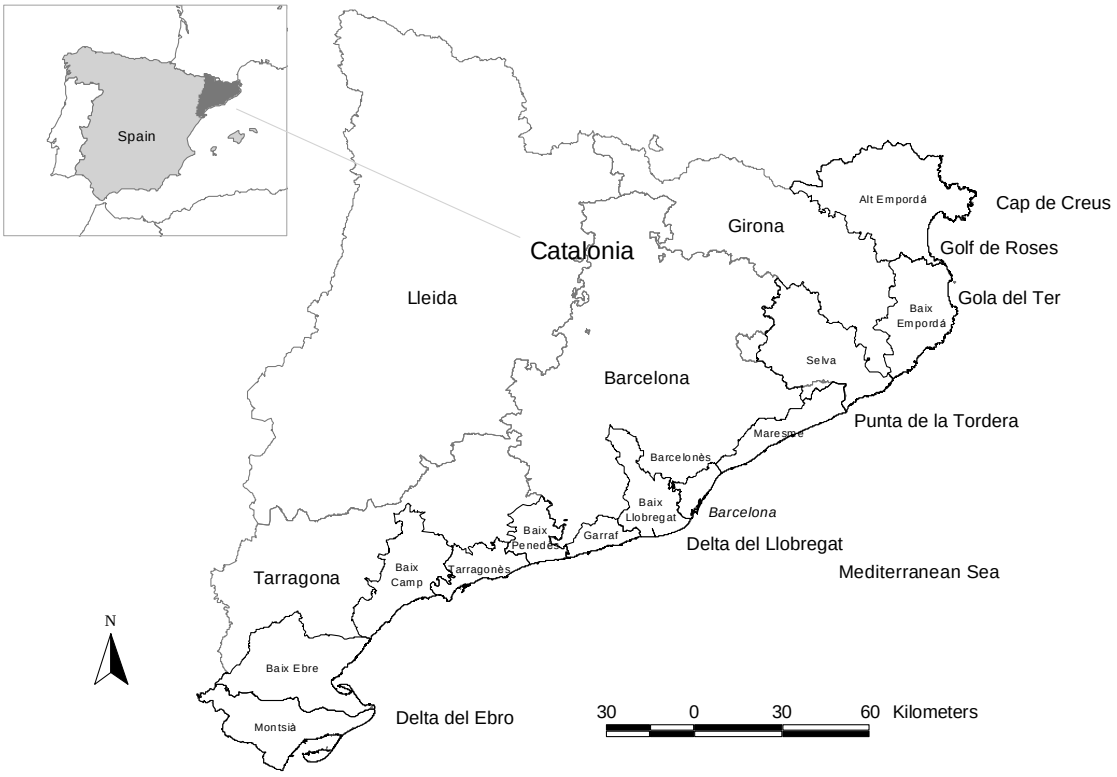

Figura .4.1. Localización de Cataluña. Provincias y comarcas con fachada marítima (Brenner, 2007)

[1] medido con una digitalización cartográfica a escala 1/50.000. Incluye el contorno de los muelles, espigones y otras construcciones que por su tamaño hayan sido digitalizadas; en cambio, excluye el de las islas.

Los 246 km de costa analizados se encuentran repartidos entre las tres provincias catalanas con fachada marítima, siendo unos 118 km los analizados en la provincia de Tarragona, unos 78 km en la provincia de Barcelona y unos 50 km en la de Girona. Así pues, en este estudio se han analizado un total de 331 playas, de las cuales 127 pertenecen a la provincia de Tarragona, 100 playas se encuentran en la provincia de Barcelona y 104 en la provincia de Girona. Algunas de estas playas han sido divididas en diversos tramos atendiendo a criterios de transporte sedimentario longitudinal y evolución costera. Así pues, aquellas playas que presentan una gran variación espacial en la tasa de evolución costera debido a la presencia de zonas que modifican el transporte longitudinal (formaciones geológicas de mayor resistencia, construcciones costeras como espigones, etc.) se dividen por estas zonas, identificando diversos tramos. El número total de tramos analizados en este estudio es de 393.

Figura 4.2 (Izquierda). Cala Tamariua, Girona (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino del Gobierno de España)
Figura 4.3 (Derecha). Playa de Vilafortuny, Tarragona (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino del Gobierno de España)

4.2. Datos

4.2.1. Introducción

En este trabajo, la vulnerabilidad se entiende como la combinación del impacto inducido por un agente y la capacidad del sistema para hacerle frente, siendo las consecuencias residuales en el sistema las que definen los diversos niveles de vulnerabilidad. Para ser fieles a esta definición, es necesario caracterizar no sólo la magnitud del impacto sino también la capacidad de respuesta del sistema. De este modo, es necesario obtener datos tanto de los agentes inductores de

vulnerabilidad presentes en la costa analizada como de las características y/o propiedades de dicha costa.

La mayor parte de información relativa a las características de la costa ha sido obtenida de la base de datos de las playas de Catalunya elaborada por el Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners (CIIRC) i el Laboratori d'Enginyeria Marítima de la UPC en el marco del proyecto "Estat de la zona costanera a Catalunya" (CIIRC, 2010). Esta base contiene las variables características de las playas objeto de estudio y ha sido utilizada para obtener los datos de: evolución costera media, ancho medio de playa, tamaño de sedimento, altura máxima de berma, pendiente del estrán y pendiente interior.

Los datos de evolución costera fueron calculados para el período 1995 a 2004, un período en el que no se hicieron actuaciones significativas a lo largo de la costa y, por tanto, reflejan condiciones naturales. Las dimensiones de las playas (ancho medio y longitud de playa) fueron medidas a partir del ortofotomapa de 2004 del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). En cuanto a los datos relativos al perfil de las playas (tamaño de sedimento, alturas de berma y pendientes), estos fueron obtenidos a partir de diversas campañas de muestreo realizadas entre los años 2009-2010.

Además de esta base de datos, también se han utilizado otras fuentes que se citan más adelante.

4.2.2. Datos referentes a los agentes

Los agentes considerados en el estudio son el transporte sedimentario longitudinal que puede provocar erosión costera a medio-largo plazo, la subida relativa del nivel del mar que puede generar un retroceso de la línea de orilla así como la inundación de la zona costera a un largo plazo y, por último, el impacto de temporales, cuyos daños inducidos son la erosión e inundación a un corto plazo.

Para determinar la vulnerabilidad a erosión debido al transporte sedimentario longitudinal es necesario disponer de las tasas de erosión y/o acreción para cada una de las playas. Tal y como se ha indicado anteriormente, estas tasas fueron obtenidas de la base de datos existente.

Para calcular la vulnerabilidad a la subida del nivel del mar, se usan las previsiones realizadas por el IPCC, considerando un valor de subsidencia en la zona del Delta del Ebro de 1,75mm/año (Somoza et al, 1998).

En cuanto al impacto de temporales, debido a las características orográficas de la costa catalana y a su localización frente a un mar semi-cerrado, tanto el viento como el oleaje generado presentan variaciones significativas a lo largo de todo el litoral. Por este motivo es necesario obtener información del oleaje en diversas áreas de la costa que puedan ser consideradas relativamente homogéneas a efectos del oleaje.

De este modo, en este estudio, la costa catalana se divide en cinco sectores (ver Figura 3.9), donde cada sector dispone de una boya, gestionada por la XIOM (Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics) de la Generalitat de Catalunya o bien por Puertos del Estado. Estas boyas se encuentran frente al litoral catalán a una profundidad de entre 45 y 90m y proporcionan datos de oleaje desde finales de la década de los 80. Debido a que las series de datos son sólo de aproximadamente 20 años, también se usaron datos retrospectivos de la base de datos de HIPOCAS (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe) que cubren el período de 1958 a 2001 (Guedes-Soares et al., 2002). Después de calibrar los datos simulados, gracias al solapamiento de datos entre 1990 y 2001, ambas fuentes fueron integradas, produciendo una serie temporal de tormentas de 50 años (1958 a 2008). Posteriormente, se ajustaron distribuciones probabilísticas extremales, a partir de las cuales se pudo obtener los valores de volumen erosionable y remonte usados en este estudio para calcular la vulnerabilidad a erosión e inundación debido al impacto de temporales. En Bosom y Jiménez (2011) puede verse una descripción detallada de la metodología seguida para la valoración de esta componente de la vulnerabilidad.

Finalmente, el rango medio de marea para el litoral catalán se obtiene a partir de los datos del mareógrafo de Barcelona, gestionado por Puertos del Estado, rango que se sitúa en torno a los 0,25m.

4.2.3. Datos referentes al sistema

Cada una de las 331 playas en estudio es identificada por su nombre y las coordenadas UTM de un punto característico de éstas. En cada una de ellas se obtienen o calculan los datos necesarios para caracterizar la respuesta del sistema ante el impacto de los diversos agentes considerados en el estudio. Estos datos son: ancho medio de la playa, tamaño del sedimento, altura máxima de berma, pendiente del estrán, pendiente interior, pendiente sumergida y pendiente emergida. Tal y como ha sido indicado anteriormente, a excepción de las pendientes sumergida y emergida, los demás datos han sido obtenidos a partir de la base de datos elaborada por y para CIIRC (2010).

Ancho medio de la playa

El ancho medio de playa es una variable importante a la hora de cuantificar la respuesta del sistema tanto a erosión como a inundación. En el caso de erosión- sea ésta debida al transporte longitudinal, la subida relativa del nivel del mar o el impacto de temporales- se produce una variación en la posición de la línea de orilla que será más o menos significativa según sea el ancho de la playa. Además, el ancho de playa nos permite conocer cuál será el recurso disponible después del impacto de los diversos agentes, variable importante a la hora de valorar la vulnerabilidad de la zona.

En el caso de inundación, el ancho de playa sólo interviene cuando se calcula la vulnerabilidad por subida del nivel del mar, donde la vulnerabilidad viene definida por la intrusión de agua en la zona contigua al dominio marítimo terrestre y por tanto debe tenerse en cuenta el ancho de playa. En el caso de temporales, la magnitud del impacto viene definida por el remonte, una distancia en la dirección vertical, y por tanto para la respuesta del sistema se usa un criterio en esa misma dirección (la altura máxima de berma), en vez de uno en horizontal (el ancho de la playa).

Altura máxima de berma

La altura máxima de berma se utiliza, en aquellos casos donde no existe duna, para caracterizar la capacidad del sistema a hacer frente a la posible inundación debida al impacto de temporales. La variable usada para cuantificar el impacto de inundación de este agente es el remonte inducido por un temporal asociado a una probabilidad de ocurrencia. Dado que el remonte se trata de una distancia en la dirección vertical, la capacidad del sistema para responder a este impacto viene determinada también por su "altura", ya que cuanta más alta sea la playa, menor será el volumen de agua que penetre tierra adentro. Dicho esto, hay que considerar también que la penetración de un mayor volumen de agua no siempre implica una mayor afectación en el dominio terrestre, ya que si la playa es muy ancha, el volumen de agua se reparte en una superficie mayor, la percolación aumenta y puede llegarse a evitar la inundación tierra adentro.

La altura de berma también se utiliza para obtener la pendiente sumergida de la playa, necesaria para calcular el retroceso de la línea de orilla según la regla de Bruun (Bruun, 1954).

Tamaño del sedimento y pendiente del estrán

El tamaño de sedimento y la pendiente del estrán se usan para tener en cuenta la contribución de la playa en el valor de los impactos debidos a la acción de un temporal. Estas dos variables están fuertemente relacionadas, de modo que la pendiente de un perfil aumenta a medida que aumenta el tamaño de grano que compone la playa (McLachlan y Brown, 2006).

Dado que la pendiente del perfil varía playa a playa y para no tener que construir series temporales de remonte y volumen erosionado para cada una de ellas (teniendo que ajustar posteriormente una distribución probabilista extremal a cada una de estas series), se decide agrupar las playas según sus características geomorfológicas. Así, dada la relación entre tamaño de sedimento y pendiente del estrán, las playas se agrupan según tamaños de sedimento, asociando a cada uno de los rangos una pendiente que resulta de la media de las pendientes de las playas con dichos tamaños de sedimento. De este modo, para una playa dada, con un tamaño de sedimento determinado, el remonte y el volumen erosionable se calculan a partir de una pendiente asociada a ese tipo de playa que, en general, difiere de la pendiente real de la playa, consiguiendo con este proceso, simplificar el cálculo de dichos impactos. Para la costa catalana se definen 6 tipos de playa que corresponden a los indicados en la Tabla 3.7.

Pendiente interior

Con los valores de pendiente interior, se obtiene un coeficiente corrector del remonte, que permite tener en cuenta el cambio de pendiente que normalmente presentan las playas (Ecuación 3.20). Con este coeficiente corrector se consigue reducir el valor del remonte en aquellos casos en que la pendiente interior es más tendida, lo que se ajusta mejor al comportamiento real de las playas.

Pendiente sumergida

La pendiente sumergida de la playa se utiliza para calcular el retroceso de la línea de orilla cuando se produce una subida del nivel del mar. Según la Regla de Bruun (Bruun, 1954) el retroceso de la línea de orilla puede ser obtenido con el siguiente modelo:

$$R = s \quad \frac{L}{B + d}$$

Donde,

R es el retroceso, s es el cambio en el nivel del mar, L es la amplitud del perfil activo, B es la altura de berma y d es la profundidad de cierre.

Siguiendo este modelo, podemos definir la pendiente sumergida como:

$$Pendiente\ sumergida = \frac{B + d}{L}$$

La amplitud del perfil activo se obtiene a partir del mapa batimétrico del Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural de la Generalitat de Catalunya y se calcula como la distancia perpendicular a la línea de costa hasta la profundidad de cierre (ver Figura 4.4). Estrictamente, dicha profundidad debería ser calculada para cada una de las playas, pero debido a la precisión de la fórmula y los datos disponibles, esta ha sido considerada igual a 10m, lo que corresponde a la zona más interna de la costa que engloba la parte más activa del perfil.

Pendiente emergida

La pendiente emergida se utiliza para calcular el valor del impacto de inundación debido a la subida relativa del nivel del mar, considerando de este modo la contribución del sistema a este impacto. Posteriormente, para cuantificar la vulnerabilidad de la zona, se incorpora el ancho medio de playa.

Las pendientes emergidas de cada playa han sido obtenidas a partir de los mapas topográficos de las series 1:5000 y 1:10000 del Institut Cartogràfic de Catalunya. Estas pendientes han sido calculadas considerando la distancia perpendicular a la línea de costa hasta la cota 5m, ya que, teniendo en cuenta la escala temporal del análisis, se puede asumir que la inundación producida por RSLR no alcanzará zonas más elevadas. En aquellos casos en que la altimetría de la zona es muy irregular y/o las playas son de gran longitud, se ha realizado una media de las pendientes emergidas en distintos puntos de la playa (Figura 4.5).

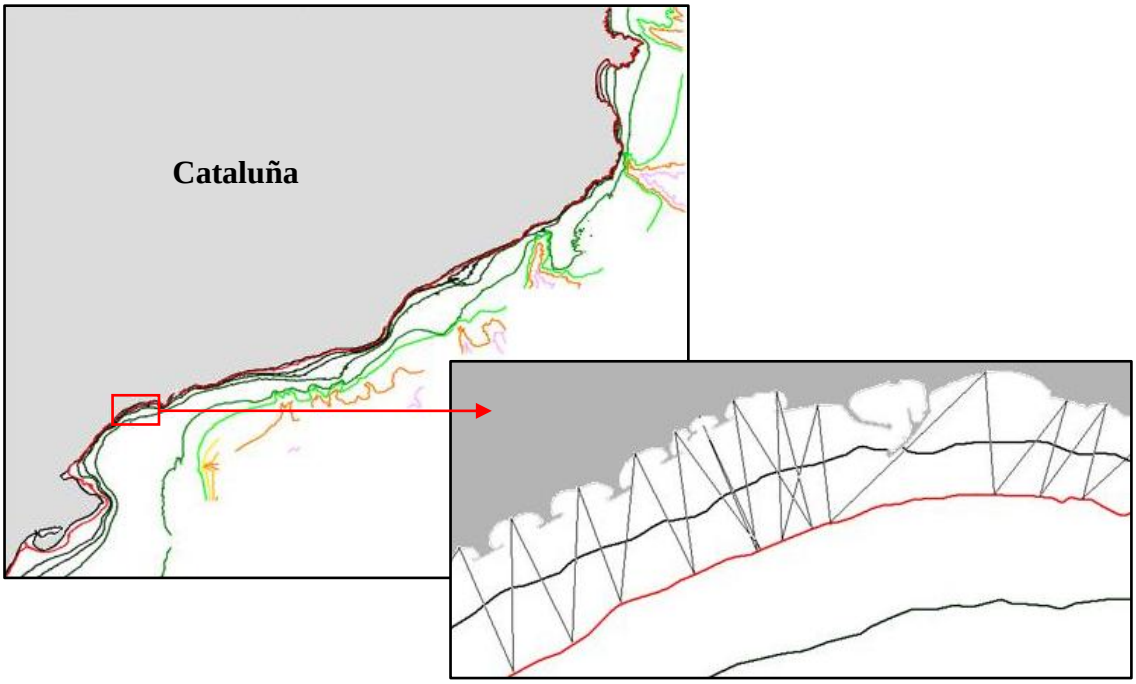

Figura 4.4. Mapa batimétrico de la costa catalana. Determinación de las amplitudes del perfil activo de las playas de la zona de Cambrils (modificado del Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural de la Generalitat de Catalunya)

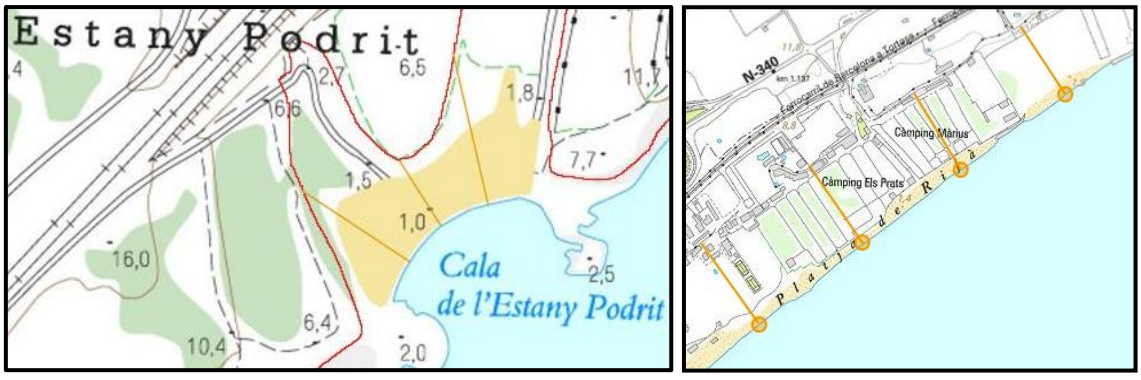

Figura 4.5. Determinación de la pendiente emergida de la Cala de l'Estany Podrit y la playa de Rifà en Tarragona (modificado del Institut Cartogràfic de Catalunya)

CAPITULO 5
RESULTADOS

5.1. Introducción

En este capítulo se procede a calcular la vulnerabilidad integrada a diversos agentes de la costa catalana mediante la metodología desarrollada. Además, también se calcula dicha vulnerabilidad mediante el Coastal Vulnerability Index con el objetivo de comparar ambos métodos.

Tal y como ha sido indicado en el capítulo anterior, el área de estudio está formada por un conjunto de 393 tramos costeros, en los cuales se dispone de datos referentes a los diversos agentes y características del sistema. Sin embargo, no todos los datos están disponibles en todos los tramos, motivo por el cual, en algunas de estas unidades no es posible calcular todos los índices. Aún así, estos tramos han sido también considerados en el estudio con el fin de obtener la máxima información posible de la costa, calculando solamente los índices cuyos datos necesarios están disponibles.

Una vez calculada la vulnerabilidad mediante los dos métodos, los diversos índices de vulnerabilidad han sido representados gráficamente mediante un SIG para su visualización sobre el territorio y, así, facilitar su interpretación.

5.2. Coastal Vulnerability Index

En primer lugar se aplica el método del Coastal Vulnerability Index para obtener la vulnerabilidad integrada a diversos agentes de la costa catalana. Este método ha sido expuesto en el apartado 3.2, y en el subapartado 3.2.6 se han realizado un conjunto de propuestas acerca de cómo adaptarlo para su aplicación a la costa catalana. Estas propuestas están dirigidas principalmente a la adaptación de la graduación de algunas de las variables incluidas en el CVI con el fin de ajustarlas a las características de nuestra zona de estudio. Sin embargo, debido a que el propósito de la aplicación del CVI a la costa catalana es, en este caso, el de compararlo con la nueva metodología desarrollada, los cálculos han sido realizados con las graduaciones originalmente propuestas por el USGS para las costas Atlántica y Pacífica de Estados Unidos (Thieler y Hammar-Klose, 2001, Tabla 3.2).

En el caso de la variable pendiente costera, ya que en este trabajo no se dispone de la información pertinente para calcularla según la metodología del CVI, esta pendiente ha sido calculada según ha sido propuesto en el subapartado 3.2.6 como la media aritmética de la pendiente "emergida" (hasta cota +5m) y la pendiente "sumergida" (hasta cota -10m), ambas obtenidas sobre la perpendicular a la costa. Una vez obtenida la pendiente costera, esta ha sido clasificada utilizando también las graduaciones indicadas por el USGS.

De los 393 tramos costeros en los que se ha dividido la zona de estudio, se ha podido calcular el CVI mediante la clasificación propuesta para la costa Pacífica y Atlántica de Estados Unidos en 371 de los tramos. Todos estos tienen los mismos valores de vulnerabilidad para geomorfología y rango mareal, ya que el estudio contiene solamente la geomorfología playa (vulnerabilidad máxima) y el rango mareal puede considerarse igual en toda el área (menor a 1m y por tanto vulnerabilidad máxima). La vulnerabilidad asociada a evolución costera es la misma en las dos graduaciones utilizadas y varía a nivel playa. Los valores de vulnerabilidad para las otras variables dependen de la clasificación utilizada.

Con la clasificación para la costa Pacífica, el oleaje en toda el área de estudio queda incluido en la clase de menor vulnerabilidad (1) mientras que la subida relativa del nivel mar pertenece a la clase de mayor vulnerabilidad (5). La vulnerabilidad asociada a la variable de pendiente costera varía playa a playa, siendo máxima en la zona del Delta del Ebro.

En cambio, con la clasificación para la costa Atlántica, la variable de pendiente costera pertenece a la clase de menor vulnerabilidad (1) en toda el área de estudio. La altura de ola pertenece a la clase de vulnerabilidad baja (2) en todos los tramos, excepto en el sector de la

Tordera dónde la vulnerabilidad para este factor es moderada (3). La vulnerabilidad asociada a la subida del nivel del mar es baja (2) en toda la costa menos en el Delta del Ebro donde debido a subsidencia la vulnerabilidad a este agente es máxima (5).

En cuanto a los valores del CVI en la costa catalana, con la graduación para la costa Pacífica, estos se encuentran entre 4,56 y 22,82. La media es 10,25 y la moda es 7,91. El primer, segundo y tercer cuartil de la serie son 7,91; 9,13 y 11,18, respectivamente. Así pues, se considera con vulnerabilidad baja aquellos tramos cuyo valor de CVI es inferior a 7,91; con vulnerabilidad moderada cuando el CVI se encuentra entre 7,91 y 9,13; con vulnerabilidad alta cuando el CVI vale entre 9,13 y 11,18 y vulnerabilidad muy alta aquellos tramos con CVI mayores a 11,18.

En el caso de la graduación para la costa Atlántica, el CVI en la costa catalana tiene valores entre 4,08 y 14,43. La media es 7,84 y la moda es 7,07. El primer y el segundo cuartil valen 7,07 mientras que el tercer cuartil vale 8,66. Debido a que los dos primeros cuartiles coinciden, en esta clasificación no existe ningún tramo con vulnerabilidad moderada. Los tramos con CVI menores a 7,07 reciben vulnerabilidad baja, entre 7,07 y 8,66 tienen vulnerabilidad alta y los tramos con CVI mayor a 8,66 son considerados con vulnerabilidad muy alta.

En la Figura 5.1 se muestra el porcentaje de tramos costeros en las distintas categorías de vulnerabilidad según las clasificaciones propuestas para la costa Pacífica y Atlántica de EEUU.

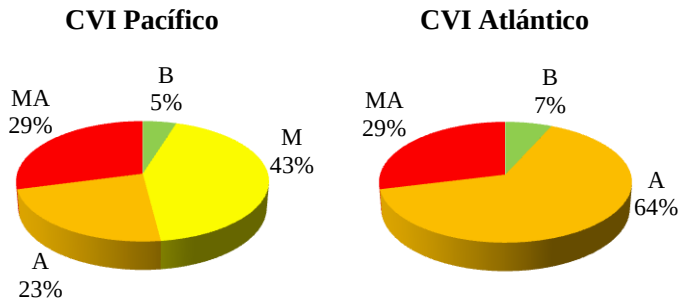

Figura 5.1. Porcentaje de tramos en cada una de las 4 categorías de vulnerabilidad consideradas en el CVI según las clasificaciones propuestas para la costa Pacífica y Atlántica de EEUU

En cuanto a la distribución de la vulnerabilidad a nivel espacial, ambas clasificaciones destacan la zona del Delta del Ebro y el Golfo de Roses como zonas de muy alta vulnerabilidad.

En el caso de la clasificación para la costa Atlántica, también tienen muy alta vulnerabilidad algunos tramos de la comarca del Baix Penedès, la comarca del Barcelonés y la costa sur del Maresme, así como el Baix Empordà.

Con la graduación para la costa Pacífica, muchas de las playas de la mitad norte de la provincia de Tarragona y comarca del Garraf presentan muy alta vulnerabilidad. También tiene muy alta vulnerabilidad la zona del Delta del Llobregat, la desembocadura del rio Tordera y la desembocadura del rio Ter.

En la Figura 5.2 pueden verse representados los resultados obtenidos en la costa de Cataluña al aplicar el método del CVI con la clasificación para la costa Pacífica de EEUU (En Anejo puede verse esta misma vulnerabilidad con la clasificación para la costa Atlántica).

5.3. Catalan Vulnerability Index

En este apartado se procede a aplicar la metodología desarrollada en este trabajo para el cálculo de la vulnerabilidad costera (apartado 3.3) a las playas del litoral catalán. Con esta nueva metodología es necesario calcular, en primer lugar, la vulnerabilidad de la costa a cada uno de los procesos litorales considerados (vulnerabilidad parcial) para, posteriormente, calcular la vulnerabilidad al efecto integrado de todos ellos (vulnerabilidad integrada).

En el caso de la vulnerabilidad parcial a los impactos de erosión e inundación debidos a la subida relativa del nivel del mar, tal y como ha sido descrito en el capítulo 3, se consideran 3 escenarios de RSLR. Aunque también la vulnerabilidad integrada a los diversos agentes (ya que integra el agente de RSLR) considera estos tres escenarios, en este capítulo solamente se presentan los resultados correspondientes a la situación de mayor subida del nivel del mar.

Esta elección se debe a que la principal aplicación de los estudios de vulnerabilidad es la de ayudar en la gestión de las zonas costeras, de modo que se considera recomendable mantener una actitud conservadora ante la incertidumbre en el valor de la subida del nivel del mar y utilizar los resultados obtenidos en el escenario más desfavorable de RSLR que corresponde a una subida acumulada de 0,59 m en 100 años. Con esta decisión se reduce la gran cantidad de resultados obtenidos debido a la consideración de los diversos escenarios de RSLR y se facilita su interpretación.

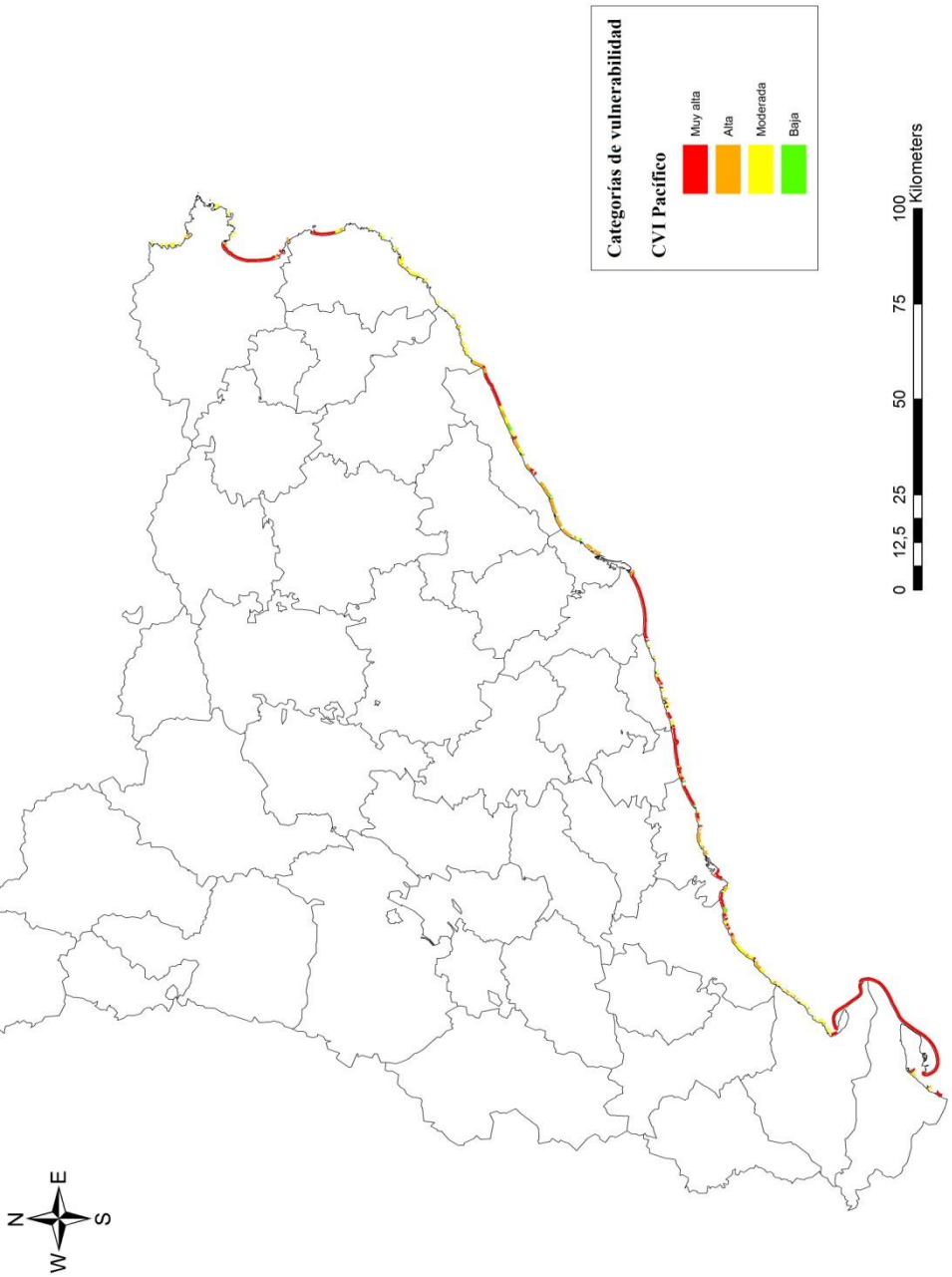

Figura 5.2. Vulnerabilidad a múltiples agentes de la costa de Cataluña mediante el método del CVI y según la clasificación para la costa Pacífica de EEUU

5.3.1. Vulnerabilidad parcial

Cálculo de la vulnerabilidad física de las playas del litoral catalán a cada uno de los procesos litorales por separado. Los procesos considerados y los índices de vulnerabilidad correspondientes son:

- Erosión a medio plazo: $IVEm_a$, $IVEm_r$
- Erosión por RSLR: $IVEs_{a1}$, $IVEs_{a2}$, $IVEs_{a3}$, $IVEs_{r1}$, $IVEs_{r2}$, $IVEs_{r3}$
- Inundación por RSLR: $IVIs_1$, $IVIs_2$, $IVIs_3$
- Erosión por temporales: IVEt
- Inundación por temporales: IVIt

Se recuerda que los subíndices "a" y "r" hacen referencia a la utilización de un indicador absoluto o relativo, respectivamente, mientras que los subíndices "1", "2" y "3" corresponden a los distintos escenarios de RSLR considerados. La subida acumulada en el nivel del mar para un periodo de 100 años es de 0,18m en el primer escenario, 0,38m para el segundo escenario y 0,59m en el tercero.

Tal y como puede verse en el subapartado 3.3.2, los índices de vulnerabilidad parcial tienen variación de 1 a 5, siendo 1 la vulnerabilidad mínima y 5 la vulnerabilidad máxima. Además, estos índices se dividen en cinco clases cualitativas de vulnerabilidad con el fin de facilitar la interpretación de los resultados. Estas clases son:

- Muy baja : de 1,0 a 1,7
- Baja: de 1,8 a 2,5
- Moderada: de 2,6 a 3,3
- Alta: de 3,4 a 4,1
- Muy alta: de 4,2 a 5,0

Erosión por RSLR

El cálculo de la vulnerabilidad de la costa catalana al impacto de erosión a largo plazo, debido a la subida relativa del nivel del mar, se estima mediante los índices $IVEs_a$ e $IVEs_r$. En el caso del índice $IVEs_a$, este se trata de un índice absoluto en el que la vulnerabilidad se identifica con la cantidad de recurso disponible (ancho) en un periodo de 100 años para que las playas puedan

cumplir con la función recreativa, ya que esta es una de las principales (sino la más) funciones de las playas en el litoral catalán. El $IVEs_{r,}$ en cambio, es un índice relativo que evalúa la variación de este recurso en el mismo periodo de tiempo.

Los cálculos de vulnerabilidad a erosión inducida por RSLR en la costa catalana han sido realizados en 385 de los 393 tramos. En la Figura 5.3 puede verse la distribución en formato porcentaje de los diversos tramos en las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para los distintos índices (absoluto y relativo) y escenarios de subida del nivel del mar (1, 2 y 3).

Tal y como se observa en dicha figura, con el índice de vulnerabilidad absoluto, aunque son muchos los tramos de costa con vulnerabilidad muy alta, existen tramos en todas las categorías de vulnerabilidad.

En cambio, según el índice de vulnerabilidad relativo ninguno de los tramos analizados presenta vulnerabilidad baja o muy baja, lo que significa que ninguno de ellos presentará acreción debido a este agente. En el caso de los escenarios 2 y 3 además, ninguno de los tramos presenta vulnerabilidad moderada y por tanto toda la costa catalana se encuentra clasificada en las categorías de alta y muy alta vulnerabilidad a erosión por RSLR según este índice.

Además, tal y como era de esperar, a medida que se consideran escenarios de subida del nivel del mar más desfavorables, un mayor número de tramos queda incluido en la categoría de vulnerabilidad muy alta. Esto es especialmente significativo en el caso del índice de vulnerabilidad relativo, donde el número de tramos en la categoría máxima de vulnerabilidad se duplica al pasar de escenario de RSLR 1 al escenario de RSLR 3.

La vulnerabilidad de la costa de Cataluña al impacto de erosión producido por la subida del nivel del mar en el escenario 3 de RSLR puede verse en las Figuras 5.4 y 5.5 mediante los índices de vulnerabilidad absoluto ($IVEs_a$) y relativo ($IVEs_r$) a este proceso, respectivamente.

En el Anejo también puede verse la vulnerabilidad de la costa catalana al impacto de erosión por RSLR con el índice absoluto ($IVEs_a$) en los escenarios 1 y 2.

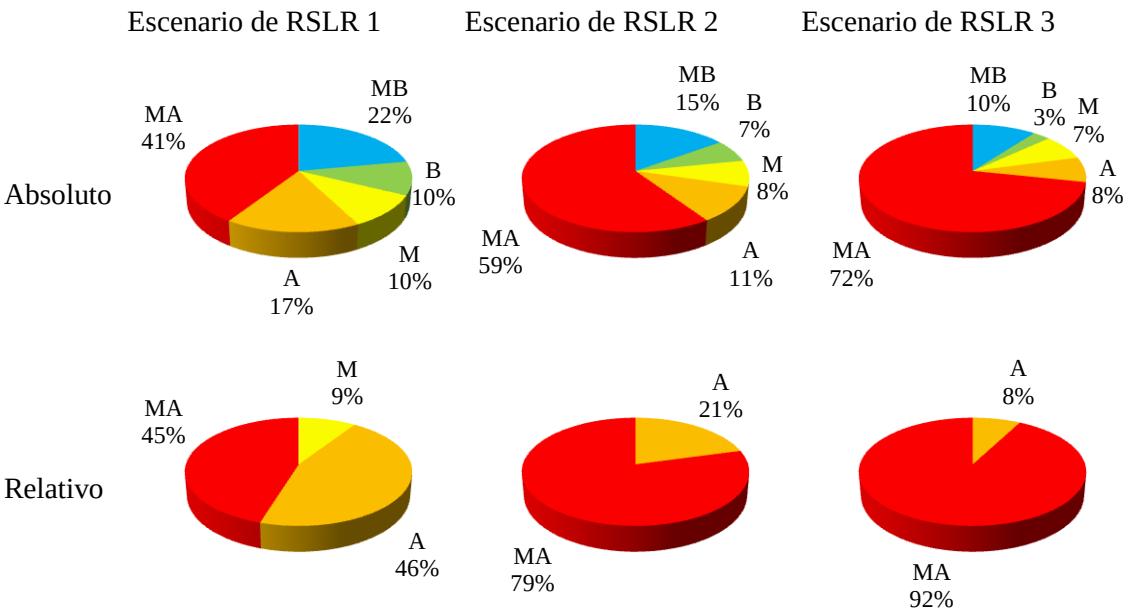

Figura 5.3. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para los diversos índices y escenarios de vulnerabilidad a erosión a la subida relativa del nivel del mar

En la Figura 5.4 se presenta la distribución espacial de los valores de vulnerabilidad absoluta de las playas a la erosión por RSLR. Como es de esperar dados los valores obtenidos, gran parte del litoral catalán presenta vulnerabilidad muy alta al impacto de erosión por RSLR. Las zonas de vulnerabilidad muy baja son escasas y se encuentran principalmente en:

- Delta del Llobregat
- Punta de la Tordera
- Desembocadura del Ter
- Golf de Roses

En términos de vulnerabilidad relativa, en la Figura 5.5, tal y como ha sido indicado anteriormente, prácticamente la totalidad de la costa de Cataluña queda incluida en la categoría muy alta. Algunas playas pertenecen a la categoría de vulnerabilidad alta, pero ninguna presenta vulnerabilidad entre muy baja y moderada.

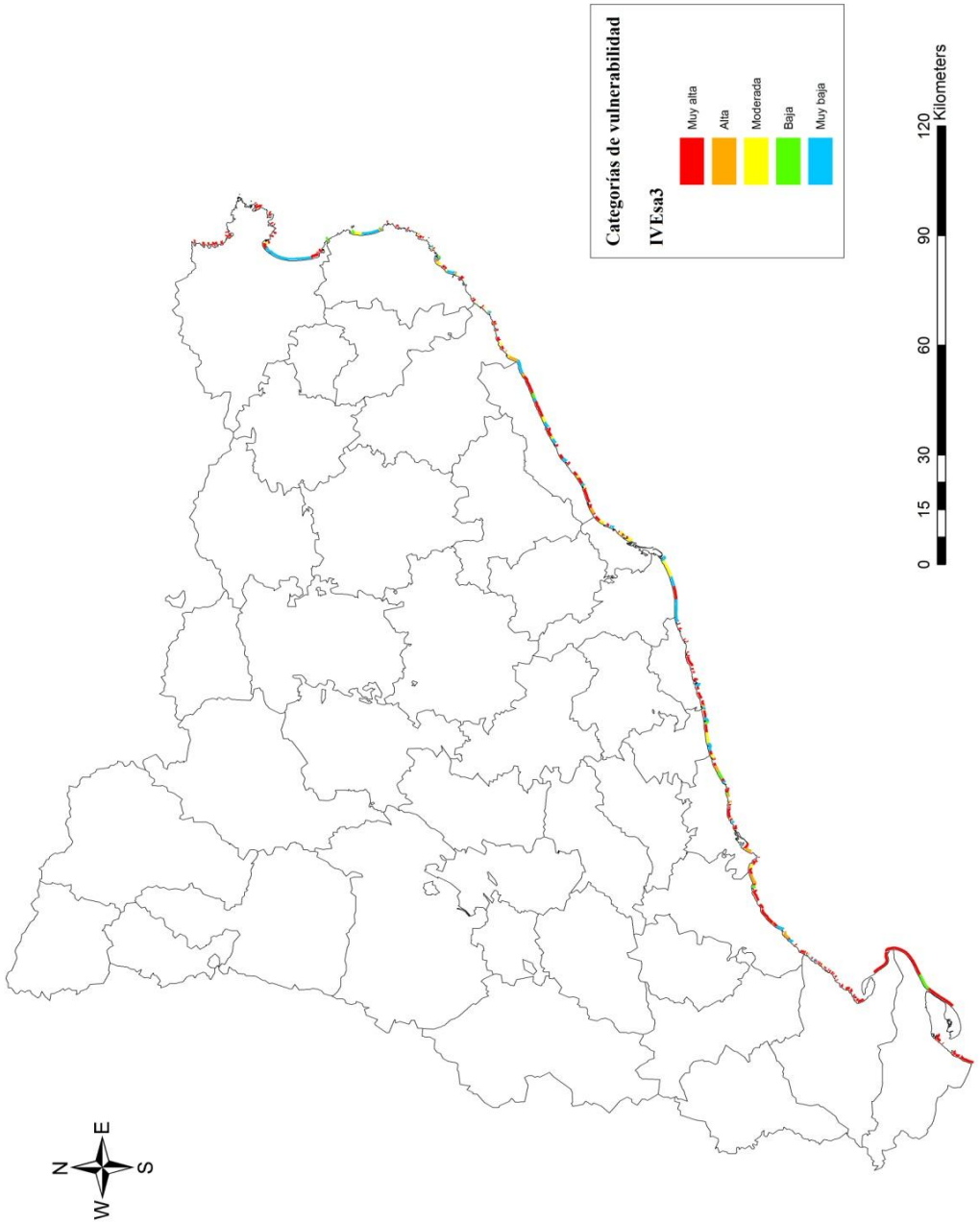

Figura 5.4. Vulnerabilidad a erosión por RSLR según $IVEs_a$ (índice absoluto) en el escenario 3 de la costa de Cataluña

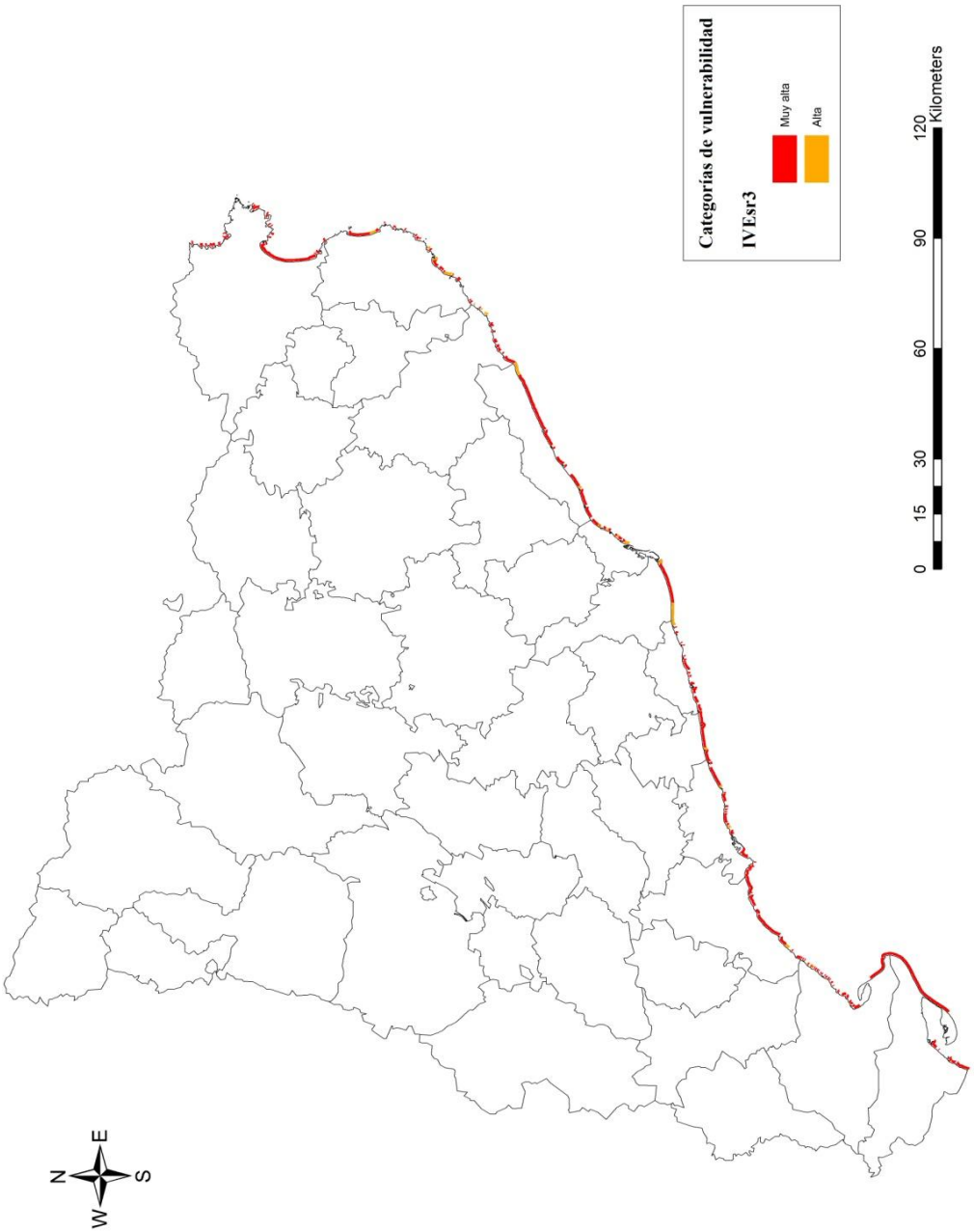

Figura 5.5. Vulnerabilidad a erosión por RSLR según IVE_{SI} (índice relativo) en el escenario 3 de la costa de Cataluña

Inundación por RSLR

La vulnerabilidad a inundación por RSLR en la costa de Cataluña ha sido calculada en 390 tramos. En la Figura 5.6 puede verse el porcentaje de estos tramos incluido en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas, según el escenario de RSLR asumido.

En dicha figura comprobamos que, de igual modo que para el impacto de erosión por RSLR, a medida que aumenta la magnitud del agente también aumenta el número de tramos en la categoría de mayor vulnerabilidad. Sin embargo, la sensibilidad del sistema al valor de la subida del nivel del mar en el impacto de inundación es menor que en el impacto de erosión, ya que el aumento de vulnerabilidad en este caso no es tan significativo como en el caso de erosión.

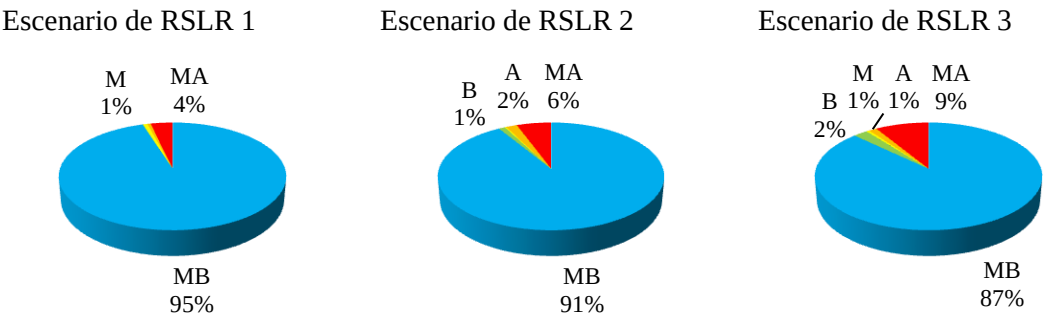

Figura 5.6. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para el índice de vulnerabilidad a inundación a la subida del nivel del mar en los escenarios 1, 2 y 3

En la Figura 5.7 se muestra la distribución a nivel espacial de la vulnerabilidad de la costa de Cataluña al impacto de inundación debido a la subida del nivel del mar considerada en el escenario 3 (en el Anejo puede verse dicha vulnerabilidad en los escenarios 1 y 2). Tal y como se observa en dicha figura, la mayor parte del litoral catalán presenta muy baja vulnerabilidad al impacto de inundación por RSLR. Además, las zonas de elevada vulnerabilidad están muy localizadas en las zonas más bajas de la costa y son:

- Delta del Ebro
- Delta del Llobregat
- Punta de la Tordera
- Desembocadura del Ter
- Golfo de Roses

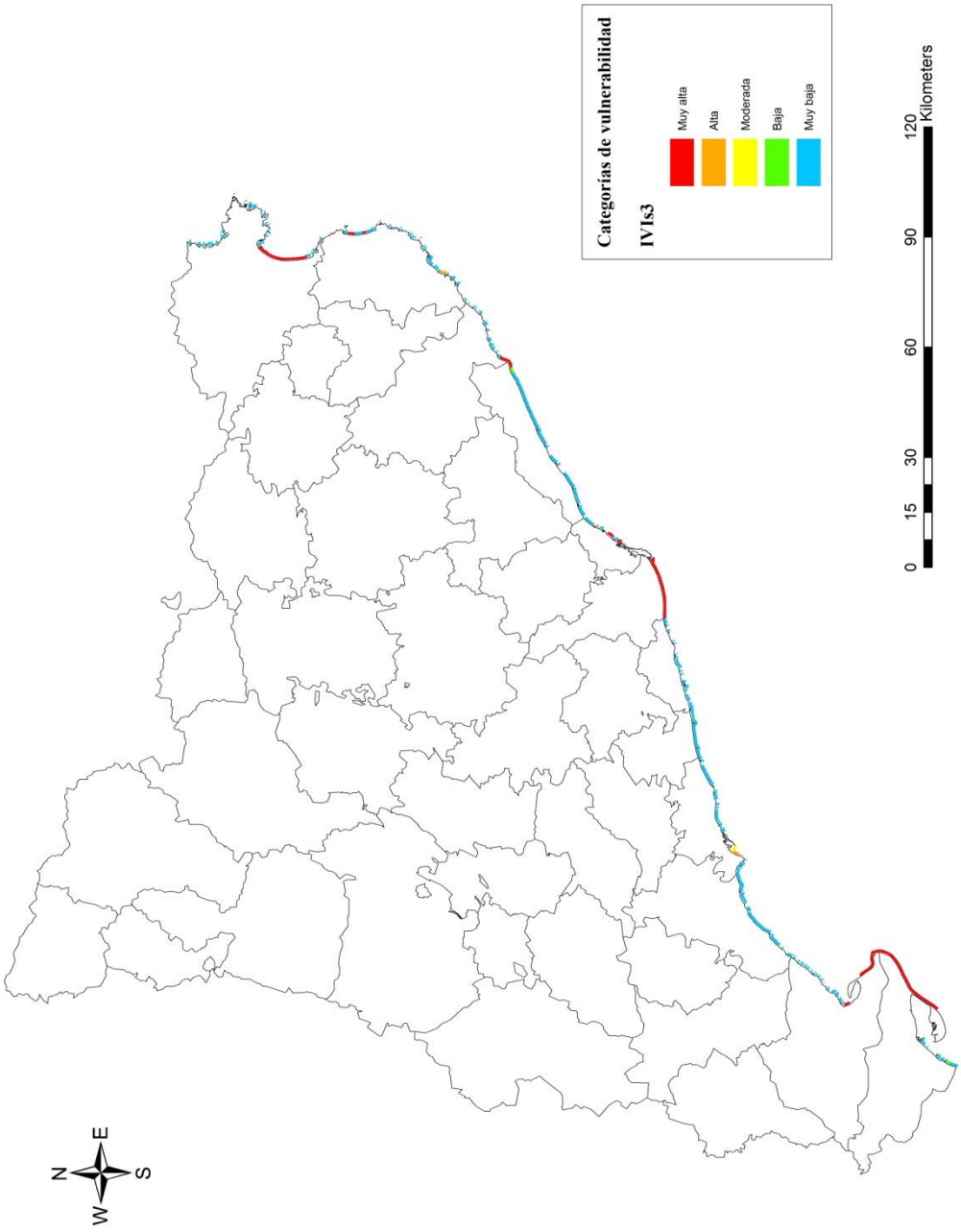

Figura 5.7. Vulnerabilidad a inundación por RSLR según IVIs en el escenario 3 de la costa de Cataluña

Erosión a medio plazo

De forma análoga al caso de erosión debido a la subida del nivel del mar, en el impacto de erosión a medio plazo también se desarrollan dos índices: uno absoluto ($IVEm_a$) que evalúa la capacidad que tendrá la playa dentro de 10 años para cumplir la función recreativa, y uno relativo ($IVEm_r$) en el que se mide la variación del recurso (ancho de playa) en este mismo periodo.

El cálculo de la vulnerabilidad a erosión a medio plazo ha sido realizado en 372 de los 393 tramos considerados en el estudio. En la Figura 5.8 se muestra el porcentaje de tramos incluidos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad de los índices descritos. En las Figuras 5.9 y 5.10 puede verse a nivel espacial la vulnerabilidad a erosión a medio plazo de la costa de Cataluña según $IVEm_a$ (absoluto) e $IVEm_r$ (relativo), respectivamente.

En el caso del $IVEm_a$, las zonas a destacar por presentar valores elevados de vulnerabilidad son, entre otras: Delta del Ebro, comarcas del Tarragonés, Garraf, Barcelonés y sur del Maresme, así como el Cap de Creus.

Con el $IVEm_r$ gran parte de la costa presenta valores de entre moderada a muy alta vulnerabilidad. En la provincia de Girona, por ejemplo, solamente dos de los tramos analizados presentan vulnerabilidad baja o muy baja.

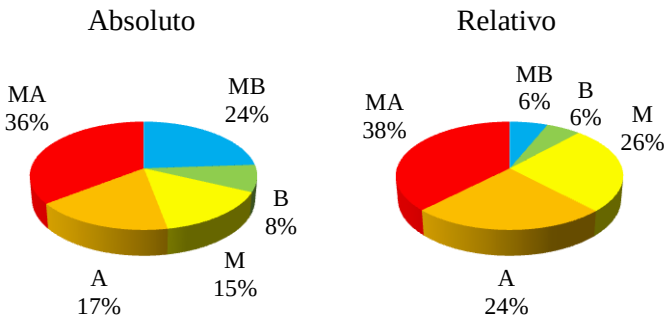

Figura 5.8. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para los índices de vulnerabilidad a erosión a medio plazo (absoluto y relativo)

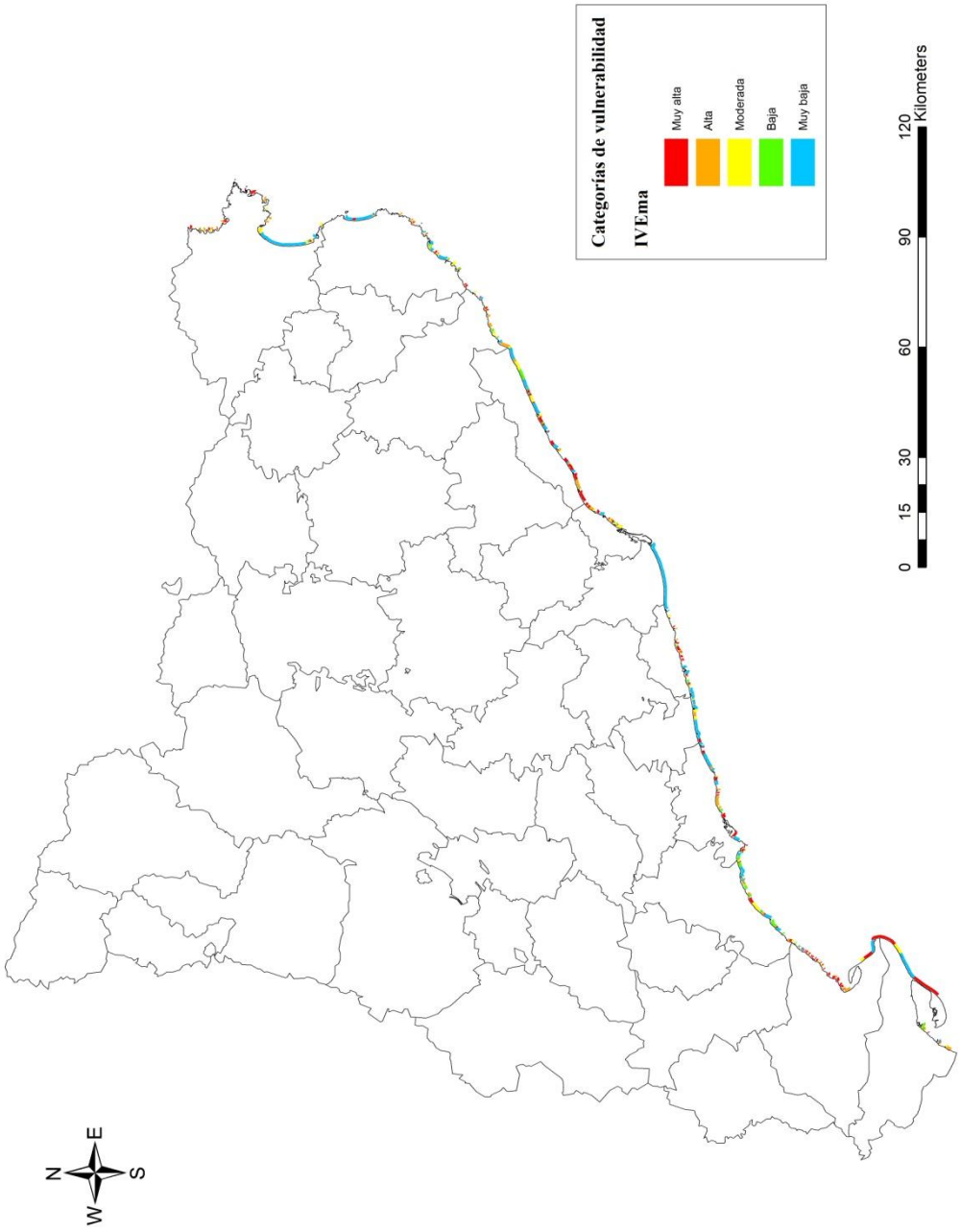

Figura 5.9. Vulnerabilidad a erosión a medio plazo según $IVEm_a$ (índice absoluto) de la costa de Cataluña

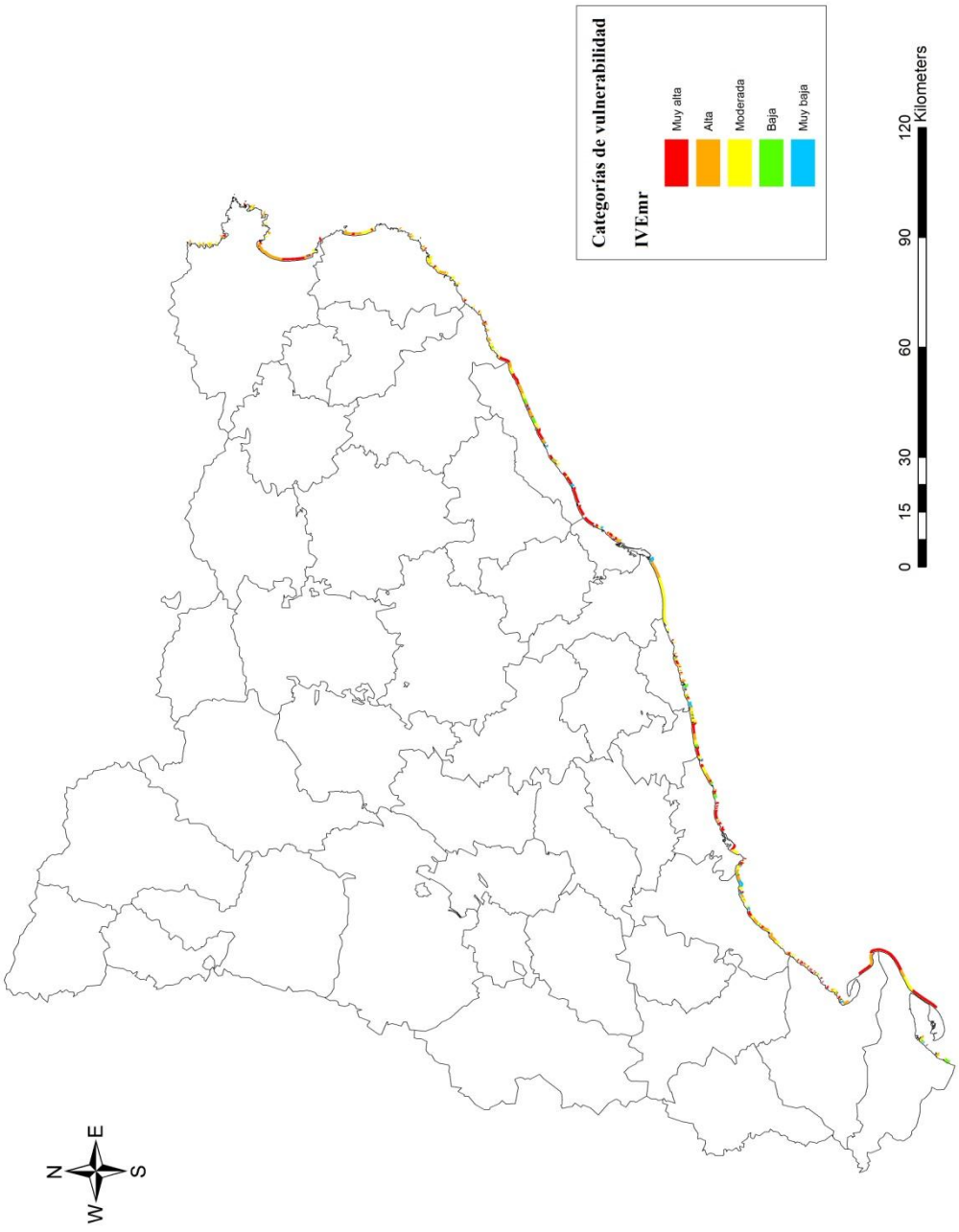

Figura 5.10.Vulnerabilidad a erosión a medio plazo según $IVEm_r$ (índice relativo) de la costa de Cataluña

Erosión por temporales

La vulnerabilidad a este impacto se cuantifica mediante el *IVEt*, índice que mide la capacidad de la playa (ancho) para hacer frente al retroceso en la línea de orilla causado por un temporal con una cierta probabilidad de ocurrencia.

En el caso del litoral catalán, se ha considerado que la probabilidad máxima admisible es de 0,5 o 0,3 según se considere una afectación económica de nivel bajo o medio y se ha utilizado el mismo tiempo de proyección que para la erosión a medio plazo (10 años). Con ello, se ha obtenido que el periodo de retorno del temporal a considerar es de 15 o 28,5 años, por lo cual se ha escogido un valor representativo del periodo de retorno de 25 años que es similar a la media.

La vulnerabilidad de la costa catalana a la erosión producida por el impacto de temporales ha sido calculada en 362 tramos. En la Figura 5.11 puede verse la distribución de estos tramos en las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para el índice de vulnerabilidad descrito con anterioridad.

Cabe notar que en el caso de este impacto, aunque muchos de los tramos presentan vulnerabilidad muy alta (44% de los tramos), solo una pequeña longitud de la costa analizada pertenece a esta categoría de vulnerabilidad (19% de los Km) y la gran parte del litoral tiene vulnerabilidad muy baja (44% de los Km).

En la Figura 5.12 pude verse la vulnerabilidad de la costa catalana al impacto de erosión por temporales (con período de retorno 25 años) según el *IVEt*. En dicha figura se observarse que, tal y como ha sido indicado, buena parte del litoral catalán muestra vulnerabilidad baja y muy baja a este impacto. Las principales zonas de alta vulnerabilidad se encuentran en los extremos sur (sector del Ebro) y norte (sector de Roses) y algunos tramos del Garraf y el Maresme.

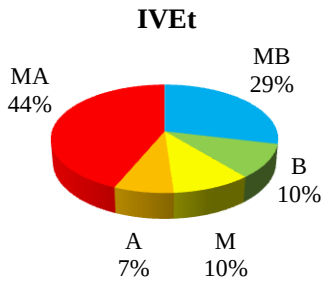

Figura 5.11. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para el índice de vulnerabilidad a erosión por temporales

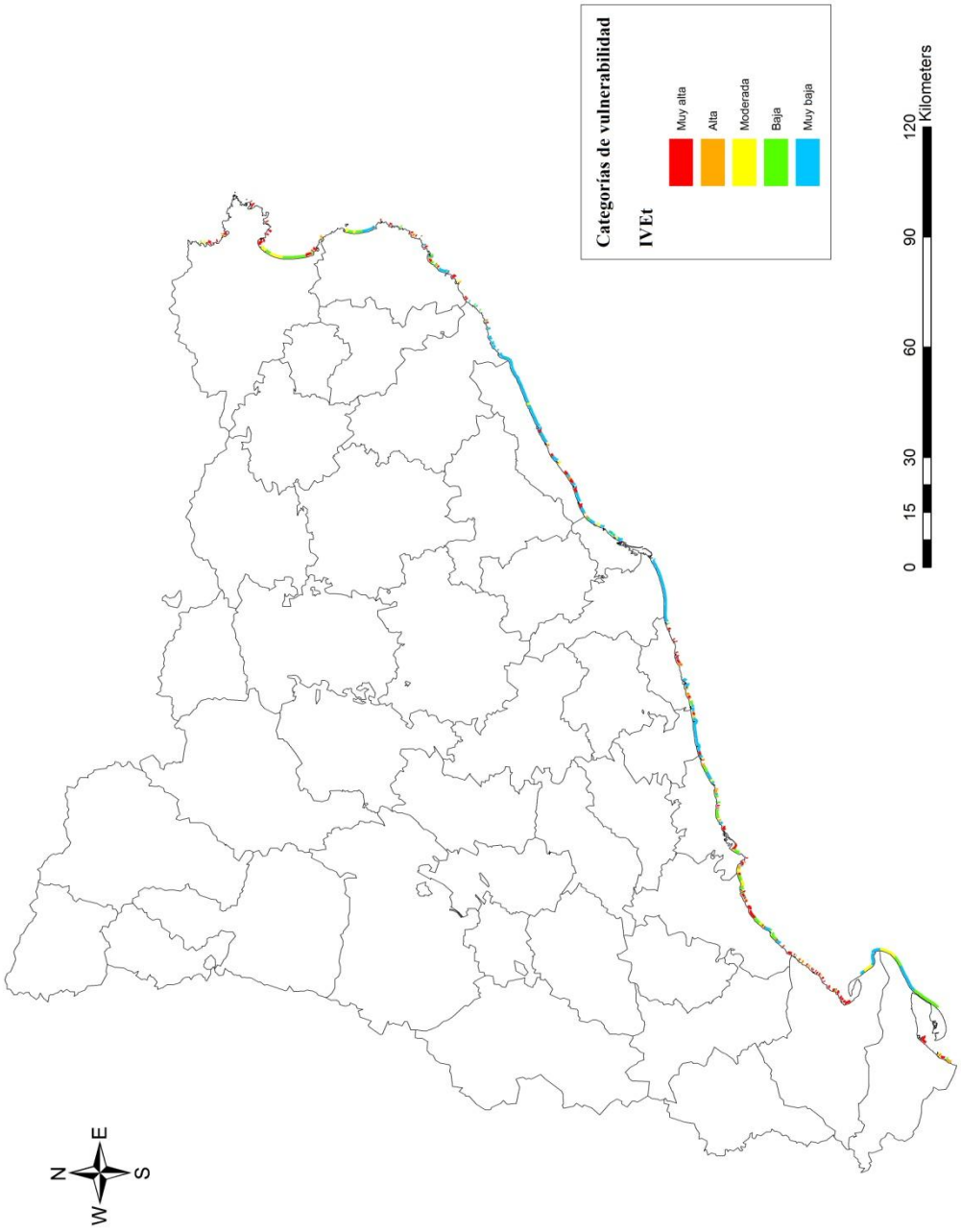

Figura 5.12. Vulnerabilidad a erosión por temporales según IVEt de la costa de Cataluña

Inundación por temporales

De forma análoga al impacto de erosión por temporales, en el caso de inundación por este mismo agente, el índice de vulnerabilidad *IVIt* cuantifica la capacidad de la playa (altura de berma) para hacer frente al remonte inducido por un temporal con una cierta probabilidad de ocurrencia. El periodo de retorno considerado en este caso es también de 25 años.

Los cálculos de vulnerabilidad a inundación por impacto de temporales han sido realizados en 365 tramos costeros. En la Figura 5.13 puede verse la distribución de estos tramos en las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para este índice.

En la Figura 5.14 puede verse la vulnerabilidad de la costa catalana a inundación por impacto de temporales (de periodo de retorno 25 años) según este mismo índice. En la figura, observamos como la mayor parte del litoral presenta vulnerabilidad baja o moderada a este agente. Las principales zonas con muy alta vulnerabilidad se encuentran en el Delta del Ebro y la comarca del Alt Empordà, aunque también existen algunas playas con alta vulnerabilidad en la costa del Maresme y el Baix Empordà.

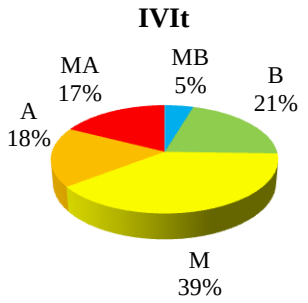

Figura 5.13. Porcentaje de tramos en cada una de las categorías de vulnerabilidad consideradas para el índice de vulnerabilidad a inundación por temporales

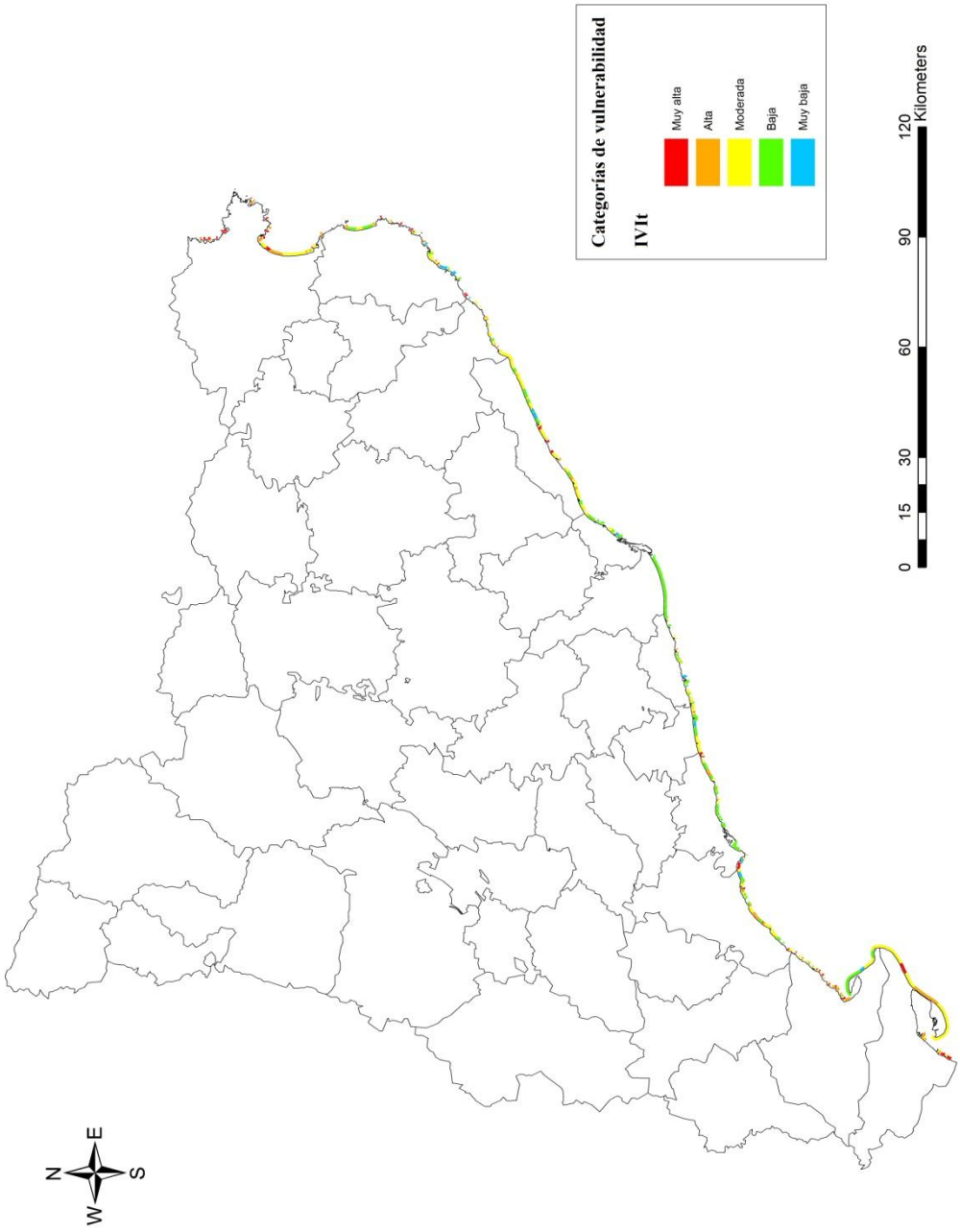

Figura 5.14. Vulnerabilidad a inundación por temporales según IVIt de la costa de Cataluña

5.3.2. Vulnerabilidad global

Una vez obtenidos los índices de vulnerabilidad parcial a cada uno de los agentes, estos son integrados en una fórmula o indicador de vulnerabilidad con el fin de reflejar la interactuación de los diversos procesos costeros y poder obtener así la vulnerabilidad global de la costa.

En la metodología desarrollada en este trabajo se proponen dos fórmulas de agregación. La primera de ellas (*CatVI-1*) consiste en una formulación análoga a la utilizada por el CVI (Ecuación 3.28), en la cual todos los procesos son integrados en un mismo indicador. La asignación de la vulnerabilidad a partir del valor del indicador puede hacerse de dos formas: igual que en el CVI, lo que consiste en obtener un índice de vulnerabilidad cualitativo definido mediante los cuartiles de la distribución; o bien mediante un índice de vulnerabilidad numérico obtenido a partir de la definición de una función de vulnerabilidad.

En el segundo método de agregación propuesto (*CatVI-2*), no todos los índices de vulnerabilidad parcial son integrados en una misma fórmula, sino que estos son agrupados en dos indicadores que evalúan de forma diferenciada la vulnerabilidad de la costa al impacto de inundación por una parte y de erosión por otra (Ecuaciones 3.31 y 3.34). Una vez calculados los índices de vulnerabilidad a erosión e inundación, estos dos índices son combinados para obtener la vulnerabilidad global de la costa. Para ello, se proponen tres métodos: media de ambos, máximo de ambos y un método cualitativo según la categoría de vulnerabilidad de los índices *IVE* e *IVI* (Ecuaciones 3.37 y 3.38 y Figura 3.15).

Así pues, en este apartado se presentan los siguientes resultados:

- *CatVI-1*
  - Vulnerabilidad global según método de los cuartiles y método de la función
- *CatVI-2*
  - Vulnerabilidad a Erosión y Vulnerabilidad a Inundación
  - Vulnerabilidad global según la media, el máximo y el método cualitativo

CatVI-1

Aquí se presentan los índices de vulnerabilidad global de la costa catalana obtenidos mediante la aplicación del primer indicador propuesto (Ecuación 3.28), tanto con el método de asignación de vulnerabilidad por cuartiles como el método de asignación según función de vulnerabilidad.

En el caso del "método de los cuartiles", el índice de vulnerabilidad global (*IV*) se define según los cuartiles de la serie, de modo que el índice de vulnerabilidad es: bajo cuando el indicador de vulnerabilidad (*V*) es inferior al valor del primer cuartil, moderado cuando *V* se encuentra entre el primer y el segundo cuartil, alto cuando *V* se sitúa entre el segundo y el tercer cuartil, y muy alto cuando el indicador es superior al valor del tercer cuartil.

En el "método de la función", en cambio, el índice de vulnerabilidad (*IV*) se define mediante una función de vulnerabilidad, de forma que a cada valor del indicador propuesto (*V*) se le asigna un valor del índice de vulnerabilidad. Este índice varía de 0 a 1 y se divide en 5 categorías de vulnerabilidad: muy baja (de 0,0 a 0,1), baja (de 0,2 a 0,3), moderada (de 0,4 a 0,5), alta (de 0,6 a 0,7) y muy alta (de 0,8 a 1,0).

Así pues, cabe notar que en el método de los cuartiles solo se consideran 4 categorías de vulnerabilidad (baja, moderada, alta y muy alta), mientras que en el método de la función se consideran cinco categorías (las anteriores más vulnerabilidad muy baja).

En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos al aplicar a la costa catalana el indicador de vulnerabilidad global propuesto en este primer método de agregación según los índices de vulnerabilidad parcial considerados en cada caso (ver Tabla 3.9).

	Mínimo	**1er cuartil**	**2do cuartil**	**3er cuartil**	**Máximo**	**Media**	**Moda**
V_{a1}	2,2	8,3	19,6	32,9	64,1	21,5	47,2
V_{a2}	2,5	10,3	22,1	34,8	80,8	23,5	47,2
V_{a3}	2,7	12,6	23,8	36,6	80,1	25,2	47,2
V_{r1}	5,3	14,6	23,6	32,6	69,8	24,4	21,1
V_{r2}	5,6	16,6	25,7	34,9	86,2	26,5	21,1
V_{r3}	6,0	17,5	27,0	36,0	86,2	28,0	21,1

Tabla 5.1. Resumen de resultados del indicador de vulnerabilidad global (V) con CatVI-1

En la Figuras 5.15 se muestran los resultados en formato porcentaje de la aplicación al litoral catalán del método de los cuartiles y el método de la función para los índices de vulnerabilidad global absoluto y relativo en el escenario 3 de RSLR.

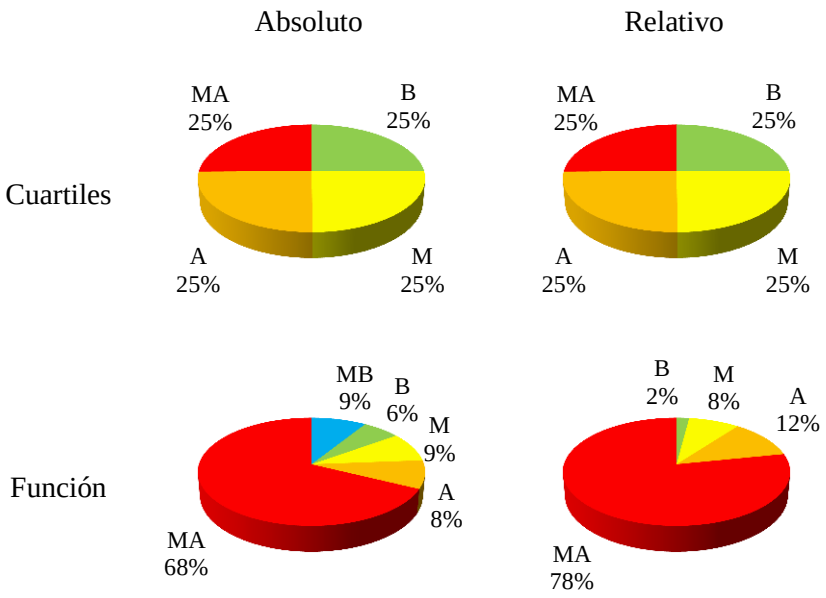

Figura 5.15. Porcentaje de tramos en cada una de las categorías de vulnerabilidad consideradas para los índices de vulnerabilidad global en CatVI-1(asumiendo escenario 3 de RSLR)

Tal y como se observa en la Figura 5.15, con el método de los cuartiles, el porcentaje de tramos contenido en cada una de las categorías de vulnerabilidad es siempre del 25% en todas las categorías y para los distintos índices considerados.

Con el método de la función, en cambio, el porcentaje de tramos en cada categoría es variable para cada categoría e índice considerado. En este caso, los resultados obtenidos al integrar los índices de vulnerabilidad parcial relativos son más desfavorables a los obtenidos cuando se integran los índices de vulnerabilidad parcial absolutos.

En la Figuras 5.16 puede verse la vulnerabilidad de la costa de la provincia de Barcelona según IV_{a3} (banda interior, índice absoluto) e IV_{r3} (banda exterior, índice relativo) calculados con el método de los cuartiles. En la Figura 5.17 se representan los mismos índices calculados con el método de la función.

Los mapas de vulnerabilidad global con el método de los cuartiles y el método de la función, tanto para el índice absoluto como el índice relativo, a nivel de Cataluña y en escenario 3 de RSLR pueden verse en el Anejo.

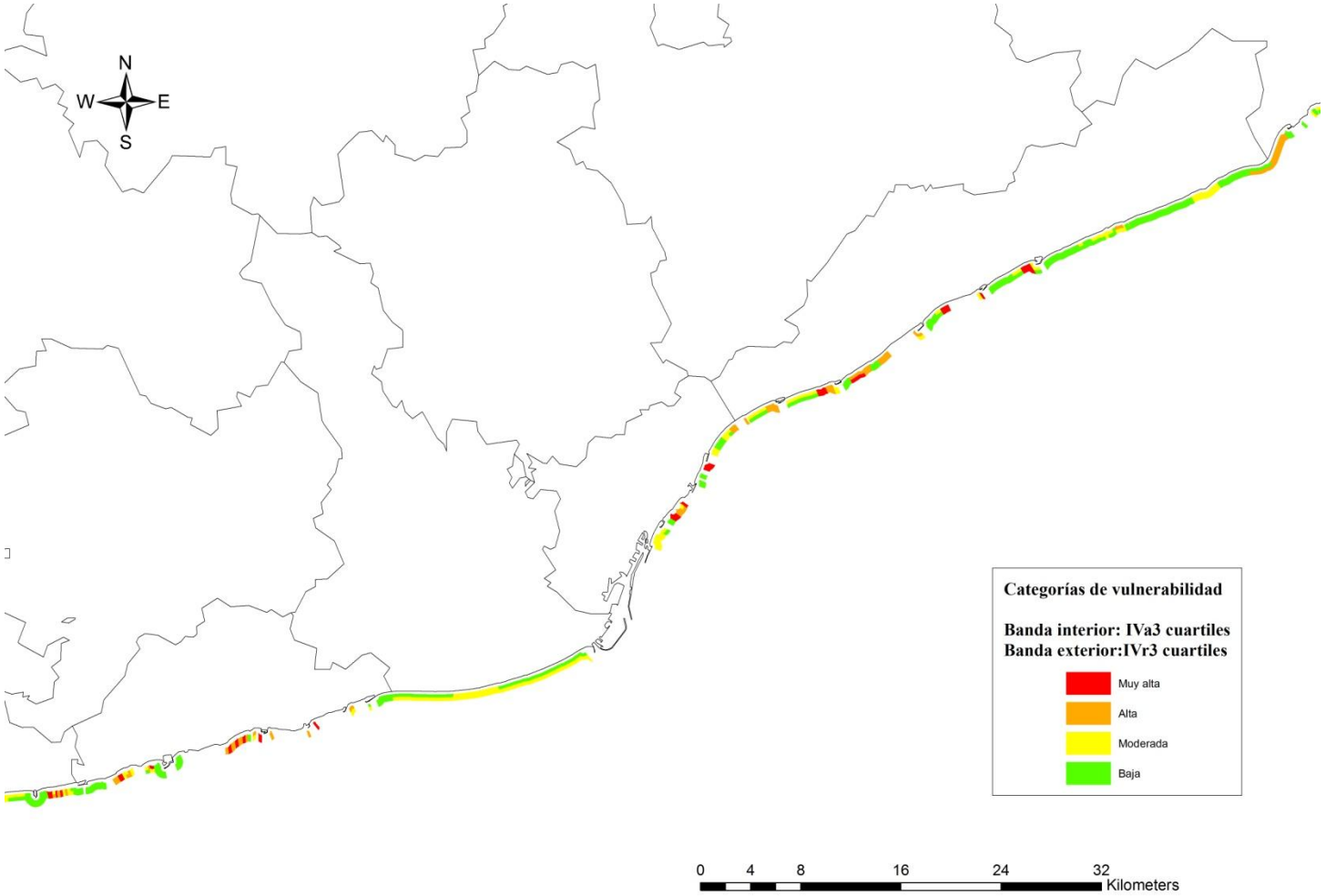

Figura 5.16. Vulnerabilidad global de la costa de la provincia de Barcelona según IV_{a3} (absoluto) e IV_{r3} (relativo) con el método de los cuartiles

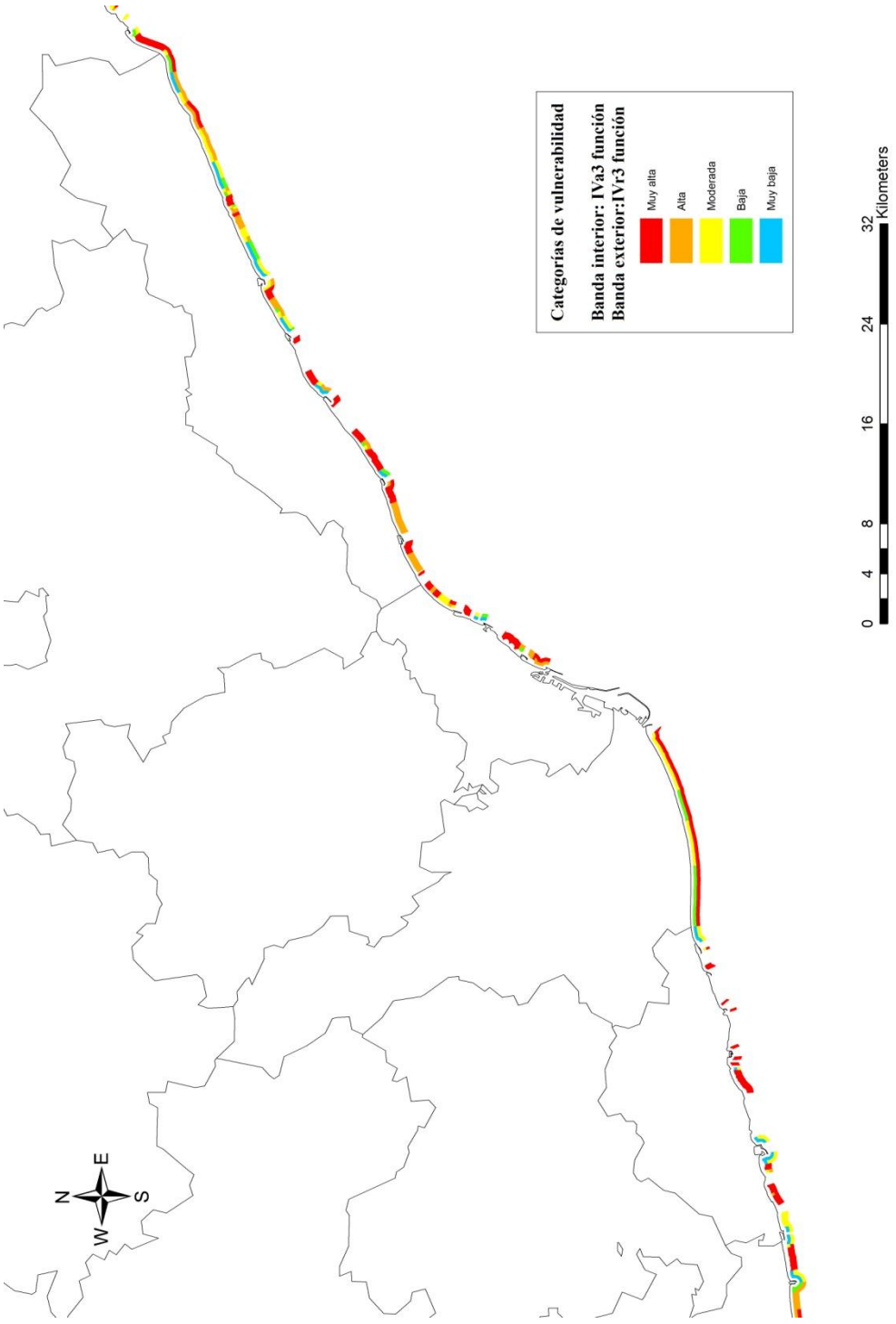

Figura 5.17. Vulnerabilidad global de la costa de la provincia de Barcelona según IV_{a3} (absoluto) e IV_{r3} (relativo) con el método de la función

En cuanto a la distribución espacial de la vulnerabilidad, con el método de los cuartiles la mayor parte de la costa catalana presenta vulnerabilidad baja y moderada. Las principales zonas con elevada vulnerabilidad son los extremos sur (Delta del Ebro) y norte (comarca del Alt Empordà), además de algunas playas en las comarcas del Baix Camp, Garraf, Barcelonés y Maresme (ver mapas en el Anejo). No existen muchas diferencias entre considerar el índice absoluto o el índice relativo (ver Figura 5.16).

Si se considera el método de la función, la situación de la costa catalana resulta más desfavorable. En el caso del índice absoluto, aunque existen todas las categorías de vulnerabilidad, hay un predominio de las clases alta y muy alta. Si se considera el índice relativo, prácticamente la totalidad de la costa presenta vulnerabilidad muy alta (ver mapas en el Anejo). En la Figura 5.17 puede verse como en la provincia de Barcelona, al considerar el índice relativo algunas zonas como el Delta del Llobregat o la Punta de la Tordera aumentan significativamente su vulnerabilidad.

CatVI-2

A continuación se presentan los resultados de aplicar a la costa catalana el segundo método de agregación de los índices de vulnerabilidad parcial. Tal y como ha sido indicado anteriormente, este segundo método consiste en calcular primero la vulnerabilidad a erosión e inundación de forma separada (*IVE* e *IVI*) y combinar después ambas vulnerabilidades en un índice de vulnerabilidad global (*IV*). Para esta última agregación se proponen tres fórmulas: media, máximo y un método cualitativo según la categoría de vulnerabilidad de los índices de erosión e inundación.

Los índices de vulnerabilidad a erosión e inundación, así como los índices de vulnerabilidad global (a excepción del cualitativo) varían de 0 a 1 y se dividen en 5 clases cualitativas de vulnerabilidad: muy baja (de 0,0 a 0,1), baja (de 0,2 a 0,3), moderada (de 0,4 a 0,5), alta (de 0,6 a 0,7) y muy alta (de 0,8 a 1,0). El índice de vulnerabilidad global cualitativo también distingue entre 5 clases de vulnerabilidad.

En la Figura 5.18 se muestra el porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para los índices de vulnerabilidad a erosión e inundación integrados. Estos índices han sido calculados asumiendo el escenario 3 de RSLR.

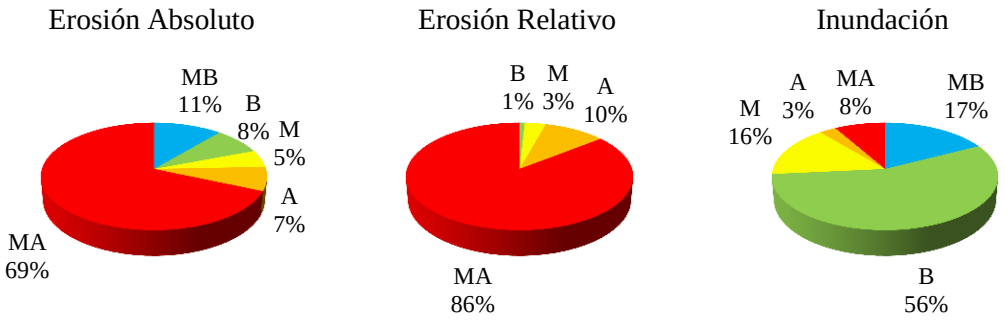

Figura 5.18. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para los índices de vulnerabilidad a erosión e inundación en CatVI-2

Tal y como se observa en esta figura, gran parte de los tramos analizados presenta vulnerabilidad muy alta al impacto de erosión, especialmente cuando se consideran los índices de vulnerabilidad parcial relativos. En cambio, en cuanto al impacto de inundación, más de la mitad de los tramos presentan vulnerabilidad baja.

En cuanto a la distribución espacial de la vulnerabilidad, en las Figuras 5.19 y 5.20 puede verse la vulnerabilidad de la costa catalana al impacto de erosión según IVE_{a3} (absoluto) e IVE_{r3} (relativo), respectivamente. En la Figura 5.21 se muestra la vulnerabilidad de la costa catalana al impacto de inundación según IVI_3.

En la Figura 5.19 observamos que la vulnerabilidad a erosión de la costa catalana según el índice absoluto es variable a lo largo de esta, presentándose valores en todas las categorías, aunque existe un predominio de playas en la clase de muy alta vulnerabilidad. Las zonas de menor vulnerabilidad se encuentran principalmente en:

- Delta del Llobregat
- Punta de la Tordera
- Desembocadura del Ter
- Golf de Roses

En la Figura 5.20 podemos ver que si consideramos el índice relativo, entonces prácticamente toda la costa presenta vulnerabilidad muy alta al impacto de erosión. Ninguna playa tiene vulnerabilidad muy baja y solamente tres playas tienen vulnerabilidad baja.

En la Figura 5.21 puede verse como la vulnerabilidad al impacto de inundación es en general mucho menor a la vulnerabilidad al impacto de erosión, ya que, en este caso, gran parte del litoral catalán presenta vulnerabilidad baja. Las principales zonas de vulnerabilidad elevada son:

- Delta del Ebro
- Delta del Llobregat
- Punta de la Tordera
- Desembocadura del Ter
- Golfo de Roses

En cuanto a la vulnerabilidad global de la costa catalana, en la Figura 5.22 se muestra el porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas en los índices de vulnerabilidad global (absoluto y relativo) utilizando la media, el máximo y el método cualitativo.

Tal y como se observa en dicha figura, cuando el índice de vulnerabilidad global se calcula como la media de los índices de vulnerabilidad a erosión e inundación (*IVE* e *IVI*), gran parte de los tramos analizados (más de la mitad) presentan vulnerabilidad alta, otros muchos tienen vulnerabilidad moderada (entorno al 25%) y relativamente pocos (5-10%) presentan vulnerabilidad muy alta.

Cuando el índice de vulnerabilidad global se calcula como el máximo, la mayor parte de los tramos analizados presenta vulnerabilidad muy alta (entre el 73 y el 90%)

Si el índice de vulnerabilidad global se calcula mediante el método cualitativo, entonces alrededor de la mitad de los tramos presenta vulnerabilidad alta y muchos otros (20-25%) tienen vulnerabilidad muy alta.

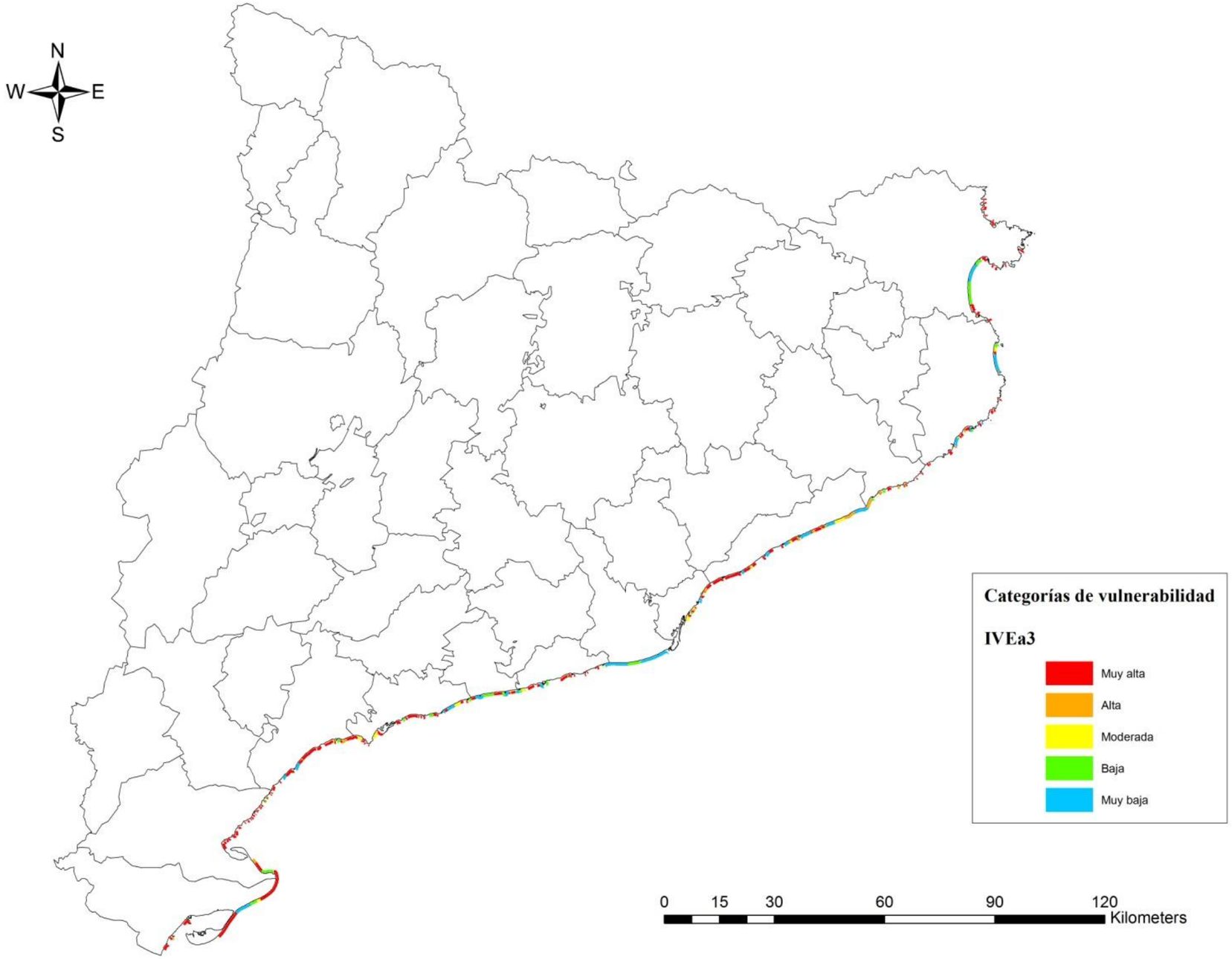

Figura 5.19. Vulnerabilidad a erosión de la costa de Cataluña según IVE_{a3} (índice de vulnerabilidad a erosión absoluto en escenario 3 de RSLR)

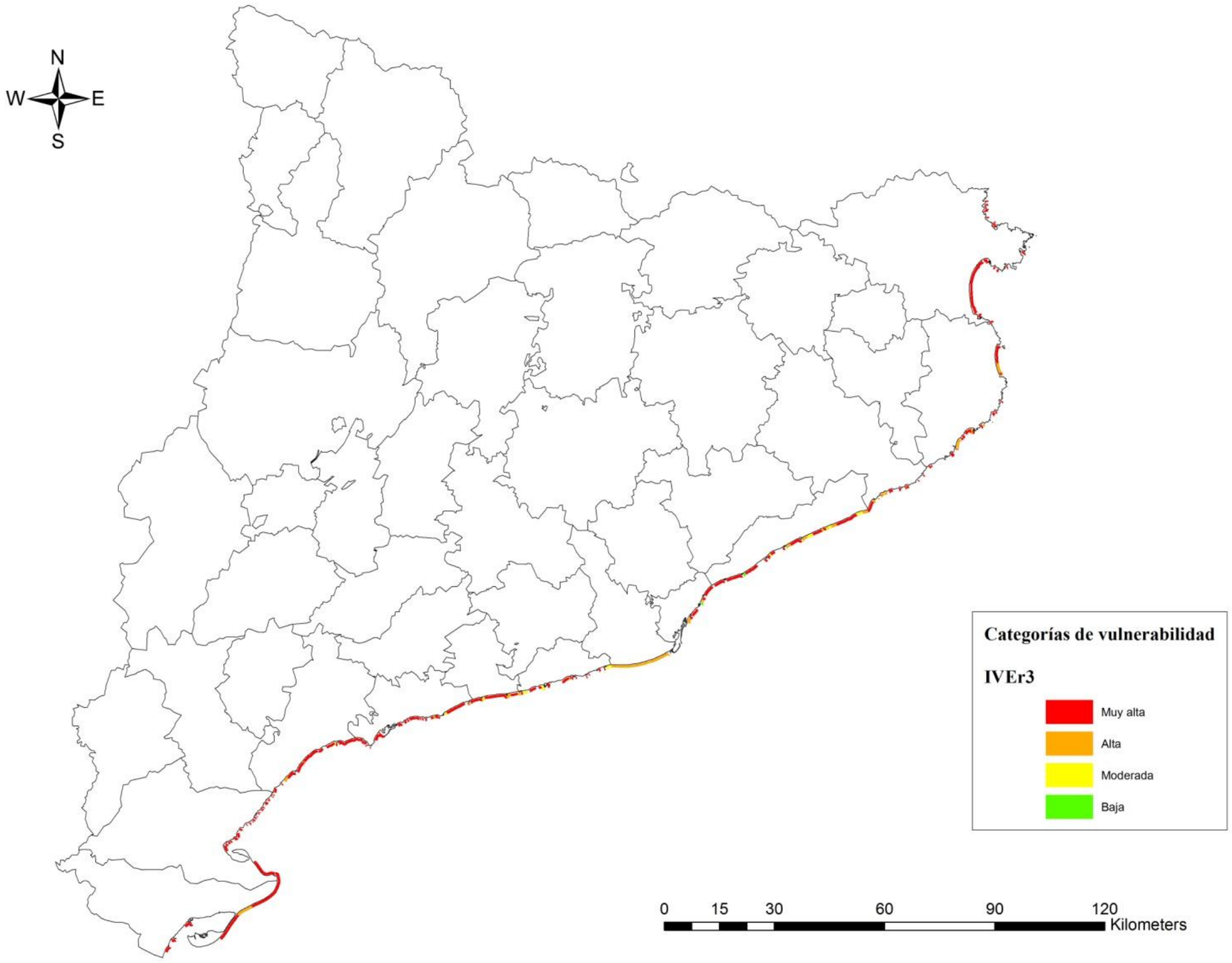

Figura 5.20. Vulnerabilidad a erosión de la costa de Cataluña según IVE_{r3} (índice de vulnerabilidad a erosión relativo en escenario 3 de RSLR)

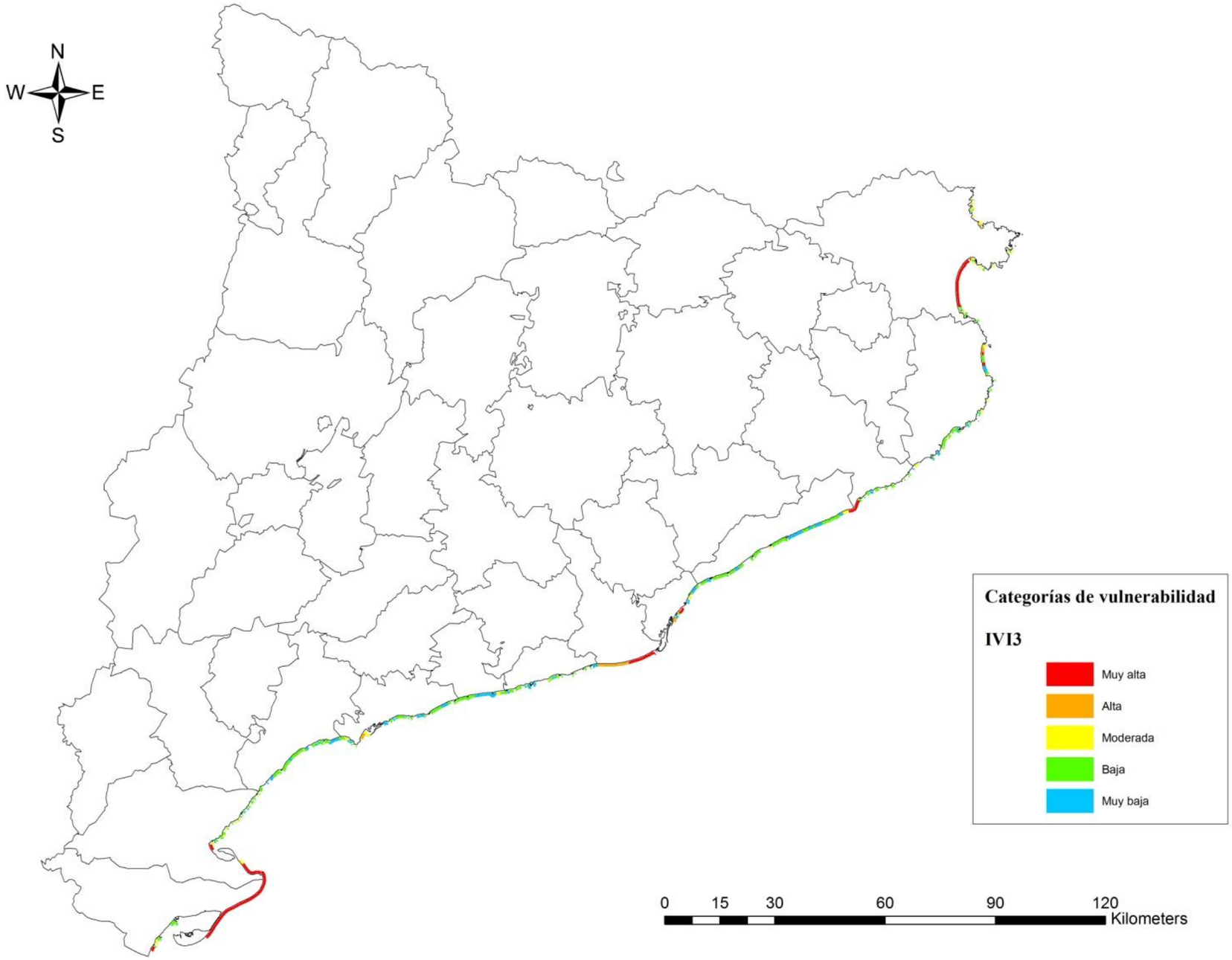

Figura 5.21. Vulnerabilidad a inundación de la costa de Cataluña según IVI_3 (índice de vulnerabilidad a inundación en escenario 3 de RSLR)

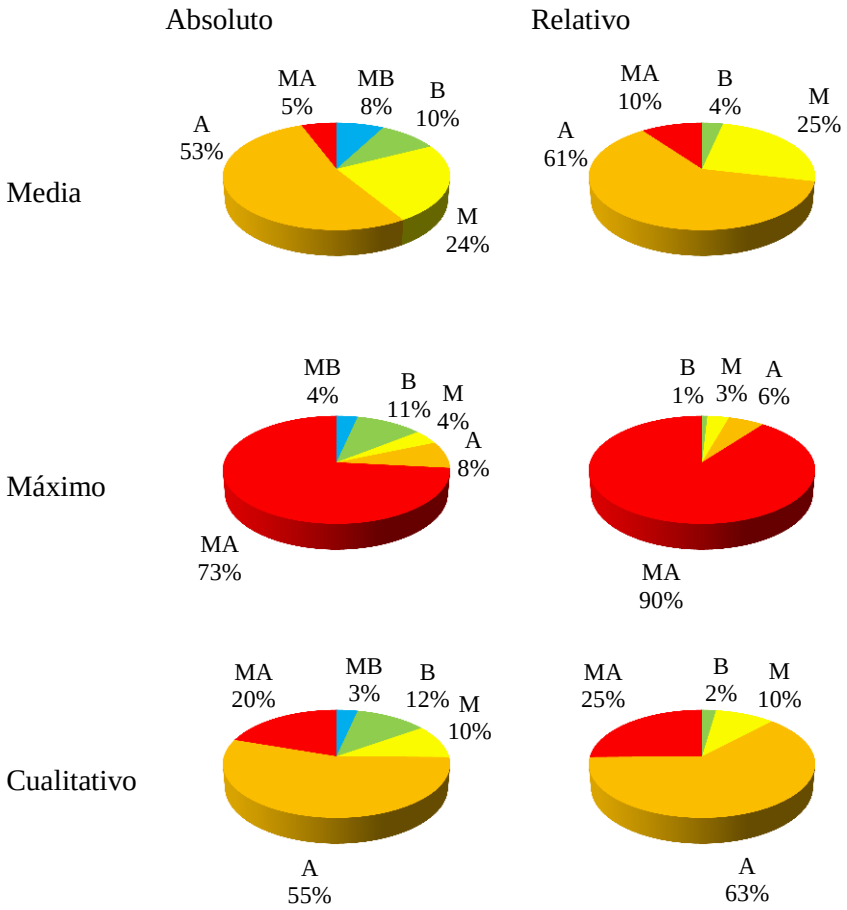

Figura 5.22. Porcentaje de tramos en cada una de las 5 categorías de vulnerabilidad consideradas para los índices de vulnerabilidad global en CatVI-2 (asumiendo escenario 3 de RSLR)

A continuación, en la Figura 5.23 se muestra la vulnerabilidad global de la costa de la provincia de Barcelona según los índices IV_{a3} (banda interior, índice absoluto) e IV_{r3} (banda exterior, índice relativo) calculados según la media. En la Figura 5.24 se representan los mismos índices calculados según el máximo.

La vulnerabilidad global de la costa catalana según los índices IV_{a3} e IV_{r3} calculados con el método cualitativo se muestra en las Figuras 5.25 y 5.26 respectivamente.

En el Anejo puede verse la vulnerabilidad global de la costa de Cataluña con los índices absoluto y relativo según los métodos de la media y el máximo, calculados asumiendo el escenario 3 de RSLR.

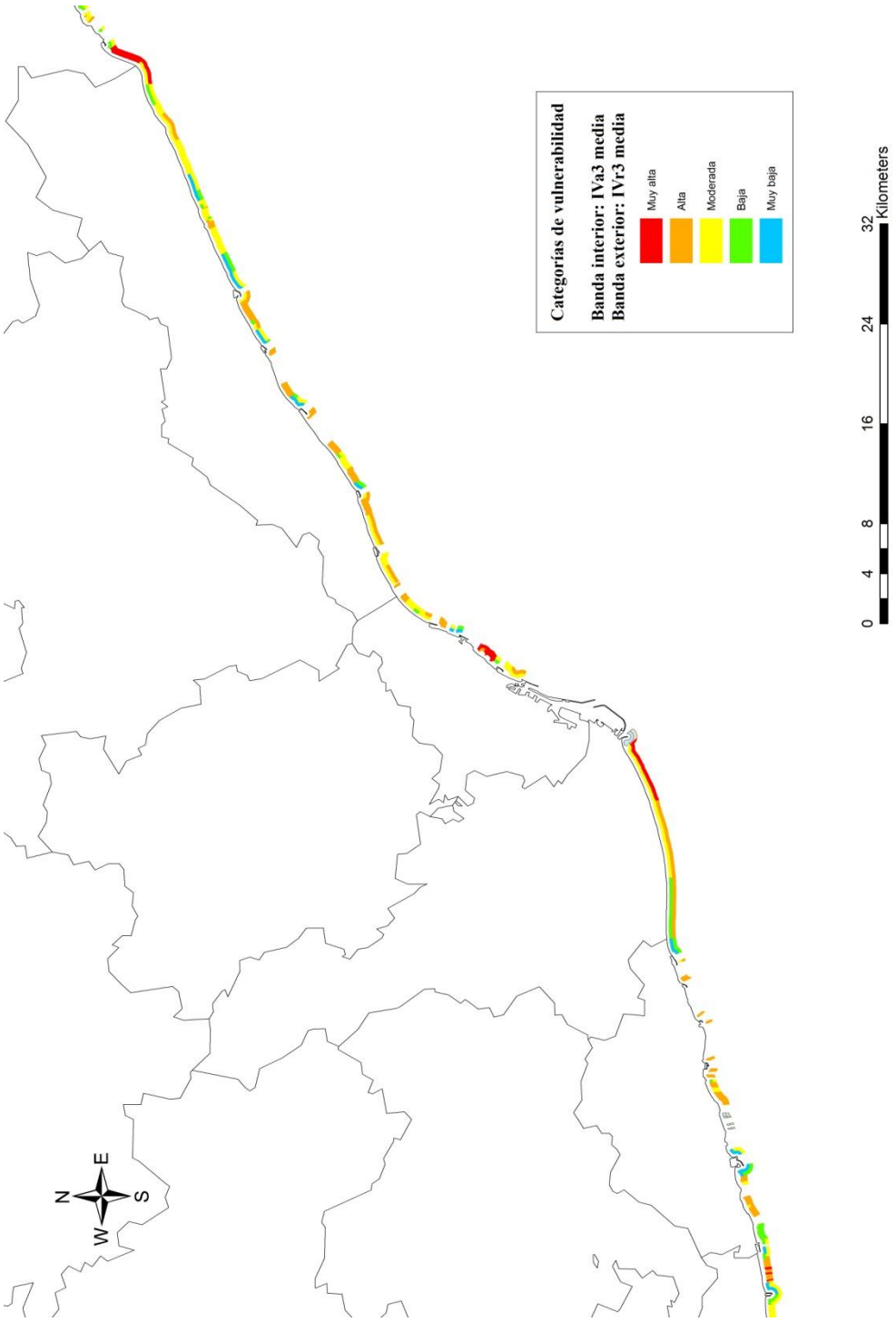

Figura 5.23. Vulnerabilidad de la costa de la provincia de Barcelona según IV_{a3} (absoluto) e IV_{r3} (relativo) utilizando la media

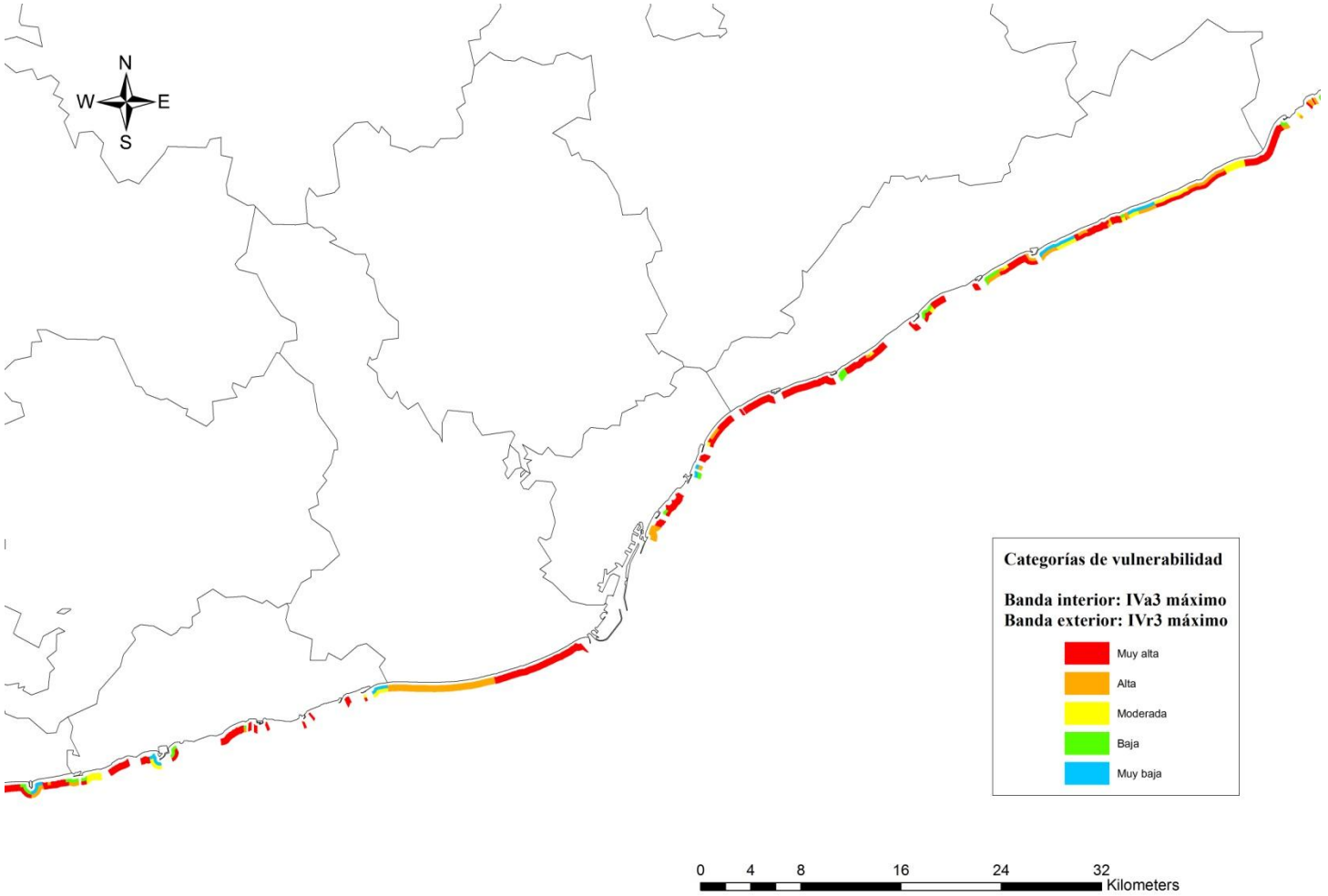

Figura 5.24. Vulnerabilidad de la costa de la provincia de Barcelona según IV_{a3} (absoluto) e IV_{r3} (relativo) utilizando el máximo

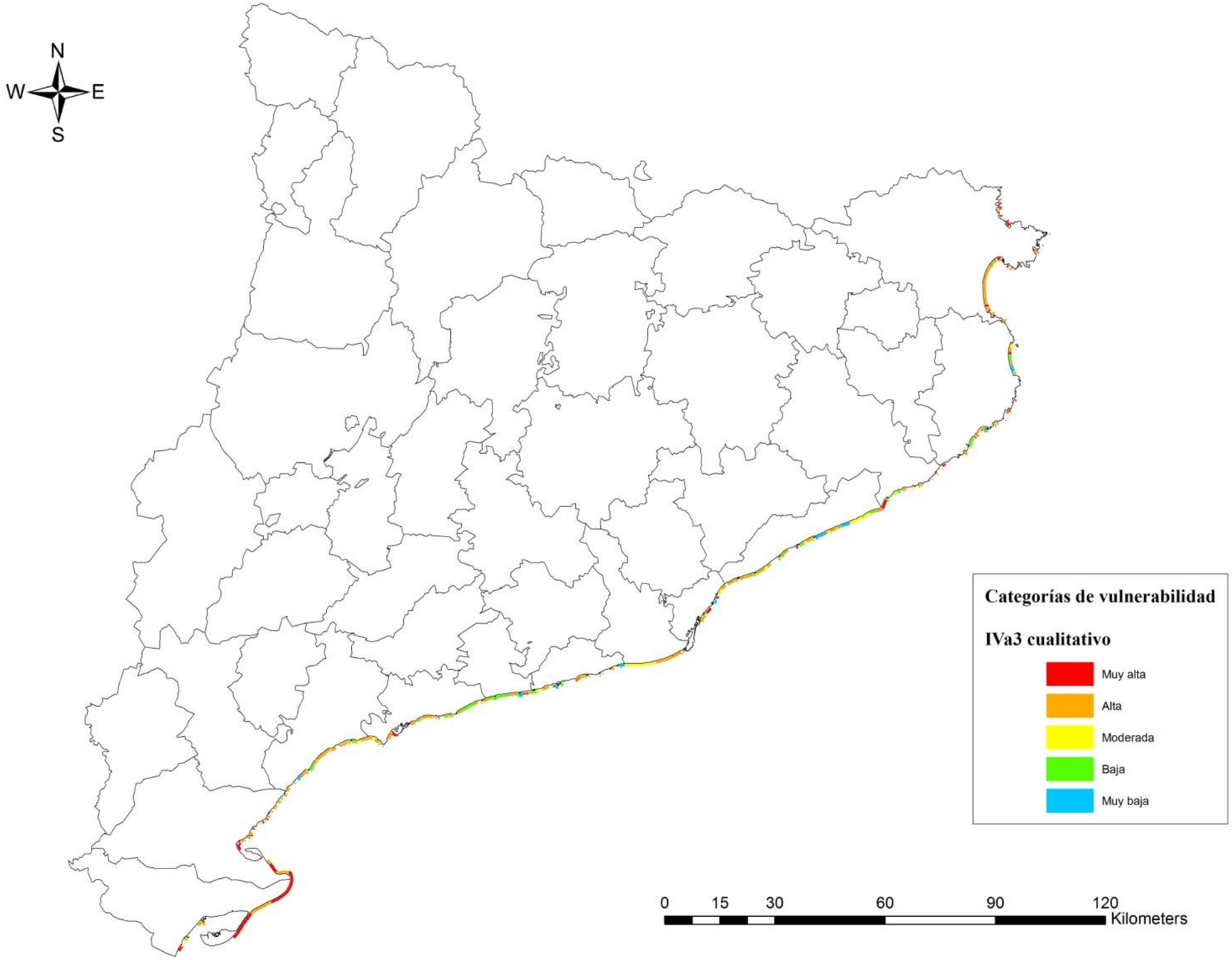

Figura 5.25. Vulnerabilidad de la costa de Cataluña según IV_{a3} (absoluto) utilizando el método cualitativo

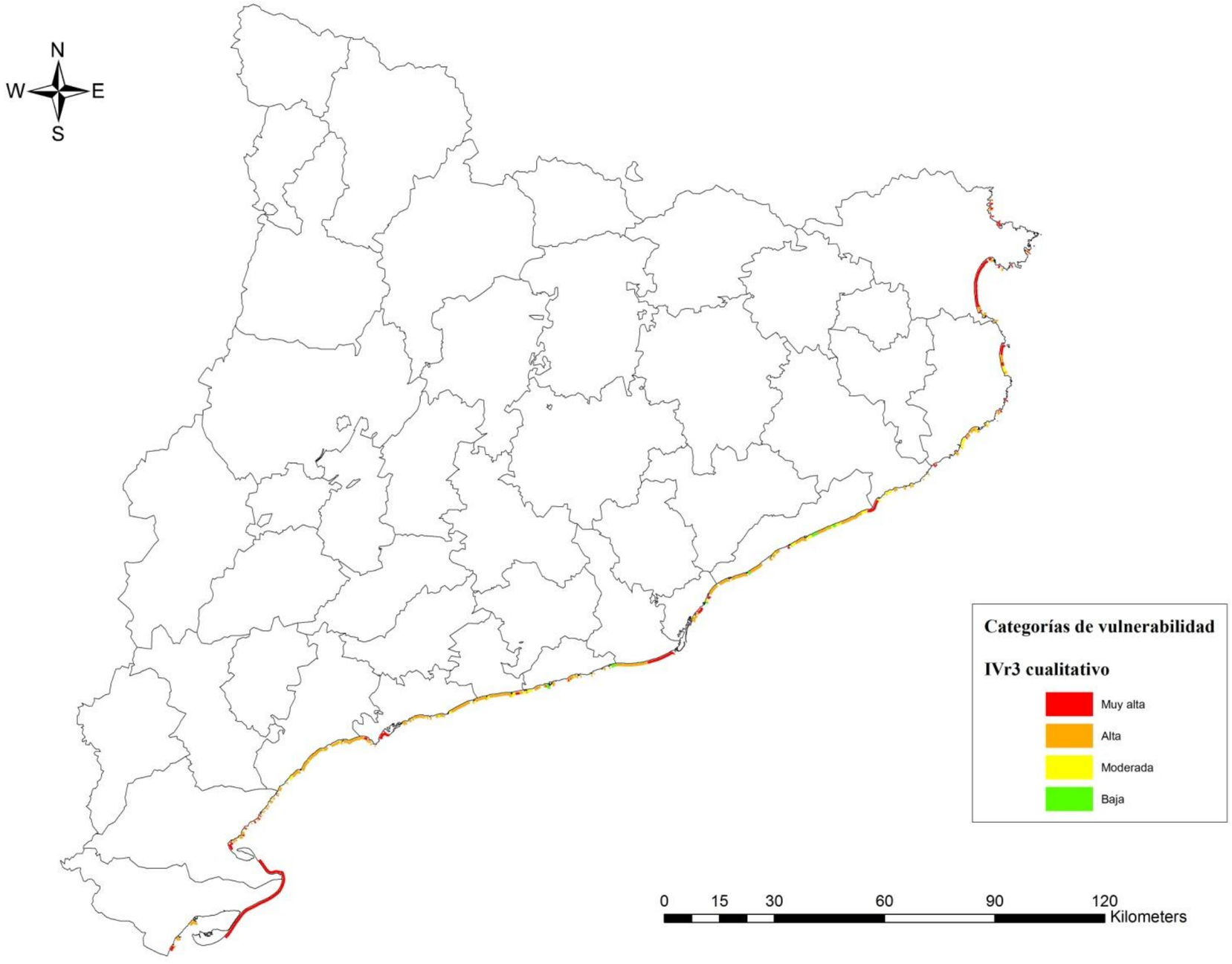

Figura 5.26. Vulnerabilidad de la costa de Cataluña según IV_{r3} (relativo) utilizando el método cualitativo

Según el índice IV_{a3} (absoluto) calculado según la media, la costa catalana presenta una gran variabilidad en su grado de vulnerabilidad, con valores en todas las categorías consideradas, aunque pocas playas presentan vulnerabilidad muy alta. La principal zona de muy alta vulnerabilidad es el Delta del Ebro (ver mapa de vulnerabilidad global de la costa de Cataluña según IV_{a3} utilizando la media en el Capítulo Anejos)

Con el IV_{r3} (relativo) calculado también con la media, la vulnerabilidad de la costa catalana no presenta tanta variabilidad y predominan las zonas de vulnerabilidad moderada-alta (ver mapa de vulnerabilidad global de la costa de Cataluña según IV_{r3} utilizando la media en el Capítulo Anejos). Las zonas de vulnerabilidad muy alta son:

- Delta del Ebro
- Algunos tramos del Delta del Llobregat
- Punta de la Tordera
- Desembocadura del Ter
- Golf de Roses

En el caso de calcular la vulnerabilidad global como el máximo de los índices de vulnerabilidad a erosión e inundación la vulnerabilidad de la costa catalana aumenta como era de esperar. Con el índice absoluto vemos que, aunque existe cierta variabilidad a lo largo de toda la costa, con tramos en todas las categorías, gran parte de la línea de orilla tiene vulnerabilidad muy alta. Con el índice relativo la situación del litoral catalán empeora todavía más, ya que prácticamente toda la longitud estudiada tiene vulnerabilidad muy alta, ningún tramo tiene vulnerabilidad muy baja y solamente tres tienen vulnerabilidad baja (ver mapas de vulnerabilidad global de la costa de Cataluña según IV_{a3} e IV_{r3} utilizando el máximo en el Capítulo Anejos).

Por último, vemos los resultados de aplicar el método cualitativo de cálculo de la vulnerabilidad global. En la Figura 5.25 vemos que con el índice absoluto la vulnerabilidad global de la costa catalana es bastante variable, con valores en todas las categorías consideradas, aunque predomina la clase de alta vulnerabilidad. Las zonas con muy alta vulnerabilidad son, principalmente:

- Delta del Ebro
- Punta de la Tordera
- Comarca del Alt Empordà

Si se evalúa la vulnerabilidad de la costa con el índice relativo (Figura 5.26) vemos que aumenta la vulnerabilidad de esta, ya que ningún tramo tiene vulnerabilidad muy baja y muy pocos (8) tienen vulnerabilidad baja. La categoría dominante continua siendo la de vulnerabilidad alta, aunque aumentan las zonas de vulnerabilidad muy alta. Esta se sitúan en:

- Delta del Ebro
- Delta del Llobregat
- Punta de la Tordera
- Desembocadura del Ter
- Comarca del Alt Empordà

CAPITULO 6
DISCUSIÓN

6.1. Coastal Vulnerability Index

El Coastal Vulnerability Index es un método que permite conocer la vulnerabilidad **relativa** de la zona costera al efecto integrado de múltiples agentes. El valor del CVI se obtiene mediante la graduación, y posterior combinación, de un conjunto de variables representativas de los diversos procesos considerados.

En su aplicación a la costa de Cataluña, se han utilizado las mismas escalas propuestas por Thieler y Hammar-Klose (2001) para el cálculo de la vulnerabilidad de la costa Atlántica y Pacífica de Estados Unidos, motivo por el cual, muchos de los factores integrantes permanecen constantes a lo largo de nuestro litoral. En el caso de la graduación para la costa Atlántica solamente la evolución costera presenta variaciones a nivel playa. Si se utiliza la graduación para la costa Pacífica es tanto la evolución costera como la pendiente costera las que presentan variaciones a nivel playa.

En las Figuras 6.1 y 6.2 pueden verse las gráficas de percentiles para el CVI calculado con las graduaciones Atlántica y Pacífica respectivamente. Observamos que, en ambas figuras, se produce un escalonamiento debido a la repetición de los valores del CVI obtenidos producido por la poca variabilidad en la vulnerabilidad asociada a los diversos factores integrantes.

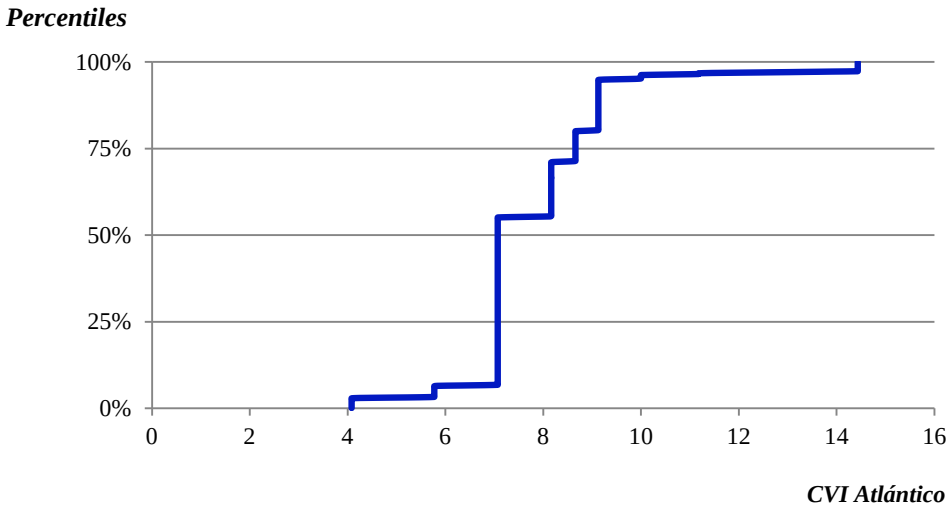

Figura 6.1. Gráfica de percentiles para el CVI calculado con la clasificación del Atlántico

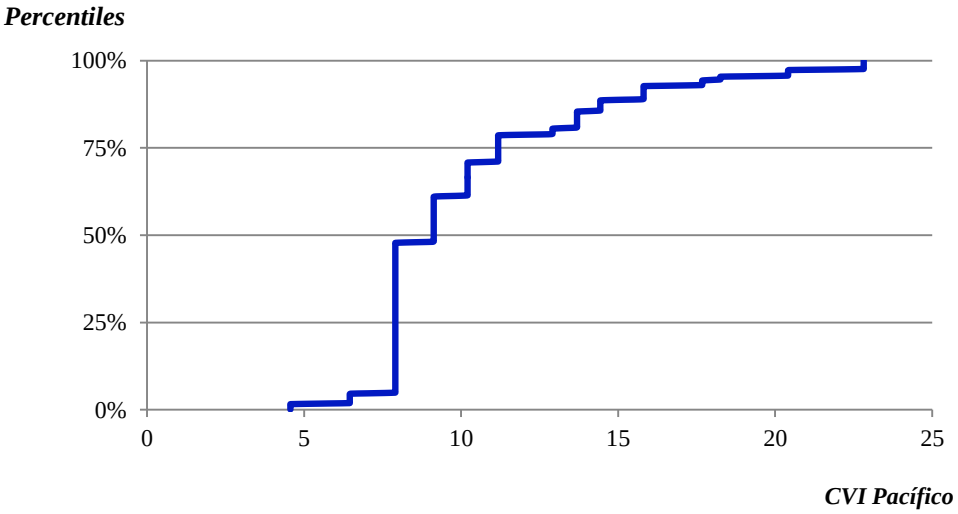

Figura 6.2. Gráfica de percentiles para el CVI calculado con la clasificación del Pacífico

En el caso de la clasificación para el Atlántico esta repetición produce que el valor asociado al percentil 25 coincida con el del percentil 50, por lo cual la categoría de vulnerabilidad moderada queda vacía. Con la graduación para el Pacífico, en cambio, el rango de valores del CVI es más amplio y se presentan las 4categorías. Sin embargo, la variabilidad continúa siendo insuficiente, ya que si las graduaciones estuviesen adaptadas a la costa catalana, cada una de las categorías debería contener aproximadamente el 25% de los tramos de análisis. En nuestro caso, en cambio, la distribución de los tramos en las diversas categorías no se realiza de forma equitativa, sino que algunas categorías contienen muchos más tramos que otras (ver Figura 5.1).

Este hecho enfatiza la necesidad de adaptar las graduaciones del CVI a la costa que se vaya a estudiar, para así representar la variabilidad de los diversos parámetros en dicha costa y poder dividirla en cuatro clases de vulnerabilidad, lo que permite la identificación de las zonas donde se precisa una actuación más inmediata.

Dado que en esta tesina la aplicación del CVI a la costa catalana solo responde a un interés de comparación respecto al método desarrollado en la misma, se asume que los resultados obtenidos utilizando la clasificación para la costa **Pacífica** (donde existen todas las categorías de vulnerabilidad) son suficientemente representativos de la vulnerabilidad relativa de la costa.

Así pues, considerando la clasificación para la costa Pacífica, vemos que el CVI destacaría aquellas zonas con una combinación de evolución costera y pendiente costera desfavorables, es decir, zonas con erosión a medio plazo y susceptibles a inundación por RSLR. Estas zonas, tal y como ha sido indicado con anterioridad, son principalmente: el Delta del Ebro, las comarcas del Tarragonès, Baix Penedès y Garraf, el Delta del Llobregat, la desembocadura del rio Tordera, el Golf de Roses y la desembocadura del rio Ter.

Cabe notar que, considerando los demás factores constantes (en nuestro caso geomorfología, marea y RSLR igual a 5 y altura de ola igual a 1), los resultados son más desfavorables cuando tanto evolución costera como pendiente costera tienen un valor moderado, que si uno de ellos es muy alto y el otro es muy bajo. De este modo, por ejemplo, cuando evolución costera tiene valor 3 y pendiente costera tiene valor 2, la clase de vulnerabilidad resultante es muy alta, mientras que si evolución costera tiene valor 5 y pendiente costera tiene valor 1, la clase de vulnerabilidad resultante es alta. Es decir, la existencia de valores muy bajos en uno de los parámetros suaviza el resultado final y, en este caso, produciría que algunas zonas con gran erosión no pertenezcan finalmente a la categoría de muy alta vulnerabilidad. Es el caso de la costa central (Barcelonès y Maresme) donde existen tramos con tasas de erosión muy elevadas (en algunos casos hasta -7m/año), pero con pendientes costeras que pertenecen a la clase de muy baja vulnerabilidad.

Por último, destacar que ninguno de los tramos en las categorías de alta y muy alta vulnerabilidad se debe a valores elevados de altura de ola, es decir, a elevada vulnerabilidad al impacto de temporales, ya que el valor de este parámetro en toda la costa catalana es muy bajo en comparación con los valores estándar de la costa Pacífica. En el caso de adaptar la graduación de este parámetro a la costa catalana podrían presentarse variaciones espaciales de vulnerabilidad al impacto de temporales y, probablemente, algunos de los tramos con elevada vulnerabilidad se deberían al impacto de este agente.

Sin embargo, así como pendiente costera y evolución costera presentan un amplio rango de variación (pendientes entre el 0,1 y el 29,4%; tasas de evolución entre +16,5 y -30,6 m/año), en el caso de altura de ola, esta es bastante parecida en los diversos sectores de oleaje considerados: 0,61m en Roses, 0,87 en Palamós, 0,69 en la Tordera, 0,74 en el Llobregat y 0,81 en el Ebre.

Por tanto, de forma similar al impacto por RSLR, podemos decir que la magnitud del agente en el caso de temporales es bastante parecida a lo largo del litoral de estudio y que la diferencia en la vulnerabilidad puede no venir determinada por dicha magnitud sino por las características del sistema, que en el caso de RSLR quedan representadas mediante la pendiente costera (que ya hemos visto que sí es variable a lo largo de la costa), pero que, para el caso de temporales, estas características no están representadas por ninguna variable.

Así pues, vemos que el método del CVI es un método demasiado robusto para ser aplicado a una escala nacional/regional ya que, principalmente, asemeja vulnerabilidad a magnitud del agente (tasa de evolución costera, subida del nivel del mar y altura de ola), que puede ser variable a una escala global pero que en escalas menores puede ser bastante homogénea.

A un nivel regional es importante tener en cuenta la influencia del sistema en la magnitud del impacto producido por cada agente. Esto en el método del CVI quedaría representado con las variables de geomorfología para erosión costera, pendiente costera para RSLR y rango mareal para temporales. Sin embargo, vemos que estas variables son insuficientes, ya que los impactos producidos por los diversos agentes dependen también de otras características costeras que el CVI no tiene en cuenta, como el tamaño de sedimento y la pendiente del estrán para el impacto de temporales, o la distinción entre pendiente sumergida y emergida para los impactos de erosión e inundación por RSLR.

Además, la vulnerabilidad de la zona costera no solo depende del impacto sino también de la capacidad de respuesta del sistema y, en este sentido, el CVI carece de representación de esta respuesta. Tal y como se verá a continuación, la situación actual del litoral catalán en cuanto al ancho de playa existente es una de las principales razones de su elevada vulnerabilidad, motivo por el cual se considera importante tener en cuenta variables como ancho de playa y altura de berma para caracterizar la respuesta del sistema y poder obtener una medida de la vulnerabilidad y no solo del impacto.

6.2. Catalan Vulnerability Index

6.2.1. Vulnerabilidad parcial

En primer lugar, y a diferencia del método del CVI, la metodología desarrollada en este trabajo nos permite conocer la vulnerabilidad de la costa a cada uno de los procesos litorales considerados. De este modo, podemos identificar cuáles son los procesos que producen mayor vulnerabilidad en un cierto tramo de costa y decidir en base a ello cuáles son las actuaciones pertinentes para reducir la vulnerabilidad en dicho tramo.

Para la evaluación de la vulnerabilidad parcial a cada uno de los procesos costeros se proponen uno o dos indicadores que modelan dicho proceso teniendo en cuenta la magnitud del agente que lo genera, las características del sistema que modulan el impacto producido y la capacidad de respuesta del sistema para hacer frente a dicho impacto. Gracias a estos indicadores, podemos evaluar la vulnerabilidad acorde con la definición considerada para este término, que no solo incluye el valor del impacto sino también la capacidad de respuesta del sistema. Esto representa una mejora respecto al método del CVI que, tal y como ha sido indicado anteriormente, centra principal atención en la valoración del impacto.

Para todos los procesos analizados se han desarrollado indicadores "absolutos", donde la vulnerabilidad a ese proceso viene determinada según el estado de la costa en el tiempo de proyección considerado. Además, para los procesos de erosión a medio y largo plazo se han desarrollado indicadores "relativos" donde la vulnerabilidad se calcula como la variación producida en la zona costera durante el tiempo de proyección considerado. Estos últimos complementan a los indicadores absolutos informándonos de la tendencia evolutiva del sistema.

Además, la vulnerabilidad a cada proceso se evalúa a una escala temporal adecuada al agente que lo produce, de modo que para el caso de erosión costera a medio plazo e impacto de temporales se considera un tiempo de proyección de 10 años, mientras que para RSLR, con una magnitud muy inferior a los otros dos agentes, se asume un tiempo de proyección de 100 años. La consideración de estos tiempos de proyección permite conocer la escala temporal en la cual se presenta la vulnerabilidad calculada, información no disponible con el método del CVI, en el cual la vulnerabilidad no tiene ningún tiempo de proyección asociado. Esto representa una ventaja a la hora de la gestión y planificación de la zona costera ya que, además de conocer el/los procesos dominantes en un determinado tramo, conocemos el tiempo en el cual los efectos de estos procesos serán notables. En cualquier caso estos tiempos siempre pueden ser modificados en función del análisis.

A continuación se discuten los resultados obtenidos para cada proceso analizado.

Erosión por RSLR

Se evalúa la vulnerabilidad a erosión a largo plazo debida a la subida relativa del nivel del mar, que produce una reducción del ancho de playa actual, disminuyendo la capacidad de carga de usuarios de las playas (uso recreativo). El impacto se mide como el retroceso en la línea de orilla y se calcula mediante la regla de Bruun (Bruun 1954) en función de la subida del nivel del mar y la pendiente sumergida de la costa. La capacidad de respuesta de la playa se mide en función del ancho medio actual de esta.

En cuanto a la magnitud del agente, las predicciones del IPCC sitúan la subida relativa del nivel del mar entre los 0,18 y 0,59m en los próximos 100 años (Meehl et al, 2007). Este valor se espera constante en todo el litoral catalán a excepción del Delta del Ebro donde, debido a la subsidencia de este, se espera una subida relativa del nivel del mar algo superior (0,0175m más en 100 años).

En cuanto al valor del impacto de erosión, este depende principalmente de la pendiente sumergida de la costa ya que, tal y como hemos visto, la subida relativa del nivel del mar es prácticamente constante a lo largo del litoral catalán. La pendiente sumergida sí presenta variabilidad a lo largo de la costa, siendo su valor medio en el litoral catalán de 2,3%, un poco inferior en las provincias de Tarragona y Barcelona, donde vale 1,8% de media, y un poco superior en Girona, donde es aproximadamente del 3,4%.

Según la regla de Bruun, el retroceso de la línea de orilla es proporcional a la subida relativa del nivel del mar y inversamente proporcional a la pendiente sumergida de la costa. Así pues, considerando RSLR constante, el retroceso de la línea de orilla será mayor en las zonas de menor pendiente sumergida, es decir Tarragona y Barcelona. Si consideramos valores medios, con una subida en el nivel del mar de 0,18m en 100 años, el retroceso en Tarragona y Barcelona sería de 10m en 100años, mientras que en Girona sería de 5.3m en 100años.

Sin embargo, la vulnerabilidad depende también de la capacidad de respuesta de las playas que, en Cataluña, tienen un ancho medio de 37m. Las playas más anchas se encuentran en la

provincia de Barcelona, donde la playa media tendría 44m (sin considerar Ca l'Arana[2]), mientras que las playas más estrechas se sitúan en Girona, con una media de 32m.

Considerando la combinación de impacto y respuesta, vemos que según valores medios y para el escenario 1 de RSLR, la provincia de Girona, pese a ser la de menor impacto, sería la provincia más vulnerable a erosión por RSLR al tener las playas más estrechas. La provincia de Barcelona sería la menos vulnerable ya que es la que tiene mayor capacidad de respuesta.

Por lo tanto, para el escenario 1 de RSLR, la vulnerabilidad de la costa a erosión viene determinada principalmente por la capacidad de respuesta de las playas que, tal y como se verá también en el impacto de erosión a medio plazo, es en general baja, motivo por el que la vulnerabilidad a este proceso es bastante elevada.

De acuerdo con los resultados obtenidos según el $IVEs_{a1}$, vemos que efectivamente las zonas de menor vulnerabilidad son las zonas de mayor ancho de playa actual, que son: Delta del Ebro, Delta del Llobregat, Punta de la Tordera, Gola del Ter, Golfo de Roses y playas a levante de puertos, especialmente en la costa del Maresme y también en las costas del Tarragonès y Baix Penedès (ver mapa en Anejo).

En los escenarios 2 y 3 de RSLR, el impacto de erosión debido a la subida relativa del nivel del mar es mayor (ya que la magnitud del agente aumenta), mientras que la capacidad de respuesta (ancho de playa) es la misma, motivo por el cual aumenta la vulnerabilidad de la costa. En el escenario de RSLR 3, escenario recomendado para la aplicación de este estudio en los planes de gestión de la zona costera, gran parte del litoral catalán presenta vulnerabilidad muy alta y las zonas de muy baja vulnerabilidad, tal y como se ha visto en el capítulo de resultados, son:

- Delta del Llobregat
- Punta de la Tordera
- Desembocadura del Ter
- Golf de Roses

[2] Esta playa del Barcelonés tiene 276 m de ancho medio, valor muy superior a los anchos de las playas de la provincia, motivo por el que se excluye del cálculo del ancho medio de las playas de la provincia.

Inundación por RSLR

El impacto se mide como la penetración tierra adentro de la lámina de agua y depende de la subida relativa del nivel del mar y la pendiente emergida de la costa. La capacidad de respuesta de la playa se mide en función del ancho medio actual de esta.

Tal y como ha sido indicado anteriormente, se espera que el nivel del mar suba entre 0,18 y 0,59m en 100 años en todo el litoral catalán, a excepción de la zona del Delta del Ebro donde la subida será algo mayor debido a subsidencia.

Ya que la subida relativa del nivel del mar es prácticamente constante a lo largo del litoral catalán, el impacto de inundación depende principalmente de la pendiente emergida de la costa. Esta pendiente es de aproximadamente el 7% de media en Cataluña, siendo un poco mayor en Girona (8,5%) e inferior en Barcelona (5,7%).

Considerando el valor medio de pendiente emergida en la costa de Cataluña y con los escenarios 1 y 3 de RSLR (0,18m en 100 años y 0,59m en 100 años, respectivamente), la penetración de la lámina de agua alcanzaría 2,6m en el primer caso y 8,4m en el segundo. Así pues, el impacto "medio" de inundación por RSLR en Cataluña es muy pequeño y prácticamente todas las playas tienen suficiente capacidad de respuesta para evitar la penetración de la lámina de agua a la parte trasera de la playa, motivo por el cual la vulnerabilidad a este proceso es en general muy baja.

Sin embargo, existen zonas del litoral muy llanas, como el Delta del Ebro (0,02%), Delta del Llobregat (0,15%), Golfo de Roses (0,16%), Gola del Ter (0,22%) y Punta de la Tordera (0,26%), entre otros, donde una subida del nivel del mar de 0,18m en 100años podría provocar una inundación de entre 70 y 900m. Aunque, en general, estas zonas son también las de mayor ancho de playa, este continua siendo insuficiente para hacer frente al gran impacto de inundación que estas zonas del litoral sufrirían. Así pues, la inundación llegaría a afectar la parte trasera de la playa, con inundaciones importantes, razón por la que estas zonas presentan muy alta vulnerabilidad.

Recordando los resultados de aplicar el *IVIs* en los diversos escenarios, vemos que efectivamente estas son las zonas de elevada vulnerabilidad, mientras que el resto del litoral presenta muy baja vulnerabilidad (ver Anejos para los mapas de *IVIs* en escenarios 1 y 2 y Figura 5.7 para *IVIs* en escenario 3).

Erosión a medio plazo

Debido a la erosión producida, el ancho de playa se reduce y existe una pérdida de capacidad de carga de usuarios (uso recreativo de la playa). El impacto viene determinado por la tasa de evolución costera y la respuesta depende del ancho actual de la playa.

Si analizamos los datos de evolución costera del litoral catalán, vemos que un 73% de los tramos considerados presentan erosión (tasa de evolución costera menor o igual a -0,10 m/año), de los cuales un 37% tiene tasas de erosión mayor a -1,0 m/año. En la provincia de Girona la tasa de erosión media se sitúa alrededor de -0,8 m/año, mientras que en las provincias de Tarragona y Barcelona es de aproximadamente -2 m/año. Las zonas con mayor erosión se encuentran en el Delta del Ebro (con valores de -20 y -30 m/año) y en algunos tramos de la costa del Barcelonès y el Maresme (con valores de -4 a -7 m/año).

En cuanto a acreción, en las provincias de Tarragona y Barcelona el porcentaje de tramos en acreción es de aproximadamente el 20% y en Girona se reduce al 6%. Además las tasas de acreción son bastante pequeñas en Girona (0.25 m/año aprox.) y moderadas en Tarragona (1m/año). La provincia de Barcelona es la que presenta mayores tasas de acreción, con una media de 2.5 m/año, pero con valores entre 5 y 15m/año en algunos tramos.

Por lo tanto, podemos concluir que la costa catalana es una costa erosiva, con tasas de erosión altas y muy altas en algunas zonas como el Delta del Ebro y las comarcas del Barcelonès y el Maresme. Estas comarcas son además las zonas donde se presentan mayores tasas de acreción, lo que, tal y como señalan Jiménez et al (2011), se debe a la combinación de numerosos puertos barrera con un transporte de sedimentos hacia el suroeste. Esta combinación produce un gran avance de la línea de costa a levante de los puertos y un gran retroceso (a veces incluso la desaparición) de la playa a poniente.

En cuanto a la capacidad de respuesta de la costa catalana a este impacto, tal y como hemos visto anteriormente, la playa media de Cataluña tiene un acho medio de 37m, siendo mayor en la provincia de Barcelona (44m) y menor en la provincia de Girona (32m). Además, el 40% de las playas tienen en la actualidad un ancho medio inferior o igual a 26m, valor que define la categoría de alta vulnerabilidad en el índice de vulnerabilidad a erosión a medio plazo absoluto ($IVEm_a$).

Por lo tanto, la capacidad de respuesta de las playas de Cataluña es bastante limitada, ya que la mayor parte de las playas no superan el ancho mínimo necesario para cumplir la función

recreativa (30-40 m) y algunas de ellas tienen anchos inferiores a este valor, razón por la cual presentarían problemas actualmente.

Así pues, la conjunción de un litoral principalmente erosivo con anchos de playa no muy grandes explica que la vulnerabilidad a este agente sea en general alta, tal y como hemos visto en el capítulo de resultados.

Las zonas de mayor vulnerabilidad según el $IVEm_a$ serían: el Delta del Ebro y las comarcas del Barcelonès y Maresme, donde, como ya ha sido indicado, la erosión es muy elevada; y el Cap de Creus, donde se hallan las playas más estrechas.

En el caso del índice relativo ($IVEm_r$) las clases de vulnerabilidad predominantes son de moderada a muy alta vulnerabilidad ya que la gran parte del litoral catalán se encuentra en erosión. Muy pocas playas presentan acreción y estas, tal y como ha sido indicado, se encuentran principalmente en las provincias de Tarragona y Barcelona.

Erosión por temporales

La erosión inducida por el impacto de temporales produce una pérdida episódica del ancho de playa, aumentando la exposición de la parte trasera de la playa a los efectos del oleaje. El impacto se mide como el retroceso de la línea de orilla debido al impacto del temporal y depende tanto de características del temporal, tales como altura de ola, periodo de ola y duración del temporal; como de características del sistema, tales como tamaño de sedimento y pendiente del estrán. La capacidad de respuesta se mide según el ancho de playa medio actual.

Dado un mismo tipo de playa, se observa que los mayores volúmenes de sedimento erosionable (con temporal de periodo de retorno de 25 años) se producen en los sectores de Roses y Palamós, mientras que en los sectores de la Tordera y el Llobregat el volumen de sedimento erosionable es menor. Para un mismo sector costero, vemos que las playas de sedimento más fino (tipos I y II) presentan más erosión que las playas de sedimento más grueso (tipos IV, V y VI).

En el caso de Cataluña, el sedimento medio de las playas del litoral catalán tiene un tamaño de 0,7mm (playa tipo III), siendo un poco más grueso en Girona, donde de media tendría un tamaño de 1mm (playa tipo IV) y más fino en Tarragona, donde tiene un tamaño de 0,4mm de media (playa tipo II).

En cuanto a la capacidad de respuesta de las playas de Cataluña, se recuerda que el ancho medio de playa del litoral catalán es de 37m, siendo un poco superior en Barcelona (44m) y un poco inferior en Girona (32m).

Los resultados obtenidos para el *IVEt* muestran que las zonas de mayor vulnerabilidad se sitúan en:

- zona sur de Tarragona: aquí se encuentran playas con poca capacidad de respuesta ya que disponen de anchos medios relativamente pequeños .Se excluye el Delta del Ebro donde los anchos de playa son elevados y la erosión no es tan acusada.
- el sector de Roses: el tamaño de sedimento es variado, aunque predominan las playas de tipo V (entre 1,3 y 1,6mm). Este tipo de playas son principalmente reflejantes, aunque debido al sector costero donde nos encontramos los volúmenes de erosión son elevados. Además esta es la zona con playas más estrechas.
- finalmente, aparecen algunas zonas de elevada vulnerabilidad en algunos tramos de las comarcas del Garraf y el Maresme, donde la elevada vulnerabilidad se debe probablemente a playas estrechas (playas a poniente de puertos).

Inundación por temporales

El impacto de inundación por temporales se mide como el remonte inducido por éste y depende tanto de características del temporal, tales como altura de ola, longitud de ola y periodo; como de características del sistema costero, tales como tamaño del sedimento, pendiente de la playa. La capacidad de respuesta se mide como la altura de berma máxima de la playa.

Para un mismo tipo de playa, el remonte inducido por el temporal (de periodo de retorno 25 años) es mayor en Roses y Tordera y menor en el sector del Ebre y el Llobregat. En un mismo sector costero observamos que el remonte es mayor en las playas con tamaño de sedimento más grueso (especialmente tipo IV) y menor en las playas de sedimento más fino (playas tipo I).

En cuanto a la respuesta del sistema, la altura de berma media de las playas del litoral catalán se sitúa alrededor de 1,8m, menor en la provincia de Tarragona, donde tendría 1,5m de media, y mayor en las provincias de Barcelona y Girona, donde sería de unos 2,2m de altura.

Tal y como se ha descrito en el capítulo de resultados, la vulnerabilidad de la costa a este agente resulta en general baja y moderada, exceptuando:

- el sector del Ebro: aunque en esta zona hay un predominio de playas de sedimento fino (tipo I), que son las playas más disipativas, esta zona presenta tramos con alta y muy alta vulnerabilidad a este proceso debido principalmente a bermas bajas.
- el sector de Roses: numerosos tramos presentan alta y muy alta vulnerabilidad ya que en esta zona hay un predominio de playas con sedimento grueso (tipo V) que son las más reflejantes y las que presentan un mayor remonte. Además, este es el sector costero donde el remonte inducido por el temporal es mayor.

6.2.2. Vulnerabilidad global

CatVI-1

El indicador de vulnerabilidad desarrollado integra los índices de vulnerabilidad parcial a todos los procesos costeros considerados además de dos factores que incorporan el efecto de marea y geomorfología. Una vez obtenido el valor del indicador, se definen dos métodos de asignación de la vulnerabilidad: método de los cuartiles y método de la función.

Con el **método de los cuartiles**, las clases de vulnerabilidad se definen a partir de los cuartiles de la serie. Se trata pues de un método de cálculo de la vulnerabilidad relativa de la costa, ya que la clase de vulnerabilidad de cada tramo depende de los valores obtenidos en la propia costa de análisis. De este modo, por ejemplo, al considerar escenarios de RSLR más desfavorables, la vulnerabilidad global de la costa no aumenta, sino que los tramos se reclasifican de manera que, para cada escenario, el índice de vulnerabilidad desarrollado destaca el cuarto de tramos con mayor vulnerabilidad.

En el caso de la costa catalana, los resultados obtenidos considerando los distintos escenarios de RSLR e índices parciales desarrollados (absolutos y relativos), son bastante parecidos. Tal y como se ha indicado en el capítulo de resultados, las zonas de elevada vulnerabilidad se encontrarían en el Delta del Ebro y las comarcas del Baix Camp, Garraf, Barcelonès, Maresme y Alt Empordà. Estas zonas presentan vulnerabilidad alta y muy alta a muchos de los procesos litorales estudiados, especialmente los de erosión, aunque también los sectores del Ebro y Roses tienen alta vulnerabilidad a inundación por temporales.

En la Figura 6.3 donde se comparan los resultados obtenidos con el método de los cuartiles y el método del CVI, que también evalúa la vulnerabilidad relativa de la costa, vemos que no existe correlación numérica ni tampoco cualitativa (por clases de vulnerabilidad) entre ambos, ya que,

por ejemplo, los tramos con muy alta vulnerabilidad en el CVI presentan vulnerabilidades en todas las categorías del método propuesto.

En la misma figura podemos ver nuevamente la repetición en los valores del CVI obtenidos debido a la utilización de escalas no adaptadas al litoral catalán. En el caso del método desarrollado en esta tesina, en cambio, los resultados del índice de vulnerabilidad son muy heterogéneos, representando mejor la variabilidad de la costa catalana.

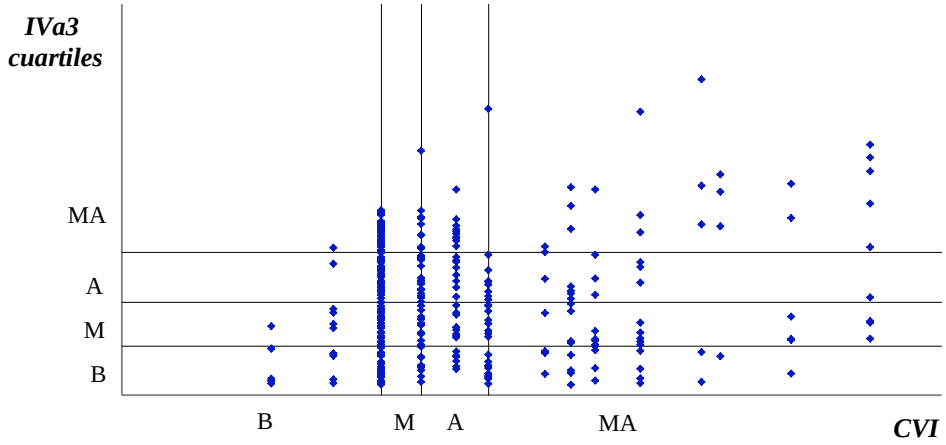

Figura 6.3. Gráfico comparativo de la vulnerabilidad relativa de la costa catalana con el CVI (clasificación del Pacífico) y el IV_{a3} calculado mediante el método de los cuartiles

En la figura 6.4 se muestra la gráfica de percentiles para el índice de vulnerabilidad *IVa3* usando el método de los cuartiles. La gráfica obtenida presenta variación lineal lo que nos indica la distribución más o menos uniforme a lo largo de todo el rango de variación. Su forma difiere de las obtenidas para el CVI (Figuras 6.1 y 6.2) en las que se produce un escalonamiento.

Si utilizamos el **método de la función**, el porcentaje de tramos en cada categoría de vulnerabilidad es variable, ya que no se evalúa la vulnerabilidad relativa de la costa sino la vulnerabilidad absoluta de esta y, por tanto, las clases de vulnerabilidad no se definen a partir de los valores obtenidos en la propia costa, sino que estas clases están prefijadas y son "universales". Con este índice, a diferencia del elaborado mediante los cuartiles, al considerar escenarios de RSLR más desfavorables, la vulnerabilidad global de la costa aumenta, es decir, no hay una reclasificación de los tramos, sino que existen más tramos con vulnerabilidad muy alta.

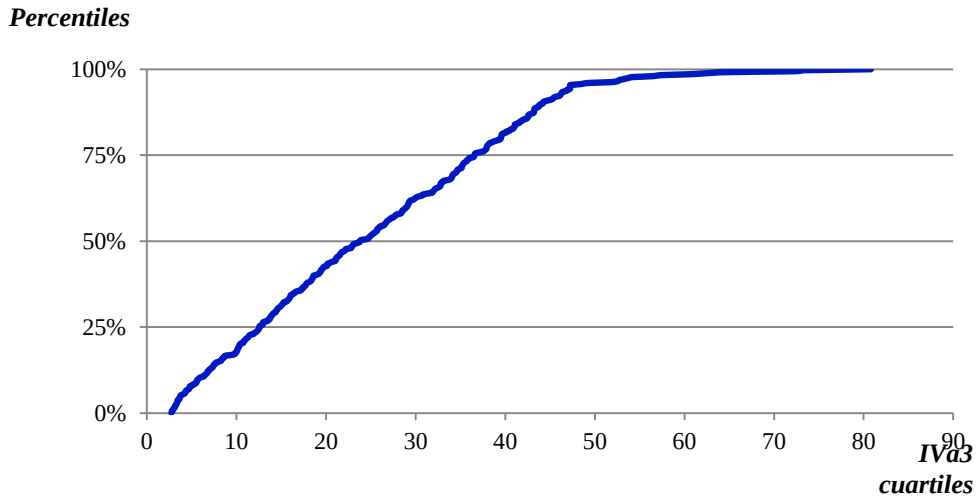

Figura 6.4 Gráfica de percentiles para el índice IVa3 obtenido con el método de los cuartiles

En la Figura 6.5 se representan los resultados de vulnerabilidad de la costa catalana obtenidos según el índice IV_{a3} mediante el método de los cuartiles y el método de la función. La gráfica obtenida se corresponde con la función de vulnerabilidad desarrollada para este segundo método, ya que el valor del índice de vulnerabilidad por cuartiles coincide con el valor del indicador de vulnerabilidad.

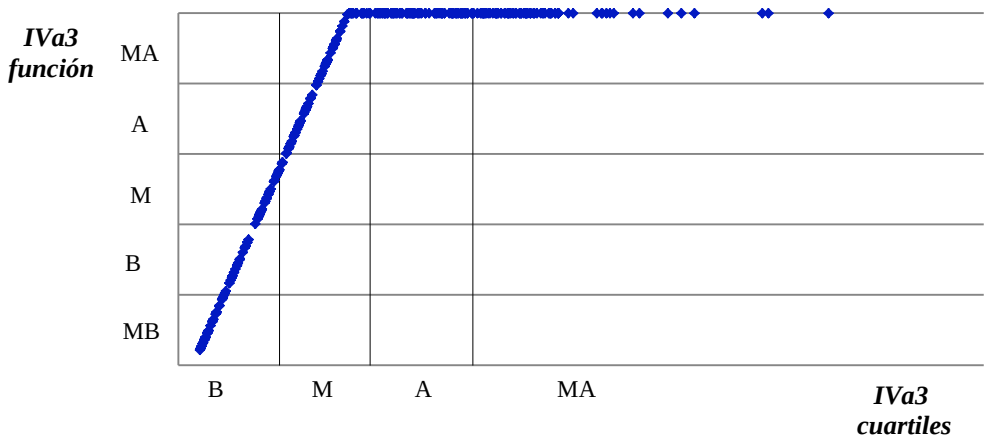

Figura 6.5. Gráfico comparativo de la vulnerabilidad de la costa catalana según el IV_{a3} con el método de los cuartiles y el método de la función

Tal y como vemos en dicha figura, la vulnerabilidad obtenida con el método de la función es mayor a la obtenida con el método de los cuartiles, ya que todos los tramos presentan una categoría de vulnerabilidad con el método de la función igual o superior a la categoría obtenida

con el método de los cuartiles. Así, por ejemplo, todos los tramos con vulnerabilidad alta y muy alta en el método de los cuartiles, y también muchos con vulnerabilidad moderada, pasan a tener vulnerabilidad muy alta con el método de la función.

Por lo tanto vemos que, debido a la elevada vulnerabilidad de la costa catalana a los diversos procesos litorales considerados, la vulnerabilidad global de la costa de Cataluña calculada con el método de la función (que evalúa la vulnerabilidad absoluta) es elevada. Sin embargo, si consideramos el método de los cuartiles (que evalúa la vulnerabilidad relativa), este hecho no queda reflejado, ya que este método solamente destaca las zonas de mayor vulnerabilidad dentro de la zona costera de estudio, lo que en este caso, podría conducir a una infravaloración de la vulnerabilidad.

Con el índice IV_{a3} calculado mediante el método de la función, vemos que la vulnerabilidad de la costa catalana es muy baja o baja solamente cuando tres o cuatro de los índices parciales se mantienen bajos o muy bajos. Esto sucede, por ejemplo, en algunas playas muy anchas, donde la vulnerabilidad a erosión a medio plazo, RSLR y temporales se mantiene baja. Por este motivo, muchos de los tramos con baja vulnerabilidad global son aquellos situados a levante de puertos, especialmente numerosos en las comarcas del Baix Penedès y el Maresme. También en el Delta del Llobregat, donde el único proceso importante es el de inundación por RSLR y en algunos tramos del Delta del Ebro, Punta de la Tordera y Gola del Ter, la vulnerabilidad es baja.

Si se considera el índice IV_{r3} también calculado con el método de la función, los resultados son mucho más desfavorables, ya que prácticamente toda la costa presenta vulnerabilidad muy alta. Esto se debe a que, con este índice, la vulnerabilidad a erosión a medio plazo y RSLR es mayor, ya que gran parte de la costa presenta erosión a medio plazo y toda la costa presenta erosión a largo plazo.

CatVI-2

En este segundo método, no todos los índices de vulnerabilidad parcial se integran en el mismo indicador, sino que se obtienen dos indicadores distintos para evaluar de forma separada la vulnerabilidad a erosión e inundación de la zona costera. Una vez se obtienen los índices de vulnerabilidad a erosión e inundación (*IVE* e *IVI*), estos son combinados para obtener el índice de vulnerabilidad global (*IV*). Esta última agregación se realiza mediante tres fórmulas: media, máximo y método cualitativo.

En cuanto al índice de vulnerabilidad a **erosión**, los resultados obtenidos en la costa catalana muestran, en general, una elevada vulnerabilidad a este impacto. Este resultado es consistente con los resultados obtenidos para los diversos índices de vulnerabilidad parcial a erosión, en los que se obtenían elevados valores de vulnerabilidad.

En el caso del índice de vulnerabilidad a erosión relativo (IVE_r), prácticamente la totalidad de la costa catalana presenta muy alta vulnerabilidad, ya que la vulnerabilidad a erosión a medio y largo plazo según los índices parciales relativos es muy alta, puesto que toda o casi toda la costa está en erosión por estos agentes.

Con el índice de vulnerabilidad a erosión absoluto (IVE_a), la vulnerabilidad a erosión a medio y largo plazo, aunque elevada, es más variable y las zonas con menor IVE_a son, en general, playas anchas donde los tres índices se mantienen bajos (playas a levante de puertos, Delta del Llobregat, Gola del Ter y Golf de Roses).

En cuanto a la vulnerabilidad a **inundación** de la costa catalana, vemos que esta es muy inferior a la vulnerabilidad a erosión, pues en este caso la vulnerabilidad se mantiene baja en gran parte del litoral. Este resultado es consistente con los valores de baja vulnerabilidad obtenidos para el impacto de inundación por RSLR y los valores moderados para la inundación por temporales.

Las zonas de muy alta vulnerabilidad a inundación son aquellas con vulnerabilidad muy alta a inundación por RSLR, es decir, las zonas muy llanas como el Delta del Ebro, Delta del Llobregat, Punta de la Tordera, Gola del Ter y Golfo de Roses.

En cuanto a la vulnerabilidad global de la costa de Cataluña, vemos que los resultados obtenidos al calcular el índice de vulnerabilidad como la **media** de los índices a erosión e inundación son en general moderados. Este método produce resultados "suavizados" ya que, si por ejemplo, el índice de vulnerabilidad a erosión es muy alto mientras que el índice de vulnerabilidad a inundación es bajo, el índice de vulnerabilidad global obtenido es moderado-alto. Este es el caso general de la costa catalana, en la que ya hemos visto que la vulnerabilidad a erosión es muy alta, mientras que la vulnerabilidad a inundación es baja.

Utilizando esta fórmula de agregación, la vulnerabilidad de un tramo resulta muy alta solo si los dos índices son muy altos o bien si uno de ellos es alto y el otro muy alto. Es decir, solamente tienen muy alta vulnerabilidad aquellos tramos que presentan muy alta vulnerabilidad a uno de los impactos y alta o muy alta vulnerabilidad al otro impacto. Cuando una de las

vulnerabilidades cae en la zona baja o moderada de la clasificación, la vulnerabilidad global deja de ser muy alta.

Con este método la principal zona con vulnerabilidad muy alta es el Delta del Ebro. También la punta de la Tordera tiene vulnerabilidad muy alta, y las comarcas del Baix Camp, la Selva y el Alt Empordà presentan vulnerabilidad alta.

Si para el cálculo de la vulnerabilidad global de la costa catalana utilizamos el **máximo** de los índices de erosión e inundación calculados, vemos que los resultados obtenidos son muy desfavorables, ya que prácticamente toda la costa tiene vulnerabilidad muy alta a erosión y, por tanto, casi toda la costa tiene vulnerabilidad muy alta con esta fórmula de agregación.

En este caso, las zonas de baja vulnerabilidad son aquellas que presentan baja vulnerabilidad a ambos impactos, motivo por el cual estas zonas son muy reducidas y se identifican, principalmente, con tramos a levante de puertos, sobre todo en las comarcas del Baix Penedès y el Maresme.

Finalmente, si la clase de vulnerabilidad global se define de forma **cualitativa** según las clases de vulnerabilidad de los índices a erosión e inundación, la costa catalana presenta vulnerabilidad alta. Este hecho se debe a que la clase de vulnerabilidad a erosión predominante en el litoral catalán es muy alta mientras que la clase de vulnerabilidad a inundación predominante es baja, combinación definida en este método como vulnerabilidad alta (ver Figura 3.15).

Los tramos que presentan vulnerabilidad global muy alta con este método son aquellos que tienen vulnerabilidad muy alta a uno de los impactos y entre moderada y muy alta vulnerabilidad al otro impacto. En el caso de Cataluña, y para el índice absoluto, estas zonas son el Delta del Ebro, la punta de la Tordera y la comarca del Alt Empordà (ver Figura 5.25).

Si consideramos el índice relativo, entonces se reduce la variabilidad espacial de la vulnerabilidad (desparece la clase muy baja) y aparecen más zonas con vulnerabilidad muy alta. Estas se encontrarían en: Delta del Ebre, Delta del Llobregat, Punta de la Tordera, Gola del Ter, Golf de Roses y Cap de Creus.

En la Figura 6.6 se comparan los resultados obtenidos con el método cualitativo respecto al método de la media (azul) y respecto al método del máximo (rojo). El tamaño de la burbuja es proporcional al número de tramos perteneciente a esa combinación de categorías de vulnerabilidad.

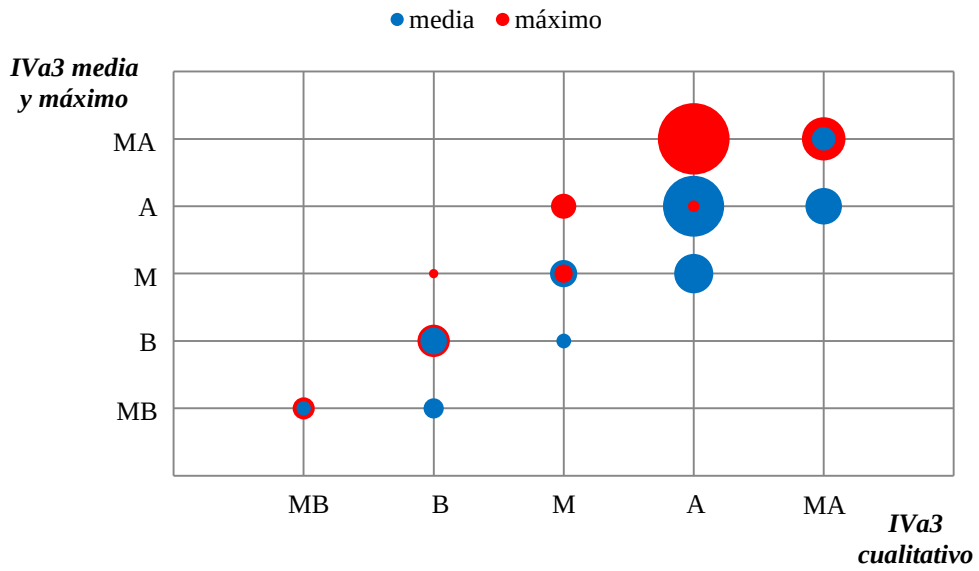

Figura 6.6. Gráfico comparativo del número de tramos (tamaño de las burbujas) perteneciente a cada una de las clases de vulnerabilidad para el índice IV_{a3} cualitativo respecto los índices IV_{a3} media (azul) y IV_{a3} máximo (rojo)

En dicha figura se observa que el método cualitativo constituye un método intermedio a los otros dos, de forma que, en algunos tramos, este método aumenta la vulnerabilidad calculada con la media y/o disminuye la vulnerabilidad calculada con el máximo. En todos los casos la modificación en la clase de vulnerabilidad respecto al método de la media o el máximo se produce en un solo nivel.

Comparativamente con el método del máximo, el cálculo de la vulnerabilidad mediante el método cualitativo permite, principalmente, reducir el número de tramos en la categoría de mayor vulnerabilidad, facilitando así la detección y priorización de las zonas más vulnerables.

Al mismo tiempo, el método cualitativo aumenta respecto al método de la media, el número de tramos contenidos en la categoría de mayor vulnerabilidad, resultando en una forma de cálculo no tan "restrictiva" y que permite detectar más áreas que solamente aquellas que son muy vulnerables a todos los impactos.

CAPÍTULO 7
RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la vulnerabilidad física de la costa catalana al efecto integrado de múltiples agentes mediante una nueva metodología propuesta y desarrollada en esta tesina. Los agentes o procesos litorales considerados son: erosión a medio plazo, erosión e inundación debido al impacto de temporales y erosión e inundación debido a la subida del nivel del mar. Esta nueva metodología ha sido formulada en base a las características de la costa mediterránea pero puede ser fácilmente aplicada en otras zonas costeras. Además, tal y como se describe a continuación, presenta múltiples ventajas frente a otros métodos de cálculo de la vulnerabilidad costera utilizados actualmente.

En primer lugar, el método desarrollado permite evaluar y comparar con robustez la vulnerabilidad costera a nivel nacional y regional, a la vez que incorpora el mayor conocimiento disponible de los procesos costeros a esta escala.

La vulnerabilidad de la zona costera se calcula como combinación de la vulnerabilidad a los diversos procesos costeros considerados en el análisis, asumiendo que los diversos procesos pueden ser aislados y analizados de forma separada. La "discretización" en el cálculo de la vulnerabilidad permite:

- mejorar la aplicación del término vulnerabilidad: cada proceso se reproduce de forma simplificada mediante un indicador que incluye tanto el impacto producido en el sistema como la capacidad de respuesta de éste
- definir tiempos de proyección adecuados al agente inductor del impacto: la magnitud de los diversos agentes es considerablemente diferente, por lo que, gracias al análisis individualizado de los procesos costeros, pueden aplicarse tiempos de proyección acordes con la magnitud de cada uno de los agentes inductores
- conocer la vulnerabilidad a cada proceso en el tiempo de proyección considerado: permite identificar los procesos que producen mayor vulnerabilidad en un cierto tramo de costa y la escala temporal en la que el efecto de esta vulnerabilidad será notable
- decidir sobre las actuaciones a realizar: cada proceso analizado genera un daño distinto a una escala temporal distinta en la zona costera. Conociendo los procesos dominantes en una tramo de costa, pueden escogerse las mejores opciones de protección/ mitigación/adaptación para ese daño

En el cálculo de la vulnerabilidad parcial a cada proceso, los gestores costeros juegan un papel muy importante, ya que estos pueden decidir sobre los tiempos de proyección a aplicar en cada proceso, el escenario de RSLR que se asume en el estudio o la probabilidad de ocurrencia del temporal a considerar. Además, son los que definen las funciones del litoral y, por tanto, la cantidad de recurso necesario en cada caso, lo que determina las leyes utilizadas para calcular los índices de vulnerabilidad parcial.

Además de calcular la vulnerabilidad asociada a cada proceso costero, evaluamos también la vulnerabilidad integrada de los impactos de erosión, la vulnerabilidad integrada de los impactos de inundación y la vulnerabilidad global al efecto de todos ellos. Con ello se obtiene el conocimiento del tipo de impacto dominante en cada tramo (erosión o inundación), así como la identificación a nivel global de zonas que requieren mayores recursos para la gestión de daños (daño integral).

Finalmente, tanto los resultados de vulnerabilidad parcial como integrada se han representado gráficamente mediante una base de datos SIG que permite visualizar a nivel espacial la distribución de la vulnerabilidad en la costa de estudio. Estos mapas facilitan la interpretación a nivel espacial de los resultados, a la vez que constituyen una herramienta muy útil para la gestión y planificación de la zona costera, ya que pueden ser fácilmente combinados con mapas de uso del suelo (ver Figura 7.1)

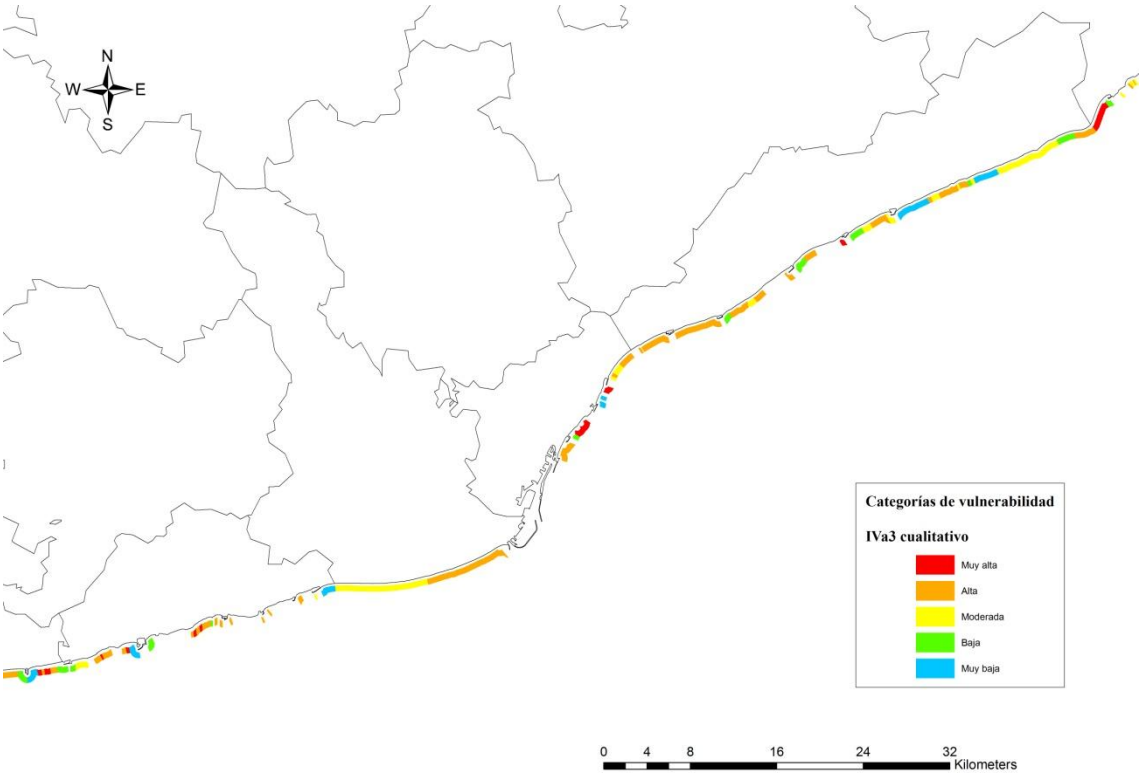

Figura 7.1. Vulnerabilidad global de la provincia de Barcelona según el índice IV_{a3} cualitativo

La metodología descrita ha sido aplicada a las playas de la costa de Cataluña, en una longitud total de 246 km, aunque no todos los índices de vulnerabilidad han podido ser obtenidos en esta longitud de costa debido a la ausencia de algunos datos. En la Figura 7.2 puede verse los kilómetros de playa incluidos en cada una de las categorías de vulnerabilidad para los diversos procesos costeros analizados.

En vista de los resultados de vulnerabilidad parcial obtenidos (ver Figura 7.2), puede concluirse que la vulnerabilidad del litoral catalán es:

- alta-muy alta al impacto de erosión a RSLR (índices $IVEs_{a3}$ e $IVEs_{r3}$)
- muy baja al impacto de inundación a RSLR aunque con grandes zonas deltaicas y desembocaduras de ríos con vulnerabilidad muy alta (índice $IVIs_3$)
- moderada-alta al impacto de erosión a medio plazo (índices $IVEm_a$ e $IVEm_r$)
- baja al impacto de erosión por temporales (índice *IVEt*)
- moderada al impacto de inundación por temporales (índice *IVIt*)

Cabe recordar que la vulnerabilidad a los diversos agentes ha sido evaluada en distintos tiempos de proyección (10 años para erosión a medio plazo y temporales, 100 años para RSLR). Además en el cálculo de la vulnerabilidad a un determinado proceso no se consideran los efectos producidos por los demás agentes. Así pues, por ejemplo, para la evaluación de la vulnerabilidad a erosión a temporales (cuyo valor en la costa catalana es en general bajo) se utiliza el ancho medio actual, sin tener en cuenta la erosión a medio plazo producida en este tiempo. Si se tuviese en cuenta esta erosión, la capacidad de respuesta de la playa se reduciría y por tanto la vulnerabilidad a erosión por temporales aumentaría.

Con los resultados obtenidos, observamos que los procesos erosivos presentan más problemas que los de inundación, motivo por el que la vulnerabilidad integrada a los impactos de erosión es muy alta, mientras que la vulnerabilidad integrada a los impactos de inundación es baja.

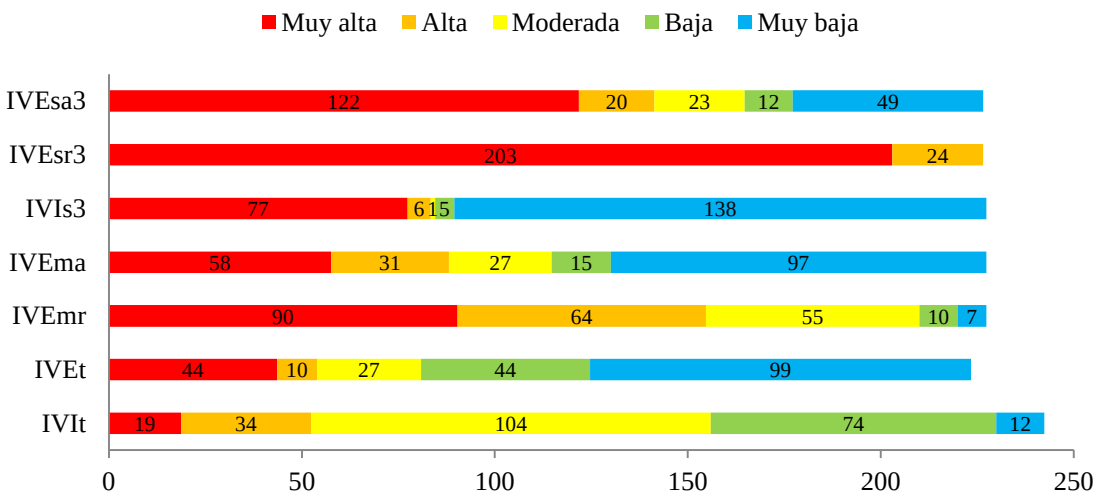

Figura 7.2. Kilómetros de playa del litoral catalán en cada categoría de vulnerabilidad según los diversos índices de vulnerabilidad a los diversos procesos costeros analizados

En cuanto a la vulnerabilidad global, los resultados obtenidos dependen del método de integración utilizado. En el primer método de integración propuesto (Ecuación 3.28), todos los factores presentan el mismo peso y la misma escala de variación. Además, aunque a nivel teórico podemos diferenciar entre variables generadoras de vulnerabilidad (agentes) y variables moduladoras de vulnerabilidad (como marea y geomorfología), esta diferencia no queda reflejada en el indicador desarrollado. Así pues, todos los factores se consideran con igual importancia en la valoración de la vulnerabilidad y contribuyen de igual modo en ella. Además,

en este indicador, la vulnerabilidad de la zona se obtiene de combinar directamente la vulnerabilidad asociada a los impactos producidos por los diversos agentes, pasando de un enfoque muy especifico a uno muy global.

En cambio, en el segundo método de agregación propuesto, los impactos de erosión e inundación se agregan de forma separada (Ecuaciones 3.31 y 3.34). Esto permite el conocimiento de la vulnerabilidad a erosión e inundación antes de calcular la vulnerabilidad global de la zona. Además, en este caso, el efecto de la marea en la acción de temporales se considera en los propios índices de vulnerabilidad a erosión e inundación por temporales, y la influencia de la geomorfología en los impactos de erosión se integra en el índice de erosión mediante un factor modulador, claramente diferenciado de los índices de vulnerabilidad a erosión de los diversos agentes. Por lo tanto, se recomienda usar el **segundo método de agregación** propuesto.

Además de recomendar la utilización del segundo método de agregación desarrollado, también se considera más acertado utilizar, para la definición de la vulnerabilidad global, el **método cualitativo**. Tal y como ha sido discutido en el capítulo 6, este método constituye una formulación intermedia a las otros dos desarrolladas (máximo y media), cuyos resultados son más acordes con la vulnerabilidad "real" de la zona. Además, permite reducir el número de tramos en la categoría de mayor vulnerabilidad obtenidos con el método del máximo, facilitando así la detección de las zonas más vulnerables, a la vez que aumenta el número de tramos contenidos en la categoría de mayor vulnerabilidad obtenidos con la media, resultando en una forma de cálculo no tan "restrictiva" y que permite detectar más áreas que solamente aquellas que son muy vulnerables a todos los impactos.

En caso de calcular la vulnerabilidad global de la costa de Cataluña con el método recomendado, se obtiene que la vulnerabilidad media de la costa catalana es alta. En la Figura 7.3 se muestran los kilómetros de playa incluidos en cada una de las categorías de vulnerabilidad según esta metodología y según el índice IV_{a3}. En el capítulo de resultados puede verse el mapa de vulnerabilidad de Cataluña según este mismo índice y escenario (Figura 5.25) y en el capítulo de Anejos puede verse los resultados obtenidos en los otros dos escenarios de RSLR considerados en el estudio.

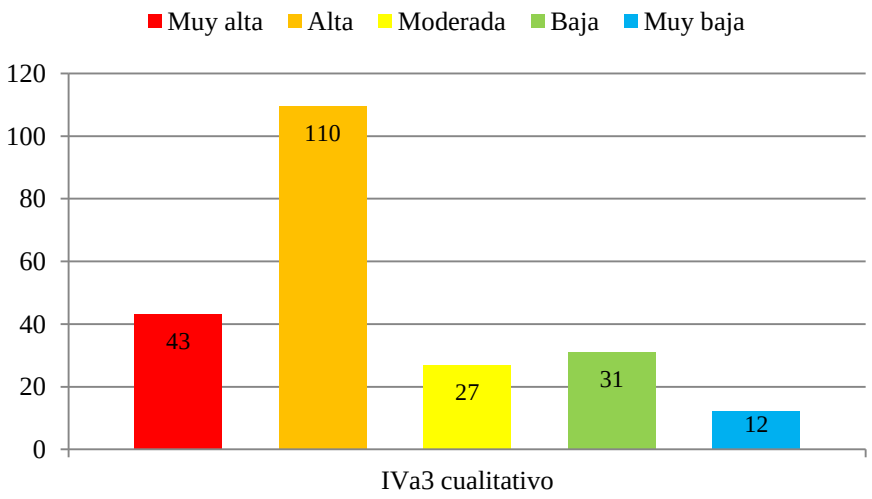

Figura 7.3. Kilómetros de playa del litoral catalán en cada una de las categorías de vulnerabilidad global según el índice IV_{a3} cualitativo

Finalmente, quiere destacarse la importancia de considerar las características del sistema costero tanto en el cálculo de los impactos inducidos por un determinado agente como en el cálculo de la vulnerabilidad a ese impacto. En muchas ocasiones, aunque la magnitud del agente pueda considerarse constante a lo largo de un determinado tramo de costa, observamos que la magnitud del impacto inducido por ese agente y la vulnerabilidad resultante a este impacto son muy variables debido a la elevada variabilidad en las características del sistema.

Así pues, por ejemplo, en el caso de la subida del nivel del mar, esta puede considerarse prácticamente constante a lo largo de todo el litoral catalán y, sin embargo, debido a la gran variabilidad tanto de pendiente emergida como pendiente sumergida de la costa, los impactos de erosión e inundación inducidos por este agente son muy variables. A la hora de calcular la vulnerabilidad a estos impactos, además, se añade el ancho actual de la playa como característica representativa de la capacidad de respuesta del sistema, motivo por el que la influencia de la geomorfología costera en la variabilidad resultante es todavía más notable.

Debido a que la vulnerabilidad está tan ligada a las propiedades actuales del sistema, es muy importante actualizar estos datos para disponer de una buena representación de éste. Por supuesto, también los datos referentes a los agentes deben ser actualizados a medida que se dispone de nuevas predicciones de RSLR, datos de oleaje, etc.

CAPITULO 8
REFERENCIAS

Abuodha, P.A. y Woodroffe, C.D. (2007), Assessing vulnerability of coasts to climate change: A review of approaches and their application to the Australian coast. En Woodroffe C.D., Bruce, E., Puotinen, M. y Furness R.A. (Eds). *GIS for the Coastal Zone: A selection of Papers from CoastGIS 2006*, Australian National Centre for Ocean Resources and Security University of Wollongong, Wollongong, Australia, 2007, 458p

Aguiló, E. "Et al", Alegre, J. y Sard, M. (2005), The persistence of the sun and sand tourism model. *Tourism Management*, 26, 219-231.

Alemany, J. (1984), Estat d'utilització de les platges del litoral català. Departament de Política Territorial i Obres Públiques, Generalitat de Catalunya, Barcelona.

Anfuso, G. y Martínez del Pozo, J.A. (2008), Assessment of Coastal Vulnerability Trought the Use of GIS Tools in South Sicily (Italy). *Environmental Management*, Vol. 43, nº 3, 533-545.

Borgman, L. (1963), Risk Criteria. *J. Waterw. Port* C.-ASCE, 89, WW3, 1-35.

Bosom, E. y Jiménez, J.A. (2011), Probabilistic coastal vulnerability assessment to storms at regional scale- application to Catalan beaches (NW Mediterranean). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 475-484.

Brenner, J. (2007), Valuation of ecosystem services in the Catalan coastal zone. Tesis doctoral, Universitat Politécnica de Catalunya.

Brooks, N. (2003), Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework, *Tyndall Centre for Climate Change Research*, Working Paper nº38.

Bruun, P. (1954), Coast erosion and the development of beach profiles, Technical Memorandum vol. 44, Beach Erosion Board, Corps of Engineers (1954) 82 pp.

Carter, T.R. "Et al", Parry, M.L., Nishioka, S. y Harasawa, H. (Eds) (1994). *Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations*, Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, University College London and Centre for Global Environmental Research, London and Tsukuba, 59pp.

CIIRC (2010), Estat de la zona costanera a Catalunya, Departament de Política Territorial i Obres Públiques, Barcelona.

CLIMsystems (2011), sitio web: http://CLIMsystems.com/site/home (visitado el 04/10/11)

De Bruijn, K. "Et al", Green, C., Johnson, C. y McFadden, L. (in press). Evolving concepts in flood risk management: Searching for a common language. En: S. Begum, J. Hall y M. J. F. Stive (Eds), *Flood risk management in Europe: Innovation in policy and practice. Advances in natural and technological hazards research*. New York: Kluwer.

De la Vega-Leinert, A.C. "Et al", Nicholls, R.J. y Tol, R.S.J. (Eds.). (2000), *Proceedings of the SURVAS Expert Workshop on European Vulnerability and Adaptation to Accelerated Sea-Level Rise*. Hamburg, Germany, Flood Hazard Research Centre, Middlesex University, Enfield, UK, 19–21 June, viii+152pp.

Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural de la Generalitat de Catalunya. Sitio web: http://www20.gencat.cat/portal/site/DAR/ (visitado el 12/05/11)

Domínguez, L. "Et al", Anfuso, G. y Gracia, F.J. (2005), Vulnerability assessment of a retreating coast in SW Spain. *Environmental Geology*, Vol. 47, nº 8, 1037-1044.

Douglas, B.C. (1991), Global Sea Level Rise. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 96 (C4). 6981-6992 pp.

Doukakis, E. (2005), Coastal Vulnerability and Risk Parameters. *European Water* 11/2:3-7

Füssel, H.-M. (2007), Vulnerability: A Generally Applicable Conceptual Framework for Climate Change Research, *Global Environmental Change*, Vol. 17, issue 2, 155-167.

Füssel, H.-M. y Klein, R.J.T. (2006), Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking, *Climate Change*, 75, 301-329

Generalitat de Catalunya. Sitio web: http://www.gencat.cat (visitado el 18/11/10)

Google Earth (2010). Sitio web: http://maps.google.com (visitado el 20/11/10)

Gornitz, V. y Kanciruk, P. (1989), Assessment of global coastal hazards from sea level rise. *Coastal Zone '89, Proceedings of the 6th Symposium on Coastal and Ocean Management*, ASCE, July 11-14, 1989, Charleston, SC, 1345-1359.

Gornitz, V.M. "Et al", Beaty, T.W. y Daniels, R.C. (1997), A coastal hazards data base for the U.S. West Coast. ORNL/CDIAC-81, NDP-043C.

Gornitz, V.M. "Et al", Daniels, R.C., White, T.W., y Birdwell, K.R. (1994) Vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 12, 327-338.

Gornitz, V. y White, T.W. (1989), The global coastal hazards data base. CONF-8911175-1.

Gornitz, V. "Et al", White, T.W. y Cushman, R.M. (1991), Vulnerability of the U.S. to future sea-level rise. CONF-910780-1.

Guedes-Soarez, C. "Et al", Weisse, R., Carretero, J.C. y Alvarez, E. (2002), A 40 years hindcast of wind, sea level and waves in European waters. *Proc. 21st Inst. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, Paper OMAE2002-28604.

Hammar-Klose, E.S. y Thieler, E.R. (2001), Coastal vulnerability to sea-level rise: A preliminary database for the U.S. Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico coasts. *U.S. Geological Survey*, Digital Data Series, DDS-68, CD-ROM. (Disponible en: http://pubs.usgs.gov/dds/dds68/)

Harvey, N. y Woodroffe, C.D. (2008), Australian approaches to coastal vulnerability assessment. *Sustainability Science* 3, pp 67-87.

Hinkel, J. y Klein, R.J.T. (2007). Integrating Knowledge for Assessing Coastal Vulnerability to Climate Change. En: McFadden, L., Nicholls, R.J. y Penning-Rowsell, E. (Eds), *Managing Coastal Vulnerability*, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands. pp 29-43.

Hinkel, J. y Klein, R.J.T. (2009), Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change* 19, pp 384-395.

Holling, C. S. (1973), Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecological Systems*, 4, 1-23

Idescat (2010). Sitio web: http://www.idescat.cat/ (visitado el 11/02/11)

Institut Cartogràfic de Catalunya. Sitio web: www.icc.cat (visitado el 17/02/11)

IPCC (2001), *Climate change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary for Policymakers*, WMO.

IPCC CZMS, (1992), *Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea*. Report of the Coastal Zone Management Subgroup, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Working group III, Rijkswaterstaat, The Netherlands, 35pp + 5 appendices.

Jiménez, J.A. "Et al", Sánchez-Arcilla, A. y Stive, M.J.F. (1993), Discussion on prediction of storm/normal beach profiles. *J. Waterw. Port*. C-ASCE, 19(4), 466-468.

Jiménez, J.A. "Et al", Valdemoro, H.I., Gracia, V., Sole, F., Mendoza, E.T., Ariza, E. y Sánchez-Arcilla, A. (2011), Evolución de las playas de Cataluña. Implicaciones para su gestión. (*En prensa*)

Judge, E.K. "Et al", Overton, M.F. y Fisher, F.S. (2003), Vulnerability indicators for coastal dunes. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 270-278.

Kay, R. y Waterman, P. (1993), Review of the applicability of the common methodology for assessment of vulnerability to sea-level rise in the Australian coastal zone. En: McLean, R. y Mimura, N. (Eds) *Vulnerability assessment to sea-level rise and coastal zone management*, Proc IPCC Eastern Hemisphere Workshop, Tokyo. pp 213-225.

Kelly, P. M. y Adger, W. N. (2000), Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Climatic Change*, 47, 4, 325-352.

Kokot, R.R. "Et al", Codignotto, J.O. y Elissondo, M. (2004), Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (3): 477-487.

Ley de Costas (1988), Ley 22/1988 de Julio de 1988. BOE 27-7-1988 nº 181.

Málvarez García, G. "Et al", Pollard, J. y Domínguez Rodríguez, R. (2000). Origins, Management, and Measurement of Stress on the Coast of Southern Spain. *Coastal Management*, 28, 215-234.

McFadden, L. y Green, C. (2007), Defining "vulnerability": conflicts, complexities and implications for Coastal Zone Management. *Journal of Coastal Research*, 50, 120-124.

McLachlan, A. y Brown, A. (2006), *The Ecology of Sandy Shores*, Academic Press Elsevier, 2nd edition.

McLaughlin, S. "Et al", McKenna, J. y Cooper, J.A.G. (2002). Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of Coastal Research*, SI 36, 487-497.

Meehl, G.A. "Et al", Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J. y Zhao, Z.-C. (2007). Global Climate Projections. En: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Mendoza, E.T. y Jiménez, J.A. (2004), Factors controlling vulnerability to storm impacts along the Catalonian coast. *Proc. 29th ICCE'04*, ASCE, 3087-3099.

Mendoza, E.T. y Jiménez, J.A. (2006), Storm-Induced Beach Erosion Potential on the Catalonian Coast. *J. Coast. Res*., SI 48, 81-88.

Mendoza, E.T. y Jiménez, J.A. (2008), Clasificación de tormentas costeras para el litoral Catalán (Mediterráneo NO). *Ing. Hidraul. Mex*, XXIII, 2, 21-32.

Mendoza, E.T. y Jiménez, J.A. (2009), Regional vulnerability analysis of Catalan beaches to storms. *P. I. Civil Eng-Mar. Eng* 162(3), 127–135.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino del Gobierno de España. Sitio web: http://www.marm.es/ (visitado el 6/03/11)

MOP (1970), Playas. Modelos tipo y sugerencias para su ordenación. Dirección general de Puertos y Señales Marítimas, Ministerio de Obras Públicas, Madrid.

Ojeda Zújar, J. "Et al", Álvarez Francoso, J.I., Marín Cajaville, D. y Fraile Jurado, P. (2008), El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza. En: Hernández, L. y Parreño, J.M. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial.* Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria. pp. 660-671.

PAP/RAC (2007), ICZM in the Mediterranean, *Split*, 2007.

Pendleton, E.A. "Et al", Williams, S.J. y Thieler, E.R. (2004), Coastal Vulnerability Assessment of Assateague Island National Seashore (ASIS) to Sea-level Rise. *U.S. Geological Survey* Open-File Report 2004-1020, Electronic Book

Pethick, J. (1984), *An Introduction to Coastal Geomorphology*. Edward Arnold (Publishers) Ltd. London. 260pp.

Pethick, J. y Crooks, S. (2000), Development of a coastal vulnerability index: A geomorphological perspective. *Environmental Conservation*, 27,4, 359-367.

Puertos del Estado. 1990. ROM 0.2-90. Actions in the design of maritime and harbor Works. *Spanish Ministry of Public Works*, Madrid, 264pp.

Puertos del Estado. Sitio Web: http://www.puertos.es/ (visitado el 24/06/11)

Rangel-Buitrago, N. y Anfuso, G. (2009), Assessment of Coastal Vulnerability in La Guajira Peninsula, Colombian Caribbean Sea. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 792-796.

Rosen, P.S. (1977), Increasing shoreline erosion rates with decreasing tidal range in the Virginia Chesapeake Bay. *Chesapeake Science*, 18, 4, 383-386.

Small, C y Nicholls, R.J. (2003), A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 19, 584-599.

Somoza, L. "Et al", Barnolas, A., Arasa, A., Maestro,A., Rees, J.G., y Hernandez, F.J. (1998), Architectural stacking patterns of the Ebro delta controlled by Holence high-frequency eustatic fluctuations, delta-lobe switching and subsidence processes. *Sedimentary Geology*, 117, 11-32.

Stockdon, H.F."Et al", Holman, R.A., Howd, P.A. y Sallenger, A.H. (2006), Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coast. Eng*., 53, 573-588.

Thieler, E.R. y Hammar-Klose, E.S. (1999), National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast. *U. S. Geological Survey*, Open-File Report 99-593.

Thieler, E.R. y Hammar-Klose, E.S. (2000a), National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Pacific Coast. *U. S. Geological Survey*, Open-File Report 00-178.

Thieler, E.R. y Hammar-Klose, E.S. (2000b), National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Gulf of Mexico Coast. *U. S. Geological Survey*, Open-File Report 00-179.

Thieler, E.R. "Et al", Williams, S.J. y Beavers, R. (2002), Vulnerability of U.S. National Parks to Sea-Level Rise and Coastal Change. *U.S. Geological Survey Fact Sheet*, FS-095-02 (disponible en: http://pubs.usgs.gov/fs/fs095-02/).

Titus, J.G. (1990), Greenhouse Effect, Sea Level Rise, and Land Use. *Land Use Policy*, Vol 7, issue2, pp:138-53.

Turner, B. L. "Et al", Kasperson, R. E., Matson, P., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A. y Schiller, A. (2003), A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the national Academy of Sciences of the USA*, 100, 14, 8074-8079.

Valdemoro, H.I. (2005), La influencia de la morfodinámica en los usos y recursos costeros. Tesis de doctorado. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

Valdemoro, H.I. y Jiménez, J.A. (2006), The Influence of Shoreline Dynamics on the Use and Exploitation of Mediterranean Tourist Beaches. *Coastal Management*, 34, 405–423.

Valiela, I. (2006), *Global Coastal Change*. Blackwell, Oxford, 368pp.

Van der Meer, J.W. y Janssen, W. (1995), Wave run-up and wave over-topping at dikes. En: Kobayashi, N. y Demirbilek, Z. (Eds), *Wave forces on inclined and vertical wall structures*, ASCE, 1-27.

Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics de la Generalitat de Catalunya. Sitio web: http://www.xiom.cat/ (visitado el 26/03/11)

Yepes, V. (1999), Las playas en la gestión sostenible del litoral. *Cuadernos de Turismo* 4, 89–110.