Conceptos y herramientas probabilísticas para el cálculo del riesgo en el ámbito portuario

Rebeca Gómez y Rafael Molina
Carmen Castillo
Ignacio Rodríguez
José Damián López

POLITÉCNICA

Puertos del Estado

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE FOMENTO

Conceptos y herramientas probabilísticas para el cálculo del riesgo en el ámbito portuario

Rebeca Gómez y Rafael Molina
Carmen Castillo
Ignacio Rodríguez
José Damián López

POLITÉCNICA

Puertos del Estado

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE FOMENTO

Edita:
Organismo Público Puertos del Estado

Imprime: VA Impresores, SA

ISBN: 978-84-88740-09-0
Depósito Legal: M-27395-2018

ÍNDICE

1. Introducción 19

1.1. El cálculo del riesgo como eje de la ingeniería portuaria del siglo XXI 21

1.1.1. Ventajas que aporta la aplicación de análisis probabilísticos en ingeniería marítima y portuaria 22

1.1.2. Consideraciones básicas sobre la aplicación de técnicas probabilísticas y sus limitaciones 23

1.1.3. Objetivos de la Guía 25

1.1.4. Bases conceptuales necesarias para entender esta Guía 25

1.1.5. Campo de aplicación recomendado 25

1.1.6. Organización del documento 25

2. Introducción histórica al concepto de riesgo 27

2.1. Evolución del concepto de riesgo en la Antigüedad 29

2.1.1. En el Medio Oriente (3200 a. C) 29

2.1.2. En el Antiguo Egipto (siglo XVIII a.C.) 30

2.1.3. En la Grecia Clásica y Creta (750 a.C.) 30

2.1.4. Roma y el fin del seguro marítimo 31

2.1.5. De la Antigüedad a la Edad Media y el Islam: Del determinismo a la recuperación del seguro marítimo 32

2.1.6. Desde la reaparición del seguro marítimo hasta su institucionalización: Edad Media y Edad Moderna 33

2.1.7. De la modernidad al Mundo Contemporáneo: De la estimación empírica del riesgo a los estudios de probabilidad 33

2.1.8. Desde finales del siglo XIX hasta nuestros días 35

2.1.9. Distribución geográfica y línea temporal de la evolución histórica del concepto de riesgo 36

2.1.10. Cinco cambios importantes entre el pasado y el presente de los riesgos [Basado en el texto de Covello y Mumpower (Covello & Mumpower, 1985)] 37

2.1.10.1. Cambio de la naturaleza de los riesgos 37

2.1.10.2. Surgimiento de nuevos riesgos 37

2.1.10.3. Aumento de la capacidad de los científicos para identificar y cuantificar los riesgos 37

2.1.10.4. Aumento de la producción y empleo del número de análisis de riesgos formales y cuantitativos 37

2.1.10.5. Aumento del interés popular, concienciación y demanda de protección 37

3. El riesgo. Concepto y revisión de los términos que lo componen 39

3.1. Introducción 41

3.2. Riesgo: Definiciones y campos de aplicación 42
3.3. Tipos de riesgo, definiciones y formulaciones 43
3.4. Términos propuestos para evaluar el riesgo 50
3.5. El concepto de riesgo infraestructural y el riesgo operativo 51
3.6. Descripción de los términos que componen la definición de riesgo 52
3.6.1. Probabilidad de fallo 52
3.6.2. Fiabilidad 54
3.6.3. Vulnerabilidad 55
3.6.3.1. Unidades espaciales de análisis 57
Ejemplo sobre tipologías que se pueden identificar en un tramo 58
3.6.3.2. Vulnerabilidad del inmovilizado material (Vim) 59
3.6.3.3. Vulnerabilidad de las operaciones (VO) 59
Ejemplo 1: Determinación de la vulnerabilidad y costes por afección sobre el inmovilizado material 60
Ejemplo 2: Determinación de la vulnerabilidad y costes por afección sobre las actividades 62
3.6.4. Coste 63
3.6.5. Desarrollo espacio-temporal de cada uno de los términos de la ecuación de riesgo 64
3.6.6. Resumen 65
3.6.6.1. Probabilidad 65
3.6.6.2. Vulnerabilidad 65
3.6.6.3. Consecuencias económicas 66
3.6.7. La gestión del riesgo 66
3.6.8. Modelos actuales de gestión del riesgo 68
3.6.9. El futuro de la gestión del riesgo 71
4. Descripción del procedimiento para la evaluación del riesgo mediante técnicas probabilísticas 73
4.1. Introducción 75
4.2. Procedimiento general. *Workflows* 77
4.2.1. Desglosando el espacio e identificando operaciones 77
Ejemplo (Importancia de la identificación del inmovilizado material y las operaciones para establecer las relaciones entre el nivel de vulnerabilidad y el tipo de gasto que se debe considerar) 78
4.2.2. Esquema para la determinación del término probabilidad 79
4.2.3. Esquema del procedimiento para la evalución de la vulnerabilidad 81
4.2.4. Esquema del procedimiento para la evaluación de las consecuencias 82
5. Identificación de los modos de fallo y parada operativa. Generación del árbol o esquema de fallos 85

5.1. Introducción ... 87
5.2. ¿Qué es un modo de fallo o parada operativa? ... 87
5.3. Definición y tipos de ecuaciones de verificación ... 88
Ejemplo: Ecuación que describe la rotura de un elemento estructural ... 89
5.4. Generación de secuencias de fallo mediante el método de los árboles o diagramas de fallo (*Fault tree analysis method*) ... 89
Ejemplo: Generación de un árbol de fallo en la evaluación de la probabilidad de fallo de un sistema de tres amarras ... 91
Nota: Tipos de dependencia entre eventos ... 91
Dependencias intrínsecas ... 91
Dependencias extrínsecas ... 92
6. Adscripción de los modos de fallo o parada a estados límite ... 93
6.1. Introducción ... 95
6.2. El método de los Estados Límite ... 95
6.3. Modos de Fallo y de parada ... 96
Ejemplo: Adscripción de modos de fallo o parada operativa de un dique vertical exento a los estados límites correspondientes ... 96
7. Caracterización de los factores de proyecto ... 97
7.1. Introducción ... 99
7.2. Tipos de caracterización: determinista, aleatoria y espectral ... 101
7.2.1. Caracterización determinista ... 101
7.2.2. Caracterización estadística ... 101
7.2.3. Caracterización espectral ... 103
7.3. Documentos de referencia sobre los procedimientos de caracterización de agentes y parámetros ... 103
8. Métodos de verificación ... 107
8.1. Introducción ... 109
8.2. Breve descripción de los métodos de verificación de Nivel I y Nivel II ... 109
8.2.1. Métodos de Nivel I: Resolución mediante la aplicación de coeficientes globales y parciales de seguridad ... 109
8.2.2. Métodos de Nivel II: Momentos estadísticos y técnicas de optimización ... 110
8.2.2.1. Método de integración ... 111
8.2.2.2. Método *Most Probable Point* (MPP) ... 111
8.2.2.3. FORM y SORM ... 112
8.3. Descripción de los métodos de resolución por simulación más utilizados (Incluye métodos de Nivel III) ... 113
8.3.1. Método de Montecarlo ... 113
8.3.1.1. Descripción ... 113
8.3.1.2. Generación de números aleatorios ... 114

8.3.1.3. Verificación por Montecarlo 115
8.3.1.4. Requisitos para aplicar este método y limitaciones 115
8.3.1.5. Ventajas y desventajas de la simulación por Montecarlo 115
8.3.1.6. Ejemplo: Simulación de valores de velocidad de viento en función de su distribución estadística 116
Para saber más sobre el método de Montecarlo 119
8.3.2. Método Latin Hypercube Sampling (LHS) 119
8.3.2.1. Descripción 119
8.3.2.2. Ventajas y desventajas de emplear el método lhs 120
Para saber más sobre el LHS 120
8.3.3. Pre-selección de casos a simular: técnicas de clasificación y selección 120
8.3.3.1. K-MEDIAS (K-MEANS) 121
8.3.3.2. Algoritmos de Clusterización Jerárquica 121
8.3.3.3. Redes neuronales auto-organizativas (SOM, self-organizing maps) 122
8.3.3.4. Vectores de cuantización con mecanismo consciente (VQC, Vector Quantization with Conscience Mechanism) 122
8.3.3.5. Algoritmos de máxima disimilitud (MaxDiss) 123
Para saber más sobre métodos de pre-selección de casos 123
8.3.4. Regeneración de series temporales de parámetros de estado de variables oceanográficas a partir de modelos de probabilidad 123
8.3.5. Redes Neuronales 125
8.3.5.1. Antecedentes 125
8.3.5.2. Definición de red neuronal artificial 126
8.3.5.3. Componentes de una red neuronal 127
8.3.5.4. Características principales y tipos de redes neuronales 128
8.3.5.5. Programación de las redes neuronales 129
8.3.5.6. Potencial de las Redes Neuronales 129
Para saber más sobre redes neuronales artificiales 130
8.3.6. Redes Bayesianas 130
8.3.6.1. Descripción 130
8.3.6.2. Aprendizaje de las redes bayesianas 132
Para saber más sobre redes bayesianas 132
8.3.7. Algoritmos Genéticos (basado en (Alfaro, 2012)) 133
8.3.7.1. Algoritmo genético simple 133
8.3.7.2. Condicionantes de aplicación 134
8.3.7.3. Ventajas y desventajas de la aplicación de los algoritmos genéticos 134
8.3.7.4. Ejemplo de aplicación de los Algoritmos Genéticos 134
Para saber más sobre algoritmos genéticos 136

Para saber más sobre la combinación de las dos técnicas 136

8.3.8. Software disponible en el mercado para emplear algunos de los métodos recogidos en este apartado 136

9. Consideraciones sobre la evaluación de las consecuencias económicas para el cálculo del riesgo 139

9.1. Introducción 141

9.2. Consideraciones iniciales en la evaluación del coste 141

9.3. Principales costes que pueden generarse por la ocurrencia de fallos o paradas operativas 147

9.3.1. Afecciones sobre el inmovilizado material 147

9.3.2. Afecciones sobre las operaciones 148

9.4. Escenarios de afección extremos desde el punto de vista de la autoridad portuaria 148

9.4.1. Modo de fallo que genera alto nivel de afección sobre el inmovilizado 148

9.4.2. Fallo que produce destrucción parcial 149

9.4.3. Modo de parada operativa 150

10. Claves sobre la gestión del riesgo 153

Ejemplo: Gestión del riesgo en la actividad de carga y descarga en una terminal de contenedores 156

Agradecimientos 161

Bibliografía 163

Anexos 175

Índice de figuras

FIGURA 1. Fracción de la estela del *Código de Hammurabi*, localizada en el museo del Louvre (París) 29

FIGURA 2. Ilustración de un Zigurat Mesopotámico 30

FIGURA 3. Barcos de vela similares a los que navegaban en la antigüedad por el río Nilo (Egipto) 30

FIGURA 4. Ilustración de Triere, embarcación griega del siglo V. a. c. 31

FIGURA 5. Página fragmentada de la obra *Phaedo* de Platón. Siglo IV a.c. 32

FIGURA 6. Grabado de Blaise Pascal, quien concibió la Teoría de la Probabilidad. 33

FIGURA 7. Viñeta representando asiduos a la Lloyd's 35

FIGURA 8. Ejemplo gráfico de gestión de riesgo: modelo de la NASA en el que se muestran las áreas susceptibles de recibir un impacto. Estación Espacial Internacional 36

FIGURA 9. Distribución espacial y evolución temporal de los estudios sobre la determinación del riesgo o el cálculo de probabilidades. Los marcadores indican los centros de estudio surgidos en torno al concepto del riesgo antes de Cristo (naranja) y los que aparecieron después de Cristo (verde) 36

FIGURA 10. Representación sobre una línea temporal de los hitos históricos acaecidos a.c. relacionados con los estudios de riesgo o cálculo de probabilidades. Los hitos se han clasificado por colores de acuerdo con el siguiente criterio: en gris, los relacionados con los seguros o previsión de catástrofes naturales; en naranja, los relacionados con el transporte de mercancías; en azul, los relacionados con las creencias religiosas; en rojo, los derivados de estudios matemático-probabilísticos 36

FIGURA 11. Representación sobre una línea temporal de los hitos históricos acaecidos d.c. relacionados con los estudios de riesgo o cálculo de probabilidades. los hitos se han clasificado por colores de acuerdo con el siguiente criterio: en gris, los relacionados con los seguros o previsión de catástrofes naturales; en naranja, los relacionados con el transporte de mercancías; en azul, los relacionados con las creencias religiosas; en rojo, los derivados de estudios matemático-probabilísticos 37

FIGURA 12. Evolución del concepto de riesgo desde que fue formulado por primera vez hasta nuestros días 42

FIGURA 13. Implementación de los tres términos que conforman el riesgo según (NASA, 2011) en el proceso de *Project Risk Analysis* (PRA) 45

FIGURA 14. Situaciones que dan lugar a la existencia de un riesgo, sus orígenes y consecuencias, aplicado a un accidente marítimo 46

FIGURA 15. Ejemplo de los valores que puede adquirir el riesgo en función del impacto de la amenaza (de 1 a 16) y su probabilidad de ocurrencia (de 1 a 5). Las casillas rojas indican que el riesgo es inaceptable, las verdes que el riesgo es aceptable y las de color ámbar representan riesgos que habrá que trasladar hacia el rojo o hacia el verde en función de la estrategia de gestión del riesgo que se adopte 47

FIGURA 16. Esta tabla muestra el resultado de trasladar los riesgos que en la figura anterior estaban marcados en ámbar hacia lo inaceptable o lo aceptable en función de que sean mayores o menores que 10, criterio establecido por los gestores a modo de ejemplo 47

FIGURA 17. Secuencia 1: el iniciador es un modo de fallo, se obtiene por tanto un riesgo estructural 49

FIGURA 18. Secuencia 2: el iniciador es un modo de fallo (la infraestructura se ve afectada), y deriva en un modo de parada operativa (la infraestructura pierde funcionalidad). Por tanto, se computa tanto un riesgo estructural como un riesgo operativo 49

FIGURA 19. Secuencia 3: el iniciador es un modo de parada operativa (afección sobre las operaciones), que desemboca en un riesgo operativo 50

FIGURA 20. Términos identificados como clave para la evaluación del riesgo 50

FIGURA 21. Relación entre los elementos que forman parte del cálculo de la probabilidad de fallo y de parada operativa 52

FIGURA 22. Representación de los principales agentes que interactúan con la obra y el entorno. Del medio físico: viento, oleaje, corrientes, variaciones del nivel del mar, transporte de sedimentos. De uso y explotación: buque, maquinaria de manipulación de mercancías, vehículos, personal. Parámetros: densidad del aire, contenido en partículas, densidad, salinidad, viscosidad del agua, cantidad de nutrientes, parámetros del terreno..... 53

FIGURA 23. Conceptos relacionados con la obtención de la función de probabilidad del factor de seguridad en un estudio de estabilidad de taludes 54

FIGURA 24. Representación de un elemento sometido a una amenaza. El elemento en este caso es un muelle de un puerto deportivo, y la amenaza (materializada) es el buque *Queen of Oak Bay,* que colisionó en Horseshoe Bay, la columbia británica, Canadá 56

FIGURA 25. Fotomontaje de la alternativa 7 del puerto de Pasajes 57

FIGURA 26. Tramos de obra para llevar a cabo la construcción de la alternativa elegida de la ampliación del puerto de Gijón. Tramos de obras exteriores (izquierda) e interiores (derecha). Anteproyecto para la ampliación del puerto de Gijón 58

FIGURA 27. Tipología muelle de cajones 58

FIGURA 28. Conjunto de elementos que dan lugar a un muelle de cajones 58

FIGURA 29. Relación entre la clasificación estructural y operacional de las instalaciones portuarias..... 59

FIGURA 30. Dependencia de la evaluación de las consecuencias económicas (u operativas) de la existencia de la vulnerabilidad 59

FIGURA 31. Representación de diferentes elementos de infraestructura y de actividades que se pueden encontrar en las instalaciones portuarias: estructuras, aspectos sociales y medioambientales, operaciones portuarias y elementos de la cadena logística..... 60

FIGURA 32. Elemento “Solera”, dentro de la tipología “Dique Vertical” correspondiente a un tramo de obra..... 60

FIGURA 33. Izquierda: ejemplo de daños en un pavimento que condiciona su utilización con alguna restricción. Derecha: daños sobre el pavimento de un puerto que podrían calificarse como ruinosos 61

FIGURA 34. Evaluación de la extensión de la grieta en el conjunto de la solera que permite evaluar la vulnerabilidad estructural de la misma a efectos del ejemplo propuesto 61

FIGURA 35. Elementos pertenecientes a una sección tipo sobre los que proceder a la evaluación del riesgo. Identificación de las amenazas, modos de fallo o paradas operativas bajo los que son vulnerables y costes derivados de la ocurrencia de fallos o paradas operativas..... 64

FIGURA 36. Relación a diferentes escalas de la zonificación del puerto, tanto de la infraestructura como de la dimensión económica de las actividades que desarrolla 65

FIGURA 37. Esquema del procedimiento a seguir para establecer políticas de gestión de riesgo.. 66

FIGURA 38. Gestión del riesgo como interacción de la toma de decisiones basada en información sobre riesgo y la gestión continua del riesgo 67

FIGURA 39. Esquema de las tareas que comprende el *Project Risk Assessment*..... 67

FIGURA 40. *Cash-flow* de un proyecto constructivo estándar en el que no se tiene en cuenta la estrategia de gestión de riesgos (*Project Cash Flow* 1) y en el que sí se tiene en cuenta (*Project Cash Flow* 2) 71

FIGURA 41. Términos clave en el cálculo del riesgo y relaciones entre ellos 75

FIGURA 42. Procedimiento a seguir para la evaluación del riesgo 76

FIGURA 43. Esquema de las relaciones e implicaciones de los elementos que intervienen en la generación de conocimiento sobre la realidad en la que se trabaja 77

FIGURA 44. Desglose de la sección ficticia en elementos de infraestructura y actividades 78

FIGURA 45. Cadena de dependencias que existen en la serie de actividades que conforman el paso de la mercancía de mar a tierra 79

FIGURA 46. Procedimiento a seguir para evaluar la probabilidad de ocurrencia de modos de fallo y paradas operativas 80

FIGURA 47. Secuencia de la parte del procedimiento correspondiente al cálculo de la vulnerabilidad 82

FIGURA 48. Secuencia propuesta para la evaluación de las consecuencias económicas de la manifestación de modos de fallo y/o paradas operativas 83

FIGURA 49. Ilustración del modo de fallo “extracción de piezas” en el morro de un dique 88

FIGURA 50. Formas en las que se pueden desarrollar los modos de fallo y el tipo de correlación según el caso 89

FIGURA 51. Representación de la probabilidad total (P_T en las figuras superiores y área mallada en las inferiores) del modo de fallo analizado o “top”, en el caso de que sea consecuencia de dos eventos que convergen en una puerta AND o en una puerta OR..... 90

FIGURA 52. Esquematización de las acciones en planta provocadas por la corriente, longitudinal al buque, y el viento, que al incidir oblicuamente se puede descomponer en sus componentes longitudinal y transversal 91

FIGURA 53. Esquema de fallo con el que se contemplan todas las combinaciones de fallos que se pueden producir, y los derivados de éstas 91

FIGURA 54. Ejemplo de los estados límite que se pueden alcanzar en un sistema de atraque..... 95

FIGURA 55. Representación de los parámetros que caracterizan la infraestructura y el entorno, y los agentes que interactúan con ella..... 99

FIGURA 56. Perfilador de corrientes y medidor de oleaje direccional de la casa Nortek..... 100

FIGURA 57. Instrumentación empleada para la realización de un ensayo triaxial de suelos. De este ensayo se extraen propiedades del terreno tales como el ángulo de rozamiento interno o la cohesión..... 100

FIGURA 58. Ejemplo de probeta llevada al ELU por compresión simple. De este ensayo se obtienen parámetros tales como resistencia a compresión, que depende a su vez del número de días de curado de la probeta en el caso del hormigón..... 100

FIGURA 59. Fotografía de la boya de Punta Carnero, que forma parte de la red costera de Puertos del Estado..... 101

FIGURA 60. Definición de los valores característicos para los esfuerzos *S* y las resistencias *R*..... 102

FIGURA 61. Representación de una serie de ondas armónicas de diferente amplitud y frecuencia, y la suma ponderada de éstas, que se corresponde con la definición de $H(t)$ 103

FIGURA 62. Representación del espectro direccional (derecha) y su equivalencia con el espectro escalar (centro), obtenido a partir de series temporales (izquierda)..... 103

FIGURA 63. Diferencia conceptual entre los fundamentos de la clasificación de los métodos de verificación disponibles 109

FIGURA 64. Representación tridimensional del dominio de fallo para la función de densidad conjunta de las funciones marginales f_R y f_S 111

FIGURA 65. Vista en planta de la región de fallo para la función de densidad conjunta de las funciones marginales f_R y f_S. G_L hace referencia a una frontera lineal, mientras que G puede ser de otro orden 111

FIGURA 66. Función de densidad conjunta de las variables $u1$ y $u2$. Estado límite exacto y aproximado. punto de mayor probabilidad de fallo..... 112

FIGURA 67. Conceptos asociados al uso de Métodos de Primer Orden para el cálculo de la probabilidad..... 112

FIGURA 68. Aproximación del FORM a la superficie de fallo en un espacio normal estándar 113

FIGURA 69. Fotografía del ENIAC en Philadelphia, Pennsylvania (1947-1955) 114

FIGURA 70. Representación de una ruleta con las 10 opciones que se pueden obtener al azar haciéndola girar..... 114

FIGURA 71. Representación de los valores aleatorios tomados en una simulación de Montecarlo. En algunos casos los valores pertenecen a la región de fallo, y en otros, a la región de seguridad 115

FIGURA 72. Esquema del viento incidente sobre un buque amarrado..... 116

FIGURA 73. Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 04-95. Proporciona la rosa de vientos, los regímenes medios direccionales y los regímenes medios escalares 116

FIGURA 74. Rosa de los vientos extraída de la Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 04-95..... 117

FIGURA 75. Régimen medio direccional obtenido de observaciones de buques en ruta. Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 04-95..... 117

FIGURA 76. Régimen medio direccional obtenido de observaciones de buques en ruta. Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 04-95..... 118

FIGURA 77. Representación en gráfico de dispersión de los resultados de generar 100 muestras mediante el método de Montecarlo (izquierda) y el método del Hipercubo latino (*latin hypercuble sampling*) (derecha)..... 119

FIGURA 78. Ilustración de la posición de los centroides (círculos negros) al aplicar el algoritmo de las k-medias, con $k = 2$ (dos grupos), durante varias iteraciones para una muestra de vectores bidimensionales (cruces naranjas)..... 121

FIGURA 79. Aplicación del algoritmo de k-medias. A) inicialización de los centroides (puntos gruesos) y definición de los mismos después de la primera iteración (puntos finos); B) centroides y subconjuntos finales 121

FIGURA 80. Aplicación de VQC: A) inicialización de los centroides (puntos gruesos) y definición de los mismos después de la primera iteración (puntos finos); B) centroides y subconjuntos finales..... 122

FIGURA 81. Selección mediante el algoritmo MaxDiss, a) versión MaxMin; b) versión MaxSum; c) versión MaxMax; d) versión MaxMean..... 123

FIGURA 82. Esquema y partes de una neurona 125

FIGURA 83. Esquemas de entrenamiento de una red neuronal: supervisado (superior) y no supervisado (inferior) 126

FIGURA 84. Equivalencia entre los componentes de una neurona biológica (izquierda) y una neurona artificial, en las que se pueden distinguir las dendritas o entradas {$x1$,$x2$,...,$x5$}, los pesos {$w1$,$w2$,...,$w5$}, la unidad de procesamiento {Δ} y la salida {Y} 126

FIGURA 85. Parametrización de una neurona artificial estándar y sus similitudes con los componentes neuronales biológicos 127

FIGURA 86. Perceptrón multicapa completamente conectado. La capa inferior son las entradas de la red, la intermedia las capas ocultas y la superior la capa de salidas 128

FIGURA 87. Representación del error registrado a medida que avanza el proceso de aprendizaje. La línea vertical marca el número óptimo de iteraciones, en el que el error es mínimo tanto en el entrenamiento como en la validación de la red 129

FIGURA 88. Representación de un grafo con un bucle en su interior, formado por la secuencia B-C-E-D-B 131

FIGURA 89. Tipos de nodo: a) divergente; b) en secuencia, donde V condiciona a S; c) en secuencia, donde S condiciona a V; d) convergente 131

FIGURA 90. Clasificador bayesiano simple en el que los atributos $A1$, $A2$,..., An son independientes dada la clase C 132

FIGURA 91. Pseudocódigo del Algoritmo Genético Simple 133

FIGURA 92. Primera parte del ciclo reproductivo de los algoritmos genéticos: selección de los padres y cruce de los individuos para obtener los descendientes. Se puede ver que los dos descendientes obtenidos cuentan con una pequeña parte de uno de los padres y una parte mayoritaria del otro de los padres. En este paso se aplica el operador de cruce basado en un punto 133

FIGURA 93. Segunda parte del ciclo reproductivo de los algoritmos genéticos: mutación de los descendientes, con una cierta probabilidad. En este paso se aplica el operador de mutación 133

FIGURA 94. Representación esquemática del espaldón, caracterizado por un francobordo (Fm), una altura a y un ancho b 135

FIGURA 95. Frente de soluciones obtenida mediante la aplicación del algoritmo genético NASGA-II 136

FIGURA 96. Esquema simplificado de ingresos y gastos a los que hacen frente el concesionario y la propiedad. En rojo se ha marcado el flujo de salida (costes) y en azul el flujo de entrada (ingresos) 143

FIGURA 97. Relación entre la materialización de un modo de fallo o parada sobre el inmovilizado material o las actividades, y riesgos asociados 143

FIGURA 98. Tipos de coste que se activan tanto para la infraestructura como para las actividades en función del nivel de vulnerabilidad determinado para un determinado modo de fallo 148

FIGURA 99. Tasas relacionadas con el nivel de actividad, que puede verse reducido por afecciones sobre el inmovilizado material o sobre las propias actividades 148

FIGURA 100. Tipos de coste que se pueden registrar al verse afectadas las actividades 148

FIGURA 101. Posibles consecuencias sobre la actividad económica derivadas de la ocurrencia de un modo de fallo que genere paradas operativas superiores a 6 meses (en el caso de las concesiones) y de 12 (en el caso de las autorizaciones) 149

FIGURA 102. Esquema de la serie temporal de ingresos percibidos por la autoridad portuaria antes y después de la ocurrencia de un modo de fallo (*MF*), en naranja rosa continuo y línea de puntos, respectivamente..... 149

FIGURA 103. Esquema ilustrativo de una curva de amortización, antes y después de producirse un modo de fallo (*MF*), en línea continua y punteada, respectivamente. Se ha sombreado el capital pendiente de amortizar en el momento de producirse el modo de fallo, y que no podrá ser amortizado con la actividad desarrollada en la obra debido a que ésta se ha visto obligada a cesar 149

FIGURA 104. Flujo de caja (*Cash-flow*) de un proyecto. En la fase de construcción será negativo, debido a que se ha realizado una inversión. En la fase de explotación debe ser positivo, debido a que percibe ingresos por la actividad que sustenta la obra. Sin embargo, al producirse un modo de fallo (*MF*), se registran pérdidas debido a que estos ingresos dejan de producirse 149

FIGURA 105. Esquema de las posibles consecuencias de la ocurrencia de un modo de fallo. si es severo y las reparaciones ocupan un periodo superior a 6 o 12 meses, las consecuencias serán las indicadas en el caso anterior. Si el modo no es muy severo y las reparaciones ocupan menos de 6 o 12 meses, se debe evaluar la vulnerabilidad del inmovilizado material y de las actividades. Las consecuencias variarán si la autoridad portuaria decide modificar o no las tasas para mitigar parte del efecto del fallo sobre el operador..... 150

FIGURA 106. Esquema de los ingresos percibidos por la autoridad portuaria en concepto de tasas, antes y después de la manifestación de un modo de fallo (*MF*), en línea continua y discontinua, respectivamente. de acuerdo con el esquema de la figura 140, en el caso de que la AP decida no modificar las tasas para aumentar la competitividad de sus instalaciones, cabe la posibilidad de que los ingresos se queden por debajo del mínimo admisible por la AP..... 150

FIGURA 107. Posibles consecuencias de la manifestación de un modo de parada operativa que puede conducir a una disminución de las tasas de actividad y utilización. Existen dos posibles ramificaciones: que no se alcancen los objetivos marcados por la AP en relación a las Tasas de Actividad y las de Utilización, o que sí se alcancen..... 150

FIGURA 108. Esquema de ingresos por tasas de la Autoridad Portuaria antes y después de la materialización de un modo de fallo. Se ha representado el escenario en el que la AP lleva a cabo la modificación de las tasas para aumentar su competitividad 151

FIGURA 109. Esquema de los beneficios de un concesionario a lo largo del tiempo, antes y después de la materialización de un modo de fallo (*MF*) y la vuelta a la actividad. Las previsiones previas a la ocurrencia del modo están marcadas con líneas continuas y las posteriores con discontinuas. Se puede ver cómo variarían teóricamente los beneficios con y sin modificación de tasas por parte de la Autoridad Portuaria 151

FIGURA 110. Fases propuestas en la metodología para la caracterización del riesgo 155

FIGURA 111. Consideraciones generales para proceder a la gestión del riesgo..... 156

FIGURA 112. Representación de la productividad mínima admisible que se debe alcanzar en la terminal para que se alcancen los objetivos económicos establecidos 156

FIGURA 113. Representación de la disminución que sufre la productividad de la actividad de carga y descarga ($P2<P1$) como resultado de la perturbación inducida por un agente climático, en este caso, el viento..... 157

FIGURA 114. Selección de los modos de fallo/parada que colaboran en la reducción de la productivididad media anual por debajo de los límites establecidos..... 157

FIGURA 115. Tensores en los que se almacena la información necesaria para generar el mapa de riesgo 158

FIGURA 116. Tensores en los que se almacena la información necesaria para generar el mapa de riesgo 158

FIGURA 117. Relación esquemática de las relaciones funcionales entre los elementos de infraestructura, las actividades portuarias, los terminalistas y la autoridad portuaria 159

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Ejemplos de los tipos de riesgo a los que está sometido un proyecto y relación de los mismos con el actor del sistema económico que se encuentra en mejores condiciones de afrontarlo (OECD/*International Transport Forum*, 2009) 43

TABLA 2. Tipo de coste que se activa en función del nivel de vulnerabilidad para el ejemplo propuesto 62

TABLA 3. Tipo de coste que se activa en función del nivel de vulnerabilidad para el ejemplo propuesto 62

TABLA 4. Resumen de los gastos derivados de la ocurrencia de modos de fallo o paradas operativas que son considerados en esta guía 63

TABLA 5. Modelo de descripción de riesgos según la CEI 73 69

TABLA 6. Ejemplos de estimación de las consecuencias según la información financiera y la preocupación de los interesados 70

TABLA 7. Ejemplos de estimación de la probabilidad de ocurrencia en función de a los indicadores 70

TABLA 8. Costes asociados al nivel de vulnerabilidad de la infraestructura 78

TABLA 9. Fases por las que pasa un proyecto constructivo 79

TABLA 10. Diferentes escalas temporales en las que se puede proceder a la verificación 79

TABLA 11. Identificación de los modos de fallo adscritos a cada estado límite en el elemento de obra “dique vertical exento” 96

TABLA 12. Ejemplo de la información de partida necesaria para obtener un valor representativo de un agente del medio físico 102

TABLA 13. Fuentes de información disponibles para la caracterización de parámetros, clasificados en función del nivel de detalle requerido 104

TABLA 14. Fuentes de información disponibles para la caracterización de agentes, clasificadas en función del nivel de detalle requerido 105

TABLA 15. Probabilidad de fallo máxima admisible en ELU para determinados valores de IRE e ISA .. 110

TABLA 16. Probabilidad de fallo máxima admisible en ELU para determinados valores de IRE e ISA .. 110

TABLA 17. Frecuencias relativas [%] de cada sector para la rosa de la Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 04-95 117

TABLA 18. Frecuencias acumuladas (%) para la rosa de la Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 04-95 117

TABLA 19. Frecuencias acumuladas de la rosa de los vientos de la Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 0.4-95 118

TABLA 20. Funciones de activación habituales (Martín & Sanz, 2006) 128

TABLA 21. Familias de costes consideradas en esta guía, agrupadas por las partidas presupuestarias a las que corresponden 143

TABLA 22. Estimación de las funciones de producción para el sector portuario (Tovar, Jara-Díaz & Trujillo, 2004-2006) 145

TABLA 23. Estimación de funciones de costes para el sector portuario (Tovar, Jara-Díaz & Trujillo, 2004-2006) 145

1. INTRODUCCIÓN

1.1. EL CÁLCULO DEL RIESGO COMO EJE DE LA INGENIERÍA PORTUARIA DEL SIGLO XXI

La previsión económica de las Autoridades Portuarias contempla, entre otros conceptos, la inversión necesaria para la construcción de obras e instalaciones, así como los gastos de explotación, donde se incluyen los de reparación y conservación. Actualmente no se dispone de una metodología consensuada por el sector para cuantificar los gastos derivados de la ocurrencia de fallos del sistema, que se sabe pueden afectar a la obra tanto en su fase de construcción, servicio y/o explotación. La gran dispersión económica que genera este vacío en el ámbito portuario revela la importancia de contar con herramientas que ayuden a reflejar dichas pérdidas a nivel presupuestario.

La disposición de activos destinados a sufragar gastos derivados de modos de fallo o paradas operativas, tales como compensaciones económicas por pérdida temporal de actividad de los concesionarios o indemnizaciones generadas por afecciones medioambientales permite evitar el endeudamiento y limitar la dispersión presupuestaria que, hoy en día, es inconcebible. Uno de los posibles enfoques para realizar una previsión económica de cara a la ocurrencia de dichos sucesos es mediante el análisis del riesgo.

Este tipo de análisis contempla cuatro factores determinantes para que el proyecto cumpla con los requisitos tanto económicos como funcionales dentro del periodo de tiempo establecido por el evaluador del riesgo: la existencia de fallos y/o paradas operativas, el cálculo de su probabilidad de ocurrencia, el grado de afección de estos modos a la fiabilidad y operatividad de la obra, y las consecuencias económicas derivadas de estos sucesos. El Riesgo permite, por tanto, determinar con qué probabilidad se pueden producir fallos o paradas operativas, y qué repercusiones económicas va a tener cada uno de ellos. El salto cualitativo entre los diseños deterministas y los probabilistas radica en la posibilidad de establecer una probabilidad de fallo o parada máxima admisible, lo que favorece que se desarrollen diseños constructivos y de explotación más eficientes.

Los diseños basados en criterios deterministas emplean lo que se conoce como márgenes de seguridad o coeficientes de seguridad. Estos márgenes son el resultado del compromiso entre la viabilidad económica de la ejecución de la obra y la necesidad tradicional de crear obras no vulnerables. Desde el punto de vista de la fiabilidad, la funcionalidad y la operatividad, las obras u explotaciones no se han de dimensionar con márgenes de seguridad, sino en función de la probabilidad de aparición de modos de fallo o paradas que comprometan, a lo largo de su vida útil, la actividad para la cual fueron concebidas.

A día de hoy se desconoce cuál es la equivalencia entre el riesgo al que está sometido un diseño basado en la aplicación de coeficientes/márgenes de seguridad y al que está sometido un diseño creado a partir de criterios probabilistas. Lo que sí se puede afirmar es que es necesario definir, u obtener, la probabilidad de ocurrencia de los modos de fallo o parada de cada elemento y tramo que componen nuestro sistema portuario, para así acotar la incertidumbre.

Es importante destacar que son múltiples los agentes que afectan a las obras marítimas en cada emplazamiento. Éstos son heterogéneos en magnitud, y el nivel de operatividad de las instalaciones es altamente dependiente de ellos, por lo que parece difícil que los valores deterministas que actualmente se emplean en el diseño sean capaces de recoger la diversidad casuística que acontece a lo largo de la vida útil de la obra.

Los diseños basados en criterios de fiabilidad presuponen que todas las obras e infraestructuras han de fallar a lo largo del tiempo. Por lo tanto, una de las diferencias primordiales entre los modelos deterministas y los probabilistas es que con estos últimos se proyecta para que el fallo suceda en el marco de un conjunto o secuencia de mecanismos de fallo previstos en el diseño y con unas probabilidades de ocurrencia y riesgos asociados. Estos riesgos son asumidos por el conjunto de actores que participan en el desarrollo del proyecto, es decir, promotor, proyectista, responsable de la ejecución y operador. De este modelo de diseño, se deriva un profundo conocimiento de los mecanismos e interacciones que dan lugar a pérdida de fiabilidad, funcionalidad y operatividad en el sistema, lo que permite acotar los riesgos.

Estos modos o mecanismos de fallo o parada pueden ser verificados mediante ecuaciones funcionales aplicando la hipótesis de que en cada incremento de tiempo, las manifestaciones del conjunto de factores de proyecto son estacionarias y uniformes desde un punto de vista estadístico. Estas ecuaciones funcionales pueden ser sustituidas, entre otros, por modelos numéricos, redes neuronales o algoritmos genéticos, siempre que no existan relaciones analíticas entre los agentes y los parámetros que participan en los modos de fallo.

El objetivo principal de este texto es proporcionar metodologías y herramientas para el desarrollo de análisis de fiabilidad, funcionalidad y operatividad en el ámbito de la Ingeniería Marítima y Portuaria, con el fin de que el concepto de riesgo pueda ser definido y analizado dentro de un marco económico concreto. Además, se trata de acercar al lector las técnicas estadísticas y de simulación básica con las que pueda poner en práctica los métodos de verificación propuestos dentro del marco del Programa ROM, base de la ingeniería portuaria española del siglo XXI. Los autores siendo conscientes de la obsolescencia programada de los contenidos, desean, que el lector se inicie en el concepto de gestión del Riesgo.

1.1.1. Ventajas que aporta la aplicación de análisis probabilísticos en ingeniería marítima y portuaria

La existencia de incertidumbres en la definición de cargas, geometría, procedimientos constructivos, modelos de cálculo, propiedades de los materiales, etc., *afecta a la eficiencia económica* de los modelos de planificación, diseño, ejecución y explotación de infraestructuras públicas y privadas.

Las herramientas que permiten desarrollar análisis probabilísticos, tales como las redes neuronales, las simulaciones de Montecarlo o los sistemas de adquisición de series temporales de los agentes que interactúan con la obra, no están siendo utilizadas en general por los profesionales dedicados a planificar, proyectar y gestionar las obras marítimas, ya que no se dispone de información suficiente sobre cómo aplicar el procedimiento de verificación, y además, hay poca experiencia acumulada al respecto. Por este motivo, la comunidad científica y técnica que emplea este tipo de análisis está realizando esfuerzos para mejorar la calidad de las variables de entrada y de los métodos de simulación, y para que los programas informáticos que procesan esta información sean más cómodos y sencillos de manejar.

Las fortalezas que ofrece la aplicación de métodos probabilísticos para la verificación de diseños en ingeniería se recoge en una lista elaborada por Long (Long, 1999) basada en la experiencia de profesionales que han trabajado con este tipo de análisis, y que se muestra a continuación.

Permite cuantificar el riesgo del diseño (o su fiabilidad) en la fase de diseño

Los análisis deterministas tienen en cuenta las incertidumbres en el diseño a través de la aplicación de un factor (de incertidumbre) por el que se multiplica la máxima magnitud esperada con el fin de que en el diseño se emplee dicho valor, para alejarnos de la posibilidad de que se produzca un fallo. En ingeniería civil, estos factores suelen ser del orden de 1 a 3 (Puertos del Estado, 2005). El método de los coeficientes de seguridad global y el método de los coeficientes parciales se aplican en prácticamente todos los campos de la ingeniería civil y la ROM 0.0 (Puertos del Estado, 2001) los considera como método de verificación de Nivel I.

A diferencia de éste, el análisis probabilístico considera la mayoría de los parámetros de diseño (si no todos) como variables lo que, combinado con los modelos de respuesta del sistema empleados, proporciona una medida cuantitativa de la fiabilidad, entendida como la probabilidad de que no se produzca un fallo a lo largo del periodo de tiempo considerado. Este hecho permite realizar una planificación económica coherente con las amenazas del sistema en la fase de diseño, por lo que es posible ahorrar tiempo y costes que, de lo contrario, se multiplicarían a posteriori.

> *Dentro del ámbito de la ingeniería aeronáutica cabe citar que la NASA prevé especificar los requisitos de diseño de los futuros vehículos espaciales en términos de fiabilidad.*

Se pueden identificar las zonas en las que los riesgos se concentran, ya en la fase de diseño

Normalmente, el riesgo es función de la probabilidad de fallo que se tiene en localizaciones específicas del tramo de obra que se esté analizando. La realización de análisis de riesgo en etapas tempranas del proyecto permite tomar medidas para reducirlo a través de modificaciones en el diseño. Así, los procesos constructivos podrían especificarse y hacer, por ejemplo, que, en las zonas críticas, las tolerancias de construcción fuesen más estrictas. Las buenas prácticas, la vigilancia y el control son actividades imprescindibles para limitar la probabilidad de fallo, y por tanto, el riesgo.

Permite determinar la importancia de las variables de diseño en la fiabilidad del tramo de obra o elemento analizado

Para llevar a cabo análisis probabilísticos se necesita considerar una gran cantidad de información, ya que uno de los requisitos del método es que se comprendan las interacciones entre la obra y el entorno, así como la sensibilidad de la fiabilidad a las variables de diseño. Una vez que se cuenta con esa información, es posible modificar los diseños para optimizar el número de soluciones de que se dispone y compararlas: reforzar o relajar las tolerancias de construcción, modificar las configuraciones en planta y alzado, la organización operativa, etc.

Proporciona un criterio de comparación entre alternativas de diseño

Además de poder comparar, una vez obtenidos, los valores de fiabilidad globales de diseños alternati-

vos, el análisis probabilístico identifica las combinaciones de variables y las localizaciones en las que la fiabilidad difiere entre los diseños comparados. Esto facilita la comprensión del comportamiento del elemento o tramo analizado y la mejora de los diseños en función de este conocimiento.

Se reduce el conservacionismo

En el ámbito de los cálculos estructurales, en el análisis de clima marítimo o en el estudio de los niveles de operatividad, normalmente es necesario tener en cuenta un elevado número de variables para estudiar cada proceso, lo que dificulta el conocimiento de cuál es la importancia relativa de cada una de ellas en el mismo. En los análisis deterministas se asume que el elemento analizado estará sometido a las peores condiciones de temperatura, tensiones, resistencia del material, condiciones de humedad, etc. Estas hipótesis suelen conducir a un diseño conservador. Los métodos probabilísticos tienen en cuenta la probabilidad de ocurrencia de estos eventos y los combinan estadísticamente a través de unos criterios de ordenación, con lo que se ajusta en mayor medida a la realidad de las interacciones.

Proporciona un modo de establecer los intervalos óptimos de inspección - reparación

El análisis probabilístico modela la respuesta del sistema frente a los agentes que interactúan con él, información que puede emplearse para establecer intervalos óptimos de tiempo para ejecutar las inspecciones, modificaciones o reparaciones de las instalaciones, de modo que se alcancen los objetivos de seguridad y explotación marcados en el diseño a lo largo de la vida útil de la obra.

Proporciona un mecanismo para establecer y clarificar la política de seguros

El análisis probabilístico proporciona un método para estimar la frecuencia con la que se puede producir cada modo de fallo y así, generar información básica para las partes que conforman un contrato de aseguramiento de la obra, concesiones, etc.

La conclusión fundamental que se recoge de los puntos anteriores es que el incorporar métodos probabilísticos para la evaluación de riesgos en la fase de diseño obliga al proyectista a comprender un problema que implica la integración de varias disciplinas, permite al diseñador cuantificar el riesgo inherente y proporciona un modo de evaluar la sensibilidad de los parámetros de diseño en el cómputo del riesgo global. Por lo general, los métodos probabilísticos requieren de un análisis más detallado del problema ingenieril, lo que en última instancia puede derivar en un diseño mejorado y más eficiente.

1.1.2. Consideraciones básicas sobre la aplicación de técnicas probabilísticas y sus limitaciones

La realización de un análisis probabilístico en la ingeniería marítima y portuaria tiene como objetivo fundamental la definición de la fiabilidad, funcionalidad y operatividad del tramo de obra considerado, expresada en términos de probabilidad para un periodo de tiempo, que por lo general es su vida útil. Suele ser un objetivo de complejo alcance debido al elevado número de variables a tener en cuenta en la modelización, pero que a su vez es muy valioso para los promotores y los operadores de las instalaciones.

El método ofrece una serie de oportunidades como las recogidas en el apartado anterior, pero también plantea algunas dificultades, las cuales se describen a continuación.

Se requieren conocimientos en ingeniería y estadística por parte del que los aplica

Para poder aplicar los métodos probabilísticos, se requieren conocimientos básicos sobre teoría de la probabilidad y estadística en lo que concierne a su aplicación práctica en ingeniería. La comprensión profunda del problema requiere sin embargo conocimientos más avanzados, dado que la teoría en la que se fundamenta la mayoría de estos métodos es compleja. Es de igual o mayor importancia que se comprenda íntegramente el diseño de obra marítima y de las actividades de explotación portuaria, por lo que la experiencia en diseño y gestión es clave. Derivado de lo anterior, se puede inferir que el usuario ideal de este tipo de modelos es un experto en ingeniería marítima y/o explotación portuaria (según si se quiere estudiar verificación para estado límite último o estado límite operativo) dotado a su vez de un notable nivel de conocimientos estadísticos.

Es necesario dedicar recursos adicionales

Se necesita tiempo y personal experto para diseñar y programar los modelos probabilísticos, especialmente si se integran con análisis basados en modelos existentes, los cuales ya de por sí consumen una gran cantidad de tiempo. Del mismo modo, dependiendo del tipo de método de análisis empleado, la ejecución de los análisis requiere recursos computacionales considerables.

Falta de datos estadísticos

Las hipótesis de extrapolación e interpolación de datos que son empleados en estadística pueden conducir a una interpretación errónea de la naturaleza y del comportamiento de las variables de diseño que consecuentemente impacta sobre la

veracidad de los resultados del análisis. Por tanto, hay que estudiar muy bien el comportamiento de cada variable para saber si al realizar extrapolaciones o interpolaciones se pueden estar cometiendo errores de partida.

Implicaciones legales de la verificación probabilística

En estos momentos, las implicaciones legales (Rosbjerg, Madsen, & Rasmussen, 1992) de la aplicación de los métodos probabilísticos en la verificación de las obras civiles no están definidas. El nivel de riesgo asociado a un diseño determinista nunca ha sido cuantificado, aun sabiéndose que existe. Del mismo modo, no se ha establecido un valor umbral de riesgo en función de la actividad por las dificultades que plantea la aceptación social del mismo. Las obras diseñadas mediante métodos probabilísticos requieren que se identifique un modo de fallo, que lleva asociada una probabilidad de ocurrencia. La existencia de la misma, por pequeña que sea, puede derivar en un gran número de ramificaciones e indefiniciones sobre las responsabilidades legales de los contratantes en caso de que el fallo se materializara, si no se definen a priori los requisitos de fiabilidad de la obra.

> *La sociedad necesita que los políticos, técnicos y gestores transmitan que el riesgo, entendido como el fallo de una infraestructura, la afección de un ecosistema por la actividad antrópica o el fallecimiento de individuos en el quehacer diario, debe ser asumido. Es obligación de los anteriores acotar y disminuir, en la medida de lo posible, el sufrimiento causado al hombre y la antropización del medio natural. Pero, para ello, hay que partir de la base de que la incertidumbre rige nuestra existencia y que, de momento sólo el estudio aleatorio permite acotar cómo, con qué probabilidad y con qué consecuencias suceden los fenómenos a nuestro alrededor.*

Certificación en el diseño

En la actualidad, los valores de los parámetros que se introducen como entradas en los programas para calcular las deformaciones del terreno, esfuerzos estructurales, oleaje, etc., son deterministas, pues en ellos se elige un parámetro de resistencia (de altura de ola o de humedad relativa del terreno en cada simulación de estado) sin contemplar la evolución temporal de los mismos, ya sea mediante modelos funcionales de evolución o funciones de distribución. ¿Cómo se puede diseñar una estructura para un determinado nivel de fiabilidad si los parámetros del modelo numérico son deterministas? La mayoría de los autores coinciden en que este aspecto es un obstáculo para la implantación generalizada de las metodologías probabilísticas.

La incertidumbre siempre está presente

El ingeniero debe tener en cuenta los escenarios, variables e interacción entre los modos de fallo más importantes. Sin embargo, cabe la posibilidad de que en alguno de estos escenarios no se puedan contemplar todos y cada uno de los aspectos que interaccionan o confluyen en la localización del elemento analizado. Esto es conocido como incertidumbre, y siempre va a estar presente con mayor o menor magnitud.

Sensibilidad de colas

Cuando se especifica que el elemento analizado debe tener una elevada fiabilidad (de 0.99999 o más), es necesario emplear modelos paramétricos, dado que no se suele disponer de suficientes datos en las colas para realizar una modelización probabilística de las mismas. Esto implica que los datos se deben ajustar mediante una función paramétrica.

Las desviaciones de las funciones de ajuste con respecto a los datos reales en las colas (tanto superior como inferior) pueden afectar a las estimaciones de alta fiabilidad, dado que ésta es muy dependiente de la función paramétrica seleccionada.

Un famoso estadístico (Box, 1979) escribió que "todos los modelos son malos, pero algunos son útiles", lo que significa que se pueden aceptar los modelos paramétricos, pero tomando la precaución de haber realizado previamente un análisis crítico sobre los mismos y aportando las consideraciones y notas necesarias para no llegar a conclusiones infructuosas. Una de las tareas del analista de riesgos y fiabilidad es la de investigar las posibles consecuencias del empleo de datos extraídos del modelo paramétrico seleccionado.

Hay varias aproximaciones disponibles a los análisis probabilísticos

(Ebberle, Newlin, Sutharshana, & Moore, 1994) redactaron una discusión muy completa sobre cuáles son las ventajas e inconvenientes de cada modelo probabilístico que se contempla en el estado actual.

Se debe poder proceder a la verificación mediante ecuaciones o modelos numéricos

Uno de los primeros pasos para desarrollar un análisis probabilístico es identificar los modos de fallo. La verificación se puede desarrollar mediante la evaluación de la ecuación de verificación del modo (si se dispone de ella), o bien mediante modelos como las redes neuronales, que no requieren de ecuación de verificación en su forma más estricta, sino de condiciones de relación entre las variables.

1.1.3. Objetivos de este texto

El principal objetivo de este documento es el de proporcionar una metodología que permita a los usuarios evaluar los riesgos derivados de la ocurrencia de los principales modos de fallo o paradas operativas que se pueden presentar a lo largo de la vida útil de la obra o de cualquier otro periodo de tiempo.

Los objetivos derivados del principal se enumeran a continuación:

- Presentación de una metodología para identificar los riesgos, sus causas y consecuencias, que sirva de ayuda a la gestión de los recursos portuarios en todas las fases del proyecto.
- Describir el concepto de Riesgo y adoptar una definición en base a la cual proceder a su evaluación.
- Identificar los conceptos relacionados con el Riesgo y seleccionar los que mejor se acomodan a la casuística presente en la ingeniería marítima y portuaria.
- Definir y describir el concepto de Vulnerabilidad.
- Poner de manifiesto que hay una serie de costes que la propiedad o el explotador debe asumir en el caso de que se produzcan fallos o paradas operativas, los cuales no se están incluyendo en las planificaciones presupuestarias.
- Poner de manifiesto el hecho de que, en las etapas tempranas de un proyecto u obra, no se identifican sistemáticamente los modos de fallo o paradas operativas que pueden tener lugar, y por tanto, no se puede desarrollar una gestión preventiva.
- Ofrecer a los usuarios información sobre cómo caracterizar los factores de proyecto, principalmente climáticos y operativos.
- Proporcionar un listado de las fuentes de información disponibles hasta la fecha de redacción de este documento sobre los factores de proyecto.
- Recopilar los métodos de verificación disponibles, que requieran o no ecuaciones de verificación, así como sus ventajas y limitaciones.
- Generar ejemplos sencillos y explicativos que permitan comprender con facilidad los conceptos recogidos en este documento.

Como comentario general, los autores desean hacer hincapié en que a lo largo del texto se describirán con mayor detalle aquellos aspectos que no están desarrollados en las Recomendaciones de Obras Marítimas porque se suponen conocidos (conceptos estadísticos, métodos probabilistas, etc.), y se darán ejemplos de los conceptos que se abordan en dichos textos.

1.1.4. Bases conceptuales necesarias para entender esta guía

Se recomienda que los usuarios de esta Guía dispongan de conocimientos básicos de probabilidad y estadística. Para aquéllos que deseen iniciarse en la materia, en los apéndices se recoge un resumen teórico que puede servir de guía para el autoaprendizaje, y que debe ser complementado con material externo si se desea desarrollar modelos más complejos de los que se presentan aquí. No obstante, las bases conceptuales del documento se pueden seguir sin ser un profundo conocedor de la parte matemática.

1.1.5. Campo de aplicación recomendado

Este libro tiene la finalidad de proporcionar una metodología para calcular el riesgo mediante métodos probabilísticos en el campo de la ingeniería marítima y la explotación portuaria. Esta metodología permite conocer los aspectos necesarios para calcular el riesgo, dependiendo de la experiencia del usuario y la disponibilidad de información. Para aquéllos que no hayan empleado estos métodos con anterioridad, se recomienda comenzar con ejemplos sencillos para ir incrementando la complejidad de los mismos a medida que se tenga un dominio adecuado sobre la metodología.

1.1.6. Organización del documento

El presente documento consta de 10 capítulos y 7 anexos.

En el Capítulo 1 se establecen los objetivos de la guía, y se ofrece una reflexión sobre las ventajas que proporciona la evaluación del riesgo en ingeniería, así como las consideraciones básicas que es necesario tener en cuenta a la hora de llevarla a cabo. En el Capítulo 2 se realiza un breve recorrido histórico sobre la estimación del riesgo y la probabilidad desde la Antigua Mesopotamia hasta nuestros días. En el Capítulo 3 se desarrolla el marco conceptual del Riesgo y los términos que en la literatura se emplean para calcularlo, y por último, se propone emplear un sistema de información geográfica para gestionar espacialmente la información obtenida. La descripción del procedimiento para la evaluación del riesgo en si se aborda a partir del Capítulo 4. Concretamente, el Capítulo 5 está dedicado a la identificación de los modos de fallo; el Capítulo 6 trata sobre la adscripción de los modos de fallo o parada a los estados límite correspondientes, mien-

tras que el Capítulo 7 aborda la caracterización de los factores de proyecto. Dado que los principales agentes que se pueden considerar son los del medio físico, el Capítulo 8 se ha dedicado a, en primer lugar, describirlos y a identificar dónde se puede encontrar información sobre los mismos. En este mismo capítulo, en segundo lugar, se recopilan los métodos de verificación más comunes, de tal modo que se facilite al lector la elección de aquél que resulte más conveniente según la naturaleza de la propia verificación o de la calidad o disponibilidad de la información de partida de que disponga. Como se verá más adelante, uno de los términos que presenta un mayor reto para evaluar el riesgo es la cuantificación de las pérdidas económicas asociadas a la materialización de un modo de fallo o parada operativa. Por ello, en el Capítulo 9 se recogen las consideraciones básicas a tener en cuenta para evaluar los costes. Dado que el objeto de calcular el riesgo es poder proceder a su gestión, en el Capítulo 10 se dan las claves para ello. Los anexos versan sobre los siguientes aspectos:

- ANEXO 1: Glosario sobre los términos relacionados con el riesgo.
- ANEXO 2: Fuentes de información para la caracterización del medio físico.
- ANEXO 3: Recopilación de los fundamentos del cálculo probabilísticos.
- ANEXO 4:Funciones más empleadas en la caracterización de las variables aleatorias y espectrales.
- ANEXO 5: Cálculo de regímenes, de cola inferior, medio y de cola superior.
- ANEXO 6: Cálculo de incertidumbres y teoría sobre la caracterización de errores.
- ANEXO 7: Ejemplo metodológico que muestra cómo evaluar los términos que se proponen en esta guía para la cuantificación del riesgo.

2. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA AL CONCEPTO DE RIESGO

En este apartado se recogen momentos de la historia en los que diferentes culturas hicieron mención o consideraron el riesgo y la probabilidad para resolver problemas o tomar decisiones, con el fin de destacar la importancia que ambos conceptos han tenido en las actividades cotidianas y profesionales de nuestros antepasados. Se recomienda su lectura detenida para comprender cómo se ha llegado a las diferentes formulaciones que se proponen en apartados posteriores. Los lectores que deseen consultarlas directamente deben acudir al apartado 3.2.

2.1. EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE RIESGO EN LA ANTIGÜEDAD

2.1.1. En el Medio Oriente (3200 a. C)

Asipu era el nombre con el que se conocía a un grupo consultor de riesgos que residía en el valle de los ríos Tigris y Éufrates (la zona que actualmente ocupa Iraq), en torno al año 3200 a.C. Estos consultores actuaban como consejeros sobre el riesgo, las incertidumbres y las decisiones difíciles a las que sus clientes se debían enfrentar. Asipu asesoraba sobre cuestiones muy diversas: acuerdos matrimoniales, emplazamientos para nuevos edificios o soluciones a problemas de diversa índole a los que se podía enfrentar cualquier tipo de empresa.

FIGURA 1. Fracción de la estela del Código de Hammurabi, localizada en el Museo del Louvre (París)

Este grupo identificaba la dimensión del problema, las alternativas de actuación, y recopilaba información para determinar cuáles podían ser las consecuencias más probables. Desde su perspectiva, los mejores datos de que disponían por aquel entonces se reducían a los signos o manifestaciones divinas, que eran interpretados por los miembros de Asipu. Lo novedoso de su práctica es que éstos creaban un cuadro comparativo, en el que existía un espacio asignado para cada alternativa considerada. Si los signos divinos eran favorables, entonces le asignaban un signo positivo "+" a la alternativa tenida en cuenta. En caso contrario, le asignaban un signo negativo "-". Al finalizar la evaluación de alternativas, Asipu recomendaba la mejor y le proporcionaba al cliente un informe detallado grabado en una tabla de arcilla. De acuerdo con , la práctica de Asipu fue el primer caso de análisis simplificado del que se tiene constancia. Las semejanzas entre los métodos empleados por los modernos analistas de riesgo y los de los antepasados babilónicos revelan la importancia del riesgo en la toma de decisiones desde el principio de la historia.

La práctica de Asipu no era muy frecuente en ese periodo histórico, ya que ellos no aseguraban prever el futuro, sino que basaban la construcción de sus consejos en un proceso de identificación de las dimensiones del problema, considerando alternativas y recopilando datos. La práctica era similar a la moderna metodología de administración equilibrada de riesgos aleatorios donde las alternativas se marcan con signos positivos o negativos dependiendo de su favorabilidad. A pesar de que Asipu era una práctica de organización de signos divinos, datos e hipótesis subyacentes, la probabilidad, tal y como la conocemos, no se empleaba.

También en Babilonia, hace ya más de 4.000 años, se originó el primer tipo de indemnización derivada de riesgos asociados a los viajes terrestres. Babilonia era un pueblo de comerciantes de Oriente, que traficaban con caravanas de mercaderes que llevaban mercancías de inestimable valor, tales como sedas exóticas, tapices, joyas y especies diversas. Para asegurarse contra las contingencias de los largos y penosos viajes, los empresarios de las caravanas unían sus efectivos y se comprometían a indemnizarse mutuamente en caso de que alguno de ellos perdiera sus mercaderías o sus camellos a causa de robo o asalto, hechos comunes en aquellos tiempos. Los préstamos se extendieron en las mercancías en tránsito e incluían primas de riesgo de hasta un 200% de interés. El prestamista normalmente apostaba todas sus propiedades e incluso su familia, por lo que los contratiempos podían llegar a ser verdaderamente catastróficos. Se generalizaron entonces los llamados "préstamos a la gruesa", también aplicados al transporte marítimo, que estaban compuestos por tres elementos:

a) El préstamo del buque, la carga o el flete
b) Una tasa de interés
c) Una prima de riesgo por la posible pérdida y la cancelación de la deuda consiguiente

El documento legislativo más antiguo en el que se pueden encontrar normas reguladoras del transporte marítimo es el Código Hammurabi, nombre que hace mención al VI rey de Babilonia (2000 a.C.), el cual lo ordenó grabar en un cilindro de piedra . El código consta de 282 párrafos, de los cuales se han perdido 35, y constituye el documento de este tipo más antiguo que se conoce. Contiene algunos artículos (del 239 al 240 y del 275 al 277) re-

lacionados con las construcciones navales, medidas de los fletes y las convenciones sobre la responsabilidad del transportista. En el código ya figuraba una especie de seguro de crédito y de transporte (tanto de buques como de mercancías), y lo que en él se recoge sentó las bases del seguro actual y del transporte marítimo, así como de los conceptos de préstamo, tasa de interés y prima de riesgo.

Los armadores de la Antigüedad financiaban sus expediciones comerciales con los préstamos de determinados inversores, a los cuales no les tenían que reintegrar el importe en el caso de que se hundiera el barco. No obstante, dado que muchos buques regresaban a puerto sin percances, los intereses que pagaban sus armadores servían de compensación a los prestamistas.

El Contrato de Fletamento es la figura más antigua de los contratos contemporáneos de transporte marítimo de mercaderías. Tiene sus precedentes en la praxis comercial que realizaban tanto los primitivos fenicios como los egipcios y los griegos, siendo recogido ulteriormente en el Derecho Romano.

En Asiria, donde los incendios causaban cuantiosas pérdidas a los suntuosos y magníficos edificios, los Sumos Sacerdotes vieron consumirse de la noche a la mañana sus espléndidos tesoros. Debido a tales circunstancias, obtuvieron del soberano la facultad de decretar la repartición del riesgo entre toda la colectividad. Si bien este tipo de compensación difiere mucho del seguro moderno, revela cómo en la Antigüedad el hombre sentía ya la necesidad de buscar en el seguro la previsión contra lo desconocido.

> *También en Mesopotamia, los granjeros comenzaron a prestar parte de sus tierras de cultivo a cambio de una parte de los productos obtenidos de los mismos. Posteriormente, en el intercambio de productos entró en juego la plata. Cuando las tasas de interés comenzaron a reflejar el riesgo del arriendo, se comenzó a cuantificar y gestionar el riesgo. También fue la agricultura la que motivó los estudios realizados por los egipcios para determinar la cantidad de cosecha que tendrían cada año en función de los niveles registrados en el Nilo durante los años precedentes*

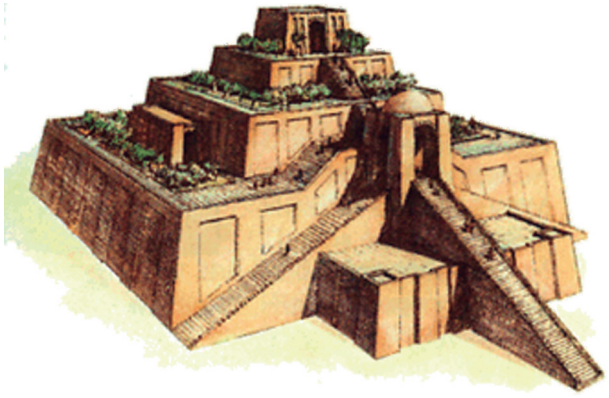


Figura 2. Ilustración de un Zigurat Mesopotámico.

2.1.2. En el Antiguo Egipto (siglo XVIII a.C.)

Todas las grandes civilizaciones de la Antigüedad trabajaron para mitigar los efectos negativos de los desastres naturales. Los registros indican que, a lo largo de la historia, los gobiernos han jugado un papel muy importante en el desarrollo y la financiación de elementos de control de riadas, como la construcción de presas, diques y canales. Uno de los primeros documentos que refleja este hecho fue redactado por Plinio el Viejo (23-79 d.C.), que recoge un sistema elaborado por las autoridades egipcias para combatir el hambre provocada por los desbordamientos del Nilo. Como protección contra un mal año de cosechas, las autoridades egipcias se basaban en datos de inundaciones y excedentes de cosecha de años anteriores. Para establecer las tasas que debían pagar los campesinos, se estudiaba el nivel alcanzado por el río ese año y la cantidad de cosecha obtenida. Este sistema de toma de decisiones sobre medidas temporales en relación con el nivel del Nilo procede del siglo XVIII a.C.

Figura 3. Barcos de vela similares a los que navegaban en la Antigüedad por el río Nilo (Egipto). Fuente: Historiageneral.com

2.1.3. En la Grecia Clásico y Creta (750 a.C.)

En la civilización minoica o cretense, el comercio naval adquirió una notable importancia debido a la peculiar situación de la isla, emplazada en el cruce de las vías entre Siria, Grecia y Egipto. Los fenicios, en sus contactos comerciales con los babilonios, aprovecharían su Derecho mercantil; éste sería desarrollado, enmendado y acondicionado a sus necesidades particulares en el contexto Mediterráneo.
No resulta sorprendente que el primer código organizado de leyes marítimas que conocemos y que

contenía en germen algunos de los principios por los que nos regimos en la actualidad, la "Ley Rodhia de Iactu" o Lex Rhodia (que algunos autores datan en el año 900 – 800 a.C. y otros en el 475 a.C.), fuese codificado en la isla de Rodas, pues durante la Antigüedad era un verdadero emporio comercial por su excelente situación en la cuenca oriental del Mediterráneo. Fenicios y griegos, que en gran número residían en la isla, se repartían con los rodios un considerable volumen de operaciones comerciales.

> *De hecho, el término Riesgo procede del griego, "rhiza", que significa "peligro derivado de navegar alrededor de un arrecife"*

La Lex Rhodia constituye la base del Derecho Mercantil Marítimo, y trataba de repartir los riesgos entre los comerciantes involucrados en el transporte de mercancías. De ese modo, si se producía la pérdida de una embarcación, los gastos derivados eran asumidos por todos los propietarios de la mercancía transportada en el barco. La Lex Rhodia se extendió por todo el Mediterráneo y sirvió posteriormente de inspiración a Roma y Bizancio en la elaboración de sus respectivas legislaciones marítimas.

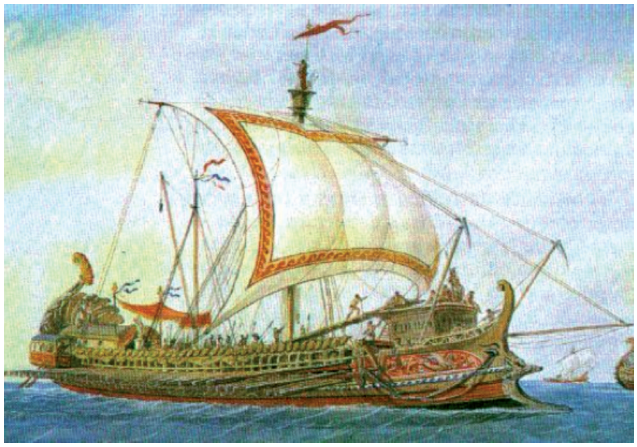


Figura 4. Ilustración de Triere, embarcación griega del siglo V. a.C.

La Grecia Clásica también disponía de una asociación llamada "ERANOL" por la que daban asistencia a los necesitados a través de un fondo común constituido por todos los agremiados.

A partir del 750 a.C. el "préstamo a la gruesa" se extendió profundamente por todo su territorio. Se fundamenta en que un propietario o armador de una nave tomaba como préstamo una suma igual al valor de la mercancía transportada. En caso de feliz arribo, el prestatario se reembolsaba el capital más un interés del 15%; en caso contrario, el prestatario no debía nada. En esos momentos, la mayoría de los viajes estaban cubiertos por este tipo de contratos, con primas de riesgo que oscilaban entre el 10% y el 25%.

Los esclavos tuvieron un papel preponderante en la estructura económica de la Grecia arcaica, pues constituían un elemento de trabajo irremplazable. Según testimonios documentales, los esclavos protagonizaban frecuentes motines que acabaron originando un verdadero clima de inseguridad civil en varios Estados, lo que devino en fugas masivas que supusieron enormes perjuicios a sus propietarios. La huida de esclavos podía arruinar a un propietario y, a fin de compensar las pérdidas que esta situación les generaba, los propietarios formalizaban contratos especiales con los banqueros, quienes, mediante una retribución periódica, se comprometían a indemnizarles en caso de que un esclavo se fugara.

Con el declive de la civilización griega, los romanos continuaron con la aplicación de primas de riesgo, y mantuvieron la Lex Rhodia.

2.1.4. Roma y el fin del seguro marítimo

Las primeras noticias que se tienen sobre el seguro marítimo fueron recogidas por Tito Livio en su "Historia de Roma", del año 59 a.C., en la que hace referencia a la II Guerra Púnica del año 215 a.C. que tuvo lugar en Hispania. Esta guerra fue provocada por los patricios, que monopolizaban el comercio y eran los encargados de avituallar a las tropas, ya que a pesar de disponer un acuerdo con el Senado Romano para el aprovisionamiento de los legionarios, eran finalmente ellos los que asumían los gastos derivados de la guerra. Debido a esto, obligaron al Senado de Roma a asegurarles en una cantidad determinada los envíos con destino a Hispania, lo que les garantizaba el pago de sus adelantos.

Se conoce como *Phoenus Nauticum* a una práctica realizada por la cultura romana basada en anteriores técnicas mercantiles griegas y fenicias. Se trataba de un contrato que tenía como función económica favorecer el comercio marítimo y consistía en la entrega de recursos a un comerciante que se disponía a realizar un viaje por mar. Con esos recursos, el comerciante adquiría mercancías con las que negociar, estipulándose que los restituiría con intereses al llegar el viaje a buen término, mientras que en caso contrario no había obligación de devolver la cantidad recibida ni indemnización alguna. La amortización del capital prestado estaba, por tanto, condicionada a la llegada de las mercancías al puerto de destino. La ventaja del deudor era encontrarse a cubierto de los riesgos de la navegación, mientras el acreedor colocaba su capital a un interés muy elevado (cerca del doble), asumiendo el riesgo de perder todo o parte del capital prestado, de forma que el préstamo cumplía la función aseguradora.

Las asociaciones de legionarios son otras de las instituciones de la Antigua Roma que se anticiparon en cierto modo al concepto del seguro moderno. Estaban formadas por oficiales de las legiones

romanas, a quienes, en tiempos del Imperio, se trasladaba frecuentemente de uno a otro punto del mundo conocido. Para poder hacer frente a los grandes desembolsos que les suponían estos viajes, y para realizarlos con la mayor comodidad posible, estos oficiales se asociaban entre sí y obtenían de su Asociación los fondos necesarios. Esta corporación auxiliaba también a la familia del oficial en caso de que éste muriera en el campo de batalla. Así nació el Primer Seguro de Vida.

Los artesanos, por su parte, formaban el "Collegia Tenuiorum" o "Collegia Funeraticia", seguridad constituida por un fondo establecido entre el Estado y los beneficios y herencias dejadas por socios fallecidos con el que los particulares tenían cubiertos sus gastos por muerte.

El análisis cuantitativo del riesgo moderno nace con los pensamientos religiosos sobre la posibilidad de la existencia de la vida en el más allá. Partiendo de la obra "Phaedo" de Platón, del siglo IV a.C., se han escrito numerosos tratados en los que se discutían los riesgos a los que se debería someter el alma según la conducta que se seguía durante la vida.

Figura 5. Página fragmentada de la obra Phaedo *de Platón. Siglol IV a.C.*

Tuvieron que transcurrir aproximadamente ocho siglos entre la publicación de esta obra y el siguiente registro relativo a una decisión sobre la recopilación de datos y las disyuntivas que éstos generaban.

2.1.5. De la Antigüedad a la Edad Media y el Islam: Del determinismo a la recuperación del seguro marítimo

Uno de los análisis más sofisticados sobre el riesgo fue llevado a cabo por Arnobius el Viejo, quien vivió en el siglo IV d.C. en el Norte de África. Arnobius era una figura importante de una iglesia "pagana" que rivalizaba con el cristianismo. Tras una revelación divina, renunció a sus creencias previas y trató de convertirse. El obispo de la iglesia cristiana rechazó su bautismo porque tenía dudas de su sincera conversión, y en un esfuerzo por demostrar la autenticidad de sus deseos de cambio, Arnobius redactó una monografía de ocho tomos titulada "Contra los paganos". En ella recogía las numerosas ventajas que aportaba el ser cristiano frente a ser pagano, una de las cuales es muy relevante para la historia del análisis del riesgo. Tras discutir fervientemente los riesgos e incertidumbres asociados a las decisiones que afectaban al alma, propuso la elaboración de una matriz de 2x2, en la que ordenar las opciones derivadas de profesar una u otra religión. Según él, se tenían dos alternativas: "Aceptar el cristianismo" o "ser pagano". Además, consideró la existencia de dos cuestiones inciertas: "Dios existe" o "Dios no existe". Si se considera la segunda posibilidad, se puede concluir que no hay diferencias entre considerarse cristiano o considerarse pagano. En cambio, si uno considera que Dios existe, Arnobius concluyó que el ser cristiano presenta mayores ventajas que el ser pagano. Esto introdujo el principio de dominancia, muy útil para tomar decisiones en situaciones de riesgo o incertidumbre.

Dando un salto temporal hasta el Al-Ándalus del siglo X, podemos encontrar un texto llamado *Kitab akriyat al-sufun*, que recoge opiniones de juristas sobre casos problemáticos relacionados con el fletamento de barcos. Aunque de diversa procedencia geográfica, todos los juristas son maestros del Derecho malikí. En la introducción, el autor alude a una segunda persona que le escribe, refiriéndole el dicho del profeta "*Quien toma en arriendo, que lo haga por una cantidad y un plazo sabidos de antemano*", y le pide que aclare algunas cuestiones respecto al alquiler de servicios de marineros en barcos, a lo que da cumplida respuesta el autor en esta obra, recogiendo diversa casuística sobre el fletamento de las embarcaciones y los litigios entre las distintas partes, junto con la opinión de los sabios al respecto. Se convierte pues en una obra de consulta, una especie de pequeño manual. Por ejemplo, en el Capítulo 4 aborda las averías de los navíos durante la travesía o tras alcanzar su punto de destino, así como el arbitraje sobre la carga perdida o recuperada (en buenas condiciones o mojada), y los pleitos en el pago del flete. En el Capítulo 5 se trata de las mercancías arrojadas al mar en situaciones de mal tiempo, por temor al naufragio, así como el arbitraje sobre su valoración, los pleitos entre las distintas partes al respecto y los intereses a tener en cuenta (LIROLA, 1993).

Como puede comprobarse, los aspectos legislativos en lo que a comercio marítimo se refiere no han cambiado sustancialmente desde entonces.

2.1.6. Desde la reaparición del seguro marítimo hasta su institucionalización: Edad Media y Edad Moderna

Los seguros desaparecieron prácticamente con la caída del Imperio Romano y se cree que reaparecieron en España en torno al 1100 d.C., cuando los reinos europeos cristianos occidentales iniciaron un gran desarrollo de la actividad náutica, tanto con fines militares como comerciales. Este desarrollo, con el tiempo, se concretó en la aparición de legislaciones específicas para los asuntos del mar, primero en ciudades italianas (como las Tablas Amalfitanas y la *Constitutum usum* de Pisa) y más tarde en los reinos cristianos de la Península Ibérica. Jaime I, a cambio de la ayuda financiera de los comerciantes, fue concediendo a éstos ciertos privilegios, entre los que se cuentan las ordenanzas marítimas de la segunda mitad del siglo XIII . La Liga Hanseática y los Lombardos (Norte de Italia) desarrollaron una regulación al respecto que se evidenció mediante las Leyes de Wisby (1300), las ordenanzas de Barcelona (1435) y la Guidon de la Mer (1600).

Surgieron también jurisdicciones especiales para los asuntos del mar, a cuyas instituciones se les dio el nombre de Consulados del Mar, y a sus jueces, el de cónsules. Los primeros Consulados fueron los de las ciudades de Barcelona y Valencia. Hubo también otro en Tortosa. Ellos formaron la base del Llibre del Consolat de la Mar (Lirola, 1993).

Una de las primeras operaciones de póliza de las que ha quedado constancia fue plasmada por un notario de Palermo el 12 de mayo de 1287. Entonces, dos comerciantes de Barcelona vendieron a un florentino un cargamento de vino que se transportó a bordo de un barco que hacía la ruta Palermo-Túnez. Este cargamento se aseguró por 300 florines con una prima del 18% para cubrir el retraso en la entrega.

> *La expansión cada vez mayor del transporte marítimo, así como del mundo conocido, trajo consigo un incremento en las relaciones comerciales, y por tanto, un aumento de la necesidad de asegurarse ante hechos inesperados*

El primer contrato moderno de reaseguro del que se tiene constancia data de 1347, cuando el asegurador Guilano Grillo contrató con Goffredo Benaira y Martino Sacco reasegurar parte del viaje que un barco debía realizar desde el puerto de Génova hasta el de Brujas. Según consta, Grillo ofreció asumir el riesgo del viaje hasta el puerto de Cádiz y transferir el riesgo que suponía el resto del trayecto. Este tipo de contrato se basa en el *Phoenus Nauticum*, ya mencionado anteriormente.

A principios del siglo XIV los mercaderes inventaron un nuevo tipo de contrato al descubrir que no existían formas satisfactorias de transferir y dividir el riesgo. Con el tiempo aprendieron que las mercancías se perdían relativamente poco, pero que, no obstante, era necesario valorar la posibilidad de esas pérdidas. No era tarea fácil, puesto que los aseguradores medievales carecían de bases estadísticas con las que evaluar los riesgos, lo que les obligaba a elevar sus tarifas cuando les llegaban noticias de peligros marítimos o guerras.

Nuestro país fue una de las primeras naciones en reglamentar el Seguro Marítimo. En 1435 se expide en Barcelona una ordenanza sobre el seguro que constituye la primera Ley al respecto en España. En el año 1543, el rey Carlos I concedió en Valladolid una cédula por la que creaba en Sevilla un Consulado encargado de controlar estos menesteres. La casa de contratación de Sevilla, en el año 1555, dictó una Ordenanza que regulaba el seguro marítimo relacionado con el tráfico con los territorios de las Indias.

El primer contrato celebrado en aquella época revela ya la generosidad de los aseguradores y expresa en parte "...si (lo que Dios no quiera) por alguna tormenta, y con parecer de los pilotos, marineros y pasajeros, por salvar las vidas, o por rescatarlas o por otro beneficio común, conviniere alijar el navío, se haga sin esperar consentimiento nuestro... y pagaremos las costas y gastos que se hicieren aunque no haya probanza ni testimonio..."

Durante todo este periodo, el establecimiento de primas de riesgo se hacía sobre la base de la experiencia, dado que no se disponía de modelos matemáticos para poder realizar un cálculo de las mismas. Fue la formulación de la Teoría de la Probabilidad la que marcó un antes y un después en los estudios de riesgo.

2.1.7. De la modernidad al Mundo Contemporáneo: De la estimación empírica del riesgo a los estudios de probabilidad

Cuando Pascal introdujo la teoría de la probabilidad en 1657, una de sus primeras aplicaciones fue la de extender la matriz de Arnobius (ver sección 2.1.5).

Figura 6. Grabado de Blaise Pascal, quien concibió la Teoría de la Probabilidad

Dada la función de distribución de la existencia de Dios, Pascal concluyó que el valor esperado de ser cristiano superaba el valor esperado de ser ateo.

En 1692, John Arbuthnot argumentó que las probabilidades de las diferentes causas de un evento podían ser calculadas. En 1693, Halley escribió tablas de mortalidad basadas en datos reales que mejoraban las expectativas de esperanza de vida consideradas hasta el momento. A principios del siglo XVIII, Cramer y Bernouilli propusieron soluciones a la paradoja de San Petersburgo[1]. Después, en 1812, Laplace desarrolló el prototipo del moderno cálculo cuantitativo del riesgo, y lo aplicó en el estudio de la probabilidad de defunción por haber contraído viruela condicionada a que el sujeto objeto de estudio se hubiera vacunado contra la enfermedad previamente o no.

¿Cuál fue la causa de este florecimiento sin precedentes de la teoría de la probabilidad? En 1865, Isaac Todhunter escribió un trabajo titulado "La Historia de la Teoría Matemática de la Probabilidad desde los tiempos de Pascal a Laplace". Tan sólo una de las 618 páginas del trabajo trata de los predecesores de Pascal. El hecho es que, antes de Pascal, no existía la teoría de la probabilidad. Algunas de las razones se describen a continuación:

- Una de las respuestas a esta circunstancia es que el rápido desarrollo de la teoría de la probabilidad fue una reacción a determinadas necesidades económicas. Es posible que las clases mercantiles necesitaran métodos mejorados para cálculos en los negocios, o para alcanzar seguridad en forma de seguros. Sin embargo, se sabe que los primeros teóricos de la probabilidad no estuvieron relacionados con el comercio, y su trabajo no era directamente aplicable a los negocios.

- Otra de las teorías sugiere que el desarrollo de la teoría de la probabilidad estaba relacionada con empresas de seguros de vida.

- Un tercer argumento se basa en defender que, antes del siglo XVII, los matemáticos no eran lo suficientemente ricos en conceptos e ideas como para generar una teoría de la probabilidad.

- Un cuarto argumento esgrime que las condiciones que llevaron al surgimiento de la teoría moderna de la probabilidad son semejantes a las que llevaron al surgimiento de la ciencia moderna en los siglos XVI y XVII. Ha sido comúnmente aceptado que los desarrollos teóricos y metodológicos durante este periodo, especialmente en Inglaterra y Francia, constituyeron una revolución científica, pero no está del todo claro por qué esto tuvo lugar. Se han propuesto como posibles razones los cambios económicos relacionados con el modo de producción o el giro estructural que supuso la reforma protestante en el ámbito religioso europeo. Otros, sin embargo, cifran el origen en una compleja cadena de cambios científicos, tecnológicos, políticos, económicos, religiosos, institucionales e ideológicos que podían entenderse como el prólogo o el caldo de cultivo que desembocaría más tarde en la Ilustración.

- El quinto argumento defiende que la teoría de la probabilidad surgió en el seno de la Iglesia católica aproximadamente un siglo y medio antes de la existencia de Pascal. Los problemas financieros que la gran institución religiosa había experimentado en el siglo XIV la condujeron a un cambio de actitud. Necesitaba fondos, por un lado, para pagar las deudas derivadas de las cruzadas, que resultaron extraordinariamente costosas, y por otro, para construir nuevas iglesias que respondieran a la creciente demanda popular. En aquel momento, además, la Iglesia había prohibido los préstamos. En 1518, el Laettian Council adoptó la redefinición de la usura, de modo que se permitiera el establecimiento de intereses siempre que el prestamista corriese un riesgo. Los sesenta y ocho años que esta situación particular estuvo vigente, pudieron ser tiempo más que suficiente para que se desarrollaran y cristalizaran pensamientos sobre la probabilidad. El verdadero cambio no fue legal o moral, sino que el riesgo en sí se convirtió en un tema legítimo de discusión. cree que el pensamiento sobre la probabilidad que se desarrolló entre los siglos XVII y XVIII tuvo sus orígenes en los debates sobre la definición de las tasas de interés en los préstamos mencionados anteriormente.

El único trabajo previo a la Teoría de la Probabilidad de Pascal que se conoce es un estudio sobre esperanza de vida desarrollado por el romano Domitius Ulpianus en el 230 a.C. El siguiente trabajo del que se tiene constancia, relacionado con esta temática, data del año 1662. Para explicar este enorme salto temporal algunos hablan del papel preponderante de la religión, ya que por aquel entonces se consideraba impío contabilizar el número de personas enfermas, o incluso el número de niños nacidos. realizó un trabajo para calcular la probabilidad de nacimientos y muertes. Poco después de dicha publicación, Halley publicó tablas de mortalidad basadas en datos de nacimientos y defunciones durante distintas épocas en la ciudad de Breslau (Polonia). Sus resultados sentaron las bases de los seguros de vida (Covello & Mumpower, 1985).

La Lloyd's (1688) se establece como núcleo del mercado del seguro marítimo global.

[1] La formulación original de la paradoja aparece en una carta enviada por Nicolaus Bernoulli a Pierre de Montmort, fechada el 9 de septiembre de 1713. La Paradoja de San Petersburgo consiste en un juego de apuestas con un valor esperado infinito. Daniel Bernouilli estuvo unos años reflexionando sobre el problema planteado, hasta que en 1738 publicó su análisis y su propuesta de solución en las Actas de la Academia de Ciencias de San Petersburgo, ciudad que da nombre a la paradoja.

En el siglo XVII, la importancia de Londres como centro mundial de comercio incrementó la demanda de asegurar buques y mercancías. El café de Edward Lloyd era el lugar en el que se podían conseguir estos seguros, y así es cómo comenzó lo que hoy en día se conoce como la compañía Lloyd's.

FIGURA 7. Viñeta representando asiduos a la Lloyd's. Fuente: Wikipedia

El desarrollo del reaseguro, en términos más parecidos a los actuales, se manifestó en los seguros contra incendios a raíz del gran incendio de Londres de 1666. De forma paralela, el desarrollo de la revolución industrial auspició la aparición de grandes infraestructuras fabriles que exigían, en caso de siniestros, grandes indemnizaciones.

De hecho, es en 1846 cuando aparece la primera compañía de reaseguro en Alemania: la compañía de reaseguro de Colonia. A partir de aquí, y especialmente con la llegada de la primera Guerra Mundial, se extendió el negocio reasegurador. También, fruto del desarrollo industrial y de los nuevos medios de transporte, surgieron otros tipos de seguros destinados a cubrir nuevas eventualidades.

Uno de los primeros intentos de aplicar sistemáticamente la Teoría de la Probabilidad en un problema de riesgo fue el desarrollado por Von Bortiewicz en el siglo XIX. Éste trató de determinar de forma teórica cuál sería la probabilidad de que los soldados muriesen como consecuencia de sufrir el impacto de una coz de caballo. Su conclusión fue que este fenómeno se comportaba como un suceso aleatorio.

2.1.8. Desde finales del siglo XIX hasta nuestros días

Desde finales del siglo XIX hasta nuestros días, son numerosos los modelos matemático - probabilísticos que se han desarrollado para su aplicación en campos como la química, la física, la informática, la economía, etc.

El cálculo del riesgo es, fundamentalmente, un concepto moderno. sostiene que el riesgo es un elemento central en nuestra sociedad, y lo considera diferente al peligro o a las amenazas (azar), al estar relacionado con el impacto que tienen sobre nosotros o nuestro entorno, y con las consecuencias de nuestras acciones. Además, destaca que el término tiene una importante connotación temporal, ya que está relacionado con eventos futuros.

La primera evaluación del riesgo mediante métodos probabilísticos data de mediados de los años 70, cuando se finalizó un estudio sobre la seguridad de un reactor nuclear . El propósito inicial de este estudio era cuantificar el riesgo que suponía para la población el funcionamiento de las plantas nucleares. Este proceso requería de la identificación, cuantificación y análisis fenomenológico de un amplio rango de eventos poco frecuentes y de grandes consecuencias, y que además no habían sido estudiados con detalle anteriormente. A pesar de tratarse de un análisis cuyos resultados fueron controvertidos, este estudio sentó las bases para la aplicación de esta metodología, que se ha ido mejorando a lo largo del tiempo (NASA, 2011).

No es hasta 1979 cuando se sientan las bases teóricas para la caracterización cualitativa del riesgo, a partir de las definiciones marcadas por la UNDRO (UNDRO, 1979). En el Apartado 3.2, se detallan las definiciones relacionadas con el concepto de riesgo. Hacia finales de los años 80, se propone la vinculación del riesgo con la probabilidad de ocurrencia de un fallo (Molina, 2011).

Hoy en día, el ámbito en el que más se aplican y mejor integrados se encuentran los métodos probabilísticos es en el de la ingeniería aeroespacial. Estos métodos se emplean en la mayor parte de los procesos, como por ejemplo en el diseño de piezas y componentes, en el establecimiento de protocolos de revisión y reparación sobre la base de la vida útil de las partes, etc. En este sector, los métodos probabilistas son retroalimentados constantemente, dado que la aviación internacional recoge información diariamente sobre el funcionamiento de sus aeronaves y lleva un registro exhaustivo de los fallos que se producen en ellas para actuar en consecuencia. Estos registros facilitan un conocimiento integral del conjunto del aparato y permiten la modelización del mismo, con lo que la determinación de los tiempos de trabajo y los protocolos de actuación en caso de fallo están preparados para minimizar la ocurrencia de los mismos, así como sus consecuencias. Por otra parte, las importantes implicaciones legales que se derivan de la ocurrencia de fallos están claramente definidas, a diferencia de otros ámbitos (ver Introducción).

La Figura 8 representa gráficamente el concepto de gestión de riesgo, ya que integra las múltiples capas de análisis y resultados que es necesario manejar para determinar si el riesgo es elevado o por el contrario, bajo, en una instalación espacial. Las líneas estratégicas en la gestión/gerencia del riesgo están orientadas

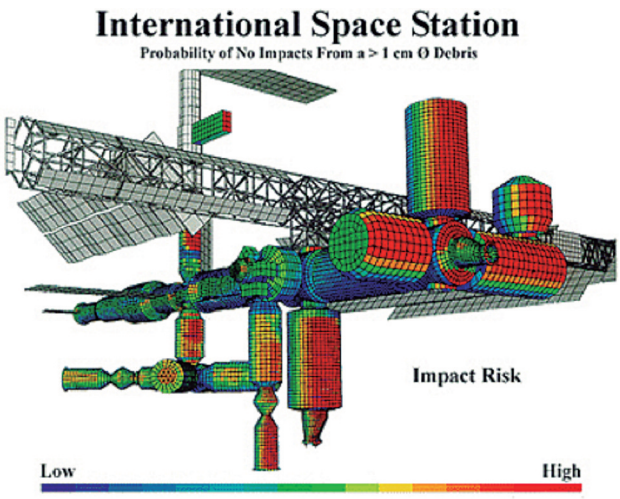


FIGURA 8. Ejemplo gráfico de gestión de riesgo: Modelo de la NASA en el que se muestran las áreas susceptibles de recibir un impacto. Estación Espacial Internacional

a la implantación de herramientas que permitan a los gestores disponer de información sintetizada sobre las áreas más vulnerables de sufrir daños o paradas operativas, así como de los costes que habría que asumir para devolver al sistema su funcionalidad original. Con estas "capas" de información es posible elaborar un SIG (Sistema de Información Geográfica) que facilite la toma de decisiones al mostrar gráficamente los posibles escenarios de actuación y las zonas críticas del conjunto de las instalaciones.

Como se ha podido comprobar a lo largo de este primer apartado, queda mucho camino por recorrer para que la implantación de los métodos probabilísticos para el cálculo del riesgo en la Ingeniería Marítima y Portuaria se haga efectiva. Los primeros pasos para conseguirlo son la puesta en valor de los mismos y facilitar su comprensión y aplicación, trabajo que se aborda en esta Guía

2.1.9. Distribución geográfica y línea temporal de la evolución histórica del concepto de riesgo

En el presente apartado se muestra la localización geográfica de los principales hitos relacionados con el cálculo de probabilidades y riesgos que han sido abordados con detalle en el apartado anterior. En la Figura 9 se indican las regiones en las que se profundizó en el estudio del riesgo y la probabilidad, en un recorrido de más de 6.000 años.

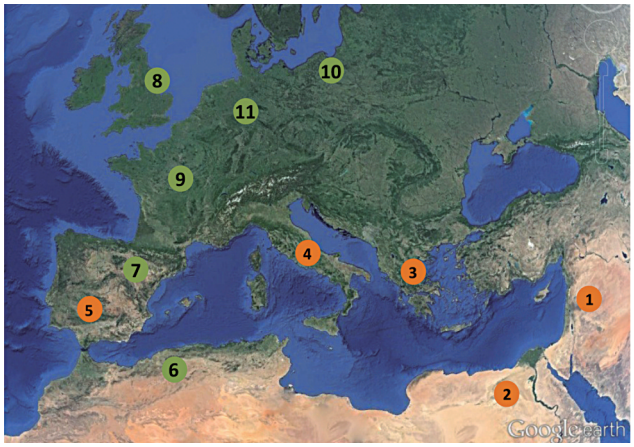


FIGURA 9. Distribución espacial y evolución temporal de los estudios sobre la determinación del riesgo o el cálculo de probabilidades. Los marcadores indican los centros de estudio surgidos en torno al concepto del riesgo antes de Cristo (naranja) y los que aparecieron después de Cristo (verde)

En las Figuras 10 y 11, se muestra una tabla resumen de los principales hitos, las fechas en las que ocurrieron y una breve descripción de los mismos. Se han numerado de acuerdo con lo indicado en la Figura 9.

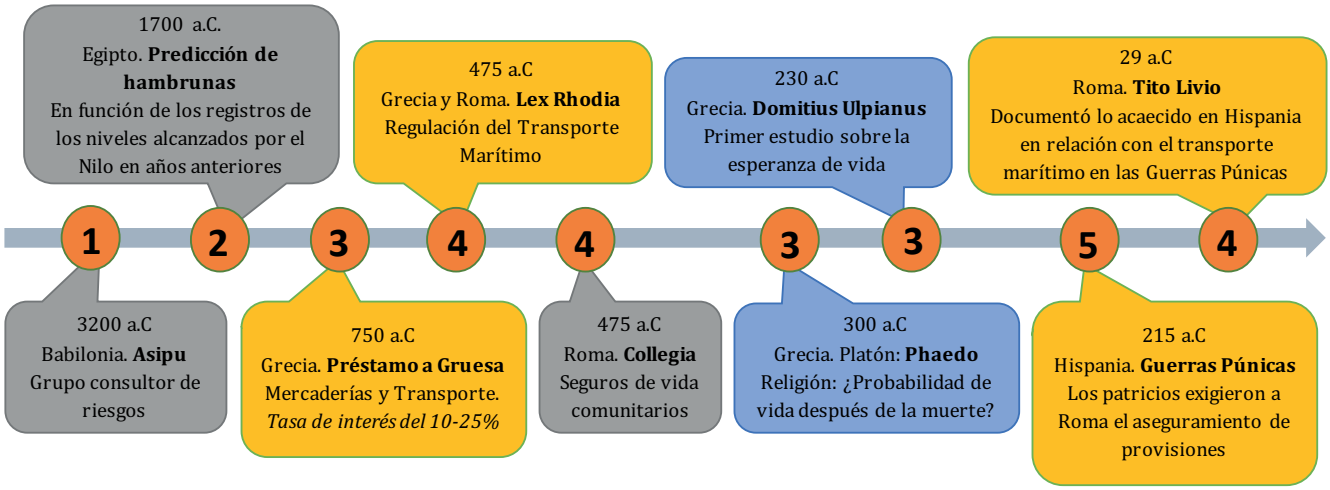


FIGURA 10. Representación sobre una línea temporal de los hitos históricos acaecidos a.c. relacionados con los estudios de riesgo o cálculo de probabilidades. Los hitos se han clasificado por colores de acuerdo con el siguiente criterio: en gris, los relacionados con los seguros o previsión de catástrofes naturales; en naranja, los relacionados con el transporte de mercancías; en azul, los relacionados con las creencias religiosas; en rojo, los derivados de estudios matemático-probabilísticos

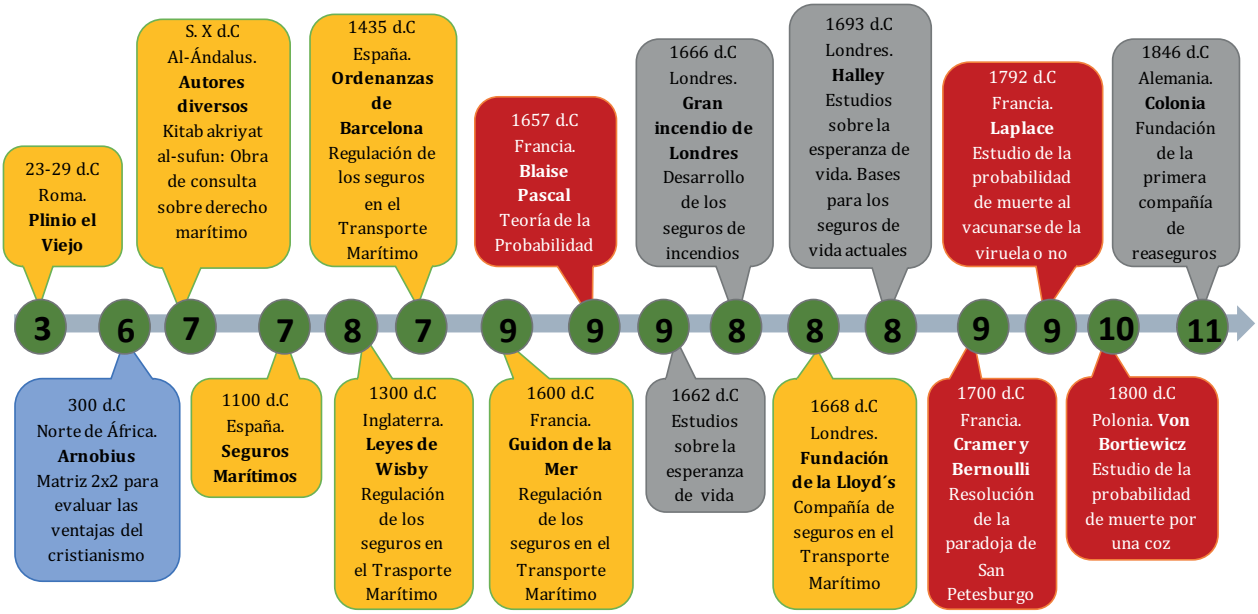


FIGURA 11. Representación sobre una línea temporal de los hitos históricos acaecidos D.c. relacionados con los estudios de riesgo o cálculo de probabilidades. Los hitos se han clasificado por colores de acuerdo con el siguiente criterio: en gris, los relacionados con los seguros o previsión de catástrofes naturales; en naranja, los relacionados con el transporte de mercancías; en azul, los relacionados con las creencias religiosas; en rojo, los derivados de estudios matemático-probabilísticos

2.1.10. Cinco cambios importantes entre el pasado y el presente de los riesgos [Basado en el texto de Covello y Mumpower (Covello & Mumpower, 1985)])

2.1.10.1. Cambio de la naturaleza de los riesgos

En la Antigüedad, el origen de la mayor parte de los riesgos que acechaban a la sociedad se encontraba en la Naturaleza. Actualmente, y gracias al aprendizaje y al estudio del comportamiento de la misma, estos riesgos están más controlados. Sin embargo, desde entonces hasta ahora, se han introducido o han aparecido nuevos riesgos. En el siglo XVIII, cuando no existía el automóvil, se producían atropellos protagonizados por carruajes. Sin embargo, con la generalización del automóvil, las cifras de mortalidad por el empleo de este "reciente" medio de transporte se dispararon. Este ejemplo sirve para ilustrar que en una sociedad de progreso, mientras unas amenazas son mitigadas, otras nuevas están apareciendo de forma continuada.

2.1.10.2. Surgimiento de nuevos riesgos

Los riesgos, con respecto a los existentes en el pasado, han aumentado en magnitud. Como ejemplos se pueden citar las guerras y los accidentes nucleares, la exposición a químicos y pesticidas, los accidentes genéticos, las emisiones a la capa de ozono y la lluvia ácida. La mayoría proceden del desarrollo de la ciencia y la tecnología.

2.1.10.3. Aumento de la capacidad de los científicos para identificar y cuantificar los riesgos

Debido a los avances tecnológicos y científicos (ensayos de laboratorio, estudios epidemiológicos, modelización del entorno, simulaciones por ordenador, cálculos de riesgo), el hombre es capaz de detectar fallos de diseño en complejos sistemas ingenieriles.

2.1.10.4. Aumento de la producción y empleo del número de análisis de riesgos formales y cuantitativos

En los últimos años, el análisis del riesgo se ha conformado como una profesión y una nueva disciplina que cuenta con sus propias sociedades, revistas y profesionales. Como ejemplo, cabe citar *The Institute of Risk Management* (**http://www.theirm.org/**), *Risk Assessment Page* (United States Environmental Protection Agency) o las revistas *Risk Management: An International Journal, Risk Analysis* o *Risk, Decision and Policy.*

2.1.10.5. Aumento del interés popular, concienciación y demanda de protección

Un estudio realizado por Louis Harris and Associates concluyó que la población consideraba estar sometida por aquel entonces a más riesgos que 45 años atrás. Catástrofes, accidentes aéreos, exposición a la radiación, etc., son riesgos para los que la sociedad demanda una mayor cantidad de información y de mejor calidad, y de los que espera una mayor capacidad de control por parte de la ciencia y la tecnología.

3. EL RIESGO. CONCEPTO Y REVISIÓN DE LOS TÉRMINOS QUE LO COMPONEN

Se puede decir que existen tantas formas de formular el riesgo como personas que lo estudian. Existen definiciones cualitativas, no acompañadas de formulación, y cuantitativas, con las que se puede obtener un valor derivado de la combinación de una serie de factores. Hemos encontrado que el cálculo del riesgo como fin no se entiende si no es dentro de un contexto de gestión del mismo.

3.1. INTRODUCCIÓN

El hombre, a medida que desarrollaba la tecnología necesaria para salvaguardarse de las amenazas que le imponía la naturaleza, ha ido ocupando el territorio y transformándolo para adaptarlo a sus necesidades.

Hasta la aparición de los registros temporales de los fenómenos de la naturaleza, la medida con la que se evaluaban las amenazas era la memoria colectiva sobre las consecuencias que éstas habían producido. Diversos estudios publicados en la década pasada[2] nos indican que el hombre distorsiona a medio plazo la realidad con el objeto de minimizar las desgracias y hacer prevalecer la visión optimista de nuestra especie.

Esta cualidad nos permite superar con mayor facilidad los desastres, aprender de ellos y progresar, pero también nos expone una y otra vez a los mismos errores. Por lo tanto, si consideramos que la experiencia es uno de los pilares de la gestión del riesgo, debemos considerar también que sólo será efectiva si se sostiene por la observación, el registro y el análisis de la información.

De forma recurrente, los grupos poblacionales hemos ocupado áreas territoriales tales como márgenes fluviales y áreas costeras que, cíclicamente, se ven sometidas al azote de eventos que ponen en riesgo a personas y actividades económicas y. derivado de lo anterior, a los propios ecosistemas en su conjunto. La consecuencia de este hecho se ha materializado en forma de pérdida de bienes y capitales dado que el Estado, la propiedad o el individuo no disponían de herramientas para sopesar los riesgos que conlleva, en términos cuantitativos, la toma de decisiones estratégicas tales como la ubicación de una actividad. Aún hoy, los objetivos sobre el coste y los plazos se pierden como consecuencia de la ocurrencia de eventos imprevistos que ni siquiera un proyectista experto puede anticipar (Hayes, Perry, Thompson & Willmer, 1987).

Actualmente, existe toda una rama del conocimiento orientada a la identificación, evaluación y gestión de riesgos, dado que es el único mecanismo de que se dispone hoy en día para cuantificar las consecuencias de un suceso que aún no ha tenido lugar, y así poder anticiparse a ellas y desarrollar un plan de mitigación. sostiene que el requisito fundamental para controlar, transferir o gestionar los riesgos es identificarlos correctamente. Las decisiones tomadas en las primeras fases de un proyecto pueden tener un gran impacto en su coste final y la duración de su ejecución. Por tanto, el inicio de un proyecto presenta la mejor oportunidad para evitar desastres futuros mediante la identificación de riesgos . A pesar de que no se puede eliminar completamente la incertidumbre, la gestión de los riesgos favorece el hecho de que un proyecto, o cualquier fase del mismo, pueda ser completado en los plazos y con el presupuesto establecidos, así como con la calidad, la seguridad y el respeto medioambiental que se requiere.

La literatura recoge numerosas formulaciones sobre riesgo, concebidas para arrojar luz sobre un determinado ámbito del conocimiento. Asociada a estas formulaciones existe una rica terminología sobre cuyo significado no hay consenso debido a las fronteras existentes entre las diferentes disciplinas que abordan su tratamiento.

En un esfuerzo por unificar criterios, la ROM 0.0 recoge las definiciones que se necesita dominar para proceder a la verificación de la obra marítima y portuaria mediante métodos probabilistas. Sin embargo, la formulación del riesgo no ha sido adaptada hasta ahora para su aplicación en el ámbito marítimo-portuario, el cual presenta singularidades espacio-temporales, debidas principalmente al entorno en el que se encuentran: la interfaz entre la tierra y el mar.

Por todo lo anterior, surge la necesidad de analizar los términos que componen las formulaciones de riesgo empleadas hasta nuestros días. La finalidad de este análisis reside en llegar a identificar aquéllos que son útiles en el diseño de obras y en la gestión y explotación portuaria, y justificar la introducción de nuevos términos, como la vulnerabilidad, de modo que la fórmula sea de utilidad para la realidad para la que se concibe.

En el Anexo 7 y a modo de síntesis de lo expuesto, se desarrolla un ejemplo metodológico sobre cómo calcular el riesgo en una instalación portuaria. Dado que no sólo es necesario calcular los riesgos, sino también gestionarlos, en este apartado se hace un breve repaso por las estrategias actualmente dis-

[2] Subjective Impact, Meaning Making, and Current and Recalled Emotions for Self-Defining Memories. *Journal of Personality*. Volume 74, Issue 3, 811–846. (Wood & Conway, 2006).

ponibles para ello. Con el fin de facilitar la actividad de los gestores, y gracias a las herramientas de información geográfica de que se dispone hoy en día, se propone un modelo con el que visualizar todas las dimensiones de la formulación propuesta.

El esquema metodológico para la evaluación del Riesgo que planteamos proporciona un valor añadido a las Recomendaciones Técnicas ya existentes en el campo de la ingeniería marítima y la explotación portuaria, puesto que introduce la dimensión espacial y la evolución temporal de la fiabilidad y la funcionalidad de las instalaciones portuarias mediante la caracterización de la interacción de las mismas con el entorno.

3.2. RIESGO: DEFINICIONES Y CAMPOS DE APLICACIÓN

A lo largo de la historia del análisis de riesgos, éstos han sido formulados de forma muy diversa. La definición más antigua data de 1711 y fue dada por Moivre. La mayoría de las formulaciones que hoy en día se encuentran en uso fueron desarrolladas en los últimos 30-40 años, aunque se pueden encontrar algunas más recientes, de comienzos del siglo XX. Aunque no es objeto de este trabajo ahondar en las diferentes ramificaciones que presenta la definición, análisis y gestión de riesgos en todos los ámbitos en los que se aplica, sí se puede decir que en general, las perspectivas originales se centraban en el estudio de valores esperados o probabilidades (motivados por el análisis de riesgos en las instalaciones nucleares), y que en los últimos años el planteamiento ha evolucionado hacia definiciones más amplias no basadas necesariamente en la probabilidad, y en las que se establece un límite muy marcado entre el riesgo como concepto y la propia cuantificación del mismo (Aven, 2012).

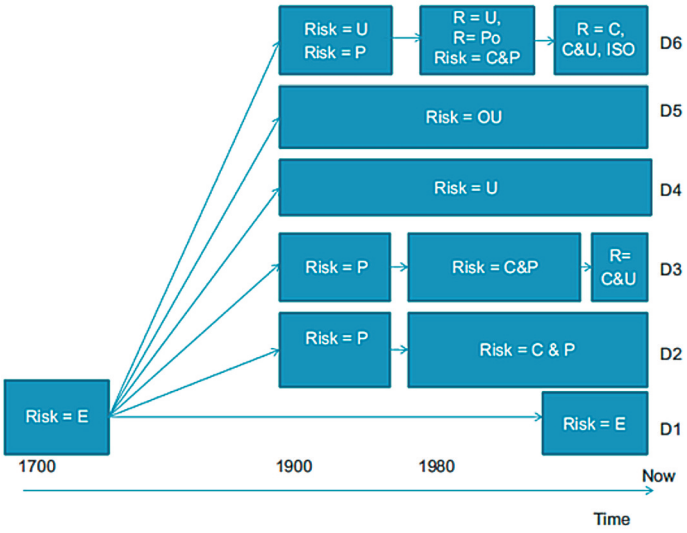


Figura 12. Evolución del concepto de riesgo desde que fue formulado por primera vez hasta nuestros días

3.3. TIPOS DE RIESGO, DEFINICIONES Y FORMULACIONES

El 'riesgo' se asocia de forma intuitiva a un suceso cuya ocurrencia tiene efectos adversos. En particular, se refiere a la gestión del riesgo como "la disciplina de vivir ante la posibilidad de que eventos del futuro generen efectos adversos".

Uno de los mayores retos en la gestión del riesgo, por lo que resulta particularmente interesante en el campo de la probabilidad y la estadística, es la necesidad de abordar resultados inesperados o extremos, en lugar de resultados esperables, normales o promedios, los cuales son el centro de atención de la mayoría de las aplicaciones clásicas de la probabilidad (McNeil, Davison & Chavez-Demoulins, 2005).

Desde un punto de vista formal y dependiendo de la disciplina en la que se evalúe, el riesgo tiene diversas implicaciones y significados, tal y como se ha visto en el apartado anterior. En la lista siguiente se definen los tipos de riesgo que se pueden identificar en los proyectos (Välilä, 2005):

- **Riesgo de diseño o Riesgo técnico**: Son todos aquellos problemas que pueden derivar de fallos en el diseño. Se puede citar como ejemplo un diseño que, aunque funcional, muestra a lo largo de su vida útil elevados costes de mantenimiento.

- **Riesgo de Construcción**: Su existencia depende de si se alcanzan o no los objetivos de plazo y coste en una obra.

- **Riesgo de Calidad del Servicio**: Su existencia depende de que la infraestructura dé el servicio para el cual fue diseñada. Este tipo incluye problemas de rendimiento, así como baja calidad y seguridad en el servicio.

- **Riesgo de Demanda**: Incluye variaciones de la demanda estimada en la fase de diseño. Las expectativas sobre la demanda también pueden influir en costes de mantenimiento superiores a lo esperado.

- **Riesgo Operativo**: Abarca los cambios en los costes previstos de operación y mantenimiento. Por ejemplo, pueden tener lugar en el hecho de que el diseño constructivo, tras unos años, demuestra ser inadecuado y requiera nuevos gastos para convertirlo en adecuado.

- **Riesgo de Pagos**: Es un riesgo derivado de la incertidumbre sobre si los usuarios de la infraestructura van a poder afrontar los gastos previstos cuando se supone que deben hacerlo.

- **Riesgo Financiero**: Derivado de un presupuesto inadecuado y mala gestión financiera de la deuda pendiente, y variaciones de las circunstancias

financieras tales como tasas de interés, tasas de intercambio e inflación.

- **Riesgo Político**: Cambios en la situación política, que alteran los términos bajo los que la infraestructura es proporcionada o empleada. Se pueden incluir cambios en la política que impliquen nuevos costes, como la introducción de nuevos estándares medioambientales, nacionalización de inmovilizados, terrorismo y guerras.
- **Riesgo Medioambiental**: Son los impactos medioambientales adversos e imprevistos que resultan de la creación de nuevas infraestructuras. Se puede incluir el hecho de que la opinión pública sobre el medioambiente pueda cambiar a lo largo del tiempo, dando lugar a alteraciones en la forma en la que el riesgo es percibido.
- **Fuerza Mayor**: Eventos imprevistos que impactan sobre la infraestructura y su uso, que incluye desastres naturales.

Tipo de Riesgo	Ejemplo	Entidad en mejor posición para asumir el Riesgo según Välilä (2005)
Riesgo de Diseño	Fallos del diseño	Privado
Riesgo de Construcción	Intensificación de costes debido a retrasos o al empleo de técnicas constructivas equivocadas	Privado
Riesgo de Demanda	Ingresos deficientes debido a un bajo volumen de actividad o precios demasiado bajos debido a la elasticidad de la demanda	Principalmente público - en ocasiones Privado
Riesgo de Operación	Operaciones y mantenimiento altamente costosas	Privado
Riesgo Financiero	Costes ante una cobertura de ingresos y gestión de la deuda inadecuada	Principalmente Privado – en ocasiones Público
Riesgo Político	Retrasos en la aprobación de proyectos, adquisición de terrenos, cambios en leyes o políticas que afectan al nivel de ingresos	Público
Riesgo Medioambiental	Costes de mitigación frente a eventos medioambientales adversos	Privado
Fuerza Mayor	Pérdidas derivadas de la guerra y desastres naturales	Público
Riesgo por Omisión de Proyecto	Bancarrota del proyecto debido a alguno o a la totalidad de los factores anteriores	Compartido Público / Privado

Tabla 1. Ejemplos de los tipos de riesgo a los que está sometido un proyecto y relación de los mismos con el actor del sistema económico que se encuentra en mejores condiciones de afrontarlo (OECD/International Transport Forum, 2009)

Dentro del campo de la ingeniería, se pueden encontrar diversas formulaciones y definiciones de riesgo, algunas de las cuales se muestran a continuación. Se podrá comprobar que aunque existen diferencias sustanciales en lo que al 'concepto' se refiere, la finalidad del riesgo es prácticamente

común para cada una de las definiciones adoptadas. realiza una clasificación de las definiciones de riesgo encontradas hasta la fecha, que se detalla a continuación:

1) Riesgo = valor esperado de la pérdida (R=E)

   i. El riesgo de perder una determinada suma es la inversa de la esperanza, y la forma de cuantificarlo es mediante el producto de la suma en riesgo y la probabilidad de la pérdida [30]
   ii. El riesgo es equivalente a la pérdida esperada [75,78]

2) Riesgo = Probabilidad de un evento indeseable (R = P)

   i. El riesgo es la probabilidad de que se produzca un daño o pérdida [41]
   ii. El riesgo es la probabilidad de que ocurra un evento indeseado [24]
   iii. El riesgo es la probabilidad de un efecto específico que se origina a partir de una determinada amenaza, que ocurre en un periodo específico o en circunstancias específicas [49]

3) Riesgo = Incertidumbre objetiva (R = OU)

   i. El riesgo es objetivo correlativo de la incertidumbre subjetiva; la incertidumbre considerada como embebida en el transcurso de eventos del mundo exterior [77]
   ii. El riesgo es la medida de la incertidumbre [50]

4) Riesgo = Incertidumbre (R = U)

   i. En relación al coste, pérdidas o daños [40]
   ii. Sobre las pérdidas [58]
   iii. De la ocurrencia de una contingencia desfavorable [57]
   iv. Del resultado de acciones y eventos [23]

5) Riesgo = Potencial/posibilidad de una pérdida (R = PO)

   i. El riesgo es la posibilidad de una ocurrencia desafortunada [64]
   ii. El riesgo es la posibilidad de una desviación desfavorable con respecto a las expectativas [5]
   iii. El riesgo es el potencial de que consecuencias negativas e indeseadas se materialicen [69]

6) Riesgo = Probabilidad y escenarios/consecuencias/severidad de las consecuencias (R = P&C)
   i. El riesgo es la combinación de amenazas medidas mediante probabilidad [63]
   ii. El riesgo es la medida de la probabilidad y la severidad de efectos adversos [55]
   iii. El riesgo es igual al triplete (s_i,p_i,c_i), donde s_i es el escenario i-ésimo, p_i es la probabilidad de dicho escenario, y c_i es la consecuencia de dicho escenario, i = 1,2,...., N.
   iv. El riesgo es la combinación de la probabilidad y el alcance de las consecuencias [2]

7) Riesgo = evento o consecuencia (R = C)

   i. El riesgo es la consecuencia incierta de un evento o actividad con respecto a algo que las personas valoran [44]

8) Riesgo = Consecuencias/daño/severidad + Incertidumbre (R = C&U)

   i. Riesgo = Incertidumbre + Daño [48]
   ii. El riesgo es una combinación bidimensional de eventos/consecuencias (de una actividad) y sus incertidumbres asociadas [6,9]
   iii. El riesgo es incertidumbre sobre la severidad de las consecuencias o resultados de una actividad en relación a algo que las personas valoran

9) El riesgo es el efecto de incertidumbre sobre los objetivos (R = ISO) [45,46]

Otras definiciones de riesgo se incluyen a continuación:

- Efecto de *incertidumbre* sobre los *objetivos*, ya sean positivos o negativos .

- El riesgo es un *evento futuro* (o serie de eventos) con una probabilidad de ocurrencia y un *impacto potencial sobre los objetivos*, que puede ser positivo o negativo (Northumbria University, 2012)

- Es una *medida de la magnitud de las amenazas.* Está formado por la probabilidad p_f o la frecuencia h_f de un evento dañino E y la esperanza media del daño en caso de que este evento tuviera lugar E(D|E). Esta esperanza puede estar expresada en términos monetarios, heridos o víctimas, o algún otro indicador de daño (Schneider, 1997).

$$R = p_f \cdot E(D)$$
$$R = h_f \cdot E(D) \qquad \textbf{Ec. 1}$$

- La definición de riesgo está formada por un *conjunto de escenarios, probabilidades y consecuencias* (NASA, 2011). La determinación del riesgo permite responder a las siguientes preguntas, similares a las que plantea el QRA (*Quantitative Risk Analysis*):

   1. ¿Qué puede ir mal?
   2. ¿Qué probabilidad existe de que suceda?
   3. En el caso de que el evento desafortunado ocurra, ¿cuáles son las consecuencias asociadas?

La respuesta a la primera pregunta es el conjunto de fallos que pueden producirse. La respuesta a la

segunda pregunta requiere la evaluación de la probabilidad de dichos escenarios, y con la tercera se evalúan sus consecuencias.

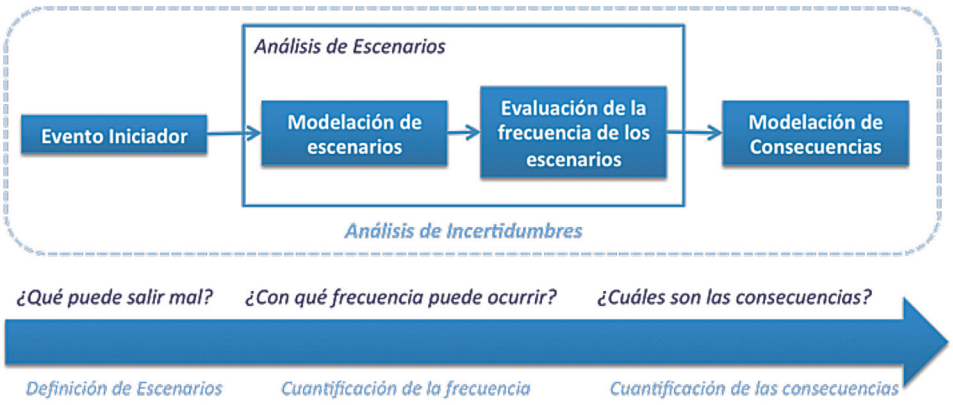


FIGURA 13. Implementación de los tres términos que conforman el riesgo según (NASA, 2011) en el proceso de Project Risk Analysis (PRA)

La expresión matemática que permite evaluar la frecuencia de un escenario de riesgo es la siguiente:

$$\Lambda_{j,k} = \Lambda(ES_{j,k}) = \lambda_j \Pr(ES_{j,k} | IE_j) \qquad \textbf{Ec. 2}$$

Donde:

- λ_j es la frecuencia del evento iniciador j modelado en el PRA (Ver Figura 13).
- Pr(ES_{jk} I IE_j) representa la probabilidad del final de estado (ES_j) de la secuencia del evento, k, en el árbol de fallo iniciado por el evento iniciador (IE_j), condicionado a que este evento haya ocurrido.

- Riesgo (Zhang, Xu & Liu, 2011): Según esta definición, el riesgo se considera como:

$$R = P \cdot T \cdot PR \qquad \textbf{Ec. 3}$$

Donde:

- P es la probabilidad de que ocurra una amenaza.
- T es la tasa de ocurrencia, la *frecuencia* con la que se produce un evento desafortunado. Recibe el mismo tratamiento que la probabilidad. Cuanto mayor sea este valor, más probable es que un evento desafortunado ocurra y por tanto, más vulnerable es el sistema analizado.
- PR (Población en riesgo) es la cantidad de población que está sometida a un riesgo.

- Riesgo específico (*Specific Risk - Rs):* Es el *grado de pérdidas esperadas* debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.

$$R_S = H \cdot V \qquad \textbf{Ec. 4}$$

Donde:

- R_S = Riesgo específico (*Specific Risk*).
- H = Amenaza, peligro o peligrosidad (*Hazard).*
- V = Vulnerabilidad (*Vulnerability).*

- Riesgo total (*Total Risk - Rt):* Se define como el número de *pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades* y efectos *sobre la actividad económica* debido a la ocurrencia de un desastre, es decir, el producto del riesgo específico *Rs*, y los elementos en riesgo *E*. Los elementos en riesgo son la población, los edificios y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada.

$$R_t = E \cdot R_S$$
$$R_t = E \cdot H \cdot V \qquad \textbf{Ec. 5}$$

Donde:

- E = Elementos en riesgo (*Elements at Risk)*
- R_t = Riesgo total (*Total Risk)*

- El riesgo total (Kristiansen, 2005): Dado que el cálculo del riesgo total de una actividad o sistema puede ser muy complejo e implicar numerosos aspectos a considerar, suele ser necesario dividirlo en escenarios de riesgo. La siguiente ecuación computa el riesgo total de una actividad o sistema como la suma de los riesgos de cada tipo de suceso para cada fase de tiempo en cada escenario posible:

$$R = \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot p_{ij} \qquad \textbf{Ec. 6}$$

Donde:

- R: Riesgo total
- i: Número de modos de fallo que pueden desembocar en una consecuencia particular
- j: Número de fases en que se divide cada suceso accidental (evento iniciador, mitigación, escape, evacuación, rescate)
- c_{ij}: Medida de las consecuencias para el escenario relevante y la fase del suceso accidental
- p_{ij}: Probabilidad de la consecuencia relevante c_{ij} para un escenario dado y fase accidental

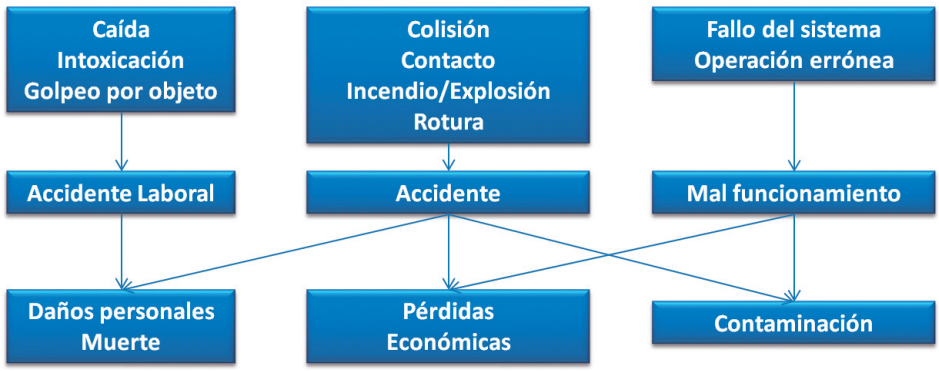


FIGURA 14. Situaciones que dan lugar a la existencia de un riesgo, sus orígenes y consecuencias, aplicado a un accidente marítimo. Elaboración propia a partir de (Kristiansen, 2005)

- Índice de Riesgo compuesto (*Composite Risk Index*): se trata de uno de los indicadores más empleados en los cálculos del riesgo. Está compuesto por el *nivel de impacto* de la ocurrencia de un fenómeno sobre el sistema analizado y por la *probabilidad* de que dicho fenómeno tenga lugar. Matemáticamente se expresa de forma muy sencilla:

$$IRC = P \cdot I \qquad \textbf{Ec. 7}$$

Donde:

- IRC: Índice de riesgo compuesto
- I: Impacto del evento
- P: Probabilidad de ocurrencia del evento

> ***Nota**: Al valor del índice de riesgo compuesto también se le conoce como "Criticidad" . Otros autores lo denominan EMV o Expected Monetary Value (Northumbria University).*

Según la definición anterior el impacto puede afectar, al menos, a las siguientes facetas de un proyecto: plazos, coste y objetivos técnicos o de calidad.

$$C = P \cdot (I_{plazo}+I_{costes}+I_{técnico}) \qquad \textbf{Ec. 8}$$

Donde:

- C: Criticidad
- P: Probabilidad de ocurrencia del evento
- I_{plazo}: Impacto sobre el plazo
- I_{coste}: Impacto sobre el coste
- $I_{técnico}$: Impacto técnico

El cálculo de estos impactos permite clasificar los riesgos, darles prioridad y definir criterios o umbrales de aceptación de los mismos. El impacto que puede tener un evento se ha venido estableciendo en una escala del 1 a 5, donde 1 y 5 representan el menor y mayor impacto posible, respectivamente. La probabilidad de ocurrencia también se clasifica en una escala del 1 al 5, donde 1 representa una probabilidad de ocurrencia muy baja y 5 una probabilidad de ocurrencia muy elevada. Los valores extremos que puede tomar el Índice de Riesgo Compuesto son por tanto 1 y 25, donde 1 significa que el riesgo es mínimo y 25 que el riesgo es máximo.

> *En la ROM 0.0 se distinguen tres tipos de consecuencias derivadas de la manifestación de una amenaza: las sociales y ambientales, difícilmente cuantificables, y las económicas.*
> *En el caso de las consecuencias económicas, la escala del 1 al 5 indicada anteriormente se sustituye por una escala del 0 al 20, donde 0 indica repercusiones económicas irrelevantes y 20 grandes repercusiones económicas.*
>
> *En el caso de las consecuencias sociales y ambientales, la escala del IRC se sustituye por una escala del 0 al 30, siendo 0 la nula afección a personas y al medio ambiente, y 30 cuando se producen consecuencias catastróficas.*

Según este criterio, para clasificar tanto la probabilidad como el impacto, es necesario que se establezcan los umbrales que limitan cada situación. Una de las limitaciones asociadas a esta clasificación radica en que no existe un criterio definido para clasificar la probabilidad y el impacto como bajo o alto.

Dependiendo de las consecuencias de la ocurrencia del riesgo (ya sean económicas, estratégicas o de otra índole), según esta formulación se puede clasificar el riesgo como aceptable (asumible) o inaceptable (no asumible). El hecho de que los riesgos sean aceptables no implica que puedan ser ignorados, es decir, **es necesario desarrollar un plan de acción** una vez que éstos han sido identificados.

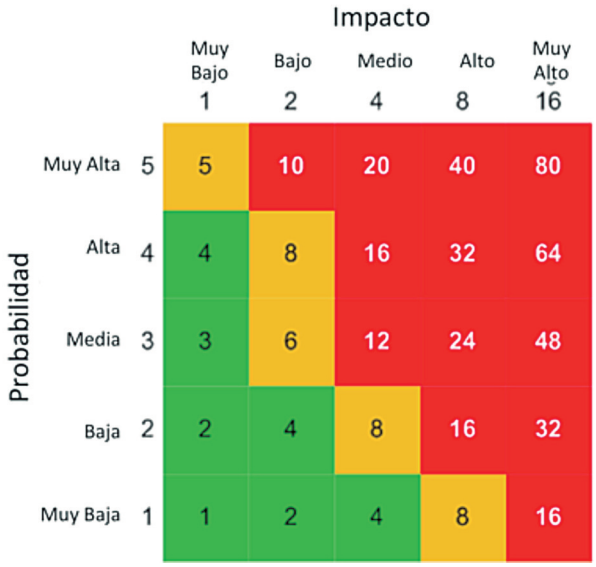


Figura 15. Ejemplo de los valores que puede adquirir el riesgo en función del impacto de la amenaza (de 1 a 16) y su probabilidad de ocurrencia (de 1 a 5). Las casillas rojas indican que el riesgo es inaceptable, las verdes que el riesgo es aceptable y las de color ámbar representan riesgos que habrá que trasladar hacia el rojo o hacia el verde en función de la estrategia de gestión del riesgo que se adopte. Fuente: www.jiscinfonet.ac.uk

Ejemplo (Cálculo del riesgo asociado a la Figura 16)

Se han identificado 10 riesgos, y se han clasificado como aceptables. Cada uno tiene una probabilidad de ocurrencia de 0.5 y las consecuencias económicas serían de 2.000 € por cada riesgo. Por tanto, el riesgo económico y en consecuencia, la previsión económica necesaria es de:

$$R = \sum_{i=1}^{10} P_i \cdot C_i = \sum_{i=1}^{10} 0{,}5 \cdot 2000 = 10000€ \qquad \textbf{Ec. 9}$$

En este caso se debe disponer de una salvaguarda económica de 10.000 € para que la ocurrencia de estos sucesos no provoque dispersión económica sobre los objetivos marcados. Con este cálculo se llega a la conclusión de que los gastos derivados de la ocurrencia de los fallos "asumibles" están cubiertos la mitad del tiempo, ya que la probabilidad de que ocurran es de 0.5.

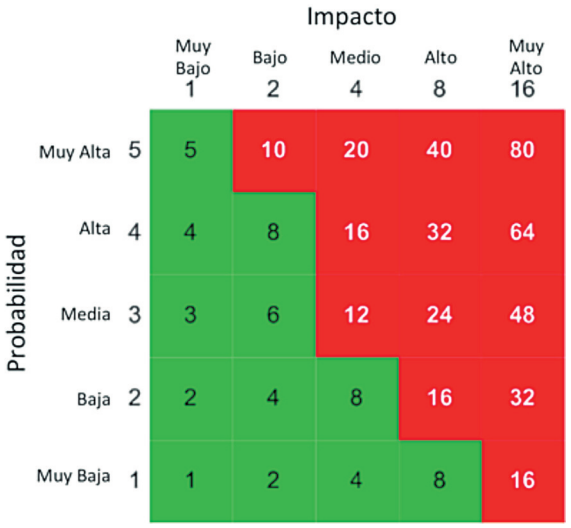


Figura 16. Esta tabla muestra el resultado de trasladar los riesgos que en la figura anterior estaban marcados en ámbar hacia lo inaceptable o lo aceptable en función de que sean mayores o menores que 10, criterio establecido por los gestores a modo de ejemplo. Fuente: www.jiscinfonet.ac.uk

- Riesgo sobre un individuo (Ho, Leroi & Roberds, 2000): Según esta definición, el riesgo se considera como la *esperanza estadística* de una serie de consecuencias adversas e inciertas, generadas por todas las amenazas que se pueden presentar. Por tanto, el riesgo está formado por dos componentes: la probabilidad de ocurrencia de la amenaza y la consecuencia del fallo. De acuerdo con esta definición, y en términos de probabilidad condicionada, el riesgo se define como (Morgan, Rawlings & Sobkowicz, 1992):

$$R(IN) = P(H) \cdot P(S|H) \cdot P(T|S) \cdot V(L|T) \qquad \textbf{Ec. 10}$$

Donde:

  - R(IN) es el riesgo sobre un individuo (por ejemplo, la probabilidad anual de pérdida de vidas).
  - P(H) es la probabilidad anual de la ocurrencia de un desastre (ejemplo: deslizamiento de una ladera).
  - P(S|H) es la probabilidad de ocurrencia de un impacto espacial (ejemplo: el deslizamiento de una ladera afecta a un edificio).
  - P(T|S) es la probabilidad de ocurrencia de un impacto en un espacio de tiempo (ejemplo: hay presencia de población en el momento del impacto del deslizamiento de una ladera).
  - V(L|T) es la vulnerabilidad de un individuo dado el impacto de una amenaza en un periodo de tiempo determinado (ejemplo: probabilidad de pérdida de vidas humanas).

- Impacto del Riesgo (Al-Bahar & Cradall, 1990): Se define como la exposición a la posibilidad de

que ocurran eventos adversos o favorables que afecten los objetivos de los proyectos como consecuencia de la incertidumbre.

$$IR = P \cdot C \qquad \textbf{Ec. 11}$$

Donde:

- *IR*: Impacto del Riesgo
- *P*: Probabilidad
- *C*: Consecuencias

La probabilidad de un evento adverso se suele expresar en términos del número de eventos esperados en un año . La consecuencia de este evento, algunas veces llamada daño, se suele expresar en términos monetarios. En el caso de desastres o grandes retrasos, como puede ocurrir en una obra, es más apropiado emplear otras medidas, como el número de días perdidos o la modificación de los ratios de productividad en función de la experiencia. El coste del riesgo puede ser mucho mayor del que inicialmente pueda parecer, pudiendo ser la mayor parte del mismo indirecto y no estar asegurado.

- Riesgo Ambiental (Puertos del Estado, 2012): La estimación del riesgo ambiental de las emisiones contaminantes se basa en la valoración de la probabilidad de ocurrencia (Pi), de la vulnerabilidad de las unidades de gestión (Vi) y de la magnitud de las consecuencias (Ci).

$$R_I = P_I \, x \, C_I \, x \, V_I \qquad \textbf{Ec. 12}$$

Donde la vulnerabilidad de las unidades de gestión (Vi) y la magnitud de las consecuencias, a su vez, quedan descritas en función de:

$$R_i = P_i \times \frac{1}{10}[5 \cdot F_s + 3 \cdot F_\alpha + 2 \cdot F_e] \times \qquad \textbf{Ec. 13}$$

$$\times \frac{1}{10}[5 \cdot F_p + 2{,}5 \cdot F_g + 2{,}5 \cdot F_r] \cdot F_c$$

Y a su vez:

- *Fs:* Susceptibilidad de las unidades de gestión.
- *Fa*: Accesibilidad de la emisión contaminante.
- *Fe*: Eficiencia de los procedimientos operativos.
- *Fp*: Peligrosidad de la emisión contaminante.
- *Fg*: Grado de extensión de la emisión contaminante.
- *Fr:* Recuperación de las unidades de gestión.
- *Fc*: Repercusión social.

Definiciones adicionales:

- Un evento incierto que, si ocurre, provoca un efecto positivo (oportunidad) o negativo (amenaza) *sobre los objetivos* de los proyectos (Cruz & Caño, 2002).
- La *medida* de futuras *incertidumbres* en alcanzar las metas y los objetivos con un coste definido, una programación y unas limitaciones de rendimiento (DoD, 2006).
- (Hilson, 2002) propone dos vertientes para la definición:, 1) oportunidad, que es un riesgo con efectos positivos, y 2) amenaza, que es un riesgo con efectos negativos.
- La combinación de la *probabilidad* de un evento y sus *consecuencias* (ISO/IEC Guide 73, 2002).
- Un evento incierto o condición que, si ocurre, tiene un efecto positivo o negativo en el *objetivo de un proyecto* (PMBok, 2004).
- La presencia de actuales o potenciales amenazas u oportunidades que influyan en los *objetivos de un proyecto* durante su construcción, puesta en marcha o en el momento de uso (RAMP, 1998).
- Eventos indeseados que pueden provocar retrasos, gastos excesivos, resultados insatisfactorios, amenazas para la seguridad o el medio ambiente, o incluso un fallo total (Raz, Shenhar & Dvir, 2002).
- La medida de la potencial incapacidad de alcanzar los *objetivos principales de un proyecto* con un coste definido, su programación y sus limitaciones técnicas (US Department of Energy, 2003).
- La causa de cambio o incertidumbre que afecta al *éxito del proyecto* de forma positiva o negativa (Özcan, 2008).

Como se ha podido comprobar, las consecuencias materiales que se mencionan son la afección sobre la actividad económica, o el impacto sobre los objetivos. No obstante, en ninguna de las formulaciones de riesgo que han sido revisadas se contempla un término que especifique el grado de afección material que sufrirían las instalaciones o las actividades económicas afectadas.

Como consecuencia, las definiciones anteriormente citadas plantean definiciones de riesgo basadas en fórmulas cuyos términos son difícilmente cuantificables, debido a la falta de concreción en su significado.

Se sabe que las consecuencias económicas derivadas de un modo de fallo o parada operativa, en general, dependen de la localización geográfica de las actividades con respecto al área de influencia de

los agentes que pueden modificar su funcionalidad. La diversidad de elementos estructurales y de actividades económicas que se pueden encontrar en un tramo de obra, particularmente en las instalaciones portuarias, invita a compartimentar dicho espacio para que la evaluación de riesgos sea más sencilla o incluso, abordable.

Por lo tanto, se propone:

- Realizar una subdivisión del tramo de obra en elementos de infraestructura.
- Identificar las operaciones que se desarrollan sobre dichos elementos de obra.
- Determinar su vulnerabilidad en función del porcentaje de afección estructural y en función del porcentaje de afección sobre el normal funcionamiento de las actividades económicas que se desarrollan sobre la infraestructura, derivadas de un fallo o parada operativa o que se ven directamente afectadas por un fenómeno.

  Para lograr este objetivo, se incorporada el término 'Vulnerabilidad' entre los términos que participan en la evaluación del riesgo, entendido como la proporción del elemento analizado que se ve afectado por fallos o paradas operativas, cuya definición formal y características se exponen con mayor detalle en apartados posteriores.

En este punto introduciremos dos conceptos importantes:

- **Riesgo estructural**: resultado de la materialización de modos de fallo en la infraestructura, sobre los equipos de manipulación de mercancía, y sobre todo aquel elemento que sufra un fallo estructural como consecuencia de la interacción con el medio físico, accidentes, etc. Estos modos pueden derivar en modos de parada operativa, que se enmarcarían dentro de los riesgos operacionales.
- **Riesgo operacional**: resultado de la materialización de modos de parada operativa en las actividades (operaciones) de la terminal, habiéndose dado previamente fallos en algún tipo de estructura o no.

Para simplificar la identificación y clasificación de riesgos se ha optado por identificar los riesgos estructurales y los riesgos operacionales. Éstos pueden derivarse de la ocurrencia de las siguientes secuencias de modos de fallo y parada operativa:

SECUENCIA 1

El iniciador es un modo de fallo, el mecanismo por el que se produce el fallo de la infraestructura o del equipamiento. Éste puede derivar en otros modos de fallo o paradas operativas, pero se ha considerado que en esta secuencia no evoluciona.

Figura 17. Secuencia 1: El iniciador es un modo de fallo, se obtiene por tanto un riesgo estructural

Ejemplo secuencia 1

Modo de fallo: inicio de avería en un dique en talud. Al ocurrir esto, el dique no pierde sin embargo su funcionalidad, ya que no se observa mayor cantidad de oleaje transmitido al interior del puerto. Además, no existe riesgo operativo porque el nivel de abrigo que proporcional el dique se mantiene constante, aun habiéndose modificado su geometría.

SECUENCIA 2

El iniciador es un modo de fallo, y deriva en un modo de parada operativa. Por lo tanto, esta secuencia entraña un riesgo operativo y un riesgo estructural.

Figura 18. Secuencia 2: El iniciador es un modo de fallo (la infraestructura se ve afectada), y deriva en un modo de parada operativa (la infraestructura pierde funcionalidad). Por tanto, se computa tanto un riesgo estructural como un riesgo operativo

Ejemplo secuencia 2

Modo de fallo: hundimiento de un cajón de un dique vertical. El dique pierde su funcionalidad, ya que al verse disminuida la cota de coronación el caudal de rebase que alcanza el área abrigada será mayor. Sin embargo, al no existir actividades en el trasdós del dique (no hay buques atracados), no se produce afección sobre las operaciones portuarias.

SECUENCIA 3

El iniciador es un modo de parada operativa, pero no evoluciona en otros modos de parada operativa.

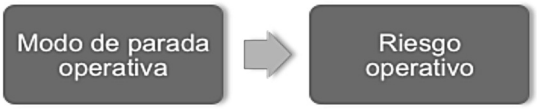


FIGURA 19. Secuencia 3: El iniciador es un modo de parada operativa (afección sobre las operaciones), que desemboca en un riesgo operativo

EJEMPLO SECUENCIA 3

Modo de parada operacional: las operaciones de carga y descarga de contenedores se ven interrumpidas por un temporal de viento, ya que su magnitud supera los umbrales admisibles para continuar con las operaciones en condiciones de seguridad.

Cabe citar que se han identificado tres posibilidades de las múltiples que pueden producirse, como por ejemplo, que derivado de un modo de parada operativa se produzcan afecciones sobre la cadena de suministro. El estudio de este fenómeno y sus consecuencias sería objeto de nuevas investigaciones.

Por otro lado, la formulación propuesta por Kristiansen , además de contemplar la probabilidad de ocurrencia de un determinado suceso y sus consecuencias, tiene en cuenta el número de modos de fallo y las fases o escenarios en las que éstos se pueden producir. Esta formulación, junto con la de Ho, Leroi y Roberds son, de entre las que se han revisado, las únicas que incorporan el factor tiempo como determinante a la hora de evaluar riesgos. Sin embargo, éste es fundamental, ya que los términos que provocan la existencia del riesgo no son estáticos, sino que evolucionan, y no presentan la misma magnitud a lo largo del tiempo. Por tanto, se debe tener en cuenta que el riesgo presenta un carácter evolutivo, tanto por la variabilidad y el alcance de las consecuencias económicas que pueden tener lugar, como por la aleatoriedad de los agentes que inducen a su materialización.

El autor Kristiansen propone que se elija una unidad temporal, como por ejemplo un estado, y realizar el análisis de riesgo en dicho estado. Sin embargo, consideramos que este enfoque no recoge completamente el carácter evolutivo del riesgo, ya que los estados no son independientes entre sí, y por lo tanto, no se pueden interpretar aisladamente.

Como conclusión, de los términos identificados y analizados en las formulaciones anteriormente expuestas, se han elegido los siguientes para la formalización de una definición de riesgo, que sea representativa del ámbito marítimo-portuario:

- **Probabilidad**, de ocurrencia de los modos fallo o paradas operativas.
- **Consecuencias** derivadas de la ocurrencia de dichos modos. En el capítulo 9 se verá cómo se aborda este término, ya que es posible evaluarlo desde diferentes perspectivas según el tipo de información de partida de que se disponga, así como dependiendo del origen del mismo.
- Se incorpora como novedad a la formulación el término **Vulnerabilidad** de la infraestructura y las operaciones frente al modo de fallo/parada, que se describe con más detalle en apartados posteriores.

3.4. TÉRMINOS PROPUESTOS PARA EVALUAR EL RIESGO

En base al análisis de los términos que componen las distintas definiciones y formulaciones de riesgo, se ha identificado que los más apropiados para la evaluación del mismo son los siguientes:

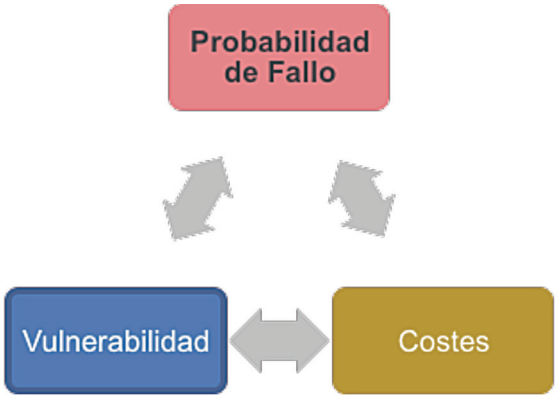


FIGURA 20. Términos identificados como clave para la evaluación del riesgo

Si se continúa en la línea del planteamiento recogido por los autores a los que se ha citado, el riesgo debería evaluarse como el producto de la Probabilidad de ocurrencia de los modos de fallo o parada operativa, la Vulnerabilidad del elemento o actividad económica que sufre el fallo o la parada, y el Coste derivado del suceso. De ser así, presentaría la siguiente forma:

$$R = P \cdot V \cdot C \qquad \textbf{Ec. 14}$$

Esta forma de abordar la cuantificación del riesgo tiene ventajas, tal como la integración de tres valores en uno solo. No obstante, presenta varias desventajas, tales como la pérdida de la importancia (o peso) relativa de cada término de la formu-

lación en el valor del resultado, así como la imposibilidad de definir un rango de valores que puede adoptar el término consecuencias (si el rango no está definido, los riesgos no son comparables). Aunque tanto la probabilidad como la vulnerabilidad se dan en una escala de 0 a 1, el término coste no está acotado. Esto dificulta la interpretación del riesgo en sí mismo, al no disponerse de valores de referencia con los que comparar los riesgos obtenidos para distintas instalaciones portuarias o actividades.

Además, este planteamiento hace que los resultados se expresen en términos estrictamente económicos, lo cual en ocasiones no es deseable. Esto puede ocurrir en el caso de evaluar riesgos operativos, en el que un indicador más útil seria la productividad de una actividad Por tanto, para poder evaluar las consecuencias de la forma más adecuada para cada tipo de riesgo se ha distinguido entre riesgos relacionados con la infraestructura y riesgos operativos.

Así pues, en una primera fase en la que abordar el estudio de riesgos en las infraestructuras y actividades portuarias, se propone hacer uso de la información que la probabilidad, vulnerabilidad y consecuencias proporcionan de tal forma que su integración no suponga la pérdida de la importancia de cada uno de ellos.

3.5. EL CONCEPTO DE RIESGO INFRAESTRUCTURAL Y EL RIESGO OPERATIVO

Hasta ahora se han tratado los conceptos de riesgo derivado de modos de fallo, el riesgo estructural, y el riesgo derivado de modos de parada operativa, el riesgo operativo. Se entiende como riesgo operativo a las posibles consecuencias económicas y operacionales derivadas de sucesos que provocan una disminución total o parcial de la operatividad de un sistema.

Cualitativamente, se entiende como operatividad al normal funcionamiento de una instalación. La ROM 0.0 hace referencia a ella como "el valor complementario de la probabilidad conjunta de parada en la fase de proyecto, frente a todos los modos de parada adscritos a todos los estados límite de parada". La evaluación de la operatividad se lleva a cabo mediante la comparación del número de paradas que se tienen a lo largo del periodo en el que se analiza el sistema y de la duración de cada parada con los valores máximos admisibles que se establecen en los Criterios Generales de Proyecto.

Por todo lo anterior, se ha acuñado una definición de riesgo operativo y de riesgo infraestructural, aplicable a las terminales portuarias:

> *"El **riesgo operativo** es un indicador que cuantifica la desviación sobre los objetivos económicos o de calidad de prestación de servicio de una actividad, derivada de la ocurrencia de modos de fallo o de parada en un área operativa de interés".*

> *"El **riesgo infraestructural** es un indicador que cuantifica la desviación sobre los objetivos de fiabilidad y funcionalidad de la infraestructura, derivada de la ocurrencia de modos de fallo".*

El riesgo operativo se produce cuando las actividades económicas que se desarrollan en la terminal se ven afectadas, mientras que el riesgo sobre la infraestructura se produce cuando ésta es susceptible de sufrir algún daño y además pierde su funcionalidad, el objeto para el cual ésta fue concebida.

Debido a que el uso del operador producto en la formulación del riesgo no está justificado, en este texto se ha optado por realizar un análisis pormenorizado de la probabilidad, la vulnerabilidad y el coste, o en su defecto, de las consecuencias sobre la operativa para disponer de un mapa de información clave sobre las causas y efectos de los modos de fallo y parada, pero sin emplear funcionales específicos (hasta que se justifique lo contrario) para obtener un valor integrado de los mismos.

El riesgo (tanto el operativo como el infraestructural) será por tanto un indicador compuesto por los tres términos anteriormente mencionados (probabilidad, vulnerabilidad y consecuencias), de forma que se pueda conocer el valor y peso específico de cada uno de ellos en cada modo identificado. Esto permite que los gestores de la infraestructura o las operaciones conozcan cuál es la dimensión que más impacto genera en sus instalaciones, y poder así atacar el problema desde su verdadera raíz:

> *¿Es la probabilidad de ocurrencia de los modos de fallo/parada muy elevada? ¿La infraestructura es vulnerable o por el contrario no lo es? ¿La ocurrencia de un modo afecta a la estabilidad de las obras o a la funcionalidad de las operaciones?*

Como se ha indicado, no se pretende dar una formulación tradicional, ya que no hay estudios previos que demuestren que la combinación de los términos mediante el operador producto u otro operador matemático aporte un resultado fácilmente interpretable y comparable por los interesados. Como conclusión, puede decirse que el riesgo será un indicador integrado de la siguiente manera:

$$R = [P|V|C]$$

La finalidad de evaluar el riesgo no se trata sólo de conocer con mayor profundidad el sistema, y

los mecanismos que pueden desembocar en consecuencias indeseadas sobre el mismo, sino el de poder gestionarlo. Por lo tanto, aunque para la evaluación del riesgo sea necesario conocer los términos indicados anteriormente, cada instalación deberá crear un baremo con el que clasificar los riesgos en base a la información de partida de que disponga, y al tipo de gestión que desee realizar.

3.6. DESCRIPCIÓN DE LOS TÉRMINOS QUE COMPONEN LA DEFINICIÓN DE RIESGO

3.6.1. Probabilidad de fallo

Uno de los objetivos principales de esta Guía consiste en proporcionar una metodología para evaluar el riesgo mediante métodos probabilistas, por lo que en este apartado tan sólo se revisarán las nociones generales y las principales relaciones entre los conceptos necesarios para entender la importancia de la probabilidad en el cálculo del Riesgo. En el Capítulo 4 se profundiza en la metodología para evaluar la probabilidad de ocurrencia de un modo o parada operativa.

Al emplearse el término "probabilidad" se está haciendo referencia a una serie de conceptos: agentes o amenazas, modos de fallo, procedimiento de verificación, etc.

Dada una alternativa de proyecto, para definir un tramo, es necesario conocer los agentes que interactúan con él. Dependiendo de su extensión y del uso que se le haya otorgado, cada tramo presentará una determinada tipología estructural. Dado que cada tipología está compuesta por una serie de elementos, y que cada elemento puede fallar mediante uno o varios mecanismos, la tipología puede tener asociados un conjunto de modos de fallo o paradas operativas. Asimismo, mediante la observación del grado de afección de la infraestructura o las actividades que provoca cada modo de fallo o parada, se puede conocer la vulnerabilidad del inmovilizado material y de las actividades, tal y como se indica en la sección 3.6.3.

La Figura 21 muestra el esquema de los elementos que forman parte de la evaluación de la probabilidad de fallo y parada operativa, y las relaciones existentes entre ellos.

Para que el esquema anterior se comprenda con mayor facilidad, a continuación se da una descripción somera de cada uno de los términos que lo

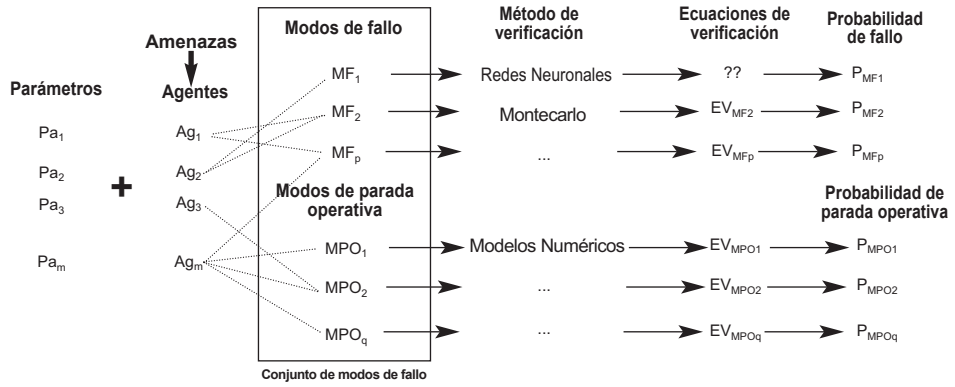


FIGURA 21. Relación entre los elementos que forman parte del cálculo de la probabilidad de fallo y de parada operativa

componen, según las definiciones establecidas por la ROM 0.0 (Puertos del Estado, 2001).

Parámetros: Son las dimensiones de cada elemento del tramo, las propiedades de los materiales con los que se han construido los elementos, las propiedades del terreno sobre el que se ubica la obra, las propiedades del agua, del aire, etc.

Agentes: Son todas las manifestaciones del medio físico o de cualquier tipo de actividad, humana o no, que pueden producir en la obra algún tipo de afección negativa, ya sea estructural o funcional, bien sobre la infraestructura, o bien sobre las actividades económicas a las que da servicio.

Cada agente puede colaborar en la ocurrencia de varios modos de fallo o parada operativa. En la Figura 22 se muestran los que principalmente interactúan con un tramo de obra. Están divididos por su origen: medio físico (Naturaleza) y de uso y explotación (operaciones). Asimismo, se muestran algunos de los parámetros que caracterizan un tramo de obra: propiedades del aire y del agua, de los materiales de construcción o la geometría.

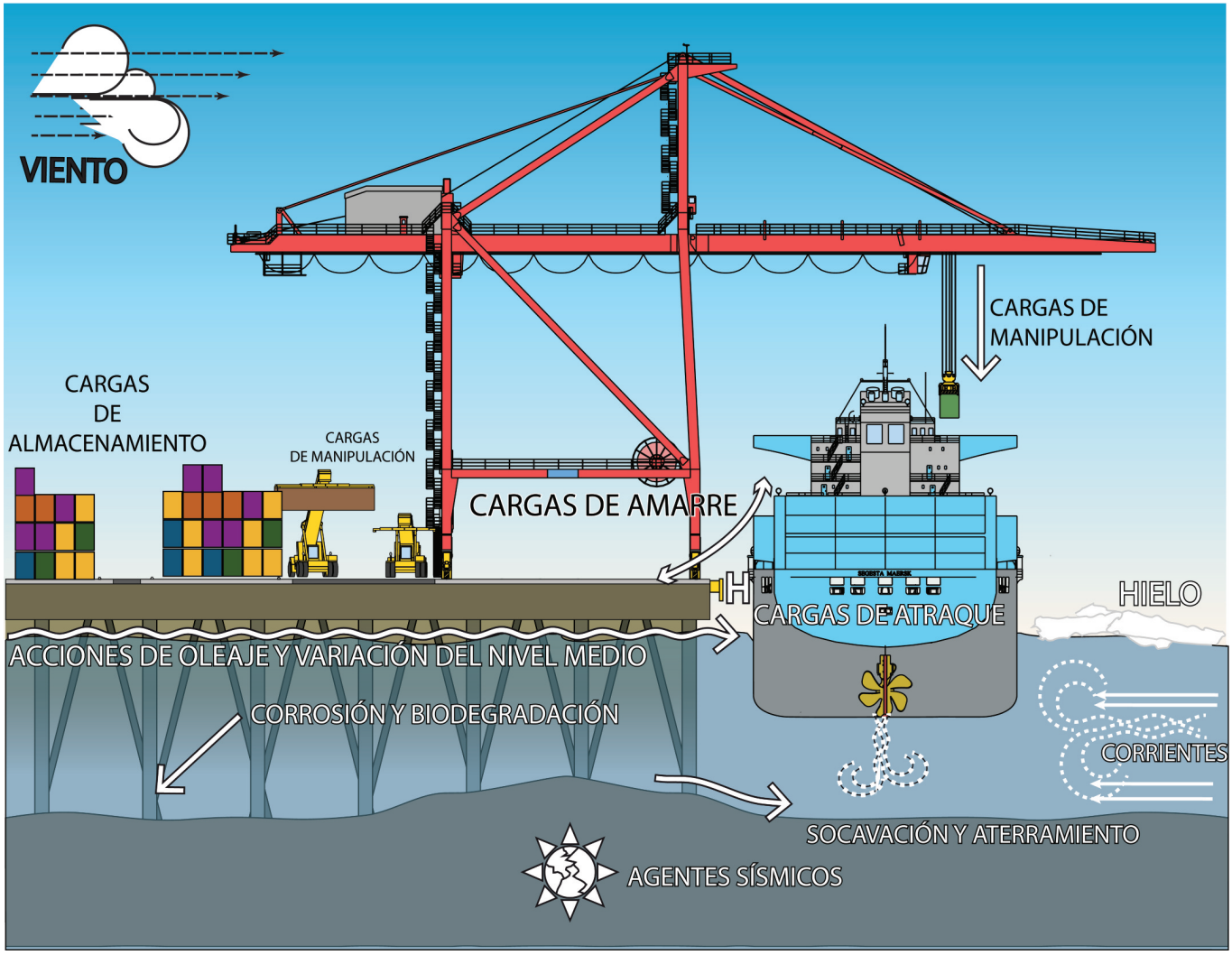


FIGURA 22. Representación de los principales agentes que interactúan con la obra y el entorno. Del medio físico: viento, oleaje, corrientes, variaciones del nivel del mar, transporte de sedimentos. De uso y explotación: buque, maquinaria de manipulación de mercancías, vehículos, personal. Parámetros: densidad del aire, contenido en partículas, densidad, salinidad, viscosidad del agua, cantidad de nutrientes, parámetros del terreno (Molina, 2011)

Modos de fallo: Son los mecanismos a través de los cuales se materializa el fallo.
Modos de parada operativa: Son los mecanismos a través de los cuales se producen las paradas operativas.

> *A su vez, los modos de fallo pueden estar relacionados entre sí, ya que la ocurrencia de unos puede provocar el desencadenamiento de otros. Si se dan de forma consecutiva, se pueden analizar mediante árboles de fallo (Consultar apartado 5.4). Lo mismo es aplicable a las paradas operativas.*

Método de verificación: es el proceso metodológico que se debe seguir para reproducir analítica o numéricamente el comportamiento de los mecanismos de fallo o parada, con cuya repetición se obtienen sus probabilidades de ocurrencia. Los modos de fallo o parada se pueden verificar mediante diversos métodos, como el de Montecarlo, las redes neuronales, algoritmos genéticos, etc. En el Capítulo 8 se describen los más empleados.

Ecuaciones de verificación: son las que establecen las relaciones entre agentes y parámetros, y en función de su magnitud, permiten determinar si se producen fallos o paradas operativas. Dependiendo del método de verificación, su formulación matemática existirá o no, y puede variar a lo largo del tiempo.

Probabilidad de fallo: es la probabilidad de que un fallo, adscrito a Estados Límites Últimos, tenga lugar.

Probabilidad de parada operativa: es la probabilidad de que se produzca una parada operativa, adscrita a Estados Límites Operativos.

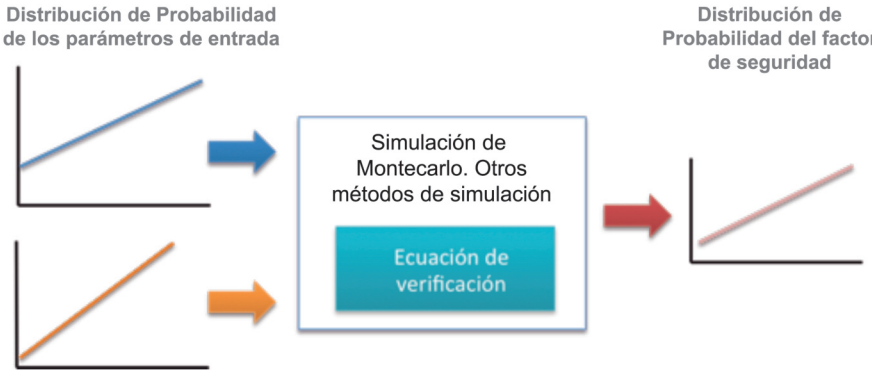


FIGURA 23. Conceptos relacionados con la obtención de la función de probabilidad del factor de seguridad en un estudio de estabilidad de taludes. Elaboración propia basada en (Ho, Leroi & Roberds, 2000)

Como se ha podido comprobar, el cálculo del riesgo es evolutivo, ya que los términos que lo definen, como los agentes del medio físico, lo son también. En su evaluación, es necesario seleccionar una dimensión espacial (de unitaria a global) y una dimensión temporal, y establecer las dependencias entre actividades, que son función de los dos términos anteriores.

3.6.2. Fiabilidad

La Fiabilidad, en el campo de la ingeniería, se define como "la capacidad que tiene un sistema o un componente para desarrollar su función en unas determinadas condiciones durante un periodo de tiempo" . De forma coloquial, la fiabilidad se entiende como el nivel de confianza que se tiene en el buen comportamiento de un elemento o del sistema al completo. Normalmente se obtiene a partir de la probabilidad, y matemáticamente puede expresarse de la siguiente forma:

$$F(t) = P\{T > t\} = \int_t^{\infty} f(x)dx \qquad \textbf{Ec. 15}$$

Donde:

- $f(x)$ es la función de densidad del fallo.
- t es el inicio del periodo de tiempo en el que se realiza el análisis.

La fiabilidad presenta las siguientes características:

- En primer lugar, hablar de fiabilidad es equivalente a hablar de probabilidad: La ocurrencia de un fallo se considera como un fenómeno aleatorio siempre que los agentes que participen en él lo sean también. La fiabilidad no aporta información particularizada sobre fallos individuales, la causa de los mismos o las relaciones entre ellos. Hablar en términos de fiabilidad de un sistema o elemento requiere que se pueda proporcionar una probabilidad de éxito, entendiendo como tal la probabilidad de que no se produzca fallo en un periodo de tiempo, ni dentro de unas bandas de confianza.
- En segundo lugar, la fiabilidad se establece según unos criterios de calidad establecidos a priori: Por lo general, el adjetivo "fiable" se emplea con aquello que no falla. Esto se aplica tanto a las partes individuales del sistema como al sistema en su conjunto.

  En la ingeniería marítima y portuaria, actualmente no se diseña en base a criterios de fiabilidad. Sin embargo, ésta es la tendencia que se está generalizando en los ámbitos de la ingeniería donde ya se han incorporado los cálculos probabilísticos en sus diseños, como la aeronáutica.

- En tercer lugar, la fiabilidad se estudia durante un periodo de tiempo acotado: En términos prácticos, se puede decir que el sistema será fiable (operará con normalidad) hasta el tiempo t. La ingeniería de la fiabilidad trata de asegurarse de que los componentes y los materiales cumplirán con los requisitos durante un periodo mínimo de tiempo. A partir de ahí, no se asegura que siga funcionando correctamente o cumpliendo con su función. La industria automovilística, por ejemplo, especifica esta durabilidad en función de los kilómetros recorridos o en función del número de ciclos de trabajo de las piezas.

  La ROM 0.0 propone que las obras se diseñen para una vida útil determinada. Acotar este periodo permite ajustarse a las necesidades del presente y de un futuro no muy lejano, y de este modo, no sobredimensionarlas.

- En cuarto lugar, se puede establecer un valor de fiabilidad para aquellas operaciones que se desarrollen bajo condiciones acotadas: Estas limitaciones son necesarias puesto que es imposible diseñar un sistema para todos los posibles escenarios que se puedan presentar.

Dado que la mayor parte de los agentes que actúan en la naturaleza tienen un carácter aleatorio, cabe la posibilidad de que se presenten situaciones que no ha sido posible plantearse durante el diseño de la obra, tales como combinaciones raras de agentes, nuevos agentes de explotación, etc. Como consecuencia derivada de estos y otros factores, el proyecto y ejecución de las obras marítimas siempre van a tener asociados un grado de incertidumbre. Cuanto menor sea, más nos estaremos aproximando a las hipótesis de partida.

A continuación se indican unos criterios generales que ayudan a determinar si algo es fiable o no:

- Algo es fiable cuando cumple con su propósito en el plazo de tiempo establecido.
- Algo es fiable cuando tiene la capacidad de funcionar tal y como fue diseñado.
- Algo es fiable cuando ofrece resistencia a que ocurra un fallo.
- Algo es fiable cuando tiene la capacidad de fallar sin que se produzcan consecuencias catastróficas.

Para poder realizar cálculos de fiabilidad en ingeniería se requieren conocimientos estadísticos, de teoría de la probabilidad y de teoría de la fiabilidad, de forma que se puedan establecer requisitos de fiabilidad, medir o predecir ésta, y aconsejar sobre posibles mejoras en los diseños y procedimientos constructivos y de explotación. Actualmente, existen numerosas técnicas tales como el análisis de amenazas, los análisis de los modos de fallo y sus efectos, el análisis mediante árboles de fallo, la predicción de fiabilidad, los ensayos de fiabilidad y de vida acelerada, etc. Dado el elevado número de técnicas disponibles, el coste asociado a su aplicación y los diferentes grados de fiabilidad requeridos dependiendo de la situación y el sistema analizado, la mayoría de los proyectos desarrollan planes de fiabilidad en los que se especifican las tareas que se deben analizar. La función de la ingeniería de la fiabilidad es la de establecer los requisitos de fiabilidad para el elemento, tramo de obra, etc., analizado, establecer un programa de explotación adecuado a su vida útil, describir las medidas correctoras que se deben aplicar para mejorar su fiabilidad y asegurar que cumple con la función para la que fue diseñado bajo unos niveles aceptables de riesgo.

El proceso de determinación de la fiabilidad se puede resumir como sigue: en primer lugar, se deben identificar las amenazas del sistema, calcular los riesgos asociados a ellas y controlarlos de tal forma que no se superen determinados umbrales. El riesgo asumible ha de ser establecido por las autoridades o los clientes. Todas estas tareas normalmente las desarrolla un ingeniero especializado en fiabilidad o un gestor dotado de conocimientos ingenieriles y una educación específica en fiabilidad.

Los estudios de fiabilidad se deben realizar durante toda la vida útil del elemento o tramo de obra, incluyendo las fases de diseño, construcción, explotación y desmantelamiento, y deben estar recogidos en el plan de fiabilidad. Dado un tramo de obra sobre el que realizar un análisis de fiabilidad, una de las primeras tareas consiste en especificar adecuadamente los requisitos de fiabilidad y mantenimiento definidos por los interesados en términos de necesidades globales. Los requisitos de fiabilidad incluyen los del sistema en sí, los de los ensayos y cálculos, las tareas asociadas y la documentación, y deben especificarse en el contrato de proyecto. Los requisitos del mantenimiento incluyen el plan de costes y los tiempos de reparación. La evaluación de la efectividad de las medidas correctoras llevadas a cabo es parte del proceso y forma parte de un buen RPP (*Reliability Program Plan*).

Los requisitos de fiabilidad de las obras marítimas, tal y como recoge la ROM 0.0, se centran en la fiabilidad en materia de seguridad, funcionalidad y operatividad, lo que significa que la probabilidad de que no sean seguros, operativos y/o funcionales debe ser baja o muy baja.

Estos requisitos se han establecido mediante indicadores del nivel de operatividad y de calidad (Puertos del Estado, 2001):

- Operatividad mínima del elemento analizado.
- Número medio de paradas que sufren las operaciones en un intervalo de tiempo de análisis.
- Duración máxima de las paradas.

3.6.3. Vulnerabilidad

La industria aeroespacial ha sido pionera en la certificación de proyectos mediante parámetros de fiabilidad. En este sector se desarrollaron, mediante métodos probabilistas, los primeros cálculos del riesgo asociado a un modo de fallo a través de la verificación de sistemas y componentes. El fundamento de esta verificación reside en simular el comportamiento de todos los elementos de un sistema y determinar su probabilidad de fallo, con la que se evalúa, entre otros términos, el riesgo.

En este contexto, la vulnerabilidad de cada componente (electrónico o mecánico), entendida como la proporción del mismo que sufre una pérdida de fiabilidad, adopta el valor de 0 cuando el componente funciona correctamente (no es vulnerable) y de 1 cuando falla (es completamente vulnerable). Las situaciones intermedias, asociadas a procesos de pérdida de funcionalidad u operatividad, no tienen sentido en aquellos elementos sin entidad espacial o que son unidimensionales, como los componentes electrónicos o las piezas pequeñas de un mecanismo.

Uno de los aspectos más característicos de la Ingeniería Civil en general, y de la Portuaria en particular es la fuerte componente espacial que domina las infraestructuras, así como en las actividades económicas que se desarrollan sobre las mismas. La vulnerabilidad permite considerar el espacio en la evaluación del riesgo. Por todo lo anterior, en el marco de aplicación de este libro se incorpora la vulnerabilidad como el término que representa la porción del elemento de la infraestructura que se ve afectado, o el grado de afección sobre una actividad frente a la ocurrencia de un modo de fallo o parada.

Algunos autores como , o describen la vulnerabilidad como las características de un sistema que causan la posibilidad de que se produzca un daño. se refiere a estas características como "vulnerabilidad de proyecto", la capacidad de un sistema para responder o lidiar con un evento de riesgo. Sin embargo, la definición de vulnerabilidad que se adopta en esta Guía es la proporcionada por , que la define como

> *"el grado de afección al que se ve sometido un elemento o grupo de elementos en riesgo como resultado de la ocurrencia de un suceso que interfiere con el normal funcionamiento de la actividad para la que fueron diseñados, expresada en una escala de 0 a 1, donde 0 corresponde a la inexistencia de daño, y 1 a una pérdida total"*

Un elemento o sistema es vulnerable cuando algún suceso, externo o interno, puede afectar a su normal funcionamiento: las amenazas. Es por ello que vulnerabilidad y amenazas son dos conceptos íntimamente ligados. Entonces, para conocer si un elemento es vulnerable, es necesario saber previamente si está sometido a algún tipo de amenaza.

A continuación se proporcionan dos indicadores prácticos para identificar elementos vulnerables:

1) **El elemento está sometido a una amenaza**. Se entiende como amenaza aquello que al existir favorece la ocurrencia de un modo de fallo o parada operativa. El estar o no sometido a una amenaza se determina mediante la evaluación de su probabilidad de ocurrencia, y la del modo de fallo que la desencadena.

2) **Existen pérdidas económicas** derivadas de la ocurrencia de un fallo: Son aquellas pérdidas que se producen como consecuencia de la materialización de una amenaza. En este caso, relacionadas con las embarcaciones amarradas, la infraestructura y el propio buque que colisiona.

FIGURA 24. Representación de un elemento sometido a una amenaza. El elemento en este caso es un muelle de un puerto deportivo, y la amenaza (materializada) es el buque Queen of Oak Bay, que colisionó en Horseshoe Bay, la Columbia Británica, Canadá. Fuente: fredfryinternational.blogspot.com

La vulnerabilidad, entendida como el nivel de afección que sufre uno o más elementos por un modo de fallo o parada operativa, está además relacionada con la componente económica. El elemento analizado posee un valor económico intrínseco y existe porque desempeña una actividad o da soporte para que una actividad sea llevada a cabo. Por lo tanto, las variaciones sobre su integridad estructural o funcional producen pérdidas económicas.

Estas pérdidas afectan tanto a la actividad a la que da servicio el propio elemento como a otras que dependen directa o indirectamente de él. Para simplificar la evaluación de las consecuencias económicas tras la eventual materialización de fallos o paradas se puede dividir el sistema en el **inmovilizado material** y **actividades**.

Se puede, por tanto, hablar de costes relacionados con el inmovilizado material (como por ejemplo el precio de devolver la infraestructura a su estado funcional) y costes derivados de afecciones sobre el normal desarrollo de las actividades económicas (el precio de tener parados los elementos que componen un sistema económico), que en esta Guía se han denominado costes de la actividad.

La exactitud con que se puede calcular la vulnerabilidad depende de la fase de proyecto en la que se esté evaluando el riesgo, dado que la naturaleza (calidad y cantidad) de la información de partida disponible varía. A continuación se muestran las diferencias entre las fases de servicio:

- **En fase de diseño y construcción,** se dispone de una configuración geométrica preliminar de la infraestructura y una distribución, también preliminar, de los usos económicos de la misma. Sobre esta distribución se pueden aplicar modelos numéricos o físicos con los que analizar los modos de fallo que se pueden dar en el emplazamiento. Los resultados del modelo numérico constituyen una primera aproximación a cómo se distribuirán espa-

cialmente los agentes que afectan a la infraestructura y a sus actividades, constituyendo así la información de partida para evaluar la vulnerabilidad. El criterio experto permitirá seleccionar los modos de fallo principales dependiendo del tipo de actividad, emplazamiento y fase de proyecto.

- **En la fase de explotación,** ya se conoce con precisión la distribución de usos en los espacios en los que se desarrollan las diferentes actividades económicas. En esta fase se podrá desarrollar un estudio de detalle (por ejemplo, en modelo físico) para optimizar la configuración espacial de las actividades en función del grado de vulnerabilidad de cada unidad.

Sin importar cómo se denominen, las características del sistema (incluyendo la capacidad de la organización para gestionar los riesgos, así como las características del proyecto) deberían tenerse en cuenta en el proceso de identificación y gestión de riesgos.

3.6.3.1. Unidades espaciales de análisis

Para poder analizar la vulnerabilidad del inmovilizado material (infraestructura, maquinaria, etc.) es necesario compartimentar los tramos de obra en unidades de menor entidad.

Dada la existencia de diferentes escalas espaciales en las que es posible evaluar el riesgo o los términos que lo componen, a continuación se muestran las que se consideran más útiles para tal fin. Se podrán emplear unas u otras en función de la cantidad de información disponible y del grado de detalle con que se quiera llevar a cabo la evaluación.

Alternativa (*Puertos del Estado, 2001*)*:* Es aquélla que define la geometría del tramo/tramos y del terreno, los parámetros y los agentes que pueden interferir con la obra y su entorno, así como sus acciones.

Figura 25. Fotomontaje de la alternativa 7 del puerto de Pasajes (http://www.southvisions.com)

Tramo de obra (*Puertos del Estado, 2001*)*:* Es el conjunto de partes de la obra que cumplen solidariamente una función específica y relevante de los objetivos y requisitos de explotación de la obra, están sometidos a los mismos niveles de acción de los agentes actuantes, y forman parte de la misma tipología formal y estructural. Esta división permite describir, clasificar, seleccionar y evaluar los factores del proyecto, así como establecer el marco espacial en la verificación de la seguridad, del servicio y de la explotación de la obra.

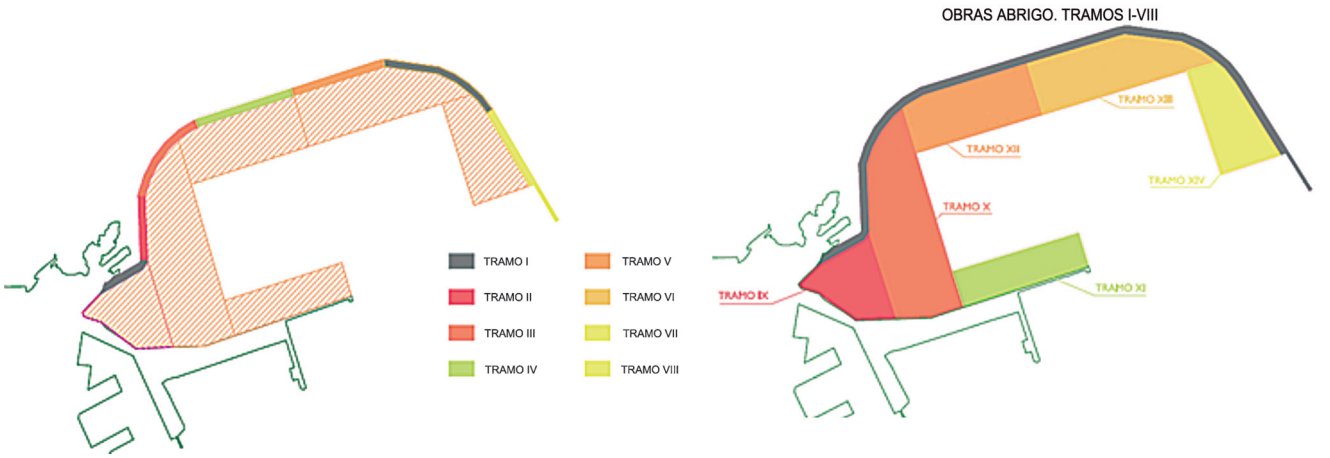


FIGURA 26. Tramos de obra para llevar a cabo la construcción de la alternativa elegida de la ampliación del Puerto de Gijón. Tramos de obras exteriores (izquierda) e interiores (derecha). Anteproyecto para la ampliación del Puerto de Gijón

Tipología: Hace referencia al conjunto de características geométrico-estructurales de la obra que, a su vez, están definidas por las solicitaciones a las que se ven sometidas y al ambiente en que se encuentran. Las tipologías estructurales están por lo general bien definidas y su comportamiento frente a un abanico de solicitaciones está acotado. Este conocimiento facilita la selección de la tipología más adecuada para la función que se debe desempeñar en el tramo de obra que se esté estudiando.

EJEMPLO SOBRE TIPOLOGÍAS QUE SE PUEDEN IDENTIFICAR EN UN TRAMO:

Tipología del tramo VI: Dique en talud. 145 T.
Tipología del tramo VIII: Dique vertical.

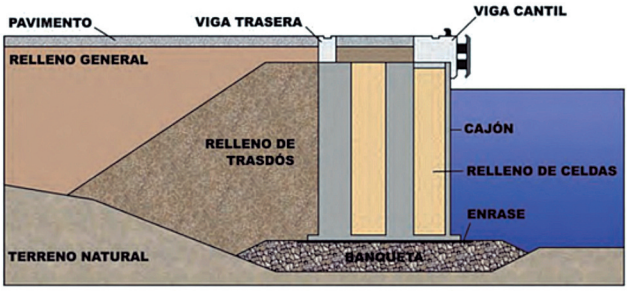


FIGURA 27. Tipología muelle de cajones

Elemento: Un elemento es cada una de las piezas que, de forma individual o conjuntamente con otras de sus mismas características, proporciona una respuesta estructural homogénea frente a las solicitaciones a las que se ve sometida. El conjunto de elementos conforma una tipología. Los elementos que componen los tramos son tridimensionales y, en función de su localización, pueden verse afectados en mayor o menor medida por agentes externos. Sobre los elementos, las operaciones portuarias tienen lugar, las cuales se pueden ver afectadas de forma directa o indirecta en caso de que se produzca un fallo o parada operativa sobre el mismo.

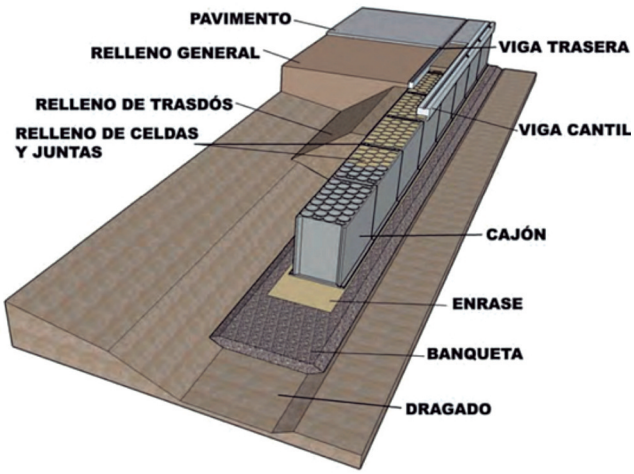


FIGURA 28. Conjunto de elementos que dan lugar a un muelle de cajones. Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas 2008

En función de la figura administrativa a la que pertenezcan y del uso económico asociado, los elementos pueden ser considerados como inmovilizado material, y sobre ellos pueden desempeñarse actividades económicas.

Dado que la vulnerabilidad refleja el nivel de afección sufrido tanto por la infraestructura como por las actividades, se ha distinguido entre dos tipos de vulnerabilidad: **vulnerabilidad del inmovilizado material**, y **vulnerabilidad de las operaciones**. Esta distinción permite abordar su análisis pormenorizado atendiendo a las particularidades de cada ámbito.

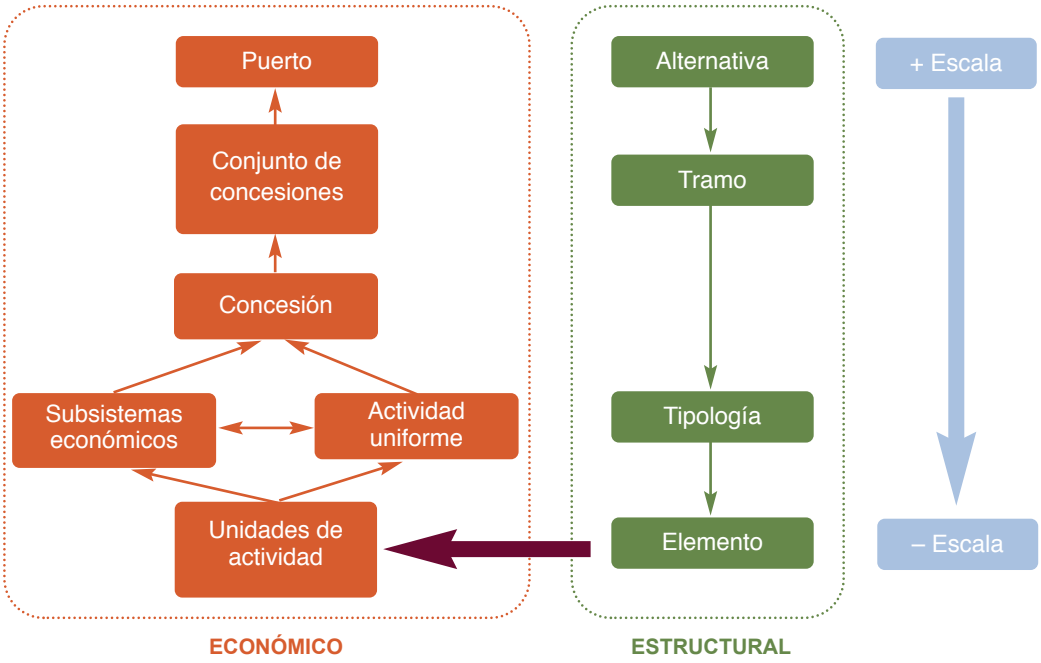


Figura 29. Relación entre la clasificación estructural y operacional de las instalaciones portuarias

ES POSIBLE CONSIDERAR TAMBIÉN LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL, TAL Y COMO RECOGE LA ROM 5.1 (Puertos del Estado, 2012)

La determinación de la vulnerabilidad es un proceso que deriva del análisis de la interacción entre los agentes y la obra o las operaciones. Como se ha podido ver a lo largo de esta sección, la interacción puede derivar en afecciones que generen consecuencias estructurales, sobre la actividad económica, o de ambos tipos. Para conocer los costes derivados de fallos o paradas operativas, es necesario determinar la vulnerabilidad del elemento analizado. Por tanto, la evaluación de costes es dependiente de la existencia o no de la vulnerabilidad, y de su magnitud.

> *Como conclusión se puede decir que un elemento es vulnerable cuando cualquier afección sobre el mismo lleva inherentemente asociadas unas pérdidas económicas*

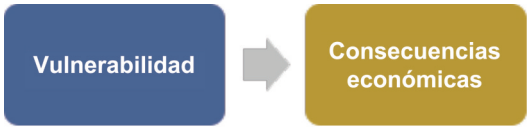


Figura 30. Dependencia de la evaluación de las consecuencias económicas (u operativas) de la existencia de la vulnerabilidad

Para ilustrar lo anteriormente descrito, se proporcionan dos ejemplos conceptuales que ilustran los tipos de vulnerabilidad: Vulnerabilidad del inmovilizado material y Vulnerabilidad de las Operaciones. Ambos conceptos se describen a continuación:

3.6.3.2. Vulnerabilidad del inmovilizado material (V_{IM})

La vulnerabilidad del inmovilizado material se puede definir como:

> *"el grado de afección del inmovilizado material, como resultado de la ocurrencia de un suceso que afecta a su integridad estructural y consecuentemente a su funcionalidad, expresada en una escala de 0 a 1, donde 0 corresponde a nula afección y 1 a la afección total"*

3.6.3.3. Vulnerabilidad de las operaciones (V_O)

La vulnerabilidad de las operaciones se puede definir como:

> *"el grado de afección de las operaciones portuarias, como resultado de la ocurrencia de un suceso que afecta a su normal funcionamiento, expresada en una escala de 0 a 1, donde 0 corresponde a plena operatividad y 1 a una parada operativa"*

La Figura 31 muestra una serie de elementos que forman una sección tipo, correspondiente a una cierta tipología y que, a su vez, forma parte de un tramo de obra. Los elementos dan servicio a las actividades portuarias.

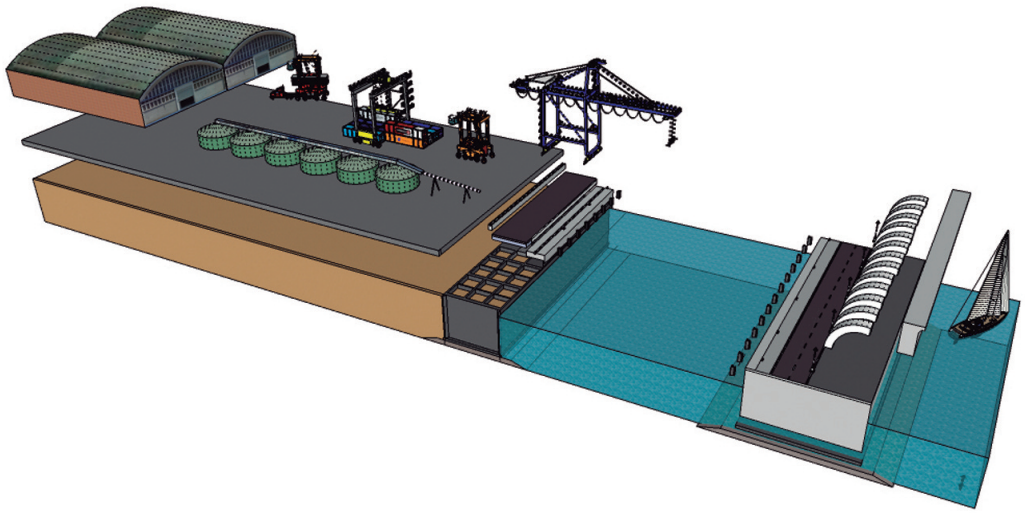


FIGURA 31. Representación de diferentes elementos de infraestructura y de actividades que se pueden encontrar en las instalaciones portuarias: estructuras, aspectos sociales y medioambientales, operaciones portuarias y elementos de la cadena logística

EJEMPLO 1: DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y COSTES POR AFECCIÓN SOBRE EL INMOVILIZADO MATERIAL

El objetivo es determinar la vulnerabilidad de un elemento de obra, así como emplear la terminología descrita hasta ahora sobre el ejemplo propuesto. Como puede verse, se ha seleccionado un tramo de obra caracterizado por una **tipología** de dique vertical. Tras la coronación se dispone de una explanada formada por una solera de hormigón, que es el **elemento** objeto de este análisis. Se observa que en la solera se ha producido una grieta. El **modo de fallo** es, por tanto, *agotamiento resistente de la solera*. En base a lo anterior, el objetivo es determinar la vulnerabilidad del inmovilizado material V_{IM}, siendo éste el elemento "solera".

Para ilustrar el concepto de "nivel de afección a un elemento" se subdivide la solera en celdas de tamaño uniforme de 1 m^2 de superficie cada una.

La información de que se dispone es la siguiente:

- Elemento j: solera de hormigón.
- Modo de fallo i: Existencia de una grieta en la solera.
- Número de unidades en que se divide j [m^2]: 336.
- Número de unidades afectadas por la grieta [m^2]: 40.

En la Figura 33 se muestran situaciones reales del ejemplo teórico sobre el que se está trabajando.

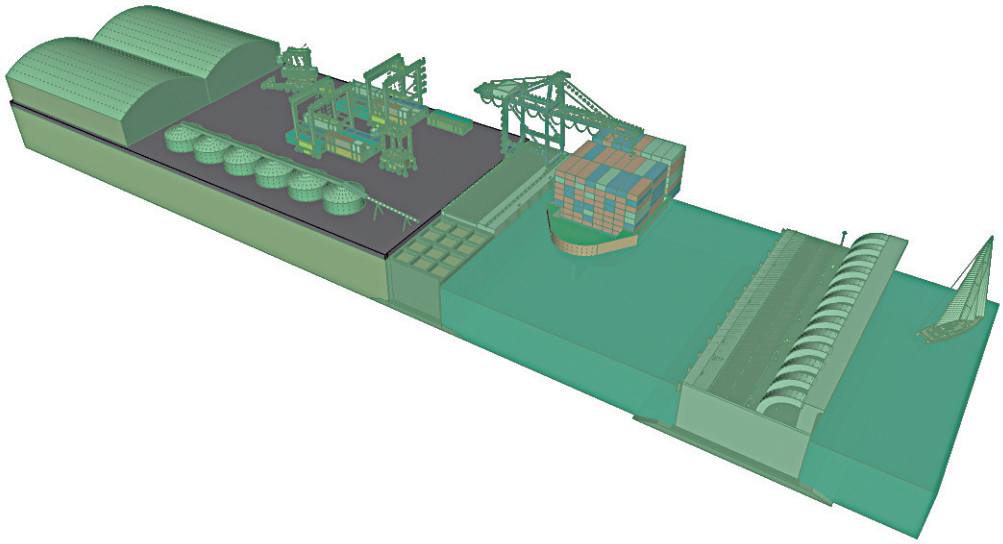


FIGURA 32. Elemento "SOLERA", dentro de la tipología "DIQUE VERTICAL" correspondiente a un tramo de obra

Figura 33. Izquierda: Ejemplo de daños en un pavimento que condiciona su utilización con alguna restricción. Derecha: Daños sobre el pavimento de un puerto que podrían calificarse como ruinosos

La grieta se extiende por una superficie de aproximadamente 40 m², o lo que es lo mismo, 40 unidades.

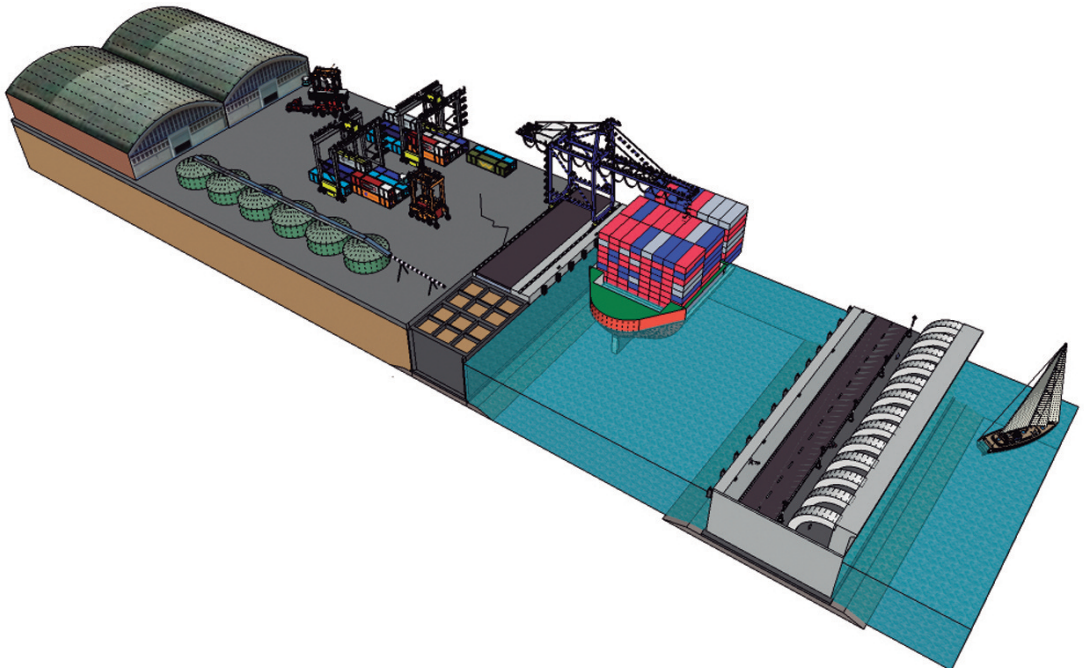


Figura 34. Evaluación de la extensión de la grieta en el conjunto de la solera que permite evaluar la vulnerabilidad estructural de la misma a efectos del ejemplo propuesto

A continuación se determina la vulnerabilidad de la solera:

Vulnerabilidad del inmovilizado material (V_{IM})*:* la grieta produce daños en la solera que es necesario reparar. La vulnerabilidad se entiende como la proporción de superficie que ocupa la grieta en relación a la superficie total del elemento:

$$Vim = \frac{[m^2]\ afectadas}{[m^2]\ Totales} \cdot 100 = \frac{40}{336} = 11{,}9\%$$

Como se introdujo en apartados anteriores, en función del nivel de vulnerabilidad será necesario computar un tipo u otro de costes. Las familias de costes que se pueden activar como consecuencia de la afección sobre el inmovilizado material analizado son:

$$FC_{IM\ Solera} = \begin{bmatrix} \text{Reparación de pequeña entidad} \\ \text{Reparación de gran entidad} \\ \text{Reposición} \\ \text{Desmantelamiento} \end{bmatrix}$$

La tabla que relaciona los costes que se activarán dependiendo del grado de afección es, en este caso, la siguiente:

Nivel de Vulnerabilidad del inmovilizado material [0-1]	Costes asociados
[0 – 0.2)	Reparación de pequeña entidad
[0,2 – 0,5)	Reparación de gran entidad
[0,5 – 0,8)	Desmantelamiento + Reposición
[0,8 – 1]	Desmantelamiento

Tabla 2. Tipo de coste que se activa en función del nivel de vulnerabilidad para el ejemplo propuesto

Dado que el nivel de vulnerabilidad de la solera es del 12% (comprendido en el intervalo 0-0,2), se activará el coste tipo "Reparación de pequeña entidad", siendo éste:

$$C_{IM solera}\ [€] = \text{coste reparación}$$

Ejemplo 2: Determinación de la vulnerabilidad y costes por afección sobre las actividades

El objetivo de este ejemplo es mostrar cómo afectaría un modo de fallo como el rebase a la actividad económica que se desarrolla sobre un elemento de infraestructura.

La información de que se dispone es la siguiente:

- Elemento j: solera de hormigón.
- Modo de fallo i: Inundación de la solera que provoca afección a la zona de acopio de granel sólido.
- Número de unidades en que se divide j [m^2]: 336.
- Número de unidades dedicadas al acopio de granel [m^2]: 336.
- Número de unidades dedicadas al acopio de granel afectadas [m^2]: 250.

Como puede verse, se ha seleccionado un tramo de obra caracterizado por una tipología constructiva: dique vertical. Tras la coronación se dispone de una explanada formada por una solera de hormigón, que es el elemento objeto de análisis. Se observa que esta solera no se ve afectada estructuralmente por los rebases, pero sí se ven afectadas las actividades ubicadas sobre ella.

***Vulnerabilidad de las Actividades Va**:* La consideración de la vulnerabilidad de la actividad económica por parte de la propiedad se tiene en cuenta en la medida que deja de percibir las tasas de ocupación, las tasas de actividad o las tasas de utilización. En este caso, presuponiendo que la actividad comercial aporta unas tasas a la Autoridad Portuaria por el volumen de producción, si sucede que ésta disminuye a causa de que el granel sólido acopiado se moja, la AP percibirá menos ingresos.

$$V_A = \frac{[m^2]\ afectadas}{[m^2]\ totales} = \frac{250}{336} \cdot 100 = 74,4\%$$

Como se ha visto en la metodología, dependiendo del tipo y nivel de vulnerabilidad, se activará una serie de costes. En este caso se ha generado la siguiente relación Vulnerabilidad-Coste, que variará para cada caso de estudio:

Nivel de Vulnerabilidad de las actividades [0-1]	Costes asociados
[0 – 0.2)	0
[0,2 – 0,5)	0
[0,5 – 0,8)	Disminución de un 60% de la Tasa de Actividad
[0,8 – 1]	Disminución de un 90% de la Tasa de Actividad

Tabla 3. Tipo de coste que se activa en función del nivel de vulnerabilidad para el ejemplo propuesto

Dado que el nivel de vulnerabilidad de la actividad es de un 74,4%, se activará el coste tipo "Disminución de un 60% de la Tasa de Actividad":

$$C_{A,\ granel}\ [€] = \text{disminución tasa actividad}$$

Dado que este ejemplo es meramente ilustrativo, para calcular el Riesgo sería necesario sustituir los costes identificados por sus valores cuantitativos.

En este caso, el riesgo es fundamentalmente operativo, mientras que en el ejemplo anterior se trata de un riesgo estructural y operativo a su vez.

Los ejemplos anteriores ilustran los conceptos de vulnerabilidad del inmovilizado material y vulnerabilidad de las operaciones. Más allá de eso, se ha

mostrado cómo se activan unos costes u otros en función del grado de afección sobre los distintos elementos y actividades que componen las instalaciones portuarias. Es necesario destacar que los costes asociados a determinados tramos de vulnerabilidad son el resultado de aplicación de hipótesis de partida, que habría que establecer encada caso.

3.6.4. Coste

El riesgo pone de manifiesto la gravedad del fallo o la parada operativa a través de la estimación de las consecuencias económicas derivadas de su ocurrencia. Para evaluar correctamente el riesgo es necesario generar una estructura de costes del sistema que se esté analizando, de tal modo que sea posible desarrollar una valoración económica de fallos o paradas lo más completa posible. Ello implica identificar y conocer por un lado la infraestructura y las operaciones que se verán afectadas en un emplazamiento dado, y por otro, el tipo de coste que se generará como consecuencia de la citada interacción. Además, en el caso de que se evalúen las consecuencias derivadas sobre las operaciones, es posible que no se disponga de la información económica completa para evaluar dichas consecuencias en términos monetarios. En este caso, se propone como alternativa la valoración del riesgo en base a la afección que sufren los parámetros operativos de las actividades.

Para determinar los costes derivados de paradas operativas, se procederá como sigue:

- **Identificación de las operaciones** que se desarrollan sobre el elemento estructural cuyo riesgo se quiere evaluar.
- **Identificación de las actividades dependientes o relacionadas con las primeras**. Esta relación de dependencia sirve de indicador sobre la magnitud de las consecuencias totales, derivadas tanto de la actividad que sufre paradas operativas, como de las actividades que dependen de ella.

La identificación de las actividades que se desarrollan en las terminales puede ser una tarea ardua. Sin embargo, la compartimentación del espacio en subsistemas puede facilitar esta tarea. Tal y como propone Monfort , entre otros, resulta práctico dividir el espacio en subsistemas sobre los que se desarrollan actividades concretas. A pesar de la variedad de configuraciones que presentan las terminales, en prácticamente todas se pueden identificar 6 subsistemas (Monfort, *et al.*, 2001):

- **Atraque y amarre**. Comprende desde la actividad del práctico, pasando por la gestión del tráfico en las dársenas, hasta el proceso de atraque y amarre.
- **Carga y descarga**. Engloba la actividad de distintos tipos de grúas, estiba, movimiento de carga dentro del buque.
- **Almacenamiento**. En esta actividad se coloca ordenadamente la carga y se gestiona.
- **Manipulación**. Implica el movimiento de la carga en la zona de almacenamiento y la transformación de la carga en productos derivados (si procede).
- **Transporte interno**. Traslado de la carga de la zona de recepción/entrega de la misma hasta las zonas de almacenamiento y manipulación.
- **Entrega y recepción**. Gestión de las llegadas de carga a puerto por tierra y por mar, y control de la mercancía.

Cuando un fallo o parada tiene lugar, se desencadenan automáticamente una serie desembolsos económicos, necesarios para restaurar la funcionalidad de la infraestructura o de las operaciones.

Desde el punto de vista de la Autoridad Portuaria, los gastos asociados a situaciones de inoperatividad o daños en la infraestructura consiste principalmente en la disminución de los ingresos por tasas, como por ejemplo la de ocupación y la de aprovechamiento. Las primeras pueden dejar de ser percibidas si la explotación es inviable debido a fallos de la infraestructura que la sustenta, y las segundas dejan de ser percibidas o se ven reducidas al disminuir el rendimiento de las instalaciones por fallos o paradas operativas. Las particularizaciones sobre la evaluación del coste se tratarán en el Capítulo 9.

Tipos de gastos derivados de fallos o paradas operativas, que debe asumir la propiedad	
Gastos necesarios para devolver funcionalidad y fiabilidad al inmovilizado material	**Ingresos que se dejan de percibir por cese de actividad o paradas operativas**
Gastos de conservación	Tasas de ocupación (Ley 33/2010)
Gastos de reparación/reposición	Tasas por el aprovechamiento (Ley 33/2010)
Gastos de desmantelamiento	

Tabla 4. Resumen de los gastos derivados de la ocurrencia de modos de fallo o paradas operativas que son considerados en esta Guía

La información que permite determinar las consecuencias económicas derivadas de un fallo o de una parada operativa será más precisa en la fase de explotación de la infraestructura que en la fase de

diseño, ya que entonces se conoce con detalle el tipo y nivel de actividad de las instalaciones.

La información económica necesaria para la evaluación del riesgo en la fase de diseño se puede estimar mediante los rendimientos esperados y precios estándar de cada actividad en un horizonte objetivo. Por un lado se dispondrá de información aproximada de la distribución de usos, y por otro se realizarán hipótesis sobre el nivel de actividad que tendrá la infraestructura en un momento dado. En este caso es fundamental contar con un experto que asesore en esta toma de decisiones.

La información en fase de explotación se puede conocer mediante los rendimientos y precios de cada actividad en el momento del análisis, que es una valiosa información de partida para realizar un análisis plurianual, como es el caso de la vida útil de la infraestructura.

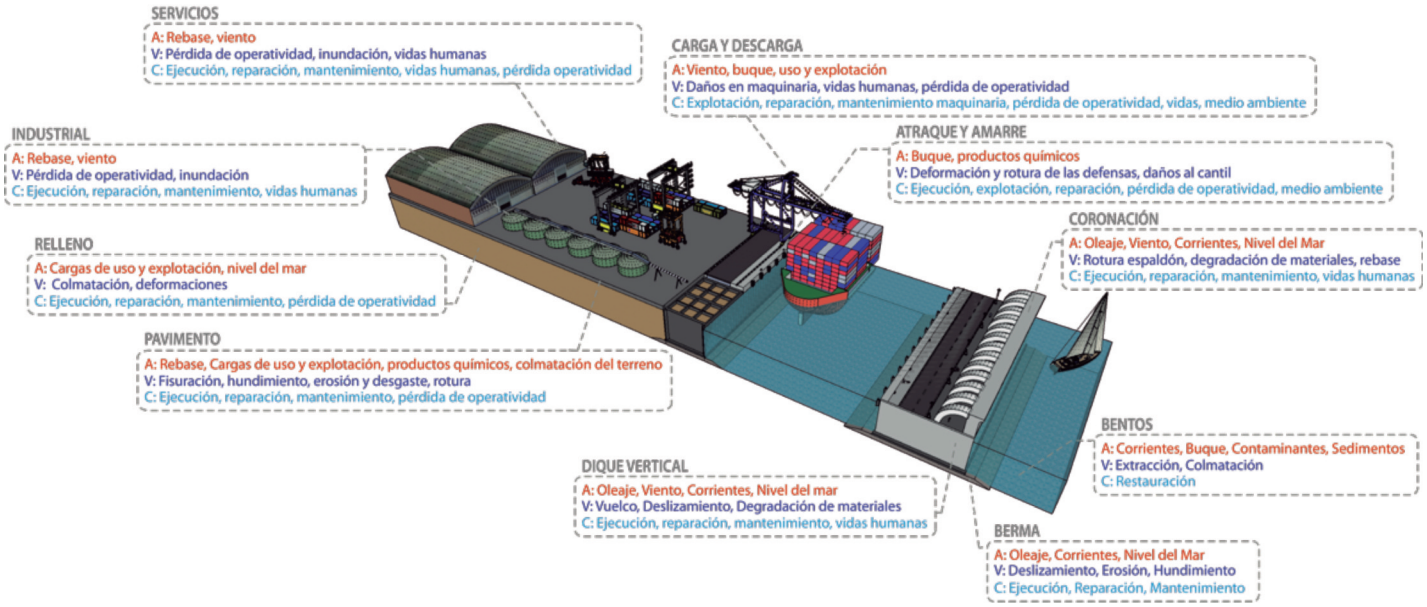


FIGURA 35. Elementos pertenecientes a una sección tipo sobre los que proceder a la evaluación del riesgo. Identificación de las amenazas (A), modos de fallo o paradas operativas bajo los que son vulnerables (V) y costes (C) derivados de la ocurrencia de fallos o paradas operativas

3.6.5. Desarrollo espacio-temporal de cada uno de los términos de la ecuación de riesgo

Los Análisis Cuantitativos de Riesgo o QRA (del inglés *Quantitative Risk Analysis*) pueden efectuarse en varias escalas de tiempo y espacio, clasificadas según como:

a) Análisis del riesgo global: permite determinar la escala del problema y definir la contribución relativa sobre el riesgo de los diferentes componentes. Esta tarea facilita la elaboración de políticas de gestión del riesgo y la asignación óptima de los recursos disponibles. El resultado de este análisis sirve a las organizaciones implicadas en la determinación de los niveles tolerables de riesgo

b) Análisis del riesgo relativo: permite determinar cuál es la acción prioritaria a seguir

c) Análisis del riesgo en un emplazamiento específico: permite evaluar las amenazas existentes y el nivel de riesgo en términos de la afección que sufre un emplazamiento dado. Este nivel de análisis será de interés para los proyectistas, ya que facilita determinar si los niveles de riesgo en un emplazamiento son aceptables, la identificación de las limitaciones del pre-diseño, la evaluación de las medidas de mitigación, etc

d) Preparación de las amenazas o mapas de riesgo: permite la zonificación de amenazas o la planificación del control de una región o área

Puede decirse que a) y b) forman parte de la Gestión del Riesgo, y c) y d) del Cálculo del Riesgo en sí. El proceso global simplificado se muestra en la Figura 37. Puede verse que para proceder a calcular el riesgo es prioritario identificar las amenazas, estimar su frecuencia de aparición (probabilidad de ocurrencia) y estimar sus consecuencias (evaluación económica).

FIGURA 36. Relación a diferentes escalas de la zonificación del puerto, tanto de la infraestructura como de la dimensión económica de las actividades que desarrolla

El periodo de tiempo que se debe considerar para caracterizar el riesgo varía dependiendo de la escala temporal para la que queramos evaluarlo. La más habitual para el ámbito de la ingeniería marítima y portuaria es la vida útil de la obra. Asimismo, y si el análisis lo requiere, se podrán elegir escalas de tiempo menores como las estaciones, los años meteorológicos, los años del calendario, etc. A continuación se describe de qué depende la evolución espacial y temporal para los términos que componen el riesgo:

3.6.6. Resumen

3.6.6.1. Probabilidad

El término probabilidad, como ya se ha indicado a lo largo del presente capítulo, se obtiene a partir del modo de fallo o parada operativa al que se encuentra adscrito. Éste a su vez depende fundamentalmente de la magnitud de los agentes del medio físico, y de uso y explotación que actúan sobre la infraestructura, los cuales evolucionan en el tiempo.

La distribución espacial de la probabilidad depende de la localización espacial en la que se producen los modos de fallo o parada operativa. Cuando se produce la concatenación de modos de fallo, en la que unos provocan la ocurrencia de otros, la probabilidad se traslada espacialmente desde el emplazamiento del fallo original hasta el emplazamiento del último de la cadena de fallos.

3.6.6.2. Vulnerabilidad

Dado que la vulnerabilidad hace referencia al grado de afección que sufre un elemento frente a un modo de fallo, ésta depende de la distribución espacial de los fallos o paradas operativas. A su vez, en determinadas ocasiones, los modos de fallo dependen de agentes del medio físico cuya magnitud puede aumentar conforme se incrementa el periodo de medición de los mismos, ya que existe más probabilidad de que se produzcan eventos extremos. Por tanto, la vulnerabilidad puede aumentar bien porque así lo hace la magnitud o la frecuencia de los agentes del medio físico, o de uso y explotación, bien porque se degradan los parámetros característicos de los materiales que componen la infraestructura.

3.6.6.3. CONSECUENCIAS ECONÓMICAS

La descripción espacial del coste derivado de la ocurrencia de un modo de fallo o parada operativa es compleja, puesto que es necesario computar tanto los costes asociados a actividades que se desarrollan físicamente sobre el elemento analizado como los asociados a actividades dependientes de éstas y que pueden o no estar próximos.

La descripción temporal del coste se divide en dos ramas: la evolución del coste estructural y la evolución de los costes asociados al cese o a la pérdida de actividad económica. Por un lado, el coste necesario para devolver un elemento degradado o que ha perdido funcionalidad a su situación original se va incrementando a lo largo del tiempo, por lo que será necesario disponer de una fórmula de actualización de precios para poder calcular este coste adecuadamente. Por otro lado, el coste asociado a la pérdida de actividad económica fluctúa con el paso del tiempo, dado que el mercado es el que determina la demanda y la importancia de dicha actividad, que puede haberse incrementado o haber disminuido con el paso del tiempo.

3.6.7. La gestión del riesgo

La gestión del riesgo puede definirse como:

> *"La identificación y priorización de riesgos que deben ser atendidos, así como la aplicación económica y coordinada de recursos para minimizar, monitorizar y controlar la probabilidad y/o el impacto de eventos desafortunados"*

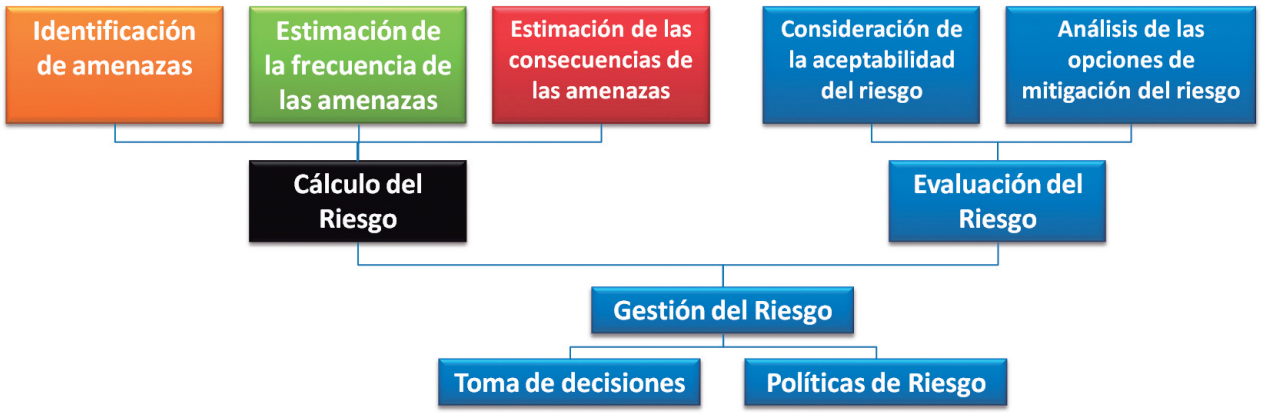


FIGURA 37. Esquema del procedimiento a seguir para establecer políticas de gestión de riesgo. Elaboración propia a partir de (Ho, Leroi, & Roberds, 2000)

Sintéticamente, la gestión del riesgo permite:

- Identificar riesgos de forma metódica.
- Crear una base de datos de riesgo que permita realizar análisis evolutivos del mismo.
- Organizar y gestionar la información relativa a los agentes que ponen en peligro la fiabilidad y operatividad de las infraestructuras y las operaciones.
- Disponer de un mapa de gestión, en base al cual sea posible tomar decisiones para reducir la probabilidad de los fallos o paradas operativas.
- Generar una estructura de costes, tanto de construcción como de explotación.
- Poseer un mayor conocimiento sobre las dependencias entre actividades económicas y, por lo tanto, del mercado al que la infraestructura da servicio.
- Evaluar las consecuencias económicas derivadas de la interacción entre los agentes del medio físico y las actividades.
- Disponer de una provisión económica para hacer frente a los riesgos que se materialicen (Disposición de contingencia).

La evaluación del riesgo implica la recopilación de la información necesaria para conocer los tres aspectos fundamentales que rodean al proyecto:

- Información económica: costes de inmovilizado y de la explotación.
- Información sobre el medio físico y los agentes de uso y explotación.
- Información sobre qué proporción de la obra o de la explotación se verá afectada por la ocurrencia de modos de fallo o paradas operativas.

Este conocimiento permite anticiparse a las situaciones adversas y prever acciones paliativas que permitan minimizar sus consecuencias.

La gestión de riesgos busca reducir la incertidumbre que rodea los proyectos (López, A., 2011).

En los últimos años se han desarrollado varios estándares de gestión de riesgo, entre los que se encuentran el del *Project Management Institute (PMI)*, el del *National Institute of Science and Technology* y los de las sociedades actuariales o los estándares ISO, como el ISO 31000 (Associations, 2002).

Las metodologías, definiciones y metas de cada estándar varían en función del contexto en que se evalúe el riesgo: gestión de proyectos, procesos industriales, objetivos financieros, salud y seguridad pública, o el ámbito marítimo-portuario.

Para cada riesgo identificado, se pueden tomar dos decisiones: aceptarlo (asumir las consecuencias) o reducirlo

La gestión del riesgo según es un concepto que comprende la interrelación de dos procesos: la toma de decisiones basadas en el Riesgo *(Risk-Informed Decision making* o RIDM) y la gestión permanente del Riesgo *(Continuous Risk Management* o CRM). El primer proceso trata de mejorar la toma de decisiones, como las relacionadas con el diseño, mediante el uso de información sobre riesgo e incertidumbre (resultados del *Project Risk Analysis)* en la selección de alternativas y el establecimiento de los requisitos de funcionamiento.

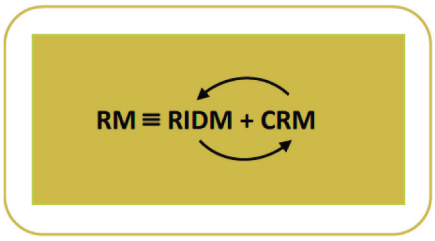


Figura 38. Gestión del riesgo como interacción de la toma de decisiones basada en información sobre riesgo y la gestión continua del riesgo (Nasa, 2011)

El *Project Risk Management* o PRM se describe como una forma de identificar riesgos y reducir sus efectos negativos en el proyecto mediante la generación de escenarios (de riesgo) y el desarrollo de estrategias de respuesta , ya que el cálculo del riesgo no se entiende si no es para elaborar un plan para su mitigación. El *Project Management Institute* lo explica como el "proceso sistemático de identificar, analizar y responder a los riesgos de los proyectos".

La identificación y el análisis de los riesgos a los que los proyectos están sometidos es fundamental para una gestión efectiva. Identificar un riesgo se puede definir como la tarea de reconocer y examinar los riesgos potenciales, sus fuentes y sus consecuencias . Se trata de un proceso sistemático de identificación, catalogación y evaluación continua de los riesgos asociados a un proyecto. Esto se perfila como una de las tareas más importantes del PRM, y según Williams , posiblemente es el paso más complicado. La ventaja de realizar lo más cuidadosamente esta tarea es que simplifica, según Bajaj , su análisis y gestión. Para Godfrey , el objeto de la identificación de riesgos es responder a la siguiente pregunta:

¿Cuáles son las características del proyecto o fuentes de riesgo que pueden causar fallos?

La identificación de riesgos permite estar seguro del alcance de los objetivos de los proyectos y de la capacidad del contratista y del propietario de adaptarse a estos límites. Más allá de lo anterior, esta fase proporciona la base para elegir la estructura organizativa más adecuada, el método de ofertas, la estrategia de los contratos, y finalmente, el reparto de riesgos entre los participantes del proyecto (McKim, 1990).

Una vez identificados los riesgos principales, el objetivo es analizarlos y gestionarlos, y finalmente, seleccionar las medidas de mitigación, transferencia, evasión y control (Godfrey, 1996).

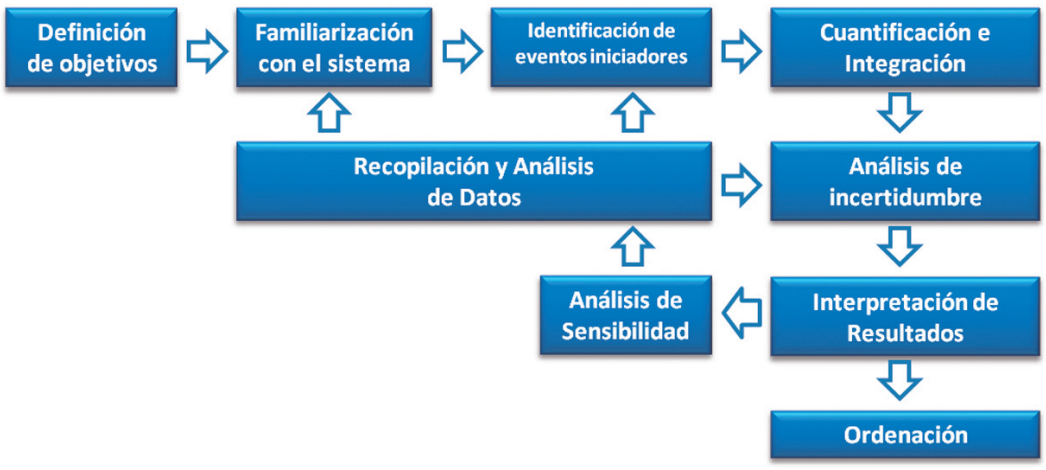


Figura 39. Esquema de las tareas que comprende el Project Risk Assessment. Elaboración propia basada en (Nasa, 2011)

La gestión sistemática del riesgo permite la detección temprana de los riesgos. Como resultado, se puede asegurar que los recursos limitados de los que se dispone se concentren en los riesgos de mayor magnitud para alcanzar el mayor efecto, como por ejemplo, analizar con detalle aquellas zonas que pueden generar más gastos o las más expuestas (Al-Bahar & Crandal, 1990).

La gestión del riesgo no es una actividad que se desarrolle una sola vez, sino que se debe realizar de forma continuada a lo largo de la vida de un proyecto u obra. De acuerdo con , y otros autores anteriormente mencionados, además de las tres etapas anteriormente indicadas (identificación, análisis y plan de mitigación), NASA 2011 incorpora dos más: seguimiento y control.

Los estudios sobre gestión del riesgo se pueden agrupar en cuatro categorías (Dikmen, Birgonul & Arikam, 2004):

1. Desarrollo de marcos conceptuales y modelos de procesamiento sistemático de riesgos.

2. Investigación de riesgos, tendencias de la gestión de riesgos.

3. Aplicación de la identificación de riesgos y técnicas de análisis a diferentes proyectos.

4. Desarrollo de herramientas de apoyo a la gestión de los riesgos.

> *La conceptualización del riesgo difiere de su cuantificación. De hecho, la definición del riesgo no va necesariamente asociada a un método con el que obtener un valor numérico que permita catalogarlo*

Al igual que, para la definición del riesgo, el método para su cuantificación no presenta homogeneidad entre los autores. Algunos de ellos, como , definen la cuantificación del riesgo como la evaluación de la magnitud y frecuencia de cada evento (que puede derivar en un riesgo), que puede referirse a una situación aislada o una serie de incidentes. Existe una serie de técnicas de análisis que se pueden emplear para cuantificar los riesgos, entre las que se encuentran los análisis de sensibilidad, el análisis probabilístico mediante simulaciones de Montecarlo y el análisis mediante árboles de fallo, que permiten determinar la probabilidad de una secuencia de fallo . No obstante lo anterior, una de las técnicas estándar para cuantificar el riesgo es el *"Quantitative Risk Analysis"* o QRA, que proporciona una metodología para calcular el riesgo mediante un examen sistemático de los factores que contribuyen a la materialización de una amenaza, estableciendo las probabilidades de los factores influyentes. El análisis de riesgo mediante QRA permite responder a las siguientes preguntas clave:

1. ¿Qué puede causar daño? [Identificación de amenazas].

2. ¿Con qué frecuencia? [Cálculo de la frecuencia de aparición de las amenazas].

3. ¿Qué puede ir mal? [Cálculo de las consecuencias].

4. ¿Cuál es la probabilidad del daño? [Cuantificación del riesgo].

5. ¿Qué se hace de acuerdo con la información anterior? [Aceptabilidad del riesgo].

6. ¿Qué debería hacerse? [Gestión del riesgo].

Cuando se ha identificado un riesgo, es necesario responder ante él. Las principales estrategias que se adoptan en gestión de riesgos son radicalmente distintas entre sí, y dependen en gran medida de las consecuencias asociadas a la materialización del riesgo. Entre estas estrategias se pueden citar la de reducción del riesgo, transferencia del riesgo a otros actores con mayor preparación para asumirlo, asumir el riesgo o evitarlo. Según Mills , la respuesta más eficiente frente a la identificación de un riesgo es asignárselo a la parte que esté en las mejores condiciones para aceptarlo.

Los principales protagonistas en la toma de decisiones de índole económica, dentro del Sistema Portuario, son el promotor, la propiedad y el operador. Esta Guía pretende desarrollar la metodología general que, mediante la incorporación de una serie de particularidades del campo marítimo-portuario, permita calcular el Riesgo desde la perspectiva de estos tres agentes. A lo largo del texto se hará referencia a los aspectos que es necesario tener en cuenta para poder adaptar la metodología según el caso. La perspectiva desde la que se evalúa el riesgo es importante, ya que el propietario del riesgo, la entidad que se responsabiliza de su gestión, debe cumplir una serie de características, entre las que se encuentran (Godfrey, 1996):

- Tener algún tipo de interés sobre los beneficios o perjuicios que supone la materialización del riesgo.

- Aceptar la responsabilidad sobre el riesgo y la estrategia a adoptar.

- Ser responsable económico de los gastos necesarios para mitigar la totalidad o parte del daño producido por el riesgo en el caso de que éste se materialice.

3.6.8. Modelos actuales de gestión del riesgo

A día de hoy, el método que mejor contempla la gestión del riesgo es el análisis de contingencias. Etimológicamente, el término contingencia es sinónimo de *riesgo* (RAE). Sin embargo, en el ámbito de este texto, no se puede tratar como tal.

Las contingencias son instrumentos de gestión que contienen las medidas técnicas, humanas y organizativas necesarias para garantizar la continuidad de una actividad. Es decir, sobre la base de la información que se dispone de la actividad económica, permiten asegurar un resguardo económico para hacer frente a los riesgos que pueden afectar a la actividad.

Este estudio previo es necesario para cuantificar la asignación económica y se denomina plan de contingencia. Los planes de contingencia son iterativos, consistentes en la repetición de la secuencia Planificar – Ejecutar – Verificar – Actuar (PDCA, del inglés *Plan-Do-Check-Act*) en cada nuevo plan que se elabora. Estos planes tienen su origen en los análisis de riesgo, y toman como información básica su evaluación. Sobre dicha base se seleccionan las medidas más adecuadas entre diferentes alternativas, que se plasman en el plan de contingencias, junto con los recursos necesarios para ponerlo en marcha. Este plan debe ser revisado periódicamente. El plan de contingencias siempre debe ser cuestionado cuando se materializa una amenaza, y siempre en función de lo siguiente:

- Si la amenaza estaba prevista y las medidas tomadas fueron eficaces, se corrigen solamente aspectos menores del plan para mejorar la eficiencia.
- Si la amenaza estaba prevista pero las medidas fueron ineficaces, debe analizarse la causa del fallo y proponer nuevas medidas.
- Si la amenaza no estaba prevista, debe promoverse un nuevo análisis de riesgos. Es posible que las medidas adoptadas fueran eficaces para una amenaza no prevista. A pesar de lo anterior, debe analizarse lo ocurrido.

El plan de contingencias se divide en tres apartados, cada uno de los cuales detalla las medidas a tomar para cada una de las fases en que se encuentren las amenazas:

- **El plan de respaldo**: Contempla las medidas preventivas antes de que se materialice una amenaza. Su finalidad es evitar dicha materialización.
- **El plan de emergencia**: Contempla las medidas necesarias durante la materialización de una amenaza, o inmediatamente después. Su finalidad es paliar los efectos adversos de la amenaza.
- **El plan de recuperación**: Contempla las medidas necesarias una vez materializada y controlada la amenaza. Su finalidad es restaurar el estado de las cosas tal y como se encontraban antes de la materialización de la amenaza.

Por otra parte, el plan de contingencias no debe limitarse a estas medidas organizativas, sino que debe expresar claramente:

- Qué recursos materiales son necesarios.
- Qué personas están implicadas en el cumplimiento del plan.
- Cuáles son las responsabilidades concretas de esas personas y su rol dentro del plan.
- Qué protocolos de actuación deben seguir y cómo son.

A continuación se muestran las directrices que propone la CEI 73 (ver Tabla 5) para la identificación, estimación y gestión de riesgos, así como los modelos de tablas que pueden ayudar a identificar riesgos:

- Identificar, caracterizar y evaluar las amenazas.
- Evaluar la vulnerabilidad frente a las amenazas existentes.
- Determinar el riesgo (mediante la evaluación de las consecuencias esperadas).
- Identificar maneras de reducir los riesgos.
- Priorizar las medidas de reducción del riesgo basadas en una estrategia.

Aspecto a tratar	Tarea asociada
Alcance del riesgo	Descripción cualitativa de los sucesos, tamaño, tipo, número y dependencias
Naturaleza del riesgo	
Interesados	Los interesados y sus expectativas
Cuantificación del riesgo	Importancia y probabilidad
Tolerancia del riesgo	Potencial de pérdida e impacto del riesgo
Tratamiento del riesgo y mecanismos de control	
Acción potencial de mejora	Recomendaciones para reducir riesgos
Política y estrategia a desarrollar	Identificación del responsable de la función de desarrollo de la política y la estrategia

Tabla 5. Modelo de descripción de riesgos según la CEI 73

En la Tabla 6 se muestra la clasificación de las consecuencias en altas, medias o bajas en relación a dos factores de análisis: el impacto financiero y la preocupación que se desataría entre aquéllos que tienen algún interés puesto en el valor del riesgo financiero.

Altas	• El impacto financiero es susceptible de superar x€. • Alta preocupación de los interesados
Medias	• El impacto financiero es susceptible de situarse entre y€ y x€. • Preocupación moderada de los interesados
Bajas	• El impacto financiero es susceptible de situarse por debajo de y€. • Baja preocupación de los interesados

Tabla 6. Ejemplos de estimación de las consecuencias según la información financiera y la preocupación de los interesados

En la Tabla 7 se clasifica la probabilidad de ocurrencia de un evento en alta, media o baja, según éste sea susceptible de ocurrir cada año, en un periodo de entre 1 y 10 años o dentro de más de 10 años, respectivamente. Como puede verse, los criterios son definidos por el usuario, y dependiendo del fenómeno analizado la clasificación podrá variar para reflejar de forma más fidedigna la realidad.

Por su parte, la ISO 31000 propone las siguientes recomendaciones para gestionar el riesgo de forma efectiva:

- Formar parte de los procesos organizativos y ser partícipe en la toma de decisiones.
- Especificar las incertidumbres y asunciones que se realizan.

Estimación	Descripción	Indicadores
Alta (Probable)	Susceptible de ocurrir cada año o más del 25% de probabilidad.	Posibilidad de que suceda varias veces en el periodo de tiempo (por ejemplo, la vida útil, 10 años). Ha ocurrido recientemente.
Media (Posible)	Susceptible de ocurrir en un periodo de 10 años o menos del 25% de probabilidad.	Podría suceder más de una vez en el periodo de tiempo.
Baja (Remota)	No es susceptible de ocurrir en un periodo de 10 años o menos del 2% de probabilidad de que ocurra.	No ha sucedido. Es poco probable que suceda.

Tabla 7. Ejemplos de estimación de la probabilidad de ocurrencia en función de a los indicadores

- Ser sistemático y estructurado en la planificación y ejecución de las medidas a tomar para mitigar los riesgos.
- Tomar como datos de partida la mejor información disponible.
- Tener en cuenta los factores humanos a la hora de evaluar riesgos.
- Ser dinámico, iterativo y responsable, así como tratar de mejorar continuadamente.
- Estar asesorado de forma continua o periódica.

A pesar del desarrollo de estándares para la gestión del riesgo, la realidad en el ámbito de la ingeniería marítima y la explotación portuaria es que no se emplean de forma extensiva.

Como una primera aproximación, a través de la estrategia de inversión que se elija en la ejecución de una obra o cualquier otra actividad económica, se puede decir que existen dos estrategias de gestión:

A) Inversión inicial elevada, lo que conduce a obras con una vulnerabilidad inicial muy baja.

B) Inversión inicial baja, donde las obras cuentan con una vulnerabilidad mayor que en el caso anterior.

El caso A representa la estrategia que se sigue tradicionalmente en la ingeniería civil. Las obras son concebidas para que no puedan fallar, o para que, si lo hacen, sea de forma accidental, es decir, con una baja probabilidad asociada. Este modelo de gestión hace que la inversión inicial sea muy elevada, con lo que el *cash-flow* de la obra tendría una forma similar a línea discontinua de la Figura 40:

Se observa que en la Figura 40, durante la fase de construcción, las curvas alcanzan la rama negativa del coste, lo que indica que se ha efectuado una inversión. A partir de la fase de explotación, la curva teóricamente debe crecer, tal y como refleja la línea discontinua, lo que indica que se están percibiendo ingresos que deben emplearse para amortizar la inversión y para obtener beneficios. En este modelo

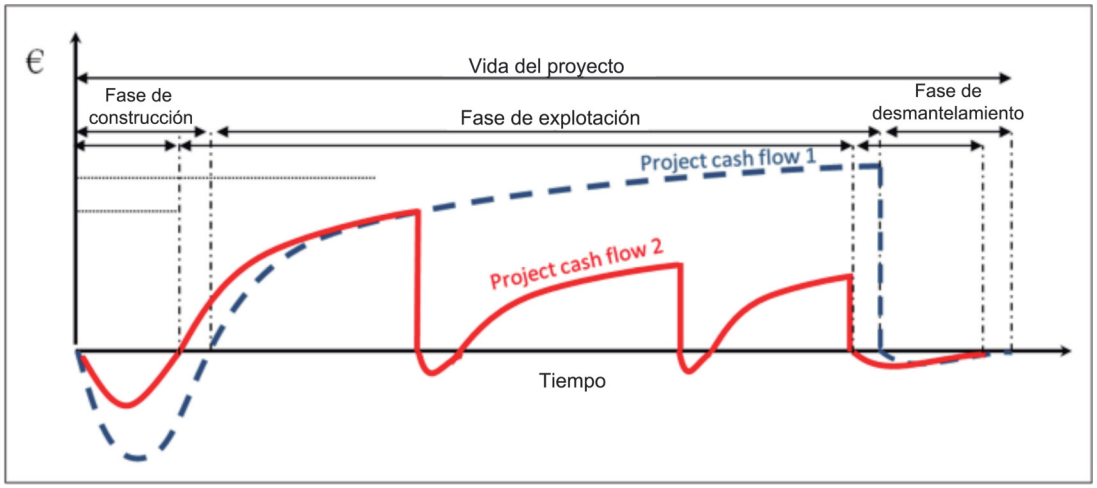


Figura 40. Cash-flow de un proyecto constructivo estándar en el que no se tiene en cuenta la estrategia de gestión de riesgos (*Project cash flow 1*) y en el que sí se tiene en cuenta (*Project cash flow 2*)

se invierte para que no se produzcan modos de fallo.

El caso B representa una estrategia alternativa en la que la inversión inicial es baja pero se van realizando inversiones sucesivas a medida que los fallos o paradas son susceptibles de ocurrir.

Como puede apreciarse en la línea continua, la inversión inicial es menor que en el caso de la línea discontinua. En la fase de explotación, la curva de flujo de caja (*cash flow*) va creciendo hasta que se produce una nueva inversión, lo que ocurre tres veces en total. Este modelo propone la distribución de las inversiones a lo largo de la vida útil de la obra, con lo que no es necesario alcanzar un nivel de endeudamiento muy elevado al inicio, sino que se pueden concentrar las inversiones en el momento que sean necesarias. En este modelo se invierte para que los modos de fallo o parada puedan tener lugar.

3.6.9. El futuro de la gestión del riesgo

Se ha podido comprobar que existe toda una rama del conocimiento dedicada a la gestión del riesgo. Sin embargo, se ha observado que la información disponible sobre los parámetros de los que depende el riesgo se organiza y se gestiona en forma de tablas o gráficas que no permiten considerar de forma conjunta más de 3 o 4 variables, aun sabiéndose que pueden existir otras igual de influyentes que concomitan y no pueden ser ignoradas. Además, se clasifica la probabilidad en 2 o 3 niveles de importancia, lo que aumenta las generalizaciones y afecta por tanto a la toma de decisiones precisas.

En el cálculo del riesgo de las instalaciones marítimas y portuarias, es imprescindible considerar cómo los modos de fallo o parada se distribuyen a lo largo del espacio, ya que tanto los agentes como los elementos con los que éstos interactúan se encuentran ligados a una localización geográfica. Por este motivo, el futuro de la gestión del riesgo debe ir orientado a la integración de toda la información disponible en sistemas de visualización selectiva de la información tal como los Sistemas de Información Geográfica, ampliamente expandidos en el ámbito de la gestión costera (Bartlett & Dmith, 2004); (Sheppard, 2012); (Wright, Dwyer & Cummins, 2011). Este tipo de sistemas permite generar capas de información estadística, económica, de áreas vulnerables, del histórico de afecciones de cada modo de fallo o parada operativa, de las características de la infraestructura, las instalaciones y la operativa, así como de las relaciones entre estos términos y su evolución espacio-temporal. El objeto sería el de generar una plataforma interactiva en la que el usuario pueda explorar una combinación de escenarios, a partir de los cuales se pueda desarrollar la mejor estrategia de mitigación o gestión de riesgos posible.

Si esta práctica se incorpora como una tarea más del conjunto de la gestión del riesgo, a lo largo del tiempo se habrán generado mapas de riesgo, con lo que incluso será posible observar tendencias históricas o el efecto de las medidas de mitigación o prevención adoptadas. Como se ha comprobado a lo largo del presente capítulo, la metodología permite que el riesgo se pueda evaluar tanto en pequeñas unidades de análisis espacial como para tramos de obra e incluso alternativas, por lo que el SIG es la herramienta más adecuada para recopilar y combinar este tipo de información espacial, de diferentes escalas y a lo largo del tiempo, en una sola interfaz. En la actualidad el Cuadro de Mando Ambiental (CMA. http://cma.puertos.es), desarrollado en el marco de los proyectos SAMPA II-SAFEPORT (APBA & OPPE, 2016) y SAMOA II (2017), incluye una herramienta de gestión de riesgos *metocean*: El Atlas de Riesgo Terrestres mediante la combinación de las predicciones de alta resolución meteo-oceanográficas y los umbrales operativos definidos por los usuarios del puerto.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO MEDIANTE TÉCNICAS PROBABILÍSTICAS

4.1. INTRODUCCIÓN

El objeto del presente apartado es proceder a la descripción del procedimiento que se propone en este libro para llevar a cabo la evaluación del riesgo, tanto en su vertiente operativa como en su vertiente infraestructural, así como introducir los términos y definiciones que serán clave para la comprensión del mismo. Dado que la naturaleza de este capítulo es la de proporcionar una visión general de la metodología, se ahondará en el detalle de cada punto de los esquemas generales en apartados posteriores.

Con objeto de describir el procedimiento para el cálculo del riesgo, vamos a partir de la Figura 41 ya que recoge los elementos clave de la metodología. En primer lugar, se deben identificar, ordenar y formular los modos de fallo, mediante sus ecuaciones de verificación. Asimismo, se deberá caracterizar los términos que componen la ecuación de verificación. Con esto se podrá obtener una distribución de probabilidad de cada modo de fallo, en base a las distribuciones de los términos que componen la propia ecuación. Seguidamente se aborda la evaluación de la vulnerabilidad, partiendo de la caracterización de los términos que componen la ecuación de verificación. Según la magnitud que alcancen dichos términos, la vulnerabilidad del sistema será menor o mayor. Una vez se dispone de una clasificación de vulnerabilidades para una selección de magnitudes de los términos de la ecuación, se puede proceder a la evaluación de las consecuencias económicas asociadas a la materialización del modo. Finalmente, el gestor deberá, para cada modo de fallo, definir un ranking mediante el cual determinar la magnitud del riesgo, en base al cual tomar decisiones.

Por ejemplo, el proyecto CLASH estableció un baremo de la vulnerabilidad de los elementos que componen el trasdós de un dique, así como los usos asignados, para una serie de caudales medios de rebase. En línea con dicha metodología, se propone que cada instalación estudie su vulnerabilidad, para obtener así valores más adecuados a su configuración geométrica, orientación con respecto al oleaje, tipología y usos. Además, el cálculo de la probabilidad de fallo y las consecuencias sí son únicos en cada caso, por lo que no se puede dar un baremo a piori. Sería interesante, no obstante lo anterior, poder comparar los riesgos derivados de un mismo modo de fallo para distintas instalaciones. Para ello, el modo de fallo debe definirse de la misma forma, y la magnitud de los agentes que lo desencadenan debe ser similar, lo que es un reto dada la aleatoriedad de los fenómenos físicos que interactúan con las obras marítimas.

Como se puede ver, se propone que el riesgo se evalúe en base a la información proporcionada por tres factores:

$$R = [P|V|C]$$

La evaluación de las consecuencias derivadas de modos de fallo o parada operativa antes de que ocurran permite al gestor generar una partida de contingencias así como un plan de actuación para mitigar los efectos de la materialización de alguno de los eventos considerados.

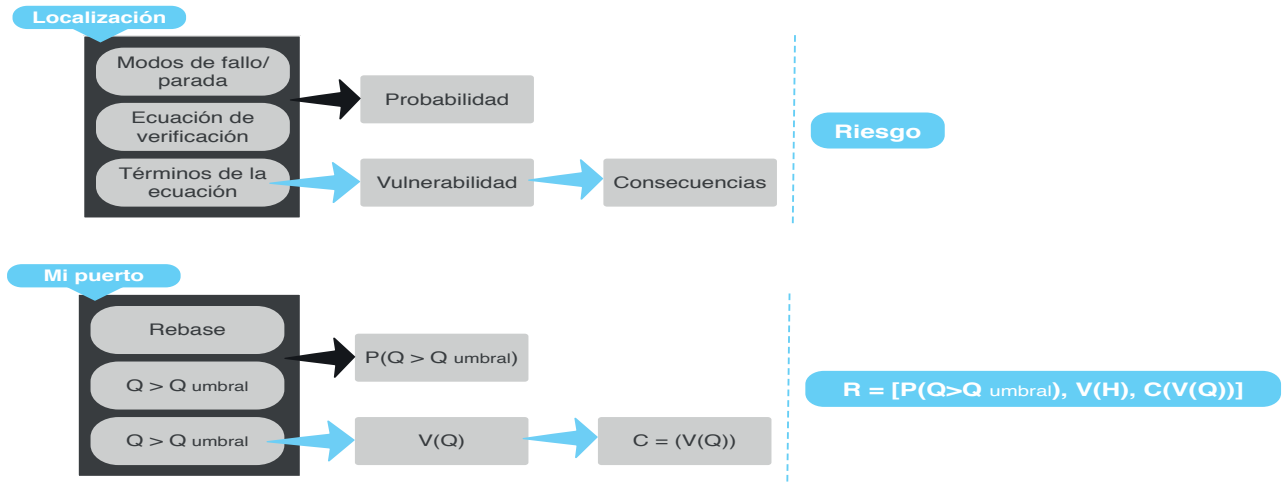


Figura 41. Términos clave en el cálculo del riesgo y relaciones entre ellos (U = Umbral)

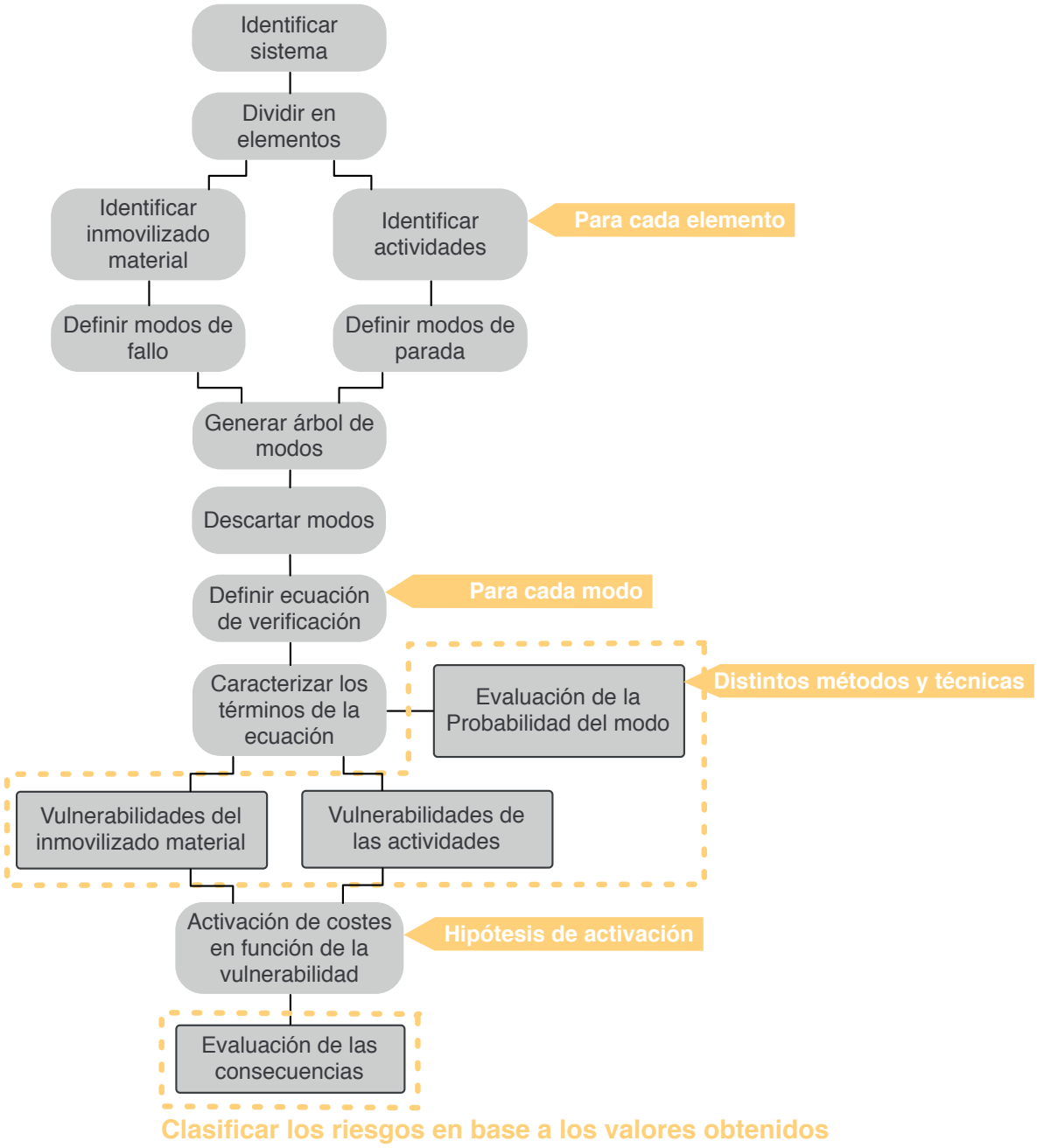


FIGURA 42. Procedimiento a seguir para la evaluación del riesgo

Cada una de las actividades que tienen lugar en las instalaciones portuarias son eslabones de una cadena logística. Las afecciones que puede sufrir cada una de estas actividades son generadoras de nuevas afecciones sobre otros eslabones de dicha cadena. Al evaluar el riesgo, es instructivo considerar estas relaciones de segundo orden, ya que amplía la riqueza del conocimiento sobre el sistema en sí, ayudando a proporcionar estimaciones más precisas y ajustadas a la realidad de cada instalación.

La metodología propuesta permite clasificar los riesgos para una determinada instalación, bajo el supuesto de que se dispone de toda la información necesaria para la evaluación de los términos que lo componen. Sin embargo, los autores son conscientes de que recopilar todos los datos requeridos para la aplicación de esta metodología en un caso real es una tarea ardua, puesto que actualmente no existen experiencias en las que se haya evaluado de forma sistemática la probabilidad de los modos de fallo o parada, la vulnerabilidad de la infraestructura y las actividades frente a los mismos, o se disponga de una estructura de costes a la que se pueda acceder con facilidad. Aun así, disponiendo de información aproximada, esta metodología mejora la capacidad de reacción de las instalacionesfrente a la materialización de modos de fallo o parada, al generarse conocimiento (ver Figura 43).

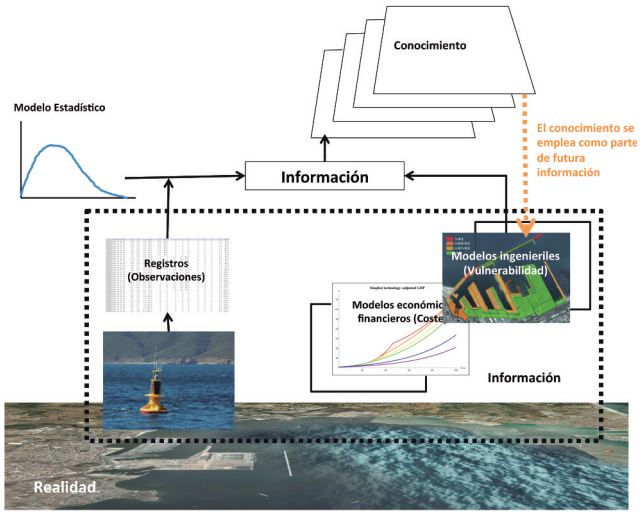


FIGURA 43. Esquema de las relaciones e implicaciones de los elementos que intervienen en la generación de conocimiento sobre la realidad en la que se trabaja

4.2. PROCEDIMIENTO GENERAL. *WORKFLOWS*

4.2.1. Desglosando el espacio e identificando operaciones

Siguiendo el esquema simplificado de la Figura 42, el primer paso consiste en seleccionar el elemento (que puede ser desde una pieza hasta un sistema completo) sobre la cual se procederá a la evaluación del riesgo. Asimismo, es necesario definir el alcance de la verificación, que dependerá de los objetivos, así como de la cantidad y calidad de la información de partida de que se disponga.

El **elemento** o **sistema** que se analiza es susceptible de verse afectado por una serie de modos de fallo o parada operativa, que hay que identificar. Estos modos tendrán asociada una probabilidad de ocurrencia para un intervalo de tiempo dado, y por tanto, el sistema es vulnerable frente a ellos.

Cada riesgo debe ser definido por la frecuencia de los agentes que lo causan, y por las consecuencias que su materialización generaría, que a su vez pasa por la determinación previa de la vulnerabilidad del sistema.

Las instalaciones portuarias están formadas por elementos de infraestructura susceptibles de verse afectados por los agentes del medio físico y de la explotación. Además, los elementos están diseñados para dar servicio a las actividades portuarias. Dada la naturaleza diferencial de la infraestructura y de las operaciones, las consecuencias derivadas de la materialización de modos de fallo o de parada debe adaptarse a sus peculiaridades y características. Por ello se propone diferenciar, dentro de la instalación objeto de estudio, entre lo siguiente:

- **Inmovilizado material**: Conjunto de elementos patrimoniales tangibles, muebles e inmuebles que se utilizan de manera continuada por la propiedad, en la producción de bienes y servicios públicos, y que no están destinados a la venta

- **Actividades:** Toda operación portuaria que tiene lugar en los límites físicos o administrativos de la instalación. Dicha instalación puede ser el puerto, una terminal o una fracción de la terminal

  Ejemplo (inmovilizado material): Elementos que componen el paseo peatonal de un dique.

  Ejemplo (actividades): Carga y descarga de la mercancía transportada por un buque.

Una vez identificado el inmovilizado material de la instalación, y las operaciones que se desarrollan en la misma, se podrá evaluar en qué medida se ven afectados en su interacción con el medio físico u otros factores de explotación.

Cuando la interacción produce modos de fallo que afectan al inmovilizado material, por lo general se producen desperfectos que hay que reparar, o que acortan los tiempos entre campañas de conservación[3]:

- **Gastos de conservación**: se producen desperfectos que acortan los ciclos de conservación y mantenimiento de la infraestructura.

- **Gastos de reparación**: los desperfectos son tales que es necesario reparar la infraestructura.

- **Gastos de desmantelamiento y reposición**: la magnitud del daño es tal que es necesario desmantelar la obra. Se deberá decidir si es viable económicamente reconstruir o no.

Por otra parte, el medio físico u otros agentes de explotación pueden afectar a las operaciones portuarias. En este caso hay que diferenciar cómo afecta el mismo modo de fallo/parada a la propiedad (normalmente la Autoridad Portuaria) y al operador (terminalista):

- **A la propiedad**[3]: Tasas (tanto de ocupación privativa del dominio público portuario como de aprovechamiento especial del dominio público portuario) que la propiedad deja de percibir en el caso de que la concesión no pueda desempeñar su actividad debido a fallos en la infraestructura que le da soporte, siempre que ésta sea propiedad de la Autoridad Portuaria, o debido a la presencia de agentes climáticos adversos. Es importante señalar que cada concesión puede estar otorgada en términos diferentes, y/o que los seguros pueden cubrir ciertas pérdidas.

[3] Nota: Dependiendo del nivel de vulnerabilidad que genere cada modo de fallo, se contabilizará un tipo u otro de gasto, o una combinación de los mismos.

  - Tasas (que se dejan de percibir) por la ocupación privativa del dominio público portuario.
  - Tasas (que se dejan de percibir) por el aprovechamiento especial del dominio público portuario.
  - Tasas (que se dejan de percibir) por el volumen de actividad.

- Al operador:

  - Coste horario del personal en plantilla.
  - Coste de estiba.
  - Amortización de equipos.
  - Consecuencias no económicas, difíciles de cuantificar:
    - ★ Fiabilidad.
    - ★ Prestigio.

En este apartado se ha introducido la idea de que el tipo de gasto, y su magnitud, dependerá de la vulnerabilidad de la infraestructura y de las operaciones. A continuación se muestra un ejemplo que ilustra esta relación.

Ejemplo 1: Ejemplo sobre la identificación del inmovilizado material y las operaciones para establecer las relaciones entre el nivel de vulnerabilidad y el tipo de gasto que se debe considerar

En un paseo marítimo se ha observado una serie de episodios de rebase que han afectado al pavimento del paseo localizado en el trasdós. La Autoridad Portuaria, al evaluar los riesgos en su instalación, estableció que, dependiendo de la extensión que se viese afectada, se tomarían las siguientes acciones: conservación, reparación o desmantelamiento con restitución. En base al precio unitario del elemento de obra, se establecieron las siguientes hipótesis (ver Tabla 8):

- Si el paseo se ve afectado en un 20% de su extensión total o menos, se considera que los gastos para devolver a su estado original a la obra forman parte de la conservación.

- En el caso de que se produzcan daños que afectan al paseo entre un 20 y un 70%, se activa la partida de reparación.

Finalmente, si los daños afectan a la infraestructura entre un 70 y un 100%, se debe desmantelar y restituir, dado que nos encontramos ante una destrucción.

Vulnerabilidad	Tipo de gasto
[0 – 0,2)	Gastos de conservación
[0,2 – 0,7)	Gastos de reparación
[0,7 – 1)	Gastos de desmantelamiento + Gastos de restitución

Tabla 8. Costes asociados al nivel de vulnerabilidad de la infraestructura

Esta relación indica que en el caso de que el pavimento vea afectada su extensión en un 20%, los costes que debe asumir la Autoridad Portuaria o la propiedad son los de conservación de dicho pavimento. Sin embargo, si se ve afectado en un 80%, es posible que sea más conveniente retirar el pavimento (desmantelamiento) y volver a construirlo (construcción), con lo que los gastos asociados son diferentes.

La Figura 44 ilustra una serie de elementos de infraestructura (inmovilizado material) y de operaciones para una terminal de contenedores.

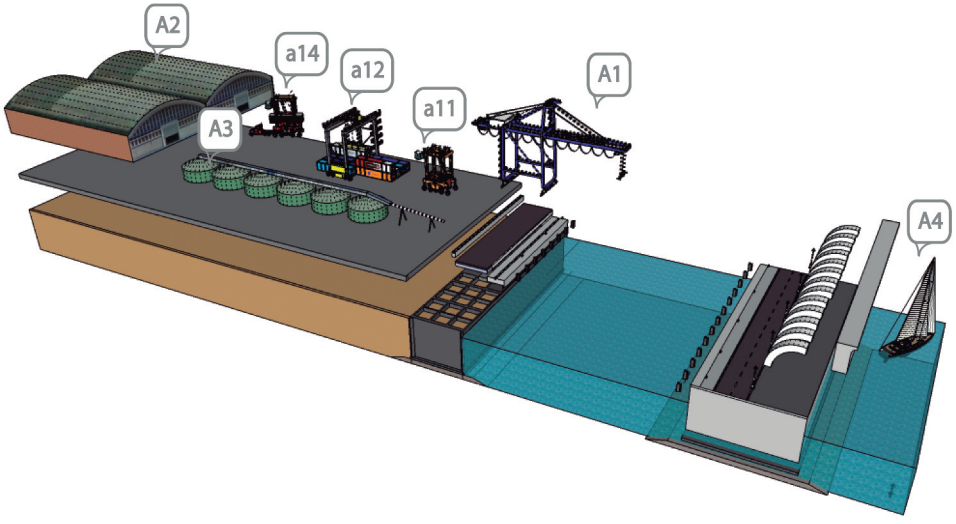


Figura 44. Desglose de la sección ficticia en elementos de infraestructura y actividades

Cada actividad identificada A1, A2, A3, etc., es una pieza de un proceso, por lo que si una de ellas se ve afectada, parte o la totalidad del proceso puede verse afectado. Las actividades dependientes pueden estar localizadas sobre el elemento que se analiza o fuera del mismo, e incluso, fuera del sistema.

La Figura 45 representa un ejemplo de cadena de dependencias. Si el normal funcionamiento de la actividad [A1] se ve modificado, existe la posibilidad de que esta perturbación se transmita a las actividades que dependen de ella.

Figura 45. Cadena de dependencias que existen en la serie de actividades que conforman el paso de la mercancía de mar a tierra

Dada la novedad del concepto, en los apartados siguientes se profundiza en cada uno de los elementos que componen la definición del Riesgo.

4.2.2. Esquema para la determinación del término probabilidad

La ROM 0.0 propone un procedimiento para la verificación de la probabilidad de ocurrencia de determinados eventos, la cual se describe a continuación. En última instancia se trata de contextualizar el problema y definir el alcance de dicha verificación. Por lo tanto, las decisiones que se deben adoptar se indican a continuación:

- Definir la *Fase de Proyecto* y las *Condiciones de Trabajo.* Para ello, se determina cuál es el *Intervalo de Tiempo* de referencia seleccionado.

Fase de Proyecto
Diseño
Construcción
Explotación
Desmantelamiento

Tabla 9. Fases por las que pasa un proyecto constructivo

- Definir el intervalo de tiempo para el cual se va a proceder a la verificación del sistema.

Intervalo de Tiempo
Corta duración
Larga duración
Fase de proyecto (vida útil)

Tabla 10. Diferentes escalas temporales en las que se puede proceder a la verificación

- Definir los tramos de obra, sus tipologías y factores de proyecto.
- Se determinan los Modos de Fallo que se pueden producir en el sistema. Estos modos se podrán clasificar dependiendo de hacia dónde conduzcan a la obra o sistema: hacia el estado límite último, de servicio, u operativo.
- Ordenación de los modos de fallo o parada operativa mediante árboles de fallo (visto en el apartado anterior). De entre todos los modos que se han identificado, se deben seleccionar los más relevantes de cada elemento de obra porque el tratamiento de todos ellos complica el problema en gran medida.
- Se identifican los Factores que participan o coexisten en la manifestación de cada modo de fallo. Para cada factor actuante en el modo de fallo se comprueba si favorece la no ocurrencia del mismo, así como la clase de valor que se adoptará para cada propiedad de cada factor de proyecto.
- Llegados a este punto, se pasa a Verificar el tramo de obra. Para cada uno de los modos de fallo, se define la Ecuación de Verificación mediante la cual se analiza el modo de fallo.
- Se declaran los Términos de la Ecuación de Verificación, determinando (Ver ROM 0.0-01):
  - Si son favorables, desfavorables o indiferentes.
  - Su clasificación temporal.
  - El coeficiente de compatibilidad y de ponderación.
  - Los factores asociados, y cuáles son *principales.*
  - Seguidamente, se vincula a cada variable del término de la ecuación las propiedades de los factores declarados previamente.
  - Para terminar, se determina cuál es la probabilidad máxima del modo de fallo en relación a la del conjunto.

La ventaja de este procedimiento es que el encargado de llevar a cabo la verificación toma una conciencia global del sistema, lo que en última instancia conduce a un mejor análisis del procedimiento y de los resultados.

Hoy en día se dispone de herramientas informáticas para la realización de simulaciones, análisis de relaciones entre variables, análisis de sensibilidad, etc., con lo que la preparación del sistema a verificar es más sencilla que cuando se concibieron por primera vez las simulaciones.

En esta guía, se mantiene el procedimiento propuesto por la ROM 0.0 y que se ha esquematizado en la Figura 46.

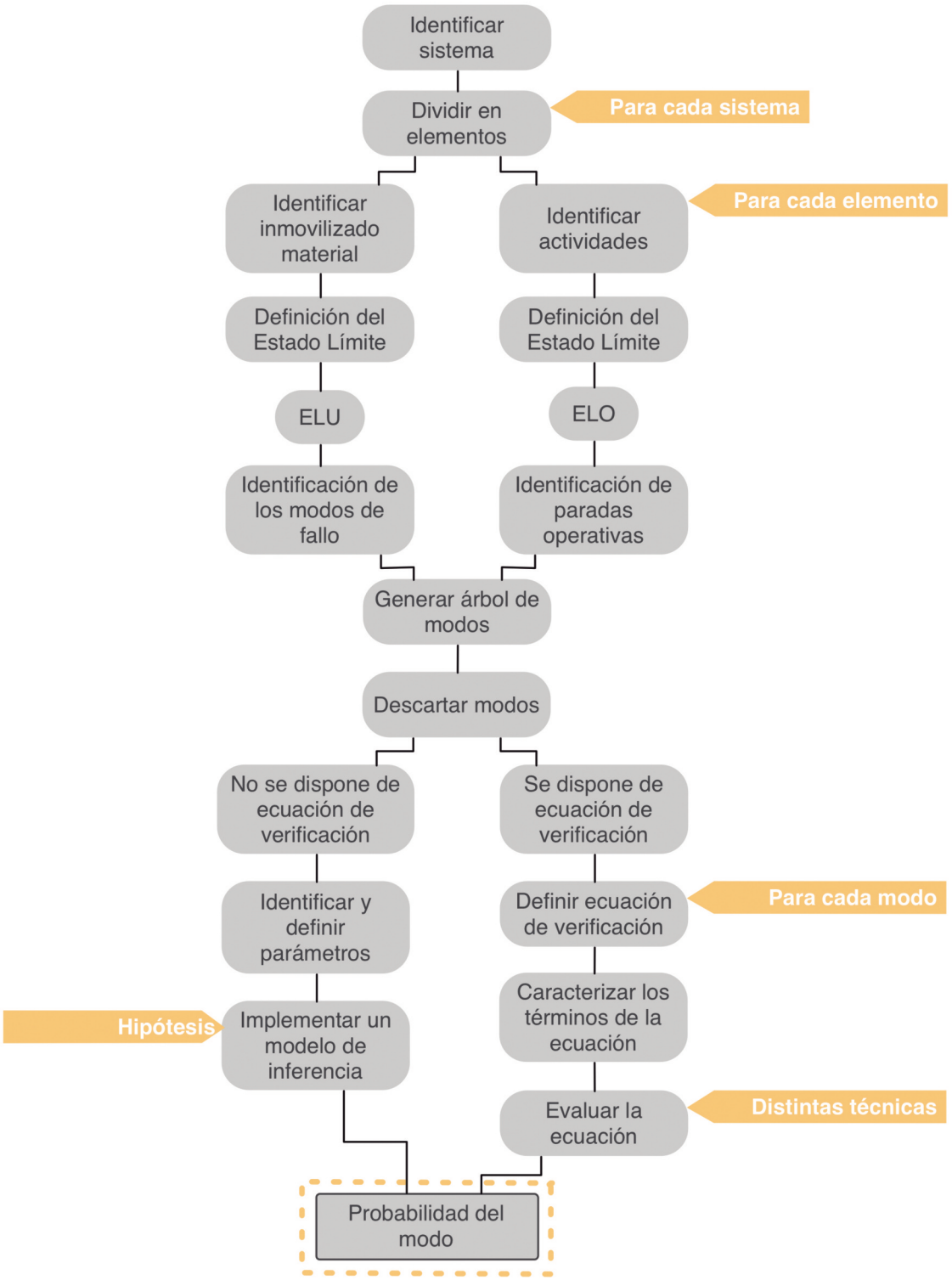


FIGURA 46. Procedimiento a seguir para evaluar la probabilidad de ocurrencia de modos de fallo y paradas operativas

1. P1. Identificación del sistema que se va a analizar: compartimentar el tramo en elementos de análisis. Cada elemento "E" estará compuesto por inmovilizado material y sobre él se desarrollarán o no actividades.

2. P2. Se distingue por tanto entre inmovilizado material (*IM*) y actividades (*A*).

3. P3. Selección de los Estados Límite para los que se quiere verificar el elemento. Pueden ser Estado Límite Último, Estado Límite de Servicio o Estado Límite Operativo.

4. P4. Identificación de todos los modos de fallo o parada que se pueden presentar en el elemento y que pueden conducir a pérdidas económicas. Los modos de fallo pueden afectar al inmovilizado material y a las actividades, mientras que los modos de parada operativa están más relacionados con la afección sobre las actividades.

5. P5. Generar árbol o esquema de fallo (*FTA*). Los árboles de fallo permiten identificar las causas que conducen a la materialización de cada modo de fallo o parada operativa.

6. P6. ¿Se pueden descartar modos? Existen modos que, ya sea por su baja probabilidad de ocurrencia, por la aplicación de buenas prácticas o por criterio experto, se pueden omitir en el análisis. Una vez se han descartado modos:

7. P7. Se tienen N modos de fallo (*MF*) y/o de parada operativa (*MPO*). Por simplicidad se continúa considerando un modo: MF_j

8. P8. ¿Se tiene ecuación de verificación? En el caso de no tenerla, se puede verificar el sistema con métodos que no requieran la existencia de una ecuación de verificación analítica, como por ejemplo, las redes bayesianas. En ambos casos hay que proceder como sigue:

8. P9. Identificación de los Factores de Proyecto: Parámetros, Agentes o Acciones.

10. P10. Se procede a la simulación del sistema. La simulación es un proceso particular de cada caso a analizar. En esta Guía se proporcionan los códigos de algunos ejemplos de simulaciones basadas en Montecarlo que pueden ser útiles para afrontar por primera vez el problema. Se pueden emplear métodos de simulación que no requieran de la definición de ecuaciones de verificación en caso de no disponer de las mismas.

11. P11. Como resultado de la simulación, se obtiene el número de veces que se ha producido el MF_j.

12. P12. Repitiendo el proceso desde P10 hasta P14 se puede obtener la probabilidad de cada *MF* y *MPO.*

13. P13. Una vez se han simulado todos los MF o MPO se obtiene la Probabilidad Conjunta de fallo o parada operativa, que es la envolvente de todos los modos de fallo o paradas operativas.

14. P14. ¿La Probabilidad obtenida está dentro de los límites estipulados en los Criterios Generales de Proyecto? En el caso de que la respuesta sea afirmativa, el sistema se da por verificado y se pasa al P19. En el caso de que la respuesta sea negativa, se deberán realizar modificaciones sobre el diseño o configuración inicial y repetir el proceso hasta aquí para comprobar si cumple o no los criterios generales de proyecto.

15. P15. RESULTADO: Probabilidad de fallo del modo de fallo MF_j o del modo de parada operativa MPO_j y Probabilidad conjunta de fallo y/o parada.

4.2.3. Esquema del procedimiento para la evalución de la vulnerabilidad

En el caso de que la Probabilidad del MF_j o MPO_j sea mayor que cero, es decir, que exista la posibilidad de que ese modo tenga lugar, se procede a determinar el grado de vulnerabilidad del elemento o sistema seleccionado.

1. V1. Nuevamente, para cada modo:

2. V2. ¿El modo –de fallo o parada– j afecta a algún elemento del inmovilizado material? En el caso de que no afecte, se considera que la vulnerabilidad del inmovilizado material frente al modo *j* es 0 (V_{IMj}=0)

3. V3. ¿El modo –de fallo o parada– j afecta a las actividades? En el caso de que no afecte, se considera que la vulnerabilidad de las actividades frente al modo *j* es 0. V_{Aj}=0

4. V4. ¿Se sabe en qué medida se ven afectadas tanto las actividades como el inmovilizado material? Si no se conoce, se deberán desarrollar estudios para determinarlo. Si se conoce, se tiene el valor de V_{IMj} y de V_{Aj} se procede a evaluar las consecuencias.

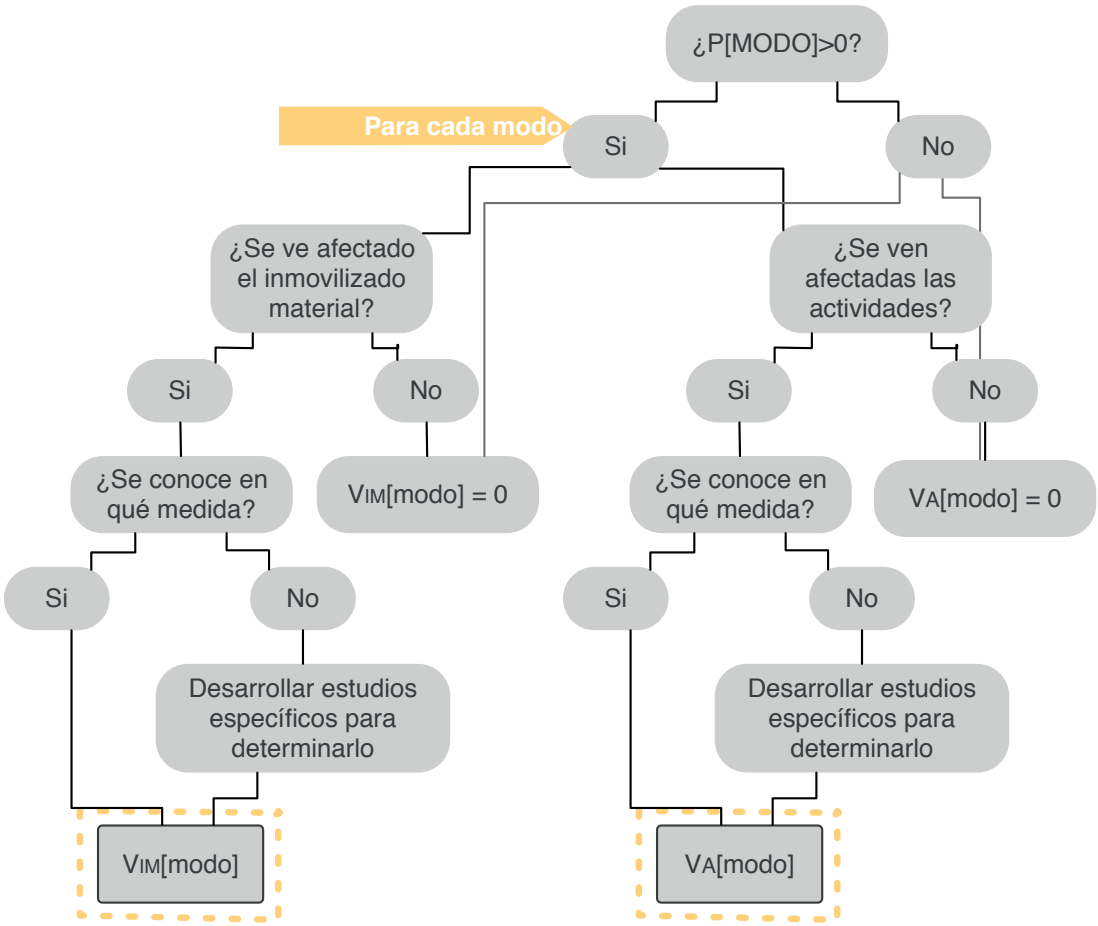


FIGURA 47. Secuencia de la parte del procedimiento correspondiente al cálculo de la vulnerabilidad

4.2.4. Esquema del procedimiento para la evaluación de las consecuencias

En el caso de que la V_{IMj} o V_{Aj} sea mayor que cero, se procede a determinar los costes asociados a la ocurrencia del *MF* o *MPOj.*

1. C1. ¿Se dispone de la información necesaria para computar el coste? Si no se dispone de dicha información, el criterio experto puede ayudar a estimarlo. Si se dispone de la información básica para la evaluación del coste, se continúa con el proceso:

2 C2. Se genera un listado completo de los costes que se pueden generar sobre el inmovilizado material del elemento "E" al producirse un modo de fallo C_{IM}.

3. C3. Se genera un listado completo de los costes que se pueden generar asociados a modos de fallo o paradas operativas que afecten a las actividades C_A.

4. C4. Sobre el elemento se desarrollan actividades que forman parte de una cadena productiva. En el caso de que se quiera tener en cuenta la afección económica que cada modo de fallo o parada genera sobre la totalidad de dichas actividades, se debe seguir en el punto C5. En caso contrario, se debe pasar al punto C9.

5. C5. Para cada actividad que se desarrolla sobre el elemento, se identifican sus actividades dependientes.

6. C6. Se estudia el nivel de dependencia de cada actividad dependiente con respecto a la principal y se proporciona en una escala de 0 a 1, donde 0 implica que no son dependientes y 1, que lo son completamente. En este último caso, las afecciones sufridas por la actividad principal se trasladan directamente a las actividades dependientes. Se obtiene V_{Ad}.

7. C7. Se pondera la vulnerabilidad de dichas actividades dependientes mediante el producto de su nivel de dependencia y la vulnerabilidad de la actividad principal. Se obtiene la serie de V_{Adp}.

8. C8. En función del nivel de vulnerabilidad ponderado obtenido, se activan una serie de costes asociados a cada actividad. Se multiplica el nivel de vulnerabilidad ponderado con sus costes correspondientes y se obtiene V_{Adp} x C_{Adp}.

9. C9. En función del nivel de vulnerabilidad de la actividad principal, se activan los costes correspondientes y se obtiene el producto V_A x C_A.

10. C10. En función del nivel de vulnerabilidad del inmovilizado material, se activan los costes correspondientes y se obtiene el producto V_{IM} x C_{IM}.

11. C11. La suma de VC_{Ad}, VC_{A_j} y de VC_{IM}, para el modo de fallo "j", genera el VC_j, la vulnerabilidad por el coste provocada por el modo "MF_j". En el caso de que VC_j sea positivo, se evalúa el riesgo.

12. Identificación de los modos de fallo y parada operativa. Generación de árboles o esquemas de fallo.

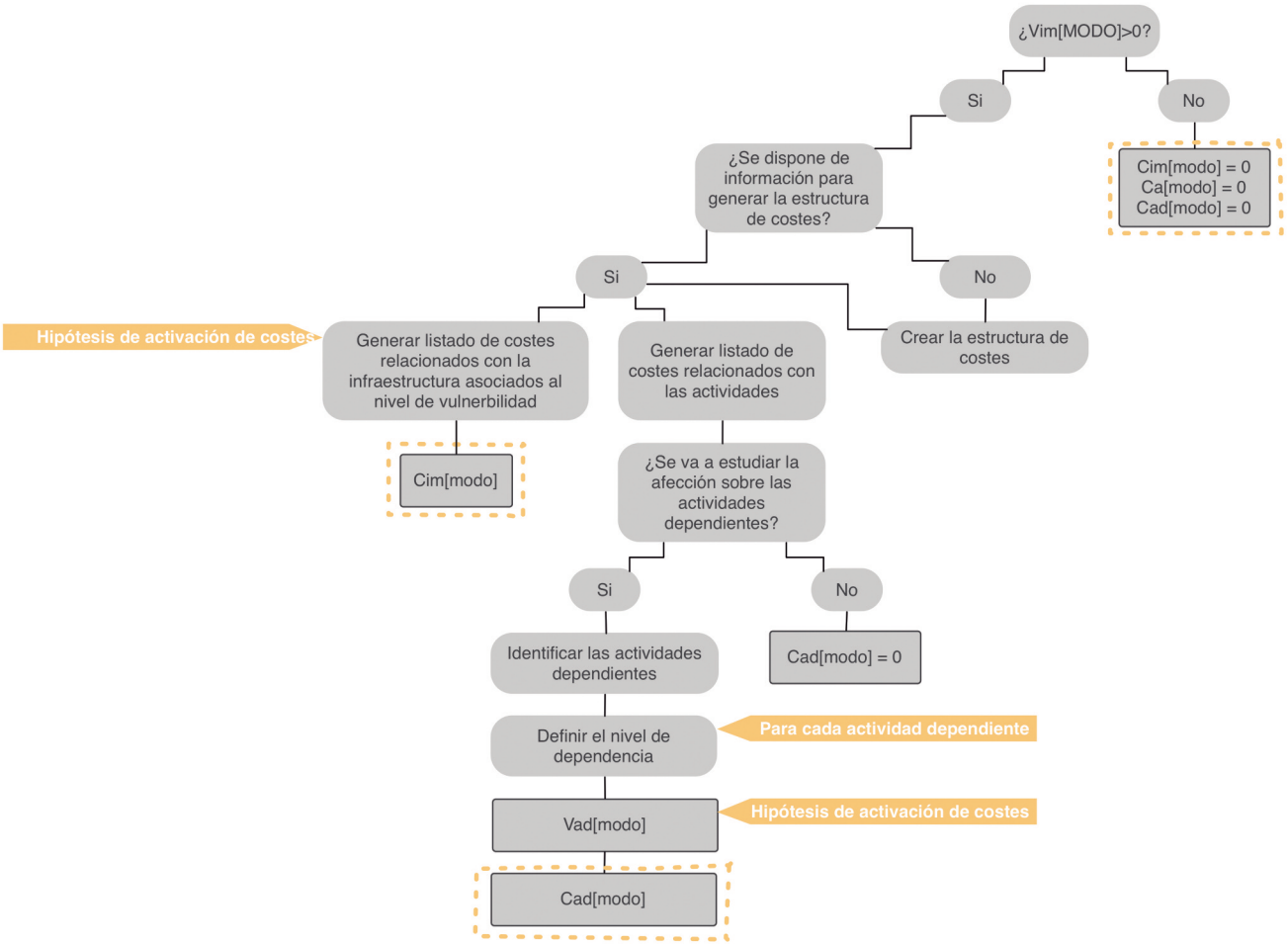
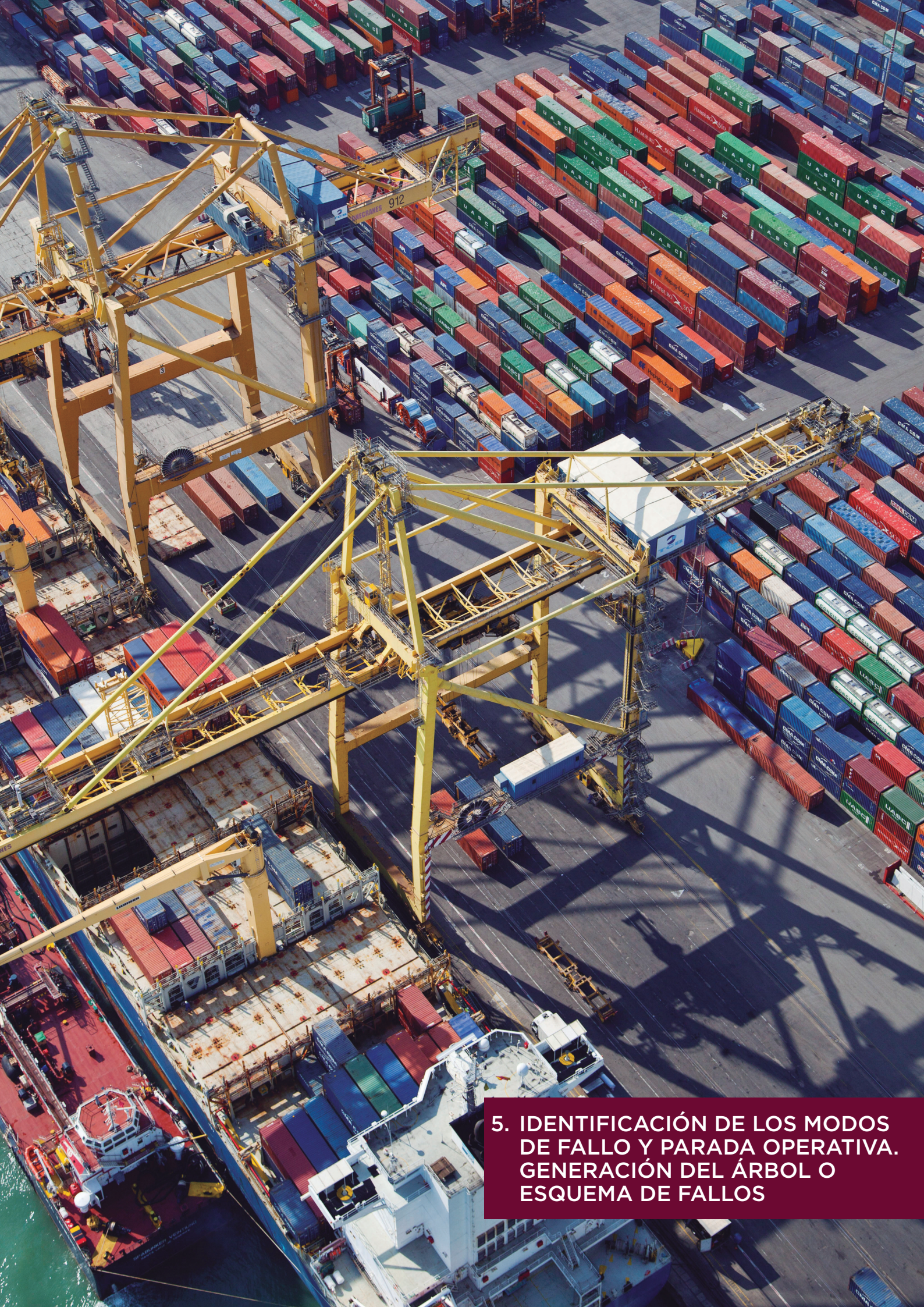


FIGURA 48. Secuencia propuesta para la evaluación de las consecuencias económicas de la manifestación de modos de fallo y/o paradas operativas



5. IDENTIFICACIÓN DE LOS MODOS DE FALLO Y PARADA OPERATIVA. GENERACIÓN DEL ÁRBOL O ESQUEMA DE FALLOS

5.1. INTRODUCCIÓN

La identificación de los modos de fallo o parada operativa es una fase crucial del proceso de análisis de riesgos. Para ello, se pueden emplear herramientas como la modelización de los fenómenos físicos, destinada a mejorar la comprensión del sistema cuyo riesgo se quiere evaluar, y que sirve para cuantificar los modos de fallo derivados de condiciones medioambientales adversas, que a su vez favorecen la superación de unos límites de diseño. El estudio probabilístico de las relaciones entre el sistema analizado y el entorno es una actividad de suma importancia, dado que el medio físico tiene un comportamiento aleatorio. El análisis probabilístico de las variables hace posible que se conozca la respuesta del sistema frente a un amplio rango de variabilidad de los agentes que lo modifican, a diferencia del análisis con parámetros deterministas, donde únicamente se considera un valor, y por tanto, sólo se obtiene una respuesta de la interacción.

Los modos de fallo o parada se representan matemáticamente mediante ecuaciones de verificación. Estas ecuaciones establecen las relaciones entre parámetros, agentes y acciones, o dicho de otro modo, representan el mecanismo que da lugar a un fallo. Se considera que se produce fallo o parada cuando al sustituir en la ecuación las variables por valores, se traspasan determinados umbrales.

Hasta hace poco tiempo no existía un procedimiento para la determinación de los umbrales, sino que se basaba en la experiencia de profesionales conocedores de los mecanismos que desembocaban en fallos. Gracias a la recopilación de información sobre problemas estructurales y operativos, y a su almacenamiento en bases de datos, está siendo posible desarrollar estudios que permitan conocer de forma precisa las condiciones en las que se producen, y así, determinar los umbrales que se deben establecer en las ecuaciones de verificación. Además, la implantación de los métodos probabilísticos en el cálculo de fiabilidad de una obra, así como la cada vez mejor y más extensa caracterización de los agentes climáticos, permiten desarrollar modelos de respuesta específicos para cada emplazamiento y con el nivel de detalle requerido.

No obstante, hay variables que es necesario caracterizar *ex profeso* en puntos aislados del emplazamiento, y que se supondrán representativas de una determinada extensión, tales como los parámetros del terreno. Hay que destacar que España cuenta con un sistema de monitorización del medio físico repartido por toda su costa, y que ello permite disponer de registros y reanálisis públicos de variables climáticas tales como las series WANA o SIMAR, que se empezaron a recopilar desde el año 1958. Esta disponibilidad de información para desarrollar estudios de clima es un privilegio con el que no cuentan la mayoría de países, salvo Japón y Estados Unidos.

Para organizar la secuencia de fallos que se pueden producir, y para establecer las relaciones de dependencia entre ellos, se emplea el método conocido como árboles de fallo. Este método (en inglés *Fault Tree Analysis* (FTA)) fue empleado por primera vez en 1961 por H.A. Watson, trabajador de *Bell Telephone Laboratories,* cuando la Fuerza Aérea de Estados Unidos le contrató para estudiar el sistema de control del misil ICBM Minuteman *(Bell Telephone Laboratories,* 1961). En 1965 se celebró el Simposio sobre Seguridad, patrocinado por la Universidad de Washington y la Compañía *Boeing,* donde se presentaron numerosos artículos dedicados a exponer las bondades del método de los árboles de fallo (University of Washington, 1965). A partir de este momento, esta técnica ha sido ampliamente perfeccionada y empleada para poder analizar sistemas complejos en instalaciones nucleares, aeronáuticas, espaciales, de industria electrónica, química, y ahora, en la ingeniería marítima y portuaria.

Existen unos modos de fallo que son los detonantes de la secuencia, denominados iniciadores. Los fallos que se producen como consecuencia de la concomitancia o la ocurrencia previa de otros modos de fallo son difíciles de identificar, pero no por ello se puede obviar su existencia, ya que se estaría subestimando el riesgo (NASA, 2011).

En este apartado, se proporciona una metodología para la identificación de los modos de fallo o parada, para la creación de los árboles o esquemas de fallo, así como una visión general de los tipos de relaciones entre modos que se pueden dar en un sistema cuyo riesgo se quiere evaluar.

5.2. ¿QUÉ ES UN MODO DE FALLO O PARADA OPERATIVA?

Modo de fallo (Puertos del Estado, 2011): Forma o mecanismo, geométrico, físico, mecánico, químico o biológico,

por el cual la obra o alguno de sus elementos, queda fuera de servicio por causas estructurales. Para comprobarlos, se adscriben a los Estados Límite Último o de Servicio, es decir, se clasifica el modo como conducente a un estado límite último o de servicio. Una vez ocurrido un modo de fallo, los requisitos estructurales, formales y de explotación del tramo de obra sólo se recuperan mediante su reparación o reconstrucción.

Ejemplos: Extracción de piezas en un dique en talud, vuelco o deslizamiento de un cajón, deformación de una defensa, rotura de las amarras de un elemento flotante (si se está analizando el sistema de amarras).

FIGURA 49. Ilustración del modo de fallo "Extracción de piezas" en el morro de un dique

Modo de parada operativa de la obra o de alguno de sus elementos estructurales (Puertos del Estado, 2011): Causa o motivo, geométrico, físico, mecánico, químico o biológico por el cual la obra o alguno de sus elementos estructurales deben dejar de operar o deben reducir su nivel funcional. Una vez que cesa la causa de parada, la obra y sus instalaciones vuelven a estar en explotación con los requisitos especificados en el proyecto. La ocurrencia de paradas operativas no implica la existencia de fallos estructurales.

Esta definición se centra en los elementos estructurales de la obra. Sin embargo, en las instalaciones portuarias las protagonistas son las actividades. Por ello, esta definición debe englobar los mecanismos por los cuales se produce un cese o una reducción del nivel de actividad en las operaciones portuarias. Con todo lo anterior, en el ámbito de esta guía NO se empleará la definición de modo de parada operativa proporcionada por la ROM 0.0. En el contexto de este trabajo, la definición de parada operativa adoptada es la siguiente:

Modo de parada operativa de las operaciones portuarias: Causa o motivo por el cual cualquier actividad relacionada con el tránsito o manipulación de la mercancía ve alterada su normal funcionamiento. Estas paradas pueden estar motivadas por agentes externos, tales como los climáticos u otras actividades portuarias. Además, pueden resultar como consecuencia de la manifestación de un modo de fallo en la infraestructura que la sustenta.

Ejemplos: Parada de la operativa de carga y descarga de un buque por velocidad del viento superior a un umbral de seguridad, rebase, ralentización de la operativa de amarre por rotura de amarras (en este caso, el objeto de estudio es la operativa y no el sistema de amarras).

5.3. DEFINICIÓN Y TIPOS DE ECUACIONES DE VERIFICACIÓN

Una ecuación de verificación es una relación funcional (matemática) entre **factores de proyecto**. Las ecuaciones de verificación se suelen formular en forma de coeficiente de seguridad o de margen de seguridad. En ambos casos el objetivo es comprobar si la relación entre los factores de proyecto supera o no un valor umbral.

Puede darse el caso de que no exista una ecuación de verificación para un modo de fallo o parada o bien que exista pero no describa la casuística que se está estudiando. En esta situaciones se debe recurrir a estudios experimentales para definirla, en campo o laboratorio, o bien, aplicar un modelo de respuesta, en el que no es necesario que exista una ecuación como tal, tal y como ocurre en la modelización mediante redes neuronales.

Las ecuaciones de verificación suelen estar formadas por dos términos: el primero, una relación entre las variables y constantes que, combinadas, pueden dar lugar a la ocurrencia de un fallo; el segundo suele ser un valor que no debe ser superado para que el diseño se encuentre en el dominio de la seguridad.

En ingeniería marítima, las ecuaciones de verificación que se emplean principalmente son aquéllas en las que se evalúa la superación o no superación de umbrales tales como:

- **Tensiones**: Las tensiones registradas no pueden superar un umbral de rotura, plastificación, deformación excesiva, etc.
- **Persistencia**: La duración de la manifestación de un agente no puede superar un determinado umbral.
- **Frecuencia**: La frecuencia de la manifestación de un agente no puede superar un determinado valor.
- **Espaciamiento entre sucesos**: La separación temporal entre sucesos no puede superar un determinado valor.

Un ejemplo conocido en ingeniería civil es la ecuación de verificación de la tensión de rotura de una probeta de hormigón. Por un lado se combinan las características del material y la tensión aplicada, y se observa que el fallo se produce al alcanzarse una tensión determinada: éste tiene lugar cuando se supera un valor de tensión umbral. Para obtener información estadísticamente representativa, se repiten los experimentos hasta que se puede elaborar la función de distribución de tensiones aplicadas al elemento. Partiendo de esta función, se toma un número elevado de valores y se observa la reacción del mismo en cada experimento. La probabilidad de fallo se calcula entonces como la probabilidad de que se supere una tensión máxima o de rotura, o aquéla que produce una deformación inaceptable.

Otra forma de verificar un proceso es mediante el análisis de su persistencia. La duración de un agente por encima o por debajo de un determinado valor (umbral) puede condicionar que se produzcan o no modos de fallo. Por ejemplo, cabe citar los procesos de disolución de salmuera, que requieren que el oleaje se encuentre por encima de un determinado valor umbral durante un periodo mínimo de tiempo, por debajo del cual la disolución no tiene lugar.

En los modelos de acumulación de daño en diques en talud, el número de veces que se produzcan episodios de temporal sobre el talud determina el nivel de daño que se alcanza en el mismo.

EJEMPLO: ECUACIÓN QUE DESCRIBE LA ROTURA DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL

El modo de fallo es “rotura del elemento estructural”. La ecuación se puede describir de distintas formas, pero la finalidad consiste en evaluar si se supera o no un umbral “u” de seguridad:

$$\sigma > \sigma_u \rightarrow Fallo$$
$$\sigma - \sigma_u > 0 \rightarrow Fallo$$
$$\frac{\sigma}{\sigma_u} > 1 \rightarrow Fallo$$

5.4. GENERACIÓN DE SECUENCIAS DE FALLO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ÁRBOLES O DIAGRAMAS DE FALLO (*FAULT TREE ANALYSIS METHOD*)

El método de análisis mediante árboles de fallo se trata de un método deductivo que parte de la selección previa de un “suceso no deseado o evento que se ha de evitar”. En el ámbito que nos ocupa, estos sucesos son los modos de fallo o parada operativa susceptibles de afectar al sistema, y que pueden dar lugar a la ocurrencia de otros modos de fallo o parada, al modificar las condiciones de partida de la obra u actividad, tales como su geometría o su capacidad resistente.

Seguidamente, y de forma sistemática y lógica, se representan los modos derivados de los iniciales, conformando niveles sucesivos tales que el suceso de cada nuevo nivel esté generado a partir de sucesos del nivel anterior.

Los modos de fallo o parada que **pueden iniciar** (iniciadores) una cadena de fallos o paradas se caracterizan porque:

1) Son independientes entre ellos.
2) Las probabilidades de que acontezcan pueden ser calculadas o estimadas.

Es recomendable que el árbol de fallo sea desarrollado por personas profundamente conocedoras de la obra o del sistema a analizar, que conozcan el método y tengan experiencia en su aplicación.

Los árboles de fallo se pueden desarrollar en serie, en paralelo o compuestos:

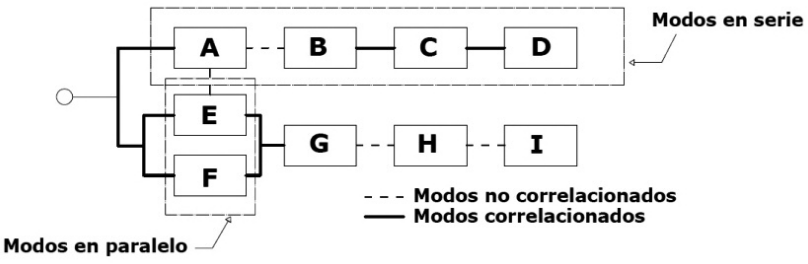


FIGURA 50. Formas en las que se pueden desarrollar los modos de fallo y el tipo de correlación según el caso. Extraído de (Gómez, Molina & Castillo, 2009)

La principal aportación de los árboles de fallo al análisis de riesgos es que con ellos es posible trasladar un sistema físico a un diagrama lógico estructurado, en el que determinadas causas conducen a la ocurrencia de un evento de interés (Lee, Grosh, Tillman & Lie, 1985).

La estructura lógica de un árbol de fallos permite utilizar el Algebra de Boole, traduciendo dicha estructura a ecuaciones lógicas. El Algebra de Boole estrictamente hablando se basa en tres operaciones internas, una unaria (negación = operación NOT) y dos binarias, que pueden ser escogidas a conveniencia (en una versión reducida, para la definición de un Algebra de Boole, solo es necesario una operación unaria y otra binaria). Por comodidad, se suelen escoger dos operaciones binarias, las denominadas OR y AND, de modo que cualquier expresión booleana se puede convertir en una combinación lineal de estas dos operaciones básicas junto con la operación NOT.

Evento básico: Es el modo de fallo o parada iniciador.

Puerta OR: Permite que se produzca un modo de fallo o parada en el caso de que alguno de los modos de fallo o parada que la precedan tengan lugar.

Puerta AND: Permite que se produzca un modo de fallo o parada en el caso de que todos los modos de fallo que la precedan tengan lugar.

Evento final: Es el modo de fallo que se quiere evaluar, y que se produce como la manifestación previa de otros modos de fallo o parada.

A medida que se desciende en cada nivel, la probabilidad se ve afectada por las "puertas" que marcan las condiciones de fallos subsecuentes de la siguiente forma:

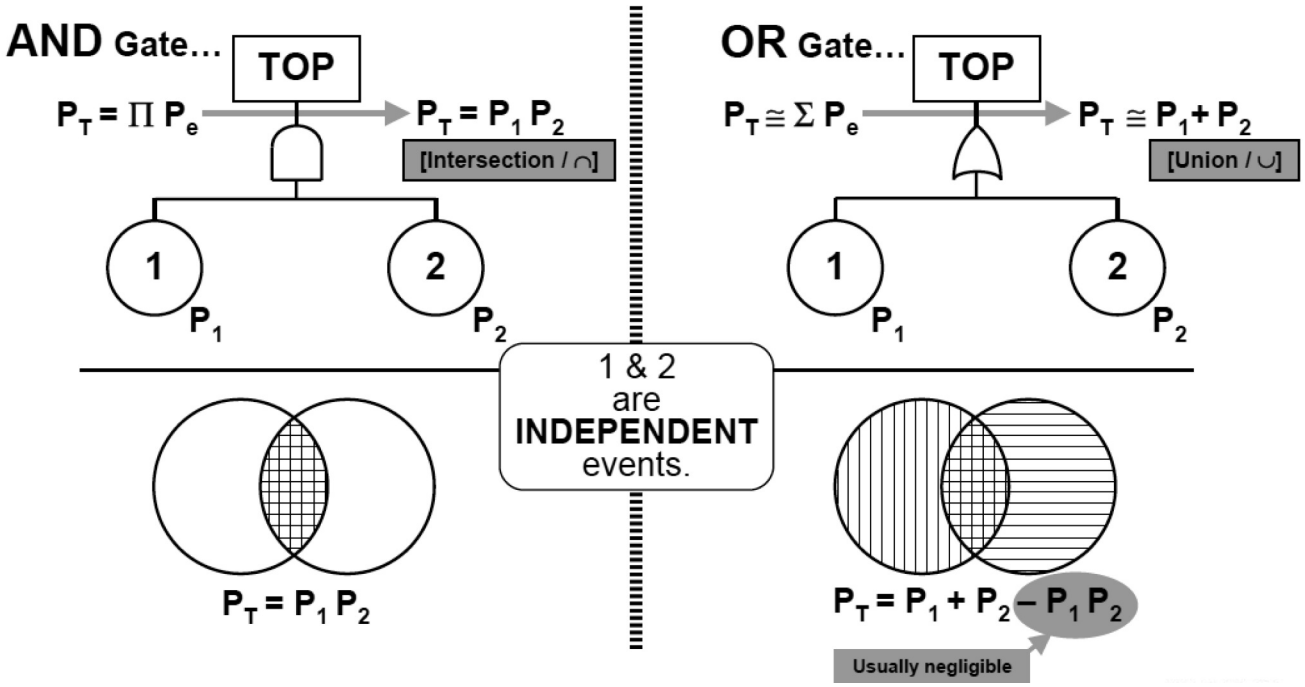


Figura 51. Representación de la probabilidad total (P_T en las figuras superiores y área mallada en las inferiores) del modo de fallo analizado o "TOP", en el caso de que sea consecuencia de dos eventos que convergen en una puerta AND o en una puerta OR. Fuente: Clemens, 2002

Existen numerosos trabajos dedicados a desarrollar y aplicar el método de los árboles de fallo, entre los que cabe citar los de (Hammer, 1972), (Barlow & Chatterjee, 1973) o (Brown, 1976).

El empleo de los árboles de fallo está recomendado, según , cuando se dan las siguientes condiciones:

- Se han identificado grandes amenazas o riesgos.
- Existen numerosas causas potenciales de contratiempos.
- Se van a analizar sistemas complejos.
- Se han identificado los eventos indeseables.

No se recomienda el empleo de árboles de fallo de gran extensión a menos que sea absolutamente imprescindible.

Mediante el análisis por árboles de fallo se puede obtener, según (Clemens, 2002):

- Representación gráfica de las cadenas de eventos o condiciones que dan lugar a un fallo o parada operativa.
- Identificación de los modos de fallo o parada críticos.
- Mejora de la comprensión de las características del sistema.
- Identificación de los recursos que se pueden emplear para prevenir el fallo o parada
- Una guía para asignar recursos que permitan optimizar el control del riesgo.
- Documentación de los resultados analíticos.

EJEMPLO: GENERACIÓN DE UN ÁRBOL DE FALLO EN LA EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLO DE UN SISTEMA DE TRES AMARRAS

El problema consiste en obtener la probabilidad de fallo de cada una de las amarras de proa de un buque amarrado que está sometido a las acciones del viento, las corrientes y la variación del nivel de marea. Estas acciones se traducen en tensiones sobre las amarras, que pueden conducir a su rotura.

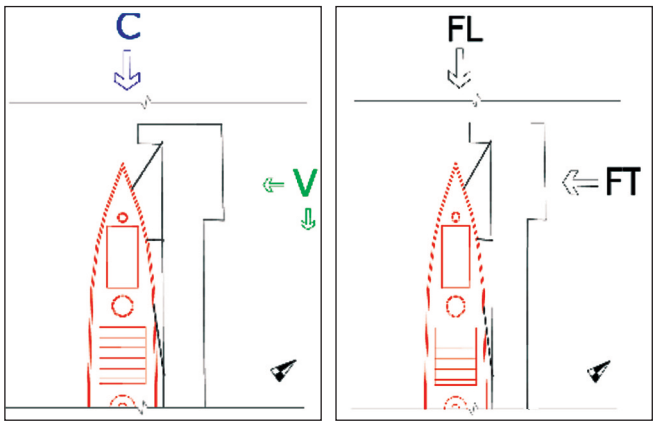


FIGURA 52. Esquematización de las acciones en planta provocadas por la corriente, longitudinal al buque, y el viento, que al incidir oblicuamente se puede descomponer en sus componentes longitudinal y transversal

La elaboración del árbol de fallo consiste en identificar todas las posibles combinaciones de rotura que se pueden dar en el sistema, compuesto por un largo, un *spring* y un través Figura 53.

En esta figura se recogen cuatro posibilidades iniciales, que dan lugar a una serie de consecuencias y que se han marcado con colores:

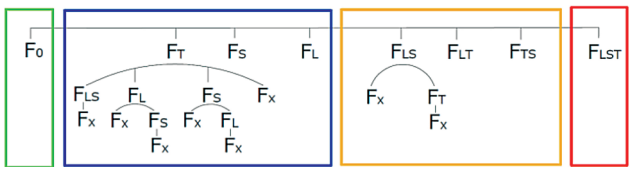


FIGURA 53. Esquema de fallo con el que se contemplan todas las combinaciones de fallos que se pueden producir, y los derivados de éstas

- F_0: No se produce la rotura de ninguna de las amarras (Verde)
- F_T, F_L, F_S: Se produce inicialmente la rotura de una de las amarras, ya sea el largo (*L*), *spring* (*S*) o través (*T*). Se ha marcado en azul.
- F_{LT}, F_{LS}, F_{TS}: Inicialmente se produce el fallo simultáneo del largo y el *spring* (*LS*), del largo y del través (*LT*) y del través y el *spring* (*TS*). Se ha marcado en amarillo.
- F_{LST}: Se produce inicialmente el fallo simultáneo del largo, del *spring* y del través.

Los niveles que derivan de las situaciones iniciales descritas en la lista anterior permiten conocer hasta qué punto se puede propagar el fallo, y además, calcular la probabilidad de cada suceso final condicionada a la ocurrencia de los sucesos iniciales.

NOTA: TIPOS DE DEPENDENCIA ENTRE EVENTOS

Se dice que dos eventos A y B son dependientes si se cumple la siguiente desigualdad:

$$Pr(A \cap B) \neq Pr(A) \,.\, Pr(B)$$

La dependencia entre actividades se puede clasificar de diferentes formas. Una de ellas consiste en clasificar las dependencias en intrínsecas y extrínsecas al sistema.

DEPENDENCIAS INTRÍNSECAS

Hacen referencia a aquéllas en las que el estado de un elemento se ve afectado por el estado de otro elemento.

- **Dependencia funcional**: este tipo hace referencia al caso en que el estado funcional del elemento A determina la operatividad del elemento B. Se puede considerar que:
  - El elemento B no es necesario cuando A está en funcionamiento.
  - El elemento B no es necesario cuando A falla.
  - B es necesario cuando A está en funcionamiento.
  - B es necesario cuando A falla.

- **Dependencia de entrada**: En este caso, el estado de funcionamiento de B depende del estado de funcionamiento de A.
- **Fallo en cascada**: El fallo de A puede conducir al fallo de B.

Dependencias extrínsecas

Hace referencia a las dependencias que no son inherentes al sistema y que suelen ser externas al mismo. Deben ser tratadas mediante la modelización del fenómeno físico que las provoca.

- **Medioambientales/Medio Físico**: En esta clasificación se incluyen las dependencias que provocan los factores del entorno.
- **Interacciones humanas**: Esta dependencia es generada por la interacción obra-hombre.

6. ADSCRIPCIÓN DE LOS MODOS DE FALLO O PARADA A ESTADOS LÍMITE

6.1. INTRODUCCIÓN

Una vez se conoce la forma de las ecuaciones que describen los modos de fallo o parada operativa, en base a la metodología propuesta por la ROM 0.0, se deben adscribir a los Estados Límite, como paso previo a la caracterización de los factores de proyecto.

6.2. EL MÉTODO DE LOS ESTADOS LÍMITE

Para llevar a cabo la verificación de un sistema se utilizará el Método de los Estados Límite. Para ello se definen tres conjuntos de estados límite[4] según se relacionen con la seguridad estructural, el servicio o la explotación del tramo.

Estados Límite Últimos: son aquéllos que producen la ruina, por rotura o colapso de la obra o de una parte de ella.

Estados Límite de Servicio: engloban aquellos estados que producen la pérdida de la funcionalidad de la obra o de una parte de ella, de forma reversible o irreversible, debido a un fallo estructural, estético, ambiental o por condicionante legal. En caso de ser permanentes, es necesaria la reparación para recuperar los requerimientos del proyecto. Estos estados pueden alcanzarse durante la vida de la obra como consecuencia de su uso y explotación, así como por su ubicación en el medio físico y en el terreno.

Estados Límite Operativos: son todos aquéllos en los que se reduce o se suspende temporalmente la explotación por causas externas a la obra o a sus instalaciones, sin que haya daño estructural en ellas o en alguno de sus elementos.

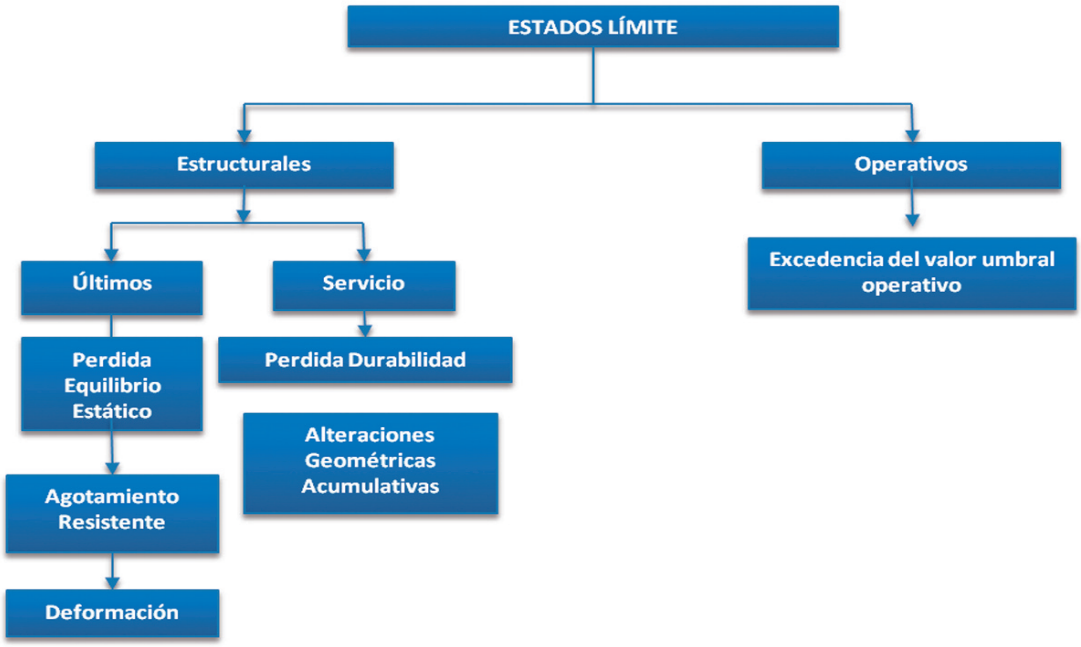


FIGURA 54. Ejemplo de los estados límite que se pueden alcanzar en un sistema de atraque

[4] Son todos aquellos estados de proyecto en los que las combinaciones de factores pueden producir uno o varios modos de fallo o parada operativa, y que ocurren de la misma forma o con el mismo mecanismo.

6.3. MODOS DE FALLO Y DE PARADA

Como se indicó anteriormente, un modo de fallo describe la forma o mecanismo en que se produce el fallo o la parada operativa del sistema o de un elemento del mismo. Para caracterizar un modo de fallo o de parada operativa es necesario definir:

- Forma o mecanismo en que se produce.
- Los factores de proyecto que pueden intervenir simultáneamente en su ocurrencia.
- Forma de verificación, es decir, la ecuación que describe la forma o el mecanismo y la relación funcional entre los factores de proyecto que intervienen en el modo.
- Rango de validez de la ecuación.

A la vista de lo expuesto se presentan los modos de fallo adscritos a los estados límite últimos, de servicio y operativos que pueden afectar a diferentes elementos de obra.

En cada una de las tablas en las que se resumen los modos de fallo o paradas operativas que se pueden producir se indica, junto a cada modo, qué subsistemas de la terminal han visto afectada su capacidad (en el caso de que alguna se haya visto perjudicada).

EJEMPLO: ADSCRIPCIÓN DE MODOS DE FALLO O PARADA OPERATIVA DE UN DIQUE VERTICAL EXENTO A LOS ESTADOS LÍMITES CORRESPONDIENTES

Identificación y clasificación de los modos de fallo o paradas operativas según el criterio definido por (Puertos del Estado, 2011):

Estados Límite para Dique vertical exento	Modos de Fallo o Parada Operativa	Afección a la capacidad de los subsistemas económicos
Estado Límite Último	- Vuelco Cajón - Deslizamiento Cajón - Deslizamiento profundo cajón - Flotación - Asientos/hundimiento - Pérdida capacidad mecánica del hormigón - Oxidación de armaduras	- Atraque y amarre, carga y descarga
Estado Límite de Servicio	- Fisuración del hormigón - Pérdida de impermeabilidad entre las juntas de los bloques	
Estado Límite Operativo	- Agitación en dársena supera los umbrales de operatividad	- Atraque y amarre - Carga y descarga

TABLA 11. Identificación de los modos de fallo adscritos a cada estado límite en el elemento de obra "Dique vertical exento"

7. CARACTERIZACIÓN DE LOS FACTORES DE PROYECTO

7.1. INTRODUCCIÓN

Una vez se conoce la forma de las ecuaciones que describen los modos de fallo o parada operativa, y que éstos han sido adscritos a un grupo de estados límite, es necesario caracterizar los términos que lo componen: los factores de proyecto. La tarea de identificar los factores de proyecto que definen el sistema analizado y que interactúan con él, así como su ordenación, es un proceso cuyas bases teóricas están definidas en la ROM 0.0 . Por ello, se recomienda seguir el procedimiento aquí descrito consultando simultáneamente la ROM 0.0-01, ya que será necesario para comprender plenamente y desarrollar correctamente el procedimiento.

Tal y como se define en la ROM 0.0, los **factores** son un conjunto de parámetros, agentes y acciones con los que se define y se comprueba la seguridad, el servicio y la explotación de todos los elementos que conforman el sistema que se esté analizando, así como de su entorno. La magnitud de los factores de proyecto y, en consecuencia, la respuesta estructural y formal de los elementos de la infraestructura y su explotación, evolucionan o pueden evolucionar en el tiempo. Adoptar un valor determinado de un factor de proyecto en el diseño y verificación de las obras comporta unas determinadas consecuencias económicas, sociales y ambientales. La información en la que se sustenta el criterio para seleccionar dicho valor es limitada, está afectada de incertidumbre estadística y, por tanto, entraña un riesgo. Por todo ello es necesario disponer de herramientas estadísticas que permitan evaluar cuantitativamente la incertidumbre asociada al valor seleccionado. Los factores se podrán ordenar según se establece en los siguientes apartados.

Parámetros: con ellos se puede definir la geometría de la obra y del terreno, así como las propiedades del medio físico, del terreno y de los materiales.

Geometría, viscosidad cinemática del agua, grado de consolidación del terreno, resistencia a compresión del hormigón, etc.

Agentes: se definen como todo aquél que puede ejercer o producir en la obra, o sobre la misma y su entorno, efectos significativos en la fiabilidad, funcionalidad, y operatividad.

Medio físico: Viento, oleaje, corrientes, terreno.

Acciones: Es la magnitud que puede adoptar el agente.

Medio físico: velocidad del viento, presiones dinámicas causadas por oleaje. Terreno: empuje. Uso y explotación: carga de atraque.

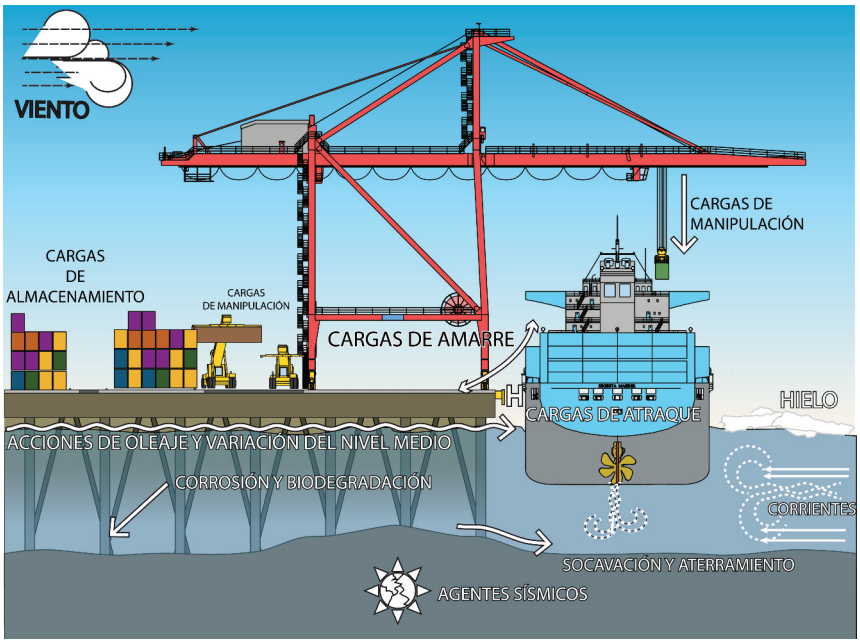


FIGURA 55. Representación de los parámetros que caracterizan la infraestructura y el entorno, y los agentes que interactúan con ella

La caracterización (o determinación) de un factor de proyecto se puede realizar mediante observación directa de la naturaleza, siendo deseable el empleo de instrumentación específica, o mediante ensayos de laboratorio (estructuras, geotecnia, oleaje). Una vez caracterizados, se puede simular la interacción de factores mediante ensayos en laboratorio o mediante simulaciones numéricas.

Caracterizar consiste en determinar los atributos peculiares de todos los elementos, estáticos y dinámicos, que conforman las obras y las operativas, de modo que se distingan claramente unos de otros.

El resultado de la caracterización es la obtención de una magnitud o función representativa de cada parámetro y agente analizado y particularizado para un emplazamiento y periodo de tiempo.

Con este fin, y dada la compleja interacción que existe entre los agentes y las obras, se trata de caracterizar de forma individual cada factor y estudiar después las consecuencias de la interacción entre ellos. En el ámbito de la ingeniería marítima y portuaria, son muy numerosas y habituales las interacciones entre el medio físico, la infraestructura y la operativa, por lo que se recomienda considerar tanto los factores de uso y explotación como los factores asociados a los procesos constructivos y al comportamiento de los materiales de construcción.

De la observación directa de la naturaleza proceden los primeros registros de altura de ola y periodo tomados por los marineros en las principales rutas de comercio marítimo. Para los estudios de oleaje en un emplazamiento dado se pueden emplear instrumentos como los sensores basados en pulsos acústicos o las boyas de oleaje.

FIGURA 56. Perfilador de corrientes y medidor de oleaje direccional de la casa Nortek

La caracterización del terreno se puede realizar mediante ensayos, como el triaxial:

FIGURA 57. Instrumentación empleada para la realización de un ensayo triaxial de suelos. De este ensayo se extraen propiedades del terreno tales como el ángulo de rozamiento interno o la cohesión

La información relativa a las propiedades mecánicas del hormigón se ha generado a partir de ensayos en laboratorio, como los de tracción indirecta o los de compresión simple.

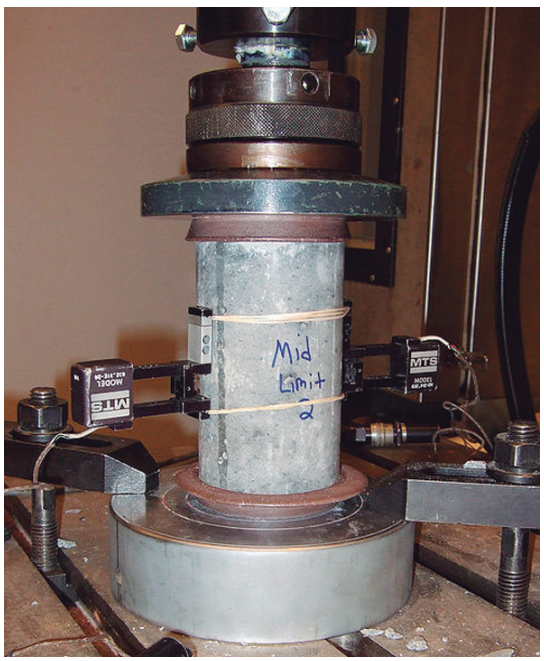


FIGURA 58. Ejemplo de probeta llevada al ELU por compresión simple. De este ensayo se obtienen parámetros tales como Resistencia a compresión, que depende a su vez del número de días de curado de la probeta en el caso del hormigón

FIGURA 59. Fotografía de la boya de Punta Carnero, que forma parte de la red costera de Puertos del Estado

7.2. TIPOS DE CARACTERIZACION: DETERMINISTA, ALEATORIA Y ESPECTRAL

Para la verificación de obras y el cálculo del riesgo desde un punto de vista probabilista, el factor de proyecto se considerará como una variable aleatoria caracterizada por su función distribución, ya sea marginal, condicionada o conjunta con otros factores de proyecto .

El proceder a la caracterización determinista, aleatoria o espectral de los factores de proyecto depende de la naturaleza del mismo, su origen, la cantidad y calidad de información disponible sobre dicho factor, el método de verificación que se va a emplear y el alcance de la misma.

7.2.1. Caracterización determinista

Se elegirá una caracterización determinista del factor de proyecto si éste cumple los siguientes requisitos:

- Se trata de un valor conocido u observado.
- Se trata de un valor representativo de una serie de experimentos aleatorios.

  Ejemplo: la resistencia nominal del hormigón que se emplea en los cálculos es el valor correspondiente a un determinado percentil de un ensayo consistente en llevar a límite de rotura a una serie de probetas

- Se adopta si hay una escasa incertidumbre en el proceso. Si hay gran incertidumbre o amplia variabilidad de resultados es necesario proceder a una caracterización aleatoria.

Cuando no se emplee un modelo de probabilidad, el valor del factor del proyecto se determinará por procedimientos tales como la experiencia previa, cálculos justificativos, normativa vigente, etc.

Este procedimiento suele emplearse para obtener la magnitud de parámetros geométricos, de materiales, agentes de uso y explotación que no presentan una alta variabilidad en intervalos de tiempo pequeños (tren de cargas de grúas, sobrecargas de almacenamiento), o para obtener factores de proyecto cuyo valor real no se puede conocer hasta que se ejecuta la obra. Por ello, en algunos casos, será necesario comprobar, mediante una campaña de medidas previstas para ser aplicadas tras la ejecución de la obra, que el valor supuesto en el prediseño es el correcto. En estos casos se definen los siguientes conceptos:

> **Valor nominal**: valor adjudicado al factor de proyecto, que es, a todos los efectos, el valor representativo.
>
> **Modelo probabilístico a partir del valor nominal**: cuando sea necesario o así lo establezca la normativa, se podrá asumir un modelo probabilístico o función de distribución teóricos para definir otros valores del factor de proyecto.

7.2.2. Caracterización estadística

La aleatoriedad, en Matemáticas, se asocia a todo proceso o experimento cuyo resultado no es previsible a priori, de forma que el resultado de todo suceso aleatorio no puede determinarse en ningún caso antes de que éste se produzca. El estudio de los fenómenos aleatorios queda dentro del ámbito de la Teoría de la Probabilidad y, en un marco más amplio, en el de la Estadística.

La caracterización aleatoria cuenta con las siguientes peculiaridades:

- Debe existir un espacio muestral del factor a caracterizar, es decir, una serie de muestras u observaciones sobre las que aplicar las teorías probabilistas.
- El valor caracterizado está condicionado por el tratamiento estadístico empleado.
- Permite obtener funciones estadísticas.
- Permite determinar parámetros característicos.

El valor representativo (el que representa a la población), en este tipo de caracterización, se obtiene a través de la función de distribución de la población.

Para determinar el valor de un factor de proyecto a partir de su modelo de probabilidad es necesario

Factor	Escala espacial	Escala temporal	Descripción del factor	Régimen	Valor repre-sentativo	Método para la obtención del valor represen-tativo	Fuente de información
Altura de ola	Costera	Corto plazo (1h)	Aleatoria	Régimen medio	Hs	Media de las 1/3 de olas mayores	Boyas / Análisis estadístico
Altura de ola Temporales	Costera	Intermedia	Aleatoria	Cola superior. Método POT	Hmax	Ajuste de los máximos sobre umbral	Boyas / Análisis estadístico
Velocidad de viento	Costera	Corto plazo (10 minutos)	Aleatoria	Régimen medio	U10	Promediada durante 10 mi-nutos a 10 metros de altura	Boyas / Instrumenta-ción local
Marea as-tronómica	Costera	Medio plazo (horas)	Determinista	Régimen medio	Max., Min.	Dependiendo de la unidad de tiempo que se considere	Mareó-grafos

TABLA 12. Ejemplo de la información de partida necesaria para obtener un valor representativo de un agente del medio físico

realizar un estudio previo de una o varias muestras y proponer una función que se ajuste a ellas para **poder reproducir su comportamiento** a posteriori. De esta función pueden determinarse descriptores estadísticos tales como la media. Es estos casos se definen los siguientes valores (ver Figura 60):

- **Valor representativo**: proporciona un orden de magnitud del valor que el factor de proyecto puede tomar en la ecuación de verificación.
- **Valor característico**: es el principal valor repre-sentativo del factor de proyecto.
- **Valor característico superior e inferior**: valores extremos del intervalo para factores de proyecto acotados en un intervalo de confianza. Salvo prescripción específica, se tomarán como los va-lores extremos del intervalo de confianza mí-nimo, $(1 - \alpha)=0,9$.

En los Anexos 3 y 4 se recogen los fundamentos de la caracterización aleatoria.

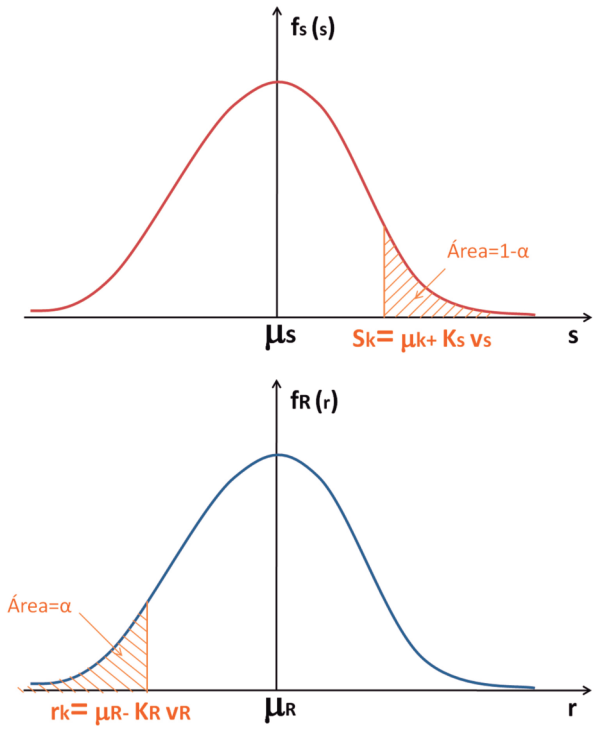


FIGURA 60. Definición de los valores característicos para los esfuerzos S y las resistencias R

7.2.3. Caracterización espectral

Las técnicas de análisis en el dominio frecuencial reciben, en general, el nombre de técnicas de análisis espectral y sus fundamentos básicos pertenecen al denominado análisis de Fourier. Así, dada una serie temporal discreta, $\eta(t)$, utilizando la transformada de Fourier, es posible transferir la información contenida en dicha serie al dominio de la frecuencia. La idea básica sobre la que se apoya el análisis espectral puede resumirse brevemente de la siguiente manera:

Sea una función $\eta(t)$ que puede ser expresada como combinación lineal de un conjunto de funciones $\beta_i(t)$:

$$\eta(t) = \sum_i \Gamma_i \beta_i(t)$$

Definimos entonces un conjunto de cantidades, en términos de , que de alguna manera nos indique la importancia relativa de cada $\beta_i(t)$ para generar $\eta(t)$, mediante una combinación lineal.

El análisis espectral, por tanto, consiste en descomponer fenómenos de mayor o menor complejidad en constituyentes elementales para conocer cuál es la contribución de cada uno de ellos al proceso. Las funciones $\beta_i(t)$ serán del tipo seno y coseno, y los valores de vendrán representados por las amplitudes correspondientes a tales funciones.

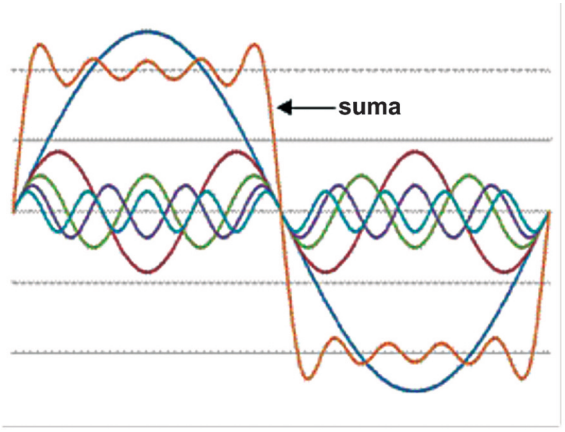


FIGURA 61. Representación de una serie de ondas armónicas de diferente amplitud y frecuencia, y la suma ponderada de éstas, que se corresponde con la definición de H(t)

De este modo observamos que el espectro de energía describe cómo la energía se distribuye sobre un rango de frecuencias y direcciones. La energía en el dominio de frecuencias se representa por el espectro de frecuencia $S(f)$, mientras que la distribución de energía en el dominio de la dirección se representa mediante la función de dispersión direccional $D(f, \theta)$.

$$S_f(f_m)\Delta f = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E[\alpha_{mm}^2]}{2} \qquad S_f(f_m, \alpha_n)\Delta f \Delta\alpha = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E[\alpha_{mm}^2]}{2}$$

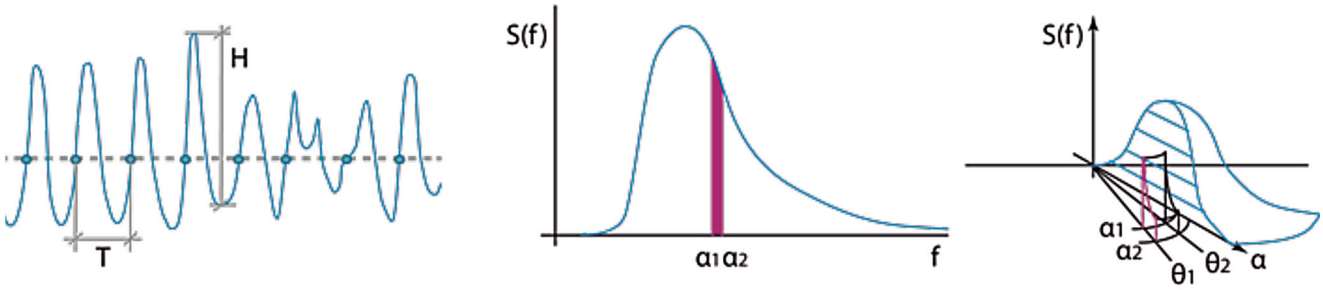


FIGURA 62. Representación del espectro direccional (derecha) y su equivalencia con el espectro escalar (centro), obtenido a partir de series temporales (izquierda)

Para profundizar sobre la caracterización espectral, se recomienda al lector consultar el Anexo 6.

7.3. DOCUMENTOS DE REFERENCIA SOBRE LOS PROCEDIMIENTOS DE CARACTERIZACIÓN DE AGENTES Y PARÁMETROS

Para facilitar al lector la caracterización de agentes y parámetros, se han creado dos tablas que recogen los documentos en los que se encuentra la información necesaria para la caracterización de los parámetros y agentes predominantes en las instalaciones portuarias, así como los experimentos recomendados en cada caso para poder efectuar una caracterización ad-hoc.

Se proporciona una tabla de documentos para las variables declaradas como Parámetros (Tabla 13), y otra para las declaradas como Agentes (Tabla 14).

Las fuentes de información se han clasificado en función del nivel de detalle que se requiera en la ca-

racterización, de forma que se pueda emplear una u otra según la finalidad. Las tablas comprenden:

- Nombre del Grupo: Tipo de Parámetro o Agente.
- Nombre del parámetro: Denominación del parámetro o agente analizado.
- Valores nominales: Fuentes documentales o instrumentales de las que obtener valores puntuales de las variables.
- Rango de valores: Fuentes documentales o instrumentales de las que las variables estén caracterizadas mediante un intervalo de valores.
- Caracterización aleatoria: Fuentes documentales o instrumentales con las que sea posible caracterizar aleatoriamente las variables.
- Otro tipo: Fuentes que proporcionan otro tipo de información.

PARÁMETROS					
Nombre del Grupo	**Denominación del parámetro**	**Valores nominales**	**Rango de valores**	**Caracterización aleatoria**	**Otro tipo**
Geometría		Levantamientos topográficos. Campañas *in-situ*			Base de datos del IGN
Terreno	Tipo de material Permeabilidad	IGME (www.igme.es)	IGME (www.igme.es)		
Aire					
Agua	Densidad Salinidad	Puertos del Estado (www.puertos.es)			
Materiales	Hormigón		Instrucción del Hormigón Estructural EHE Eurocódigo 2		
Materiales	Acero Madera Piedra		Estructuras de acero en la edificación Eurocódigo 3 Eurocódigo 5		

Tabla 13. Fuentes de información disponibles para la caracterización de parámetros, clasificados en función del nivel de detalle requerido

AGENTES					
Nombre del Grupo	**Denominación del agente**	**Valores nominales**	**Rango de valores**	**Caracterización aleatoria**	**Otro tipo**
Gravitatorio	Peso Propio				
Medio Físico	Climáticos atmosféricos	Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)		ROM 1.0-09 ROM 0.4-95 Medidas en campo + análisis de clima Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)	
	Climáticos marítimos	Puertos del Estado (www.puertos.es)	ROM 0.3-91	ROM 1.0-09 Medidas en campo + análisis de clima Puertos del Estado (www.puertos.es) ROM 0.3-91	
Hidráulicos		Confederaciones Hidrográficas		Confederaciones Hidrográficas	
Biogeo-químico					
Sísmico	Terremotos	IGN(www.ign.es)	Norma de Construcción Sismorresistente (NCSR-02) Eurocódigo 8	IGN (www.ign.es)	
	Maremotos	IGN(www.ign.es)			
Térmicos	Temperatura ambiente	Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)		Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)	
	Temperatura del agua	Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) Puertos del Estado (www.puertos.es)		Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) Puertos del Estado (www.puertos.es)	
Terreno			ROM 0.5-05 ROM 0.2-90		
Uso y explotación			ROM 3.1-99		
Asociados al material			EHE- 08 Eurocódigos 2,3,4,5,9		

Tabla 14. Fuentes de información disponibles para la caracterización de agentes, clasificadas en función del nivel de detalle requerido

8. MÉTODOS DE VERIFICACIÓN

8.1. INTRODUCCIÓN

La verificación es el proceso que permite determinar si se cumple la condición matemática que define el modo de fallo o parada operativa. En el ámbito de este texto, la ecuación o ecuaciones de verificación relacionan agentes y parámetros, que, dependiendo de su magnitud, darán lugar a un modo de fallo o parada operativa.

Según la ROM 0.0 (Puertos del Estado, 2001), un procedimiento de verificación se aplica para comprobar cuándo y cómo un tramo de obra deja de cumplir en una fase los requisitos del proyecto, que suelen girar en torno a la fiabilidad, la funcionalidad y la operatividad.

La ecuación puede incorporar tantos términos como sea necesario para que el modo sea correctamente representado a través de ella. La limitación existente a la hora de formular una ecuación de verificación radica en la disponibilidad de información para obtener los valores de los parámetros, agentes y acciones intervinientes.

Una ecuación de verificación puede presentar varios términos, como podría ser la que se muestra a continuación:

$$Ax + By - Cz - Kv^2 > 5$$

Donde:

- *A, B, C* y *K* son parámetros. Los parámetros pueden estar representados por valores discretos o por funciones evolutivas.

- *x, y, z, v* son valores representativos o funciones características de los agentes que participan en el modo de fallo o parada operativa. La magnitud de los agentes puede constituir un valor discreto, una función evolutiva en el tiempo, o una función probabilística.

Estas ecuaciones también se pueden presentar una forma sencilla:

$$\sigma > \sigma_u$$

La ROM 0.0 propone los siguientes métodos para verificar las obras frente a modos de fallo o parada operativa:

- **Nivel I:**
  - Coeficientes de seguridad global.
  - Coeficientes parciales.
- **Nivel II:**
  - Momentos estadísticos y técnicas de optimización.
- **Nivel III:**
  - Integración y simulación numérica.

Al margen de la clasificación anterior, algunos autores clasifican las metodologías existentes en función de la forma de resolver las ecuaciones de verificación.

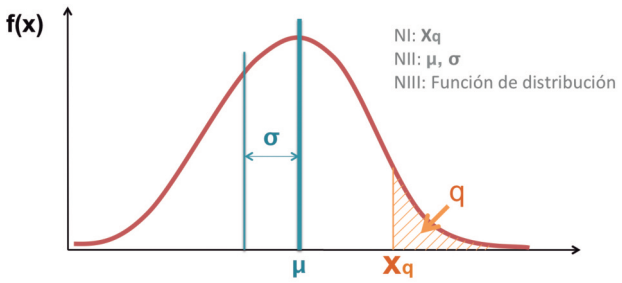


FIGURA 63. Diferencia conceptual entre los fundamentos de la clasificación de los métodos de verificación disponibles

En la Figura 63 se muestran los parámetros con los que se trabaja en los diferentes métodos de verificación disponibles y que dan lugar a su clasificación. Los conocidos como métodos de Nivel I emplean un valor "determinista" para establecer los umbrales de la verificación, que en la figura se denomina x_q. En los métodos de Nivel II se trabaja con la media y la desviación típica de la muestra como parámetros característicos de la misma. En los métodos de Nivel III se trabaja con la función de distribución en su totalidad.

8.2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE VERIFICACIÓN DE NIVEL I Y NIVEL II

8.2.1. Métodos de Nivel I: Resolución mediante la aplicación de coeficientes globales y parciales de seguridad

La verificación por métodos de Nivel I consiste en evaluar el balance entre los términos desfavorables (los que favorecen la manifestación del fallo o parada) de la ecuación y los términos favorables. Este

balance puede establecerse mediante la evaluación de la diferencia o la evaluación del cociente entre los términos.

Así pues, para que NO se produzca fallo, se debe cumplir que:

$$\sum \text{Términos favorables} - \sum \text{Términos desfavorables} > 0$$

O bien:

$$\frac{\sum \text{Términos favorables}}{\sum \text{Términos desfavorables}} - > 1$$

Se incluyen, por tanto, los métodos del coeficiente de seguridad global y de los coeficientes parciales.

En ambos, por lo general, los factores de proyecto y los valores de los términos de la ecuación de verificación se determinan con criterios deterministas. Esto significa que los factores de proyecto y los resultados de la verificación se tratan como variables deterministas, aunque puede haber factores que lo hagan como variables aleatorias: resistencia del hormigón a compresión simple, la altura y el periodo del oleaje, etc.

El método del coeficiente de seguridad global consiste en evaluar la ecuación de verificación y comparar el resultado con un coeficiente de seguridad global. Se considera que el modo de fallo o parada operativa ocurre cuando se cumple que:

$$Z > Z_c$$

Donde:

- Z es el cociente entre los términos que favorecen la no ocurrencia del modo y los que sí lo hacen.
- Z_c es un valor máximo admisible denominado coeficiente de seguridad global. Mediante este coeficiente se evalúan las incertidumbres conocidas y desconocidas asociadas al proceso de cálculo, la disponibilidad de datos, la validez de la ecuación, etc.

A continuación se enumeran algunas de las consideraciones que hace la ROM 0.0 sobre la aplicabilidad de este método:

- Se aplicará en obras o tramos de obra pequeños, o en estudios previos.
- Las ROM específicas ofrecen los valores de los coeficientes de seguridad mínimos admisibles.
- Los términos de la ecuación toman valores nominales. En el caso de tratarse de agentes del medio físico, este valor se podrá determinar a partir de la probabilidad de excedencia del agente.
- No se aplicará este método en aquellas situaciones que sean claramente una extrapolación del estado del conocimiento o cuando no se tenga experiencia en su utilización.

La verificación mediante el método de los coeficientes parciales se lleva a cabo mediante una ecuación de margen de seguridad, y a través de la evaluación de la diferencia entre los términos desfavorables a la ocurrencia del modo (X_d) y los favorables (X_f). A su vez, estos términos están ponderados por los coeficientes C_d y C_f. Este tipo de ecuaciones presenta la siguiente forma:

$$S = \sum C_d \cdot X_d - \sum C_f \cdot X_f$$

La verificación de la seguridad, fiabilidad y operatividad consiste en comprobar que $S>0$.

El resultado de la aplicación de los métodos de Nivel I es un valor que indica el comportamiento de un tramo frente a un modo de fallo o parada operativa.

8.2.2. Métodos de Nivel II: Momentos estadísticos y técnicas de optimización

Los métodos de Nivel II permiten verificar el tramo de obra frente a un modo de fallo, y evalúan su probabilidad de ocurrencia en el intervalo de tiempo. La ROM 0.0 recomienda que se emplee este método en la verificación cuando el carácter general u operativo de la obra se encuentre en el intervalo IRE-ISA:

IRE = 20	Vida útil = 50 años
ISA ≥ [5 – 19]	Probabilidad de fallo máxima admisible en ELU ≤ 0,1

TABLA 15. Probabilidad de fallo máxima admisible en ELU para determinados valores de IRE e ISA

O bien en el intervalo:

IRE = 20	Vida útil = 50 años
ISA ≥ [20 - 29]	Probabilidad de fallo máxima admisible en ELU ≤ 0,01

TABLA 16. Probabilidad de fallo máxima admisible en ELU para determinados valores de IRE e ISA

En este caso, la ecuación de verificación se formula en términos del margen de seguridad. Para poder aplicar este método se deben conocer las funciones de distribución y de covarianza de los factores

de proyecto en el intervalo de tiempo. En caso de que no se disponga de esta información, se deben establecer hipótesis de trabajo sobre dichas funciones, sobre todo en relación a la independencia estadística de los términos de la ecuación de verificación.

8.2.2.1. Método de integración

En la verificación por el método de integración se utilizan modelos de probabilidad conjunta, teniendo en cuenta el periodo de tiempo para el que las funciones marginales fueron obtenidas. Para cada uno de los estados de análisis (horas, días, semanas, meses, años, etc.) se comprueba si se producen o no los modos de fallo o parada operativa provocados principalmente por agentes del medio físico o agentes de explotación. En este tipo de métodos es necesario integrar las funciones de probabilidad conjunta en la región de fallo.

Este proceso requiere (1) la obtención de las funciones de densidad de los agentes predominantes, (2) el cálculo de la función de densidad conjunta de los agentes que colaboran en la ocurrencia del modo de fallo y (3) la integración de ésta en la región de fallo, que también es necesario (4) definir matemáticamente.

El cálculo de la probabilidad conjunta de más de dos elementos definidos por sus funciones de densidad marginales es un procedimiento matemáticamente complejo y que en ocasiones no es abordable por el elevado número de variables a tener en cuenta.

La Figura 64 representa las funciones necesarias para poder evaluar la probabilidad de fallo dada la ocurrencia de dos agentes, mediante métodos de nivel II:

- $f_R(r)$ es la función de densidad del agente (variable) R.
- $f_S(s)$ es la función de densidad del agente (variable) S.
- $f_{RS}(rs)$ es la función de densidad conjunta de los agentes R y S.
- La función G es la que define la frontera entre la ocurrencia o no de fallo.

Integrando $f_R(r)$ en la región (D) donde se produce fallo (G<0), se obtiene la probabilidad de fallo dados los agentes R y S, que actúan conjuntamente:

$$p_{FALLO} = P(R - S \le 0) = \int\int_D f_{RS}(r,s)drds$$

En el caso de que R y S fuesen independientes, tal como se vio en el capítulo de caracterización de variables, ocurre que:

$$f_{RS}(rs) = f_R(r) \cdot f_S(s)$$

por lo que:

$$p_{FALLO} = P(R - S \le 0) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{S \ge r} f_R(r) \cdot f_s(s)drds$$

Así pues, se repite el proceso para cada modo de fallo que se desee verificar.

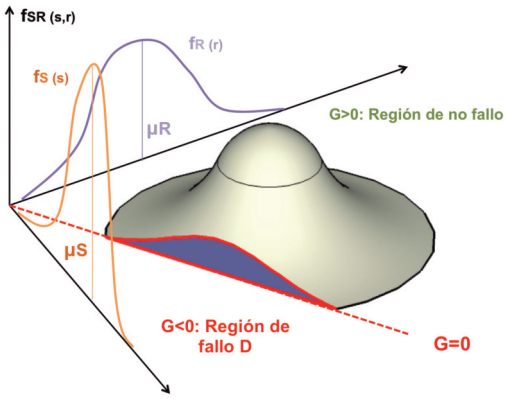


Figura 64. Representación tridimensional del dominio de fallo para la función de densidad conjunta de las funciones marginales f_R y f_S. Elaboración propia a partir de las figuras de (Schneider, 1997)

La Figura 65 muestra la planta de la función de densidad conjunta de R y S y de la ecuación de fallo G.

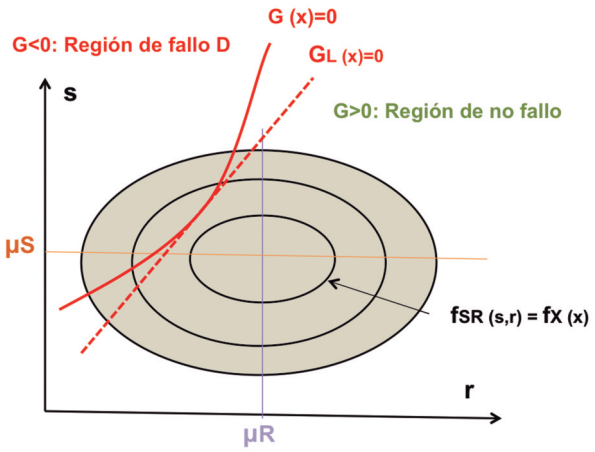


Figura 65. Vista en planta de la región de fallo para la función de densidad conjunta de las funciones marginales f_R y f_S. G_L hace referencia a una frontera lineal, mientras que G puede ser de otro orden. Elaboración propia a partir de las figuras de (Schneider, 1997)

8.2.2.2. Método *Most Probable Point* (MPP)

Para el desarrollo de algunas simulaciones, los métodos de muestreos aleatorios (pseudoaleatorios)

no son eficientes, y debido a ello se desarrollaron los métodos conocidos como "Most Probable Point" o método del punto más probable. EL MPP es un punto en el estado límite que se corresponde con el máximo valor de la función de densidad conjunta de las variables de entrada. Este punto es también la mínima distancia desde el origen hasta el estado límite en el espacio transformado de probabilidad.

Dado que el MPP se encuentra en la mínima distancia, es posible aplicar algoritmos de optimización para encontrar dicha distancia. Una vez que se ha localizado el MPP, se pueden emplear métodos probabilísticos para encontrar la probabilidad en la región de fallo, como el FORM *(First Order Reliability Method*, (Ang & Cornell, 1975); (Hasofer & Lind, 1974)) o el SORM *(Second Order Reliability Method*, Rackwitz & Fiessler, 1978; (Ang & Cornell, 1975); (Madsen, Krenk & Lind, 1986); (Fiessler, Numann & Rackwitz, 1979)).

Dada una respuesta de una variable aleatoria X, el análisis de fiabilidad se focaliza en encontrar la probabilidad de fallo frente a dicha condición. Por ejemplo, una restricción se puede definir por la relación:

$$G(X) \leq 0$$

que hace que la probabilidad de fallo se pueda definir como:

$$P_f = P(G(X) > 0)$$

Y por lo tanto, la fiabilidad viene dada por:

$$R = 1 - P_f$$

La ecuación del estado límite (la ecuación de verificación) está definida por la frontera del fallo, dada por:

$$G(X) = 0$$

Una aproximación para resolver Ec. 17 es mediante el método aproximado de integración de la probabilidad, cuyo objetivo es encontrar una medida de la fiabilidad rotacionalmente invariante, con la cual el método FORM o SORM es desarrollado.

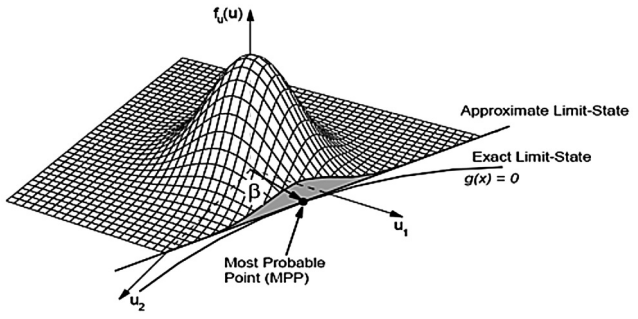


FIGURA 66. Función de densidad conjunta de las variables u_1 y u_2. Estado límite exacto y aproximado. Punto de mayor probabilidad de fallo (NASA, 2011)

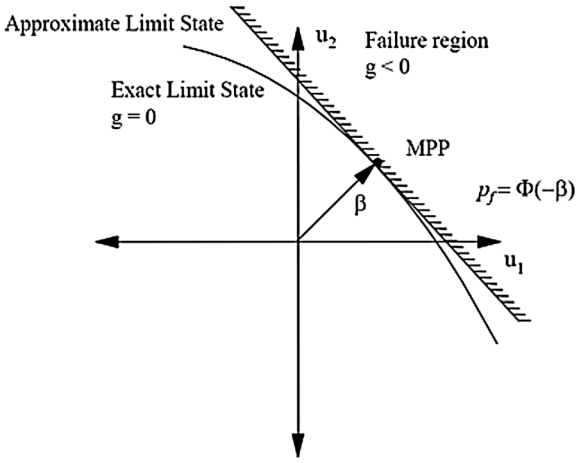


FIGURA 67. Conceptos asociados al uso de Métodos de Primer Orden para el cálculo de la probabilidad (NASA, 2009)

Uno de los pasos más importantes en el empleo de un método basado en el MMP para analizar la fiabilidad de un sistema es la propia determinación del MPP. Esto habitualmente se consigue mediante el empleo de un algoritmo de búsqueda optimizado. La mínima distancia asociada con el MPP proporciona un valor de probabilidad de seguridad, que puede obtenerse a través de métodos aproximados de integración de la probabilidad tales como el FORM o el SORM (Hou, 2004).

8.2.2.3. FORM Y SORM

La fiabilidad, vulnerabilidad y resiliencia proporcionan medidas de la frecuencia, magnitud y duración de los fallos, y se han venido empleando de forma habitual en el ámbito de los recursos acuáticos. Tradicionalmente, estas medidas se han estimado mediante simulaciones, lo que puede ser computacionalmente intenso, en particular cuando los modelos de respuesta del sistema son complejos . Los métodos FORM se pueden emplear, por tanto, como una alternativa a la simulación para obtener estimadores probabilísticos de la fiabilidad, vulnerabilidad y resiliencia.

De forma similar al apartado anterior, la probabilidad de fallo se puede definir como:

$$P_f = P\{G(X) < 0] = \int_{G(X)<0} f_x(x)dx$$

En general, la integral de la ecuación anterior es difícil de evaluar computacionalmente. Es posible obtener soluciones aproximadas mediante técnicas como la simulación de Montecarlo, Mean-Value First-Order Second-Moment analysis (MFSOM), FORM o SORM.

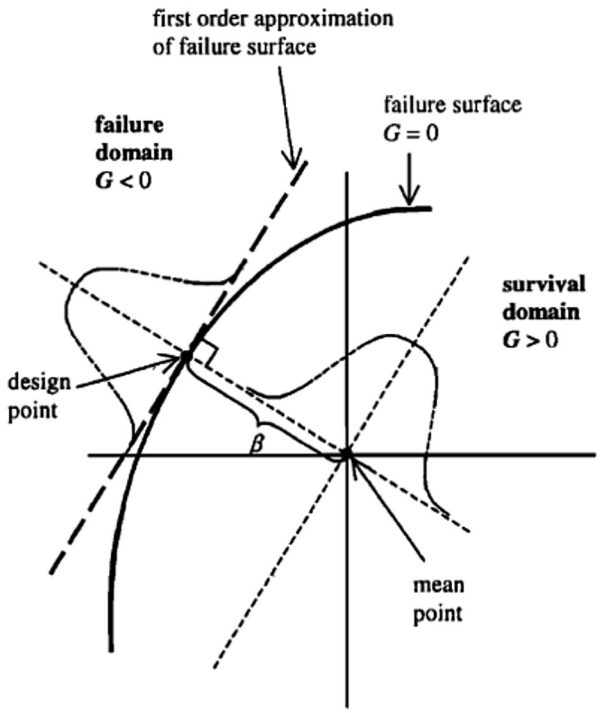


Figura 68. Aproximación del FORM a la superficie de fallo en un espacio normal estándar

El método FORM se desarrolló inicialmente para evaluar la fiabilidad de las estructuras ((Hasofer & Lind, *Exact invariant second-moment code format,* 1974); (Rackwitz R., 1976)) y más recientemente en la ingeniería de recursos hídricos (Maier, Lence, Tolson & Foschi, 2001). El objetivo de este método es localizar el punto de diseño (*design point* en la Figura 68), que tiene asociado el riesgo de fallo más elevado de entre todos los puntos de la superficie del fallo.

La determinación del punto de diseño es un problema de optimización no lineal con restricciones. Algunas técnicas de optimización potencialmente aplicables en la resolución de este problema son el método Rackwitz-Fiessler, (Madsen, Krenk & Lind, 1986) el algoritmo del gradiente reducido generalizado (Cheng, 1982) y el método de multiplicadores de Lagrange (Shinozuka, 1983). FORM transforma las variables aleatorias X_i al espacio Z_i,, el de las variables normales no correlacionadas. Para realizar esta transformación se puede emplear el método Der Kiureghian and Liu (Der Kiureghiam & Liu, 1986). FORM aproxima mediante series de Taylor la función de fallo en torno al punto de diseño. Es necesario destacar por tanto que la probabilidad de fallo obtenida mediante este método es, consecuentemente, una aproximación.

- Ventajas:
  - Relativamente eficiente cuando se trata de obtener bajas probabilidades de fallo.
  - Resultado exacto cuando se dispone de funciones lineales compuestas por variables aleatorias normales.
- Desventajas:
  - La localización del MPP puede ser complicada en el caso de funciones no lineales.
  - Se cometen errores en la determinación de la probabilidad para estados límite no lineales.
  - Sólo permiten analizar un estado límite.

El método SORM es idéntico al FORM salvo que el primero emplea una aproximación de segundo orden de la superficie de fallo en el punto de diseño. ofrece una descripción detallada de este método.

- Ventajas:
  - Relativamente eficiente cuando se trata de obtener bajas probabilidades de fallo.
  - Resultado exacto para superficies parabólicas.
- Desventajas:
  - La localización del MPP puede ser complicada en el caso de funciones no lineales.
  - Se cometen errores en la determinación de la probabilidad para estados límite no parabólicos.
  - Sólo permiten analizar un estado límite.

Para saber más sobre FORM

- (Ditlevsen & Madsen, 1996).
- (Melchers, 1999).

8.3. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE RESOLUCIÓN POR SIMULACIÓN MÁS UTILIZADOS (INCLUYE MÉTODOS DE NIVEL III)

Simular tiene como objetivo replicar características y comportamientos propios de un sistema real . Las simulaciones numéricas son una buena solución para proceder a la verificación del sistema cuando las soluciones analíticas son complejas de obtener.

8.3.1. Método de Montecarlo

8.3.1.1. Descripción

El método de Montecarlo es un método numérico que permite resolver dichos problemas matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias El método de Montecarlo permite simular un sistema a través de la construcción de modelos matemáticos que representen la realidad de la forma más aproximada. El nombre del método procede de la ciudad del Principado de Mónaco, que alberga un casino del mismo nombre, ya que uno de los mecanismos más sencillos para obtener una variable aleatoria es la ruleta.

Si se emplean para proceder a una toma de decisiones óptima, la utilización de modelos matemáticos permite, según (Rodríguez-Aragón, 2011):

- Introducir nuevas variables.
- Hacer variar sus valores.
- Analizar las consecuencias de estas modificaciones.

El método de verificación por Montecarlo consiste, dadas las distribuciones de probabilidad de las variables que forman parte de la ecuación de verificación, en la simulación de un elevado número de valores de cada variable, que se introducen en la ecuación de verificación para comprobar si se cumple o no la condición que establece. Dado el elevado número de valores que se puede obtener de cada variable, este método permite que se disponga de un espacio muestral de resultados estadísticamente consistente a partir del cual poder calcular la probabilidad de fallo o parada operativa. Se considera 1949 como la fecha de nacimiento del método de Montecarlo, año en el que apareció el artículo titulado *"The Monte Carlo Method"* . La creación de este método suele ligarse a los matemáticos norteamericanos John von Neumann (1903-1957) y Stanislaw Ulam (1909-1984), aunque también se relaciona con el físico Enrico Fermi (1901-1954).

Resulta curioso que la base teórica del método se conozca desde hace tanto tiempo. De hecho, algunos problemas de Estadística se resolvían empleando muestras aleatorias, es decir, aplicando el método Montecarlo. Sin embargo, hasta la aparición de las Máquinas Calculadoras Electrónicas (MCE), este método no se extendió, pues la simulación a mano de variables aleatorias constituía un proceso muy laborioso. Por tanto, Montecarlo se convirtió en un método numérico de gran universalidad gracias a las MCE. La creación del ENIAC *(Electronic Numerical Integrator And Computer)* tuvo lugar en la Segunda Guerra Mundial, y fue utilizado por el Laboratorio de Investigación Balística del Ejército de los Estados Unidos. Permitía realizar unas 5.000 sumas y 300 multiplicaciones por segundo. Esta nueva capacidad de computación sirvió de base para que se desarrollaran nuevas formas de obtener probabilidades.

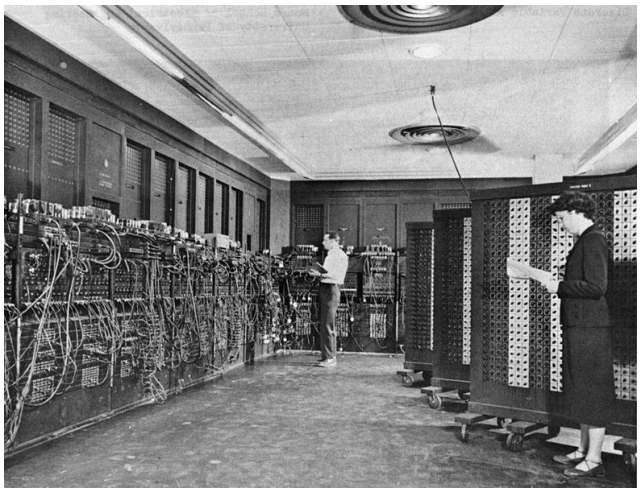


Figura 69. Fotografía del ENIAC en Philadelphia, Pennsylvania (1947-1955). Fuente: US Army Photo

8.3.1.2. Generación de números aleatorios

El método de Montecarlo es un método de integración numérica basado en la utilización de números aleatorios.

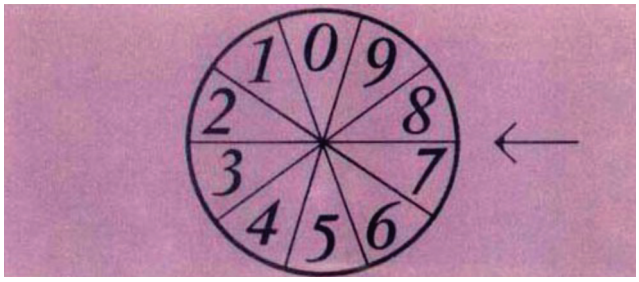


Figura 70. Representación de una ruleta con las 10 opciones que se pueden obtener al azar haciéndola girar (Sóbol, 1979)

Sin embargo, la aleatoriedad es sorprendentemente rara a nivel macroscópico en la naturaleza. A pesar de que los eventos en el transcurso de la vida cotidiana pueden parecer fortuitos y arbitrarios, podría decirse basándonos en la física clásica que ninguno de ellos es genuinamente aleatorio, ya que todos se podrían predecir disponiendo de la información y la capacidad de cálculo adecuada, siendo casi imposible lograr una verdadera aleatoriedad a no ser que se involucren procesos cuánticos donde la aleatoriedad es un proceso intrínseco de la misma.

Aun así, dada la dificultad para obtener una serie de números aleatorios de forma lo suficientemente rápida para afrontar el procedimiento de forma eficaz, a efectos prácticos se suele optar por emplear en el algoritmo una serie de números pseudo-aleatorios, los cuales no muestran ningún patrón o regularidad aparente desde el punto de vista estadístico, a pesar de haber sido generada la serie por un algoritmo completamente determinista.

Por convención, se define como aleatoria, y por tanto válida para el procedimiento de simulación de Montecarlo, cualquier sucesión de números tal que nadie que utilice recursos computacionales razonables pueda distinguir entre la serie en cuestión y una sucesión de números verdaderamente aleatorios de una forma mejor que tirando una moneda legal para decidir cuál es cual.

Si bien el uso de series pseudo-aleatorias introduce errores en los cálculos mediante simulación de

Montecarlo, la magnitud de los mismos dependen de la calidad de la misma serie de números ("Los números aleatorios no deberían ser generados por un método elegido aleatoriamente". –Donald E. Knuth). En la actualidad, los errores introducidos por los algoritmos matemáticos que generan las series de números pseudo-aleatorias suelen ser muy pequeños y, en caso de necesidad, pueden ser reducidos a costa del empleo de mayores recursos electrónicos o de tiempo en su caso.

8.3.1.3. Verificación por Montecarlo

La idea básica del método es simular valores de las variables que forman parte de la ecuación de verificación en lugar de experimentar u observar la realidad. La importancia del método de Montecarlo se basa en la existencia de problemas que tienen difícil solución por métodos exclusivamente analíticos o numéricos, pero que dependen de factores aleatorios o se pueden asociar a un modelo probabilístico artificial (resolución de integrales de muchas variables, minimización de funciones, etc.).

Mediante la técnica de Montecarlo se simula un número elevado de vidas útiles como secuencias de ciclos de solicitación y de calma tanto atmosféricos, sísmicos como astronómicos (que a su vez están formados por secuencias de estados), cuyos descriptores satisfacen los modelos de probabilidad conjuntos. Seguidamente se verifican los modos de fallo o parada operativa del tramo frente a cada una de las vidas útiles simuladas (Puertos del Estado, 2009).

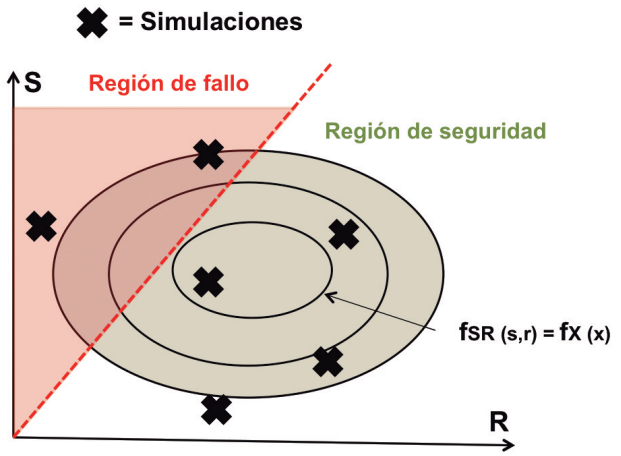


Figura 71. Representación de los valores aleatorios tomados en una simulación de Montecarlo. En algunos casos los valores pertenecen a la región de fallo, y en otros, a la región de seguridad. Elaboración propia a partir de (Campos & Castillo, 2012)

8.3.1.4. Requisitos para aplicar este método y limitaciones

Error: En estos métodos el error ~ 1/√N (donde N es el número de pruebas) supone que ganar una cifra decimal en la precisión implica aumentar N en 100 veces. Por ejemplo , indican que para alcanzar una probabilidad de fallo (dada una ecuación de verificación estructural) del orden de 10^{-3} son necesarias 10^5 a 10^6 simulaciones con análisis dinámico no lineal. El número de simulaciones se puede disminuir si se combinan con técnicas de reducción de varianza, tales como el Importance Sampling o Adaptive Sampling. Estos últimos toman como zona inicial de muestreo aquélla definida por una función aproximada de la forma $g(X) = 0$ en la región de fallo. El área que cumple $g(X)<0$ se va incrementando gradualmente mediante la modificación de los límites de muestreo hasta que la región de muestreo ha cubierto suficientemente la región de fallo. Las ventajas que aportan estos métodos son que resultan más eficientes que el método de Montecarlo, ya que se centra en tomar muestras en la región de fallo, mientras que la principal desventaja radica en la necesidad de determinar previamente la región de fallo o MPP.

8.3.1.5. Ventajas y desventajas de la simulación por Montecarlo

- Ventajas:
  - Es un método directo y flexible.
  - Existe un amplio abanico de programas y lenguajes destinados a simular.
  - Cuando el modelo matemático es demasiado complicado, la simulación ayuda a obtener una aproximación.
  - La simulación nos otorga la posibilidad de formular condiciones extremas con riesgos nulos.
  - La simulación no interfiere con el mundo real y fomenta, por tanto, la experimentación.
  - Permite estudiar la interacción entre las diferentes variables del problema.
  - Mediante la simulación podemos "influir en el tiempo" de los procesos.
  - La simulación posibilita resolver problemas que no tienen solución analítica.

- Desventajas:
  - Una simulación desarrollada adecuadamente puede resultar muy complicada por el gran número de variables que se deben manejar en ella.
  - La simulación no genera soluciones óptimas globales.
  - No proporciona la decisión que hay que tomar, sino que resuelve el problema mediante aproximación para unas condiciones iniciales.
  - Cada simulación es única, y en ella interviene el azar.

8.3.1.6. EJEMPLO: SIMULACIÓN DE VALORES DE VELOCIDAD DE VIENTO EN FUNCIÓN DE SU DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA

El viento es una variable aleatoria direccional. La dirección de procedencia del mismo se puede obtener a partir de la rosa de vientos de la zona en la que se emplaza la obra, que puede ser consultada en el Atlas de Viento de la ROM 0.4-95 (Puertos del Estado, 1995). En este ejemplo se muestra cómo generar valores aleatorios de la velocidad de viento en base a su función de distribución.

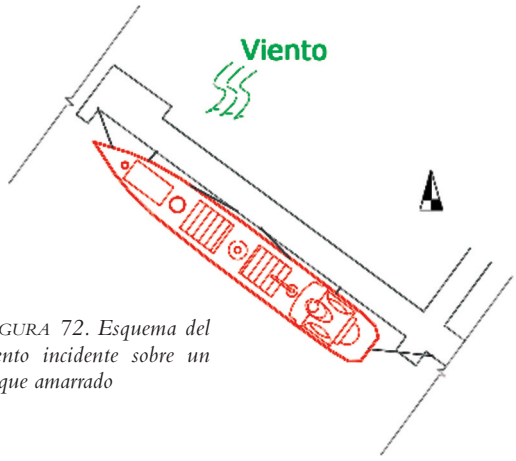


FIGURA 72. Esquema del viento incidente sobre un buque amarrado

En primer lugar, es necesario acudir a la fuente de información de velocidad de viento para el emplazamiento. En este caso, se ha elegido el puerto de Huelva. La información relativa a este lugar se encuentra en la Hoja IV del Atlas de Viento de (Puertos del Estado, 1995), tal y como puede verse en la Figura 73.

El procedimiento que aquí se describe permite, según los datos de direcciones proporcionados por la rosa de viento, simular una dirección de procedencia del viento. La suma de las frecuencias de cada sector y las calmas es de 100, expresadas éstas en tanto por ciento. Si se expresan en tanto por uno, cada frecuencia se encuentra en un intervalo comprendido entre el 0 y el 1. Así pues, generando un número aleatorio de 0 a 1 se obtendrá un valor que corresponda a una de las direcciones que contempla la rosa de viento. Cuanto más frecuente sea una dirección, mayor probabilidad habrá de obtener dicha dirección en la simulación de números aleatorios.

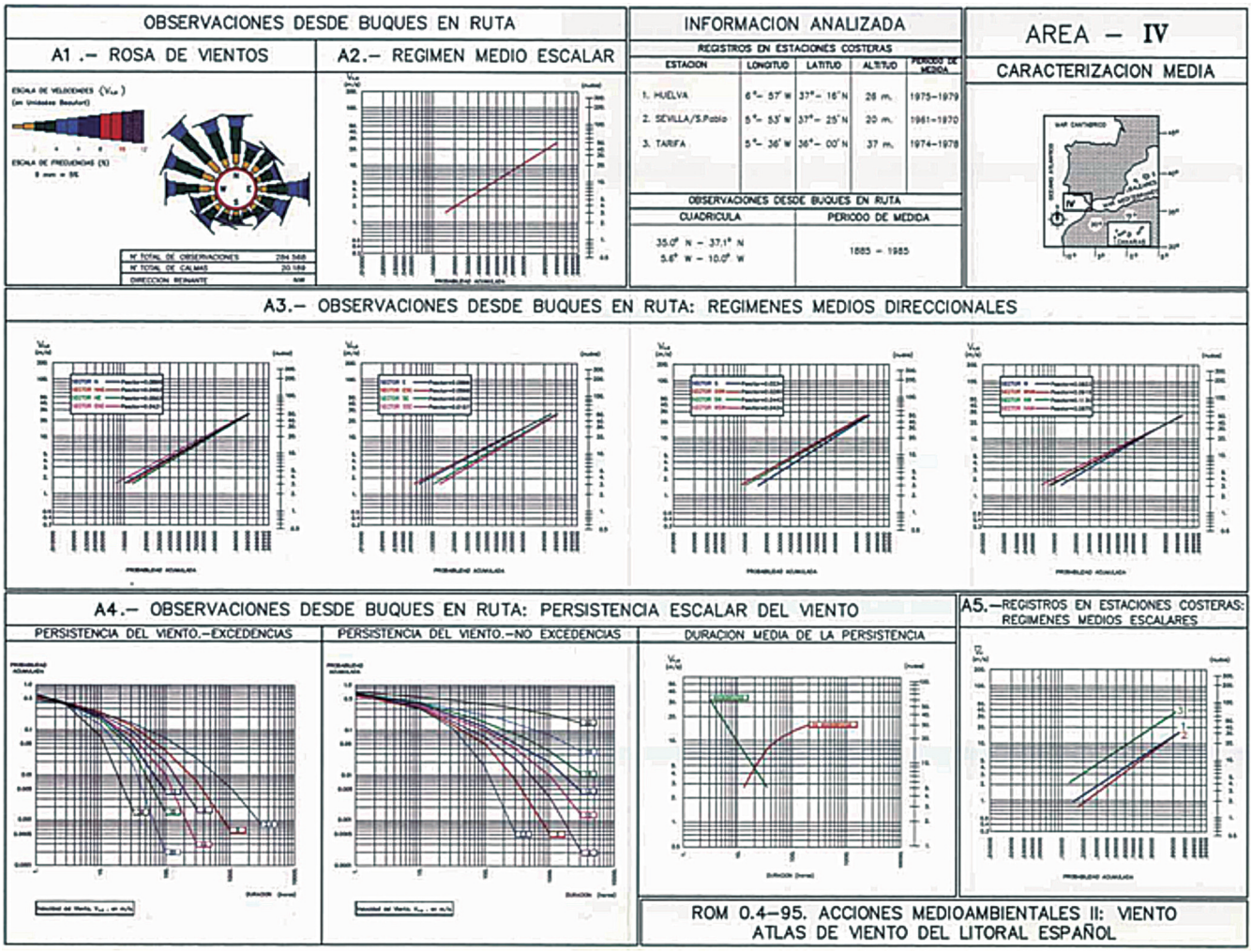


FIGURA 73. Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 04-95. Proporciona la rosa de vientos, los regímenes medios direccionales y los regímenes medios escalares

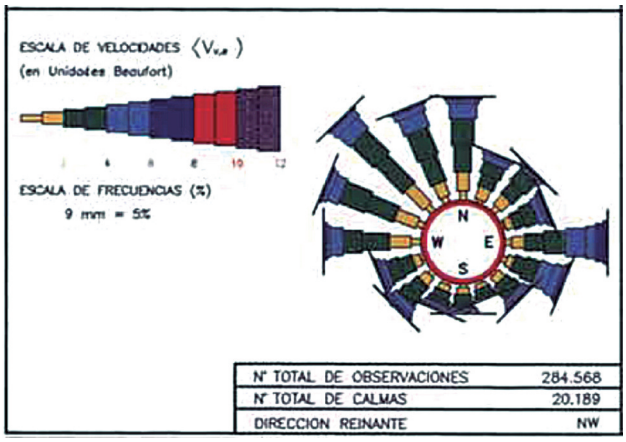


Figura 74. Rosa de los vientos extraída de la Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 04-95

Para la rosa de vientos mostrada en la Figura 74, las frecuencias de procedencia del viento son las mostradas en la Tabla 17, teniendo en cuenta las 16 direcciones de la rosa y las calmas.

N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
9.4	5	5	5	9.4	6.1	3.9	1.7
S	**SSW**	**SW**	**WSW**	**W**	**WNW**	**NW**	**NNW**
2.8	2.8	5	4.4	8.89	9.44	11.7	9.4
CALMAS							
0.07							

Tabla 17. Frecuencias relativas [%] de cada sector para la rosa de la Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 04-95

En sentido horario se recoge la frecuencia en tanto por ciento de procedencia del viento, empezando por el norte (como ejemplo, pues tanto el punto de inicio, como el orden pueden ser escogido al azar).

A partir de las frecuencias de procedencia ordenadas según el criterio anterior, se obtiene un vector que recoja las frecuencias acumuladas, tal y como se muestra en la Tabla 18, donde la frecuencia de cada sector sea la suma de las frecuencias de los anteriores y la suya propia.

La simulación genera un número aleatorio comprendido entre 0 y 1. Si fuera el 0,2, por ejemplo, se correspondería con una frecuencia del 20%. Si se observa el vector de frecuencias acumuladas, la dirección asociada sería el ENE porque el valor obtenido es igual o inferior a la probabilidad acumulada en el sector ENE y a su vez superior a la probabilidad acumulada del sector NE. Por tanto, el viento será de procedencia ENE.

Una vez determinada la dirección de procedencia del viento (en el ejemplo, el ENE), se acude a las funciones de distribución de la variable aleatoria

N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
9.4	14.4	19.4	24.4	33.8	39.9	43.8	45.5
S	**SSW**	**SW**	**WSW**	**W**	**WNW**	**NW**	**NNW**
48,3	51.1	56.1	60.5	69.39	78.83	90.53	99.93
CALMAS							
100							

Tabla 18. Frecuencias acumuladas (%) para la rosa de la Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 04-95

estudiada: el viento. Dicha variable se ajusta a una distribución Weibull Biparamétrica (ROM 0.4-95). En la Figura 75 se muestra la relación existente a través de esta fórmula entre el valor de la velocidad y la probabilidad acumulada, para cada dirección.

Cada una de estas rectas tendrá unos parámetros propios, que se definen en base a la gráfica para obtener una expresión analítica que relacione la probabilidad acumulada (F_V) y la velocidad de viento (v). Cuando se tienen definidas todas las rectas, se elige la correspondiente a la dirección que se ha elegido en el paso anterior.

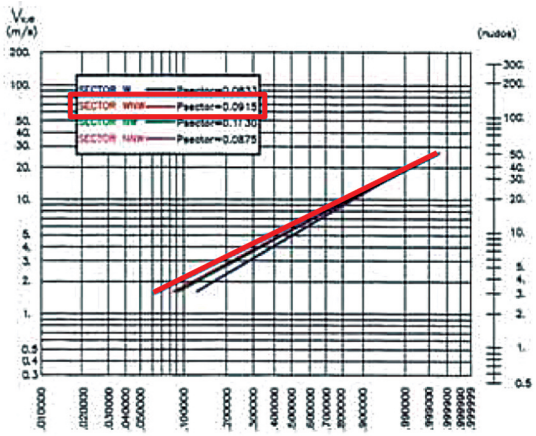


Figura 75. Régimen medio direccional obtenido de observaciones de buques en ruta. Hoja IV del Atlas de viento de la ROM 04-95

Entonces, para obtener un valor de velocidad de viento se genera nuevamente un número aleatorio entre 0 y 1, que será el valor de F_V en la función de distribución. De este modo, realizando la inversa de la función se obtiene un valor de velocidad de viento con el que proceder a la verificación del sistema.

Es necesario destacar la importancia de la elaboración de las funciones de distribución en función de las series temporales adquiridas por los sistemas de medida. Cuanto mejor sea la caracterización del medio físico, mayor aproximación a las condiciones reales se podrá alcanzar.

El valor con el que se procede a la verificación no es directamente el obtenido con el procedimiento

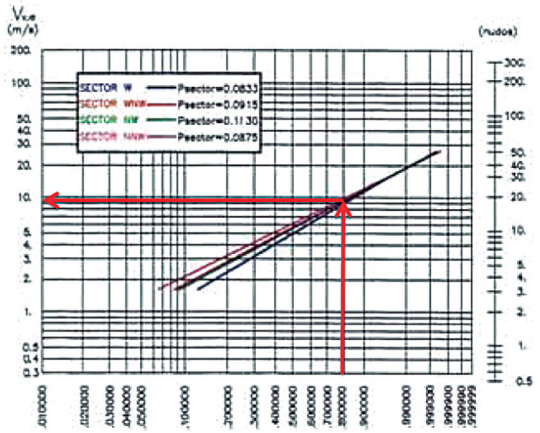


FIGURA 76. Régimen medio direccional obtenido de observaciones de buques en ruta. Hoja IV del Atlas de viento de la ROM 04-95

anterior. A este valor se le aplica un factor de pico o de ráfaga con el fin de reproducir el efecto de viento racheado.

La velocidad de ráfaga se define como sigue, según la ROM 0.4-95:

$$V_{ráfaga} = \bar{V}_{10min} + F_{pico}\,(t) \cdot \sigma_{viento}$$

Donde:

- $V_{ráfaga}$ es el valor de la velocidad del viento (en m/s) con el que se procede a la verificación.
- $\bar{V}_{10min}$ es la media de la velocidad del viento en un intervalo de 10 minutos (en m/s). La velocidad media en el intervalo de 10 minutos se corresponde con el valor obtenido de la función de distribución del viento.
- F_{pico} (t) es un factor dependiente del intervalo de tiempo t considerado, que en este caso es de 3 segundos (las ráfagas tienen una duración de 3 segundos). El valor recomendado por la ROM 04-95 para este intervalo temporal es de 3.43.
- σ_{viento} es la desviación típica asociada a la serie de velocidades de viento. Se calcula como sigue:

$$\sigma_{viento} = \frac{0{,}98}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}\bar{V}_{10min}$$

Y a su vez:

- Z_0 es la rugosidad superficial, en metros. Se ha tomado un valor de 0.3 (tabla 2.1.2.2.1. de la ROM 0.4-95) que se corresponde con la rugosidad superficial en el caso de oleaje muy fuerte y campo abierto, llano u ondulado, con obstáculos dispersos. Como el emplazamiento es el puerto de la ría de Huelva, se ha considerado que esta rugosidad es apropiada para las características del emplazamiento.

Ejemplo del procedimiento a seguir de forma esquemática:

1. Simulación de dirección: generación de un número comprendido entre 0 y 1. Por ejemplo, se obtiene el 0.5, por lo tanto, 50%.

2. Se acude al vector de frecuencias acumuladas de dirección con el valor "50": si el valor está comprendido entre dos frecuencias del vector, se toma el límite superior, en este caso, 51,1. La dirección correspondiente a esta frecuencia acumulada es la SSW:

N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
9.4	14.4	19.4	24.4	33.8	39.9	43.8	45.5
S	**SSW**	**SW**	**WSW**	**W**	**WNW**	**NW**	**NNW**
48,3	51.1	56.1	60.5	69.39	78.83	90.53	99.93
CALMAS							
100							

TABLA 19. Frecuencias acumuladas de la rosa de los vientos de la Hoja IV del Atlas de Viento de la ROM 0.4-95

3. Sabiendo que la dirección es SSW, se acude al régimen de viento direccional correspondiente al SSW (línea roja). El ajuste de velocidad de viento seleccionado es el del SSW.

4. Se genera nuevamente un número aleatorio comprendido entre 0 y 1, que representa la probabilidad acumulada de velocidad de viento en este caso. Supongamos que se simula el "0,8". En el papel probabilístico, se entra en abscisas con el valor "0,8" (probabilidad acumulada) y se obtiene el valor de 10 en m/s de velocidad de viento.

5. El valor obtenido es el valor de velocidad de viento promediada en 10 minutos (ROM 0.4-95). Para calcular la velocidad de ráfaga se debe calcular lo siguiente:

$$\sigma_{viento} = \frac{0{,}98}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \cdot \bar{V}_{10min} = \frac{0{,}98}{\ln\left(\frac{10}{0{,}2}\right)} \cdot 10 = 2{,}79$$

Siendo el valor de ráfaga:

6. Con este valor de ráfaga, y realizando las correspondientes transformaciones de unidades a nudos (requeridas por la bibliografía) se entra en las ecuaciones de cálculo de fuerzas sobre el buque, las cuales habrá que verificar.

Para saber más sobre el método de Montecarlo

- (Gentle, 2004): Encyclopedia of Statistical Sciences. John Wiley and Sons.
- (Kalos & Whitlock, 2008): Monte Carlo Methods. Wiley-VCH.
- (Kroese & Rubinstein, 2008): Simulation and the Monte Carlo Method. John Wiley and Sons.
- (Shreider, 1964): Method of Statistical Testing: Monte Carlo Methods.

8.3.2. Método *Latin Hypercube Sampling* (LHS)

8.3.2.1. Descripción

Se trata de un método que permite generar muestras de una distribución multidimensional. propusieron el uso del *Latin Hypercube Sampling* como una atractiva alternativa al muestreo aleatorio tradicional. Esta técnica fue mejorada por (Iman, Helton & Campbell, 1981), quienes afirmaban que su característica fundamental, en contraste con el muestreo aleatorio simple, era la posibilidad de estratificar las muestras en todas las dimensiones. El método de Hipercubo Latino (LHS) es similar al método de Montecarlo con la diferencia básica de que las clases son tratadas como estratos y los números pseudo aleatorios se distribuyen proporcionalmente a los elementos de cada muestra entre los estratos establecidos (Martins, Ferreira, Pardal & Morano, 2012).

El muestreo aleatorio no permite asegurar que se vayan a obtener muestras de un conjunto determinado del espacio muestral. En ocasiones se puede dar el caso de que un determinado conjunto de datos tenga baja probabilidad de ocurrencia pero grandes consecuencias en el caso de generarse, y con el método de muestreo aleatorio es poco probable que se tome una muestra de este conjunto.

El muestreo estratificado, conocido también como muestreo por importancia, proporciona una solución a esta limitación mediante el empleo de subconjuntos sobre los que se realiza el muestreo. El proceso consiste en dividir la muestra en subconjuntos excluyentes (esto significa que no hay solape entre los conjuntos) y muestrear una serie de elementos de cada subconjunto. La principal ventaja de este método es que obliga a considerar grupos de población a la vez que se mantiene el carácter probabilístico del proceso de muestreo. La mayor limitación del método es la necesidad de definir los conjuntos y calcular sus probabilidades. Este método es una solución de compromiso entre las ventajas que aportan los métodos de muestreos aleatorios y estratificados, y proporciona resultados más estables que los primeros.

El muestreo del Hipercubo Latino es una particularización del método de muestreo estratificado. Se trata de un método más sencillo de implementar que el original, dado que no es necesario definir las estratificaciones y sus probabilidades. En lugar de eso, divide el espacio muestral en clases equiprobables y toma una serie de muestras en cada intervalo. La cantidad de números aleatorios que se deben generar en la simulación se determinan de acuerdo con las recomendaciones formuladas por (Cochran, 1954) y (Flanagan & Norman, 2003). De este modo, la simulación se realiza para un tamaño de muestra determinado, las clases definidas y la cantidad de números pseudo-aleatorios a generar. Después, se realiza una verificación de la distribución de los números generados en relación con la distribución original mediante la prueba de adherencia Chi cuadrado, y por comparación de la máxima verosimilitud de la simulación en relación a la muestra. Si se aprueba la prueba de adherencia se valida la simulación (Martins, Ferreira, Pardal & Morano, 2012). La demostración matemática se puede consultar en (Helton & Davis, 2003).

Este método distribuye las muestras de tal forma que la densidad del muestreo está muy extendida

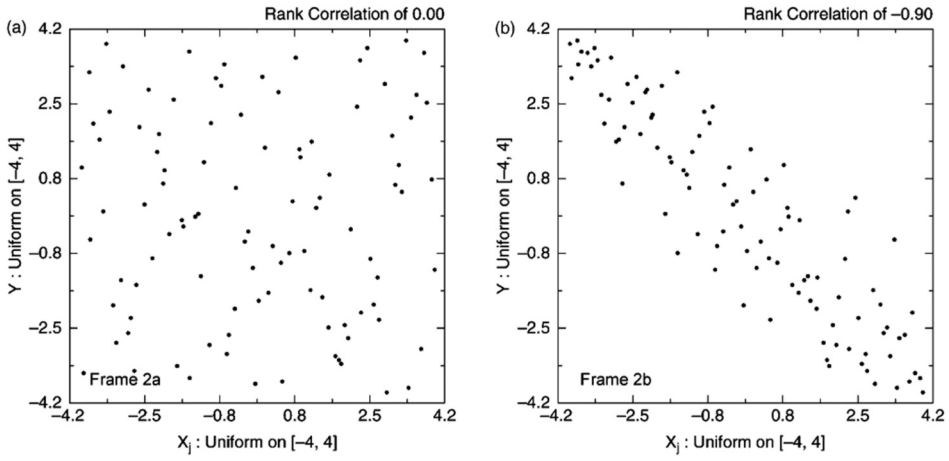


Figura 77. Representación en gráfico de dispersión de los resultados de generar 100 muestras mediante el método de Montecarlo (izquierda) y el método del Hipercubo Latino (Latin Hypercuble Sampling) (derecha) por (Helton & Davis, 2003)

por toda la función de distribución de cada variable de entrada. Permite obtener un mayor número de muestras que el método de Montecarlo para el mismo número de simulaciones.

8.3.2.2. Ventajas y desventajas de emplear el método LHS

- Ventajas
  - Se puede utilizar con cualquier modelo.
  - Las muestras se encuentran más repartidas a lo largo de la distribución que en el caso de Montecarlo.
  - Permite analizar varios estados límite.
- Desventajas
  - Es necesario generar un elevado número de muestras para alcanzar probabilidades de bajo orden.

Para saber más sobre el LHS

- (Tang, 1992): Orthogonal Array-Based Latin Hypercubes. Journal of the American Statistical Association 88 (424), 1.392–1.397.
- (Owen, A., 1992): Orthogonal arrays for computer experiments, integration and visualization. Statistica Sinica 2, 439–452.
- (Ye, 1998): Orthogonal column Latin hypercubes and their application in computer experiments. Journal of the American Statistical Association 93 (444), 1.430–1.439.

8.3.3. Pre-selección de casos a simular: técnicas de clasificación y selección

La minería de datos se presenta como una disciplina nueva, ligada a la Inteligencia Artificial y diferenciada de la Estadística (Aluja, 2001). La aplicación de técnicas pertenecientes a la disciplina de la Minería de Datos y de Algoritmos de Selección a las bases de datos de variables meteo-oceanográficas permite la extracción de la información básica de estos grandes volúmenes de datos de alta dimensionalidad. Con estas metodologías se pretende obtener una definición multidimensional del clima marítimo mediante una serie reducida de estados de mar representativa de todo el conjunto de datos disponible (Camus, 2009).

Las técnicas de clasificación y selección permiten caracterizar la base de datos de partida, obteniendo un grupo reducido de datos representativos, agrupados en función de las semejanzas y diferencias de cada dato. Representar los datos por una serie de subconjuntos (clusters) implica la perdida de detalles, pero consigue la simplificación de las operaciones a realizar con los mismos. Por un lado, las técnicas de clasificación dividen el conjunto de datos en subconjuntos siguiendo un criterio de similitud, mientras que las técnicas de selección identifican un conjunto de elementos de la base original representativos de la diversidad de los datos. El criterio de similitud o diferencia entre los elementos del conjunto de datos se suele determinar mediante la definición de una función distancia, adecuada a las características del tipo de problema al que nos enfrentemos, siendo las más habituales las distancias Euclidea, Manhattan o Mahalanobis. A continuación se citan algunas técnicas de clasificación y se proporciona una descripción somera de las mismas: K-Medias, SOM y VQC.

8.3.3.1. K-Medias (K-Means)

Es un tipo de técnica particional bastante conocido en el que los objetos se clasifican en uno de los "k" grupos (también denominados *clusters*), donde k se selecciona a priori. La pertenencia de cada dato a un grupo se determina a través de la obtención del centroide de cada grupo (que se puede asemejar a una versión multi-dimensional de la media) y asignando después cada dato u objeto al grupo con el centroide más próximo.

Se establece el número de grupos deseado, se inicializan los prototipos o centroides y el algoritmo itera los prototipos moviéndolos hasta minimizar la varianza total intra-grupos, que representa la suma de distancias entre el prototipo y los datos de entrada asociados a cada prototipo.

Abbas (2008) proporciona un pseudo-código del algoritmo de las k-medias con el que se explica claramente cómo funciona:

1. Seleccionar el número de grupos k.
2. Inicializar los vectores de los k grupos (por ejemplo, aleatoriamente).
3. Para cada vector muestra:
4. Calcular la distancia entre el nuevo vector y el resto de vectores.
5. Recalcular el vector más cercano con el nuevo vector, empleando una tasa de aprendizaje que decrece en el tiempo.

El algoritmo de las k-medias es popular debido a que:

- Su tiempo de computación es proporcional a O(nkl), donde n es el número de patrones, k el número de grupos y l el número de iteraciones que necesita el algoritmo para converger.

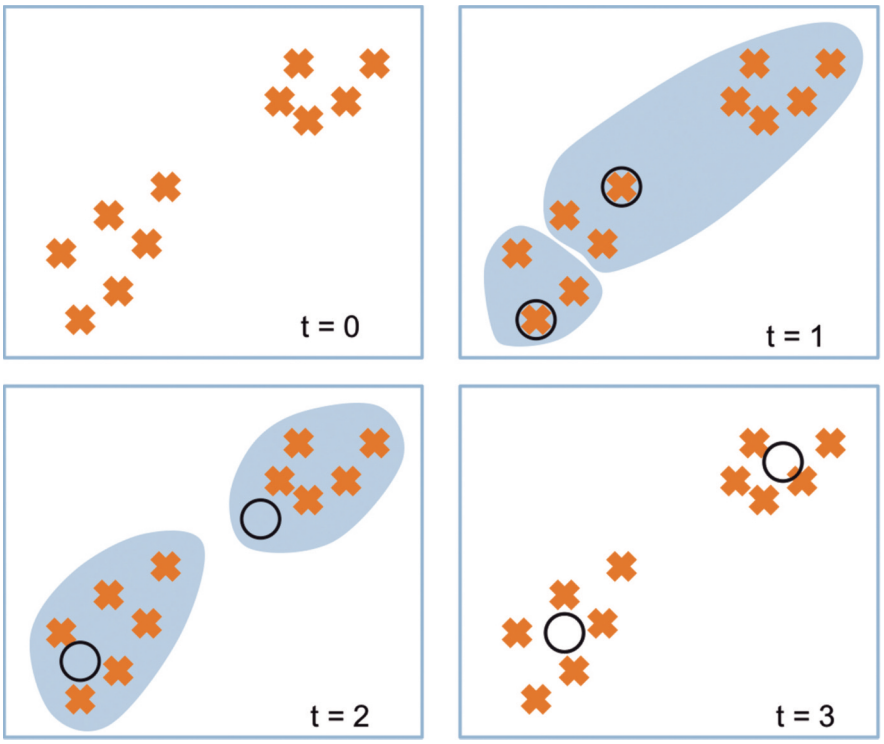


FIGURA 78. Ilustración de la posición de los centroides (círculos negros) al aplicar el algoritmo de las k-medias, con k = 2 (dos grupos), durante varias iteraciones para una muestra de vectores bidimensionales (cruces naranjas). Elaboración propia a partir de (Vélez, Moreno, Sánchez & Esteban, 2003)

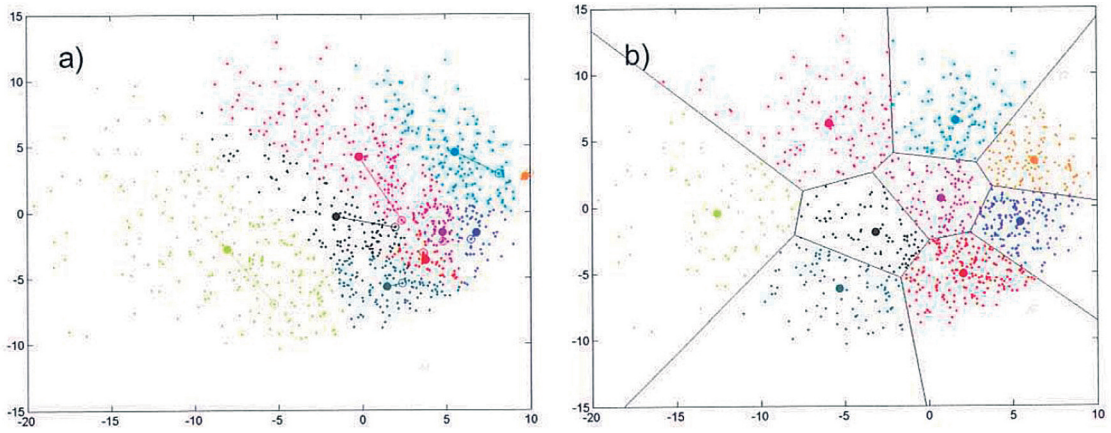


FIGURA 79. Aplicación del algoritmo de K-Medias. A) Inicialización de los centroides (puntos gruesos) y definición de los mismos después de la primera iteración (puntos finos); B) Centroides y subconjuntos finales (Camus, 2009)

- El requerimiento de espacio es proporcional a O(k+n), debido a que requiere espacio adicional para almacenar la matriz de datos.

- Es un algoritmo independiente del orden. Dado un grupo inicial de centroides, genera la misma partición de los datos independientemente del orden con que los patrones se presenten al algoritmo.

8.3.3.2. ALGORITMOS DE CLUSTERIZACIÓN JERÁRQUICA

Los algoritmos jerárquicos combinan o dividen los grupos ya existentes, creando una estructura jerárquica que refleja el orden en el que los grupos se han unido o dividido.

El pseudo-código del algoritmo de clusterización jerárquica se muestra a continuación:

1. Calcular la matriz de proximidad, que contiene la distancia de cada par de patrones. Trate cada patrón como un grupo.

2. Encuentre el par de grupos más similar empleando la matriz de proximidad. Una los dos grupos en un solo grupo. Actualice la matriz de proximidad para reflejar esta unificación.

3. Si todos los patrones están en un grupo, pare. En caso contrario, vuelva al punto 2.

Estos algoritmos presentan las siguientes ventajas:

- Son flexibles.
- En ellos es fácil manejar las condiciones de similitud o distancia.
- Son aplicables, por tanto, a cualquier tipo de atributo.
- Son versátiles.

8.3.3.3. REDES NEURONALES AUTO-ORGANIZATIVAS (SOM, SELF-ORGANIZING MAPS)

Las SOM emplean un mecanismo de competición y cooperación para conseguir aprendizaje no supervisado. Se trata de una técnica de clasificación que detecta automáticamente patrones o clases en el conjunto de datos y los proyecta en un espacio bidimensional con organización espacial que permite una visualización muy intuitiva de los resultados. Por ello, están indicadas para trabajar en espacios de alta dimensionalidad.

En las SOM clásicas, un conjunto de nodos es organizado según un patrón geométrico, que por lo general tiene forma de celosía. Cada nodo es asociado con un vector de pesos que tiene la misma dimensión que el espacio de entrada.

El objeto de las SOM es encontrar un buen mapeo de datos partiendo de un espacio de entrada de alta dimensionalidad para la representación bidimensional de los nodos.

El pseudo-código de los algoritmos SOM es el siguiente:

1. Elija la dimensión del mapa.
2. Para cada vector muestra:

   2.1.1. Calcule la distancia entre el nuevo vector y el resto de vectores de los grupos.

   2.1.2. Recalcule todos los vectores en función del nuevo vector empleando una distancia en el mapa y una tasa de aprendizaje que disminuya con el tiempo.

VENTAJAS QUE PRESENTA EL USO DE LOS MÉTODOS SOM

Las principales ventajas que aporta el uso de los métodos SOM son las siguientes:

- Mientras que las regiones de Voronoi de las unidades del mapa sean convexas, la combinación de varias unidades del mapa permite la construcción de grupos no-convexos.
- Se pueden emplear diferentes métodos de medida de distancia y de criterios de agrupamiento para formar los grupos más grandes.
- Estos algoritmos han sido empleados para el reconocimiento de voz y la cuantización de vectores.
- Los SOM generan una partición sub-óptima si los pesos iniciales no se eligen adecuadamente.

8.3.3.4. VECTORES DE CUANTIZACIÓN CON MECANISMO CONSCIENTE (VQC, VECTOR QUANTIZATION WITH CONSCIENCE MECHANISM)

Se trata de un algoritmo basado en los vectores de cuantización desarrollados por Kohonen, Kaski, & Lappalainen y el mecanismo consciente propuesto por DeSieno que clasifica los datos de entrada de una serie de centroides iso-probables. Los VQC pueden considerarse como una red neuronal auto-organizativa, pero sin función de vecindad.

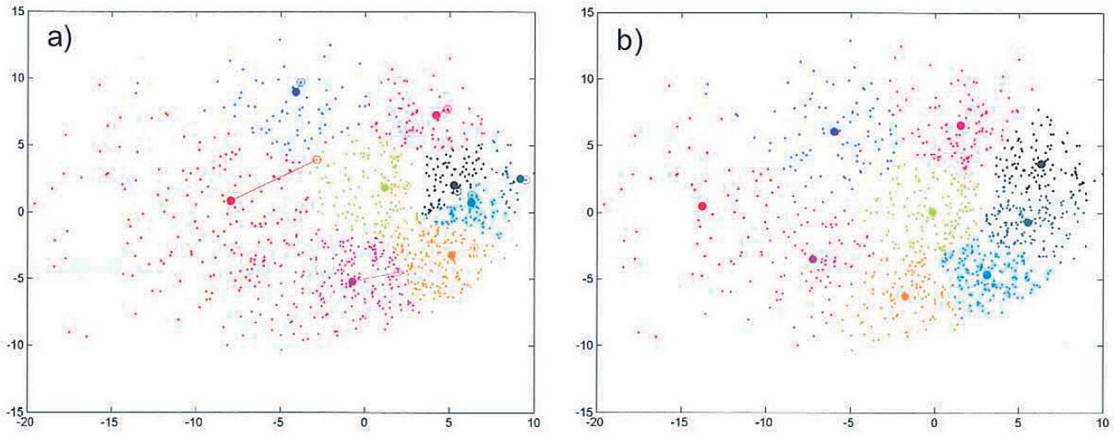


FIGURA 80. Aplicación de VQC: a) Inicialización de los centroides (puntos gruesos) y definición de los mismos después de la primera iteración (puntos finos); b) Centroides y subconjuntos finales (Camus, 2009)

Los algoritmos de selección más empleados son los basados en disimilitudes: algoritmo de máxima disimilitud (MaxDiss) y algoritmo de esfera de exclusión (SE).

8.3.3.5. Algoritmos de máxima disimilitud (MaxDiss)

Consisten en la selección de un subconjunto de datos representativo de la muestra de datos de partida. El algoritmo fue descrito por Kennard & Stone y admite varias versiones dependiendo del criterio de inicialización del subconjunto y de selección del resto de datos del mismo: MaxMin, MaxMax, MaxSum y MaxMean.

Para saber más sobre métodos de pre-selección de casos

- (Camus, 2009). Metodologías para la definición del clima marítimo en aguas profundas y someras. Aplicaciones a corto, medio y largo plazo. Universidad de Cantabria.
- (Cohen, 2003). Maximum Difference Scaling: Improved Measures of Importance and Preference for Segmentation. Sawtooth Software Conference Proceedings, Sequim, WA.
- (Louviere, 1991). Best-Worst Scaling: A Model for the Largest Difference Judgments. Working Paper, University of Alberta.
- (Kennard & Stone, 1969). Computer aided design of experiments. Technometrics 11, 137-148.

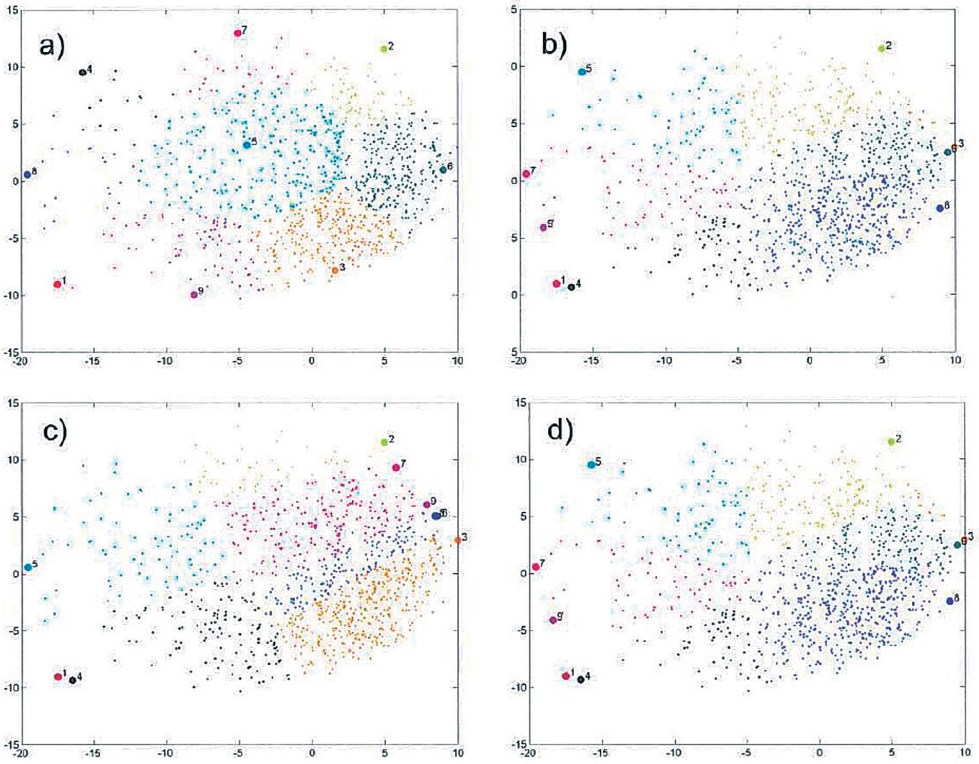


Figura 81. Selección mediante el algoritmo MaxDiss, a) versión MaxMin; b) versión MaxSum; c) versión MaxMax; d) versión MaxMean (Camus, 2009)

8.3.4. Regeneración de series temporales de parámetros de estado de variables oceanográficas a partir de modelos de probabilidad

La verificación de estructuras costeras y portuarias se puede llevar a cabo mediante métodos de Nivel III aplicando, por ejemplo, la técnica de Montecarlo (Puertos del Estado, 2001). En ingeniería costera, las principales variables intervinientes en el proceso susceptibles de ser simuladas son, principalmente, la altura de ola, dirección, periodo, velocidad de viento y su dirección y el nivel del mar. La simulación de series temporales de parámetros de estado multi-variados de oleaje y viento tiene una gran cantidad de aplicaciones en ingeniería oceanográfica. Entre ellas se incluyen: morfología costera, estudios de trasporte y explotación energética, diseño y gestión de puertos y vías navegables, diseño o construcción y operación de estructuras *offshore* (Guedes Soares & Cunha, 2000); (Stefanakos & Belibassakis, 2005).

En la actualidad, los métodos más empleados para la simulación de series temporales de altura de ola y otras variables oceanográficas se basan en modelos auto-regresivos y en la transformación de

variables, de modo que estén normalizadas y sean estacionarias. El comportamiento *a largo plazo* de las variables consideradas en un estado de mar debe cumplir tales características y, en consecuencia, deben estudiarse mediante el empleo de modelos multi-variados no estacionarios que representen la dependencia temporal de las variables. Por ello, Solari y Losada han desarrollado una metodología para la simulación de nuevas series temporales que definan el estado de mar y de viento en aguas profundas en función de modelos de probabilidad: distribuciones mixtas paramétricas y no estacionarias. Para ilustrar la metodología emplearon series temporales de 13 años de duración en las que se proporciona un dato cada 3 horas de *Hm*0, *Tp*, dir media, *Vv* y Dir *v*.

$$f(x) = \begin{cases} f_m(x)F_c(u_1) & x < u_1 \\ f_c(x) & u_1 \le x \le u_2 \\ f_M(x)(1-F_c(u_2)) & x > u2 \end{cases}$$

Ecuación 1. Representación de una distribución mixta, en la que f_c es la distribución Log-Normal (LN), f_m es la GPD de mínimos y f_M es la GPD de máximos. x es la variable analizada (H_{m0}, T_p, etc.), u_1 es el umbral inferior y u_2 es el umbral superior

Las distribuciones mixtas consisten en una distribución central truncada, representativa del régimen central o del grueso de los datos, y de dos distribuciones Pareto generalizadas (GPD) para los regímenes de máximos y mínimos, representativas de las colas superior e inferior respectivamente (Solari, 2011). En cuanto a la simulación de series temporales de altura de ola significante, actualmente existen dos líneas de trabajo: la primera se centra en la simulación de tormentas y la segunda simula series completas de variables.

El método más empleado para la simulación de tormentas parte de las distribuciones conjuntas o condicionadas de las variables aleatorias con que se caracterizan las tormentas, su intensidad y duración. Basándose en esas distribuciones, se simulan nuevas series temporales asumiendo una forma de tormenta estándar. En general, la ocurrencia de tormentas se modela con una distribución de Poisson, y su intensidad con una distribución generalizada de Pareto (GPD). Para este fin se pueden emplear funciones estacionarias, pero también no estacionarias (Luceño, Menéndez & Méndez, 2006); (Méndez, Menéndez, Luceño & Losada, 2006); (Méndez, Menéndez, Luceño, Medina & Graham, 2008); (Izaguirre, Méndez, Menéndez, Luceño & Losada, 2010).

La determinación precisa de la frecuencia con la que se presentan las variables oceanográficas y su incertidumbre asociada requiere que se disponga de modelos de probabilidad. Estos modelos deben cubrir, preferentemente, todo el rango de valores de las variables, así como modelar la distribución central y las colas. Este aspecto es particularmente importante cuando la respuesta del sistema no depende únicamente de las condiciones de tormenta (régimen de máximos), sino también de condiciones centrales o de calma, como en el caso de las playas (Solari & Losada, 2012).

(Solari & Losada, 2012) proponen un método de simulación para series no estacionarias uni-variadas con dependencia temporal que incluye el uso de 1) distribuciones mixtas paramétricas no estacionarias para modelar la distribución uni-variada de la variable y 2) las cópulas para modelar su dependencia temporal. Esto implica que en primer lugar se normalizan y se convierten las variables en estacionarias, que en este caso son *Hm*0, *Tp*, dir media, *Vv* y Dir *v*, mediante funciones de distribución marginales paramétricas y no estacionarias. Después se simulan nuevas series temporales de las variables ya normalizadas mediante el empleo de uno de los modelos VAR: VAR estándar, TVAR *(Self Exiting Threshold VAR)* y MSVAR *(Markov Switching VAR model).* Finalmente, las variables normalizadas se transforman en las originales a través de las distribuciones no estacionarias (Solari & van Gelder, 2012). Resumidamente, la metodología consiste en lo siguiente:

1. Se normalizan las variables de entrada mediante el empleo de funciones de distribución estándar y se obtienen las variables normalizadas. Sus parámetros se estiman mediante el método de máxima verosimilitud o se aproximan mediante series de Fourier. Se aplica el modelo c-GPD, que consiste en ajustar los datos de la zona central (los comprendidos entre el umbral superior y el inferior) mediante una función de distribución estándar (Normal, Log-Normal, Weibull, etc.) y dos GPD para las colas. En el caso de la variable altura de ola, se elige la log-normal para la zona central, por lo que el modelo se conoce como LN-GPD. Para velocidad de viento se toma una distribución Weibull y el modelo se denomina WB-GPD. El empleo de los modelos LN-GPD (Log-Normal y GPD) está justificado porque se demostró que proporcionan un mejor ajuste de la distribución marginal que el resto de modelos paramétricos. Aunque es especialmente válido para la distribución central, este modelo también se emplea sobre las colas .

2. Se aplican modelos auto-regresivos a las variables normalizadas para la simulación de series temporales de estas variables. Los modelos dan el valor de la observación actual como una función lineal de observaciones pasadas, más un ruido blanco. Se han considerado tres modelos:

   - El clásico Vector Autorregresivo (VAR) de orden finito p.
   - El TVAR(Kr, p) (Self Exciting Threshold Vector Autorregresive model de Kr regímenes y orden p).
   - MSVAR(Kr, p) (Markov Switching Vector Autorregresive model de Kr regímenes y orden p). En este modelo se asume la existencia de

una variable no observada que determina el régimen en cada paso de tiempo, y que cumple como un proceso de Markov discreto.

3. Se transforman las series temporales normalizadas en las variables originales a través de las distribuciones marginales.

4. Se comparan las series simuladas con las originales en términos de sus distribuciones marginales (uni – bi variadas), así como su variabilidad interanual, sus regímenes de persistencia y su auto correlación, y correlaciones cruzadas.

Es importante que las series simuladas reproduzcan no solo las distribuciones marginales bi-variadas de los datos medidos, sino también sus distribuciones marginales multi-variadas, ya que éstas contienen información sobre la ocurrencia conjunta de los valores de las variables. Entre las distribuciones multi-variadas, las bi-variadas son las más sencillas de evaluar gráficamente y son las más familiares para el ingeniero marítimo.

Es necesario destacar que los autores concluyeron que los modelos VAR recogen las características principales de las series originales pero que no reproducen correctamente algunos regímenes de persistencias, así como ciertos aspectos de las distribuciones bi-variadas. Además, las series temporales reproducen correctamente la función de densidad de probabilidad (PDF) media anual de las series analizadas.

El método presentado muestra tres limitaciones: a) no tiene en cuenta las variaciones interanuales y las tendencias en las series, b) es incapaz de producir series completamente no estacionarias, y c) los modelos no pueden reproducir los regímenes de persistencia observados para elevados umbrales de las variables.

8.3.5. Redes Neuronales

8.3.5.1. Antecedentes

Diseñar y construir máquinas capaces de realizar procesos con cierta inteligencia ha sido uno de los principales objetivos y preocupaciones de los científicos a lo largo de la historia. Sin embargo, a pesar de disponer de herramientas y lenguajes de programación diseñados para el desarrollo de máquinas inteligentes, existe un problema de fondo que limita los resultados: estas máquinas se implementan sobre ordenadores basados en la filosofía de Von Neumann y se apoyan en una descripción secuencial del proceso de tratamiento de la información.

Las primeras teorías sobre el cerebro y el pensamiento surgieron de filósofos de la Grecia Antigua como Platón y Aristóteles, cuyas ideas fueron después refrendadas y matizadas por Descartes y algunos filósofos empiristas.

Alan Turing, en 1936, fue el primero en estudiar el cerebro como mecanismo para entender el mundo de la computación, pero quienes primero concibieron los fundamentos de la computación neuronal fueron los neurólogos Warren McCulloch y Walter Pitts . Donald Hebb desarrolló sus ideas sobre el aprendizaje neuronal, lo que quedó reflejado en la "Regla de Hebb", de 1949. Sin embargo, habría que esperar hasta 1958 para encontrar la primera red neuronal: era el llamado "Perceptrón", creado por Frank Rosenblatt. En 1960, Widrow y Hoff desarrollaron el "ADALINE", que fue la primera aplicación industrial real, y Stephen Grossberg realizó "Avalancha" en 1967.

En los años siguientes se redujo la intensidad de la investigación en este campo debido a la falta de modelos de aprendizaje y las limitaciones del "Perceptrón". Sin embargo, en los años 80 se retomó el interés por las RN gracias al desarrollo de la red de Hopfield, y en especial, al algoritmo de aprendizaje de retropropagación ideado por Rumelhart y McLellan en 1986, que fue aplicado en el desarrollo de los perceptrones multicapa.

James Anderson desarrolló el Asociador Lineal también en esta década, y en Japón, Kunihiko Fukushimika y Teuvo Kohonen centraron su estudio en las redes neuronales para el reconocimiento de patrones.

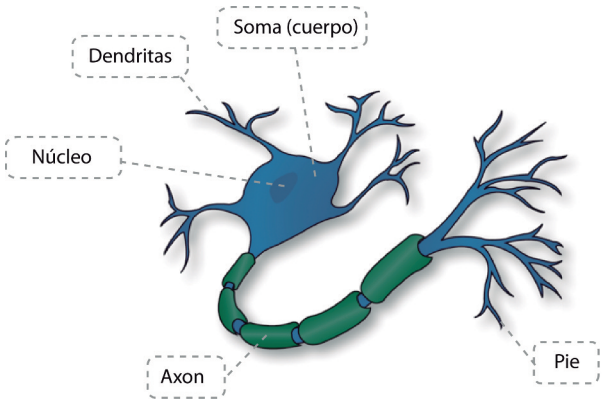


Figura 82. Esquema y partes de una neurona

A partir de 1985 comenzaron a consolidarse importantes congresos como el *Neuronal Networks for Computing* o la *Neural Information Processing Systems*. Actualmente son numerosos los trabajos que se realizan y publican en revistas como *Neural Networks* o *Transactions on Neural Networks.* El Departamento de Defensa de los Estados Unidos o la Sociedad Europea de Redes Neuronales demuestran hasta qué punto se vive hoy una resurrección de la investigación sobre redes neuronales.

8.3.5.2. DEFINICIÓN DE RED NEURONAL ARTIFICIAL

Una red neuronal es una simulación computacional del comportamiento del cerebro humano mediante la réplica en pequeña escala de los patrones que éste elabora para la formación de resultados a partir de los sucesos percibidos. Con la construcción de una red neuronal se trata de analizar y reproducir el mecanismo de aprendizaje de sucesos que poseen los animales más evolucionados.

La red simula grupos de neuronas o "capas" que están relacionadas unas con otras de forma similar a lo que sucede en el cerebro. Los datos se introducen en la primera capa, llamada "capa de entradas". Cada capa transfiere la información a sus vecinas en base al valor del peso o ponderación que tienen asignadas. Estos pesos se van modificando a medida que la red es entrenada, y es lo que se conoce como aprendizaje.

Cuando los datos llegan a la última de las capas, llamada "capa de salida", el valor resultante es tomado como el resultado de la red.

Las redes neuronales artificiales son sistemas de aprendizaje basados en ejemplos. Por tanto, su capacidad para resolver problemas estará ligada al tipo de ejemplos de que dispone el proceso de aprendizaje. Los ejemplos o patrones que se introducen a la red deben cumplir una serie de características, entre las que se encuentran:

- Debe haber un número suficiente de ejemplos, de tal forma que la red sea capaz de modificar sus pesos eficazmente, o lo que es lo mismo, aprender adecuadamente.
- El conjunto de aprendizaje debe de ser diverso. Todos los patrones disponibles deben estar suficientemente representados, para que la red no se especialice en aquel que tenga mayor número de datos.

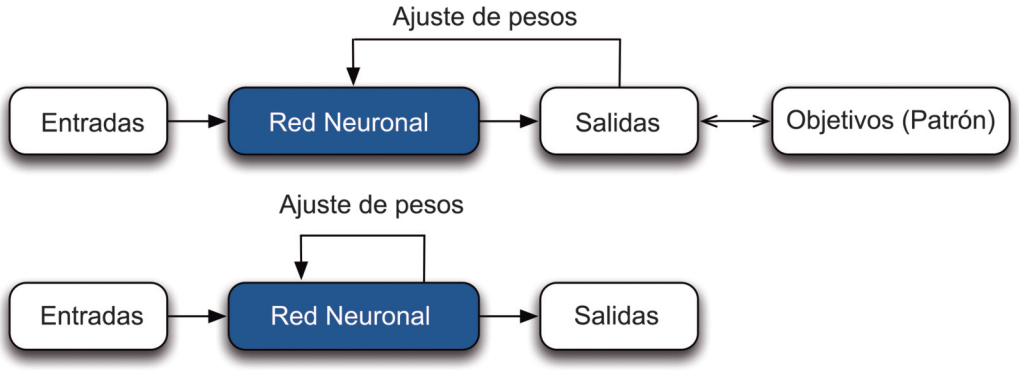


FIGURA 83. Esquemas de entrenamiento de una red neuronal: supervisado (superior) y no supervisado (inferior)

De todos los datos o patrones de que se dispone para entrenar la red neuronal se deben dividir en tres:

- El grupo de entrenamiento, que por lo general es el 70% de los datos.
- El grupo de validación, que por lo general es el 15% de los datos.
- El grupo de test, que suele ser el 15% de los datos.

Estos tres conjuntos de datos deben ser independientes, es decir, no se deben utilizar los mismos datos para entrenar la red, para validarla ni para testarla.

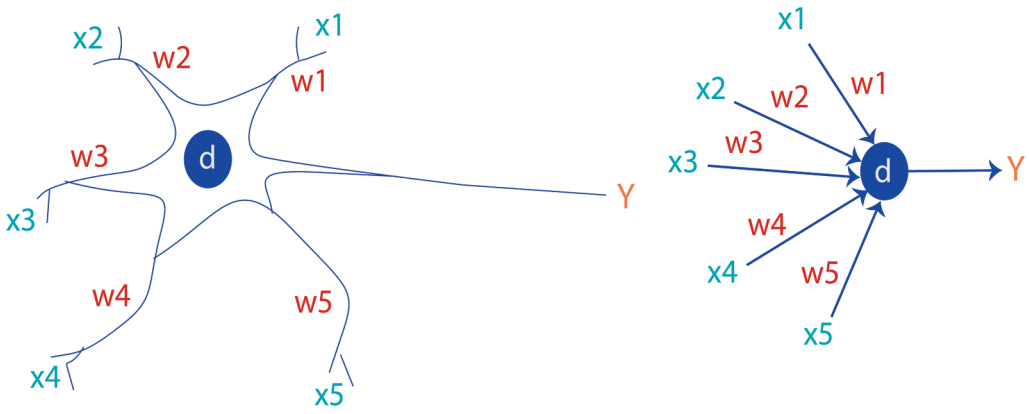


FIGURA 84. Equivalencia entre los componentes de una neurona biológica (izquierda) y una neurona artificial, en las que se pueden distinguir las dendritas o entradas {x1,x2,…,x5}, los pesos {w1,w2,…,w5}, la unidad de procesamiento {Δ} y la salida {Y}

8.3.5.3. Componentes de una red neuronal

Los principales componentes o estados de la red neuronal son:

Unidad de proceso: La neurona Artificial. Existen tres tipos de unidades en cualquier sistema:

- Entradas: reciben señales desde el entorno.
- Salidas: envían la señal fuera de la red.
- Ocultas: sus entradas y salidas se encuentran dentro del sistema.

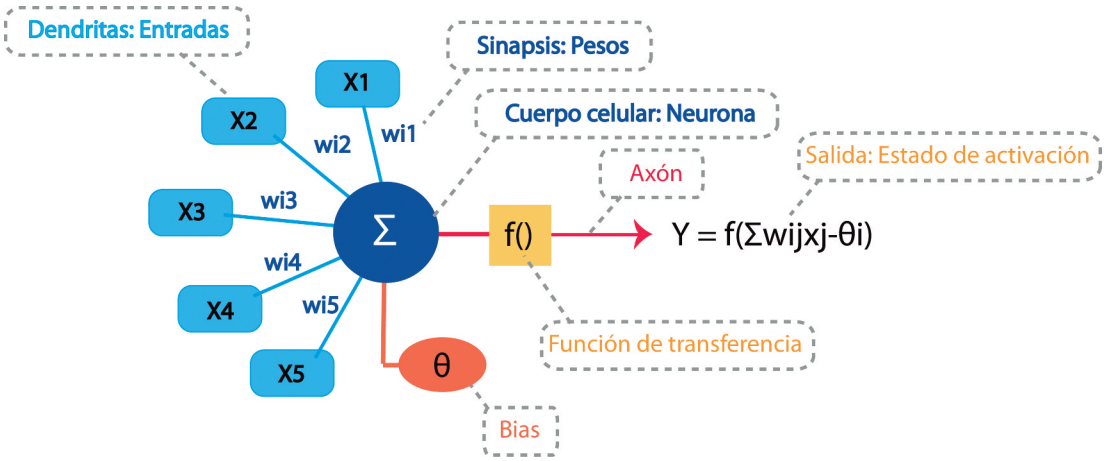


Figura 85. Parametrización de una neurona artificial estándar y sus similitudes con los componentes neuronales biológicos

Estado de Activación: Los estados del sistema en un tiempo t se representan por un vector de activación A(t). Los valores de activación pueden ser continuos o discretos, y a su vez, limitados o ilimitados:

- Continuos: Función sigmoidal [–1,1].
- Discretos: [0 o inactivo, 1 o activo].

Función de Salida: Asociada a cada unidad hay una función de salida que transforma el estado actual de activación en una señal de salida.

Conexiones entre neuronas: Las conexiones que unen a las neuronas que forman una RN tienen asociado un peso, que es el que hace que la red adquiera conocimiento. Se considera que el efecto de cada señal es aditivo, de tal forma que la entrada neta que recibe una neurona es la suma del producto de cada señal individual por el valor de la sinapsis que conecta ambas neuronas. Esto es lo que se conoce como red de propagación.

Se utiliza una matriz *W* con todos los pesos:

- Si $w_{ji} > 0$: la relación entre las neuronas es excitadora, es decir, siempre que la neurona i esté activada, la neurona *j* recibirá una señal que tenderá a activarla.
- Si $w_{ji} < 0$, la sinapsis será inhibidora. En este caso si i está activada, enviará una señal que desactivará *j*.
- Si $w_{ji} = 0$ se supone que no hay conexión entre ambas.

Función o Regla de Activación: Se requiere una regla que combine las entradas con el estado actual de la neurona para producir un nuevo estado de activación. Esta función F produce un nuevo estado de activación en una neurona creado a partir del estado que existía y la combinación de las entradas con los pesos de las conexiones. Las funciones de activación más habituales se muestran en la Tabla 20.

Regla de Aprendizaje: El aprendizaje puede ser comprendido como la modificación de comportamiento inducido por la interacción con el entorno que conduce al establecimiento de nuevos modelos de respuesta para los estímulos externos. En el cerebro humano, el conocimiento se encuentra en la sinapsis. En el caso de las RN, el conocimiento se encuentra en los pesos de las conexiones entre neuronas. Todo proceso de aprendizaje implica cierto número de cambios en estas conexiones. En realidad puede decirse que se aprende modificando los valores de los pesos de la red.

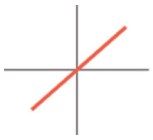
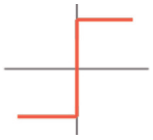
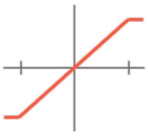
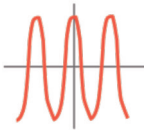
	Función	Rango	Función gráfica
Identidad	$y = x$	$[-\infty,+\infty]$	
Escalón	$y = signo(x)$ $y=H(x)$	$\{-1,+1\}$ $\{0,+1\}$	
Lineal por tramos	$y = \begin{cases} -1 & si \quad x < -l \\ x & si \quad +l \le x \le -l \\ +1 & si \quad x > +l \end{cases}$ $[-1,+1]$	$[-1,+1]$	
Sogmoidea	$y = \frac{1}{1+e^{-x}}$ $[0,+1]$ $y = tgh(x)$ $[-1,+1]$	$[0,+1]$ $[-1,+1]$	
Gaussiana	$y = A \cdot e^{-Bx^2}$	$[0, +1]$	
Sinusoidal	$y = A \cdot sen(\omega x+\varphi)$	$[-1, +1]$	

TABLA 20. Funciones de activación habituales (Martin & Sanz, 2006)

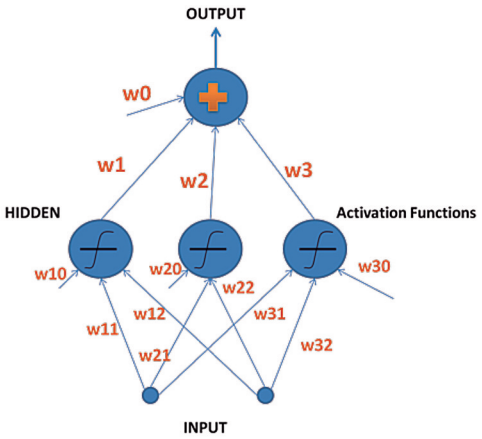


FIGURA 86. Perceptrón multicapa completamente conectado. La capa inferior son las entradas de la red, la intermedia las capas ocultas y la superior la capa de salidas

8.3.5.4. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES Y TIPOS DE REDES NEURONALES

La arquitectura de las redes neuronales consiste en la organización y disposición de las neuronas en capas más o menos alejadas de la entrada y salida de la red. En este sentido, los parámetros fundamentales de la red son: el número de capas, el número de neuronas por capa, el grado de conectividad y el tipo de conexiones entre neuronas.

Existen cuatro aspectos que caracterizan una red neuronal:

- Su topología.
- El mecanismo de aprendizaje.
- El tipo de asociación realizada entre la información de entrada y salida.
- La forma de representación de estas informaciones.

Los tipos de redes neuronales disponibles se describen a continuación:

- **Redes Monocapa**: Se establecen conexiones laterales, cruzadas o auto-recurrentes entre las neuronas que pertenecen a la única capa que constituye la red. Se utilizan en tareas relacionadas con lo que se conoce como auto-asociación (por ejemplo, para generar información de entrada que se presenta a la red incompleta o distorsionada).

- **Redes Multicapa**: Son aquéllas que disponen de conjuntos de neuronas agrupadas en varios niveles o capas. Una forma de distinguir la capa a la que pertenece la neurona consiste en fijarse en el origen de las señales que recibe a la entrada y en el destino de la señal de salida. Según el tipo de conexión, como se vio previamente, se distinguen las redes *feedforward,* y las redes *feedforward/feedback.*

El aprendizaje es el proceso por el cual una red neuronal modifica sus pesos en respuesta a una información de entrada. Los cambios que se producen durante el proceso de aprendizaje se reducen a la destrucción, modificación y creación de conexiones entre las neuronas. La creación de una nueva conexión implica que el peso de la misma pasa a tener un valor distinto de cero y una conexión se destruye cuando su peso pasa a ser cero. Se puede afirmar que el proceso de aprendizaje ha finalizado (la red ha aprendido) cuando los valores de los pesos permanecen estables ($dwij / dt = 0$).

Los mecanismos de asociación dan lugar a dos tipos de redes neuronales: las redes heteroasociativas y las autoasociativas.

- Una **red heteroasociativa** podría considerarse aquélla que computa cierta función, que en la mayoría de los casos no podrá expresarse analíticamente, entre un conjunto de entradas y un conjunto de salidas (correspondiendo a cada posible entrada una determinada salida). Existen redes heteroasociativas con conexiones *feedforward, feedforward/feedback* y redes con conexiones laterales. También existen redes heteroasociativas multidimensionales cuyo aprendizaje puede ser supervisado o no supervisado.

- Por otra parte, una **red autoasociativa** es una red cuya principal misión es reconstruir una determinada información de entrada que se presenta incompleta o distorsionada (a la que le asocia el dato almacenado más parecido). Pueden implementarse con una sola capa, existir conexiones laterales o auto-recurrentes, y habitualmente son de aprendizaje no supervisado.

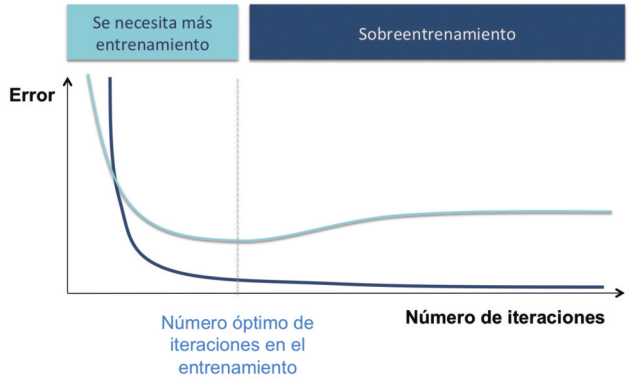


FIGURA 87. Representación del error registrado a medida que avanza el proceso de aprendizaje. La línea vertical marca el número óptimo de iteraciones, en el que el error es mínimo tanto en el entrenamiento como en la validación de la red

8.3.5.5. PROGRAMACIÓN DE LAS REDES NEURONALES

1. **Simulación de la red sobre un ordenador convencional mediante un software específico**. Es un procedimiento rápido, económico e institucionalizable que intenta simular redes con un alto grado de paralelismo con máquinas que ejecutan secuencialmente las operaciones. Esta es su mayor desventaja, pues en realidad, los valores intrínsecos de las redes neuronales no pueden obtenerse de esta forma.

2. Realización de redes neuronales a través de arquitecturas orientadas a la ejecución de procesos con un alto grado de paralelismo, tales como redes de transputers, arquitecturas sistólicas, etc. Este método es una optimización del anterior, ya que el acelera el proceso, permitiendo una respuesta en tiempo real. Sin embargo, el comportamiento de la red sigue estando simulado por una estructura ajena a la estructura intrínseca de una red neuronal.

3. **Implementación por uno o varios circuitos integrados específicos**. Son los llamados chips neuronales. Las neuronas y las conexiones se emulan con dispositivos específicos de forma que la estructura del circuito integrado refleje la arquitectura de la red.

La comercialización de productos software es la forma más extendida para simular redes neuronales, debido a las ventajas citadas anteriormente. La diferencia entre los distintos productos software radica en aspectos tales como el tipo y el número de arquitecturas de red que soporta, velocidad de procesamiento, interfaz gráfica, exportación de código C para el desarrollo automático de aplicaciones, etc.

Algunos de los productos en código abierto que encontramos son: Pythia, OpenAI o Neural Network Toolbox.

8.3.5.6. POTENCIAL DE LAS REDES NEURONALES

Debido a su constitución y a sus fundamentos, las RNA presentan un gran número de características semejantes a las del cerebro. Por ejemplo, son capaces de aprender de la experiencia, de abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante, etc. Esto hace que ofrezcan numerosas ventajas y que este tipo de tecnología se esté aplicando ya en múltiples áreas. Entre las ventajas de las RNA, destacan:

- No necesitan un algoritmo para resolver un problema, ya que ellas pueden generar su propia distribución de los pesos de los enlaces mediante el aprendizaje.

- En algunos casos, tras haber completado el periodo inicial de entrenamiento, continúan aprendiendo a lo largo de su vida.

- Aprendizaje Adaptativo: tienen la capacidad de aprender a realizar tareas basadas en un entrenamiento o una experiencia inicial.

- Auto-organización: usan su capacidad de aprendizaje adaptativo para organizar la información que reciben durante el aprendizaje y/o la operación. Esta auto-organización proporciona la capacidad de responder apropiadamente cuando se les presentan datos o situaciones a los que no habían sido expuestas anteriormente.

- Pueden aprender a reconocer patrones con ruido, distorsionados, o incompletos.

- Pueden seguir realizando su función (con cierta degradación) aunque se destruya parte de la red.

- Operación en Tiempo Real: Los computadores neuronales pueden ser realizados en paralelo, y se diseñan y fabrican máquinas con hardware especial para obtener esta capacidad.

- Fácil inserción dentro de la tecnología existente. Debido a que una red puede ser rápidamente entrenada, comprobada, verificada y trasladada a una implementación hardware de bajo coste, es fácil insertar RNA para aplicaciones específicas dentro de sistemas existentes (chips, por ejemplo). De esta manera, las redes neuronales se pueden utilizar para mejorar sistemas de forma incremental, y cada paso puede ser evaluado antes de acometer un desarrollo más amplio.

Para saber más sobre redes neuronales artificiales

- (Golden, 1996). Mathematical Methods for Neural Network Analysis and Design. MIT Press.

- (Hassound, 1995). Fundamentals of Artificial Neural Networks. MIT Press.

- (Hayking, 2008). Neural Networks and Learning Machines. Prentice Hall.

- (Hilera & Martínez, 2005). Redes neuronales artificiales: fundamentos, modelos y aplicaciones.

- (Huss & Horne, 1993). Progress in Supervised Neural Networks. What's new since Lippmann?. IEEE S.P. Magazine, 8-39.

- (Kung, 1993). Digital Neural Networks. Prentice-Hall Inc.

- (Lippmann, 1987). An introduction to computing with neural nets. IEEE ASSP Magazine, 4-22.

- (Matlab, 2011). Toolbox neural net. Matlab, v.7.01.

- (Vapnik, 1998). Statistical Learning Theory. John Wiley & Sons.

- (Zurada, 1992). Introduction to Artificial Neural Systems. West Publishing Company.

8.3.6. Redes Bayesianas

8.3.6.1. Descripción

Las Redes Bayesianas (RB) son estructuras gráficas que se utilizan para representar las relaciones probabilísticas entre un gran número de variables y para realizar la inferencia estadística con dichas variables. Se emplean en el razonamiento probabilístico, ya que los nodos representan variables aleatorias y los arcos representan relaciones de dependencia directa entre las variables.

De forma simplificada se puede decir que se trata de un método para razonar bajo condiciones de incertidumbre, donde el razonamiento se lleva a cabo en función de las probabilidades.

Con este modelo se puede hacer inferencia bayesiana, es decir, estimar a posteriori la probabilidad de las variables no conocidas en función de las variables conocidas. Las aplicaciones prácticas más comunes son clasificación, predicción, diagnóstico, etc.

- Una red bayesiana se define por:

- Un conjunto de variables y un conjunto de arcos direccionados entre las variables.

- Cada variable tiene un conjunto finito de estados mutuamente excluyentes.

- Las variables y los arcos direccionados forman un grafo no cíclico. Esto significa que no pueden aparecer bucles cerrados dentro de la representación de los grafos.

- Todas las variables A cuyos padres son B1, B2,..., Bn tienen una tabla de probabilidad asociada P(A| B1, B2,..., Bn).

Ejemplo de arco cíclico

A continuación se muestra un grafo cíclico, en el que los nodos B-C-D-E están conectados formando un bucle. En este caso, este grafo no podría ser representativo de una red bayesiana.

La variable a la que apunta el arco es dependiente de la que está en el origen de éste. La topología o estructura de la red nos da información sobre las dependencias probabilísticas entre las variables. En una RB, todas las relaciones de independencia condicional representadas en el grafo corresponden a relaciones de independencia en la distribución de

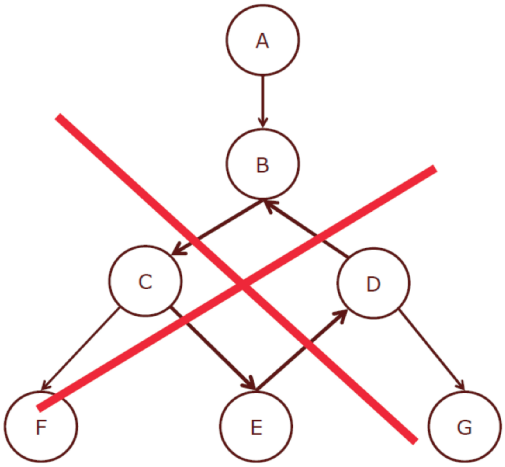


FIGURA 88. Representación de un grafo con un bucle en su interior, formado por la secuencia B-C-E-D-B

probabilidad. Dichas independencias simplifican la representación del conocimiento, ya que se requiere considerar un menor número de parámetros, así como el razonamiento, puesto que la propagación de probabilidades se hace de forma más directa.

Lo anterior se representa con la siguiente notación para el caso de *X* independiente de *Y*, dado *Z*:

- Independencia en la distribución: P(X|Y;Z) = P(X|Z).
- Independencia en el grafo: *I* < X | Z | Y >

La independencia condicional se verifica mediante el criterio de separación. Previamente a su definición, conviene distinguir tres tipos de nodo en función de las direcciones de los arcos que inciden en él:

- Nodos en secuencia: X → Y → Z
- Nodos divergentes: X ← Y → Z
- Nodos convergentes: X → Y ← Z

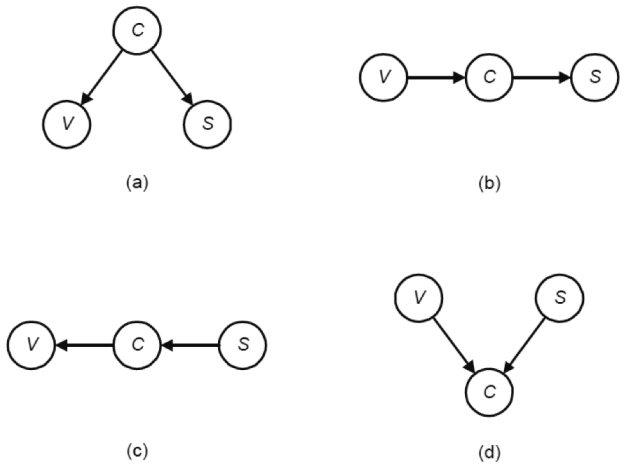


FIGURA 89. Tipos de nodo: a) divergente; b) en secuencia, donde V condiciona a S; c) en secuencia, donde S condiciona a V; d) convergente. Fuente: (Neapolitan R., 2000)

El conjunto de variables *A* es independiente del conjunto B dado el conjunto *C*, si no existe trayectoria entre *A* y *B* en que:

- Todos los nodos convergentes están o tienen descendientes en *C*.
- Todos los demás nodos están fuera de *C*.

Dada una distribución de probabilidad o modelo (M) y una representación gráfica de dependencias o grafo (G), debe existir una correspondencia entre las independencias representadas en ambos.

En una RB, cualquier nodo X es independiente de todos los nodos, excepto de los que desciende (y que parten de sus nodos padres), Pa(X), denominados el contorno de X. La estructura de una RB se especifica indicando el contorno (padres) de cada variable. Se puede distinguir entre:

- Nodos raíz: vector de probabilidades marginales.
- Otros nodos: matriz de probabilidades condicionales dados sus padres.

Puesto que los contornos (padres) de cada nodo especifican la estructura, mediante las probabilidades condicionales de dichos nodos se pueden especificar también las probabilidades requeridas. Aplicando la regla de la cadena y las dependencias condicionales, se puede calcular la probabilidad conjunta. En general, la probabilidad conjunta se calcula mediante el producto de las probabilidades de cada variable dados sus padres:

$$P(X_1, X_2, ..., X_n) = \prod_{i=1}^{n} P(X_1 | P_\alpha(X_i))$$

El tamaño de la tabla de probabilidad condicional crece exponencialmente con el número de padres de un nodo, por lo que puede crecer demasiado. Una forma de reducir este problema es utilizar ciertos modelos para representar las tablas sin que sea necesario especificar todas las probabilidades. Es lo que se conoce como modelos canónicos. Los principales modelos canónicos son:

- Modelo de interacción disyuntiva (Noisy OR). Es el modelo más utilizado.
- Modelo de interacción conjuntiva (Noisy AND).
- Compuerta Max (Noisy Max gate).
- Compuerta Min (Noisy Min gate).

Aplicando el Teorema de Bayes, un clasificador bayesiano obtiene la probabilidad posterior de cada clase, Ci, como el producto de la probabilidad a priori de la clase por la probabilidad condicional de los atributos (E) dada la clase, dividido por la probabilidad de los atributos:

$$P(C_i \Big| E) = \frac{P(C_i)P(E|C_i)}{P(E)}$$

El clasificador bayesiano simple (*Naive Bayes Classifer, NBC)* asume que los atributos son independientes entre sí dada la clase, así que la probabilidad se puede obtener por el producto de las probabilidades condicionales individuales de cada atributo dado el nodo clase:

$$P(C_i|E)\Big| = P(C_i)\frac{P(E_1|C_i)P(E_2|C_i)...P(E_n|C_i)}{P(E)}$$

Siendo *n* el número de atributos, el número de parámetros se incrementa linealmente con el número de atributos, y no exponencialmente. Gráficamente, un NBC se puede representar como una red bayesiana en forma de estrella, con un nodo de la raíz, *C*, que corresponde a la variable de la clase que está conectada con los atributos, $\{E_1, E_2, ..., E_n\}$.

Los atributos son condicionalmente independientes dada la clase, de tal manera que no existen arcos entre ellos. Dado que la estructura de un clasificador bayesiano simple está predeterminada, únicamente es necesario que aprenda los parámetros asociados, que son:

- $P(C)$: vector de probabilidades a priori para cada clase.
- $P(E_i|C)$: matriz de probabilidad condicional para cada atributo dada la clase.

Estos parámetros se pueden estimar fácilmente a partir de los datos y en función de frecuencias.

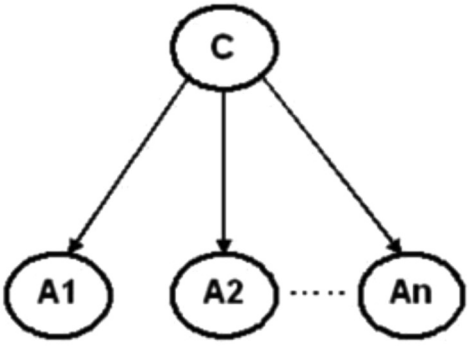


FIGURA 90. Clasificador bayesiano simple en el que los atributos A1, A2,…, An son independientes dada la clase C

8.3.6.2. APRENDIZAJE DE LAS REDES BAYESIANAS

El aprendizaje de redes bayesianas consiste, en general, en inducir un modelo, estructura y parámetros asociados, a partir de unos datos. Puede dividirse naturalmente en dos partes:

- **Aprendizaje estructural** en el que se obtiene la estructura o topología de la red.
- **Aprendizaje paramétrico** en el que, dada la estructura, se obtienen las probabilidades asociadas.

Cuando se tienen datos completos y suficientes para todas las variables en el modelo, es relativamente fácil obtener los parámetros, asumiendo que la estructura esté dada. En este caso se trata de un aprendizaje paramétrico. El método más empleado es el de máxima verosimilitud, bajo el cual se estiman las probabilidades en función de las frecuencias de los datos.

Dado que normalmente no se cuenta con suficientes datos, hallamos incertidumbre en las probabilidades estimadas. Esta incertidumbre se puede representar mediante una distribución de probabilidad, de forma que se considere de forma explícita la incertidumbre sobre las probabilidades. Para el caso de variables binarias se modela con una distribución Beta y para variables multivariadas mediante su extensión, que es la distribución Dirichlet.

Para determinar la tipología o estructura de la red bayesiana se emplea el aprendizaje estructural, que consiste en encontrar las relaciones de dependencia entre las variables, de forma que se pueda determinar la topología o estructura de la red bayesiana. De acuerdo al tipo de estructura, podemos dividir los métodos de aprendizaje estructural en:

- Aprendizaje de árboles.
- Aprendizaje de poliárboles.
- Aprendizaje de redes multiconectadas.

PARA SABER MÁS SOBRE REDES BAYESIANAS

- (Charniak, 1991). Bayesian Networks without Tears. *AI Magazine,* 12.
- (Heckerma, Geiger & Chickering, 1995). Learning Bayesian Networks: The combination of knowledge and statistical data.
- (Jensen, 2009). Introduction to Bayesian Networks. Apuntes de la asignatura Advanced Herd Management. Universidad de Copenague.
- (Larrañaga, Extebarria, Lozano & Peña, 2000). Combinatorial optimization by learning and simulation of Bayesian networks. Proceedings of the 16th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, 343-352.
- (Neapolitan, R., 2000). *Learning Bayesian Networks.* Northwestern Illinois University.
- (Peña, Lozano & Larrañaga, 2002). Learning recursive Bayesian multinets for clustering by

means of constructive induction. *Machine Learning,* 47, 63-89.
- (Ruiz, 2005). Introducción a las redes bayesianas. Apuntes de clase de la asignatura Inteligencia Artificial II. Universidad de Sevilla.
- Proyecto ELVIRA: http://www.ia.uned.es/~elvira/
- http://www.ia.uned.es/~fjdiez/bayes/rbayes.html

8.3.7. Algoritmos Genéticos [basado en (Alfaro, 2012)]

Los Algoritmos Genéticos (AGs) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. John Koza propuso una definición muy completa de lo que es un Algoritmo Genético:

> "Es un algoritmo matemático altamente paralelo que transforma un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto, y tras haberse presentado de forma natural una serie de operaciones genéticas de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas y se les asocia con una cierta función matemática que refleja su aptitud."

Por tanto, los AGs están basados en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acuerdo con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes postulados por Darwin en 1859.

Por imitación de este proceso, los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de las mismas.

Un algoritmo genético consiste en una función matemática o una rutina de software que toma como entradas todos los ejemplares y devuelve como salidas únicamente los que deben generar descendencia para la nueva generación.

Los principios básicos de los Algoritmos Genéticos fueron establecidos por (Holland, 1975) y se encuentran bien descritos en varios textos como los de (Goldberg, 1989), (Davis, 1991) o (Reeves & Yamada, 1998).

8.3.7.1. Algoritmo genético simple

El Algoritmo Genético Simple, también denominado Canónico, se representa en la Figura 91. Se necesita una codificación o representación del problema, que resulte adecuada al mismo. Además, se requiere una función de ajuste o adaptación al problema, la cual asigna un número real a cada posible solución codificada. Durante la ejecución del algoritmo, los padres deben ser seleccionados para la reproducción; a continuación, dichos padres seleccionados se cruzarán generando dos hijos, sobre cada uno de los cuales actuará un operador de mutación. El resultado de la combinación de las anteriores funciones será un conjunto de individuos (posibles soluciones al problema) que, en la evolución del Algoritmo Genético, formarán parte de la siguiente población.

```
BEGIN /* Algoritmo Genetico Simple */
    Generar una poblacion inicial.
    Computar la funcion de evaluacion de cada individuo.
    WHILE NOT Terminado DO
    BEGIN /* Producir nueva generacion */
        FOR Tamaño poblacion/2 DO
        BEGIN /*Ciclo Reproductivo */
            Seleccionar dos individuos de la anterior generacion,
            para el cruce (probabilidad de seleccion proporcional
            a la funcion de evaluacion del individuo).
            Cruzar con cierta probabilidad los dos
            individuos obteniendo dos descendientes.
            Mutar los dos descendientes con cierta probabilidad.
            Computar la funcion de evaluacion de los dos
            descendientes mutados.
            Insertar los dos descendientes mutados en la nueva generacion.
        END
        IF  la poblacion ha convergido THEN
            Terminado := TRUE
    END
END
```

Figura 1: Pseudocódigo del Algoritmo Genético Simple

Figura 91. Pseudocódigo del Algoritmo Genético Simple

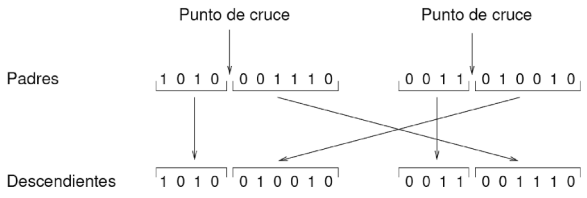


Figura 92. Primera parte del ciclo reproductivo de los Algoritmos Genéticos: Selección de los Padres y Cruce de los individuos para obtener los Descendientes. Se puede ver que los dos descendientes obtenidos cuentan con una pequeña parte de uno de los padres y una parte mayoritaria del otro de los padres. En este paso se aplica el operador de cruce basado en un punto

Figura 93. Segunda parte del ciclo reproductivo de los Algoritmos Genéticos: mutación de los descendientes, con una cierta probabilidad. En este paso se aplica el operador de mutación

8.3.7.2. Condicionantes de aplicación

Los algoritmos genéticos se han aplicado de forma generalizada a los problemas de optimización, en los que han resultado de gran utilidad dada su eficiencia.

Sin embargo, antes de aplicar los AGs se recomienda verificar que el modelo cumpla las siguientes características:

- Su espacio de búsqueda (por ejemplo, sus posibles soluciones) debe estar delimitado dentro de un cierto rango. Lo más recomendable es intentar resolver problemas que tengan espacios de búsqueda discretos aunque éstos sean muy amplios. Sin embargo, también podrá intentarse usar la técnica con espacios de búsqueda continuos (preferentemente cuando exista un rango de soluciones relativamente pequeño).

- Debe poderse definir una función de aptitud que indique la bondad de la respuesta. La función de aptitud es la función objetivo del problema de optimización. El algoritmo genético únicamente maximiza, pero la minimización puede realizarse fácilmente utilizando el recíproco de la función maximizadora. Una característica que debe tener esta función es que tiene que ser capaz de "penalizar" las malas soluciones y de "premiar" las buenas, de forma que sean estas últimas las que se propaguen con mayor rapidez.

- Las soluciones deben codificarse de una forma que resulte relativamente fácil de implementar. Lo más común en las soluciones es la codificación a través de cadenas binarias, aunque se han utilizado también números reales y letras. El primero de estos esquemas ha gozado de mucha popularidad debido a que es el que propuso originalmente Holland, y además, porque resulta muy sencillo de implementar.

8.3.7.3. Ventajas y desventajas de la aplicación de los algoritmos genéticos

Ventajas

- No necesitan conocimientos específicos sobre el problema que intentan resolver.

- Operan de forma simultánea con varias soluciones, en vez de trabajar de forma secuencial como las técnicas tradicionales.

- Cuando se usan para problemas de optimización, como maximizar una función objetivo, resultan menos afectados por los máximos locales (falsas soluciones) que las técnicas tradicionales.

- Usan operadores probabilísticos, en vez de los operadores deterministas de las otras técnicas.

- Se trata de una técnica robusta.

- Se pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas, incluyendo aquéllos en los que otros métodos encuentran dificultades.

- Existe evidencia empírica de que se encuentran soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo, con el resto de algoritmos de optimización combinatoria.

- El gran campo de aplicación de los Algoritmos Genéticos se relaciona con aquellos problemas para los cuales no existen técnicas especializadas.

- En el caso en que dichas técnicas existan, y funcionen bien, pueden efectuarse mejoras de las mismas hibridándolas con los Algoritmos Genéticos.

Desventajas

- Pueden tardar mucho en converger, o no converger en absoluto, dependiendo en cierta medida de los parámetros que se utilicen: tamaño de la población, número de generaciones, etc.

- Pueden converger prematuramente debido a una serie de problemas de diversa índole.

8.3.7.4. Ejemplo de aplicación de los Algoritmos Genéticos

En este apartado se plantea un ejemplo de aplicación de un conocido y difundido algoritmo genético: el NSGA-II, desarrollado por el Kanpur Genetic Algorithm Laboratory. Se trata de un algoritmo multiobjetivo que permite obtener un frente de soluciones óptimas para un mínimo de dos funciones programadas por el propio usuario, variando tantos parámetros como se desee entre los intervalos que se definan. Para activar el algoritmo, se debe definir a priori el tamaño de la población inicial y el número de generaciones hasta llegar a la población final. La convergencia del algoritmo dependerá del número de generaciones que se especifique. Como mejora del mismo, podría definirse un criterio de parada en función del grado de dispersión del frente de soluciones. NSGA-II puede descargarse de forma gratuita[5] junto con un artículo que describe en profundidad las hipótesis y los distintos bloques que componen el algoritmo.

Como ejemplo, se plantea la aplicación de dicho algoritmo en el entorno de Matlab® para minimizar la probabilidad de rebase y el coste de construcción de un determinado espaldón (ver Figura 94), de forma simplificada.

[5] NSGA-II programado en Matlab®: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429
NSGA-II programado en C: http://www.iitk.ac.in/kangal/codes.shtml

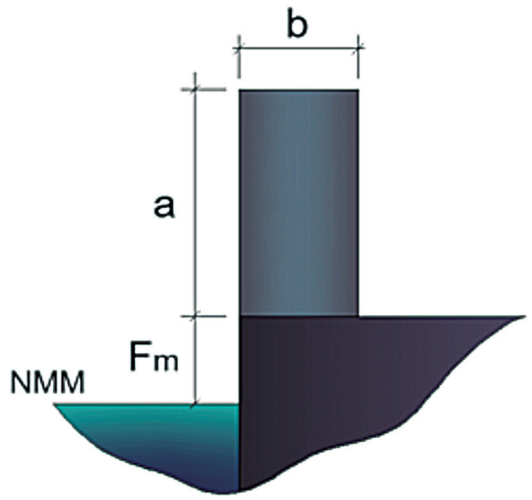


FIGURA 94. Representación esquemática del espaldón, caracterizado por un francobordo (Fm), una altura a y un ancho b

Se parte de un clima marítimo conocido en forma de matriz de N estados de mar (Hs, Tz, θ, marea astronómica MA y marea meteorológica MM) y se propone calcular la probabilidad de rebase aplicando el método de simulación numérica de Montecarlo a la formulación de (Franco & Franco, 1999):

$$q_i = 0{,}082\exp\left\{\frac{-3F_{C,i}}{H_{S,i}\gamma_{B\sigma,i}\gamma_{geo}}\right\}\sqrt{gH_{S,i}^3} \quad siendo \begin{cases}\gamma_{geo}=1\ (botaolas\ recto)\\ \gamma_{B\sigma,i}\begin{cases}\cos\theta_i & \theta_i<37^\circ\\ 0{,}79 & \theta_i\geq 37^\circ\end{cases}\end{cases}$$

$i = 1...N$ *estados de mar*

de manera que todo estado de mar que provoque un caudal medio de rebase (q_i) superior a 0,4 l/m/s (catalogado como daño potencial a equipamientos a 5-10 m. del espaldón según el EUROTOP) sea contabilizado dentro de la probabilidad de rebase. En este caso se tendrá en cuenta la variabilidad del nivel del mar, por lo que el valor del francobordo será $F_{C,i} = F_m + a - (MA_i + MM_i)$. Por simplicidad en la resolución, se considerará que b=0,5*a.

Por tanto, el planteamiento del problema es el siguiente:

1. Funciones a optimizar:
   - Probabilidad de rebase = $\frac{\sum_{i=1}^{N} rebases\ con\ q_i \geq 0{,}4l/m/s}{N}$
   - Coste construcción espaldón = = Coste*Volumen/m lineal
2. Variables de decisión:
   - Dimensiones del espaldón. Vamos a acotar el valor de a en el intervalo [3, 10] m.
3. Población inicial y número de generaciones:
   - Al ser un problema sencillo tiene una convergencia muy rápida, por lo que usaremos el número mínimo de generaciones (5). En cuanto a la población inicial, para obtener una solución gráfica de calidad, emplearemos 100 individuos.

El algoritmo NSGA-II programado en Matlab® está dividido en 8 archivos:

- nsga_2.m
- objective_description_function.m
- initialize_variables.m
- evaluate_objective.m
- non_domination_sort_mod.m
- tournament_selection.m
- genetic_operator.m
- replace_chromosome.m.

El archivo nsga_2.m es el que controla el proceso iterativo: a lo largo de las sucesivas generaciones va llamando ordenadamente a cada una de las funciones hasta llegar a la población final, que habrá convergido a una solución óptima si el número de generaciones es suficiente. Para adaptar el algoritmo a nuestro problema en particular, únicamente es necesario modificar el archivo **evaluate_objective.m**, que en este caso quedaría de la siguiente forma:

function f = evaluate_objective(x, M, V)

a = x(1)

Nótese que el vector x recoge las variables de decisión, que pueden ser tantas como se deseen.

[*Coste,Prob_R*] = *EvaluacionRebase*(*a*);

En este caso se ha optado por definir una nueva función que calcule automáticamente el Coste y la Probabilidad de Rebase para una altura del espaldón (a) determinada.

f = [];

La función f recoge los valores de las funciones a optimizar para cada uno de los valores aleatorios de a.

f(1) = *Coste;*
f(2) = *Prob_R;*

Finalmente, para ejecutar el algoritmo genético, basta con escribir *nsga*_2(100,5) en la ventana de comandos, donde 100 hace referencia al número de individuos y 5 al número de generaciones.

En la misma ventana, se pide introducir el número de funciones objetivo, que en este caso son dos, la de coste y la de probabilidad de rebase; el número de variables de decisión, que en este caso es una, y el valor mínimo (3) y máximo (10) de la variable de decisión (a, en este caso).

Como solución se obtiene una matriz denominada "chromosome" en la que cada fila corresponde a un individuo de la población (una solución individual del problema) y cada columna aporta una información sobre cada individuo.

Las primeras columnas hacen referencia a los valores generados aleatoriamente de las variables de decisión, las columnas siguientes aportan el valor de las funciones a optimizar (en el orden en que hayan sido introducidas) y las 2 últimas contienen la información para ordenar y cruzar los individuos durante las sucesivas generaciones. Si se representan gráficamente los valores de las funciones a optimizar, se obtiene el frente de soluciones del problema (ver Figura 95), que permite analizar claramente las relaciones de sensibilidad entre ambas funciones. En este caso, el análisis es trivial: al aumentar la altura del espaldón aumenta el coste del mismo, y por tanto, disminuye la probabilidad de rebase. Cada uno de los puntos de esta gráfica corresponde con una solución aleatoria del problema.

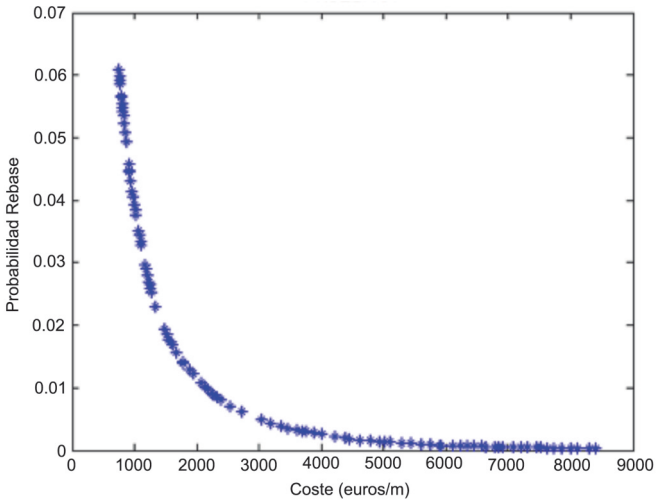


Figura 95. Frente de soluciones obtenida mediante la aplicación del algoritmo genético NASGA-II

Para saber más sobre algoritmos genéticos

- Initialization, mutation and selection methods in genetic algorithms for function optimization. Proceedings of the 4th International Conference on Genetic Algorithms, 100-107.
- Handbook of Genetic Algorithms. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Structure learning of Bayesian Network by Genetic Algorithms. New Approaches in Classification and Data Analysis. Springer-Verlag, 300-3.007.
- Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Genetic Algorithms, Path Relinking and the Flowshop Sequencing Problem. *Evolutionary Computation Journal (MIT Press)*, Vol. 6, 230-234.

Para saber más sobre la combinación de las dos técnicas

La literatura sugiere que se podrían hacer modelos mixtos o híbridos en los que se combinen las ventajas de las redes neuronales y los algoritmos genéticos, aunque hay muy poco material disponible en este campo. Tal vez esto se deba al hecho que los AGs y el estudio de las redes forman dos ramas o escuelas separadas dentro de la inteligencia artificial, por lo que los investigadores han preferido perfeccionar alguno de los dos modelos antes que tratar de unirlos.

Una red neuronal puede ser entrenada para diversos usos, entre ellos, como mecanismo de optimización. En este sentido podría asegurarse que serían un modelo alternativo competitivo con los algoritmos genéticos, si se las programara para este fin.

- (Larrañaga, Kuijpers, Murga & Yurramendi, 1996). Learning Bayesian Network structures by searching for the best ordering with genetic algorithms. *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics,* Vol. 26, 487-493.
- (Larrañaga, Poza, Yurramendi & Kuijpers, 1996). Structure learning of Bayesian networks by genetic algorithms: A performance analysis of control parameters. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* Vol. 18, 912-926.

8.3.8. Software disponible en el mercado para emplear algunos de los métodos recogidos en este apartado

Para la aplicación de alguno de estos métodos puede resultar cómodo, y en algunos casos imprescindible, emplear software especializado. A continuación se muestran algunos ejemplos, según el tipo de análisis que permiten llevar a cabo:

Árboles de fallo y diagramas de influencia

- **DPL 7.** http://www.syncopation.com/index.html. Software desarrollado por Syncopation para facilitar la toma de decisiones en sistemas complejos basado en métodos probabilísticos, ya que emplea la simulación de Montecarlo.
- **Isograph** (gratuito): http://www.isograph.com/software/reliability-workbench/fault-tree-analysis/?gclid=Cj0KEQjw6pGfBRD09M-TmYT-BzqIBEiQAcRzH5zzCoKJ4h2DDeg1GW3dHl6zdl-bexArCDqEf3_Rr3tf0aArsC8P8HAQ

Inferencia bayesiana

- GeNie & SMILE. http://genie.sis.pitt.edu/about.html. Software para crear modelos teóricos de decisión a través de una interfaz gráfica. Desarrollado por el Laboratorio de Sistemas y Decisión de la Universidad de Pittsburgh (http://dsl.sis.pitt.edu/).

Análisis de fiabilidad y riesgo

- STRUREL. http://www.strurel.de/index.html. Conjunto de herramientas para desarrollar análisis de fiabilidad en sistemas estructurales creado por RCP Consult GmbH (Reliability Consulting Programs).

9. CONSIDERACIONES SOBRE LA EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS ECONÓMICAS PARA EL CÁLCULO DEL RIESGO

9.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se van a tratar los conceptos relacionados con los aspectos económicos a tener en cuenta a la hora de establecer las consecuencias derivadas de un modo de fallo o parada operativa.

En (Tovar, Jara-Díaz & Trujillo, 2004-2006) encontramos la siguiente interesante reflexión:

> *"La industria portuaria se caracteriza por la gran diversidad de actividades que la componen. El sector público y el privado suelen convivir en esta industria de forma que el primero regula las actividades que las empresas privadas desarrollan en el ámbito portuario. [...]* ***El análisis de la estructura de costes de las empresas ha sido una tarea en la que los economistas han estado siempre interesados porque un conocimiento exhaustivo de los costes es útil para muchos fines****, aunque el objetivo perseguido en cada caso concreto puede afectar al qué se estima y al cómo se estima. De esta manera, cobra una especial relevancia el conocimiento exhaustivo de la estructura de costes de las empresas reguladas, ya que permitiría al sector público adoptar medidas regulatorias adecuadas. [...] Hay que tener en cuenta que, en casi todos los países, la industria portuaria se caracteriza por estar sometida a cierto control del sector público que se encarga, entre otras funciones, de planificar la inversión futura. [...] Destaca la escasez de trabajos que sobre la estructura de coste existen en el sector, sobre todo cuando se refieren a actividades tan importantes como la manipulación de mercancías."*

En este preámbulo se recoge un mensaje claro: el conocimiento de la estructura de costes de las empresas que desarrollan su actividad en las instalaciones portuarias es de gran utilidad para muchos fines, entre ellos, el de planificar las inversiones futuras. El factor económico es uno de los pilares fundamentales para gestionar el riesgo, al tratarse de un indicador tangible de la magnitud de las consecuencias de los potenciales fallos o paradas operativas en la instalación.

9.2. CONSIDERACIONES INICIALES EN LA EVALUACIÓN DEL COSTE

La evaluación del "coste" derivado de fallos o paradas operativas en una instalación portuaria es todavía una asignatura pendiente, dada la escasez de estudios y metodologías dedicados a la creación de una estructura de costes que facilite dicha tarea. El propio término cuenta con una gran variedad de matices y significados, que hacen de su evaluación un tema complejo a tratar tanto por la variedad de perspectivas desde la que puede plantearse, por el propio dinamismo e incertidumbre que reina en los mercados que rigen los elementos en base a los cuales se calcula, por la fluctuación del estado de las actividades portuarias, así como por la opacidad a la hora de obtener valores específicos con los que crear la estructura.

Es necesario tener en cuenta que, en este trabajo, se hace referencia al **coste que estaría asociado a la eventual materialización de modos de fallo o paradas operativas en las instalaciones.** No obstante, y como se verá más adelante, para evaluar dicho coste es imprescindible disponer de precios de actividad y materiales, costes de operación o de metro lineal de infraestructura. Cuando más detallado se encuentre el desglose de precios y de costes de operación, mejor se podrá estimar el riesgo correspondiente.

Así pues, la primera consideración que debe hacerse es desde qué punto de vista se va a evaluar el riesgo. En primer lugar hay que posicionarse, ya sea desde la perspectiva de la propiedad o de la autorización o concesionario, cuyos roles se pueden sintetizar como sigue:

Propiedad: Invierte en la infraestructura y lleva a cabo su mantenimiento y amortización. Después, concesiona el espacio a los explotadores.

- Costes que asume la propiedad con respecto a la infraestructura: Amortización y mantenimiento.
- Ingresos que percibe la propiedad: Por arrendamiento de espacios y tasas de actividad, que son fijados de antemano.

Concesionario u autorización: Desarrolla actividades económicas. Invierte en infraestructuras para mejorar la eficiencia y capacidad

- Costes que asume el concesionario/autorización: Costes de funcionamiento ordinario (suministro eléctrico, de agua), costes asociados a la conce-

sión y tasas de actividad, costes derivados de su responsabilidad sobre la infraestructura.

- Ingresos que percibe el concesionario/autorización: Ingresos por el desarrollo de su actividad comercial, variables según la instalación y el negocio.

Esta diferenciación de actores es clave, ya que en el sistema español, los concesionarios o autorizaciones explotan las instalaciones de la Autoridad Portuaria a riesgo y ventura. Esto significa que los espacios e inmovilizado material que sean propiedad de la Autoridad Portuaria son responsabilidad del concesionario.

La selección del momento en el que se estudian los riesgos existentes sobre la instalación es fundamental. Se pueden distinguir dos situaciones de análisis:

- Previo a la construcción o Greenfield: fase de proyecto, evaluación de riesgos constructivos (más detallados) y de operación (menos detallados).

- Ya construido o Brownfield: la evaluación de riesgos puede hacerse con más detalle, al disponerse de un layout y una distribución de actividades definida y consolidada.

La condición de aseguramiento de la obra es clave a la hora de considerar, asumir o descartar determinados riesgos, ya que según la fase de proyecto la instalación puede estar asegurada frente a determinadas contingencias y por tanto, la materialización de un fallo tendrá un impacto económico menor, al verse compensada una parte de los costes derivados por la aseguradora. Algunos ejemplos:

- Durante la fase de construcción, las obras están aseguradas.

- Las condiciones de aseguramiento durante la explotación son particulares para cada proyecto, y deben estar especificadas en los pliegos de los contratos de concesión o autorización.

Mediante el estudio del *cash-flow* del proyecto una vez realizado el análisis de las probabilidades de fallo o parada, se podrían tomar decisiones relacionadas con el aseguramiento de la infraestructura o la explotación en función del coste derivado de las ocurrencias de fallos o paradas operativas.

Según la Ley 33/2010, las tasas portuarias[6] son aquéllas exigidas por la utilización privativa o aprovechamiento especial del dominio público portuario y por la prestación del servicio de señalización marítima. Dichas tasas son las siguientes:

- Tasa de ocupación, por la ocupación privativa del dominio público portuario,

- Tasa de actividad, por el ejercicio de actividades comerciales, industriales y de servicios en el dominio público portuario,

- Tasas de utilización, por la utilización especial de las instalaciones portuarias, y

- Tasa de ayuda a la navegación, por el servicio de señalización marítima.

A efectos de la evaluación del coste derivado de modos de fallo o paradas operativas, las tasas que se ven afectadas son la Tasa de Ocupación (TO), la Tasa de Actividad (TA) y la Tasa de Utilización (TU). En lo que respecta a la Tasa de Actividad (TA), los criterios para la fijación de la base imponible que a efectos de la guía aplican, son los siguientes:

- En servicios y actividades de manipulación de carga, la base imponible será el número de unidades de carga manipulada, medidas en toneladas, número de contenedores u elementos de transporte tipificados, vehículos, etc.

- En el servicio de pasaje, la base imponible será el número de pasajeros y vehículos en régimen de pasaje embarcados y desembarcados.

- En los servicios técnico-náuticos, la base imponible será el número de unidades de arqueo bruto (GT) de los buques servidos o el número de servicios prestados.

Tal y como puede verse en la Figura 96, los elementos que dominan el flujo de entrada y de salida son, por un lado las actividades, ya que marcan tanto los ingresos del concesionario por actividad comercial como las tasas que éste debe abonar (y por lo tanto la propiedad ingresar) y, por otro lado, los costes asociados a la infraestructura. Desde un enfoque causal, se pueden identificar los riesgos asociados a dichos elementos y actividades tal y como refleja la Figura 97.

La asignación de partidas presupuestarias por parte de la propiedad se hace en base a una serie de gastos bien definidos (ver Tabla 21). En las partidas se distinguen dos capítulos dedicados a cubrir eventualidades (los gastos extraordinarios), así como desviaciones con respecto a las estimaciones iniciales (variación de las provisiones de inmovilizado inmaterial, material y financiero). Estos ejemplos ilustran la utilidad de la evaluación del riesgo, ya que de conocerse, estas partidas presupuestarias podrían definirse de forma más precisa.

Las familias de gastos recogidos en las partidas contables de las Autoridades Portuarias son, principalmente:

[6] La estructura de las tasas puede variar con el tiempo. En este texto se recogen aquéllas vigentes a fecha de noviembre de 2012.

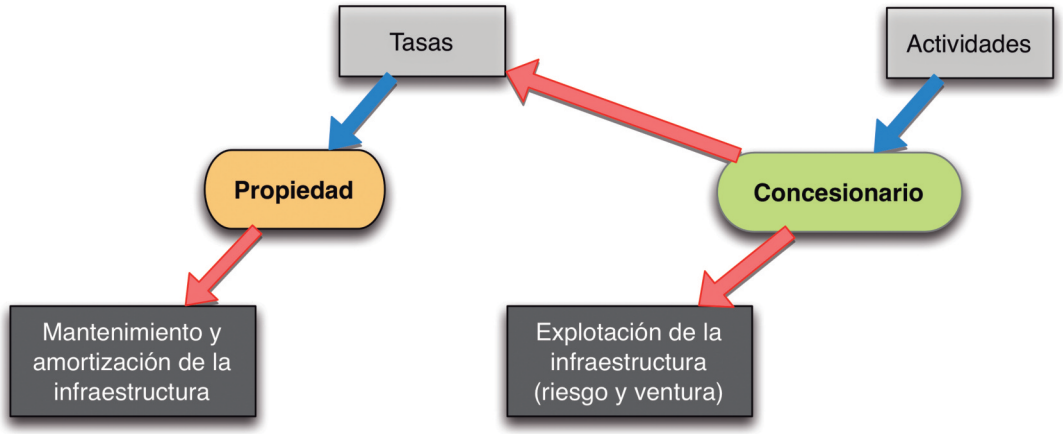


Figura 96. Esquema simplificado de ingresos y gastos a los que hacen frente el concesionario y la propiedad. En rojo se ha marcado el flujo de salida (costes) y en azul el flujo de entrada (ingresos)

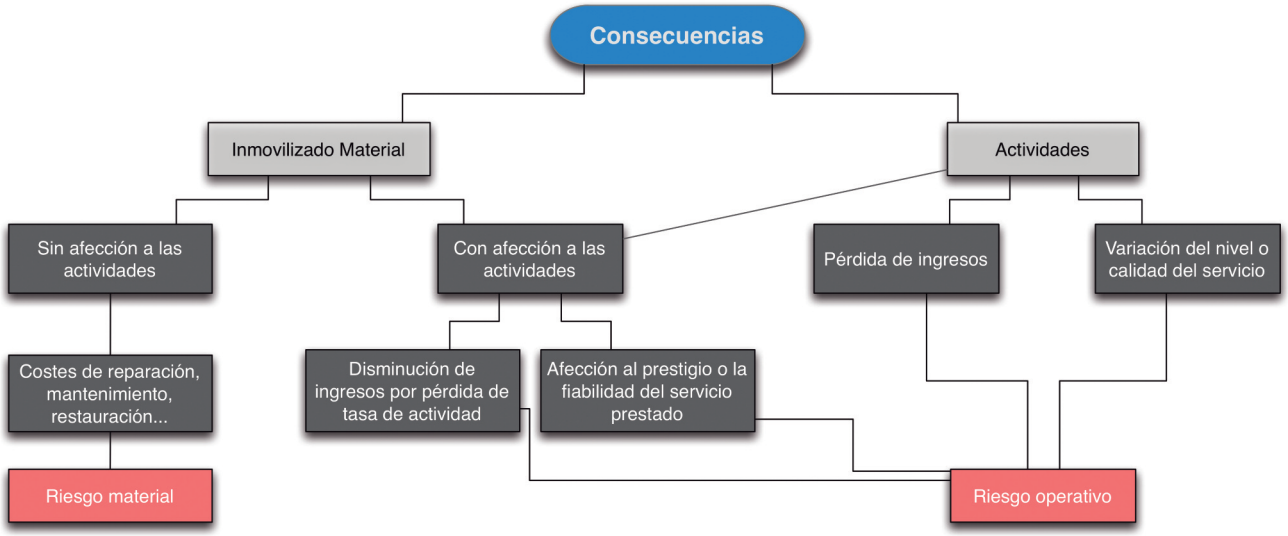


Figura 97. Relación entre la materialización de un modo de fallo o parada sobre el inmovilizado material o las actividades, y riesgos asociados

PARTIDA	Desglose
PERSONAL	
Sueldos y salarios	
Indemnizaciones	
Seguridad Social	
Otros	
DOTACIONES PARA AMORTIZACIONES DE INMOVILIZADO	
VARIACIÓN DE LA PROVISIÓN PARA INSOLVENCIA DEL TRÁFICO	
OTROS GASTOS DE GESTIÓN	

Tabla 21. Familias de costes consideradas en esta Guía, agrupadas por las partidas presupuestarias a las que corresponden

PARTIDA	Desglose
Servicios Exteriores	
	Reparación y conservación
	Servicios profesionales independientes
	Suministros
	Publicidad y Propaganda
	Otros
VARIACIÓN DE LAS PROVISIONES DE INMOVILIZADO INMATERIAL, MATERIAL Y FINANCIERO	
PÉRDIDAS PROCEDENTES DE LAS PROVISIONES DE INMOVILIZADO INMATERIAL, MATERIAL Y FINANCIERO	
GASTOS EXTRAORDINARIOS	
GASTOS Y PÉRDIDAS DE OTROS EJERCICIOS	

Tabla 21 (Continuación). Familias de costes consideradas en esta Guía, agrupadas por las partidas presupuestarias a las que corresponden

En la literatura se pueden consultar trabajos en los que se trata de esclarecer la estructura productiva y de costes en los puertos. (Tovar, Jara-Díaz & Trujillo, 2004-2006) distinguen, en su revisión de la literatura disponible en la materia, dos enfoques ante este problema:

- Trabajos que utilizan funciones de producción: (Chang, 1978); (Rekers, Connell & Ross, 1990), que concluye que el factor trabajo, reflejado a través de la variable horas de grúa netas es el principal factor explicativo de la función de producción; y (Tongzon, 1993).

- Trabajos que utilizan funciones de costes: (Kim & Sachish, 1986); (Martínez-Budría, 1996); (Jara-Díaz, Cortes, Vargas & Martínez-Budría, 1997); (Martínez-Budría, González-Marrero & Díaz, 1998); (Jara-Díaz, Martínez-Budría, Cortes & Basso, 2002); y (Tovar, 2002).

En las aproximaciones encontradas en la literatura para poder estimar las funciones de coste, se trata de establecer una parametrización del factor trabajo (número de empleados, horas trabajadas, horas efectivas trabajadas) y del factor capital (valor de los activos netos del puerto, horas de atraque, número de grúas empleadas por hora de atraque).

Para las funciones de producción, tal y como se puede comprobar en la Tabla 22, existen diversas definiciones para lo que los autores denominan "producto". Algunas de ellas se indican aquí:

- (Rekers, Connell & Ross, 1990) define el producto como el número de TEUS.

- (Tongzon, 1993) define el producto como el número de TEUS por hora de atraque.

- Actividad total: toneladas totales manejadas por el puerto en todos los casos.

- (Kim & Sachish, 1986) y (Martínez-Budría, 1996) consideran el producto como las toneladas de carga que atraviesan el puerto durante un año.

De estos estudios, cabe señalar que son pocos los trabajos dedicados a clarificar y estudiar los costes en el sector portuario, debido en su mayor parte a las dificultades que los investigadores encuentran a la hora de obtener la información necesaria para ello.

Autor	Actividad Estudiada	Datos de partida	Funcional de Producción	Variables estudiadas
(Chang, 1978)	Infraestructura	Serie temporal Observaciones anuales (1953-1973)	$Q_1(L,K,e^{T/L})$	Q_1: Producción = Beneficio neto (no incluye los pagos a los estibadores) L: Número medio de empleados K: Valor de los activos netos del puerto (precios de 1967) T/L: Toneladas por unidad de trabajo $e^{T/L}$: Proxy para el avance tecnológico
(Rekers, Connell & Ross, 1990)	Terminal-Muelle de contenedores	Datos de panel Tres terminales Observaciones mensuales (Mayo 1984-Febrero 1990)	$Q_2(C,B,L)$	Q_2: Producción = Número de TEUs C: Tiempo neto de operación de grúa B: Horas de atraque L: Manos
(Tongzon, 1993)	Terminal-Muelle de contenedores	Datos de panel Tres terminales Observaciones mensuales (Mayo 1984-Febrero 1990)	$Q_3(X_1, X_2, X_3)$	Q_3: Producción = Número de TEUs por hora de muelle X_1: Número de grúas por hora de muelle X_2: Número de manos por hora de muelle X_3: Número TEUs transportados por hora de muelle

Tabla 22. Estimación de las funciones de producción para el sector portuario (Tovar, Jara-Díaz & Trujillo, 2004-2006)

Autor	Actividad Estudiada	Datos de partida	Funcional de Coste	Variables estudiadas
(Kim & Sachish, 1986)	Infraestructura y servicios portuarios	Serie temporal 19 observaciones anuales (1966-1983)	$CT_{LP}(Y,L,K, P_1,P_2)$	CT_{LP}: Coste total a largo plazo Y: Toneladas de mercancía L: Factor trabajo K: Factor capital P_1: Precio del factor trabajo P_2: Precio del factor capital
(Martínez-Budría, 1996)	Infraestructura	Datos de panel 27 puertos 5 Observaciones anuales (1985-1989)	$CT_{it}(Q_{it}, W_{it}, m_{it}, r_{it}, d_i, d_t, D_i, D_t)$	C_{it}: Coste total del puerto i en el año t Q_{it}: Miles de toneladas de mercancía del puerto i en el año t W_{it}: Precio del factor trabajo del puerto i en el año t m_{it}: Precio de los factores intermedios del puerto i en el año t r_{it}: Amortización del Puerto i en el año t d_i: Efecto individual específico del puerto i dt: Efecto individual específico del año t Di: *Dummy* para el puerto i Dt: *Dummy* para la empresa t

Tabla 23. Estimación de funciones de costes para el sector portuario (Tovar, Jara-Díaz & Trujillo, 2004-2006)

Autor	Actividad Estudiada	Datos de partida	Funcional de Coste	Variables estudiadas
(Jara-Díaz, Cortes, Vargas, & Martínez-Budría, 1997)	Infraestructura	Datos de panel 27 puertos 5 Observaciones anuales (1985-1989)	$CTlp_{it}(GL_{it}, GS_{it}, MGC_{it}, MGNC_{it}, CANON_i, w_{it}, r_{it}, m_{it})$	$CTlp_{it}$: Coste total a largo plazo del puerto i en el año t GL_{it}: Miles de toneladas de graneles líquidos manipuladas por el puerto i en el año t GS_{it}: Miles de toneladas de graneles sólidos manipuladas por el puerto i en el año t MGC_{it}: Miles de tolenadas de mercancía general contenerizada manipuladas por el puerto i en el año t $MGNC_{it}$: Miles de toneladas de mercancía general no contenerizada manipuladas por el puerto i en el año t $CANON_i$: Índice agregado de otras actividades que utilizan parte de la infraestructura w_{it}: Precio del factor trabajo r_{it}: Precio del factor capital m_{it}: Precio del factor intermedio
(Martínez-Budría, González-Marrero, & Díaz, 1998)	Actividad de las SEED	Datos de panel 24 SEED 7 Observaciones anuales (1990-1996)	$CT_{it}(GS_{it}, MG_{it},, Pl_{it}, Pi_{it}, T)$	CT_{it}: Coste total del puerto i en el año t GS_{it}: Miles de toneladas de graneles sólidos manipuladas por el puerto i en el año t MG_{it}: Miles de toneladas de mercancía general manipuladas por el puerto i en el año t Pl_{it}: Precio del factor trabajo Pi_{it}: Precio del factor intermedio T: Tiempo
(Jara-Díaz, Martínez-Budría, Cortes, & Basso, 2002)	Infraestructura	Datos de panel 26 puertos Observaciones anuales (1985-1995)	$CTlp_{it}(GL_{it}, GS_{it},, MGC_{it}, MGNC_{it}, CANON_{it}, w_{it}, r_{it}, m_{it})$	$CTlp_{it}$: Coste total a largo plazo del puerto i en el año t GL_{it}: Miles de toneladas de graneles líquidos manipuladas por el puerto i en el año t GS_{it}: Miles de toneladas de graneles sólidos manipuladas por el puerto i en el año t MGC_{it}: Miles de tolenadas de mercancía general contenerizada manipuladas por el puerto i en el año t $MGNC_{it}$: Miles de toneladas de mercancía general no contenerizada manipuladas por el puerto i en el año t $CANON_i$: Índice agregado de otras actividades que utilizan parte de la infraestructura w_{it}: Precio del factor trabajo r_{it}: Precio del factor capital m_{it}: Precio del factor intermedio

Tabla 23 (Continuación). Estimación de funciones de costes para el sector portuario (Tovar, Jara-Díaz & Trujillo, 2004-2006)

Autor	Actividad Estudiada	Datos de partida	Funcional de Coste	Variables estudiadas
(Tovar, 2002)	Manipulación de mercancías	Pool de datos Tres terminales Observaciones mensuales (1990-1999)	$CTlp_{it}(MGC_{it}, MG_{it}, ROD_{it}, Wnp_{it}, Wlc_{it}, Wlc_{it}, Wle_{it}, m_{it}, r_{it}, D_t)$	$CTlp_{it}$: Coste total a largo plazo del puerto i en el año t MGC_{it}: Miles de toneladas de mercancía general contenerizada manipuladas por el puerto i en el año t MG_{it}: Miles de toneladas de mercancía general manipuladas por el puerto i en el año t ROD_{it}: Wnp_{it} Wlc_{it}: Precio portuario laboral común en el puerto i año t Wle_{it}: Precio portuario laboral especial en el puerto i año t m_{it}: Precio de los factores intermedios del puerto i en el año t r_{it}: Amortización del Puerto i en el año t D_t: Dummy para la empresa t

Tabla 23 (Continuación). Estimación de funciones de costes para el sector portuario (Tovar, Jara-Díaz & Trujillo, 2004-2006)

9.3. PRINCIPALES COSTES QUE PUEDEN GENERARSE POR LA OCURRENCIA DE FALLOS O PARADAS OPERATIVAS

9.3.1. Afecciones sobre el inmovilizado material

Como ya se ha manifestado en capítulos anteriores, la interacción entre los agentes del medio físico y de uso y explotación con la infraestructura puede afectar al inmovilizado material, en primera instancia, y a las actividades, ya sea de forma directa o como consecuencia de lo anterior. El nivel de afección, como resultado de la citada interacción, se conoce como vulnerabilidad. Dependiendo del nivel de vulnerabilidad se activarán determinados costes, cuyo valor específico depende de cada instalación y del momento en el que se evalúa el riesgo, ya que los precios varían fuertemente de forma interanual. A modo de síntesis, y a falta de una metodología específica para su evaluación, los que de forma inmediata se podrían considerar son los siguientes:

- Costes de reparación de poca entidad: necesarios para restaurar la plena funcionalidad de la infraestructura cuando ésta ha experimentado un desperfecto de pequeña entidad.

- Costes de reparación de gran entidad: necesarios para restaurar la plena funcionalidad de la infraestructura cuando ésta ha experimentado un desperfecto de gran entidad.

- Costes de desmantelamiento: si el fallo es tal que no es posible reparar la infraestructura, será necesario llevar a cabo su desmantelamiento. Normalmente este coste irá asociado al coste de reconstrucción.

- Costes de reconstrucción: Cuando la infraestructura se ha destruido completamente, es necesario volver a construirla, y por tanto, habrá que considerar los precios de la reconstrucción actualizados al año en que se prevé que se puedan producir tales daños.

Además de los riesgos derivados directamente de la manifestación de modos de fallo o paradas operativas, se identifica también un riesgo relacionado con las inversiones iniciales. Al producirse un fallo de elevada magnitud en la infraestructura, aunque ésta se encuentre asegurada, la amortización puede verse comprometida al depender ésta, en parte, del nivel de ingresos por actividad, que puede verse paralizada por los citados daños. Si la obra deja de ser operativa en un tiempo $t_{inoperatividad}$, la amortización pendiente desde ese momento hasta el último periodo de amortización constituye un riesgo, que en este trabajo se ha denominado Riesgo Base.

Al computarlo se pueden evaluar los costes asociados a la pérdida de valor de la amortización inicial, así como los correspondientes a las amortizaciones de las inversiones previstas a lo largo del tiempo de análisis, ya que es necesario destacar que el objeto de cuantificar el riesgo es el de conocer la salvaguarda económica de que habría que disponer

para evitar dispersiones presupuestarias a posteriori, que a su vez puedan conducir hacia un endeudamiento indeseado. El Riesgo base se puede formular como sigue:

$$R_{BASE} = C_0(t) + \sum_{k=1}^{v} C_k(t)$$

Donde:

- C_0 es el coste de la inversión inicial pendiente de amortización en el tiempo t.
- C_k son los costes asociados a las inversiones previstas pendientes de amortización en el tiempo t.
- v es el número de inversiones previstas a lo largo del marco temporal para el cual se va a evaluar el Riesgo.

El Riesgo base depende del momento en el que se proceda a su evaluación, ya que a medida que nos acerquemos al final del periodo de amortización, las cantidades pendientes se verán reducidas.

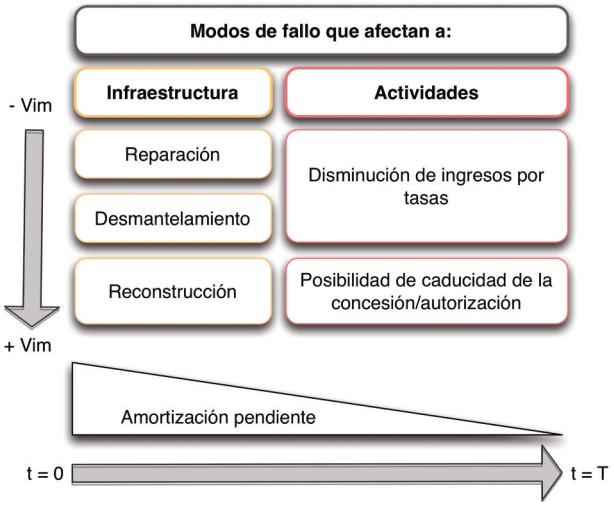


FIGURA 98. Tipos de coste que se activan tanto para la infraestructura como para las actividades en función del nivel de vulnerabilidad determinado para un determinado modo de fallo

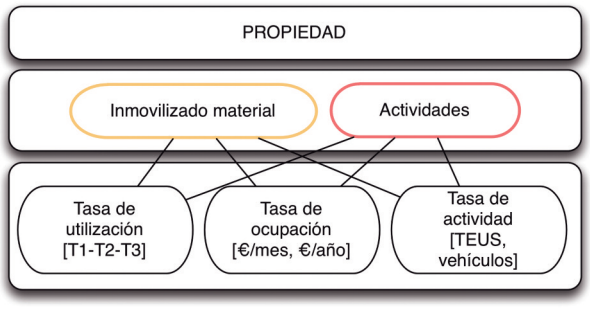


FIGURA 99. Tasas relacionadas con el nivel de actividad, que puede verse reducido por afecciones sobre el inmovilizado material o sobre las propias actividades

9.3.2. Afecciones sobre las operaciones

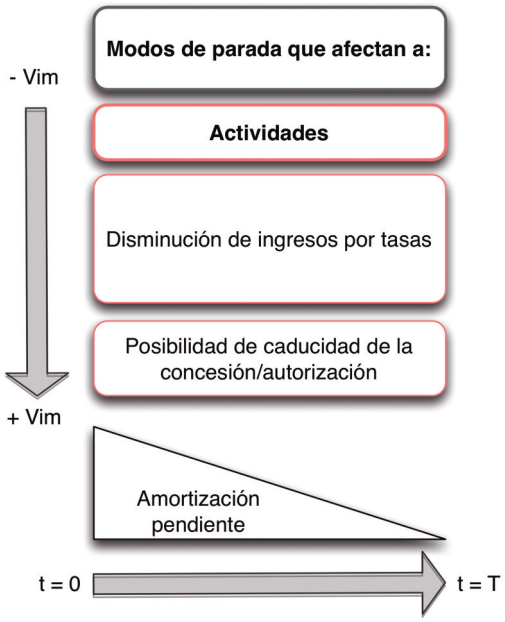


FIGURA 100. Tipos de coste que se pueden registrar al verse afectadas las actividades

9.4. ESCENARIOS DE AFECCIÓN EXTREMOS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA AUTORIDAD PORTUARIA

Aunque poco frecuentes, se han identificado 3 tipos de situaciones extremas que se pueden presentar y cuya evaluación del riesgo puede ser de interés para la Autoridad Portuaria:

1. Se produce un modo de fallo con gran afección sobre el inmovilizado.
2. Se produce un modo de fallo con destrucción parcial del inmovilizado y afección a las actividades.
3. Se produce un modo de parada operativa.

9.4.1. Modo de fallo que genera alto nivel de afección sobre el inmovilizado

En este escenario se plantea la manifestación de un modo de fallo que genera daños de tal magnitud que las reparaciones no se pueden efectuar en un periodo inferior a 6 o 12 meses (dependiendo de que la figura beneficiaria sea una concesión o autorización, respectivamente). En este supuesto, según la Ley 33/2010 (Puertos del Estado, 2011) se puede declarar la caducidad de la autorización o de la concesión. De ocurrir esto, la Autoridad Portuaria dejaría de percibir las tasas de Utilización, Actividad y Ocupación que tenía previstas durante una serie de años, y con las que posiblemente amortizaría parte de las inversiones realizadas.

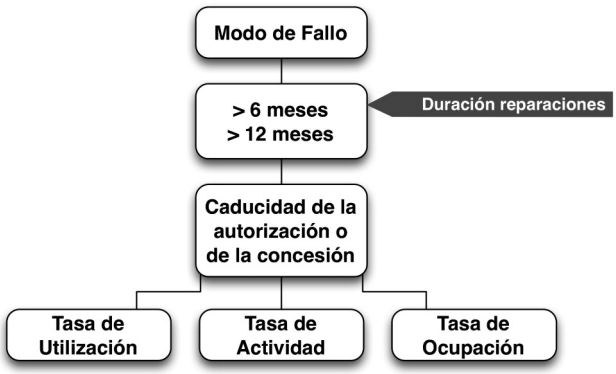


FIGURA 101. Posibles consecuencias sobre la actividad económica derivadas de la ocurrencia de un modo de fallo que genere paradas operativas superiores a 6 meses (en el caso de las concesiones) y de 12 (en el caso de las autorizaciones)

Esta primera figura (Figura 102) representa la evolución temporal de los ingresos por recaudación de tasas de la Autoridad Portuaria. En el momento que se produce un modo de fallo que acarrea grandes consecuencias, la AP sufre las pérdidas correspondientes a la falta de ingresos por tasas que se indican en línea discontinua.

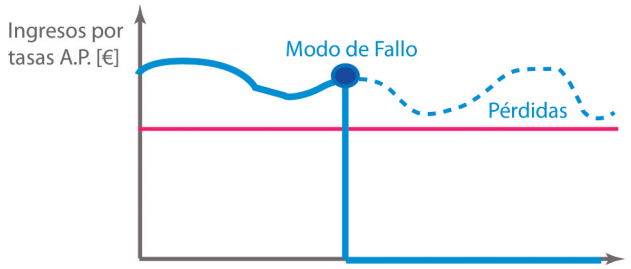


FIGURA 102. Esquema de la serie temporal de ingresos percibidos por la Autoridad Portuaria antes y después de la ocurrencia de un modo de fallo (MF), en naranja rosa continuo y línea de puntos, respectivamente

La Figura 103 representa las pérdidas que sufrirá la AP debidas a la parte proporcional de la amortización pendiente que estaba planificada para ser saldada mediante los ingresos por tasas a lo largo del tiempo.

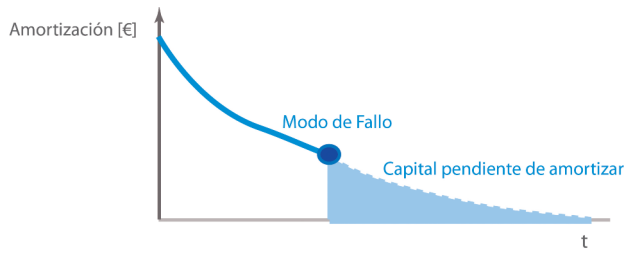


FIGURA 103. Esquema ilustrativo de una curva de amortización, antes y después de producirse un modo de fallo (MF), en línea continua y punteada, respectivamente. Se ha sombreado el capital pendiente de amortizar en el momento de producirse el modo de fallo, y que no podrá ser amortizado con la actividad desarrollada en la obra debido a que ésta se ha visto obligada a cesar

En lo referente al flujo de caja de la Autoridad Portuaria, los gastos iniciales debidos a la inversión realizada no podrán ser compensados ni se obtendrán beneficios a partir del momento en que se produce un modo de fallo de gran magnitud.

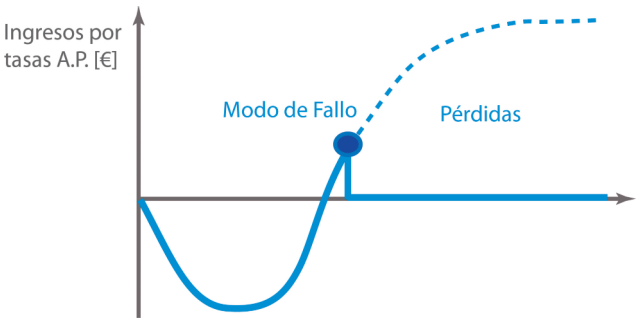


FIGURA 104. Flujo de caja (Cash-flow) de un proyecto. En la fase de construcción será negativo, debido a que se ha realizado una inversión. En la fase de explotación debe ser positivo, debido a que percibe ingresos por la actividad que sustenta la obra. Sin embargo, al producirse un modo de fallo (MF), se registran pérdidas debido a que estos ingresos dejan de producirse

9.4.2. Fallo que produce destrucción parcial

En este segundo escenario se plantea la posibilidad de que se produzca un modo de fallo y que el periodo requerido para devolver la infraestructura a la situación de completa operatividad sea o bien de 6 a 12 meses (dependiendo de si la figura es una concesión o autorización) o bien inferior a ese tiempo.

- **En el primer caso**, las consecuencias son las indicadas en el apartado anterior.

- **En el segundo caso**, dado que no se caduca la concesión/autorización, es necesario evaluar la vulnerabilidad de las actividades y del inmovilizado material. En el caso de que las actividades sean vulnerables a dicho modo de fallo, la recaudación de las tasas de Utilización, Actividad y Ocupación se puede ver amenazada. Sin embargo, las Autoridades Portuarias cuentan con mecanismos de compensación mediante los que pueden modificar las tasas para que el beneficiario de la concesión/autorización siga operando en sus instalaciones. Por lo tanto, las consecuencias económicas dependerán de la estrategia que siga la AP.

En lo que respecta al inmovilizado material, dependiendo de su vulnerabilidad, se contabilizarán los costes necesarios para devolver la infraestructura a su situación de completa funcionalidad.

Focalizando el análisis en la segunda rama, las variaciones de los ingresos previstos por la AP en forma de tasas dependerá de la estrategia que elija ésta: podrá modificar las tasas o no hacerlo. Una vez que se produce el modo de fallo, existe un

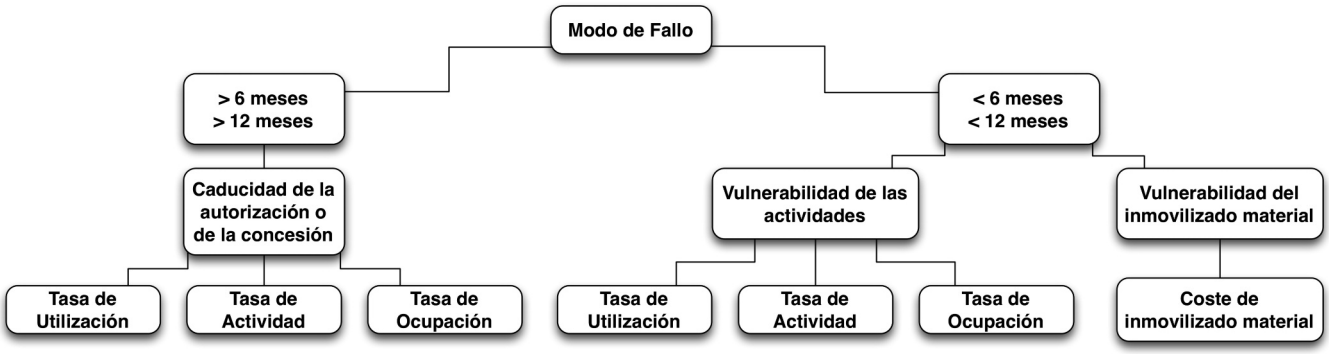


FIGURA 105. Esquema de las posibles consecuencias de la ocurrencia de un modo de fallo. Si es severo y las reparaciones ocupan un periodo superior a 6 o 12 meses, las consecuencias serán las indicadas en el caso anterior. Si el modo no es muy severo y las reparaciones ocupan menos de 6 o 12 meses, se debe evaluar la vulnerabilidad del inmovilizado material y de las actividades. Las consecuencias variarán si la Autoridad Portuaria decide modificar o no las tasas para mitigar parte del efecto del fallo sobre el operador

periodo de tiempo en el que la infraestructura está siendo reparada. Una vez se vuelve a la actividad, se pueden dar dos circunstancias principalmente:

1. Que la AP decida mantener las tasas: la recuperación de las pérdidas sufridas puede ser lenta.

2. Que la AP decida bajar las tasas para captar un mayor tráfico y fomentar la actividad: la recuperación de las pérdidas sufridas puede ser más rápida.

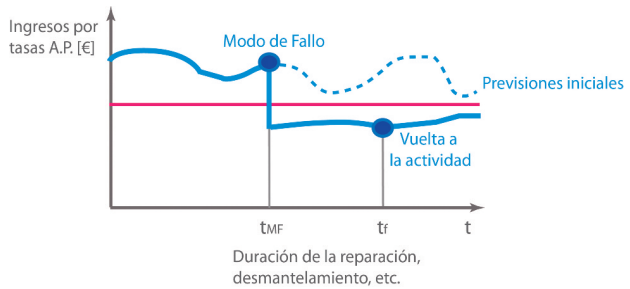


FIGURA 106. Esquema de los ingresos percibidos por la Autoridad Portuaria en concepto de tasas, antes y después de la manifestación de un modo de fallo (MF), en línea continua y discontinua, respectivamente. De acuerdo con el esquema de la Figura 105, en el caso de que la AP decida no modificar las tasas para aumentar la competitividad de sus instalaciones, cabe la posibilidad de que los ingresos se queden por debajo del mínimo admisible por la AP

Desde el punto de vista del concesionario, sus ingresos pueden evolucionar como se representa en la Figura 106. La línea rosa representa el umbral por debajo del cual el concesionario/autorización experimenta pérdidas. Al producirse un modo de fallo, el concesionario ve reducida su actividad hasta que la infraestructura se encuentra operativa de nuevo, lo cual repercute en sus ingresos. En el caso de que la AP no modifique las tasas para compensar estas pérdidas, los beneficios del concesionario/autorización se verán reducidos en mayor medida. Como consecuencia, estará sufriendo un riesgo mayor.

9.4.3. Modo de parada operativa

En este tercer escenario se analiza la posibilidad de que se produzca una parada operativa. Como consecuencia de esto, el nivel de Actividad y de Utilización se verá reducido. La Ley 33/2010 estipula que los concesionarios/autorizaciones deben alcanzar un nivel de productividad mínimo, de forma que la AP reciba unas tasas de Actividad y de Utilización mínimas que garanticen la viabilidad del sistema.

En el caso de que el modo de parada produzca una reducción de las actividades tal que no se alcancen dichos valores mínimos, la concesión/autorización es susceptible de verse caducada, por lo que los ingresos, tanto de la AP como del concesionario, se reducen a cero. Si pese a producirse el modo de parada se alcanzan los valores mínimos de Actividad y Utilización, la AP puede decidir disminuir las tasas proporcionalmente a las pérdidas que sufre el concesionario derivadas del modo.

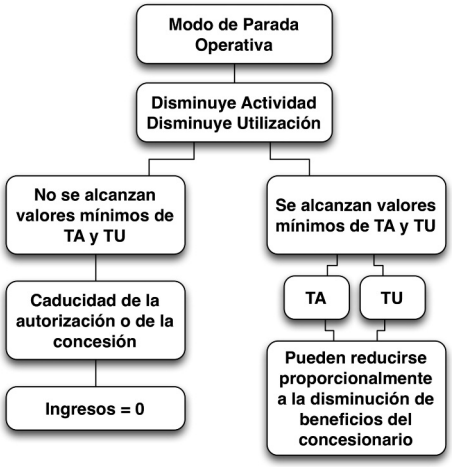


FIGURA 107. Posibles consecuencias de la manifestación de un modo de parada operativa que puede conducir a una disminución de las tasas de actividad y utilización. Existen dos posibles ramificaciones: que no se alcancen los objetivos marcados por la AP en relación a las Tasas de Actividad y las de Utilización, o que sí se alcancen

Desde el punto de vista de la Autoridad Portuaria, se produce una pérdida por disminución de ingresos en el caso de que decidan disminuir las tasas.

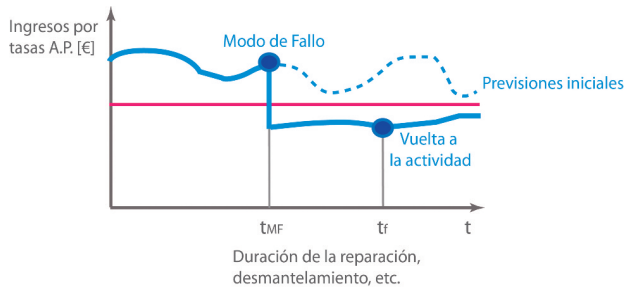


FIGURA 108. Esquema de ingresos por tasas de la Autoridad Portuaria antes y después de la materialización de un modo de fallo. Se ha representado el escenario en el que la AP lleva a cabo la modificación de las tasas para aumentar su competitividad

Desde el punto de vista del concesionario, existen a su vez diversas posibilidades. En el caso de que no se modifiquen las tasas para compensar al concesionario/autorización de la ocurrencia de paradas operativas, éste puede tardar más en volver a su nivel de beneficios previstos que en el caso de que las tasas se vean modificadas.

En este caso se ha partido de la hipótesis de que se conocen los umbrales de explotación de las infraestructuras, aunque puede darse el hecho de que éstos no se conozcan durante la fase en la que el proyecto está siendo redactado. Esto genera una rotura entre el diseño estructural-funcional y la función comercial que la obra debe desempeñar al servicio de la actividad económica.

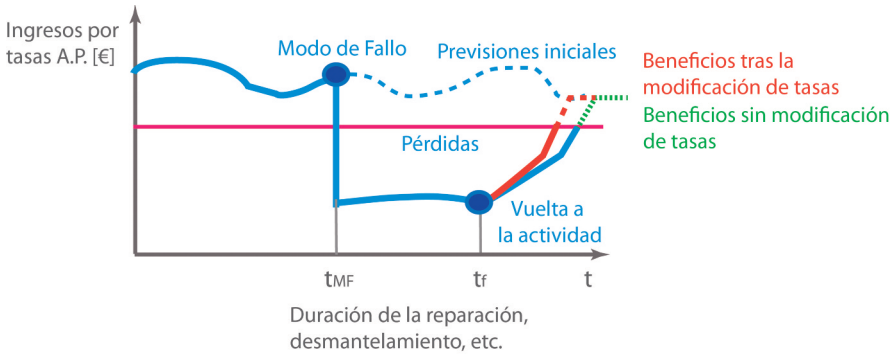
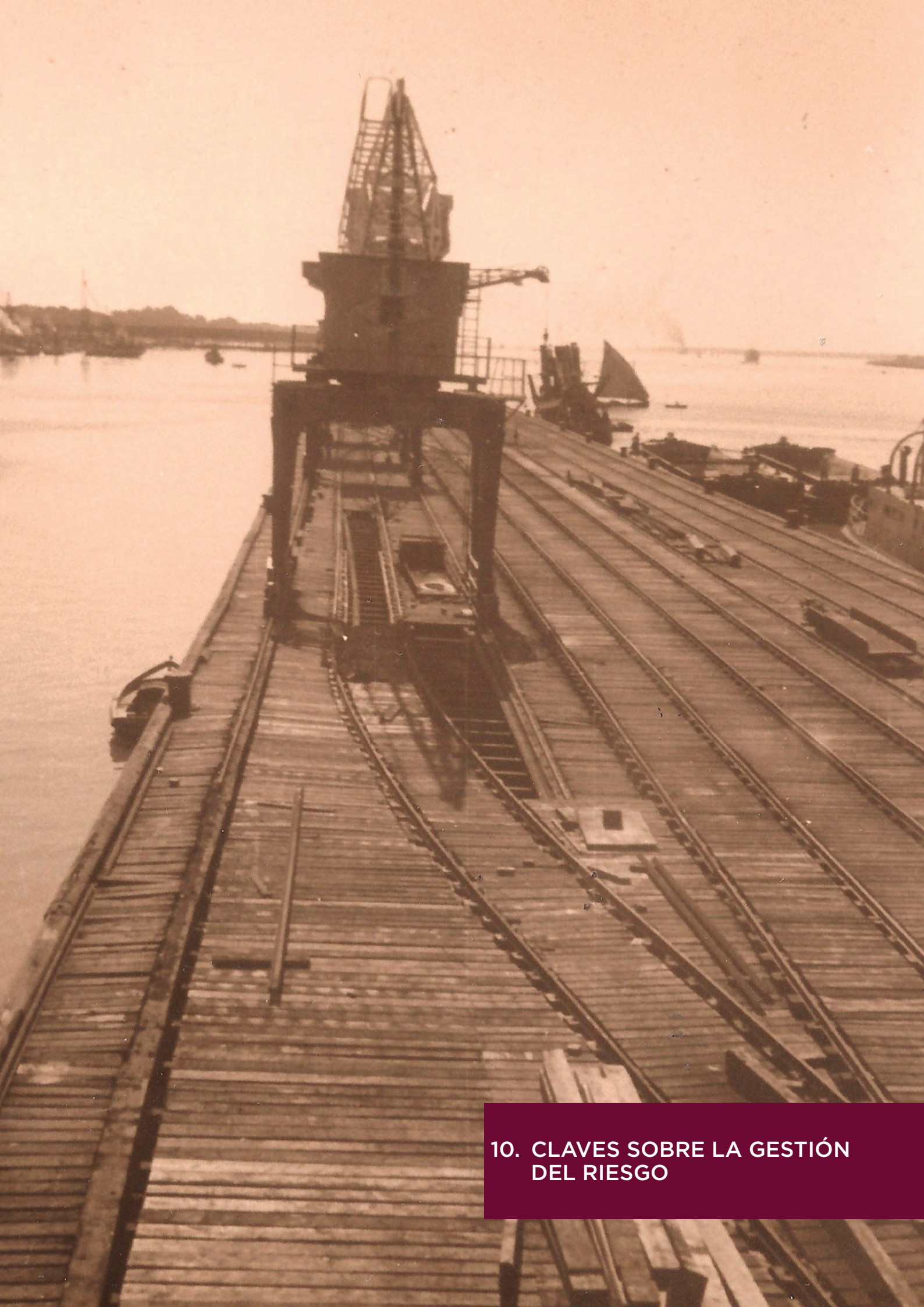


FIGURA 109. Esquema de los beneficios de un concesionario a lo largo del tiempo, antes y después de la materialización de un modo de fallo (MF) y la vuelta a la actividad. Las previsiones previas a la ocurrencia del modo están marcadas con líneas continuas y las posteriores con discontinuas. Se puede ver cómo variarían teóricamente los beneficios con y sin modificación de tasas por parte de la Autoridad Portuaria



10. CLAVES SOBRE LA GESTIÓN DEL RIESGO

Finalmente, y tras haber abordado la probabilidad, vulnerabilidad y las consecuencias como piezas fundamentales de la evaluación del riesgo, es necesario hilarlas para poder proceder a su gestión. Como se ha visto a lo largo de los capítulos anteriores, todos los conceptos abordados están íntimamente relacionados entre sí. En el desarrollo del presente trabajo se han perseguido tres objetivos principales:

1. Identificar y discutir la conveniencia de los términos a considerar en la evaluación del riesgo.

2. Considerar la posibilidad de que los términos finalmente contemplados no se integren a través de una relación funcional tal como el producto, al no estar este enfoque debidamente justificado.

3. Esbozar las claves para gestionar el riesgo, lo cual enlaza y se complementa con la metodología propuesta para la evaluación del mismo.

En este capítulo se da una visión general del proceso completo. En primer lugar se quiere destacar que las estrategias específicas de gestión dependerán de cada instalación, y que una metodología únicamente puede proporcionar las directrices o líneas maestras para obtener los términos fundamentales, pero el uso que se hace de ellos es competencia de cada gestor.

El cálculo del riesgo es, básicamente, un camino de ida y vuelta sobre los términos probabilidad, vulnerabilidad y consecuencias, en dos horizontes temporales diferenciados. El camino de ida recorre el proceso para la creación del mapa de riegos de la instalación, que debe realizarse una vez y actualizarse periódicamente al identificarse nuevos riesgos o al verse modificados drásticamente la probabilidad de ocurrencia de los modos de fallo, la vulnerabilidad del sistema o las consecuencias que derivan de la materialización de lo anterior. Por otra parte, el camino de vuelta muestra cómo a través del establecimiento de un criterio económico que defina la existencia de un riesgo sobre la actividad es posible identificar qué términos es más conveniente modificar: la probabilidad de ocurrencia de dicho modo de fallo/parada o el propio sistema, para que sea menos vulnerable.

En resumen, la constitución de un mapa de riesgos se consigue tal y como muestra la Figura 110, donde los elementos clave a evaluar son, como ya se ha visto en capítulos anteriores, la probabilidad, la vulnerabilidad y las consecuencias. Como segunda derivada, esta información se puede geolocalizar para generar un SIG que permita asignar el riesgo calculado a determinados elementos de la infraestructura.

Por otra parte, la gestión que se puede realizar con la información generada al aplicar el procedimiento que se resume en la Figura 111 y que se ilustra con un ejemplo en las siguientes líneas. Una vez más, los criterios para identificar riesgos serán diferentes según se trate de estudiar la infraestructura o las actividades portuarias, si bien como concepto general se puede decir que se trata el última instancia de un criterio económico.

El primer paso en la gestión del riesgo consiste en definir un criterio, específico para cada actividad o infraestructura a gestionar, con el que los gestores establezcan las desviaciones económicas máximas que pueden admitir como consecuencia de la ocurrencia de un fallo o una parada operativa en el sistema.

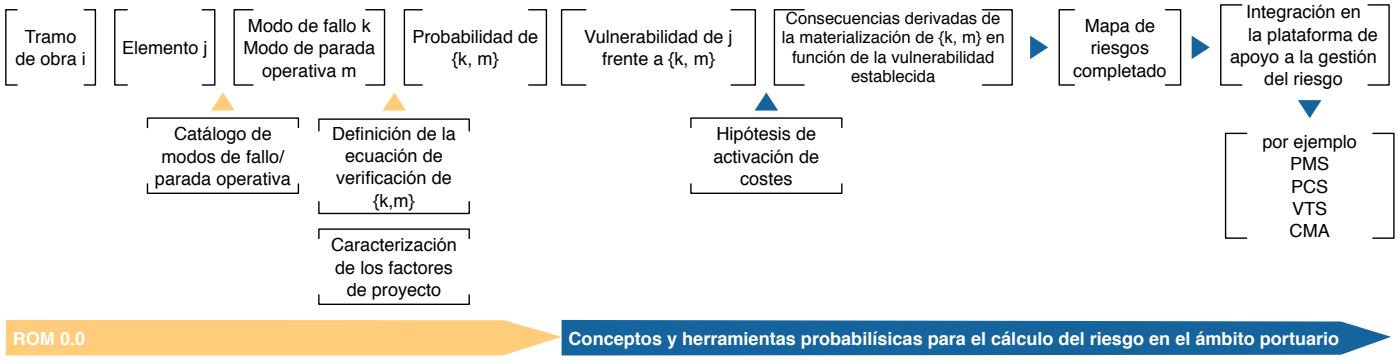


Figura 110. Fases propuestas en la metodología para la caracterización del riesgo

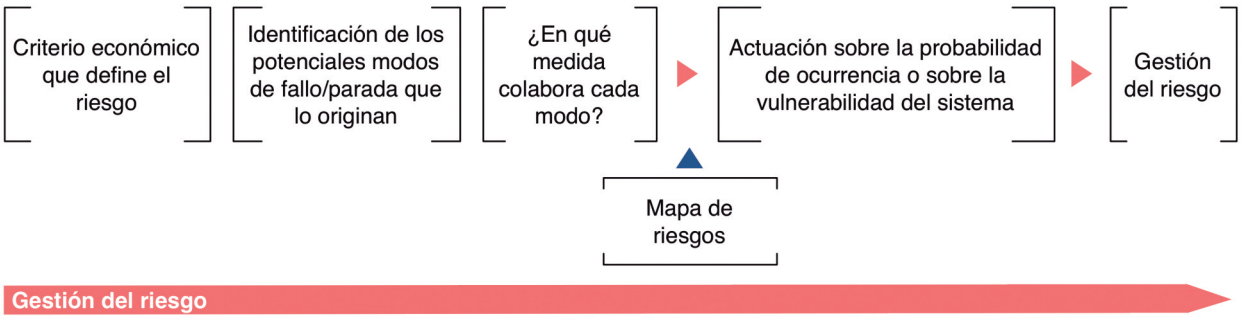


Figura 111. Consideraciones generales para proceder a la gestión del riesgo

Para el gestor de una actividad portuaria, el criterio se puede definir de la siguiente manera: suponiendo que una actividad es rentable si se alcanza una facturación determinada en un periodo de tiempo dado (por ejemplo, el año), conviene identificar los factores externos a la propia actividad que hacen que ésta no pueda desarrollarse con normalidad, lo cual afecta a los objetivos económicos establecidos. Estos factores externos se materializan en forma de modos de fallo o parada operativa, que están definidos mediante una ecuación de verificación, la cual a su vez está formada por una combinación de factores de proyecto, que es necesario caracterizar. En el caso de que se haya generado el mapa de riesgos de la instalación, será posible identificar aquellos que colaboran en mayor medida (elevada probabilidad, sistema más vulnerable o mayores consecuencias) en la ocurrencia del modo. Así pues, habiendo identificado las potenciales causas de las desviaciones económicas, se podrá ajustar su probabilidad de ocurrencia o realizar actuaciones para modificar la vulnerabilidad del sistema frente a las mismas.

Para ilustrar lo anterior se muestra un ejemplo aplicado al negocio de movimiento de contenedores.

Ejemplo: Gestión del riesgo en la actividad de carga y descarga en una terminal de contenedores

Sea una terminal de contenedores ficticia, el ejemplo se centra en la operativa de carga y descarga. Como es sabido, la terminal recibe ingresos según el volumen de mercancía manipulado. La terminal, como empresa, se marca unos objetivos de producción en un horizonte dado con el fin de que su actividad resulte rentable. Así pues, el objetivo de rentabilidad se puede establecer como:

$$facturación > x\ €/año$$

Para conseguir dicha facturación se debe alcanzar una productividad media para el periodo considerado de:

$$productividad\ (año) \geq P_1$$

Siendo P_1 la productividad media anual por debajo de la cual se comienzan a registrar pérdidas.

Desde el punto de vista de la gestión de riesgos conviene identificar aquellos eventos externos a la

Figura 112. Representación de la productividad mínima admisible que se debe alcanzar en la terminal para que se alcancen los objetivos económicos establecidos

FIGURA 113. Representación de la disminución que sufre la productividad de la actividad de carga y descarga ($P_2<P_1$) como resultado de la perturbación inducida por un agente climático, en este caso, el viento

propia actividad que puedan hacer que dicho nivel de productividad no se alcance. Estos eventos son todos aquellos modos de fallo o parada operativa que provocan interrupciones en la actividad ordinaria. En la Figura 113 se muestra cómo el viento puede afectar a la productividad, pero la realidad es que a lo largo de la anualidad serán múltiples las causas que produzcan una disminución del rendimiento de las operaciones. Dado que se trata de un ejemplo, únicamente nos centraremos en un agente o causa, para poder ilustrar los conceptos que se desean introducir con este texto.

Una vez que se ha desarrollado correctamente el mapa de riesgos de la terminal, la probabilidad de los modos identificados como principales causantes de dichas interrupciones operativas, la vulnerabilidad del sistema frente a los mismos serán conocidas, y se dispondrá de una estimación de las consecuencias asociadas.

A lo largo de un año se producirán una serie de eventos adversos, de mayor o menor duración, que desembocan en una disminución de la productividad media:

$$\Delta P = P_2 - P_1 < 0$$

Donde:

- P_2 es la productividad media tras la materialización de una serie de modos de fallo o parada operativa en la terminal.
- P_1 es la productividad media necesaria para que los objetivos económicos de la terminal se satisfagan.
- Si $\Delta P \geq 0$, la actividad se desarrolla con normalidad, ya que no se registran pérdidas.
- Si $\Delta P < 0$, la actividad se ve comprometida.

Por tanto, para poder identificar el origen de las perturbaciones y cuantificar la importancia relativa de cada una de ellas es de gran utilidad disponer de un mapa de riesgos. Así pues, del listado de modos de fallo o parada identificados sobre nuestra instalación se seleccionarán aquéllos que colaboren con la pérdida de rendimiento de la actividad de carga y descarga:

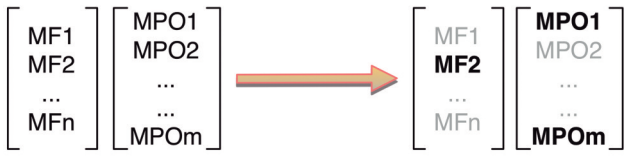


FIGURA 114. Selección de los modos de fallo/parada que colaboran en la reducción de la productivididad media anual por debajo de los límites establecidos

Estos modos de fallo/parada están caracterizados y contenidos en el mapa de riesgos, el cual muestra la probabilidad de ocurrencia de los modos, la vulnerabilidad del sistema frente a ellos y las consecuencias económicas asociadas. El mapa de riesgos se debe generar para distintos niveles de vulnerabilidad, por lo tanto el mismo mapa se ramifica a medida que se avanza en su generación. De ahí la utilidad de integrar esta información en un GIS, ya que se pueden enlazar capas de información y visualizarlas según resulte más conveniente.

Conviene recordar que el mapa de riesgos facilita la identificación de:

1. Los modos que colaboran en la reducción de la actividad.
2. La vulnerabilidad del sistema dada una combinación de agentes.
3. Las consecuencias asociadas a cada combinación y modo de fallo.

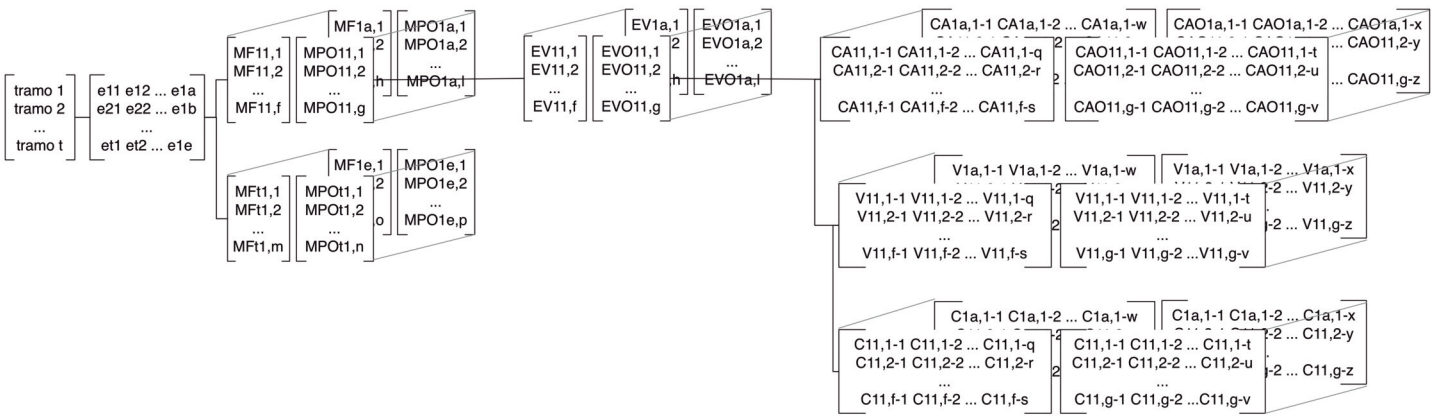


FIGURA 115. Tensores en los que se almacena la información necesaria para generar el mapa de riesgo

La Figura 115 ilustra cómo se va desglosando la información generada durante la creación del mapa de riesgos. Dicho mapa se podrá ver simplificado en caso de que sea posible descartar riesgos, ya sea por su baja probabilidad o por las escasas consecuencias derivadas de su materialización.

Así pues, y continuando con el ejemplo anterior, se sabe que la disminución de la actividad por debajo de un determinado nivel implica que se produzcan unas pérdidas para la terminal:

$$\Delta P \rightarrow \Delta C, \text{ siendo } \Delta C < 0$$

Por lo tanto, si lo que se desea es identificar las causas, o acumulación de las mismas, que pueden producir esas pérdidas económicas, será necesario acudir al mapa de riesgos. En nuestro mapa de riesgos podremos identificar los modos que de forma más significativa presentan grandes consecuencias económicas, así como los modos más probables. En este punto entra en juego el criterio experto, ya que habrá que decidir si se abordan aquellos modos que tienen asociadas mayores pérdidas económicas o aquellos que presentan mayor probabilidad:

$$\Delta C = \sum_{i=1}^{N} C_i$$

Siendo C_i cada uno de los costes identificados en el mapa de modos de fallo y de parada operativa como críticos (ver Figura 116):

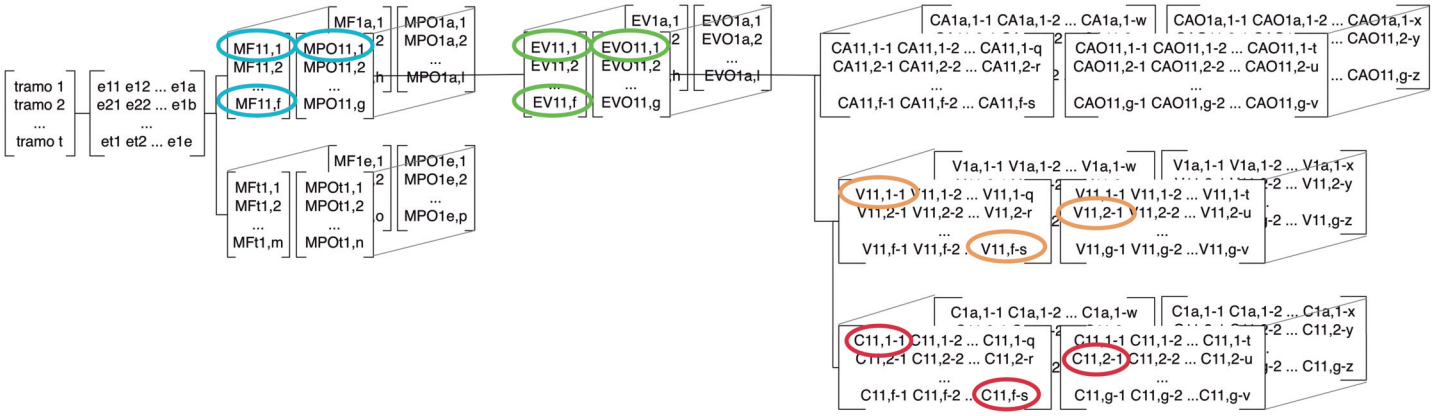


FIGURA 116. Tensores en los que se almacena la información necesaria para generar el mapa de riesgo

Cuando se indica que para gestionar el riesgo hay que recorrer el camino necesario para la obtención de los términos del riesgo pero a la inversa significa que si bien para generar el mapa de riesgos se comienza por una observación de la realidad física, y se culmina con una cuantificación económica de los posibles escenarios futuros, en la gestión se parte de un criterio económico que acota las desviaciones máximas admisibles, y así, se podrán tomar medidas preventivas para modificar los valores de probabilidad y vulnerabilidad. La importancia de la reducción de las probabilidades no radica en el valor finalmente obtenido, sino en la verdadera comprensión de las implicaciones que

esto presenta para el conjunto del proyecto o la actividad.

En el diseño de proyectos de gran envergadura esto es de vital importancia, ya que una vez que se han identificado los riesgos, se establecen criterios, ya sean económicos o de otra índole (que en última instancia se traducen en términos monetarios) para minimizar la posibilidad de que ocurran determinados modos.

En la Figura 117 se puede ver que los elementos de infraestructura dan soporte a las actividades, que son la razón de ser de las terminales. Éstas por su parte dependen y sirven a la autoridad portuaria, que gestiona a su vez la infraestructura. Por tanto, cualquier interrupción en las relaciones existentes entre cada uno de los elementos descritos afectará al resto. De ahí, como ya se indicó al comienzo de este libro, de conocer desde la perspectiva de qué *stakeholder,* o actas, se realizará el análisis y la gestión del riesgo.

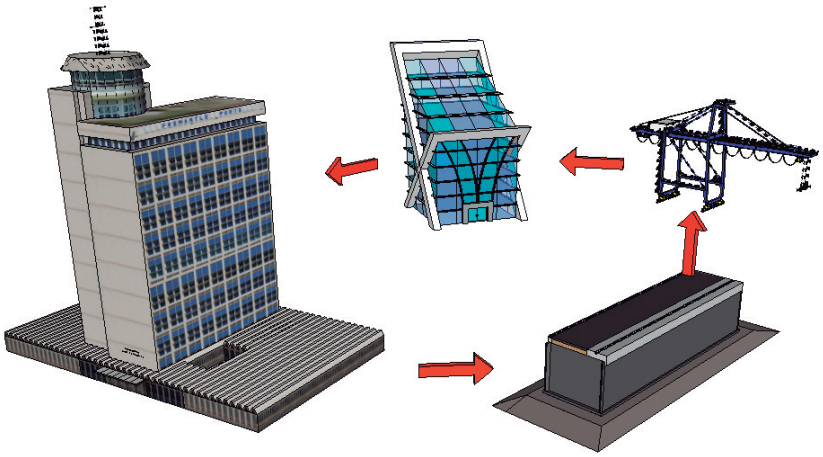


Figura 117. Relación esquemática de las relaciones funcionales entre los elementos de infraestructura, las actividades portuarias, los terminalistas y la autoridad portuaria

Agradecimientos

La redacción de este texto ha sido un proceso evolutivo, que ha ido creciendo desde su objeto inicial, el de acercar las metodologías existentes para la verificación de las obras marítimas mediante métodos probabilísticos a la comunidad portuaria, hasta lo que tiene en sus manos, un texto en el que se tratan los aspectos claves para proceder a la evaluación cuantitativa de los riesgos que afectan a las obras marítimas así como a las actividades portuarias.

Hemos recorrido el camino acompañados de grandes profesionales que han realizado valiosas aportaciones y comentarios a este trabajo. El apoyo de Puertos del Estado, y en particular de José Damián López Maldonado ha permitido llevar este texto a buen puerto, que los autores esperan sea de interés de la comunidad portuaria española.

Especial mención debe hacerse a Álvaro Campos, investigador y doctorando de la Universidad de Castilla-La Mancha, que se ha mostrado siempre dispuesto a revisar y a dotar de contenidos al texto, y cuyas críticas han permitido mejorar el resultado final.

Gracias a los compañeros del Harbor Research Laboratory (HRL-UPM), por abordar con nosotros los conceptos tan abstractos que se manejan aquí, y por ayudarnos a concretarlos y hacerlos más cercanos al usuario final. El texto ha madurado con nosotros, investigadores y profesionales del sector, lo que se ha manifestado el valor, alcance e implicaciones de las discusiones recogidas en la guía. Una mención especial Ana Alises por el ejemplo metodológico del Anexo 7 que ilustra un intento temprano de evaluar la viabilidad de la metodología.

En su fase más temprana, el presente texto contó con la colaboración y el apoyo de José María García-Valdecasas, cuyo saber hacer sirvió para lanzar y mejorar el software que dará apoyo al texto, MARCAT, creado para facilitar los análisis probabilísticos del clima marítimo. Este software puede ser descargado en la página web de Puertos del Estado.

También queremos agradecer a todos los revisores que nos han hecho llegar sus comentarios e ideas de forma tan generosa.

Y por último pero no menos importante, a nuestras familias, amigos y maestros por estar ahí, inspirándonos.

Bibliografía

(n.d.). From http://www.husdal.com/2009/12/17/risk-management-in-maritime-transportation-networks/

Álvarez, E. G. (2001). Nivmar: A storm-surge forecasting system for the Spanish waters. *Sciencia Marina*, Vol 65, 145-154.

Özcan, G. (2008). *A Generic Risk and Vulnerability Assessment Framework for International Construction Projects. Doctoral Dissertation*. Ankara: Middle-East University.

Abbas, O. (2008). Comparisons Between Data Clustering Algorithms. *The International Arab Journal of Information Technology*, 320-325.

Al-Bahar, J. & Crandall, K. (1990). Systematic Risk Management Approach for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 533-546.

Alfaro, E. (2012 **йил** 26-Junio). Algoritmos Genéticos.

Ang, A. & Cornell, C. (1975). Reliability Bases of Structural Safety and Design. *Journal of Structural Mechanics*, 1755-1769.

Ang, A. & Tang, W. H. (1984). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design.* New York: John Wiley & Sons.

Arbolí, A. (1998). *El riesgo en el seguro del transporte marítimo. Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación. Tesis Doctoral.* La Laguna: Universidad de La Laguna.

Associations, F. o. (2002). *Estándares de gerencia de riesgos. ISO 31000*.

Bajaj, J. (1997). Analysis of contractors' approaches to riesk identification in New South Wales, Australia. *Construction Management and Economics,* Vol. 15, 363-369.

Banner, M. (1990). Equilibrium Spectra of Wind Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 966-984.

Barlow, R. & Chatterjee, P. (1973). *Introduction to fault tree analysis.* Berkeley: UC Berkeley.

Bell Telephone Laboratories (1961). *Launch Control Safety Study.* Murray Hill, NJ, USA: Bell Telephone Labs.

Berkhoff, J. (1972). Computation of combined refraction and diffraction. *13th International Coastal Engineering Conference* (pp. 471-490). ASCE.

Berkhoff, J. (1976). *Mathematical models for simple harmonic linear water waves; wave refraction and diffraction. PhD Thesis.* Delft: Delft Technical University of Technology.

Bernouilli, D. (1738). Exposition of a New Theory on the Measurement of Risk. 23-36.

Besley, P. (1999). *Overtopping of seawalls - design and assessment manual.* Bristol, United Kingdom: Environment Agency.

Besley, P. (1999). *Overtopping of seawalls - design and assessment manual.* Bristol, UK: Environmental Agency.

Biesel, F. & Suquet, F. (1953). *Laboratory Wave-generating Apparatus.* St. Anthony Falls Hydraulic Laboratories.

Blanco, S. & y Carvajal, P. (--). Antecedentes del seguro a prima. Madrid, Madrid, España: Departamento de Economía Financiera y Contabilidad. Universidad Complutense de Madrid.

BMT Ltd. (1986). *Global Wave Statistics.* London.

BOE (2010). Ley 33/2010, de 5 de agosto, de modificación de la Ley 48/2003, de 26 de noviembre, de régimen económico y de prestación de servicios en los puertos de interés general.

Boij, N. R. (1999). A third generation wave model for coastal region. Part I: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, 7649-7666.

Booij, N., Ris, R. & Holthuijsen, L. (1999). A third-generation wave model for coastal regions. Part I: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 7649-7666.

Bouws, E., Günter, H., Rosenthal, W. & Vincent, C. (1985). Similarity of the wind-wave spectrum in finite depth water 1. Spectral Form. *Journal of Geophysical Research*, 975-986.

Box, G. (1979). Robustness in the Strategy of Scientific Model Building. Academic Press.

Bretschneider, C. (1959). *Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves.* Washington D.C.: Corps of Engineers.

Brooij, N., Ris, R. & Holthuijsen, L. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 7649-7666.

Brown, D. B. (1976). Fault Tree Analysis. In *Systems Analysis and Design for Safety* (pp. 152-193). Prentice-Hall.

Bryant, C. & Peck, D. (2006). *21st Century Sociology: a Reference Handbook*. SAGE Publications.

Camarero, A. & al., e. (2009). Optimización y estudio de la capacidad de las terminales portuarias mediante modelos de simulación y explotación. Determinación de los niveles de servici. *X Jornadas Españolas de Costas y Puertos* (pp. 745-758). Santander.

Campos, A. & Castillo, C. (2012). *Avances en el diseño de diques fusibles. Trabajo fin de máster. Máster en Territorio, Infraestructuras y Medio Ambiente.* Ciudad Real: Universidad de Castilla-La Mancha.

Camus, P. (2009). *Metodologías para la definición del clima marítimo.* Santander (España): Universidad de Cantabria.

Cano, M. & Cruz, A. (2002). Integrated Methodology for Project Risk Management. *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 473-485.

Cartwright, D. & Longuet-Higgins, M. (1956). The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function. *Proceedings of the Royal Society of London*, Series A, 212-232.

Castillo, E. (1988). *Extreme Value Theory in Engineering.* San Diego: Academic Press, Inc.

Castillo, E. & Pruneda, R. (2001). *Estadística Aplicada*. Santander (Spain): Moralea.

Castillo, E. & Pruneda, R. (2001). *Estadística Aplicada.* Santander (España): Moralea.

Cavanie, A., Arhan, M. & Ezraty. (1976). A statistical relationship between individual heights and periods of storm waves. *Behaviour of Offshore Structures*, 235-244.

Chang, S. (1978). Production function and capacity utilization of the port of Mobile. *Maritime Policy and Management*, 297-305.

CLASH (2000-2010). *Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Prediction and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping.* Fifth Framework Programme of the EU, Contract n:EVK3-CT-2001-00058.

Clemens, P. (2002 **йил** Febrero). Fault Tree Analysis.

Commission, N. R. (1975). *Reactor Safety Study. Report WASH-1400.*

Covello, V. & Mumpower, J. (1985). Risk Analysis and Risk Management: An Historical Perspective. *Risk Analysis*, 103-119.

Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection.* London: Murray.

Davidian, I., Lopatukhin, L. & Rozhkov, W. (1985). *Vetzovoye Volneniye kak Veroyatnostnyy Gidrodinamicheskiy Process*. Leningrado.

Davis, L. (1991). *Handbook of Genetic Algorithms.* Van Nostrand Reinhold.

De Monie, G. (1988). *Monografías de la UNCTAD sobre Gestión de Puertos - Medición y Evaluación del Rendimiento y de la Productividad de los Puertos*. Nueva York: UNCTAD, United Nations.

DeSieno, D. (1988). Adding a Conscience to Competitive Learning. *IEEE Proceedings on Numerical,* 117-124.

Dikmen, I., Birgonul, M. & Arikam, A. (2004). A Critical Review of Risk Management Support Tools. *Association of Researchers in Construction Management.*

Ditlevsen, O. & Madsen, H. (1996). *Structural Reliability Methods*. Chichester: John Wiley.

Donelan, M., Hamilton, J. & Hui, W. (1985). Directional Spectra of Wind-Generated Waves. *Phil. Trans. Royal Society*, 509-562.

Ebberle, D., Newlin, L., Sutharshana, S. & Moore, N. (1994). Alternative Computational Approaches for Probabilistic Fatigue Analysis.

Eckart, C. (1952). *The propagation of gravity waves from deep to shallow water.* National Bureau of Standards.

Estado, P. d. (2001). *Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias. R.O.M. 0.0*. Madrid: Ministerio de Fomentio.

Eurotop Overtopping Manual (2007). *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures Assessment Manual.*

Ezell, B. (2007). Infrastructure Vulnerability Assessment Model. *Risk Analysis*, 571-583.

Fiessler, B., Numann, H. & Rackwitz, R. (1979). Quadratic Limit States in Structural Reliability. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 105. 661-676.

Franco, C. & Franco, L. (1999). Overtopping formulae for caisson breakwaters with non-breaking 3-d waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering*, 98-107.

Franco, L., de Gerloni, M. & van der Meer, J. (1994). Wave Overtopping on Vertical and Composite Site Breakwaters. *24th International Conference on Coastal Engineering* (pp. 1013-1044). Kobe: ASCE.

Franco, L., de Gerloni, M. & Van der Meer, J. (1994). Wave overtopping on vertical and composite site breakwaters. *24th International Conference on Coastal Engineering* (pp. 1013-1044). Kobe: ASCE.

Fukuda, N., Uno, T. & Irie, I. (1974). Field observations of wave overtopping of wave absorbing revetment. *Coastal Engineering in Japan*, 117-128.

Fukuda, N., Uno, T. & Irie, I. (1974). Field observations of wave overtopping of wave absorbing revetment. *Coastal Engineering in Japan,* 117-128.

García-Valdecasas, J. (2010). CISNE Software (Integrated SwaN Environment).

Giddens, A. (1999). Risk and Responsibility. *The Modern Law Review*.

GIOC (2000). *Documento de referencia. Vol. 1. Dinámicas.* Cantabria: Universidad de Cantabria.

Goda, Y. (1983). *Analysis of wave grouping and spectra of long-travelled swell.* Port and Harbor Research Institute.

Goda, Y. (1970). *Numerical Experiments on Wave Statistics with Spectral Simulations.* Port and Harbour Research Institute.

Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures.* New Jersey: World Scientific.

Goda, Y. (1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of a wave spectrum. *Coastal Engineering in Japan*, 39-52.

Goda, Y., Kishira, Y. & Kamiyama, Y. (1975). Laboratory investigation on the overtopping rate of seawalls by irregular waves. *Report of the Port and Harbor Research Institute*, 3-44.

Goda, Y., Kishira, Y. & Kamiyama, Y. (1975). *Laboratory investigation on the overtopping rate of seawalls by irregular waves.* Port and Harbour Research Institute.

Godfrey, P. (1996). *Control of Risk: A Guide to the Systematic Management of Risk from Construction.* London: Construction Industry Research and Information Association.

Goldberg, D. (1989). Genetic Algorithms in Search, *Optimization and Machine Learning*. Wesley Publishing Company.

González, N. (2007). *Metodología para la determinación de parámetros de diseño de terminales portuarias de contenedores a partir de datos de tráfico marítimo.* Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Graunt, J. (1662). *Natural and Political Observations Made Upon the Bills of Morality.*

Green, M. (1994). Wave height distribution in storm sea effect of wave breaking. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 283-301.

Grier, B. (1980). One Thousand Years of Mathematical Psycology. *Society for Mathematical Psycology Convention.* Madison, Wisconsin.

Grier, B. (1981). The Early History of the Theory and Management of Risk. *Judgement and Decision Making Group Meeting.* Philadelphia, Pennsylvania.

Guedes Soares, C. (2008). Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe. *Coastal Engineering. Special Issue*, 1-3.

Guedes Soares, C. W. (2002). A 40 Years Hindcast of Wind, Sea Level and Waves in European Waters. *21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (ASME)* (pp. OMAE2002-28604). New York.

Guedes Soares, C. & Cunha, C. (2000). Bivariate autoregressive models for the time series of significant wave height and mean period. *Coastal Engineering,* Vol. 40. 297-311.

Gómez, M. A. (2005). Wave forecasting at the Spanish coasts. *Journal of Atmospheric and Ocean Science*, 389-405.

Gómez, R., Molina, R. & Castillo, C. (2009). Propuesta de una metodología para la verificación de la fiabilidad de una estructura marítima mediante la aplicación de la probabilidad condicionada. In *X Jornadas Españolas de Costas y Puertos.* Santander.

Halley, E. (1693). An Estimate of the Degrees of Mortality of Mankind, Drawn from Curious Tables of the Births and Funerals at the City of Breslau, with an Attempt to Ascertain the Price of Annuities Upon Lives. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 596-610.

Hammer, W. (1972). Fault Tree Analysis. In *Handbook of System and Product Safety* (pp. 238-246). Prentice-Hall.

Hasofer, A., & Lind, N. (1974). An Exact and Invariant First-Order Reliability Format. *Journal of Structural Mechanics*, 111-121.

Hasselman, K. E. (1973). Measurements of wind wave growth and swell decay during the joint North Sea wave project (JONSWAP). *Erganzugsh. Dtsch. Hydrogr.*

Hasselmann, D., Dunckel, M., & Ewing, J. (1980). Directional Wave Spectra Observed during JONSWAP 1973. *Journal of Physical Oceanography*, 1264-1280.

Helton, J. C. & Davis, F. (2003). Latin Hypercube Sampling and the Propagation of Uncertainty in Analysis of Complex Systems. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 81. 23-69.

Hilera, J. & Martínez, V. (2000). *Redes Neuronales Artificiales.* Madrid: Alfaomega.

Hillson, D. (2002). Extending the Risk Process to Manage Opportunities. *International Journal of Project Management*, 235-240.

Ho, K., Leroi, E. & Roberds, B. (2000). *Quantitative Risk Assesment: Application, Myths and Future Direction.*

Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems.* Michigan: University of Michigan Press.

http://www.archives.gov/research/guide-fed-records/groups/037.html. (n.d.).

http://www.globalwavestatisticsonline.com/. (n.d.).

http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html. (n.d.).

http://www.oceanor.no/Services/WWWS. (n.d.).

Huang, N., Long, S., Tung, G., Yuen, Y. & Bliven, L. (1981). A unified two parameter wave spectral model for a general sea state. *Journal of Fluid Mechanics*, 203-224.

Hughes, S. (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. Singapore: World Scientific.

IITC (1966). *Recommendations of the 11th International Towing Tank Conference.* Tokyo.

Iman, R., Helton, J. & Campbell, J. (1981). An approach to sensitivity analysis of computer models, Part 1. Introduction, input variable selection and preliminary variable assessment. *Journal of Quality Technology*, Vol. 13. 174-183.

Institute of Electrical and Electronics Engineering (1990). *IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries.* New York.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (1990). *IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries.* New York: IEEE.

Isasi, P. & Galván, I. (2004). *Redes Neuronales Artificiales. Un enfoque práctico*. Madrid: Prentice Hall.

ISSC (1964). International Ship Structures Congress. *ISSC*. Delft (Netherlands).

Izaguirre, C., Méndez, F., Menéndez, M., Luceño, A. & Losada, I. (2010). Extreme wave climate variability in southern Europe using satellite data. *Journal of Geophysical Research*.

Jaafari, A., & Anderson, J. (1995). Risk assessment on development projects, the case of lost opportunities. *Australian Institute of Building Projects.*

Jara-Díaz, S., Cortes, C., Vargas, A. & Martínez-Budría, E. (1997). Marginal costs and scale economies ins panish ports. *European Transport Forum* (pp. 137-147). London.

Jara-Díaz, S., Martínez-Budría, E., Cortes, C. & Basso, L. (2002). A multioutput cost function for the services of spanish ports' infrastructure. *Transportation,* 419-437.

Jassen, P. A. (2003). *Error Estimation of Buoy, Satellite and Model Wave Height Data.* Technical Memorandum 402. ECMWF. 17 pp.

Jassen, P. (2004). *The Interaction of Ocean Waves and Wind.* Cambridge University Press. 300 pp.

Kammen, F. M. & Hassezahl, D. M. (2001). *Should we risk it?: exploring environmental, health, and technological problem solving (2nd ed.)*. Princeton Universtiy Press.

Kaplan, S. & Garrick, B. (1981). On the Quantitative Definition of Risk. *Risk Analysis,* Vol. 1, 11-37.

Kennard, R. & Stone, L. (1969). Computer aided design of experiments. *Technometrics*, 137-148.

Kim, M. & Sachish, A. (1986). The structure of production, technical change and productivity in a port. *International Journal of Industrial Economics,* 209-223.

Kitaigorodskii, S. (1961). *Application of the theory of similarity to the analysis of wind-generated wave motion as a stochastic process.*

Kohonen, T., Kaski, S. & Lappalainen, H. (1997). Self-organized formation of various invariant-feature filters in the adaptive-subspace SOM. *Neural Computation*, 1321-1344.

Kristiansen, S. (2005). *Maritime Transportation. Safety Management and Risk Analysis*. Elsevier.

Krylov, Y. (1966). *Spektralnyye Metody Issledovaniya i Razcheta Vetrovykh Voln.* Leningrado.

Kung, S. (1993). *Digital Neural Networks*. Prentice Hall.

Kuwashima, S. & Hogben, N. (1986). The Estimation of Wave Height and Wind Speed Persistence Statistics from Cumulative Probability Distributions. *Coastal Engineering*, 563-590.

Laplace, P. (1812). *Theorie Analitique de Probabilities*. París.

Le Méhauté, B. & Hanes, d. (1990). *Ocean Engineering Science.* John Wiley and Sons.

Lee, W., Grosh, D., Tillman, F. & Lie, C. (1985). Fault Tree Analysis, Methods and Applications - A Review. *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-34. Nº 3.

Lirola, J. (1993). *El poder naval de Al-Ándalus en la época del Califato Omeya. Tesis Doctoral.* Granada: Universidad de Granada.

Long, M. N. (1999). *Probabilistic Design Methodology for Composite Aircraft Structures.* U.S. Department of Transportation.

Longuet-Higgins, M. (1983). On the Join Distribution of Wave Periods and Amplitudes in a Random Wave Field. *Royal Society* (pp. 241-258).

Longuet-Higgins, M. (1963). The Effect of Nonlinearities on Statistical Distributions in the Theory of Sea Waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 459-480.

Longuet-Higgins, M. & Stewart, R. (1961). The Changes in Amplitude of Short Gravity Waves on Steady Non-Uniform Currents. Journal of Fluid Mechanics , 529-549.

Losada, I. & Liu, P. (2000). Modelos matemáticos y numéricos para el estudio de la agitación portuaria. *Estudios e Investigaciones Marinas,* 47-67.

Louis Harris and Associates (1980). *Risk in a Complex Society. Public opinion survey conducted for Marsh and McLennan, Inc*. New York.

Luceño, A., Menéndez, M. & Méndez, F. (2006). The effect of temporal dependence on the estimation of the frequency of extreme ocean climate events. *Proceedings of the Royal Society A* (pp. 1638-1697).

López, A. (2011). Apuntes de la asignatura "Proyectos". 5º curso de Ingeniería de Telecomunicación. . Universidad Rey Juan Carlos.

MacCollum, D. (2006). *Construction Safety Engineering Principles: Designing and Managing Safer Job Sites*. McGraw-Hill Professional.

Madsen, H., Krenk, S. & Lind, N. (1986). *Methods of Structural Safety*. New Jersey: Prentice Hall.

Mahadaven, S. & Chamis, C. (1993). Structural System Reliability Under Multiple Failure Modes.

Manual, E. O. (2007). *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures Assessment Manual.*

Martín, B. & Sanz, A. (2006). *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos.* Madrid: RA-MA.

Martínez-Budría, E. (1996). Un estudio econométrico de los costes del sistema portuario español. *Revista Asturiana de Economía,* 135-149.

Martínez-Budría, E., González-Marrero, R. & Díaz, J. (1998). *Análisis económico de las Sociedades Estatales de Estiba y Desestiba en España*. Tenerife: Universidad de La Laguna.

Massel, S. (1996). *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction.* Singapore: World Scientific.

Massel, S. (1996). *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction.* Singapore: World Scientific.

Massel, S. (1996). *Ocean Surface Waves; their Physics and Prediction.* Singapore: World Scientific.

Masselink, G. & Short, A. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 785-800.

McKay, M., Beckman, R. & Conover, W. (1979). A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, Vol. 21. 239-245.

Melchers, R. (1999). *Structural Reliability: Analysis and Prediction*. John Wiley.

Mendenhall, W., Beaver, J. & Duhan, R. (1986). *Statistics for Management and Economics.* Prindle Weber & Schmidt Publishers.

Méndez, F., Menéndez, M., Luceño, A. & Losada, I. (2006). Estimation of the long-term variability of extreme significant wave height using a time-dependent peak over threshold model. *Journal of Geophysical Research.*

Méndez, F., Menéndez, M., Luceño, A., Medina, R. & Graham, N. (2008). Seasonality and duration in extreme value distributions of significant wave height. *Ocean Engineering,* 131-138.

Metropolis, N. U. (1949). 1949. J*ournal of American Statistical Association*, Nº 247, 335-341.

Michalewicz, Z. (1994). *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs.*

Mills, A. (2001). A Systematic Approach to Risk Management for Construction. *Structural Survey,* Vol 19. Number 5, 245-252.

Mitsuyasu, H., Suhaya, T., Mizuno, T., Okhuso, M., Honda, T. & Rikiishi, K. (1975). Observation of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy. *Journal of Physical Oceanography*, 750-760.

Mo Nui Ng, H. (2006). *Dynamic Decision Support for Contingency Management and Allocation for Construction Projects.* Doctoral Dissertation. Urbana-Champaign: University of Illinois.

Modarres, M., Kaminskiy, M. & Krivtsov, V. (1999). *Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide.* New York: Marcel Dekker.

Molina, R. (2011). Fiabilidad y Riesgo, marco normativo. *Apuntes de la asignatura "Gestión y Explotación Portuaria" .* Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Monfort, A. (2009). Estimación de la capacidad por línea de atraque y de almacenamiento en terminales de contenedores. *X Jornadas Españolas de Costas y Puertos* (pp. 759-768). Santander.

Monfort, A., Aguilar, J., Gómez-Ferrer, R., Arnau, E., Martínez, J., Monterde, N., et al. (2001). T*erminales marítimas de contenedores: el desarrollo de la automatización*. Valencia (Spain): Fundación Instituto Portuario de Estudios y Cooperación de la Comunidad Valenciana.

Morgan, G., Rawlings, G. & Sobkowicz, J. (1992). Evaluating Total Risk to Communities from Large Debris Flows. *Proceedings of the 1st Canadian Symposium on Geothecnique and Natural Hazards* (pp. 225-236). Vancouver, Canadá.

NASA (2009). *Bayesian Inference for NASA Probabilistic Risk and Reliability Analysis.*

NASA (2011). *NASA System Safety Handbook.*

NASA (2011). *Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners.*

Neapolitan, R. (2000). *Learning Bayesian Networks.* Illinois: Northwestern Illinois University.

Nedeß, C., Friedewald, A., Wagner, L. & Neumann, L. (2006). *Risk Management in Maritime Transportation Networks.* Berlin: Erich Smidt Verlag.

Neumann, G. (1953). *On ocean wave spectra and a new method of forecasting wind-generated sea.* Vicksburg: Coastal Engineering Research Center.

Nuclear Regulatory Commission. (1975). *Reactor Safety Study.*

Ochi, M. & Hubble, E. (1976). Sic parameter wave spectra. *International Conference on Coastal Engineering.* Honolulu: ASCE.

Ochi, M. & Hubble, E. (1976). Sic Parameter Wave Spectra. *15th International Conference on Coastal Engineering.* Honolulu, Hawaii: ASCE.

OECD/International Transport Forum. (2008). Risk Sharing in Public-Private Partnerships. In I. T. OECD, *Transport Infrastructure Investment: Options for Efficiency* (pp. 121-136). OECD Publishing.

Oil Companies International Marine Forum. (1978). *Guidelines and Recommendations for the Safe Mooring of Large Ships at Piers and Sea Islands*. London (England): Witherby and Co. Ltd.

Olsson, A., Sandberg, G. & Dahlblom, O. (2003). On Latin Hypercube Sampling for Structural Reliability Analysis. *Structural Safety*, Vol. 25. 47-68.

Oppenheim, L. (1977). *Ancient Mesopotamia.* Chicago: University of Chicago Press.

Owen, M. (1980). *Designs of seawalls allowing for wave overtopping. Reperto No. EX 924*. UK: HR Wallingford.

Peregrine, D. (1967). Long waves on a beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 815-882.

Pery, P. & Camarero, A. (2003). Determinación de la línea de atraque en los puertos españoles. Departamento de Ingeniería Civil – Transportes. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Philips, O. (1958). The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves. *Journal of Fluid Mechanics,* 426-434.

Pierson, W. (1955). Wind Generated Gravity Waves. In H. Landsberg, *Advances in Geophysics* (pp. 93-175). New York: Elsevier.

Pierson, W. & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research*, 5181–5190.

PMBoK (2004). *A Guide to Project Management Body of Knowledge.* New Square, PA, USA: Project Management Institute.

podaac.jpl.nasa.gov. (n.d.).

PROJECT, C. (2000-2010). *Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neuronal Network Prediction and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping.* Fifth Framework Program of the EU.

Puertos del Estado (2008). *Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas*. Madrid: Puertos del Estado.

Puertos del Estado (2008). *Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas.* Madrid: Ministerio de Fomento.

Puertos del Estado (2001). *Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias. PARTE I. R.O.M.0.0*. Madrid: Puertos del Estado.

Puertos del Estado (2009). *R.O.M. 1.0-99: Recomendaciones del diseño y ejecución de las obras de abrigo.* Madrid: Puertos del Estado.

Puertos del Estado (2009). *Recomendaciones del diseño y ejecución de las obras de abrigo*. Madrid: Puertos del Estado.

Puertos del Estado (2001). *ROM 0.0. Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias.* Madrid: Puertos del Estado.

Puertos del Estado (2001). *ROM 0.0. Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias.* Madrid: Ministerio de Fomento.

Puertos del Estado (1991). ROM 0.3-91: *Recomendación para Oleaje y Atlas de Clima Marítimo en Litoral Español.* Madrid: Puertos del Estado.

Puertos del Estado (1995). *ROM 0.4-95. Recomendación de Obras Marítimas con Acciones Climáticas II: Viento.* Madrid: Ministerio de Fomento.

Puertos del Estado (2011). *ROM 2.0. Obras de atraque y amarre*. Madrid: Puertos del Estado.

Puertos del Estado (2011). *Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante.* Madrid: Organismo Público Puertos del Estado.

Rackwitz, R. & Fiessler, B. (1978). Structural Realiability Under Combined Load Sequences. *Journal of Computers and Structures,* Vol. 9. 489-494.

RAMP (1998). *Risk Analysis and Management for Projects.* London, UK: Thomas Telford.

Raz, T., Shenhar, A. & Dvir, D. (2002). Risk Management, Project Success and Technological Uncertainty. *R&D Management,* 101-109.

Reeves, C. & Yamada, T. (1998). Genetic Algorithms, Path Relinking and the Flowshop Sequencing Problem. *Evolutionary Computational Journal (MIT Press)*, 230-234.

Rekers, R., Connell, D. & Ross, D. (1990). The development of a production function for a container terminal in the port of Melbourne. *Papers of the Australiasian Transport Research Forum,* 209-218.

Rice, S. (1994). The mathematical analysis of random noise. *Bell System Technical Journal,* 282-332.

Rodríguez, A. (2009). *Prospectiva Económica de Interés Portuario.* Madrid: Puertos del Estado.

Rodríguez-Aragón, L. J. (2011 йил Marzo). Simulación, Método de Montecarlo.

Romero, D. (2010). *Evaluación de la protección portuaria en terminales de contenedres. Aplicación del código ISPS*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Rosbjerg, D., Madsen, H. & Rasmussen, P. (1992). Prediction in partial duration series with generalized pareto-distributed exceedances. *Water Resources*, 3001-3010.

Sarewitz, D., Pielke, J. R. & Keykhah, M. (2003). Vulnerability and Risk: some thoughts from a political and policy perspective. *Risk Analysis*, 805-810.

Saurí, S. E. (2009). Estudio de la capacidad de terminales marítimas de carga rodada. *X Jornadas Españolas de Costas y Puertos* (pp. 783-792). Santander.

Schneider, J. (1997). *Introduction to Safety and Reliability of Structures*. Zürich (Suiza): Structural Engineering Documents.

Schneider, J. (1997). *Introduction to Safety and Reliability of Structures*. Zürich (Switzerland): Structural Engineering Documents.

Serrano, O. y. (2006). Banco de datos oceanográficos: conocer para decidir. Revista de Puertos, 44-51.

Silva, R. (2002). *Análisis y descripción estadística del oleaje.* Universidad Nacional Autónoma de México.

Solari, S. (2011). *Metodologías de simulación de agentes naturales y desarrollo de sistemas. Modelo de verificación y gestión de terminales portuarias. Aplicación al puerto de la Bahía de Cádiz*. *Tesis Doctoral.* Granada: Universidad de Granada.

Solari, S. & Losada, M. (2011). Non-stationary wave height climate modeling and simulation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116.

Solari, S. & Losada, M. (2012). Unified distribution models for met-ocean variables: Application to series of significant wave height. *Coastal Engineering*, Vol 68. 67-77.

Solari, S. & van Gelder, P. (2012). On the use of Vector Autoregressive (VAR) and Regime Switching VAR models for the simulation of sea and wind state parameters.

Soldevilla, M. J. (2009). *Caracterización de regímenes medios y extremales I. R.O.M. 03-91, 0.4-95 y 0.0-01.* Madrid: CEPYC. Ministerio de Fomento.

Songer, A. (1997). Risk Analysis for Revenue Dependent Infrastructure Projects. *Construction Management and Economics*, Vol. 15 , 377-382.

SPM (1984). *Shore Protection Manual.* Washington: Coastal Engineering Research Center.

Stefanakos, C. & Belibassakis, K. (2005). Nonstationary stochastic modelling of multivariate long-term wind and wave data. *Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering.* Halkidiki (Grecia): ASME.

Sóbol, I. M. (1979). *Método de Montecarlo. Lecciones populares de matemáticas.* Moscú: MIR.

Tayfun, M. (1990). Distribution of large wave heights. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering,* 686-707.

Tayfun, M. (1993). Joint distribution of large wave heights and associated periods. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering,* 261-273.

Thompson, P., Cai, Y., Reeve, D. & Stander, J. (2009). Automated threshold selection methods for extreme wave analysis. *Coastal Engineering,* 1013-1021.

Thoresen, C. A. (2003). *Port Designer's handbook: Reccomendations and Guidelines.* Thomas Telford Limited.

Toba, Y. (1973). Local balance in the air-sea boundary processes I: On the growth process of wind waves. *Journal of Oceanography*, 109-120.

Tolman, H. L. (1991). A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. *Journal of physical Oceanography*, Vol. 21. 782-797.

Tolman, H. L. (1999). *User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB.* Technical Note 166. 110 pp.

Tolman, H. L. (2002). User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. Technical Note 222. 139 pp: NOAA/NWS/NCEP/MMAB.

Tomás, A. (2009). *Metodologías de calibración de bases de datos de reanálisis de clima marítimo.* Tesis Doctoral: Universidad de Cantabria.

Tongzon, J. (1993). The Port of Melbourne Authority's pricing policy: its efficiency and distribution implications. *Maritime Policy and Management*, 197-203.

Torres-Zúñiga. (2010). *Introducción a la técnica de Montecarlo con Matlab.* Retrieved 2012 from www.slideshare.net/vicetz/montecarlo-en-matlab

Tovar (2002). *Análisis multiproductivo de los costes de manipulación de mercancías en terminales portuarias. El puerto de La Luz y de Las Palmas. Tesis Doctoral*. Las Palmas de Gran Canaria (Spain): Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Tovar, B., Jara-Díaz, S. & Trujillo, L. (2004-2006). *Funciones de producción y costes y su aplicación al sector portuario. Una revisión de la literatura*. Las Palmas de Gran Canaria (Spain): Universidad de La Laguna.

Trimpop, R. (1994). *The Psycology of Risk Taking Behaviour.* Elsevier.

Tvedt, L. (1990). Distribution of Quadratic Forms in Normal Space Application to Structural Reliability. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 116. 1186-1997.

UNDRO (1979). *Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report of Expert Group Meeting.* Génova, Italia.

Universidad de Cantabria. *Atlas de inundación del litoral peninsular español.* GIOC. Universidad de Cantabria.

University of Washington. (1965). *System Safety Symposium.* Seattle.

University, N. (2012 йил Junio). *JISC infoNet.* Retrieved 2011 from http://www.jiscinfonet.ac.uk/

US Department of Energy. (2003). *Risk Management.* Office of Management, Budget and Evaluation of Project Management Practices.

Välilä, T. (2005). How expensive are cost savings? On the economics of public-private partnerships. *EIB Papers,* 95-119.

Van der Meer, J., Van Gent, M., Pozueta, B., Verjaeghe, H., Steendam, G. & Medina, J. (2005). Application of neural network to predict wave overtopping at coastal structures. *ICE, Coastlines, Structures and Breakwaters*, 259-268.

Van der Meer, J., Verhaeghe, H. & Steendam, G. (2005). *Database on wave overtopping at coastal structures.* The Netherlands.

Vélez, J. (2012 йил Octubre). Apuntes de clase de la asignatura Aplicaciones Industriales. *Máster Universitario en Visión Artificial*. Móstoles, Madrid, España.

Velez, J., Moreno, A., Sánchez, A. & Esteban, J. (2003). *Visión por computador.* Dykinson.

Verhaeghe, H. (2005). *Neural network prediction of wave overtopping at coastal structures. Doctoral Dissertation.* Ghent University.

Villagran, J. (2006). *Vulnerability Assessment in the Context of Disaster - Risk, a Conceptual Methodological Review.* United Nations University.

WADMI Group: Hasselman, S. H. (1988). The WAM Model- A Thrid Generation Ocean Wave Prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 18. Pp 1775-1810.

Wikipedia, la enciclopedia Libre. (n.d.). From http://en.wikipedia.org/wiki/Risk_managemen

Williams, P. (1995). A regulation eveluation system: a decision support system for the Building Code of Australia. *Construction management and Economics,* Vol. 13, 197-208.

Wood, W. J. & Conway, M. (2006). Subjecive Impact, Meaning Making and Current and Recalled Emotions for Self-Defining Memories. *Journal of Personality*, Vol. 74. Issue 3. 811-846.

Wood, W. & Conway, M. (2006). Subjective Impact, Meaning Making and Current and Recalled Emotions for Self-Defining Memories. *Journal of Personality,* 811-846.

Woodruff, S. D. (1987). A Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. 68. No. 10, 1239-1250.

Wu, J. (1969). Wind stress and surface roughness at air-sea interface. *Journal of Geophysical Research*, 209-220.

www.aviso.oceanobs.com. (n.d.).

Zhang, H. (2007). A redefinition of the project risk process: using vulnerability to open up the event-consequence link. *International Journal of Project Management*, 694-701.

Zhang, L., Xu, Y. & Liu, Y. (2011). *Assessment of Levee Breaching Risks to the Pearl River Delta.* Vogt, Schuppener, Straub & Bräu.

ANEXOS

Índice de Anexos

ANEXO 1. GLOSARIO DE TÉRMINOS RELACIONADOS CON EL RIESGO 183

ANEXO 2. FUENTES DE INFORMACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO 187

1. Introducción 189
2. Datos visuales 189
3. Medidas remotas: satélites 192
4. Estadísticas elaboradas 193
5. Datos sintéticos: SIMAR 194
   - 5.1. SIMAR-44 195
   - 5.2. WANA 196
6. Datos instrumentales 197
   - 6.1. Red costera (REDCOS) 197
   - 6.2. Red exterior (REDEXT) 197
   - 6.3. Radares 198
   - 6.4. Conjunto de datos externos 199
7. Propagaciones 199
   - 7.1. Conjunto de datos Propagación 201
8. Predicciones 202
   - 8.1. Predicción a escala oceánica 202
   - 8.2. Predicción a escala portuaria 202
   - 8.3. El proyecto SAMPA: Sistema Autónomo de Medición, Predicción y Alerta 203
9. Tabla resumen de las fuentes de información públicas y sus características 205
   - 9.1. Oleaje 206
   - 9.2. Parámetros atmosféricos 210
   - 9.3. Nivel del mar 212
   - 9.4. Parámetros oceanográficos 212
10. Referencias 214

ANEXO 3. FUNDAMENTOS PROBABILÍSTICOS PARA EL CÁLCULO DEL RIESGO 215

1. Conceptos básicos de probabilidad 217
   - 1.1. Experimento determinista y experimento aleatorio 217
   - 1.2. Sucesos 217
2. Teoría de la probabilidad 219

2.1. Axiomas: Propiedades de la probabilidad 219
2.2. Tipos de probabilidad 220
2.3. Teorema de la probabilidad total 223
2.4. Teorema de Bayes 223
3. Variables aleatorias 224
3.1. Variables aleatorias unidimensionales 224
3.2. Variables aleatorias bidimensionales 225
4. Estadísticos 225
4.1. Estadísticos de tendencia central 226
4.2. Estadísticos de dispersión 226
4.3. Otros estadísticos 227
5. Momentos 227
5.1. Momentos de variables unidimensionales 228
5.2. Momentos de variables n-dimensionales 229

ANEXO 4. VARIABLES ALEATORIAS Y ESPECTRALES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE AGENTES 231

1. Variables aleatorias unidimensionales más comunes 233
1.1. Introducción 233
1.2. Variables aleatorias unidimensionales 233
1.2.1. Bernoulli 233
1.2.2. Binomial 233
1.2.3. Poisson 234
1.2.4. Uniforme 235
1.2.5. Exponencial 236
1.2.6. Gamma 237
1.2.7. Beta 238
1.2.8. Normal 239
1.2.9. Log-Normal 240
1.3. Variables compuestas 241
1.3.1. Casos 241
1.4. Distribuciones truncadas 241
1.4.1. Truncamiento por la derecha 241
1.4.2. Truncamiento por la izquierda 242
1.4.3 Truncamiento por la izquierda y por la derecha 242

1.5. Distribuciones asintóticas 242
1.5.1. Weibull 243
1.5.2. Gumbel 245
1.5.3 Frechet 247
1.6. Estadísticos de Orden 248
1.6.1. Distribución del máximo 249
1.6.2. Distribución del mínimo 249
1.6.3 Distribución conjunta de varios estadísticos de orden 249
1.7. Aplicaciones 250
1.7.1. Distribución de los desplazamientos de la superficie libre 250
1.7.2. Distribución de las alturas de ola 251

2. Variables aleatorias N-dimensionales 254
2.1. Distribución de Cavané *et al.* 254
2.2. Distribución de Longuet-Higgins 255
2.3. Distribuciones de periodos de ola 255
2.3.1. Distribución de Cavanie, Arhan & Ezraty, 1976 255
2.3.2. Distribución de Longuet-Higgins, 1983 256
2.3.3. Variable normal N-dimensional 256

3. Datos observados y modelos probabilísticos: Estimación de parámetros 258
3.1. Procedimiento general 258
3.2. Funciones más empleadas 259
3.2.1. Normal 259
3.2.2. Lognormal 259
3.2.3. Weibull de máximos 259
3.2.4. Weibull de mínimos 259
3.2.5. Gumbel de máximos 259
3.2.6. Gumbel de mínimos 259
3.2.7. Frechet de máximos 259
3.2.8. Frechet de mínimos 260
3.3. Ejemplos 260
3.3.1. Normal 260
3.3.2. Lognormal 260
3.3.3. Gumbel de máximos 261

4. Parámetros espectrales 262
4.1. Momentos espectrales 262
4.2. Anchura espectral 262
4.3. Factor de apuntamiento 262
4.4. Dispersión direccional 262
4.5. Modas del espectro 264

5. Funciones de densidad espectral más comunes 265
5.1. Introducción 265
5.2. El modelo de Philips 265
5.3. Espectros 266
5.3.1. Espectro de Neumann 266
5.3.2. Espectro de Bretschneider-Mitsuyasu 266
5.3.3. Espectro de Kitaigorodskii-Toba 267
5.3.4. Espectro de Pierson-Moskowitz 268
5.3.5. Espectro ISSC 269
5.3.6. Espectro de Krylov 269
5.3.7. Espectro ITTC 269
5.3.8. Espectro JONSWAP 270
5.3.9. Espectro Davidian *et al.* 271
5.3.10. Espectro Wallops 272
5.3.11. Espectro de Ochi-Hubble 272
5.3.12. Espectro TMA 273

6. Generación de series temporales a partir de un espectro 274
6.1. Función de transferencia: Definición 274
6.2. Alcance y objeto 274
6.3. Obtención de la función de transferencia 274
6.4. Formulación analítica de la función de transferencia: Oleaje regular 275
6.4.1. Solución para un caso general 275
6.5. Formulación analítica de la función de transferencia: Oleaje irregular 275
6.5.1. Ejemplo de aplicación 276
6.6. Método experimental 277
6.7. Referencias bibliográficas 277

ANEXO 5. REGÍMENES 281
1. Introducción 283
2. Régimen medio 283
2.1. Log-normal 285
2.2. Weibull biparamétrica 285
3. Régimen de cola superior 288
3.1. Método de los máximos anuales para la selección de los datos con los que se realizará el análisis de cola superior 292
3.2. Método POT para la selección de los datos con los que se realizará el análisis de cola superior 292
3.3. Método de persistencias 292
3.4. Ejemplos de ajuste de datos de la cola superior 298
4. Régimen de cola inferior 300

ANEXO 6. INCERTIDUMBRE Y PROPAGACIÓN DE ERRORES 303
1. Incertidumbres 305
1.1. Definiciones de incertidumbre 305
1.2. Incertidumbres asociadas al tipo de medida 306
2. Teoría de propagación de errores 306
2.1. Medidas indirectas 306
2.2. Propagación de errores 306
2.3. Hipótesis de partida 306
2.4. Fórmula general para la propagación de errores 306
2.5. Propagación de errores en sumas y diferencias 307
2.6. Propagación de errores en productos 307
2.7. Propagación de errores en cocientes 307
2.8. Error del producto por una constante 308
2.9. Error de una potencia 308
2.10. Error en funciones de una variable 308
2.11. Error en funciones de varias variables 308

ANEXO 7. EJEMPLO METODOLÓGICO 309
1. Introducción 311
2. Antecedentes 311
3. Descripción del tramo de obra 311
4. Metodología de cálculo del riesgo derivado del rebase 313
5. Análisis previo 313

6. Probabilidad de ocurrencia de caudales de rebase 314
7. Consecuencias esperables 317
8. Cálculo del riesgo por rebase 320
9. Discusión de los resultados 321
10. Bibliografía 322

ANEXO 1

Glosario de términos relacionados con el riesgo

En el cálculo y la gestión del riesgo se emplean una gran variedad de términos que es necesario conocer y definir para que la interpretación que se hace de los mismos no resulte ambigua. En este anexo se recogen algunos de los más relevantes

GLOSARIO DE TÉRMINOS RELACIONADOS CON EL RIESGO

Amenazas (*Hazards*): Son todos aquellos posibles sucesos y condiciones que pueden resultar severos y causar daños significativos. Una amenaza sería una contingencia de consecuencias "severas".

Análisis RAM (*Reliability, Availability, Maintainability Analysis*): Análisis de fiabilidad, disponibilidad y mantenimiento que están relacionados con los parámetros descriptores de la fiabilidad.

Contingencia (*Contingency*): Se define como algo que puede suceder. En el contexto de esta Guía, coincidiendo con el uso que se da a este término en el campo de la gestión del riesgo, también hace referencia a una cantidad económica que se prevé para paliar los efectos de amenazas cuyo riesgo asociado es bajo.

Coordinador de riesgos (*Risk Manager*): Responsable de la definición del proceso de gestión de riesgos en la organización. Será el responsable de escribir el documento *"Risk Management Plan*".

Evaluación del riesgo (*Risk Evaluation*): Empleo del análisis del riesgo para comparar el riesgo calculado con los criterios establecidos a priori y encontrar el nivel de riesgo. Pretende responder a la siguiente pregunta: ¿El riesgo calculado es aceptable?

Fiabilidad (*Reliability*): Una de las definiciones se refiere a ella como la capacidad de un sistema o componente para cumplir determinadas funciones. Gestión del riesgo (*Risk Management*): Actividades coordinadas para dirigir y controlar el riesgo.

Jefe de proyecto (*Project Manager*): Responsable de la labor de gestión de riesgos en los proyectos que se encuentren bajo su responsabilidad. La dirección intervendrá cuando las decisiones que haya que tomar adquieran un impacto importante.

Incertidumbre (*Uncertainty*): Es la falta de conocimiento seguro y claro de algo. Las principales fuentes de incertidumbre están relacionadas con el carácter aleatorio del fenómeno estudiado, con la cantidad y calidad de los datos de partida, con el tratamiento estadístico e hipótesis aplicadas para describir el fenómeno y con el modelo empleado para estimar un valor en el proceso de análisis (Puertos del Estado, 2001).

Plan de Contingencia (*Contingency Plan*): Prevenir y paliar los efectos de las contingencias (entendidas como algo que puede suceder).

Plan de Gestión de Riesgo (*Risk Management Plan, RMP*): Documento en el que se detalla el proceso de gestión de riesgos, así como los procedimientos asociados.

Propietario del Riesgo (*Risk Owner*): Persona o entidad con autoridad y responsabilidad sobre la ejecución del plan de acción asociado a un riesgo.

Riesgo (*Risk*): Comprende la evaluación de amenazas (*hazards*) en términos de la severidad de las mismas y su probabilidad de ocurrencia.

Seguridad (*Security*): Es el grado de libertad de un peligro o daño. La seguridad se consigue haciendo las cosas bien la primera vez y cada vez que se hacen.

ANEXO 2

Fuentes de información para la caracterización del medio físico

Conocer el clima marítimo de la forma más precisa posible es determinante a la hora de diseñar, gestionar y explotar infraestructuras
portuarias o costeras seguras y operativas. En este anexo, se presentan algunas de las fuentes de datos
más importantes

1. INTRODUCCIÓN

Conocer el clima marítimo de la forma más precisa posible es determinante a la hora de diseñar infraestructuras portuarias o costeras seguras y operativas. Ese conocimiento está en gran parte contenido en el Banco de Datos Oceanográficos, una herramienta de Puertos del Estado originalmente enfocada a la ingeniería portuaria, pero que, con la ayuda de Internet, es cada vez más demandada para otras actividades costeras (Serrano, 2006).

Además de la base de datos de Puertos del Estado existen otras bases de datos oceanográficos obtenidos y gestionados por instituciones nacionales e internacionales. Algunas de las más importantes se describen en este apartado.

En ocasiones, las bases de datos climáticos no recogen el tipo de fenomenología que se necesita conocer, no se encuentra con el detalle requerido, o bien no se dispone de información en el emplazamiento en el cual se está desarrollando el estudio. En estos casos es conveniente colocar un instrumento de medida ad-hoc, durante un periodo de tiempo adecuado a la naturaleza del agente que se desea monitorizar.

En el medio marítimo los agentes son múltiples, pero los que ejercen mayores modificaciones sobre el mismo y se consideran por tanto principales son, según (Puertos del Estado, 2001):

- Gravitatorios
- Medio físico
- Oleaje
- Viento
- Nivel del Mar
- Corrientes
- Terreno
- Uso y explotación
- Asociados al material
- Proceso constructivo

Una vez identificados los agentes del medio que actúan sobre la infraestructura, es necesario obtener datos que permitan caracterizarlos. En este apartado se hace una revisión de las fuentes de información actualmente disponibles sobre los principales agentes del medio físico, es decir, oleaje, viento, nivel del mar y corrientes. Esta información se puede organizar atendiendo a dos criterios: el primero consiste en organizar las fuentes de información climática por variables, y el segundo consiste en organizarlas por los instrumentos que los registraron.

Dado que en la gran mayoría de los casos un mismo instrumento puede albergar distintos sensores que midan parámetros de diversos agentes del medio físico, este apartado se organiza en torno a las fuentes instrumentales disponibles.

En el punto 1.9 se proporciona una tabla que resume el tipo de instrumentación empleado para monitorizar los distintos agentes del medio físico, así como el periodo de medida disponible.

Las fuentes de información sobre los agentes del medio físico se pueden diferenciar en 6 grupos principales, dependiendo del método de medida:

- Datos visuales
- Medidas remotas (satélite y radar)
- Estadísticas elaboradas
- Datos sintéticos: obtenidos a partir de información meteorológica histórica y modelos de generación de oleaje
- Datos instrumentales aportados por boyas y otros sistemas de medida
- Modelos numéricos de propagación y predicción

A continuación se describen brevemente las características de cada uno de ellos.

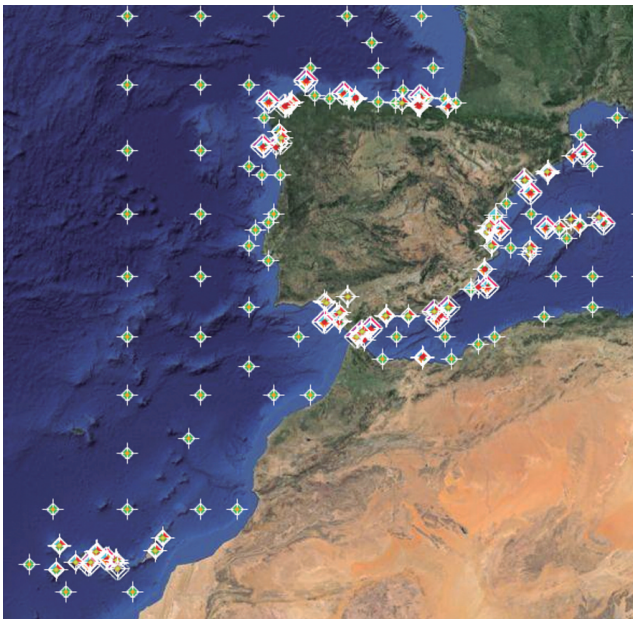


FIGURA 1. Localización de las fuentes de datos históricos de oleaje, viento, temperatura del agua, corrientes, salinidad, nivel del mar, presión atmosférica, temperatura del aire y agitación en el litoral español (www.puertos.es)

2. DATOS VISUALES

Los datos visuales son un conjunto de registros de oleaje, viento, presión atmosférica y temperatura, entre otros, tomados por **observadores experimentados** en puntos discretos a lo largo de las rutas co-

merciales marítimas, desde 1662. Los datos de oleaje visuales también se han tomado desde barcos meteorológicos o estructuras off-shore (Tomás, 2009).

Se trata de la fuente de datos más antigua de que se dispone, aunque las observaciones se realizaron principalmente en las rutas comerciales más transitadas. Tiene limitaciones relacionadas con la experiencia del observador y su percepción de las condiciones extremas, al observarlas en condiciones climáticas extremas.

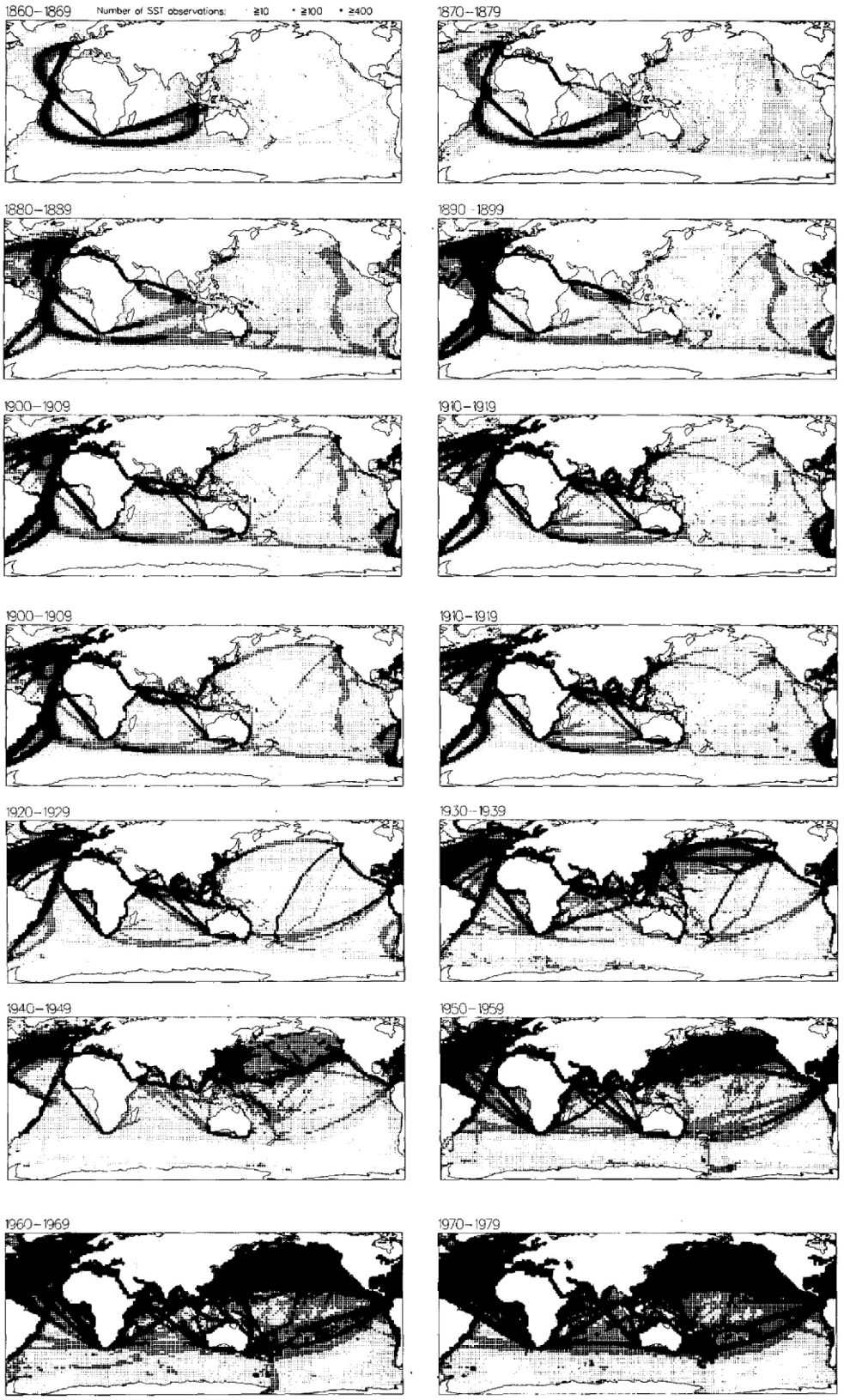


Figura 2. Mapas de los puntos de observación de parámetros océano-meteorológicos en las rutas comerciales desde 1860 hasta 1979 (Woodruff, 1987)

La información está clasificada por cuadrículas de 10º x 10º que cubren la totalidad del globo y que a su vez se subdividen en 100 cuadrículas.

Cada registro está formado por 99 campos cuya codificación responde a un protocolo de recuperación eficiente de la información. Entre estos cam-

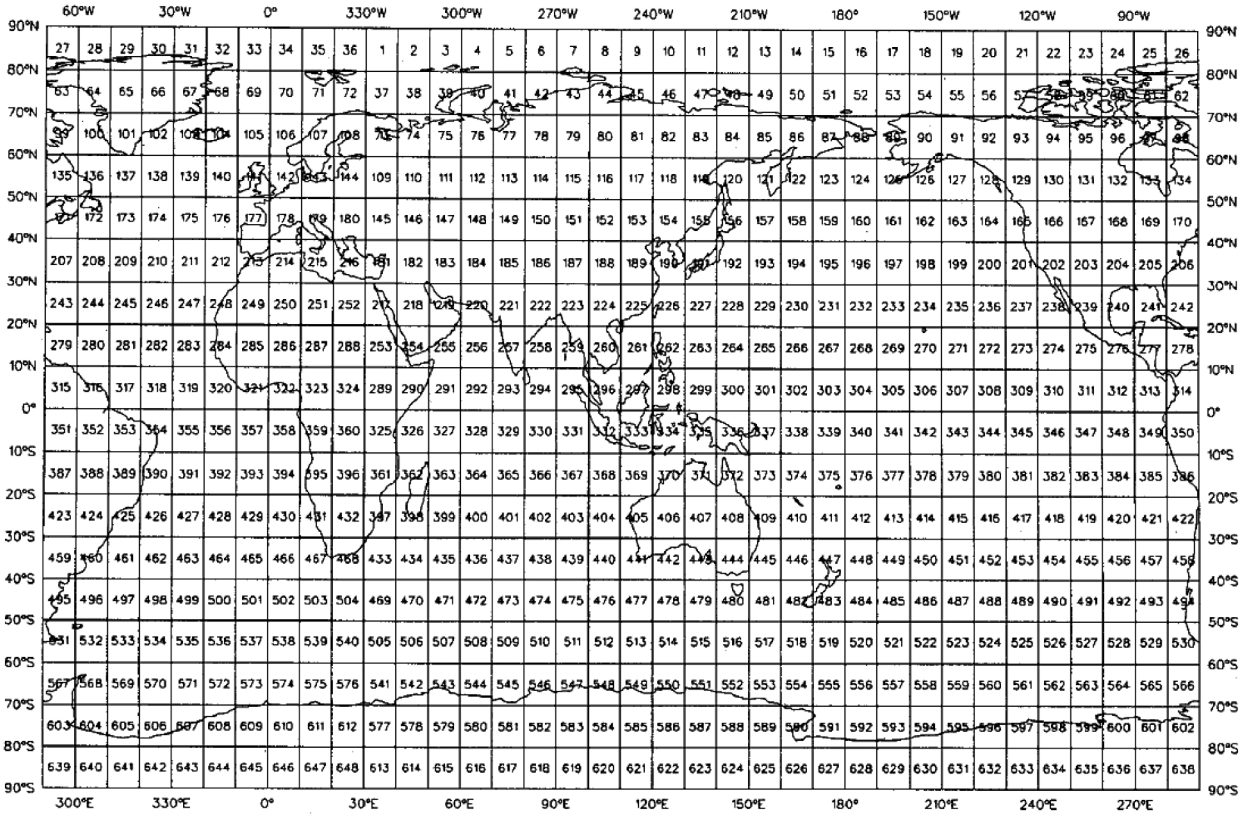


FIGURA 3. Sistema de numeración de las cuadrículas de 10º en las que se anotan las observaciones de parámetros océano-meteorológicos (Woodruff, 1987)

pos se encuentra el tipo de barco y el observador que efectúa la medida, el estado de nubosidad, hielo, temperatura del agua o temperatura del aire. Además de la información mencionada anteriormente, se puede encontrar:

- Fecha y hora de la observación
- Longitud y latitud de la posición del barco
- Altura visual del oleaje de viento
- Periodo visual del oleaje de viento
- Dirección del viento (se considera que el oleaje de viento tiene la misma dirección)
- Altura visual del oleaje de fondo
- Periodo visual del oleaje de fondo
- Dirección visual del oleaje de fondo

Las alturas están clasificadas en intervalos de 0,5 m, los periodos en intervalos de 1 s y las direcciones de olaje están referidas a rosas de entre 8 a 36 rumbos. En lo respectivo a las velocidades de viento, se proporciona según la escala Beaufort. Su dirección se proporciona referida a rosas de 8 a 36 rumbos.

Para su aplicación a un caso concreto, en general los datos de oleaje de viento (SEA) y de fondo (SWELL) no se proporcionan de forma separada, sino que cada observación se limita a una altura de ola, un periodo y una dirección visual. Una vez seleccionados los datos correspondientes al área, se examina con detalle la base de datos, eliminando los datos incompletos, y se determina la altura de ola visual compuesta mediante la fórmula:

$$H_{visual} = \sqrt{H_{SEA}^2 + H_{SWELL}^2}$$

Por lo que respecta al periodo y a la dirección visual compuesta, éstas se corresponden con la dirección y el periodo de la mayor altura de ola:

$$T_{visual} = T_{SEA} \text{ si } H_{SEA} \geq H_{SWELL}$$

$$T_{visual} = T_{SWELL} \text{ si } H_{SWELL} > H_{SEA}$$

$$\theta_{visual} = \theta_{SEA} \text{ si } H_{SEA} \geq H_{SWELL}$$

$$\theta_{visual} = \theta_{SWELL} \text{ si } H_{SWELL} > H_{SEA}$$

Los datos observados se registran con un formato establecido y se envían a centros internacionales que se encargan de su almacenamiento y distribución. En la actualidad, dicha información, llamada VOS (*Voluntary Observing Ships*), está gestionada por la Organización Mundial Meteorológica (WMO, *World Meteorological Organization*).

Estos datos se pueden encontrar en una de las bases de datos más completas, la ICOADS *(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set*), cuya página web es **http://icoads.noaa.gov**[1]. Se disponen de datos desde 1784 (Woodruff, 1987).

Las limitaciones de esta fuente de medida son, además de la heterogeneidad espacial y temporal, la sobreestimación sistemática de la magnitud de la observación en condiciones climáticas adversas.

En lo referente a la observación de las características del viento, el lugar próximo a tierra donde tiene mayor interés es en los aeropuertos. AEMET presta el servicio de observación de aeródromo mediante el personal de observación destinado en sus Oficinas Meteorológicas de Aeródromo (OMA), y los equipos instalados en los mismos. Se registran diversos parámetros meteorológicos, como la velocidad y dirección de viento, visibilidad, temperatura, presión atmosférica, etc.

3. MEDIDAS REMOTAS: SATÉLITES

3.1. Satélites

Los satélites son una fuente instrumental que proporciona información global del oleaje. En los últimos años se ha alcanzado un alto nivel de precisión en las medidas remotas de la superficie libre del mar, y la posterior obtención de parámetros de oleaje como Hs y Tm.

Existen multitud de organismos que distribuyen los datos altimétricos, por ejemplo AVISO (www.aviso.oceanobs.com) o PO.DAAC [*Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (podaac.jpl.nasa.gov)]. Gracias a los avances en las medidas satelitales, se pueden obtener los parámetros representativos de:

- Oleaje
  - Conjunto de datos: JASON
    - Precisión < 4 cm
    - Tiempo de resiliencia: 10 días
    - Cobertura espacial: global
    - Años de inicio de los proyectos: 2002, 2008
    - Formato: RAW, NETCDF
  - Conjunto de datos: OSTM
    - Tiempo de resiliencia: 10 días
    - Cobertura espacial: global
    - Años de inicio de los proyectos: 2008, 2009
    - Formato: NETCDF
  - Conjunto de datos: TOPEX
    - Tiempo de resiliencia: 10 días
    - Cobertura espacial: global
    - Años de inicio y fin de los proyectos: 1992-2005 y 1996-1998
    - Formato: RAW
- Viento
  - Conjunto de datos: ASCAT
    - Tiempo de resiliencia: 12 horas
    - Cobertura espacial: global
    - Años de inicio de los proyectos: 2007, 2009
    - Formato: NETCDF
  - Conjunto de datos: CCMP
    - Tiempo de resiliencia: 12 horas
    - Cobertura espacial: global
    - Años de inicio de los proyectos: 2002-2010, 1990-1997, 1991-2000, 1995-2009, 1999-2006, etc.
    - Formato: BINARY
- Circulación oceánica
  - Conjunto de datos: OSCAR
    - Tiempo de resiliencia: 5 días
    - Cobertura espacial: Global
    - Año de inicio del proyecto: 1992
    - Formato: NETCDF
- Presión oceánica
  - Conjunto de datos: TELLUS
    - Tiempo de resiliencia: 1 mes
    - Cobertura espacial: Global
    - Año de inicio del proyecto: 2002
    - Formato: GIF, GEOTIFF, ASCII, NETCDF

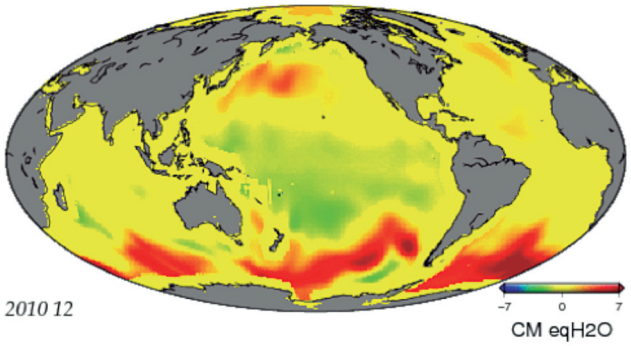


Figura 4. Mapa de presión oceánica proporcionado por PO.DAAC.

[1] El enlace se encuentra operativo a fecha de julio de 2014.

- Temperatura
  - Conjunto de datos: ABOM
    - Tiempo de resiliencia: 1 día
    - Cobertura: Oceánica y global
    - Formato: NETCDF
  - Conjunto de datos AVHRR
    - Tiempo de resiliencia: 5 días/7días/8 días/1 mes/1 año.
    - Cobertura espacial: Global
    - Formato: RAW, HDF
  - Conjunto de datos: EUR
    - Tiempo de resiliencia: 1hora/ 3 horas/2 veces al día/ 1 día/
    - Cobertura espacial: Mediterráneo, Océano Pacífico, Océano Atlántico, Global
    - Formato: NETCDF
- Densidad del agua/salinidad
  - Conjunto de datos: AQUARIUS
    - Promediada en 1 día, 7 días, 1 mes, 3 meses
    - Región: Global
    - Formato: HDF5

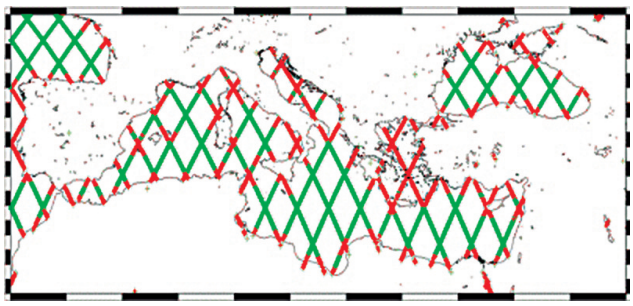


Figura 5. Imagen de las áreas barridas por los satélites Jason-2 y Topex/Poseidon, posteriormente procesadas por métodos estándar (en rojo) o almacenadas (en verde)

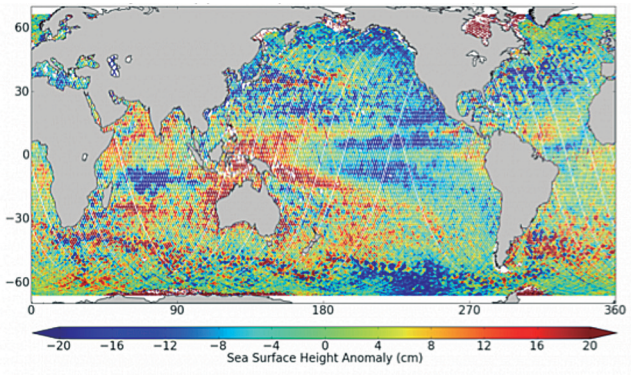


Figura 7. Variación de la superficie libre del mar en cm. medida por los satélites Jason-1 y Jason-2 del 23 de abril al 3 de mayo de 2011

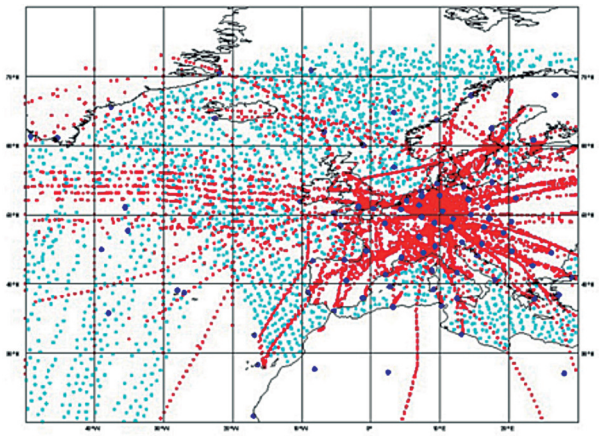


Figura 8. Distribución de observaciones meteorológicas asimiladas procedentes de satélite (azul claro), aviones (rojo) y radiosondeos (azul oscuro)

4. ESTADÍSTICAS ELABORADAS

El oleaje se ha registrado con diferentes propósitos a lo largo de la Historia, lo que ha permitido elaborar todo tipo de informes por distintas agencias para los que se ha empleado una gran variedad de

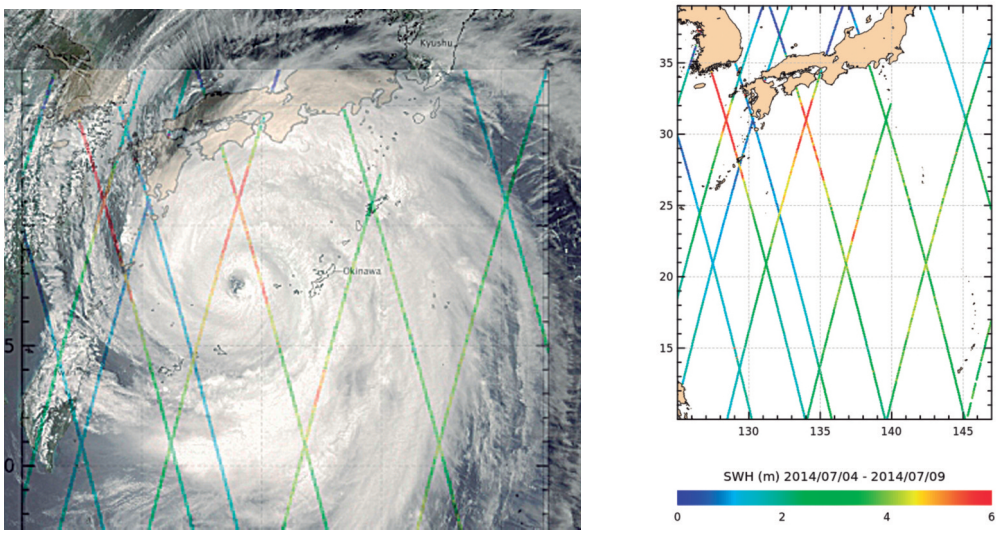


Figura 6. Superposición de la traza seguida por el satélite HY-2ª sobre el Tifón Neoguri (July 2014)

instrumentación. Sin embargo, aunque los datos instrumentales se han considerado como los más fiables, su disponibilidad y calidad varían ampliamente (BMT Ltd, 1986).

El tratamiento estadístico que se aplica a los datos en bruto empleados para las estadísticas elaboradas depende del organismo responsable. Hay organismos que distinguen entre oleaje SEA y oleaje SWELL y otros que proporcionan una única altura de ola.

De entre los conjuntos disponibles, destacan las siguientes estadísticas elaboradas, que abarcan extensas áreas marítimas:

- US Naval Hydrographic Office: SEA y SWELL. (http://www.archives.gov/research/guide-fed-records/groups/037.html)
- Ocean Wave Statistics (1996): Tablas bivariadas de SEA y SWELL para cada mes, trimestre y año. Elaboradas por Hogben y Lumb para 50 áreas marítimas.
- Global Wave Statistics: Información elaborada para 104 áreas. Basadas en observaciones visuales de buques y completadas por el modelo de previsión NMIMET (http://www.globalwavestatisticsonline.com)
- Hindcast Spectral Ocean Model Climatic Atlas (1983): Atlas del Atlántico Norte, en el que se caracterizan 7 parámetros climáticos en 63 puntos. Elaborado por el Naval Oceanography Command Detatchment (Asheville, North Carolina).
- Summary of Synoptic Meteorological Observations (1850 - 1979): Elaborado por el US Naval Oceanography Command. Se diferencia del anterior en que el mallado es más detallado. (http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html)

4.1. Atlas de inundación del litoral peninsular español (Universidad de Cantabria)

Este Atlas recoge regímenes medios y de colas de dos variables: nivel de marea (teniendo en cuenta marea astronómica y meteorológica) y cota de inundación (sumando a la anterior el run-up del oleaje) obtenidos a partir de los datos de la red REDMAR de Puertos del Estado, los datos del Instituto Nacional de Oceanografía y los datos procedentes de boyas (Puertos del Estado). Sus resultados son sólo válidos en playas abiertas ya que no considera la difracción del oleaje. El titular de la información es el Ministerio de Medio Ambiente.

5. DATOS SINTÉTICOS: SIMAR

Los datos sintéticos son el resultado de la aplicación de un modelo de generación de oleaje y de un modelo atmosférico. El modelo atmosférico se alimenta del campo de presiones y genera un campo de velocidades de viento que, a su vez, es la entrada del modelo de generación de oleaje para la definición de estados de mar asociados al mismo. Es importante destacar que estos datos no son medidas directas de la naturaleza, sino resultados de simulaciones numéricas, por lo que deben ser calibradas/validadas con información instrumental de oleaje.

Desde los años 90 se utilizan varios modelos que han mejorado la calidad de sus resultados de forma notable. Los dos modelos de tercera generación más extendidos son el WaveWatch III (Tolman, User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB,

NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER
151 PATTON AVENUE ROOM 120
ASHEVILLE, NC 28801-5001
(NCDC)
PHONE : (828) 271-4800 INTERNET : orders@ncdc.noaa.gov
FACSIMILE : (828) 271-4876 WEB site : http://www.ncdc.noaa.gov

November 1998

CLIMATIC WIND DATA FOR THE UNITED STATES

The climatic wind data contained in this summary was extracted from the NCDC's Local Climatological Data publication, Navy & Air Force climatic briefs, and other sources. Locations are not all inclusive and wind data may be available for sites not listed in this summary. The total period of this summary is 1930-1996. The period of record (POR) for which wind data is summarized varies for individual sites and may begin and end at any time during the 1930-1996 period. All available wind data is provided regardless of POR or source. Updated data for many sites can be obtained from post 1996 Local Climatological Data annual publications.
In the table, prevailing wind directions (DIR) are given in compass points; mean wind speeds (SPD) and peak gust (PGU) are in miles per hour (mph). When peak gust (PGU) wind velocities are not available, fastest-mile or 5-second winds may be substituted. This will be indicated by a $ for fastest-mile and # for 5-second winds preceding PGU (ie: $PGU = fastest-mile winds). Wind types may be combined to reflect the highest reported wind. When appropriate wind data is not available, an N/A will appear in lieu of data.
Conversion tables of miles per hour to knots and compass points to degrees are provided at the end of this wind table.

****

		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
ALABAMA														
Birmingham	DIR	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	S	N
	SPD	8	9	9	9	7	6	6	6	7	6	7	8	7
	$PGU	49	59	65	56	65	56	57	50	50	43	52	41	65

FIGURA 9. Información sinóptica sobre condiciones de viento en el año 1998 para Alabama (EE.UU.)

1999); (Tolman, user Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III version 2.22, 2002) y el modelo WAM (WADMI Group, Hasselman, 1988); (Jassen, 2004).

Los modelos de tercera generación han sido aplicados a escala global y calibrados con medidas satelitales para generar mapas globales de reanálisis de oleaje desde 1948 hasta nuestros días, mediante del modelo Global Ocean Wave (GOW) desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria. Estas series permiten completar la información puntual proporcionada por las boyas a escala global. Para ampliar esta información se recomienda consultar al artículo de Reguero et al., 2012

Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR-44 y WANA. Esta concatenación permite disponer de series temporales más extendidas y que se actualizan diariamente. El rango temporal de cada conjunto de datos es:

- SIMAR-44: 1958 – 1999.
- WANA: 2000 – Actualidad.

En la base de datos SIMAR se recogen las siguientes variables:

- Oleaje
  - Altura significante espectral.
  - Periodo de pico espectral.
  - Periodo medio espectral (momentos de orden 0 y 2).
  - Dirección media de procedencia del oleaje
  - Altura y dirección del mar de viento.
  - Altura, periodo medio y dirección del mar de fondo.

- Viento
  - Velocidad media.
  - Dirección media de procedencia del viento.

Es necesario prestar atención a la hora de utilizar los datos SIMAR en las zonas que se citan a continuación:

- **En el Sur del Archipiélago Canario**: las condiciones que proceden del suroeste pueden no estar bien reproducidas debido a la proximidad del dominio de la malla que utiliza el modelo.
- **En general, los modelos tienden a subestimar picos en velocidades de viento y alturas de ola en temporales muy extremos**. Para verificar la bondad de los valores, se recomienda cotejar los mismos con medidas de instrumentos ubicados en las inmediaciones del punto.

5.1. SIMAR-44

Es un conjunto de series temporales de parámetros atmosféricos y oceanográficos del periodo comprendido entre el año 1958 y el 1999. Proceden del modelado numérico de alta resolución de atmósfera, nivel del mar y oleaje que cubre todo el entorno litoral español. La simulación atmosférica y del oleaje en la cuenca del Mediterráneo han sido desarrolladas por Puertos del Estado dentro del proyecto HIPOCAS (*Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe*; (Guedes Soares C. W., 2002) y (Guedes Soares C., 2008), mientras que los datos del Atlántico y del Estrecho de Gibraltar proceden de otras dos simulaiones de oleaje y viento: una de ellas realizada por Puertos del Estado de forma independiente y otra por el IMEDEA dentro del proyecto VANIMEDAT-II.

Los campos de oleaje se han generado con el modelo espectral WAM, con cadencia horaria. Para el área mediterránea se han empleado mallas de 25 km. x 25 km. para el borde Este de la malla y de 12,5 km. x 12,5 km. para el resto del área modelada. El modelo empleado incluye los efectos de refracción y asomeramiento. Sin embargo, dada la escala de la simulación, se recomienda interpretar los datos de oleaje como si estuvieran localizados en aguas abiertas y profundidades indefinidas, aunque el modelo incluye los efectos de refracción y asomeramiento.

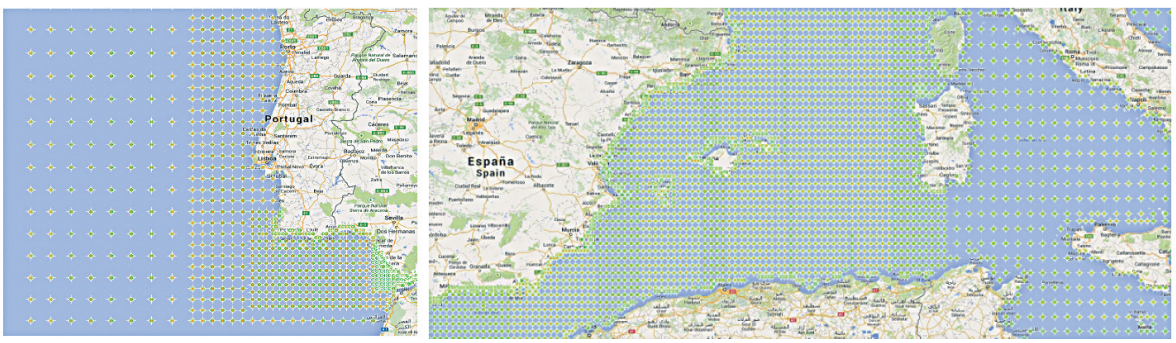


Figura 10. Localización y resolución de los puntos SIMAR en el Atlántico y el Mediterráneo

5.2. WANA

Los datos WANA proceden del Proyecto WASA, cuyo acrónimo significa *Waves and Storms in the North Atlantic*. Este Proyecto fue financiado por el programa *European Union's Environment* y su principal objetivo fue la confrontación de la hipótesis sobre el aumento de tormentas, tanto en intensidad como en frecuencia, en el Atlántico Nororiental. Para este propósito, el grupo WASA decidió reconstruir el clima marítimo de los últimos 50 años usando el modelo WAM de generación de oleaje y la información meteorológica existente. De esta manera, se obtuvo un conjunto de datos homogéneo que cubrió todo el Atlántico Norte. Los datos resultantes del trabajo son parámetros de viento, oleaje y el espectro direccional en cada uno de los puntos de las mallas utilizadas.

El conjunto de datos WANA está formado por series temporales (desde 1996) de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico: generación de viento (HIRLAM) y generación de oleaje (WAM y WaveWatch). Son, por tanto, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

Para obtener series de parámetros oceanográficos, en primer lugar se generó una base de datos de presiones y estados meteorológicos aplicando modelos numéricos a los mapas sinópticos disponibles desde 1952. El HIRLAM es un modelo atmosférico para generar campos de viento a 10 m sobre el nivel del mar, mesoescalar e hidrostático. La resolución espacial y temporal del HIRLAM ha evolucionado de la siguiente forma:

1996-2006		2006-2012		2012-presente	
Temporal	**Espacial**	**Temporal**	**Espacial**	**Temporal**	**Espacial**
6 h	30 km	6 h	9 km	1 h	3 km

Tabla 1. Evolución de la resolución espacial y temporal del modelo HIRLAM desde 1996 hasta nuestros días

El estado inicial atmosférico, o análisis, se obtiene corrigiendo una primera estimación basada en una predicción a corto plazo reciente, mediante la asimilación de observaciones convencionales procedentes de estaciones de superficie en tierra, barcos y boyas, radiosondeos y aviones. Además se corrigen los datos brutos medidos por los instrumentos a bordo de los satélites meteorológicos lo que se lleva a cabo mediante un método variacional tri o tetradimensional (3DVAR o 4DVAR).

A partir de los datos de salida del modelo HIRLAM de 0,16º de resolución ejecutado en el Centro de Proceso de Datos (CPD) de AEMET, se generan cada 12 horas pronósticos de viento y temperatura con alcances de H+6, H+12, H+18 y H+24.

Los campos de oleaje han sido generados a través de los modelos WAM y WaveWatch (modelos espectrales), forzados a partir de los campos de viento proporcionados por HIRLAM. De forma similar al HIRLAM, los modelos de generación de oleaje han evolucionado como se indica a continuación:

	1996-2006		2006-2012		2012-presente	
Escala	**Temporal**	**Espacial**	**Temporal**	**Espacial**	**Temporal**	**Espacial**
Cantábrico	3 h	15 km	3 h	2.5 km	1 h	2.5 km
Cádiz	3 h	15 km	3 h	5 km	1 h	5 km
Canarias	3 h	15 km	3 h	5 km	1 h	5 km
Mediterráneo	3 h	7.5 km	3 h	5 km	1 h	5 km
Estrecho de Gibraltar	–	–	3 h	1 km	1 h	1 km

Tabla 2. Evolución de la resolución espacial y temporal del modelo WAM desde 1996 hasta nuestros días

*Las series WANA proceden del sistema de predicción del estado de la mar que Puertos del Estado desarrolló en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, **www.aemet.es**).*

6. DATOS INSTRUMENTALES

Son el instrumento de medida que proporciona la información más completa y fiable del oleaje en una posición fija. Su disponibilidad es más limitada que la visual o la sintética, ya que se localiza a lo largo de las costas de los países más desarrollados que disponen de redes de medida.

En España, los datos instrumentales de oleaje proceden, en gran medida, de las boyas pertenecientes a las Redes de Medida del Organismo Público Puertos del Estado (OPPE).

Las boyas siguen el movimiento de la superficie del mar, determinando la evolución de la misma gracias a un acelerómetro situado en su interior, en el caso de las boyas escalares. También hay boyas direccionales que son capaces de referenciar el norte magnético o estimar la dirección de cada ola con la ayuda de otros dispositivos que se incorporan sobre dos ejes ortogonales, como inclinómetros o acelerómetros horizontales.

Los registros más antiguos de oleaje mediante boyas datan de la década de los 70. La mayor red de boyas pertenece al NDBC (*National Data Buoy Center*, www.ndbc.noaa.gov). Japón cuenta con la JMA (*Japan Meteorological Agency*) y la India gestiona sus instrumentos a través del INDBP (*Indian National Data Buoy Programme*). Según Tomás (2009), las redes más importantes de Europa son las de Reino Unido (*United Kingdom Met Office*), Francia (*Météo France*), España (OPPE), Italia (IDROMARE) o Grecia con el HNODC (*Hellenic National Oceanographic Data Center*).

Esta red cubre la totalidad del litoral español, la península Ibérica, los dos archipiélagos, Ceuta y Melilla. Se subdivide en otras dos redes, la de aguas profundas (REDEXT) y la costera (REDCOS).

6.1. Red costera (REDCOS)

Se trata de una red de boyas situadas en las proximidades de las instalaciones portuarias, por lo que sus registros se ven afectados tanto por efecto de la costa como por el fondo, ya que suelen estar fondeadas a menos de 200 m. de profundidad. La red costera ha recopilado 26 años de datos hasta la fecha (marzo de 2015). Está formada por 11 boyas, 9 modelo triaxys (Barcelona II, Tarragona, Melilla, Málaga, Ceuta, Tarifa, Bilbao II, Las Palmas Este y Santa Cruz de Tenerife), 1 tipo Watchkeeper (Algeciras) y 1 tipo Datawell (Abra-Cervana).

Los datos que proporcionan las boyas de la REDCOS, con cadencia horaria, son los siguientes:

- Altura de ola significante de paso por cero.
- Altura de ola máxima del registro.
- Periodo de pico.
- Periodo medio de cruce por cero.
- Periodo de altura de ola máxima.
- Dirección del oleaje.

Pueden ser consultados en la web http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx

6.2. Red exterior (REDEXT)

Se trata de una red de boyas oceanográficas situada en aguas profundas, fondeadas entre 200 y 1000 m. de profundidad en aguas abiertas de todo el litoral español. Está formada por 15 boyas, 3 del tipo WaveScan (Cabo Begur, Mahón. Dragonera) y 12 del tipo SeaWatch (Tarragona, Valencia, Cabo de Palos, Cabo de Gata, Cabo silleiro, Villano-Sisargas, Estaca de Bares, Cabo Peñas, Santander-IEO, Bilbao-Vizcaya), que envían datos en tiempo real vía satélite a las oficinas de Puertos del Estado. Desde el año 2003 todas estas boyas son direccionales. Las boyas miden parámetros oceanográficos y meteorológicos que son transmitidos cada hora vía satélite y que pueden ser consultados en la web http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx

Cada boya proporciona observaciones representativas de grandes zonas litorales alejadas de la costa, ya que los sensores no están perturbados por efectos locales. Los datos que proporcionan las boyas de REDEXT con cadencia horaria, son:

- Presión Atmosférica.
- Temperatura del Aire.
- Velocidad media del Viento (se mide la velocidad durante 10 minutos cada hora y se promedia).
- Dirección media del Viento (se registra la dirección durante 10 minutos cada hora y se promedia).
- Velocidad del corriente (depende de la boya).
- Dirección de la corriente (depende de la boya).
- Temperatura del agua.
- Salinidad del agua.
- Altura de ola significante espectral (equivalente a la Hs numérica).
- Periodo de pico (equivalente al Tp numérico).
- Periodo medio espectral Tm02.
- Dirección media del espectro.
- Dirección del periodo de pico.
- Dispersión direccional de la frecuencia de pico.

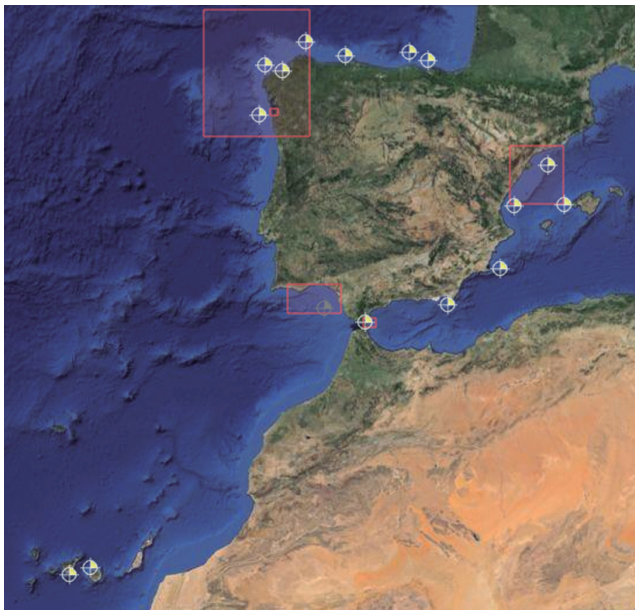


FIGURA 11. Localización de las boyas que registran datos de corrientes a lo largo del litoral español

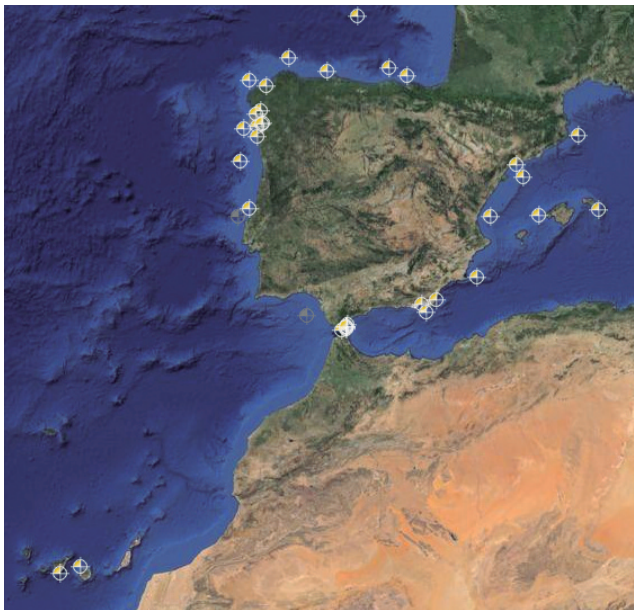


FIGURA 12. Localización de las boyas de aguas profundas y estaciones meteorológicas que registran viento en el litoral español

Es importante estudiar la ubicación de las boyas para el análisis de los datos. Los datos procedentes de las boyas plantean como principal problema los fallos de la instrumentación, lo que se traduce en datos erróneos o medidas incorrectas.

6.3. Radares

La red de Mareógrafos Portuarios, REDMAR, está formada por sensores que miden las variaciones del nivel del mar (desde julio de 1992), así como la altura de ola significante Hs y el periodo medio del oleaje Tm (desde 2006). A partir de ellos también se caracteriza la magnitud de la marea astronómica y de la marea meteorológica. En la actualidad, la red cuenta con más de 30 estaciones en funcionamiento, cuyos datos se integran periódicamente en centros de datos internacionales como el Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) o el Global Sea Level Observing System (GLOSS).

> *La caracterización del nivel del mar resulta esencial a la hora de evaluar condiciones de operación de las instalaciones portuarias (Serrano, 2006)*

Es necesario conocer los niveles de referencia de que se dispone, o bien la relación entre el nivel de referencia con respecto al que se proporciona el nivel del mar con los niveles de referencia disponibles en el emplazamiento. En la Figura 21, se presentan las relaciones entre el Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA) y otros niveles de referencia como son el Cero del Puerto (CP), el Nivel Medio del Mar (NMM) en Gijón y los niveles de la Pleamar

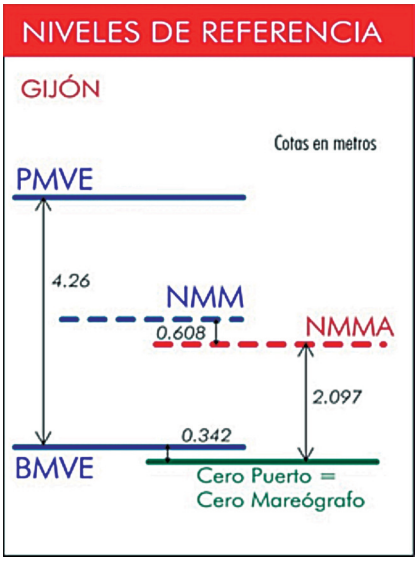


FIGURA 13. Niveles de referencia en el Puerto de Gijón

Media Viva Equinoccial (PMVE) y de la Bajamar Media Viva Equinoccial (BMVE).

El nivel del mar total se separa mediante un análisis armónico de las componentes de marea en marea astronómica (MA) y marea meteorológica (MM). Dado que la marea astronómica es determinista, bastará para su definición determinar la amplitud y fase de sus componentes principales.

La marea meteorológica, asociada a las perturbaciones atmosféricas, tiene un carácter aleatorio, por lo que, será necesario definir su distribución estadística, tanto para el régimen medio como para el de colas.

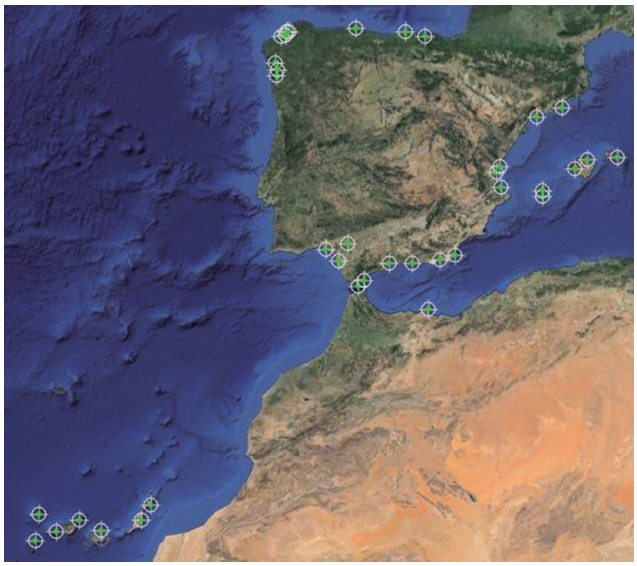


FIGURA 14. Localización de los mareógrafos que componen la red REDMAR de Puertos del Estado[2]

El conjunto de datos REDMAR recoge los siguientes parámetros del nivel del mar:

- Nivel del mar (se promedia cada minuto y después se obtienen datos horarios a partir de la serie bruta, cuyo incremento de tiempo es de 5 minutos)
- Residuo meteorológico (horario)
- Extremos
  - Diarios
  - Mensuales
  - Anuales
- Niveles Medios
  - Diarios
  - Mensuales
  - Anuales
- Carreras de Marea
- Constantes Armónicas
  - Anuales
  - Promedio

Asimismo, recoge los siguientes parámetros de **agitación**:

- Altura significante espectral (se promedia cada 20 minutos).
- Periodo medio espectral (se promedia cada 20 minutos).

[2] http://www.puertos.esoceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html

6.4. Conjunto de datos externos

Está formado por medidas procedentes de boyas no pertenecientes a la red de Puertos del Estado. El objetivo de facilitar esta información radica en poder complementar las medidas de Puertos del Estado así como ampliar la cobertura de validación de los modelos de oleaje. Las estaciones disponibles a fecha de 2014 pertenecen a las siguientes instituciones:

- MeteoGalicia/Intecmar, Xunta de Galicia, España
- Instituto Hidrográfico-Marinha, Portugal
- Irish Marine Institute, Irlanda
- UK MetOffice, Reino Unido
- MétéoFrance, Francia

Las series históricas de datos externos son proporcionados por las instituciones propietarias de los aparatos, por lo que es necesario contactar con ellas para obtener la información.

7. PROPAGACIONES

Al realizar una propagación de oleaje hacia la costa, se producen fenómenos de modificación del mismo que afectan a la distribución de la energía, como la refracción, reflexión, asomeramiento, rotura, fricción con el fondo, etc.

(Eckart, 1952); (Berkhoff, 1972) y (Berkhoff, 1976) propusieron, en el marco de la teoría lineal de ondas, una teoría para dos dimensiones adecuada para estudiar procesos de refracción y difracción en grandes extensiones. Esta teoría se basa en asumir que los modos evanescentes son despreciables cuando las ondas se propagan sobre una batimetría que varía suavemente, salvo en las proximidades de obstáculos tridimensionales (Losada & Liu, 2000). La formulación que sustenta esta teoría se conoce como “ecuación de pendiente suave”.

La aplicación de la ecuación de la pendiente suave requiere especificar las condiciones de contorno en la línea de costa y, por norma general, cuando se analizan grandes superficies no se conoce la línea de rotura. Al desconocerse la localización de la línea de rotura no es posible determinar la energía disipada, reflejada o transmitida. La solución a esta limitación pasa por aplicar la aproximación parabólica de la ecuación de la pendiente suave. Esta versión parabólica se emplea para propagar el oleaje hasta zonas cercanas a la costa y para el estudio de corrientes generadas por el oleaje.

Para los estudios de agitación portuaria se continúa empleando la versión elíptica de la ecuación, ya que considera la reflexión del oleaje.

En situaciones en las que la batimetría no presenta una pendiente suave, sino que es abrupta, las teorías anteriormente expuestas no son válidas. Por ello, Peregrine (1967) derivó las ecuaciones de Boussinesq para fondo variable, realizando la asunción de que la no linealidad y la dispersión en frecuencia son débiles y del mismo orden de magnitud. Estos modelos no pueden ser aplicados en profundidades muy reducidas por la descompensación entre los efectos no lineales y la dispersión frecuencial, ni en indefinidas donde la dispersión frecuencial tiende a la unidad (Losada & Liu, 2000).

Desde un punto de vista práctico, se puede hablar de dos tipos de modelos:

1. Aquellos que propagan oleaje monocromático (tren de ondas de una única frecuencia y amplitud), basados en la ecuación de pendiente suave (mild-slope).

2. Los que propagan un espectro de energía asociado a un oleaje irregular, basados en la ecuación de Boussinesq.

El primer tipo de modelos se utiliza para caracterizar el patrón de oleaje en una zona de estudio. Su bajo coste computacional permite propagar un alto número de trenes de ondas monocromáticas, las cuales se obtienen a partir de los regímenes medios direccionales en el área, que han sido obtenidos a priori.

Estos modelos representan el patrón de oleaje, aunque tienden a sobreestimar las alturas de ola en profundidades reducidas. Si el objetivo es identificar los patrones de comportamiento del oleaje, estos modelos funcionan de manera satisfactoria.

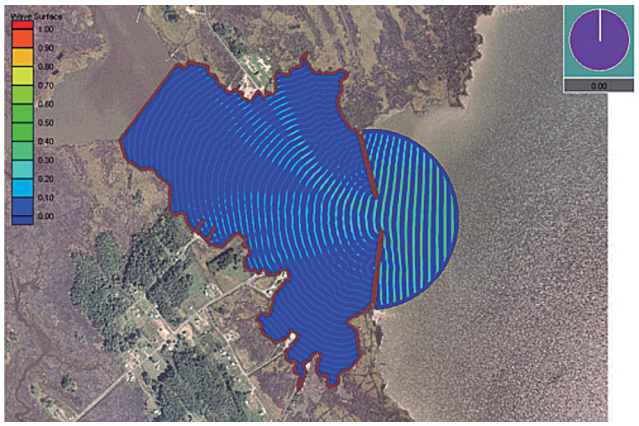


FIGURA 15. Simulación de propagación de oleaje en Tedious Creek, Maryland, mediante el modelo CGWAVE, que resuelve la ecuación de pendiente suave (Coastal & Hydraulics Laboratory, US Army Corps of Engineers)

El segundo tipo de modelos permite conocer en una zona de estudio la altura de ola estadísticamente representativa de un estado de mar (oleaje irregular). Este tipo de modelos son bastante precisos en el cálculo de las alturas de ola y requieren un alto coste computacional. Por este motivo, **se aplican en la propagación de casos extraordinarios** o en aquellos casos en los cuales se requiere obtener con una gran precisión los regímenes de oleaje en una zona de la costa, como en el diseño de estructuras marinas.

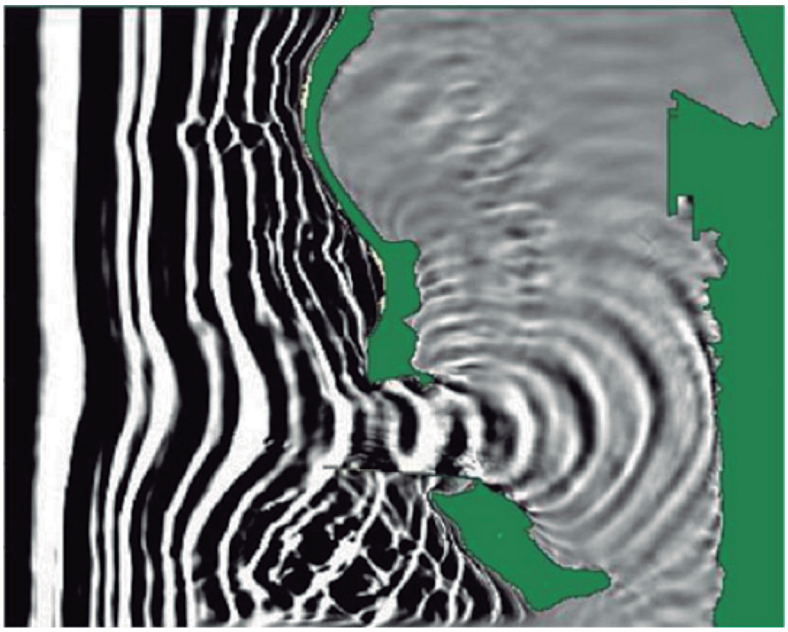


FIGURA 16. Modelo de propagación basado en la ecuación de Boussinesq del Puerto Nelson (Nueva Zelanda). Fuente: http://www.asrltd.com/projects/nelson.php

Dos de los modelos numéricos que se pueden emplear para la propagación son Ref-Dif (refracción-difracción), desarrollado inicialmente en la Universidad de Delaware (USA), o MSP (Mild-Slope Potencial), en cualquiera de sus dos versiones MSP-MEF, resuelta por elementos finitos (Grupo de Puertos y Costas, Universidad de Granada, España) o WAPO (UNAM, México), que resuelve la ecuación por diferencias finitas.

Para el empleo de modelos de propagación del oleaje es imprescindible disponer de la batimetría del área de estudio que, en función de la fase de estudio, servirá para:

- Crear las mallas (*grids*) para llevar a cabo la propagación desde profundidades indefinidas hasta los puntos objetivo, próximos a la costa. Estas mallas deben de tener un mínimo de 8 nodos por longitud de onda.

- Definir las mallas para las propagaciones que estimen el posible comportamiento de la estructura, tramo de costa, etc., frente a los agentes del medio marino. Estas mallas serán lo más densas posible, pero compatibles con los recursos computacionales de que se disponga.

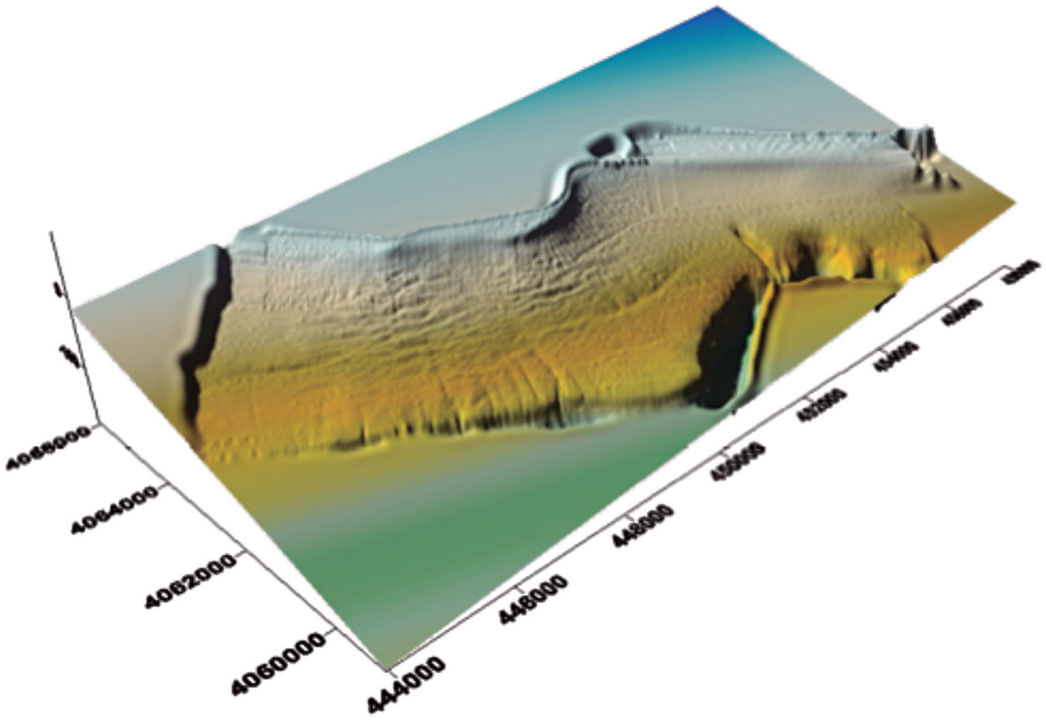


Figura 17. Vista tridimensional de la batimetría de un tramo de costa: Desembocadura del Guadalfeo (Granada). Fuente: CEAMA (UGR)

7.1. Conjunto de datos PROPAGACIÓN

Puertos del Estado emite el conjunto de datos PROPAGACIÓN, formado por series temporales de parámetros de oleaje procedentes de la propagación en tiempo real de los datos medidos por las boyas de la red exterior (conjunto REDEXT) hasta un punto de la costa en el que se carece de métodos de observación del oleaje. El sistema empleado es de propagación punto a punto que reproduce las transformaciones lineales que sufre el oleaje desde aguas abiertas hasta los puntos de propagación. Por lo tanto, para poder obtener estas propagaciones es necesario que exista una boya de la Red Exterior, y por otro que se pueda obtener una matriz de propagación para el punto seleccionado.

Las matrices de propagación son en realidad matrices de transformación de amplitudes y ángulos generadas mediante un modelo de propagación monocromático que barre una serie de casos por periodos y direcciones. Las matrices de propagación han sido obtenidas por tres modelos parabólicos de propagación diferentes por las siguientes instituciones, estando disponibles para los puntos reflejados en la Figura 18:

- Modelo PROPS (Puertos del Estado): Bilbao, Gijón, Avilés y Coruña.
- Modelo REFDIF10 (CEPYC-CEDEX): Langosteira.
- Modelo OLUCA (GIOC-UC): Silleiro.

Dado que las boyas de la Red Exterior transmiten la información espectral direccional en tiempo real, es posible reconstruir el espectro direccional completo de la misma y modificarlo en base a las matrices de transformación, con lo que se obtiene información propagada y se pueden estimar los parámetros siguientes:

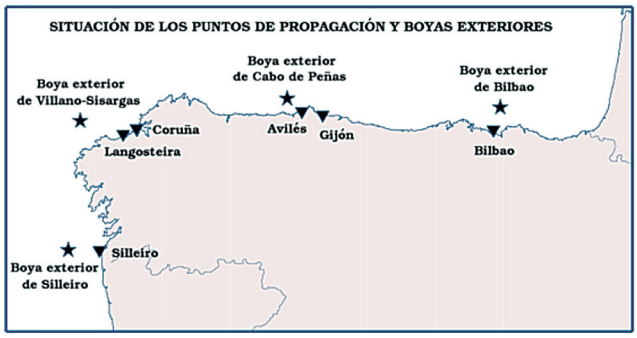


FIGURA 18. Posiciones de las boyas exteriores y los puntos del sistema de propagación punto a punto

- Altura de ola significante.
- Periodo medio.
- Periodo de pico
- Dirección media.
- Dirección de pico

8. PREDICCIONES

En lo que respecta a la predicción de oleaje, el Organismo Público Puertos del Estado, conjuntamente con el Instituto Nacional de Meteorología (INM), produce y distribuye dos veces al día pronósticos horarios de viento y oleaje para los próximos tres días. El sistema consta de dos módulos:

- Sistema de predicción a escala oceánica.
- Sistema de predicción a escala portuaria (SAPO, o Sistema Autónomo de Predicción de Oleaje).

La predicción de viento, utilizada como forzamiento de los modelos de generación de oleaje, procede del modelo meteorológico de área limitada HIRLAM, que se encuentra operativo en el INM. El sistema de predicción de oleaje arranca diariamente a las 7 horas y a las 9 horas. Aproximadamente una hora después están disponibles los resultados.

8.1. Predicción a escala oceánica

En las predicciones de oleaje a escala oceánica se emplean los modelos WAM y WaveWatch en el tramo en estudio. La resolución de los modelos varía según el área de estudio tal y como se recoge en la Tabla 2. Las predicciones obtenidas deben considerarse siempre como datos en aguas abiertas y profundidades indefinidas, por lo que no se pueden aplicar directamente en puntos de la costa.

8.2. Predicción a escala portuaria

El sistema de predicción a escala portuaria está basado en el modelo SWAN y está constituido por aplicaciones específicas desarrolladas por cada puerto, que cubren un área de unos 25 km alrededor de las instalaciones, con una resolución que oscila entre los 200 y los 500 m.

Estos modelos están anidados dentro de los módulos de escala oceánica. Las aplicaciones SAPO necesitan lo que se conoce como condiciones de contorno, es decir, la información del estado de mar en el borde de su zona de cobertura o dominio. Habitualmente para ello se emplean los espectros completos de densidad de energía procedentes de la aplicación de predicción a escala oceánica. Además, recibe los campos de viento del modelo HIRLAM cada hora.

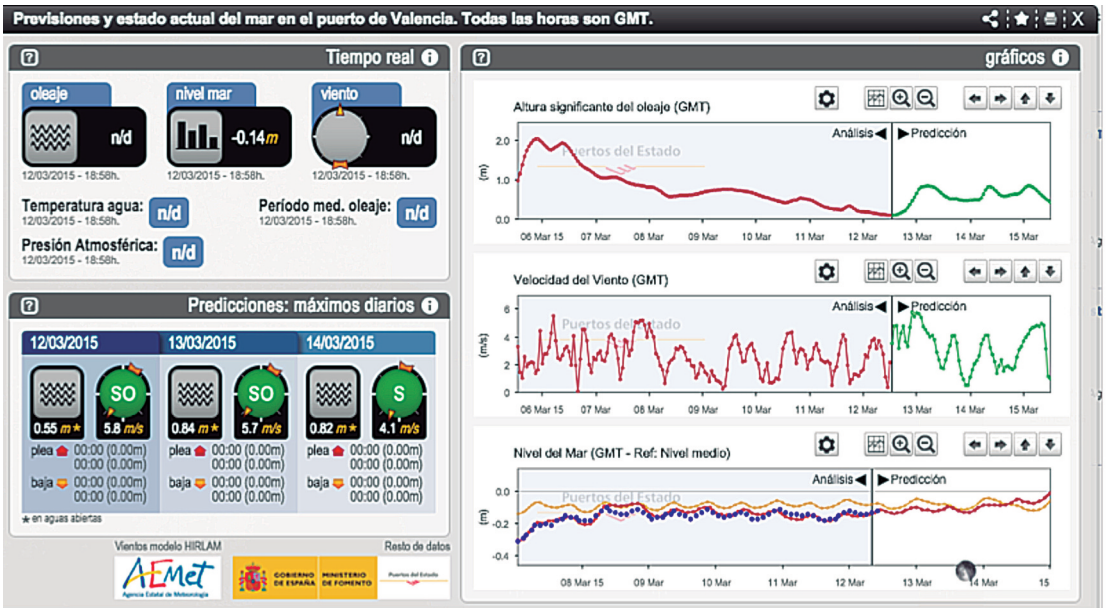


FIGURA 19. Visualización de las condiciones oceanometeorológicas en el Puerto de Valencia, serie histórica, valores en tiempo real y predicción

Las predicciones tienen en cuenta las transformaciones del oleaje al aproximarse a la costa inducidas por la batimetría y los accidentes geográficos. Estos datos por lo tanto son representativos de un área muy limitada al entorno del punto donde se obtiene la información.

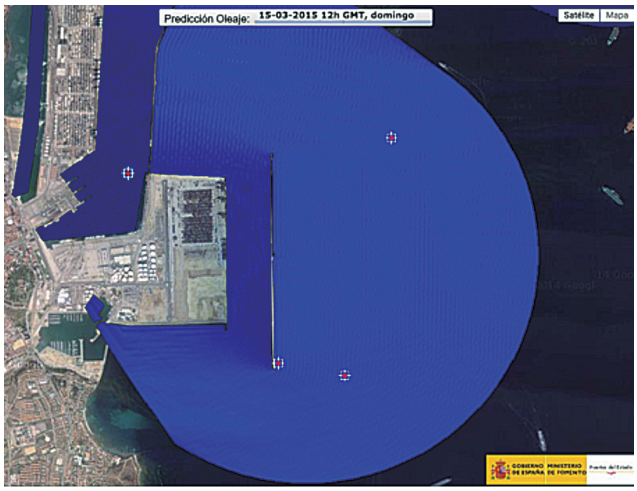


FIGURA 20. Predicción de oleaje en las inmediaciones del dique Isla Verde exterior, en la Autoridad Portuaria de Bahía de Algeciras

La caracterización de la dinámica marina en el entorno y el interior de los puertos es de gran interés para las terminales, ya que les permite conocer cuáles serán las condiciones de explotación, así como para las navieras, ya que proporciona información sobre las condiciones de aproximación. Con este fin el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria ha desarrollado el proyecto MARUCA, que permite obtener estadísticas del clima marítimo en el entorno del puerto y en las dársenas, gracias a la combinación de técnicas de reanálisis, propagación y downscaling hacia el interior de los puertos de los estadísticos de clima más útiles para las operaciones portuarias. Para ampliar la información se recomienda al lector acudir al sitio web del proyecto MARUCA en maruca.ihcantabria.es

8.3. El proyecto Sampa: sistema autónomo de medición, predicción y alerta

8.3.1. Descripción general

Con el fin de aumentar la seguridad y la sostenibilidad de las actividades portuarias, el objetivo del proyecto SAMPA es la implantación de un sistema de predicción de alta resolución en toda la zona del Estrecho de Gibraltar y las instalaciones portuarias de la Bahía de Algeciras y Tarifa, conectados a un sistema de alerta temprana, que permitirá conocer con mayor exactitud y antelación las condiciones océano-meteorológicas y poder planificar en base a ellas.

El proyecto SAMPA está siendo desarrollado por Puertos del Estado, la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras y el Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA), con la colaboración de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), la Universidad de Cádiz y el Instituto Hidrográfico de la Marina. Las estimaciones iniciales sobre la duración del proyecto eran de 3 años, los cuales darían comienzo en 2010, estando la fecha de finalización fijada en el año 2013. Sin embargo, los objetivos iniciales del proyecto se alcanzaron a finales de 2012, momento en el que se dio por finalizado el mismo.

El proyecto consta de 3 módulos principales:

- Un sistema de medición permanente (boyas oceanográficas, estaciones de nivel del mar, estaciones meteorológicas y correntímetros) que ofrece una completa descripción en tiempo real de las condiciones del mar y la atmósfera en la zona.

- Un sistema de predicción basado en modelado a un gran nivel de detalle de la hidrodinámica en 3D de un área marítima determinada, integrando las variables más relevantes del medio marino, como son el oleaje, viento, nivel del mar y corrientes, temperatura. Su aplicación con éxito al área marítima del Estrecho no hace sino revelar la potencia del proyecto, dada la especial complejidad hidrodinámica de este ámbito geográfico.

- Un conjunto de herramientas de valor añadido entre las que destacan un sistema de visualización específico, denominado cuadro de mando ambiental de SAMPA, y otro de generación de alertas vía email y SMS basado en la detección automática de situaciones adversas y la publicación/envío de advertencias a los distintos usuarios de la comunidad portuaria.

Actualmente ya se pueden consultar los datos en la página oficial del proyecto en tiempo real y las predicciones con un horizonte temporal de 3 días.

8.3.2. Instrumentación empleada

A lo largo del año 2011 se llevaron a cabo dos campañas de toma de datos en la Bahía de Algeciras, en dos épocas distintas del año con el fin de validar los resultados del modelo. Los periodos escogidos para el despliegue de la instrumentación fueron la primavera de 2011 (Marzo-Junio 2011) y el otoño-invierno de ese mismo año (Octubre 2011-Febrero

2012). Las estaciones de observación se pueden clasificar en someras (profundidades menores de 40 metros) y profundas (profundidades en torno a los 100 metros).

El diseño instrumental para estaciones de uno u otro tipo es diferente. Las estaciones ubicadas en aguas poco profundas contienen un único instrumento de medida, el perfilador de corrientes (ADP en lo sucesivo) que perfila corrientes en capas superficiales mediante efecto Doppler. Esta estación lleva incorporada además sensores de temperatura y presión. Las estaciones localizadas a mayor profundidad tienen un diseño más complejo, típico de las líneas de fondeo usadas en investigación oceanográfica. Constan de una boya de cabecera, que proporciona la flotabilidad al conjunto, en la que va embebido el ADP y una antena emisora por satélite para localización en caso de emergencia, un sensor CT de temperatura/salinidad y un liberador acústico para despegar la línea del fondo. El ADP cuenta con sensores de presión y temperatura.

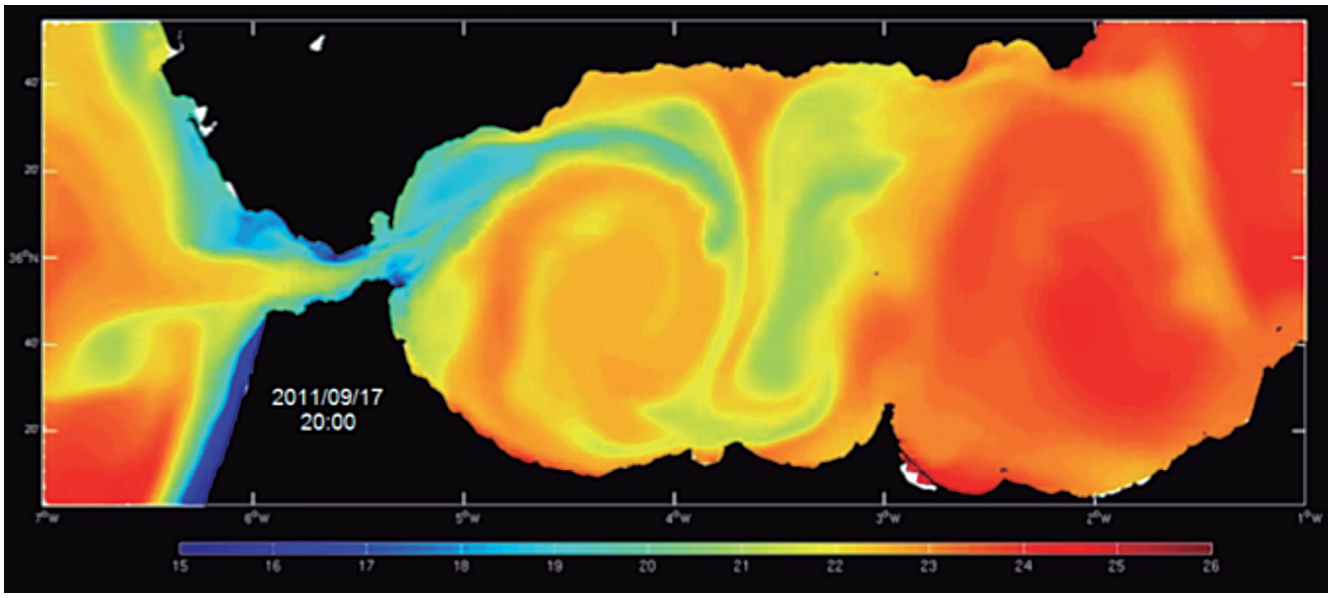


Figura 21. Temperatura superficial en el Estrecho de Gibraltar y el mar de Alborán

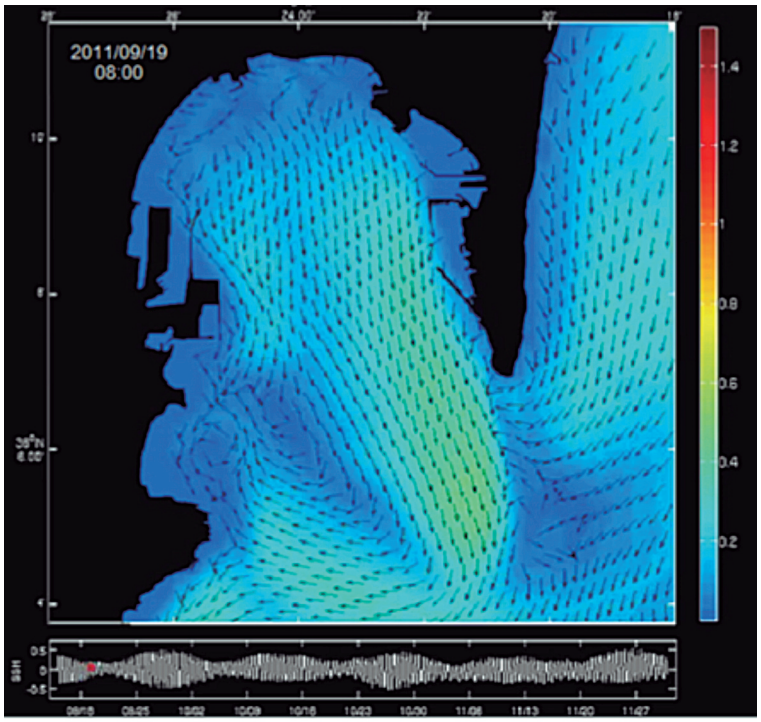


Figura 22. Velocidad superficial de corrientes en la Bahía de Algeciras

8.3.3. Área piloto de implantación

Este proyecto ha sido desarrollado en la Bahía de Algeciras y en la zona costera española del Estrecho de Gibraltar, con la intención de que pueda desarrollarse en todas las Autoridades Portuarias españolas y que mediante convenios internacionales pueda extenderse a otros países.

La Bahía fue elegida por tener una de las mayores intensidades de tráfico marítimo del planeta. Estas aguas son punto de confluencia de las principales rutas marítimas internacionales, con casi 100.000 buques transitando al año, de los cuales unos 25.000 hacen escala en las aguas e instalaciones administradas por la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras (APBA).

Debido a ello, se está poniendo en marcha una nueva iniciativa, denominada SAMOA (Sistema de Apoyo Meteorológico y Oceanográfico de las Autoridades Portuarias), que pretende extender el potencial SAMPA a otras instalaciones.

8.3.4. Enlaces a Sampa y otros proyectos relacionados

Página oficial
http://sampa-apba.puertos.es/

Otros proyectos relacionados
http://oceano.uma.es/proyectosref.php?Id=10&i=1
http://www.naucher.com/es/actualidad/puertos-del-estado-presenta-el-sistema-de-monitorizacion-sampa-y-la-aplicacion-movil-imar/_n:513/
http://oceano.uma.es/almacen/P29.pdf

9. TABLA RESUMEN DE LAS FUENTES DE INFORMACIÓN PÚBLICAS Y SUS CARACTERÍSTICAS

Dada la heterogeneidad de fuentes de información de que se dispone, en las siguientes tablas se recogen los parámetros que se pueden obtener de las bases de datos de más fácil acceso. En la Figura 28 se muestra el inicio y el fin de los registros disponibles de información océano-marítima.

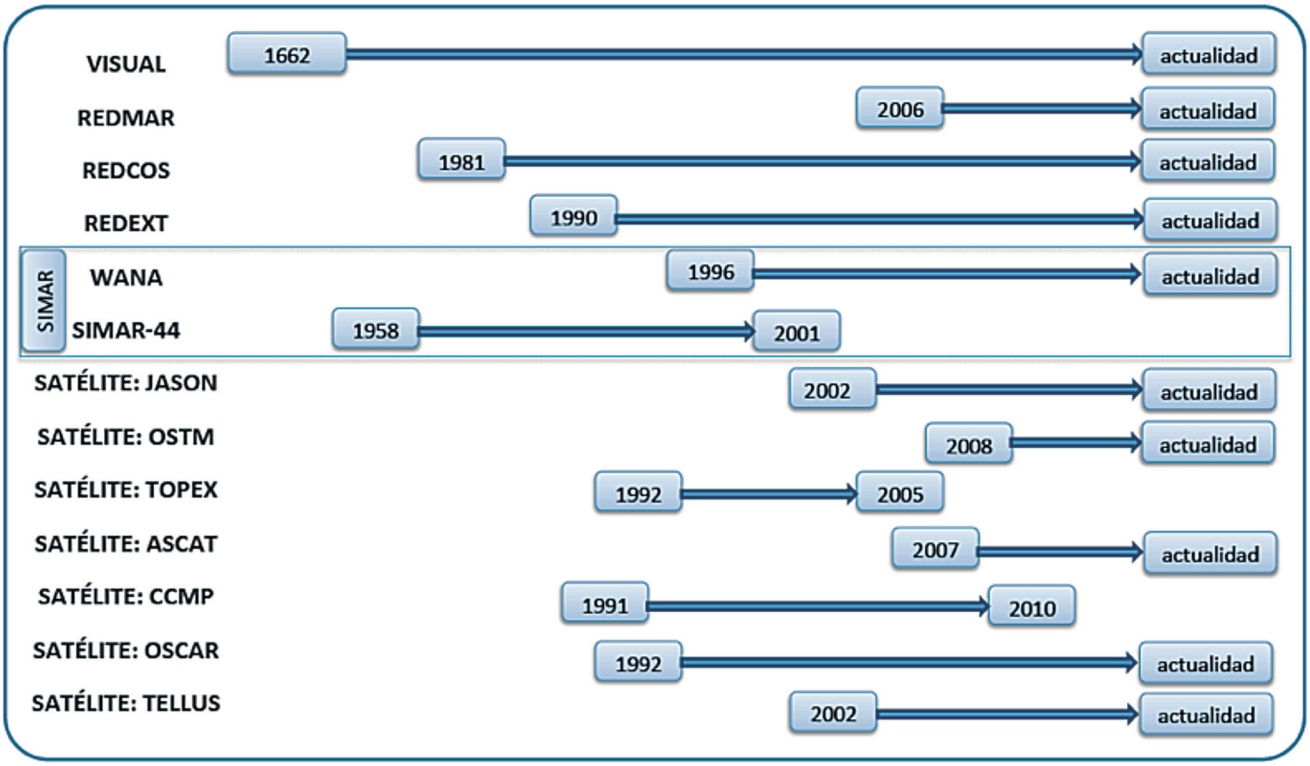


Figura 23. Disponibilidad de información océano-marítima según la fuente. Elaboración propia a partir de la información proporcionada por cada proyecto

	Parámetro	Fuente de información	
OLEAJE	Altura, periodo dirección del oleaje de viento*	Visual	
	Altura, periodo de oleaje de fondo*	Visual	
	Altura significante espectral [Hm]	REDMAR	
		WANA	
		SIMAR-44	
	Periodo medio espectral [Tm0 y Tm02]	SIMAR-44	
		WANA	
	Altura significante [Hs]	Satélite: JASON	
		Satélite: OSTM	
		Satélite: TOPEX	
	Periodo medio [Tm]	REDMAR	
		Satélite: JASON	
		Satélite: OSTM	
		Satélite: TOPEX	
	Periodo de pico espectral [Tp]	WANA	
		SIMAR-44	
	Dirección media de procedencia del oleaje [dirm]	WANA	
		SIMAR-44	
	Altura significante espectral del mar de viento [Hm_V]	WANA	
		SIMAR-44	
	Periodo medio espectral del mar de viento [Tm_V]	SIMAR-44	
		WANA	

Tabla 3. Resumen de la información disponible sobre los principales descriptores del oleaje

	Cadencia	Periodo de datos	Formato
	Mensual	1662 - actualidad	NOAA AMIM
	Mensual	1662 - actualidad	NOAA AMIM
	1 dato cada 20 minutos	2006 - actualidad	
	1 dato cada 3 horas	1996 – 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	
	1 dato cada 3 horas	1958-2001	
	1 dato cada 3 horas	1958 - 2001	
	1 dato cada 3 horas	1952 - 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	
	10 días	INIC: 2002, 2008	RAW, NETCDF
	10 días	INIC: 2008, 2009	NETCDF
	10 días	INIC: 1992-1996 FIN: 1998-2005	RAW
	1 dato cada 20 minutos	2006 - actualidad	
	10 días	INIC: 2002, 2008	RAW, NETCDF
	10 días	INIC: 2008, 2009	NETCDF
	10 días	INIC: 1992-1996 FIN: 1998-2005	RAW
	1 dato cada 3 horas	1996 - 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	
	1 dato cada 3 horas	1958 - 2001	
	1 dato cada 3 horas	1996 - 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	
	1 dato cada 3 horas	1958 - 2001	
	1 dato cada 3 horas	1996 - 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	
	1 dato cada 3 horas	1958 - 2001	
	1 dato cada 3 horas	1958 - 2001	
	1 dato cada 3 horas	1996 - 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	

	Parámetro	Fuente de información	
OLEAJE	Dirección media de procedencia del mar de viento [dirm_V]	SIMAR-44	
		WANA	
	Altura significante espectral del mar de fondo [Hm_F]	SIMAR-44	
		WANA	
	Periodo medio espectral de mar de fondo [Tm_F]	SIMAR-44	
		WANA	
	Dirección media de procedencia del mar de viento [dirm_F]	SIMAR-44	
		WANA	
	Altura significante Espectral de Cruce por Cero [Hs]	REDCOS	
		REDEXT	
	Altura máxima y Periodo asociado	REDCOS	
		REDEXT	
	Periodo significante [Ts]	REDCOS	
		REDEXT	
	Periodo Medio Espectral de cruce por cero [Tm]	REDCOS	
		REDEXT	

Tabla 3 (Continuación). Resumen de la información disponible sobre los principales descriptores del oleaje

	Cadencia	Periodo de datos	Formato
	1 dato cada 3 horas	1958 - 2001	
	1 dato cada 3 horas	1996 - 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	
	1 dato cada 3 horas	1958 - 2001	
	1 dato cada 3 horas	1996 - 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	
	1 dato cada 3 horas	1958 - 2001	
	1 dato cada 3 horas	1996 - 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	
	1 dato cada 3 horas	1958 - 2001	
	1 dato cada 3 horas	1996 - 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	
	1 dato cada hora	INIC: 1981 - 2005 FIN: 2002 - actualidad	
	1 dato por hora	INIC: 1990-2009 FIN: junio de 2014	
	1 dato cada hora	INIC: 1981 - 2005 FIN: 2002 - actualidad	
	1 dato cada hora	INIC: 1990-2009 FIN: junio de 2014	
	1 dato cada hora	INIC: 1981 - 2005 FIN: 2002 - actualidad	
	1 dato cada hora	INIC: 1990-2009 FIN: junio de 2014	
	1 dato cada hora	INIC: 1981 - 2005 FIN: 2002 - actualidad	
	1 dato cada hora	INIC: 1990-2009 FIN: junio de 2014	

	Parámetro	Fuente de información	
OLEAJE	Dirección media del periodo de Pico de Energía	REDCOS (sólo boyas Triaxys	
		REDEXT	
	Dispersión de la Dirección en el Pico de Energía	REDCOS (sólo boyas Triaxys	
		REDEXT	

Tabla 3 (Continuación). Resumen de la información disponible sobre los principales descriptores del oleaje

	Parámetro	Fuente de información	
METEOROLOGICO	Velocidad media de viento [VelV. m/s]	SIMAR-44	
		WANA	
		REDEXT	
		Satélite: ASCAT	
		Satélite: CCMP	
	Dirección media de procedencia del viento [DirV, º]	SIMAR-44	
		WANA	
		REDEXT	
	Velocidad de racha de viento	REDEXT	
	Temperatura del Aire	REDEXT	
	Presión del Aire	REDEXT	

Tabla 4. Parámetros atmosféricos

	Cadencia	Periodo de datos	Formato
	1 dato cada hora	INIC: 1981 - 2005 FIN: 2002 - actualidad	
	1 dato cada hora	INIC: 1990-2009 FIN: junio de 2014	
	1 dato cada hora	INIC: 1981 - 2005 FIN: 2002 - actualidad	
	1 dato cada hora	INIC: 1990-2009 FIN: junio de 2014	

	Cadencia	Periodo de datos	Formato
	1 dato cada 3 horas	1958 - 2001	
	1 dato cada 3 horas	1996 - 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	
	Se promedia durante 10 minutos cada hora	INIC: 1990-2009 FIN: junio de 2014	
	12 horas	2007, 2009	NETCDF
	12 horas	2002-2010, 1990-1997, 1991-2000, 1995-2009, 1999-2006, etc.	BINARY
	1 dato cada 3 horas	1958 - 2001	
	1 dato cada 3 horas	1996 - 2011	
	1 dato cada hora	2011 - actualidad	
	Se promedia durante 10 minutos cada hora	1990-2009 - actualidad	
	Se promedia durante 10 minutos cada hora	1990-2009 - actualidad	
	Se promedia durante 10 minutos cada hora	1990-2009 - actualidad	
	Se promedia durante 10 minutos cada hora	1990-2009 - actualidad	

NIVEL del MAR

Parámetro	Fuente de información
Nivel de Mar (m)	REDMAR
Residuo Meteorológico	REDMAR
Extremos	REDMAR
Niveles Medios	REDMAR
Constantes armónicas	REDMAR

Tabla 5. Resumen de la información disponible sobre los principales descriptores del nivel del mar

OCEANOGRAFICO

Parámetro	Fuente de información
Circulación oceánica	Satélite: OSCAR
Presión oceánica	Satélite: TELLUS
Salinidad	REDEXT
	Satélite: AQUARIUS
Temperatura del agua	REDEXT
	Satélite: ABOM
	Satélite: AVHRR
	Satélite: EUR
Velocidad media de la corriente	REDEXT
Dirección media de la corriente	REDEXT

Tabla 6. Resumen de la información disponible sobre los principales descriptores sobre otros parámetros oceanográficos

	Cadencia	Periodo de datos	Formato
	Se promedia cada minuto y se obtienen datos horarios	1992 – actualidad	
	1 hora	1992 - actualidad	
	1 día/1 Mes/ 1 Año	1992 - actualidad	
	1 día/1 Mes/ 1 Año	1992 - actualidad	
	1 año	1992 - actualidad	

	Cadencia	Periodo de datos	Formato
	5 días	1992	NETCDF
	1 mes	2002	GIF, GEOTIFF, ASCII, NETCDF
	1 dato cada hora	INIC: 1990-2009 FIN: junio de 2014	
	1d/7d/1m/3m		HDF5
	1 dato cada hora	INIC: 1990-2009 FIN: junio de 2014	
	1 día	NETCDF	
	5d/7d/8d/1m/1a	RAW, HDF	
	1h/3h/2 veces al día/ 1d	NETCDF	
	1 dato cada hora	INIC: 1990-2009 FIN: junio de 2014	
	1 dato cada hora	INIC: 1990-2009 FIN: junio de 2014	

10. REFERENCIAS

Reguero, B.G., Menéndez, M., Méndez, F.J., Mínguez, R., Losada, I.J. (2012): A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering*, 65, 38-55.

ANEXO 3

Fundamentos probabilísticos para el cálculo del riesgo

En este anexo se recoge un resumen sobre los fundamentos sobre probabilidad, conceptos básicos que se emplean en el cuerpo del documento principal y algunos ejemplos ilustrativos apoyados en la base matemática mostrada

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE PROBABILIDAD

1.1. Experimento determinista y expermimento aleatorio

- **Experimento determinista**: Se conoce como experimento determinista al experimento cuyo resultado es conocido.
- **Experimento aleatorio**: Aquél que puede dar lugar a varios resultados, sin que se pueda enunciar con certeza cuál de estos va a ser observado en la realización del experimento, a pesar de haberlo realizado previamente en similares condiciones.

EJEMPLO (EXPERIMENTO ALEATORIO)

Un proyectista de obras marítimas está interesado en conocer el tiempo que transcurre entre la ocurrencia de olas de altura mayores de 5 metros en una determinada zona, para lo cual instala una boya que registra altura y tiempo. Se trata de un experimento aleatorio porque los tiempos que pueden obtenerse son infinitos y además, desconocidos a priori.

Para obtener un conocimiento de la población se toma un conjunto de datos que se conoce como muestra y, a partir de los resultados o conclusiones obtenidos de la muestra, los generalizamos a dicha población sin proporcionar una información exacta, sino incluyendo un cierto nivel de incertidumbre. A la colección de los posibles resultados que se obtiene en los experimentos aleatorios se le llama espacio muestral.

1.2. Sucesos

Suceso: Se trata de la existencia de un subconjunto dentro de un espacio muestral. Un suceso es lo que se observa que ocurre entre todos los casos posibles.

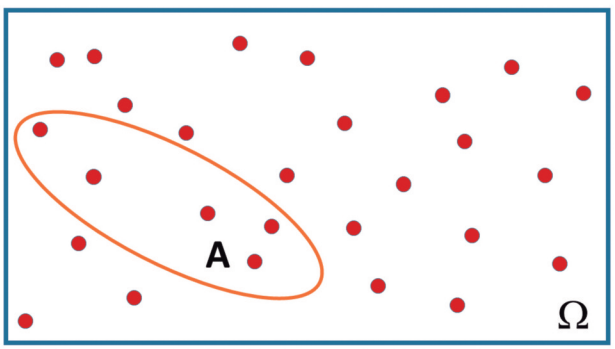


FIGURA 1. Representación de un suceso A dentro de un espacio muestral Ω

Existen diferentes tipos de sucesos:

Suceso elemental, suceso simple o punto muestral es cada uno de los resultados posibles del experimento aleatorio. Los sucesos elementales son, por tanto, subconjuntos del espacio muestral que cuentan con sólo un elemento (los puntos de la figura 1 representan cada uno de los sucesos elementales).

Se llama **suceso complementario** del A, A^c, al formado por los sucesos elementales que no están en A. Todos los sucesos elementales del espacio muestral pertenecen a uno u otro sucesos.

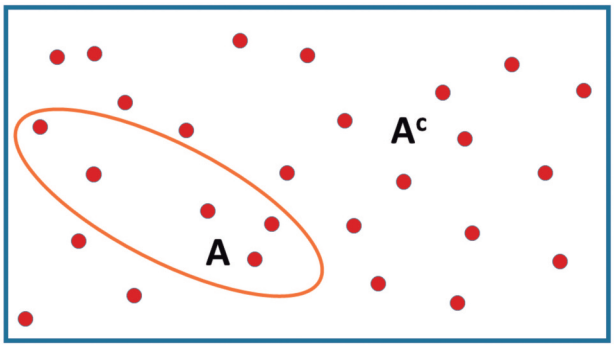


FIGURA 2. Representación de un suceso A dentro de un espacio muestral y su suceso complementario A^c

Se llama **suceso unión** de A y B, A U B, al formado por los sucesos elementales que están en A y/o en B.

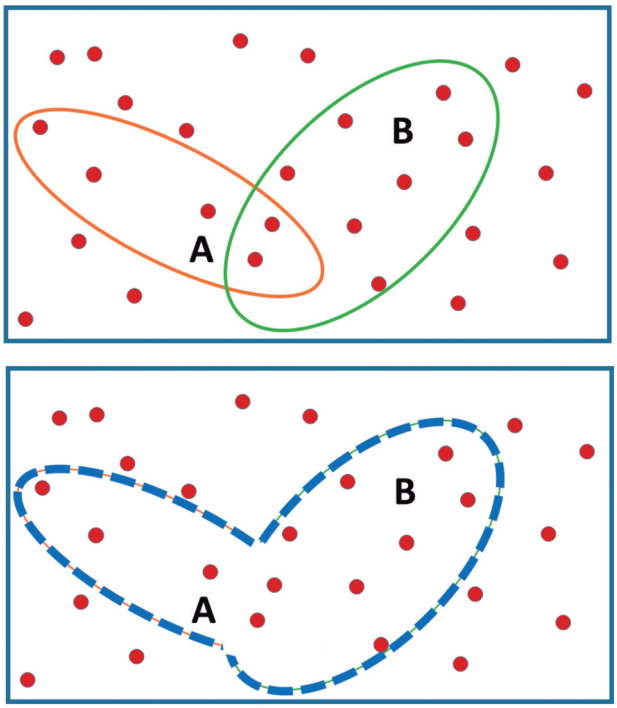


FIGURA 3. Representación de los sucesos A, B (arriba) y A B (abajo)

Se llama **suceso intersección** de A y B, denotado por A∩B, al formado por los sucesos elementales que están simultáneamente en A y en B.

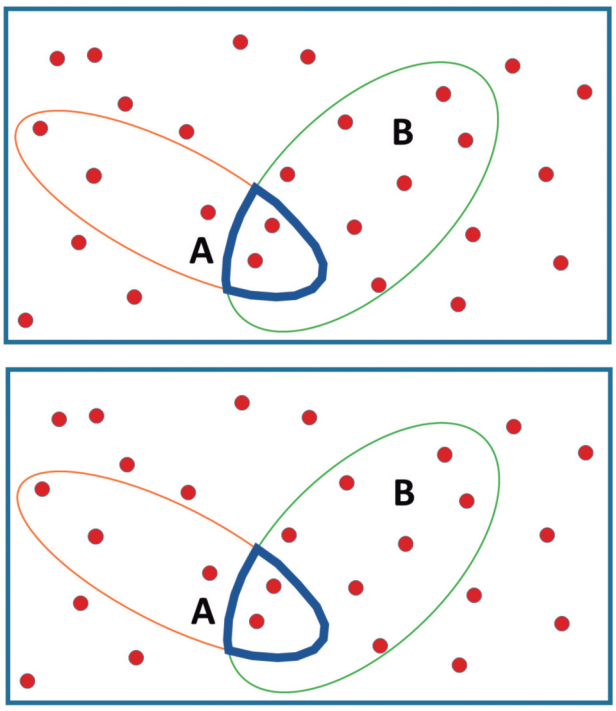


Figura 4. Representación de los sucesos A, B (arriba) y A∩B (abajo)

Se llama **suceso compuesto** a todo subconjunto, incluyendo el vacío, del espacio muestral. Un suceso compuesto ocurre cuando se da alguno de sus sucesos elementales. Entre este tipo de sucesos destacan:

- **Suceso seguro**, que consta de todos los sucesos elementales del espacio muestral. Se le denomina seguro o cierto porque ocurre siempre.
- **Suceso imposible**, es aquél que no tiene ningún elemento del espacio muestral Ω y por tanto no ocurrirá nunca.

Dos sucesos son compatibles cuando pueden ocurrir simultáneamente, es decir, cuando la intersección de los conjuntos asociados no está vacía, mientras que son incompatibles cuando no pueden ocurrir simultáneamente, es decir, cuando la intersección de los conjuntos asociados está vacía.

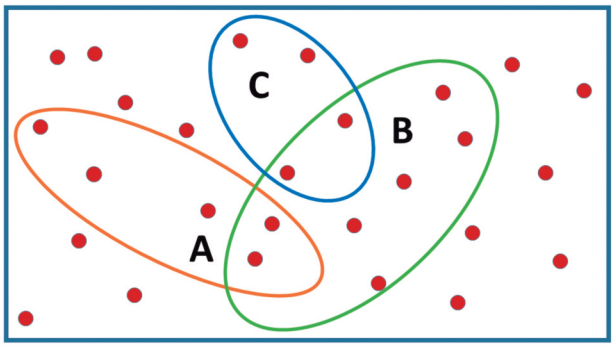


Figura 5. Representación de sucesos compatibles (A y B; B y C) e incompatibles (A y C)

- **Suceso opuesto**: Dos sucesos son opuestos cuando ocurre siempre alguno de los dos, y, si ocurre uno, no ocurre el otro, es decir, que los conjuntos asociados de ambos son complementarios respecto al espacio muestral.

Ejemplo (Suceso compatible/incompatible)

En el estudio de la morfodinámica de playas meso o macromareales, la clasificación de los diferentes estados morfodinámicos depende del rango de marea relativo y del parámetro adimensional de velocidad de caída de grano. Si suponemos que la única variable aleatoria que interviene en esta clasificación es la altura

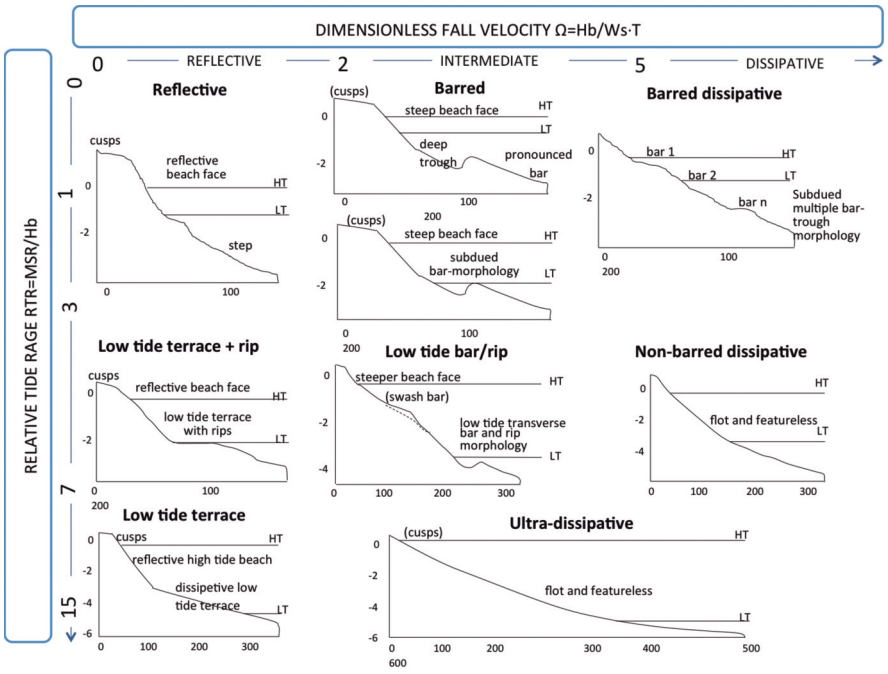


Figura 6. Estados morfodinámicos de las playas según Masselink y Short (1993)

de ola significante en rotura cuya distribución es conocida (periodo constante), podemos establecer las probabilidades de ocurrencia de cada estado morfodinámico (Figura 6). Algunos de estos estados pueden ser sucesos imposibles debido a que los sucesos "altura de ola significante en rotura dentro de un rango" asociados a los límites del rango de marea relativo y al parámetro adimensional de velocidad de caída de grano correspondientes a dicho estado son sucesos incompatibles.

Así, en la Figura 7, "1,44 m<Hsb<3,6 m" es un suceso incompatible con "0,543 m<Hsb<1,267 m". Por el contrario, el suceso "Hsb>3,6m" y el suceso "Hsb>1.267 m" son compatibles, siendo su compatibilidad (suceso intersección) ""Hsb>3,6 m".

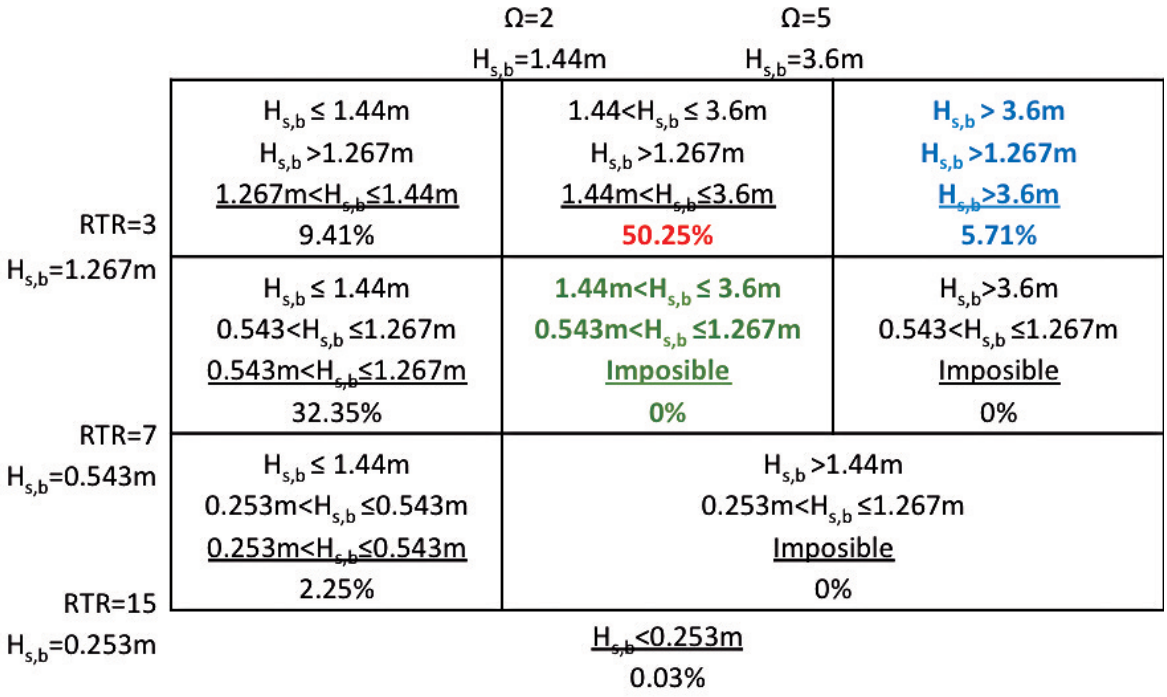


Figura 7. Ejemplo de estados morfodinámicos. En azul aparece un suceso compatible y en verde un suceso incompatible. Para poder resolver el problema de forma sencilla se ha supuesto que el periodo del oleaje es constante

2. TEORÍA DE LA PROBABILIDAD

La realización repetida de experimentos aleatorios pone en evidencia que unos sucesos ocurren con más frecuencia que otros. Sin embargo, las frecuencias de aparición de los diferentes sucesos y la combinación de éstas para determinar la de otros sucesos compuestos relacionados con ellos siguen unas determinadas leyes que deben satisfacerse.

La Teoría de la Probabilidad es la parte de las Matemáticas que se encarga del estudio del experimento aleatorio. En Probabilidad conocemos una variedad de posibles desenlaces, pero no cuál de ellos ocurrirá. Por tanto, la probabilidad de ocurrencia de los eventos depende del conjunto de posibles desenlaces.

2.1. Axiomas: Propiedades de la Probabilidad

El valor de la probabilidad de cualquier suceso se encuentra entre 0< $P(A)$ <1, ya que la probabilidad del suceso imposible (Ø) es nula y la probabilidad del suceso seguro (Ω) es uno.

$$Prob\ (\emptyset) = 0$$
$$Prob\ (\Omega) = 1$$

Dada una serie de sucesos $\{A_1, A_2, \ldots A_n\}$ tales que sean incompatibles dos a dos (es decir, que si se toman dos sucesos cualquiera de todos los posibles, éstos no se pueden dar de forma simultánea), su intersección dará lugar al vacío:

$$Ai \cap Aj = \emptyset,\ \forall i \neq j$$

La probabilidad de unión en todos ellos es la suma de sus probabilidades:

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \ldots \cup A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \ldots + P(A_n)$$

La probabilidad de un suceso más su complementario es el suceso seguro:

$$Prob\ (A) + Prob\ (A^c) = 1$$

De estos axiomas se deducen los siguientes, que se apoyan gráficamente tras la descripción matemática:

- Si A y A^c son sucesos complementarios, se verifica que la probabilidad de uno de ellos es 1 menos la probabilidad de su complementario, donde 1 representa la probabilidad del suceso seguro:

$$P(A) = 1 - P(A^c)$$

- Si A es un suceso que incluye al suceso B ($A \supset B$), se obtiene que la probabilidad de B es menor o igual que la probabilidad de A:

$$P(B) \leq P(A)$$

- La probabilidad de cualquier suceso es menor o igual a la unidad. No existen probabilidades mayores que 1:

$$P(A) \leq 1$$

- Si A y B son dos sucesos cualesquiera (una demostración que se puede encontrar en numerosos textos dedicados a la estadística, así como en la red), se cumple que:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$$

- Si A y B son dos sucesos cualesquiera, se cumple que la probabilidad de la unión de dichos sucesos es menor o igual que la probabilidad de uno más la probabilidad del otro. Este axioma deriva del anterior:

$$P(A \cup B) \leq P(A) + P(B)$$

2.2. Tipos de probabilidad

Existen cuatro tipos de probabilidad: marginal, unión, conjunta y condicionada.

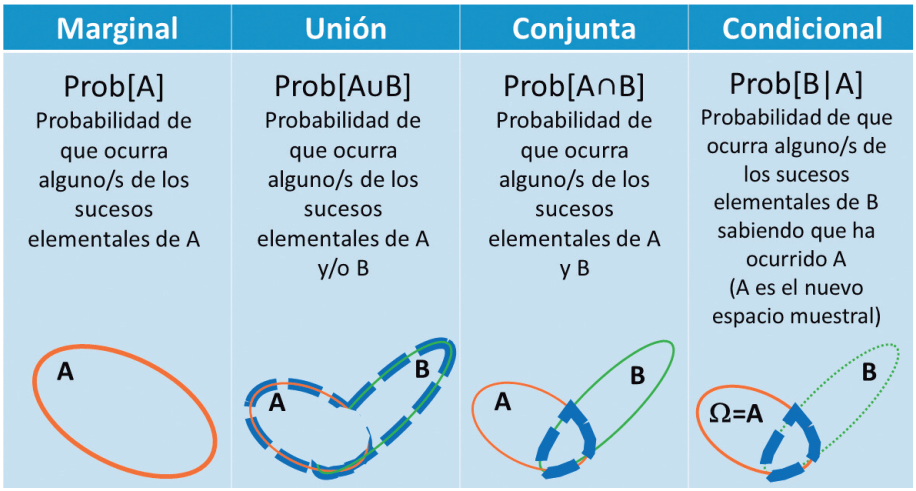


FIGURA 8. Representación gráfica de los 4 tipos de probabilidad

PROBABILIDAD MARGINAL

La probabilidad de cualquier suceso A es igual al cociente entre el número de resultados favorables a la ocurrencia de A y el número total de posibles resultados del espacio muestral:

$$P(A) = \frac{resultados\ favorables}{total\ de\ resultados\ posibles}$$

Para calcular la probabilidad de un suceso cuando todos los posibles resultados tienen la misma probabilidad de ocurrir se aplica lo que se conoce como Regla de Laplace para espacios muestrales finitos. También se le suele llamar probabilidad a priori, pues para calcularla es necesario conocer antes de realizar el experimento aleatorio el correspondiente espacio muestral, pudiendo calcular la probabilidad de cualquier suceso antes de realizar el experimento aleatorio.

EJEMPLO DE PROBABILIDAD A PRIORI

El lanzamiento de un dado sólo puede proporcionar 6 resultados, de forma que el espacio muestral es finito y si el dado está correctamente equilibrado, la probabilidad de obtener cada uno de los seis números es la misma.

Aplicar la definición clásica de probabilidad puede presentar dificultades en algunos casos, como cuando el espacio muestral es infinito, o bien cuando los posibles resultados de un experimento no son igualmente probables. Para resolver estos problemas se hace una extensión de la definición de probabilidad (de forma que se pueda aplicar con menos restricciones), lo que nos conduce a la noción frecuentista de la probabilidad.

Este proceso se define como inductivo y consiste en tomar una serie de muestras de las que, por

medio de tratamientos estadísticos, se obtiene el modelo de probabilidad que permite determinar el valor buscado. Se le llama inductivo porque, a partir de una serie de datos de una población, se infiere el modelo probabilístico que predice el comportamiento de la misma.

Ejemplo

La definición de los regímenes de oleaje se realiza a partir de los datos proporcionados por las boyas de Puertos de Estado, que se analizan estadísticamente y generan un modelo de probabilidad que nos permite estimar el valor de altura de ola.

Probabilidad de unión

La probabilidad de la unión de dos sucesos es igual a la suma de las probabilidades individuales de los dos sucesos que se unen, menos la probabilidad del suceso intersección:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$$

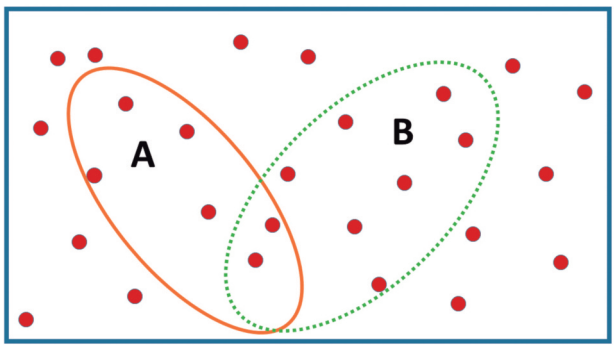
Probabilidad conjunta

Es la probabilidad de la intersección, $P(A \cap B)$, es decir la probabilidad de que ocurra la zona que comparten A y B.

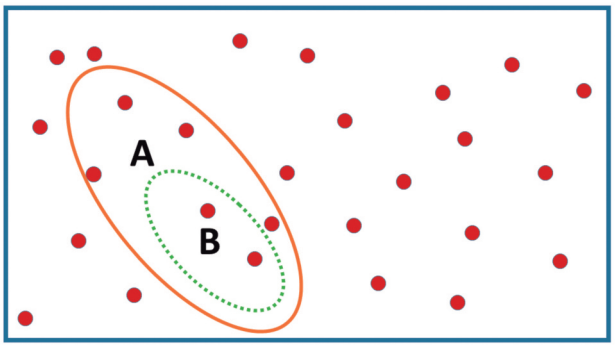
Probabilidad condicionada

Siendo A y B dos sucesos tal que $P(B) \neq 0$, se llama probabilidad de A condicionada a B, $P(A/B)$, a la probabilidad de que ocurra A dado que ha sucedido B. Es la proporción entre la intersección de dos sucesos y el suceso que condiciona:

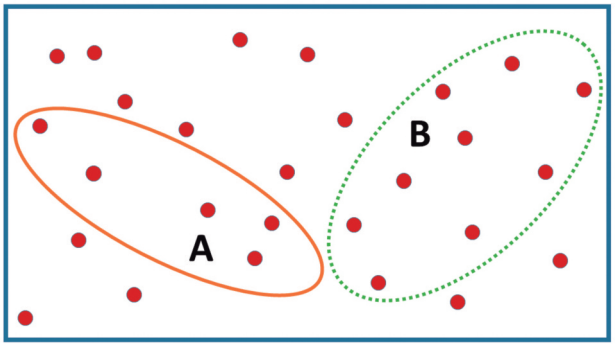
$$P(A / B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$



Sucesos incompatibles ($A \cap B = \emptyset$)
$P(B|A)=0$



Sucesos compatibles ($A \cap B \neq \emptyset$) y $B \subseteq A$
$P(B|A)=1$

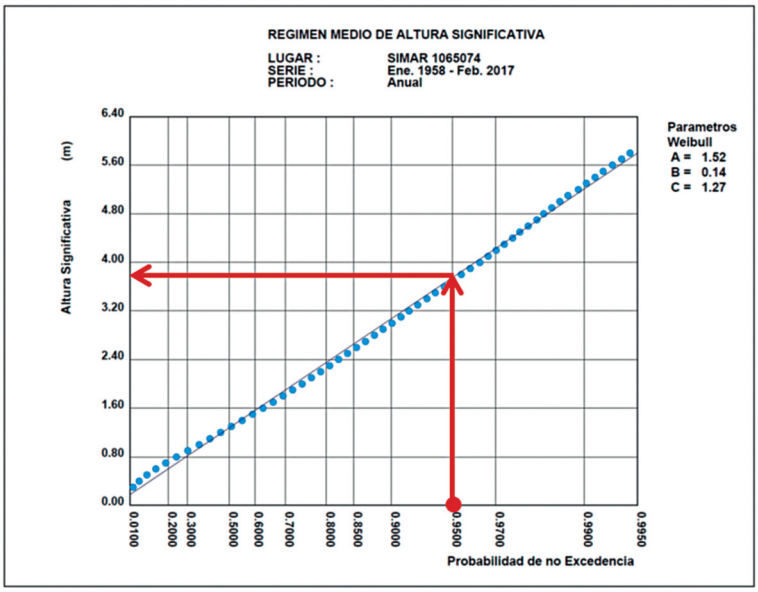


Sucesos compatibles ($A \cap B \neq \emptyset$)
$P(B|A) = P(A \cap B) / P(A)$

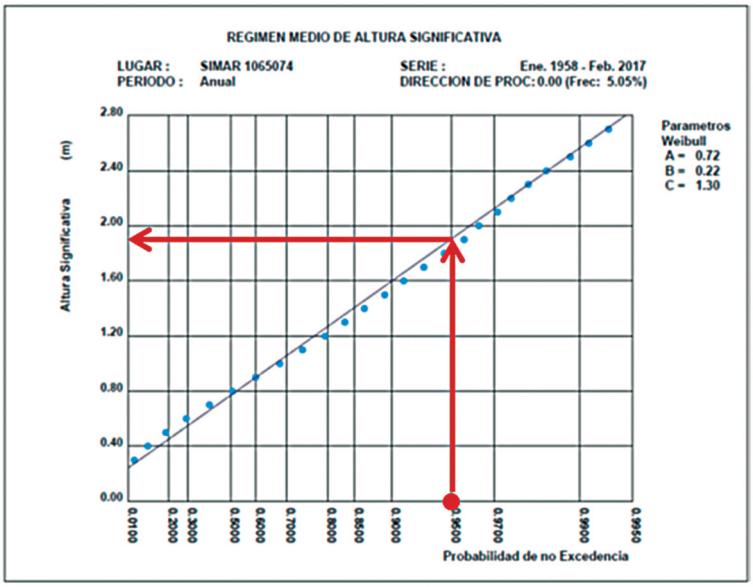
Figura 9. Diferentes casos en los que se puede aplicar la probabilidad condicionada

Ejemplo Probabilidad condicionada

En el ámbito marítimo, un ejemplo sencillo de probabilidad condicionada es el régimen medio direccional (de altura de ola visual, por ejemplo). En dicho régimen se establece la relación entre los diversos valores de la variable con la probabilidad de que dichos valores no sean superados en el año climático medio con la variable procedente del sector direccional considerado. Se trata, por tanto, de probabilidad condicionada a que la variable proceda de



N



NNE

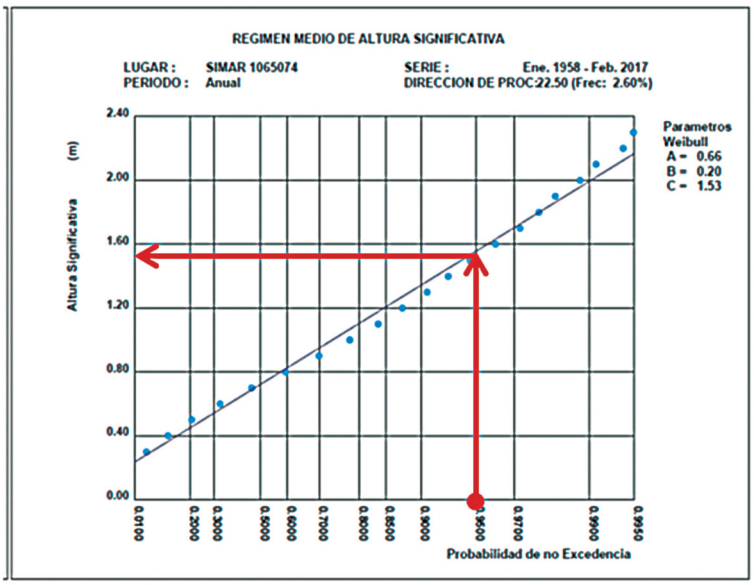


FIGURA 10. Ejemplo de probabilidad condicionada: regímenes direccionales de altura de ola significante punto SIMAR 1065074

dicho sector direccional. Así, para obtener este régimen sólo se tendrán en cuenta aquellos datos procedentes del sector direccional considerado.

La figura 10 muestra, para el mismo punto SIMAR, la probabilidad de que la altura de ola significante no sea superada. En la parte superior, se muestra el caso escalar (con independencia de la dirección de procedencia del oleaje) mientras que, en los otros dos, se muestra sólo el sector direccional indicado (condicionado a dicho sector de incidencia, es decir, considerando únicamente los datos oleaje procedente de dicho sector). Se representa en todos los casos, el valor de altura de ola significante superado por el 5% de los estados de mar (probabilidad acumulada de 0,95). Los valores obtenidos para los tres casos son, aproximadamente, 3,7 m; 1,9 m y 1,55 m, respectivamente.

Si dos sucesos A y B son independientes, tales que $P(A)>0$ y $P(B)>0$, se dice que la $P(A/B)=P(A)$ o bien que $P(B/A)=P(B)$ porque para dos sucesos independientes:

$$P(A\cap B) = P(A)\cdot P(B)$$

$$P(A / B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = P(A)$$

2.3. Teorema de la probabilidad total

Sea $\{A_1,A_2,...,A_N\}$ una partición sobre el espacio muestral (ver figura 11 superior) donde $A_1,A_2,...,A_n$ son sucesos incompatibles dos a dos y cuya suma da lugar al espacio muestral total Ω, y sea B un suceso cualquiera del que se conocen las probabilidades condicionales $P(B|A_i)$ (correspondientes a las tramas de la figura 11 inferior).

La probabilidad del suceso B viene dada por la expresión:

$$P(B) = P(B \cap A_1) + P(B \cap A_2) + ... + P(B \cap A_n) =$$
$$= \sum_{1\le i\le n} P(B / A_i)\cdot P(A_i)$$

EJEMPLO TEOREMA DE LA PROBABILIDAD TOTAL

Para el cálculo del régimen escalar de altura de ola significante a partir de los regímenes direccionales, se usa el método de la probabilidad total.

$$\text{Prob}[H_s \le x] = \sum_j \text{Prob}[H_s \le x \,|\, \theta_j]\ \text{Prob}[\theta_j]$$

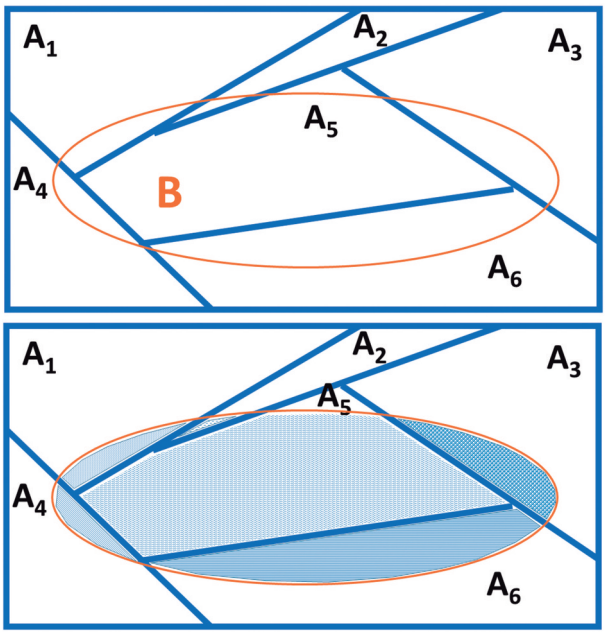


FIGURA 11. *Representación del Teorema de la Probabilidad Total*

Donde:

- *Prob* $[H_s \le x]$ *representa la probabilidad de no excedencia de altura de ola significante (régimen escalar).*
- *Prob* $[H_s \le x|\theta_j]$ *es la probabilidad de no excedencia de altura de ola significante en el sector direccional j (régimen direccional; representadas por los puntos en la figura 12).*
- *Prob* $[\theta_j]$ *es la probabilidad de que el oleaje proceda del sector j (frecuencia de dicho sector; representadas por los rectángulos en la figura 12).*
- *j incluye todos los sectores direccionales y el sector calmas (no asignadas a ninguna dirección).*

La figura 12 muestra la manera de obtener el régimen escalar de altura de ola visual a partir de los regímenes direccionales de la ROM 0.3-91. Suponiendo que todos los sectores direccionales no incluidos en la figura pueden considerarse calmas a efectos de cálculo, la frecuencia de calmas vendría dada por $1 - \sum_j f_j$ *donde el sumatorio incluye las frecuencias indicadas en la parte superior izquierda de la figura.*

2.4. Teorema de Bayes

A partir del Teorema de la Probabilidad Total se obtiene:

$$P(A_i / B) = \frac{P(B / A_i)\cdot P(A_i)}{\sum_{1\le i\le n} P(B / A_i)\cdot P(A_i)}$$

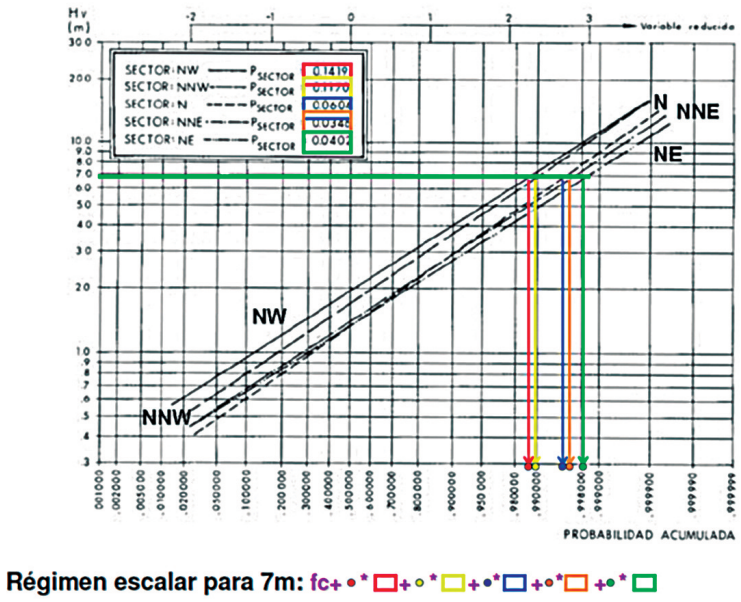


Figura 12. Cálculo del régimen escalar de altura de ola visual a partir de los regímenes direccionales

Este Teorema permite calcular la probabilidad de cualquier suceso *A* (que forma parte de una lista de sucesos) condicionado a la ocurrencia de *B*.

3. VARIABLES ALEATORIAS

3.1. Variables aleatorias unidimensionales

Una variable aleatoria se define como toda función $X: \Omega \rightarrow R^n$ que permita determinar el valor de la probabilidad de un experimento aleatorio. La expresión anterior significa que la función *X* debe ser real.

3.1.1. Variable aleatoria discreta y función de probabilidad

Una variable aleatoria discreta es aquélla que sólo puede tomar un número finito o infinito numerable de valores, como por ejemplo, el conjunto de los números naturales. Puede haber infinitos valores, pero la variable no está definida por una función continua sino que se trata de valores discretos.

Una de las formas de definir la distribución de la probabilidad de las variables aleatorias discretas es mediante la función de probabilidad.

La función de probabilidad de una variable aleatoria discreta X asigna a cada valor x la probabilidad de que la variable *X* tome dicho valor x y se expresa como $P_X(x)$.

$$P_x(x) \geq 0$$
$$\sum_{x\in} P_x(x) = 1$$

Ejemplo Variable aleatoria discreta

Una variable aleatoria discreta es el número de buques que atracan en un año en un puerto.

3.1.2. Variable aleatoria continua y función de densidad

Una variable aleatoria continua es aquélla que puede tomar un número infinito no numerable de valores (no se pueden contar), donde la probabilidad de cada uno de ellos de forma aislada es nula (como el total de valores posibles es infinito, la probabilidad de cada valor de forma independiente tiende a cero).

Una de las formas de definir la distribución de la probabilidad de las variables aleatorias discretas es mediante la función de densidad.

La función de densidad de una variable aleatoria continua *X* se expresa como $f_X(x)$ y cumple:

$$\text{Prob}[\alpha < X \leq b] = \int_a^b f_x(x)dx$$
$$f_x(x) \geq 0$$
$$\int_? f_x(x)dx = 1$$

Ejemplo Variable aleatoria continua

El valor de la marea es una variable aleatoria continua puesto que puede tomar infinitos valores y la probabilidad de cada uno de ellos es nula.

3.1.3. Variable aleatoria mixta y función de probabilidad–densidad

Se llama mixta a una variable aleatoria cuando puede tomar un conjunto infinito no numerable de valores y la probabilidad de alguno de ellos de forma aislada no es nula.

Una de las formas de definir la distribución de la probabilidad de las variables aleatorias mixtas es mediante la función de probabilidad-densidad.

La función de probabilidad-densidad de una variable aleatoria mixta X se expresa como $P_X(x) - f_X(x)$ y cumple:

$$\text{Prob}[\alpha < X \leq b] = \sum_{x>\alpha}^{x\leq b} P_x(x) + \int_{\alpha}^{b} f_x(x)dx$$

$$P_X(x) \geq 0$$

$$f_x(x) \geq 0$$

$$\sum_{x>-\infty}^{x<\infty} P_x(x) + \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x)dx = 1$$

Ejemplo Variable aleatoria mixta

En los registros de datos visuales de oleaje, el valor de periodo mínimo es de 5 segundos, por lo que se comporta como una variable aleatoria mixta. En teoría, el periodo puede adoptar infinitos valores (variable aleatoria continua), pero lo que se observa es que no se registran valores inferiores a 5 segundos, por lo que no se cumple la condición de ser continua y, por lo tanto, pasa a ser mixta.

3.1.4. Función de distribución

La función de distribución, que es común para los tres tipos de variables aleatorias (discretas, continuas y mixtas), asigna a cada valor x la probabilidad de que la variable X tome valores menores o iguales que x y se expresa como $F_X(x)$ o F(x).

$$F_X(x) = \text{Prob}[X \leq x]$$

Algunas propiedades de la función de distribución son:

$F(\infty) = \text{Prob}\,[X \leq \infty] = \text{Prob}\,[\Omega] = 1$

$F(-\infty) = \text{Prob}\,[X \leq -\infty] = \text{Prob}\,[\emptyset] = 0$

F es monótona no decreciente

F es continua por la derecha

$\text{Prob}\,[\alpha < X \leq b] = F(b) - \text{F}(\alpha)$

El conjunto de puntos de discontinuidad es finito o numerable

$0 \leq F(x) \leq 1$

3.2. Variables aleatorias bidimensionales

Una variable aleatoria bidimensional se define como toda función (X: $\Omega \rightarrow R^n$) que permita determinar el valor de la probabilidad de un experimento aleatorio en el que a cada resultado le corresponde una pareja de números reales.

Ejemplo Variable aleatoria bidimensional

Para caracterizar el oleaje, no sólo basta con proporcionar la altura de ola, sino que es necesario facilitar también el periodo de la misma. El oleaje sería por tanto una variable aleatoria bidimensional, puesto que con cada observación se obtienen dos datos: altura y periodo.

Variable aleatoria bidimensional discreta

Una variable aleatoria bidimensional es discreta cuando las dos variables aleatorias marginales son discretas. Una de las formas de definir la distribución de la probabilidad de las variables aleatorias bidimensionales discretas es mediante una función de probabilidad.

Ejemplo Variable aleatoria bidimensional discreta

La función conjunta experimental (tomada de un registro de oleaje) de altura de ola significante y periodo pico es un ejemplo de variable aleatoria bidimensional discreta, puesto que ambas adquieren valores discretos.

Variable aleatoria bidimensional continua

Una variable aleatoria bidimensional es continua cuando las dos variables aleatorias marginales son continuas.

Una de las formas de definir la distribución de la probabilidad de las variables aleatorias discretas es mediante una función de densidad.

Ejemplo Variable aleatoria bidimensional continua

La función conjunta teórica de altura de ola y periodo (como la de Longuet-Higgins) es un ejemplo de variable aleatoria bidimensional continua, puesto que los valores que pueden adoptar la altura y el periodo proceden de una función continua.

4. ESTADÍSTICOS

Una vez obtenidos los datos, se analizan. Parte de ese análisis lo constituye el cálculo de los estadísticos siendo éstos funciones de los datos en las que se ponen de manifiesto ciertas propiedades de los mismos.

Cabe recordar que las conclusiones obtenidas de la muestra (datos) serán generalizados para la población incluyendo un cierto nivel de incertidumbre. Éste fue el motivo del diseño del experimento aleatorio que proporcionó los datos.

4.1. Estadísticos de tendencia central

Las medidas de centralización nos permiten conocer en torno a qué valor se agrupan los datos.

4.1.1. Media

La media o media aritmética de una muestra de *n* datos x_1, x_2, ... x_N; no necesariamente distintos, se obtiene dividiendo la suma de todos los datos por el número de ellos.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_n + ... + x_n}{n} = \sum_{k=1}^{n} x_k$$

Algunos datos importantes sobre la media:

- Participación de todos los datos.
- Si se representan los valores de los datos sobre un eje, sin peso, y a los puntos resultantes se les asigna un peso igual a su frecuencia, a la media le corresponde ser el centro de gravedad del conjunto.
- El inconveniente es que los datos extremos pueden influir excesivamente.

4.1.2. Mediana

La mediana es un valor numérico tal que ni la frecuencia relativa de los valores observados (tanto los menores como los mayores que él) superan el 50%. Dicho de otra forma: es un valor que no es superado por la mitad de la población ni supera al valor de la otra mitad de la población. Es el valor que se encuentra en el "medio" de todos los datos.

Si el número de datos es impar existe una única mediana y es precisamente el valor central de la relación ordenada, pero en caso de tener datos pares será la media de los dos valores centrales.

Algunos datos y características de la mediana:

- A diferencia de la media, no influyen tanto en ella los valores extremos.
- El inconveniente es que su tratamiento es mucho más complejo que el de la media, por lo que es menos utilizada.

4.2. Estadísticos de dispersión

4.2.1. Rango

El rango es la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de la muestra.

4.2.2. Varianza

La varianza es la media de los cuadrados de las diferencias de los datos respecto de su media, es decir:

$$S_{xx} = \frac{\sum_{k=1}^{n}(x_k - \bar{x})^2}{n}$$

Indica cuánto se aleja el conjunto de datos del valor medio. Si la varianza es muy grande, significa que los datos no están "cerca" de la media, y si es muy pequeña, significa que la mayoría de los datos se agrupan en torno a la media.

Algunos datos y características de la varianza:

- Es muy sensible a los valores extremos, ya que tienen más peso en la ecuación que los intermedios al estar elevados al cuadrado.
- Es invariable respecto a las traslaciones de los datos.
- Si se representan los valores de los datos sobre un eje, sin peso, y a los puntos resultantes se les asigna un peso igual a su frecuencia, la varianza representa el momento de inercia respecto a la media.

4.2.3. Desviación típica

La desviación típica es la raíz cuadrada positiva de su varianza.

$$S_x = \sqrt{S_{xx}}$$

Las propiedades son idénticas a las de la varianza.

4.2.4. Coeficiente de variación

Coeficiente de variación se define como el cociente entre la desviación típica y la media. Mide, en términos relativos, la dispersión alrededor de la media aritmética.

$$V = \frac{S_x}{\bar{x}}$$

Algunas de sus características son:

- Este estadístico no es de utilidad cuando es cercano o igual a cero.
- No es invariante respecto a traslaciones de datos.
- Es un estadístico adimensional, por tanto, es una medida de dispersión relativa.

4.3. Otros estadísticos

4.3.1. Moda

La moda es el valor más probable, puesto que es el valor que más veces sucede.

4.3.2. Cuantiles

Los cuantiles de orden α, que se denotan como qα, se definen como el valor numérico tal que ni la frecuencia relativa de los valores observados menores que él supera el valor α, ni la frecuencia relativa de los mayores supera el valor 1–α.

Si se emplean los valores 0,25, 0,50, 0,75 se denominan cuartiles (divididos de 0,25 en 0,25), mientras que si se usan el 0,1, 0,2,... se conocen como deciles (divididos de 0,1 en 0,1).

Ejemplo Cuantiles

Consideremos que 2 es el cuantil 0,3 de una muestra de datos: qα = q0,3 = 2. Esto implica que los valores inferiores a 2 ocurren con una frecuencia inferior al 30% y que los valores superiores a 2 ocurren con una frecuencia igual o superior al 70%.

4.3.3. Valor $X_{1/N}$

El valor $X_{1/n}$ es la media de los N/n valores mayores registrados en el experimento.

Ejemplo $X_{1/N}$

El parámetro comúnmente adoptado para representar la altura de ola en un estado de mar es la altura de ola significante $H_s=H_{1/3}$. Este parámetro se obtiene calculando la media del tercio mayor de los valores registrados de altura de ola. Supongamos que se tienen las siguientes alturas de ola (9 valores):

0,1, 0,25, 0,1, 0,5, 0,4, 0,8, 0,75, 0,6, 1

Si se quiere calcular el $X_{1/3}$ estaremos calculando la media del tercio de las olas mayores, por lo que hay que ordenar los datos para saber cuáles son las 9/3 olas mayores:

0,1, 0,1, 0,25, 0,4, 0,5, 0,6, 0,75, 0,8, 1

El tercio de las olas mayores son 3 valores: 0,75, 0,8, 1

Y su media es

$$H_s = H_{1/3} = \frac{0,75+1,8+1}{3} m = 0,85\ m$$

NOTA: El cálculo de este estadístico tiene una excepción: el periodo $T_{1/n}$. Éste se define como la media de los periodos que acompañan a los N/n valores mayores de altura de ola registrados. Así, en su cálculo, no se tienen en cuenta los mayores valores de los periodos del oleaje sino aquéllos que acompañan a los valores mayores de altura de ola.

Valor X_N

El valor X_n es la media de los n valores mayores.

Ejemplo ($X_{1/n}$ – X_n): En las teorías de evolución de daño, una de las variables cuyo trato no se ha unificado es el valor de la altura de ola representativa. Algunos autores defienden el parámetro $X_{1/n}$, como por ejemplo la altura de ola significante (SPM, 1984), mientras que otros asumen X_n, por ejemplo el valor de H_{50} (Vidal, 2003).

Ejemplo X_N

Se tienen las siguientes alturas de ola (10 valores):

0,1, 0,25, 0,1, 0,5, 0,4, 0,8, 0,75, 0,6, 1, 0,2

Si se quiere calcular el X_4 estaremos calculando la media de las 4 olas mayores, por lo que hay que ordenar los datos para saber cuáles son éstas:

0,1, 0,1, 0,2, 0,25, 0,4, 0,5, 0,6, 0,75, 0,8, 1

Las 4 olas mayores son: 0,6, 0,75, 0,8, 1

Y su media es:

$$X_4 = \frac{0,6+0,75+0,8+1}{4} = 0,7875$$

5. MOMENTOS

Los momentos permiten entender cómo se distribuye la probabilidad, y en muchos casos sirven para identificar distribuciones concretas dentro de una familia de distribuciones (Castillo & Pruneda, 2001).

5.1. Momentos de variables unidimensionales

El momento de orden *k* de una variable *X* aleatoria unidimensional respecto de $a \in R$, cuya función de distribución es $F_X(x)$, y se designa por μ_{ka}, al número real dado por:

$$\mu_{ka} = \int_{?} (x-\alpha)^k dF_X(x)$$

Donde la integral del término de la derecha no es otra que la integral de la variable aleatoria $(x-a)^k$ con respecto a la probabilidad inducida por $F_X(x)$. Para variables aleatorias discretas, la expresión anterior se puede definir como:

$$\mu_{ka} = \sum_{x \in A} (x-\alpha)^k P(x)$$

Donde $P(x)$ es su función de probabilidad y *A* es el conjunto en el que la $P(x)$ no se hace cero.

Para variables aleatorias continuas se tiene que:

$$\mu_{ka} = \int_{?} (x-\alpha)^k f(x) dx$$

Donde $f(x)$ es la función de densidad de *X*.

5.1.1. Media o esperanza matemática

El momento de primer orden respecto del origen recibe el nombre de media o esperanza matemática de la variable aleatoria *X* y se designa simplemente como μ o también como $E[X]$.

$$\mu_1 = \mu = E[X] = \int_{?} (x-0)^1 dF_X(x)$$

5.1.2. Varianza

El momento de segundo orden **respecto a la media o centrado** recibe el nombre de varianza y se denota como Var(*X*) o σ^2.

$$\mu_2 = \sigma^2 = Var[X] = \int_{?} (x-\mu)^2 dF_X(x)$$

Si el momento de segundo orden no se da con respecto a la media, la varianza se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma^2 = E[X^2] - \mu^2$$

Nota: El significado físico de la media y la varianza en Estadística son análogos a los que tienen el centro de gravedad y el momento de inercia en Mecánica. Según la definición anterior, las x serían todos los puntos del sólido rígido que tienen una masa mi y con los que se calcula dónde se acumula la masa con respecto al centro de gravedad del sólido. El valor "a" representa el punto con respecto al que se calcula la inercia: una puerta no tiene la misma inercia en las bisagras que en su centro.

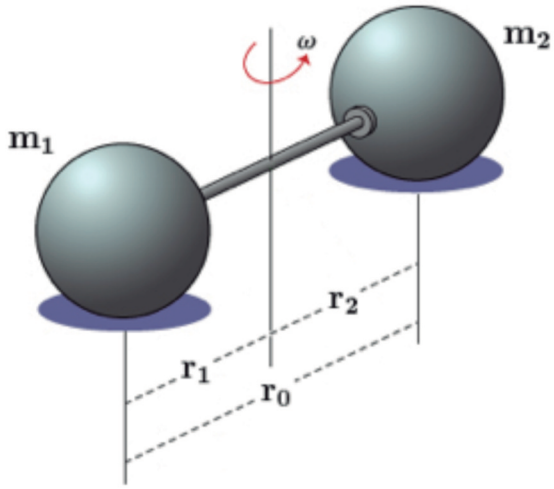


Figura 13. Esquema de un sólido rígido formado por dos masas esféricas unidas por una barra, de masas m1 y m2, separadas una distancia de r1 y r2

Ejemplo: Consideremos una variable aleatoria uniforme, tal que su función de densidad sea:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & si\ 0 \le x \le 1 \\ 0 & en\ otro\ caso \end{cases}$$

Entonces su momento de orden 1 con respecto al origen (α=0), es decir, su media sería:

$$\mu_1 = \int_0^1 (x-0)^1 f(x) dx = \int_0^1 (x) \cdot 1 \cdot dx = \frac{x^2}{2}\Big]_0^1 = \frac{1}{2}$$

Y su momento de orden dos (respecto al origen, α=0) sería:

$$\mu_2 = \int_0^1 (x-0)^2 f(x) dx = \int_0^1 (x)^2 \cdot 1 \cdot dx = \frac{x^3}{3}\Big]_0^1 = \frac{1}{3}$$

Por tanto, teniendo en cuenta que en este caso se está calculando todo con respecto al origen de la función y no con respecto a la media, la varianza sería:

$$\sigma^2 = \frac{1}{3} - \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{12}$$

5.1.3. Coeficiente de asimetría

Los momentos de tercer y cuarto orden son interesantes para conocer la forma en que se distribuyen los valores. Así, el momento centrado de orden tres permite conocer la simetría (o asimetría) de la función respecto a la media.

$$\beta_1 = \frac{1}{\sigma^3} E[(X-\mu)^3]$$

5.1.4. Coeficiente de apuntamiento o kurtosis

El momento central de orden cuatro o Kurtosis es una medida de la forma o apuntamiento de las distribuciones. Así las medidas de kurtosis (también llamadas de apuntamiento o de concentración central) tratan de estudiar la mayor o menor concentración de frecuencias alrededor de la media y en la zona central de la distribución.

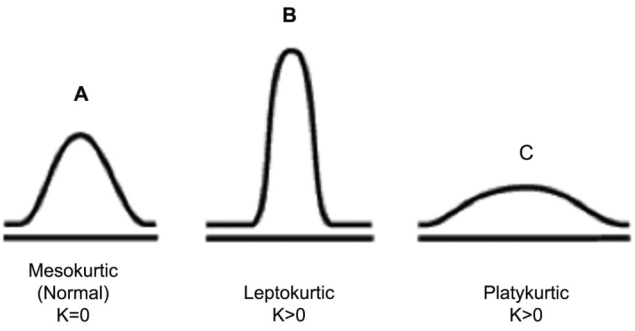


Figura 14. Funciones con distinto apuntamiento o kurtosis

La kurtosis se puede interpretar como una medida del peso que tienen las colas en la distribución o como la existencia de "picos" en esa distribución. Se define como el cociente entre el momento de cuarto orden centrado o con respecto a la media y la desviación típica elevada a la cuarta:

$$\beta_2 = \frac{1}{\sigma^4} E[(X-\mu)^4]$$

5.2. Momentos de variables n-dimensionales

El momento de orden $(k_1,k_2,...,k_n)$ de una variable aleatoria n-dimensional $X=(X_1,X_2,...,X_n)$ respecto de $a=(a_1,a_2,...,a_n)$ cuya función de distribución es $F(x_1,x_2,...,x_n)$ es el número real dado por:

$$\mu_{k_1,k_2...k_n:\,\alpha_1\alpha_2...\alpha_n} = \int_n (x_1-\alpha_1)^{k_1}(x_2-\alpha_2)^{k_2}...(x_n-\alpha_n)^{k_n}\,dF(x_1,x_2,...,x_n)$$

Para variables aleatorias discretas, la expresión anterior se puede definir como:

$$\mu_{k_1,k_2...k_n:\,\alpha_1\alpha_2...\alpha_n} = \sum_{(x1,x2,...,xn)\in A} (x_1-\alpha_1)^{k_1}(x_2-\alpha_2)^{k_2}...(x_n-\alpha_n)^{k_n} P(x_1,x_2,...,x_n)$$

Donde $P(x_1,x_2,...,x_n)$ es su función de probabilidad y A es el conjunto en el que $P(x_1,x_2,...,x_n)$ no se hace cero.

Para variables aleatorias continuas se tiene que:

$$\mu_{k_1,k_2...k_n:\,\alpha_1\alpha_2...\alpha_n} = \int_n (x_1-\alpha_1)^{k_1}(x_2-\alpha_2)^{k_2}...(x_n-\alpha_n)^{k_n} f(x_1,x_2,...,x_n)dx_1,dx_2,...,dx_n$$

Donde $f(x_1,x_2,...,x_n)$ es la función de densidad de X.

ANEXO 4

Variables aleatorias y espectrales para la caracterización de agentes

Como se ha visto a lo largo del texto, los agentes pueden caracterizarse desde el punto de vista estadístico y espectral. En este anexo se han recopilado las funciones estadísticas y espectrales más comunes, para que el lector tenga fácil acceso a las mismas

1. Variables aleatorias unidimensionales más comunes

1.1. INTRODUCCIÓN

Habitualmente, cuando se diseñan estructuras marítimas o se estudia algún fenómeno oceanográfico, sólo se dispone de información de los parámetros característicos más relevantes que definen un estado de mar, debido esencialmente a lo siguiente:

- Cuando se tienen mediciones de estados de mar no es económico registrar toda la estadística del oleaje.
- En ocasiones se utiliza el espectro de energía para caracterizar los estados de mar.
- No obstante, es común que se requiera más información estadística y por ello resulta imprescindible contar con herramientas que permitan estimar las funciones de probabilidad de la superficie libre, altura de ola, periodo y la conjunta de altura de ola-periodo.

Por ello, en este anejo se muestra en primer lugar una revisión de las variables aleatorias unidimensionales y n-dimensionales más comunes y se ofrecen diversos ejemplos prácticos que sirvan de apoyo a los conceptos teóricos.

Función de probabilidad de Bernoulli
$P(x)=\begin{cases} p & si\ \ x=1 \\ q=1-p & si\ \ x=0 \end{cases}$
O en su forma más genérica:
$f(x)=p^x(1-p)^{1-x} \quad con\ x=\{0,1\}$
Función de distribución de Bernoulli
$F(x)=\begin{cases} 0 & si\ x\le 0 \\ q & si\ 0\le x<1 \\ 1 & si\ x\ge 1 \end{cases}$

Media	Varianza	Kurtosis
$\mu = p$	$\sigma^2 = p(1-p)$	$\beta_2 = \frac{6p^2-6p+1}{p(1-p)}$

Función Generadora de Momentos
$q = pe^{it}$

TABLA 1. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución de Bernoulli

1.2. VARIABLES ALEATORIAS UNIDIMENSIONALES

1.2.1. Bernoulli

Supóngase que se realiza un experimento cuyos resultados posibles son sólo dos: el éxito, con probabilidad p, y el fracaso, con probabilidad q = 1–p. Se trata por tanto de una función de probabilidad discreta. Ambos sucesos son por tanto mutuamente excluyentes (si sucede uno no puede suceder el otro) e incompatibles (no se pueden dar ambos a la vez).

Se tiene una variable aleatoria X que indica el número de "éxitos", donde cada éxito o fracaso es evaluado en un único experimento. En este caso se dice que la variable X se distribuye como una Bernoulli de parámetro p "Be(p)", donde:

$$X=\begin{cases} 1 & si\ \ éxito \\ 0 & si\ \ fracaso \end{cases}$$

1.2.2. Binomial

Se trata de una distribución de probabilidad discreta que mide el número de éxitos en una secuencia de experimentos independientes y en los que sólo se pueden tener dos posibles resultados, el éxito o el fracaso, considerando que la probabilidad de ocurrencia de cada éxito es p y es fija. Se denota por $B(n,p)$, y proporciona el número de éxitos en la realización de n pruebas independientes de Bernoulli con probabilidad de éxito p. En el caso en que el número de experimentos n sea igual a 1, se convierte en una variable de Bernoulli.

Ejemplo gráfico

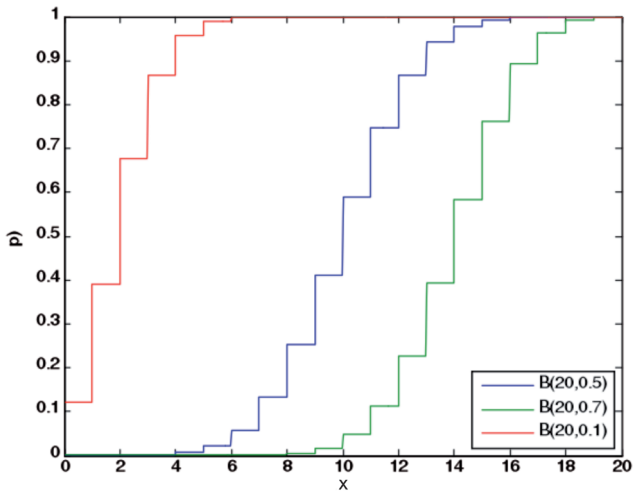


FIGURA 1. Funciones de distribución de variables Binomiales con distintos parámetros

La representación matemática de la variable Binomial es la siguiente:

Función de densidad
$f(x)=\binom{n}{x}p^{x}(1-p)^{n-x}$
Donde: $x=\{0,1,2,\mathrm{K}\ ,n\}$ $\binom{n}{x}=\frac{n!}{x!(n-x)!}$
La última expresión representa las combinaciones de *n* elementos que se toman de *x* en *x*
Función de distribución
$I_{1-p}(n-k,1+k)$
Dominio
$0 \le x \le n$

Media	Varianza	Kurtosis
$\mu = np$	$\sigma^2 = npq$	$\beta_2 = \frac{1-6p(1-p)}{np(1-p)}$
Función Generadora de Momentos		
$\left(1-p+pe^{it}\right)^{n}$		

Tabla 2. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución Binomial

Ejemplo Binomial

Planteamiento:

Se observa que un dique es rebasado. Si la probabilidad de que una ola rebase es de 0,01, ¿cuál es la probabilidad de que en un total de 100 olas el dique sea rebasado menos de 5 veces?

Respuesta:

Puesto que sólo son posibles dos resultados en cada prueba, que la ola rebase o que no rebase, y como cada experimento es independiente (a modo de simplificación), la situación se puede interpretar como una repetición de pruebas de Bernouilli, y en consecuencia, el número de veces que el dique es rebasado o no se puede representar mediante una variable Binomial, caracterizada por un número de experimentos, que en este caso es 100, y una probabilidad de éxito, que es 0,01. Es importante destacar que los sucesos son discretos. Así pues, la variable queda definida como una binomial de número de experimentos n = 100 y probabilidad de cada éxito p = 0,01, lo que es equivalente a $B(100,0.01)$.

Por tanto, si se quiere conocer la probabilidad de que el número de éxitos sea menor de 5, habrá que proceder como sigue:

$$P(x<5)=P(x=0)+P(x=1)+P(x=2)+P(x=3)+P(x=4)$$

$$P(x=0)=\binom{100}{0}0.01^{0}(1-0.01)^{100-0}=\frac{100!}{0!(100-0)!}0.01^{0}(1-0.01)^{100-0}=1\times1\times0.366=0.366$$

$$P(x=1)=\binom{100}{1}0.01^{1}(1-0.01)^{100-1}=\frac{100!}{1!(100-1)!}0.01^{1}(1-0.01)^{100-1}=100\times0.01\times0.3697=0.3697$$

$$P(x=2)=\binom{100}{2}0.01^{2}(1-0.01)^{100-2}=\frac{100!}{2!(100-2)!}0.01^{2}(1-0.01)^{100-2}=4950\times0.0001\times0.37346=0.1846$$

$$P(x=3)=\binom{100}{3}0.01^{3}(1-0.01)^{100-3}=\frac{100!}{3!(100-3)!}0.01^{3}(1-0.01)^{100-3}=161700\times0.000001\times0.37723=0.06099$$

$$P(x=4)=\binom{100}{4}0.01^{4}(1-0.01)^{100-4}=\frac{100!}{4!(100-4)!}0.01^{4}(1-0.01)^{100-4}=3921225\times10^{-8}\times0.3810=0.01494$$

$$P(x<5)=B(x=0,100,0.01)+B(x=1,100,0.01)+B(x=2,100,0.01)+B(x=3,100,0.01)+B(x=4,100,0.01)=$$

$$0.366+0.3697+0.1846+0.06099+0.01494;$$

$$P(x<5)=0.9962$$

1.2.3. Poisson

Se trata de una variable discreta con la que se obtiene la probabilidad de que ocurra un número de eventos durante un periodo de tiempo, a partir del dato de la frecuencia media con que dichos eventos tienen lugar. Se denota por $f(k;\lambda)$ y representa la función de probabilidad que da el numero de sucesos (éxitos), k, que se espera que ocurran con una frecuencia λ.

Función de probabilidad		
$f(k,\lambda)=\frac{e^{-\lambda}\lambda^{k}}{k!}$		
Función de distribución		
$P_X(x)=\frac{\Gamma(k+1,\lambda)}{k!} \quad k \geq 0$		
Dominio		
$0 \leq x \leq \infty$		
Media	**Varianza**	**Kurtosis**
$\mu = \lambda$	$\sigma^2 = \lambda$	$3 + \lambda^{-1}$
Función Generadora de Momentos		
$e^{\lambda\left(e^{it}-1\right)}$		

Tabla 3. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución de Poisson

Ejemplos gráficos de Poisson

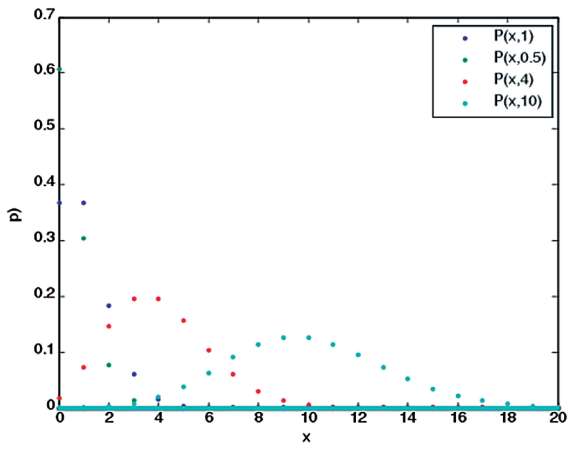


Figura 2. Funciones de probabilidad de variables de Poisson

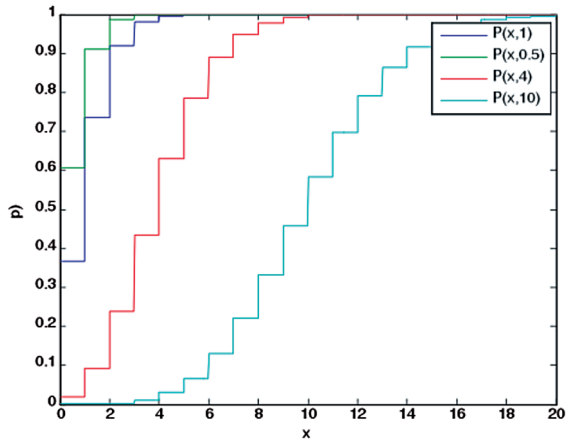


Figura 3. Funciones de distribución de variables de Poisson

Ejemplo Poisson

Planteamiento:

El oleaje entra a una dársena a través de tres puntos, y tiene una frecuencia de superación de un umbral de 0,25 m por hora en cada punto de entrada que se denota por λ_1, λ_2 y λ_3, donde $\lambda_1 = 3$, $\lambda_2 = 5$ y $\lambda_3 = 10$. ¿Cuál es la probabilidad de que se supere el umbral operativo en 4 ocasiones?

Respuesta:

Al buscarse la probabilidad de que un suceso, superación del umbral 0,25 m, con una frecuencia determinada, representada por las λ, ocurra un número de veces igual a 4, se puede modelizar a través de una función de Poisson.

En este caso, la distribución del oleaje que sobrepasa el estado operativo de la dársena vendrá dado por la suma de los tres casos, es decir:

$$P = P(\lambda_1)+P(\lambda_2)+P(\lambda_3)$$

Que en virtud de la reproductividad de la variable Poisson:

$$P = P(\lambda_1)+P(\lambda_2)+P(\lambda_3) = P(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)$$

$$P = P(\lambda_1)+P(\lambda_2)+P(\lambda_3) = P(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3) =$$

$$= P(3+5+10) = P(18)$$

Por tanto:

$$P(4;18) = \frac{18^4 e^{-18}}{4!} = 0.0000666159$$

1.2.4. Uniforme

A la variable aleatoria uniforme, designada por $U(a,b)$, le corresponde una función de probabilidad constante en el intervalo $[a,b]$.

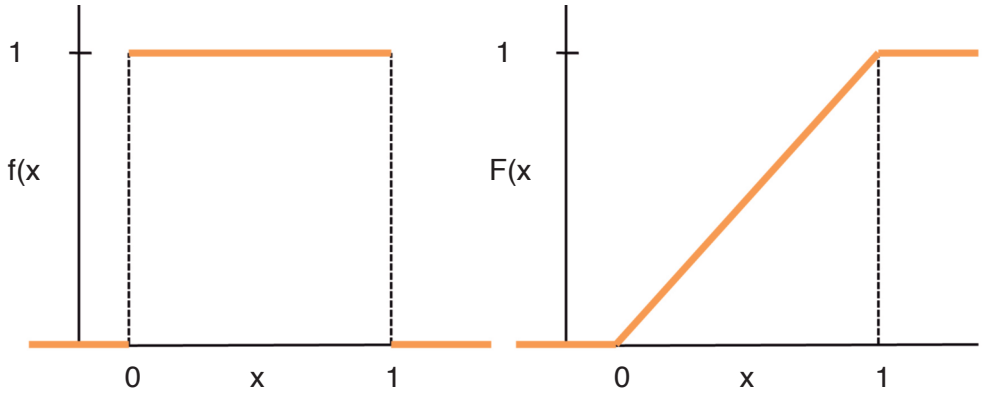


FIGURA 4. Funciones de densidad y distribución respectivamente para U(0,1)

Función de densidad
$f(x,a,b)=\begin{cases}\frac{1}{b-a} & a\le x\le b\\ 0 & otro\end{cases}$
Función de distribución
$F(x,a,b)=\begin{cases}0 & x<a\\ \frac{x-a}{b-a} & a\le x<b\\ 1 & x\ge b\end{cases}$
Dominio
$a \le x \le b$

Media	Varianza	Kurtosis
$\mu=\frac{a+b}{2}$	$\sigma^2=\frac{(b-a)^2}{12}$	$\beta_2=\frac{-6}{5}$

Función Generadora de Momentos
$\frac{e^{tb}-e^{ta}}{t(b-a)}$

TABLA 4. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución Uniforme

Ejemplo Uniforme

Planteamiento:

Supóngase un tramo de un dique de tipología homogénea de 200 m de longitud expuesto a condiciones de oleaje también homogéneas, y considérese la variable aleatoria *X*, que mide la distancia en metros desde el origen del tramo al lugar donde se produce rebase. En este caso, dadas las condiciones de homogeneidad puede suponerse que la variable aleatoria *X* puede modelizarse mediante una función Uniforme, de 0 a 200: *U* (0,200).

1.2.5. Exponencial

Se representa por *E*(B) e indica el tiempo transcurrido entre sucesos consecutivos de Poisson o el tiempo transcurrido hasta que el primero de ellos se manifiesta.

Función de densidad
$f(x)=\begin{cases}\lambda e^{-\lambda x} & para\ x\ge 0\\ 0 & en\ otro\ caso\end{cases}$
Función de distribución
$F(x)=\begin{cases}1-e^{-\lambda x} & x\ge 0\\ 0 & en\ otro\ caso\end{cases}$
Dominio
[0, ∞]

Media	Varianza	Kurtosis
$\mu=\frac{1}{\lambda}$	$\sigma^2=\frac{1}{\lambda^2}$	9

Función Generadora de Momentos
$\left(1-\frac{t}{\lambda}\right)^{-1}$

TABLA 5. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución Exponencial

Ejemplo gráfico exponencial

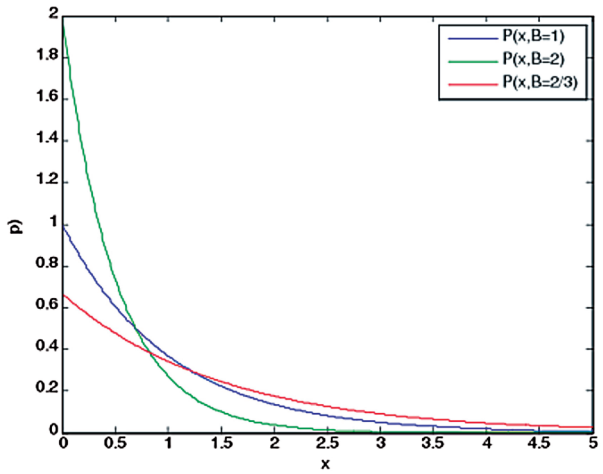


FIGURA 5. Funciones de densidad Exponenciales con diferentes parámetros

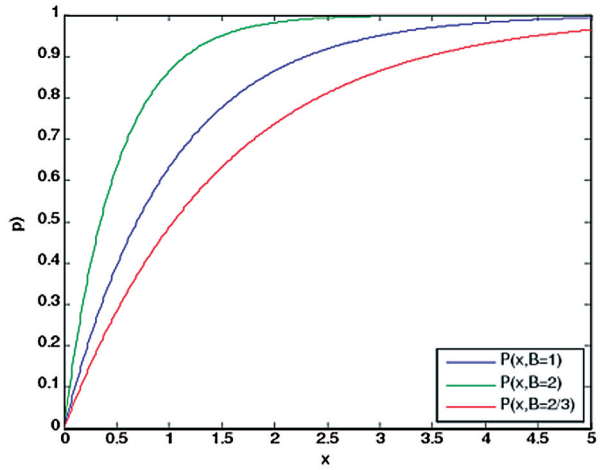


FIGURA 6. Funciones de distribución Exponenciales con diferentes parámetros

Ejemplo práctico exponencial

Planteamiento:

Para entrar en un puerto pequeño, un barco necesita un tiempo t_0 = 20 minutos en el que ningún otro barco puede estar accediendo o saliendo del mismo. Se sabe que la frecuencia de entrada o salida de buques es de 2 barcos/hora. Se quiere saber cuánto tiempo dispone el barco para entrar al puerto.

Respuesta:

El tiempo T que transcurre desde que llega nuestro barco hasta que puede entrar sin que otro barco entre o salga del puerto se puede modelar mediante una variable exponencial, dado que el tráfico interno del puerto es poissoniano (sigue una distribución de Poisson), y además se quiere evaluar la probabilidad de un determinado tiempo entre sucesos. La frecuencia del suceso evaluado es 2/hora, por lo que λ=2. El tiempo t_0 = 20 minutos = 1/3hora. Por tanto la probabilidad es:

$$P(T \le t_0) = F(t_0) = e^{-2t_0} = e^{-2\frac{1}{3}} = e^{-\frac{2}{3}} = 0.5134$$

Con lo que la probabilidad de que el tiempo de que disponga el barco para entrar sea de 20 minutos es de 0,5134.

1.2.6. Gamma

La variable gamma describe el tiempo transcurrido hasta la ocurrencia del suceso poissoniano *k*-ésimo, que es equivalente a la probabilidad de hayan tenido lugar *k*-1 sucesos en tiempo *x* multiplicada por la probabilidad de que ocurra al menos un suceso en tiempo *dx*.

Función de densidad		
$f(x) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} \cdot x^{a-1} \cdot e^{\frac{-x}{b}}$	$a > 0, b > 0$	
Función de distribución		
$F(x) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} \cdot \int_0^x u^{a-1} \cdot e^{\frac{-x}{b}} \cdot du$		
Dominio		
$0 \le x \le \infty$		
Media	**Varianza**	**Kurtosis**
$\mu = ab$	$\sigma^2 = ab^2$	
Función Generadora de Momentos		
$(1 - bt)^{-a}$		

TABLA 6. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución Gamma

Ejemplo gráfico Gamma

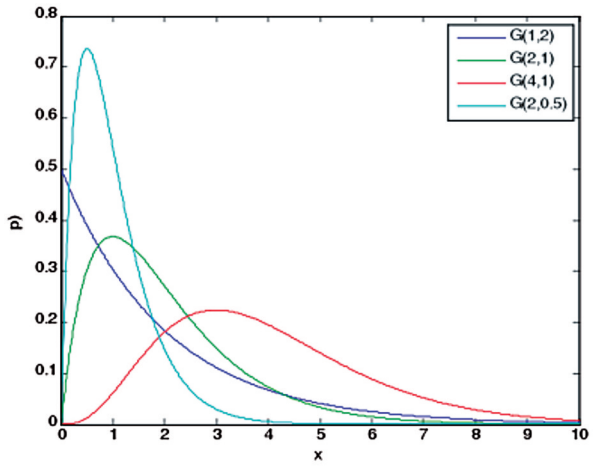


FIGURA 7. Funciones de densidad Exponenciales con diferentes parámetros

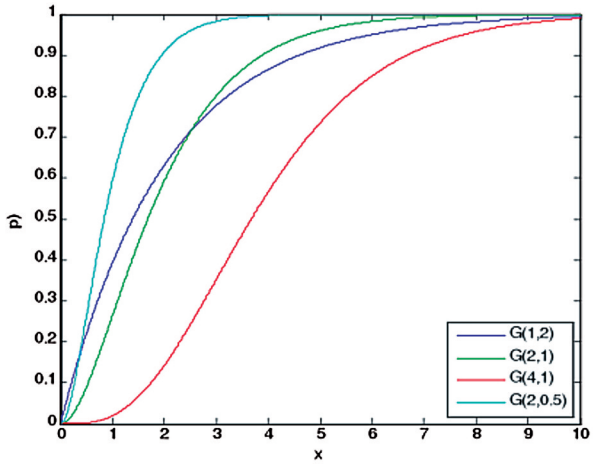


FIGURA 8. Funciones de distribución Exponenciales con diferentes parámetros

Ejemplo Gamma

Planteamiento:

Se ha instalado una planta de hormigón próxima al emplazamiento en el que tiene lugar la construcción de un dique. La planta es capaz de producir *N* cubípodos al día. Considerando que no hay acopio, sino que se llevan directamente a la puesta y que esta sigue una distribución poisoniana de *L* cubípodos/hora, plantear a qué distribución se ajustaría el proceso.

Respuesta:

La función de densidad del tiempo *T* diario durante el cual se está trabajando vendrá dada por el tiempo que transcurre hasta el suceso N-ésimo, por lo que el proceso se puede plantear como una función Gamma: *G*(N,1/L).

1.2.7. Beta

Función de densidad
$f(x)=\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}$
Función de distribución
$I_x(\alpha,\beta)$
Dominio
$0 \le x \le 1$
Media — **Varianza**
$\mu=\frac{\alpha}{\alpha+\beta}$ — $\sigma^2=\frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)}$
Función Generadora de Momentos
$1+\sum_{k=1}^{\infty}\left(\prod_{r=1}^{k-1}\left(\frac{\alpha+r}{\alpha+\beta+r}\right)\right)\frac{t^k}{k!}$

TABLA 7. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución Beta

Ejemplo gráfico Beta

Esta variable aleatoria es especialmente interesante por su flexibilidad. Se puede observar en los gráficos de la Figura 9 que la función de densidad puede tomar formas muy diferenciadas, por lo que resulta de utilidad para describir datos experimentales.

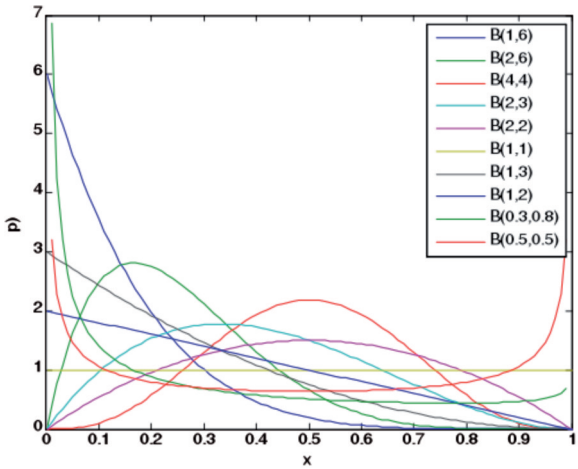


FIGURA 9. Funciones de distribución Exponenciales con diferentes parámetros

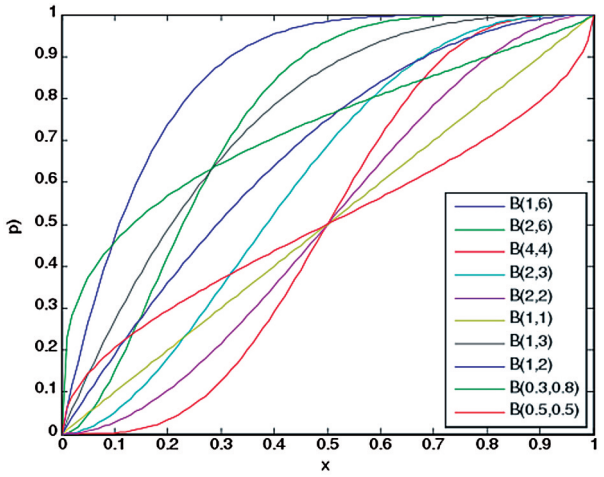


FIGURA 10. Función de distribución Beta para distintas combinaciones de parámetros

1.2.8. Normal

Función de densidad
$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$
Función de distribución
$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx = \frac{1}{B\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-A}{B}\right)^2} dx = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$
Dominio
$-\infty \leq X \leq +\infty$

Media	Varianza	Kurtosis
μ	σ	0

Función Generadora de Momentos
$e^{\mu it - \frac{\sigma^2 t^2}{2}}$

TABLA 8. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución Normal

Propiedades

Sea Z una variable aleatoria resultante de la suma de n variables aleatorias igual distribuidas, Z tiende a ser normal para n tendiendo a infinito.

La moda y la mediana coinciden con la media y los puntos de inflexión de la función de densidad se encuentran a una distancia σ de la media, tal y como se observa en la figura anterior.

Ejemplo gráfico de la influencia de sus parámetros

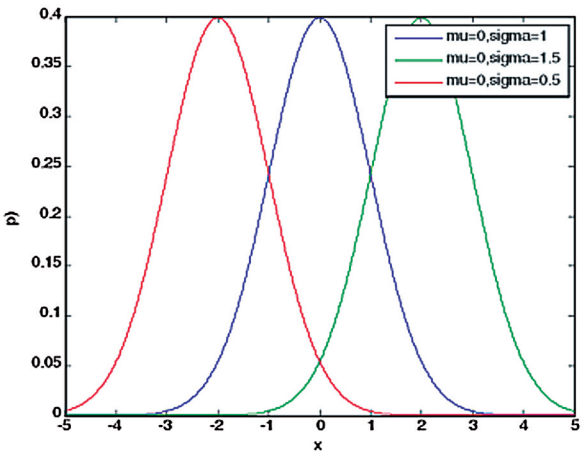


FIGURA 11. Funciones de densidad normal con diferente media

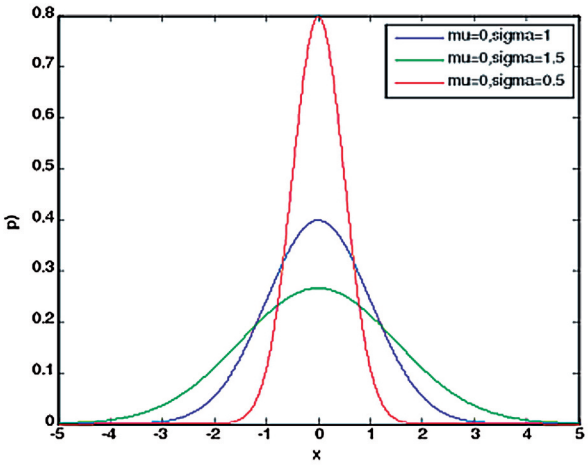


FIGURA 12. Funciones de densidad normal con igual media y diferente desviación típica

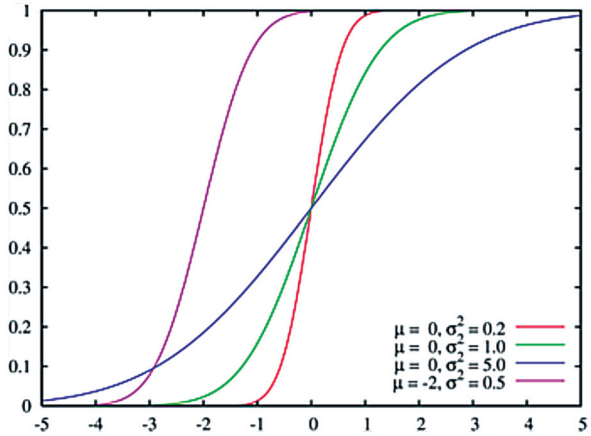


FIGURA 13. Funciones de distribución normal variando sus parámetros

El cambio de variable $X = \frac{Z-\mu}{\sigma}$ transforma una variable $Z,N(\mu,\sigma^2)$ en otra $X,N(0,1)$ pudiéndose aplicar de este modo las tablas que dan la función normalizada.

$$F_{N(\mu,\sigma^2)}(x) = F_{N(0,1)}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$$
$$f_{N(\mu,\sigma^2)}(x) = \frac{1}{\sigma} f_{N(0,1)}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$$

Por otra parte, la simetría de la distribución hace que se cumpla para valores negativos:

$$F_{N(0,1)}(a) = 1 - F_{N(0,1)}(-a)$$
$$f_{N(0,1)}(a) = f_{N(0,1)}(-a)$$

Ejemplo

Planteamiento:

Sabiendo que la marea meteorológica de Santander es una variable de tipo normal $N(-0{,}0045, 0.967^2)$, calcular la probabilidad de que el nivel del mar X sea superior a 0,45 m.

Respuesta:

$$P(X > 0.45) = 1 - P(X < 0.45) = 1 - F_{N(-0.0045,0.936)}(0.45)$$
$$= 1 - F_{N(0,1)}\left(\frac{0.45-(-0.0045)}{0.967}\right) = 1 - 0.37 = 0.63$$

1.2.9. Log-Normal

Por definición, X es log-normal si $ln(x)$ es normal, y surge de forma similar a la normal, considerando el producto en lugar de la suma. Esta variable se ha aplicado en procesos de rotura, trituración de aglomerados, o mecanismos de fatiga entre otros.

Función de densidad
$f(x,\mu,\sigma) = \frac{1}{Bx\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - A}{B}\right)^2}$
Función de distribución
$F(x) = \frac{1}{B\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - A}{B}\right)^2} dx$
Dominio
$0 \le x < +\infty$
Media / **Varianza**
$\mu^* = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)}$ / $\sigma^{*2} = e^{2\mu}\left(e^{(2\sigma^2)} - e^{\sigma^2}\right)$

TABLA 9. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución Log-Normal

Ejemplo gráfico

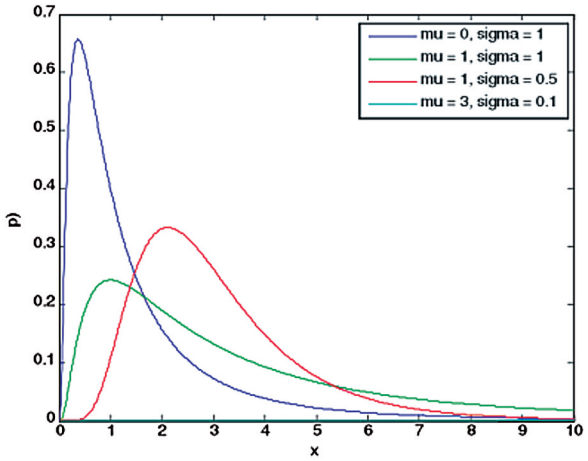


FIGURA 14. Función de densidad Log-normal con diferentes parámetros

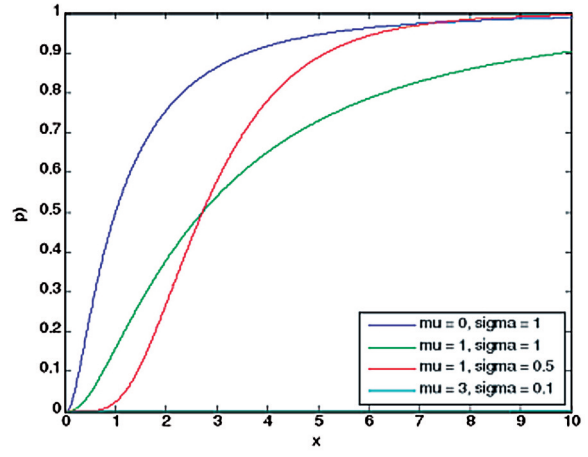


FIGURA 15. Función de distribución Log-normal con diferentes parámetros

Ejemplo para Log-Normal

Planteamiento:

Sabiendo que el registro de altura de ola significante de Santander es una variable de tipo Log-normal de media μ =0,57 y varianza σ^2 = 0,30, calcular la probabilidad de que la altura de ola, definida por *X* sea mayor que 3,5 m.

Respuesta:

La probabilidad de que la altura de ola, sea mayor que 3,5 m vendrá dada por:

1.3. VARIABLES COMPUESTAS

Sea *X* una variable aleatoria tal que su función de distribución es $F(x; \theta_1, \theta_2,...,\theta_p)$ donde los parámetros son a su vez variables aleatorias con función de distribución *c*.

Aplicando el teorema de la probabilidad total, se llega a que la función de distribución de la variable aleatoria *X* viene dada por la expresión:

$$F^*(x) = \int_{R^p} F(x;\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p)dG(\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p).$$

A la variable *X*, se le llama variable aleatoria compuesta de la familia de distribuciones aleatorias con función de distribución *F* con la variable que tiene por función de distribución *G*. Del mismo modo, a *F** se le llama distribución compuesta de la *F* con la *G* y se representa por:

$$F^* = F \wedge G$$

1.3.1. Casos

- Para *F* y *G* continuas

$$f^*(x) = \int_{R^p} f(x;\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p)g(\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p)d\theta_1,d\theta_2,\dots,d\theta_p$$

- Para *F* continua y *G* discreta

$$f^*(x) = \sum_{(\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p)\in^{\circ\ p}} f(x;\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p)P_G(\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p).$$

- Para *G* continua y *F* discreta

$$p^*(x) = \int_{R^p} P_F(x;\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p)g(\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p)d\theta_1,d\theta_2,\dots,d\theta_p.$$

- Para *F* y *G* discretas

$$p^*(x) = \sum_{(\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p)\in^{\circ\ p}} P_F(x;\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p)P_G(\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_p).$$

Ejemplo de aplicación

Planteamiento:

Se sabe que el número anual de semanas lluviosas en una determinada región puede considerarse poissoniano de media *v*. La precipitación producida en cualquier semana es independiente de las demás y se distribuye exponencialmente con media λ. Obtener la función de densidad de la precipitación total ocurrida en un año en la región considerada.

Respuesta:

La precipitación total anual *X*, es la suma de un número poissoniano *N*, de variables exponenciales $E(\lambda)$. Para N fijo, X sería la suma de *N* exponenciales $E(\lambda)$, y por tanto una variable Gamma $G(N, \lambda)$ ya que, por definición, la variable exponencial da el tiempo transcurrido hasta el primer suceso poissoniano o entre dos, y la gamma el total hasta la ocurrencia del suceso *K*-ésimo. Ahora bien, siendo *N* poissoniano:

$$f_X(x) = \sum_{N=0}^{\infty} \frac{\lambda e^{-\lambda x}(\lambda x)^{N-1}}{\Gamma(N)} \frac{e^{-\nu}\nu^N}{N!}$$

1.4. DISTRIBUCIONES TRUNCADAS

1.4.1. Truncamiento por la derecha

Sea *X* una variable aleatoria con función de distribución $F_X(x)$. Se dice que la variable aleatoria *Y* procede de *X* por truncamiento por la derecha en y_0 si su función de distribución es $F_Y(y) = F_{X|A}(y)$ siendo $A \equiv [x|x \le y_0\}$.

Aplicando la probabilidad condicionada, la distribución truncada por la derecha es:

$$F_Y(y) = F_{X|X\le y_0}(y) = \text{Prob}[X \le y | X \le y_0] = \frac{\text{Prob}[X \le y, X \le y_0]}{\text{Prob}[X \le y_0]} =$$

$$= \begin{cases} \dfrac{\text{Prob}[X \le y]}{\text{Prob}[X \le y_0]} & \text{si } y < y_0 \\ \dfrac{\text{Prob}[X \le y_0]}{\text{Prob}[X \le y_0]} & \text{si } y \ge y_0 \end{cases}$$

$$F_Y(y) = \begin{cases} \dfrac{F_X(y)}{F_X(y_0)} & si\ y < y_0 \\ 1 & si\ y \ge y_0 \end{cases}$$

1.4.2. Truncamiento por la izquierda

Sea X una variable aleatoria con función de distribución $F_X(x)$. Se dice que la variable aleatoria Y procede de X por truncamiento por la izquierda en y_0 si su función de distribución es $F_Y(y) = F_{X|A}(y)$ siendo $A \equiv \{x|x > y_0\}$.

Aplicando la probabilidad condicionada, la distribución truncada por la izquierda es:

$$F_Y(y) = F_{X|X>y_0}(y) = \text{Prob}[X \le y | X > y_0] =$$

$$= \frac{\text{Prob}[X \le y, X > y_0]}{\text{Prob}[X > y_0]} = \begin{cases} \dfrac{0}{\text{Prob}[X > y_0]} & \text{si } y < y_0 \\ \dfrac{\text{Prob}[y_0 < X \le y]}{\text{Prob}[X > y_0]} & \text{si } y \ge y_0 \end{cases}$$

$$F_Y(y) = \begin{cases} 0 & si\ y < y_0 \\ \dfrac{F_X(y) - F_X(y_0)}{1 - F_X(y_0)} & si\ y \ge y_0 \end{cases}$$

1.4.3. Truncamiento por la izquierda y por la derecha

Sea X una variable aleatoria con función de distribución $F_X(x)$. Se dice que la variable aleatoria Y procede de X por truncamiento por la izquierda en y_0 y por la derecha en y_1 si su función de distribución es $F_Y(y) = F_{X|A}(y)$ siendo $A \equiv \{x|y_0 < x \le y_1\}$.

Aplicando la probabilidad condicionada:

$$F_Y(y) = F_{X|(X>y_1, X\le y_2)}(y) = \text{Prob}[X \le y | (X > y_1, X \le y_2)] =$$

$$= \frac{\text{Prob}[X \le y, X > y_1, X \le y_2]}{\text{Prob}[X > y_1, X \le y_2]}$$

$$F_Y(y) = \begin{cases} \dfrac{0}{\text{Prob}[y_1 < X \le y_2]} & \text{si } y < y_1 \\ \dfrac{\text{Prob}[X \le y, X > y_1]}{\text{Prob}[y_1 < X \le y_2]} = \dfrac{\text{Prob}[y_1 < X \le y]}{\text{Prob}[y_1 < X \le y_2]} & \text{si } y_1 \le y < \\ \dfrac{\text{Prob}[X > y_1, X \le y_2]}{\text{Prob}[y_1 < X \le y_2]} = \dfrac{\text{Prob}[y_1 < X \le y_2]}{\text{Prob}[y_1 < X \le y_2]} & \text{si } y \ge y_2 \end{cases}$$

$$F_Y(y) = \begin{cases} 0 & si\ y < y_0 \\ \dfrac{F_X(y) - F_X(y_0)}{F_X(y_1) - F_X(y_0)} & si\ y_1 > y \ge y_0 \\ 1 & si\ y > y_1 \end{cases}$$

1.5. DISTRIBUCIONES ASINTÓTICAS

En la distribución de los estadísticos de orden se puede dar el problema de distribuciones asintóticas, tomando valores de 0 y 1 en el caso de mínimos y máximos respectivamente, es decir, éstas son degeneradas. Para evitarlo se buscan transformaciones lineales de la forma $Y = a_n + b_n x$, donde a_n y b_n son constantes que dependen de n, tales que las distribuciones límite no degeneren. Resultando para máximos:

$$\lim_{n\to\infty} H_n(a_n + b_n x) = \lim_{n\to\infty} F^n(a_n + b_n x) = H(x); \quad \forall x$$

Dado que la función de distribución de máximos se desplaza hacia la derecha se usa a_n para mantenerla en su posición b_n y para devolverla a su inclinación original, coincidente con la de la población de partida.

De forma análoga para mínimos:

$$\lim_{n\to\infty} L_n(c_n + d_n x) = \lim_{n\to\infty} 1 - [1 - F(c_n + d_n x)]^n = L(x); \quad \forall x$$

Si una distribución satisface alguna de las ecuaciones anteriores, de dice que pertenece al dominio de atracción para máximos de una distribución dada $H(x)$, o para mínimos $L(x)$ respectivamente.

Se dan a continuación consideraciones prácticas basadas en el dominio de atracción de la función de distribución:

- Sólo tres distribuciones (Frechet, Weibull y Gumbel) pueden ocurrir como distribuciones límite de máximos y mínimos.
- Existen reglas para saber si $F(x)$ pertenece al dominio de atracción de estas tres.
- Las distribuciones de Gumbel pueden aproximarse por las de Weibull y Frechet, son caso límite de ellas.

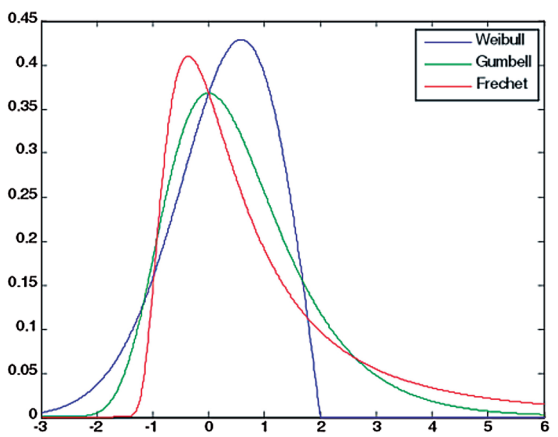


FIGURA 16. Formas Weibull, Gumbel y Frechet con parámetro de escala=1 y de localización=0

Distribución	Dominio de atracción	
	Para máximos	Para mínimos
Normal	Gumbel	Gumbel
Exponencial	Gumbel	Weibull
Log-Normal	Gumbel	Gumbel
Gamma	Gumbel	Weibull
Gumbel de Máximos	Gumbel	Gumbel
Gumbel de mínimos	Gumbel	Gumbel
Rayleigh	Gumbel	weibull
Uniforme	Weibull	Weibull
Weibull de Máximos	Weibull	Gumbel
Weibull de mínimos	Gumbel	Weibull
Frechet de Máximos	Frechet	Gumbel
Frechet de mínimos	Gumbel	Frechet

Tabla 10. Dominio de atracción para máximos y mínimos de distintas distribuciones. Extraído del libro Estadística Aplicada (2001), de Enrique Castillo y Rosa Eva Pruneda

1.5.1. Weibull

La distribución Weibull tiene gran importancia en la caracterización de valores extremos. Se ha aplicado en el campo de la fatiga, motores, aislamiento eléctrico, etc. (Castillo, 1988) .

Cambiando los parámetros *X* por *–X* y λ por $-\lambda$, las funciones de máximos de Weibull se transforman en las de mínimos y viceversa, por lo que cualquier propiedad o método de estimación de parámetros es aplicable de la misma forma.

Weibull de mínimos

Función de densidad
$f(x)=\begin{cases}\dfrac{\beta\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)^{\beta-1}\exp\left[-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)^{\beta}\right]}{\delta} & x\geq\lambda \\ 0 & en\ otro\ caso\end{cases}$
Función de distribución
$F(x)=\begin{cases}1-\exp\left[-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)^{\beta}\right] & x\geq\lambda \\ 1 & en\ otro\ caso\end{cases}$

Dominio	
$x\geq\lambda$	
Media	**Varianza**
$\bar{x}=\lambda+\delta\cdot\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$	$\sigma^2=\delta^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right)-\Gamma^2\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right]$
Mediana	**Moda**
$\lambda+\delta 0.693^{1/\beta}$	$\lambda+\delta\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)^{1/\beta}\quad \beta>1$ $\lambda\quad \beta\leq 1$

Tabla 11. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución de Weibull de mínimos

Donde:

- λ es el parámetro de localización, β el de forma y δ el de escala.

Ejemplo gráfico

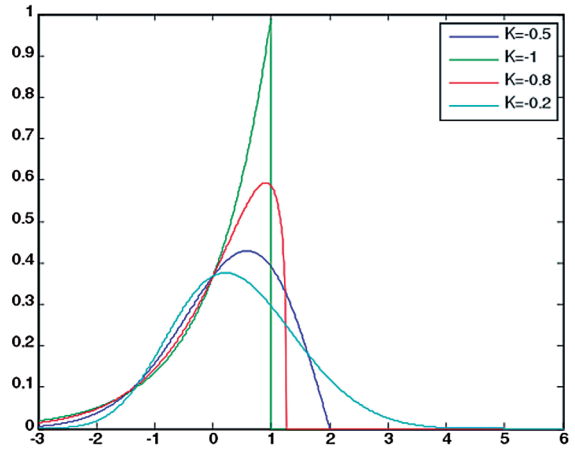


Figura 17. Funciones de densidad Weibull con diferentes parámetros de forma y manteniendo los parámetros de escala y localización iguales a 1 y 0 respectivamente

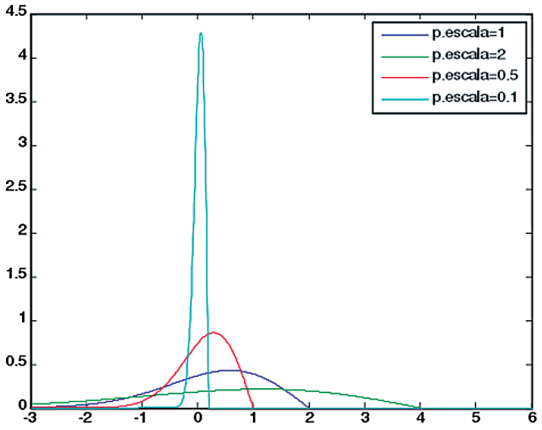


FIGURA 18. Funciones de densidad Weibull de mínimos con diferentes parámetros de escala y manteniendo los parámetros de forma y localización iguales a –0,5 y 0 respectivamente

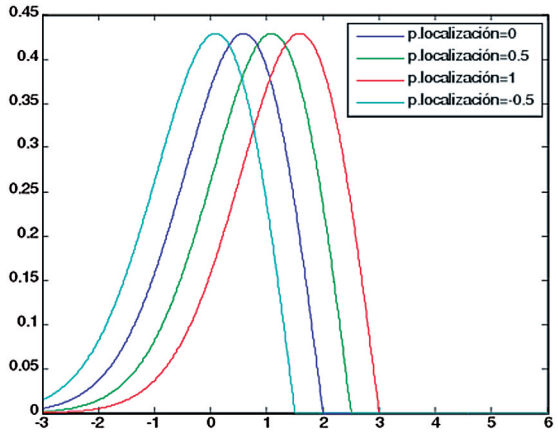


FIGURA 19. Funciones de densidad Weibull de mínimos con diferentes parámetros de localización y manteniendo los parámetros de forma y escala iguales a –0,5 y 1 respectivamente

WEIBULL DE MÁXIMOS

Función de densidad
$f(x)=\begin{cases}\dfrac{\beta\left(\frac{\lambda-x}{\delta}\right)^{\beta-1}\exp\left[-\left(\frac{\lambda-x}{\delta}\right)^{\beta}\right]}{\delta} & x\le\lambda \\ 0 & en\ otro\ caso\end{cases}$
Función de distribución
$F(x)=\begin{cases}\exp\left[-\left(\frac{\lambda-x}{\delta}\right)^{\beta}\right] & x\le\lambda \\ 1 & en\ otro\ caso\end{cases}$
Dominio
$x \ge \lambda$

Media	Varianza
$\bar{x}=\lambda-\delta\cdot\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$	$\sigma^2=\delta^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right)-\Gamma^2\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right]$
Mediana	**Moda**
$\lambda-\delta 0.693^{1/\beta}$	$\lambda-\delta\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)^{1/\beta}\quad \beta>1$ $\lambda\quad \beta\le 1$

TABLA 12. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución de Weibull de máximos

Ejemplo gráfico

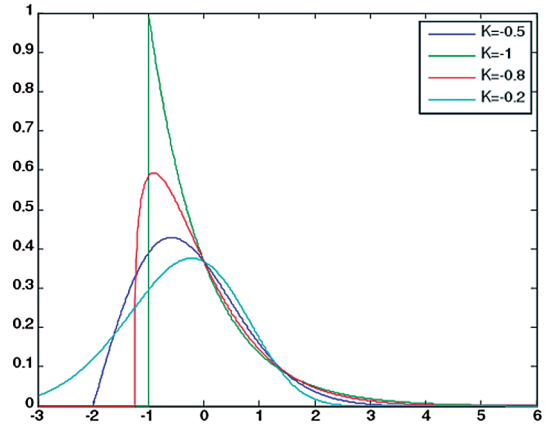


FIGURA 20. Funciones de densidad Weibull de máximos con diferentes parámetros de forma y manteniendo los parámetros de escala y localización iguales a 1 y 0 respectivamente

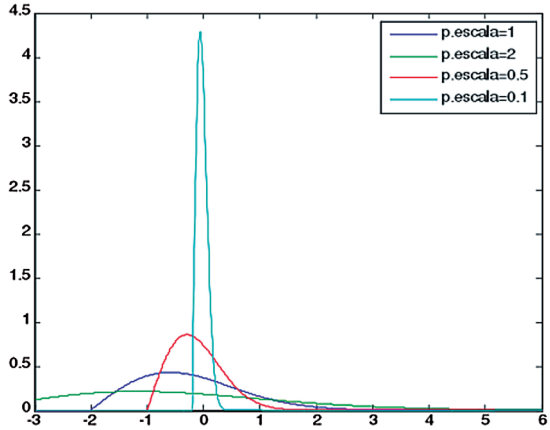


FIGURA 21. Funciones de densidad Weibull de máximos con diferentes parámetros de escala y manteniendo los parámetros de forma y localización iguales a –0,5 y 0 respectivamente

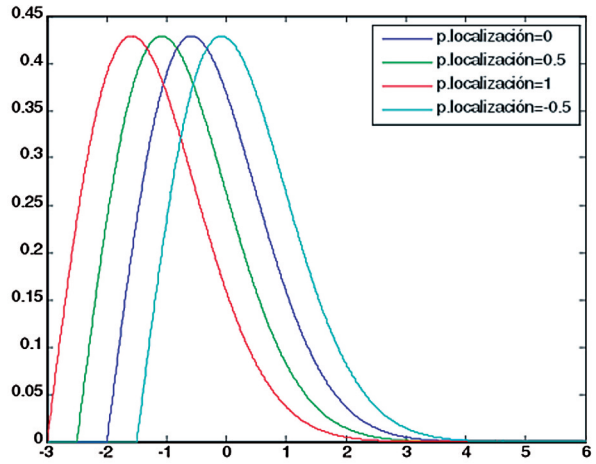


Figura 22. Funciones de densidad Weibull de máximos con diferentes parámetros de localización y manteniendo los parámetros de forma y escala iguales a –0,5 y 1 respectivamente

Weibull biparamétrica y Rayleigh

La distribución weibull biparamétrica es un caso particular de la Weibull de mínimos, resultante de hacer el parámetro de localización igual a cero $\lambda=0$ La distribución Rayleigh es un caso particular de la Weibull de mínimos, resultante de hacer el parámetro de forma $\beta=2$

Función de densidad para Rayleigh:

$$f(x)=\frac{x-\lambda}{\delta^2}\exp\left[-\frac{(x-\lambda)^2}{2\delta^2}\right] \qquad x>\lambda$$

1.5.2. Gumbel

La importancia de la distribución Gumbel es su aplicabilidad a valores extremos. Ha sido utilizada para caracterizar valores extremos de velocidades de viento (Simiu & Ellinwood, 1977) (Grigoriu & Harper, 1995) alturas de ola (Cartwright & Longuet-Higgins, 1956), (Dattatri, Raman, & Shankar, 1978), (Borgman, 1972), (Battjes, 1974), o corrientes (Castillo, 1988).

Cambiando los parámetros X por $-X$ y λ por $-\lambda$, la funciones de máximos de Gumbel se trasforman en las de mínimos y viceversa, por lo que cualquier propiedad o método de estimación de parámetros es aplicable del mismo modo.

Gumbel de mínimos

Función de densidad
$f(x)=\dfrac{\exp\left[\dfrac{-(\lambda-x)}{\delta}\right]\exp\left[-\exp\left(\dfrac{-(\lambda-x)}{\delta}\right)\right]}{\delta};$ $-\infty<x<\infty,\delta>0$
Función de distribución
$F(x)=1-\exp\left[-\exp\left[\dfrac{-(\lambda-x)}{\delta}\right]\right];$ $-\infty<x<\infty,\delta>0$
Dominio
$\infty \le x \le \infty$

Media	Varianza	Kurtosis
$\bar{x}=\lambda-0{,}57772\sigma$	$\sigma^2=\dfrac{\pi^2\delta^2}{6}$	–1,1396
Mediana	**Moda**	
$\lambda-0{,}3665\sigma$	λ	

Tabla 13. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución de Gumbel de mínimos

Ejemplo gráfico

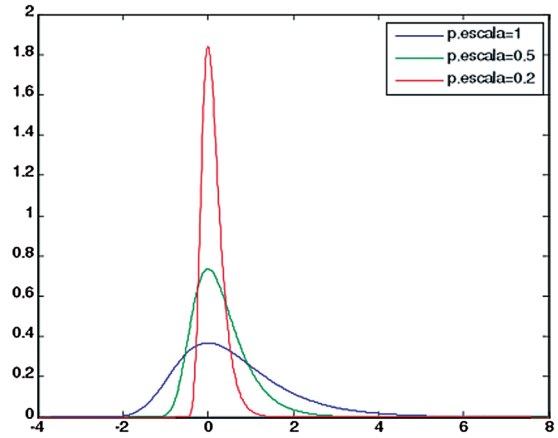


Figura 23. Funciones de densidad Gumbel de mínimos con distintos parámetros de escala y manteniendo el parámetros de localización=0

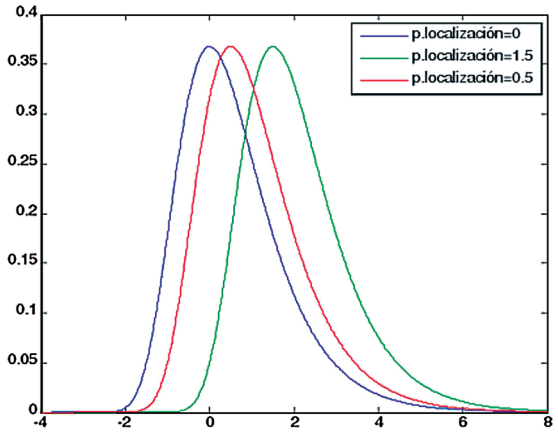


FIGURA 24. Funciones de densidad Gumbel de mínimos con diferentes parámetros de localización y manteniendo el parámetros de escala=1

Ejemplo gráfico

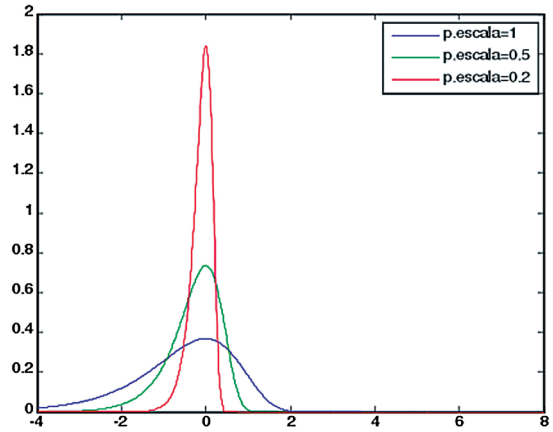


FIGURA 25. Funciones de densidad Gumbel de máximos con distintos parámetros de escala y manteniendo el parámetros de localización=0

GUMBEL DE MÁXIMOS

Función de densidad
$f(x)=\dfrac{\exp\left[\dfrac{-(x-\lambda)}{\delta}\right]\exp\left[-\exp\left(\dfrac{-(x-\lambda)}{\delta}\right)\right]}{\delta};$ $-\infty<x<\infty,\delta>0$
Función de distribución
$F(x)=\exp\left[-\exp\left[\dfrac{-(x-\lambda)}{\delta}\right]\right];\quad -\infty<x<\infty,\delta>0$
Dominio
$\infty \leq x \geq \infty$

Media	Varianza	Kurtosis
$\bar{x}=\lambda-0{,}57772\sigma$	$\sigma^2=\dfrac{\pi^2\delta^2}{6}$	−1,1396
Mediana		**Moda**
$\lambda+0{,}3665\sigma$		λ

TABLA 14. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución de Gumbel de máximos

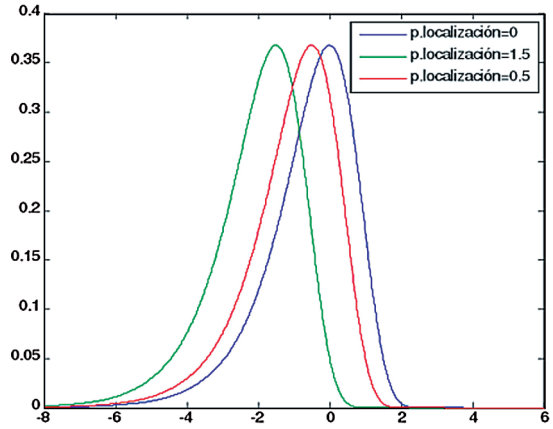


FIGURA 26. Funciones de densidad Gumbel de máximos con diferentes parámetros de localización y manteniendo el parámetros de escala=1

1.5.3. Frechet

Cambiando los parámetros X por $-X$ y λ por $-\lambda$, la funciones de máximos de Frechet se trasforman en las de mínimo y viceversa. Por lo que cualquier propiedad o método de estimación de parámetros es aplicable del mismo modo.

Frechet de mínimos

Función de densidad
$f(x)=\begin{cases}\frac{\beta}{\delta}\left(\frac{\delta}{\lambda-x}\right)^{\beta+1}\exp\left[-\left(\frac{\delta}{\lambda-x}\right)^{\beta}\right] & x\le\lambda \\ 0 & en\ otro\ caso\end{cases}$
Función de distribución
$F(x)=\begin{cases}1-\exp\left[-\left(\frac{\delta}{\lambda-x}\right)^{\beta}\right] & x\le\lambda \\ 0 & en\ otro\ caso\end{cases}$
Dominio
$\infty \le x \ge \infty$
Media — **Varianza**
$\bar{x}=\lambda-\delta\cdot\Gamma\left(1-\frac{1}{\beta}\right)\quad \beta>1$ — $\sigma^2=\delta^2\left[\Gamma\left(1-\frac{2}{\beta}\right)-\Gamma^2\left(1-\frac{1}{\beta}\right)\right]\quad \beta>2$
Mediana
$\lambda-\delta\cdot 0.693^{-1/\beta}$

Tabla 15. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución de Frechet de mínimos

Ejemplo gráfico

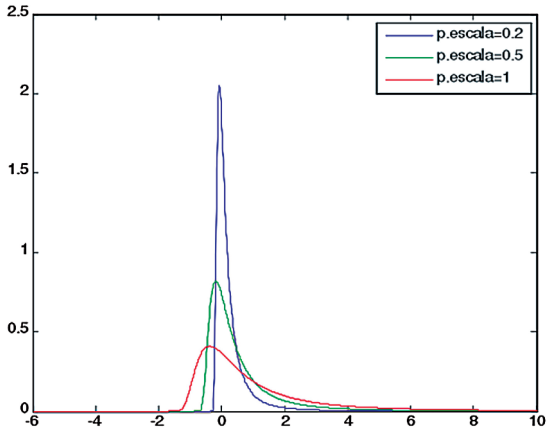


Figura 27. Funciones de densidad Frechet de mínimos con diferentes parámetros de escala y manteniendo los parámetros de forma y localización iguales a 0,5 y 0 respectivamente

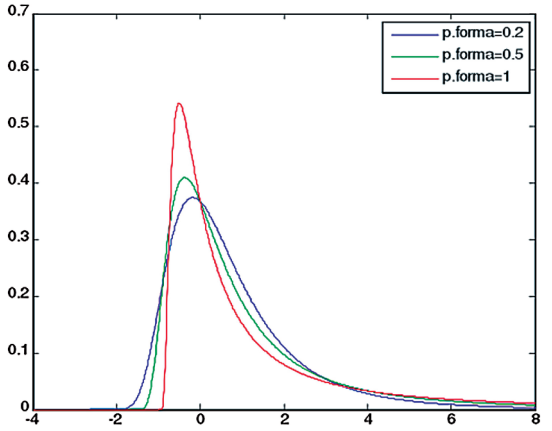


Figura 28. Funciones densidad Frechet de mínimos con diferentes parámetros de forma y manteniendo los parámetros de escala y localización iguales a 1 y 0 respectivamente

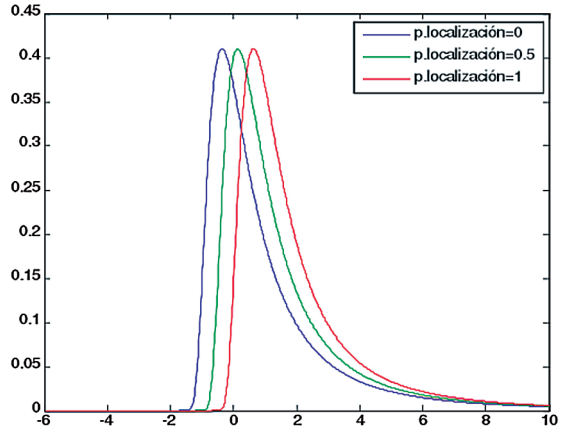


Figura 29. Funciones densidad Frechet de mínimos con diferentes parámetros de localización y manteniendo los parámetros de forma y escala iguales a 0,5 y 1 respectivamente

Frechet de máximos

Función de densidad
$f(x)=\begin{cases}\frac{\beta}{\delta}\left(\frac{\delta}{x-\lambda}\right)^{\beta+1}\exp\left[-\left(\frac{\delta}{x-\lambda}\right)^{\beta}\right] & x\geq\lambda \\ 0 & en\ otro\ caso\end{cases}$
Función de distribución
$F(x)=\begin{cases}\exp\left[-\left(\frac{\delta}{x-\lambda}\right)^{\beta}\right] & x\geq\lambda \\ 0 & en\ otro\ caso\end{cases}$
Dominio
$\infty \leq x \geq \infty$
Media — **Varianza**
$\bar{x}=\lambda+\delta\cdot\Gamma\left(1-\frac{1}{\beta}\right)\ \beta>1$ — $\sigma^2=\delta^2\left[\Gamma\left(1-\frac{2}{\beta}\right)-\Gamma^2\left(1-\frac{1}{\beta}\right)\right]\ \beta>2$
Mediana
$\lambda+\delta\cdot 0.693^{-1/\beta}$

Tabla 16. Función de densidad, función de distribución y estadísticos principales de la distribución de Frechet de máximos

Ejemplo gráfico

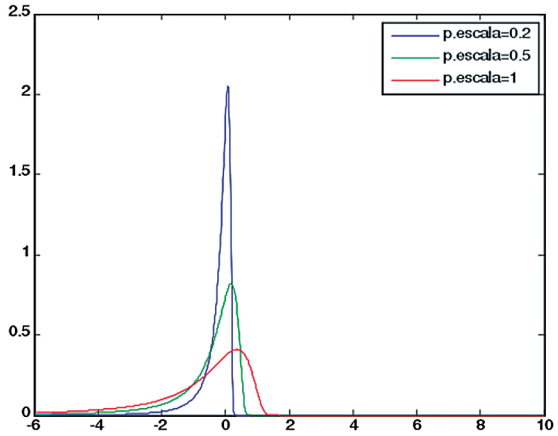


Figura 30. Funciones de densidad Gumbel de máximos con distintos parámetros de escala y manteniendo el parámetros de localización=0

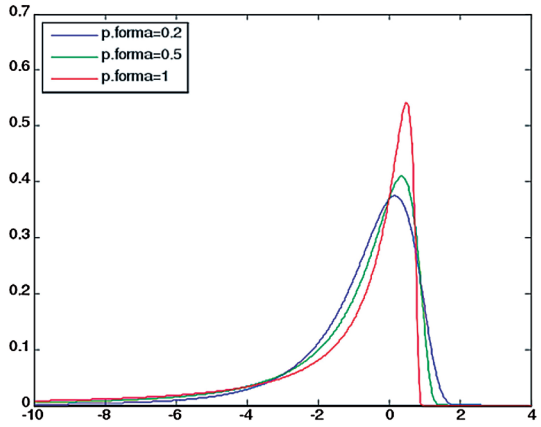


Figura 31. Funciones densidad Frechet de máximos con diferentes parámetros de forma y manteniendo los parámetros de escala y localización iguales a 1 y 0 respectivamente

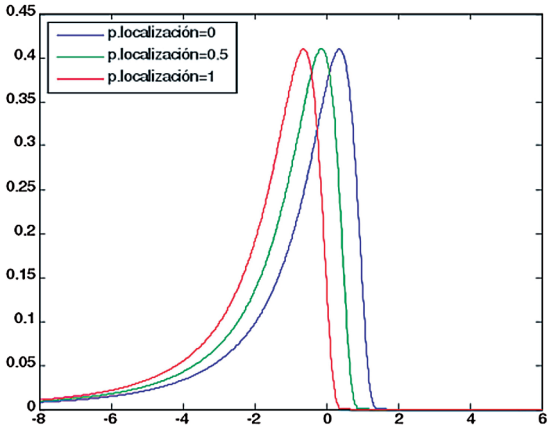


Figura 32. Funciones de densidad Frechet de máximos con diferentes parámetros de localización y manteniendo los parámetros de forma y escala iguales a 0,5 y 1 respectivamente

1.6. ESTADÍSTICOS DE ORDEN

Los estadísticos de orden tienen gran importancia tanto en estadística teórica como práctica. Entre ellos destacan mínimo y máximo, pues constituyen los valores críticos que se usan en estudios y proyectos de ingeniería, medicina física, etc.

Sea $(x_1, x_2,...,x_n)$ una muestra procedente de una población. Si los valores $x_1, x_2,...,x_n$ se ordenan en orden creciente $x_{1:n} \leq x_{2:n} \leq ... \leq x_{n:n}$, entonces el miembro r-ésimo de esta nueva secuencia se denomina estadístico de orden r de la muestra dada.

Entre ellos destacan $x_{1:n} = \min(x_1, x_2,...,x_n)$ y el máximo $x_{n:n} = \max(x_1, x_2,...,x_n)$ de la muestra.

1.6.1. Distribución del máximo

Sea (x_1, x_2,...,x_n) una muestra aleatoria simple (de valores idénticamente distribuidos e independientes) procedente de una población con función de distribución $F(x)$. La función de distribución del máximo es:

$$F_{max}(x) = F^n(x)$$

1.6.2. Distribución del mínimo

Sea (x_1, x_2,...,x_n) una muestra aleatoria simple (de valores idénticamente distribuidos e independientes) procedente de una población con función de distribución $F(x)$. La función de distribución del mínimo es:

$$F_{\min}(x) = 1 - \left[1 - F(x)\right]^n$$

1.6.3. Distribución conjunta de varios estadísticos de orden

Sean $X_{r1:n}$, $X_{r2:n}$,...,$X_{rk:n}$, con $r_1 < r_2 < ... < r_k$, k estadísticos de orden de una muestra aleatoria simple de tamaño n procedentes de una población con función de distribución $F(x)$. Con objeto de obtener la distribución conjunta de este conjunto de estadísticos, considérese el suceso $x_j \le X_{rj:n} \le x_j + dx_j$; $1 \le j \le k$ para valores diferenciales dx_j; $1 \le j \le k$. Es decir k de los elementos de la muestra pertenecen a los intervalos (x_j, x_j, + dx_j) para $1 \le j \le k$ y el resto están distribuidos de manera que exactamente ($r_j - r_{j-1} - 1$) pertenecen al intervalo ($x_{j-1} + dx_{j-1}$, x_j) para $1 \le j \le k$, donde $r_0 = 0$, $r_{k+1} = n+1$, $x_0 = -\infty$, $x_{k+1} = \infty$.

Considérese ahora el siguiente experimento multinomial con $2k+1$ sucesos posibles: Obtener al azar n elementos de la población y determinar a cuál de los $2k+1$ intervalos pertenecen. Puesto que se considera independencia y reemplazamiento el conjunto de los números de elementos en los diferentes intervalos constituye una variable multinomial:

$$M\left\{n; f(x_1)dx_1, f(x_2)dx_2, \ldots, f(x_k)dx_k, \left[F(x_1) - F(x_0)\right], \left[F(x_2) - F(x_1)\right], \ldots, \left[F(x_{k+1}) - F(x_k)\right]\right\}$$

donde los parámetros son n (el tamaño de la muestra) y las probabilidades asociadas con los $2k+1$ intervalos. En consecuencia la función de densidad conjunta de los k estadísticos resulta:

$$f_{r_1,r_2,\ldots,r_k:n}(x_1, x_2, \ldots, x_k) =$$

$$= n! \prod_{i=1}^{k} f(x_i) \prod_{j=1}^{k+1} \frac{\left[F(x_j) - F(x_{j-1})\right]^{r_j - r_{j-1} - 1}}{(r_j - r_{j-1} - 1)!}; \qquad x_1 \le x_2 \le \ldots \le x_k.$$

APLICACIONES:

A partir de la distribución anterior pueden obtenerse las de otros estadísticos de interés como son el rango de una muestra, la diferencia entre dos estadísticos de orden cualesquiera o distribuciones condicionadas.

Tiene especial interés por su aplicación en simulación las distribuciones condicionadas de dos estadísticos de orden consecutivos procedentes de una población uniforme $U(0,1)$, así la distribución de $X_{i:n}$ condicionada por $X_{i+1:n} = x_2$, resulta:

$$F_{X_{1:n}|X_{i+1:n}}(x_1 \mid x_2) = \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^i; \qquad x_1 \le x_2$$

Análogamente, la función de distribución de $X_{i+1:n}$ condicionada por $X_{i:n} = x_1$ resulta:

$$F_{X_{i+1:n}|X_{1:n}}(x_2 \mid x_1) = 1 - \left(\frac{1 - x_2}{1 - x_1}\right)^{n-i}; \qquad x_1 \le x_2$$

Las funciones de densidad y distribución del estadístico de orden r de una muestra de tamaño n son:

$$f_{r:n}(x) = f(x)\frac{F(x)^{r-1}\left[1 - F(x)\right]^{n-r}}{B(r, n-r+1)}$$

$$F_{r:n}(x) = I_{F(x)}(r, n-r+1)$$

dónde I_p (a,b) es la función beta incompleta.

Ejemplo

Se sabe que la altura de ola, X, de las olas que ocurren en un determinado lugar es un variable aleatoria de Rayleigh, es decir su función de densidad es:

$$f(x) = \delta e^{-\frac{\delta^2}{2}}; \qquad \delta \ge 0,$$

$$\delta = \frac{x}{\mu_0^{1/2}}$$

y μ_0 es el momento de orden cero de su espectro de energía. Las funciones de densidad y distribución de los estadísticos de orden de una muestra de 1.000 olas son:

$$f_{X_{r:1000}}(x) = r\binom{1000}{r}\left[1 - e^{-\delta^2/2}\right]^{r-1} e^{\frac{-\delta^2(1000-r)}{2}} \delta e^{-\delta^2/2}$$

$$F_{X_{r:1000}}(x) = \sum_{k=r}^{1000}\binom{1000}{k}\left[1 - e^{-\delta^2/2}\right]^{k} e^{\frac{-\delta^2(1000-k)}{2}}$$

Si se sabe que una escollera de tipo rígido se rompe cuando la probabilidad de que sobreviva una serie de 1.000 olas es:

$$p = F_{X_{1000:1000}}(4,8) = 0,99$$

Del mismo modo, si una escollera flexible resiste 5 olas de altura mayor que su probabilidad de supervivencia a las 1000 es:

$$p = F_{X_{996:1000}}(3,5) = 0,92$$

1.7. APLICACIONES

A continuación se muestran algunas aplicaciones de las funciones de distribución más utilizadas en oleaje:

1.7.1. Distribución de los desplazamientos de la superficie libre

1.7.1.1. Distribución normal de desplazamientos de la superficie libre

Considerando que la superficie libre es el resultado de las contribuciones de un gran número de ondas superpuestas de manera aleatoria:

$$\eta_{mn} = a_{mn}\cos\left[k_m\left(x\cos\theta_n + y sen\theta_n\right) - \sigma_m t + \varepsilon_{mn}\right]$$

Y asumiendo que las contribuciones son variables aleatorias independientes y despreciando las interacciones entre componentes, se llega a que la superficie libre del oleaje $\eta(t)$ está normalmente distribuida con media $\bar{\eta}$ y varianza $\bar{\sigma}_n^2$.

$$p(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e\left(\frac{-1}{2}\xi^2\right) = \frac{1}{\eta_{rms}\sqrt{2\pi}} e\left(\frac{-1}{2}\frac{\eta^2}{\eta_{rms}^2}\right)$$

$$\xi = \frac{\eta - \bar{\eta}}{\sigma_n}; \qquad \bar{\eta} = 0, \sigma_n = \eta_{rms}$$

Para comparar los resultados obtenidos por mediciones directas y los obtenidos teóricamente se utiliza la asimetría y la kurtosis, que determinan la no linealidad del oleaje midiendo distancia entre la moda y la media en el primer caso y el grado de apuntalamiento de la distribución. Si ambas toman el valor 0, la variable esta normalmente distribuida.

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\bar{\sigma}_n^3} = \hat{m}_3$$

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\bar{\sigma}_n^4} - 3 = \hat{m}_4 - 3$$

Esta distribución presenta ciertas limitaciones:

- No es válida cuando intervienen procesos no lineales, ya que no tiene en cuenta la cesión de energía entre componentes o el peraltamiento del oleaje cuando se aproxima a profundidades reducidas, entre otras.
- Esta distribución admite alturas de ola tan grandes como se quiera y esto es físicamente imposible ya que el oleaje rompe antes de alcanzar ciertas alturas en función a la profundidad en que se encuentre.

1.7.1.2. Distribución no lineal de desplazamientos de la superficie libre

Cuando el oleaje encuentra profundidades intermedias o bajas, empieza a verse afectado por el fondo, principalmente por efectos de refracción y rotura. Es en este momento cuando el desplazamiento del oleaje alrededor de su nivel medio deja de presentar una distribución normal. Por tanto, los parámetros de asimetría y kurtosis tendrán un valor distinto a 0 y el proceso será no gaussiano. Para este caso se han desarrollado:

– Series tipo "A" de Gram-Charlier (o Gauss modificada)

$$p(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-1}{2}\xi^2\right)}\left[1 + \frac{\hat{m}_3}{3!}H_3(\xi) + \frac{\hat{m}_4 - 3}{4!}H_4(\xi) + \right.$$

$$\xi = \frac{\eta - \bar{\eta}}{\sigma_n}$$

$$\left. + \frac{\hat{m}_5 - 10\hat{m}_3}{5!}H_5(\xi) + \frac{\hat{m}_6 - 15\hat{m}_4 + 30}{6!}H_6(\xi) + \ldots\right]$$

Donde son los polinomios de Hermite están definidos como se muestra a continuación:

$$H_3(\xi) = \xi^3 - 3\xi$$
$$H_4(\xi) = \xi^4 - 6\xi^2 + 3$$
$$H_5(\xi) = \xi^5 - 10\xi^3 + 15\xi$$
$$H_6(\xi) = \xi^6 - 15\xi^4 + 45\xi^2 - 15$$
$$\ldots$$

El mayor inconveniente de esta distribución es que los parámetros de asimetría, kurtosis y orden superior deben ser conocidos a priori.

1.7.1.3. Distribución de los desplazamientos basada en un desarrollo de Stokes

Para derivar la función de densidad no gaussiana, (Huang *et al.,* 1971), asumiendo que el oleaje responde a una expansión de Stokes, establecieron

que la superficie libre asociada a un espectro de banda estrecha, no lineal, se puede representar como:

$$\eta = \frac{1}{2}a^2k + a\cos x + \frac{1}{2}a^2k\cos 2x + \frac{3}{8}a^3k^2\cos 3x + \ldots$$
$$= a\cos x + a^2k\cos x + \frac{3}{8}a^3k^2\cos 3x + \ldots$$

Siendo:

- α la amplitud,
- k el numero de onda y
- $x = kx\cos\theta + y\,\mathrm{sen}\theta - \sigma t + \varepsilon$

Asumiendo que la amplitud y el número de onda son variables aleatorias que cambian lentamente y siguen una distribución Rayleigh y Uniforme respectivamente se tiene:

$$p(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{\left(\frac{-1}{2}A\right)}\left[\frac{B}{\sqrt{R}} + \frac{9}{8}\frac{(k\bar{\sigma}_\eta)^2}{N}\frac{1}{\sqrt{R^3}}\right]$$
$$A = N^2\left[\eta - k\bar{\sigma}_\eta(\xi^2-1) + (k\bar{\sigma}_\eta)^2\left(\frac{13}{8}\xi^3 - 2\xi\right)\right]^2$$
$$B = N\left[1 - 2k\bar{\sigma}_\eta\xi + \left(k\bar{\sigma}_\eta\right)^2\left(\frac{39}{8}\xi^2 - 2\right)\right]$$
$$R = 1 + \frac{9}{4}(k\bar{\sigma}_\eta)^2\xi^2$$
$$N = 1 + (k\bar{\sigma}_\eta)^2$$

Donde k es evaluado utilizando la frecuencia pico espectral y la profundidad local

– Otras distribuciones a destacar son las de (Tayfun, 1993) en función de la modulación de la amplitud o las de (Massel, 1996) que desarrolla dos distribuciones en las que considera la influencia de la rotura, una para aguas profundas y otra en aguas de profundidad finita.

1.7.2. Distribución de las alturas de ola

En función de las hipótesis que se adopten, pueden emplearse distintas funciones de distribución de altura de ola. A continuación se muestran algunas de las hipótesis:

1. El desplazamiento de la superficie libre sigue una distribución normal.

2. El espectro es de banda estrecha.

3. La correlación entre desplazamientos máximos positivos y negativos es igual a uno. (correlación perfecta, SWELL puro con ancho espectral ε=0.

4. La correlación entre desplazamientos máximos positivos y negativos es igual a cero. (correlación nula: SEA).

5. La correlación entre desplazamientos máximos positivos y negativos es arbitraria.

6. La altura de ola está limitada por efectos de rotura

1.7.2.1. Si se adoptan las hipótesis 1, 2 y 3: distribución de Rayleigh

Esta última función de distribución puede expresarse indistintamente en función de H_{rms}, $\bar{H}$ y H_s, siendo las expresiones de la función de densidad y de distribución para cada descriptor las siguientes:

$$f(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2}\exp\left(-\frac{H^2}{H_{rms}^2}\right) \qquad H \geq 0$$
$$F(H) = 1 - \exp\left(-\frac{H^2}{H_{rms}^2}\right) \qquad H \geq 0$$

$$f(H) = \frac{\pi}{2}\frac{H}{\bar{H}^2}\exp\left(-\frac{\pi}{4}\frac{H^2}{\bar{H}^2}\right) \qquad H \geq 0$$
$$F(H) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4}\frac{H^2}{\bar{H}^2}\right) \qquad H \geq 0$$

$$f(H) = 4.01\frac{H}{H_s^2}\exp\left(-2.005\frac{H^2}{H_s^2}\right) \qquad H \geq 0$$
$$F(H) = 1 - \exp\left(-2.005\frac{H^2}{H_s^2}\right) \qquad H \geq 0$$

Parámetros de altura de ola:

Probabilidad de que una altura de ola supere un cierto valor H_q.

$$q = 1 - F(H_q) = \exp\left(-\frac{H_q^2}{H_{rms}^2}\right)$$

Altura media de las N/n olas más altas

$$H_{1/n} = H_{rms}\left\{\sqrt{\log_e N} + n\sqrt{\pi}\left[1 - \Phi\left(\sqrt{2\log_e n}\right)\right]\right\}$$

Media de altura de ola máxima (para N>100)

$$\bar{H}_{\max N} = H_{rms}\left[\sqrt{\log_e N} + \frac{C}{2}\left(\log_e N\right)^{-1/2}\right], \quad C = 0.57722$$

Moda de altura de ola máxima (para N>100)

$$H^{0}_{\max N} = H_{rms}\sqrt{\log_e N}$$

Se muestra a continuación un ejemplo de la función de densidad y distribución Rayleigh.

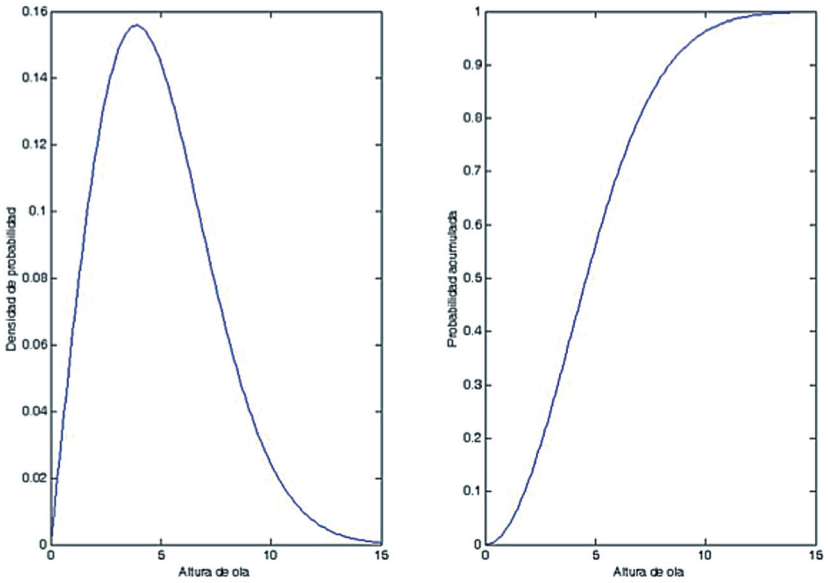


FIGURA 33. Funciones de densidad y de distribución Rayleigh

La distribución Rayleigh no representa correctamente la distribución de las mayores olas de un estado de mar, ya que realiza una predicción excesiva de las probabilidades de las mayores olas del registro, incrementándose el error conforme se acerca a la cola de la distribución.

En la zona central, la distribución Rayleigh presenta discrepancias con los oleajes registrados cuanto más asimétrico y no lineal es este. Siempre que no se produzca la rotura, es decir en aguas profundas los parámetros estadísticos empleados mediante esta función de distribución pueden ser empleados con notable fiabilidad, fiabilidad que se va perdiendo progresivamente con la propagación del oleaje hacia profundidades menores.

Debido a lo arriba expuesto (Glukhovsky, 1966) desarrolló una extensión de la distribución de Rayleigh para profundidades de aguas finitas:

$$p(H) = \frac{b}{\bar{H}}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{\frac{1+n}{1-n}} e^{\left[-a\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{\frac{2}{1-n}}\right]}$$

$$a = \frac{\pi}{4\left(1+\frac{n}{\sqrt{2\pi}}\right)}$$

$$b = \frac{2a}{1-n}$$

El coeficiente n es la relación entre la altura de ola mediada y la profundidad, que varía entre 0 y 0,5. Cuando *n*=0 coincide con la distribución Rayleigh y en el caso de 0.5 con la condición límite de surf zone.

1.7.2.2. SI SE ADOPTAN LAS HIPÓTESIS 1, 2 Y 4: DISTRIBUCIÓN CARTER

Carter asumiendo que correlación crestas-valles consecutivos es nula desarrolló la distribución de las alturas de olas suponiendo que las distribuciones de las crestas y los valles son Rayleigh y desarrollando la conjunta.

$$p(H) = \frac{1}{4\sqrt{m_0}} e^{-\left(\frac{H^2}{4m_0}\right)}\left[2\frac{H}{\sqrt{m_0}} e^{-\left(\frac{H^2}{4m_0}\right)} + \sqrt{\pi}\left(\frac{H^2}{m_0}-2\right) Erf\left(\frac{H}{2\sqrt{m_0}}\right)\right.$$

Donde:

Erf es la función error definida como:

$$Erf(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^X e^{-u^2} du$$

Siendo *u*(*u*=y_2/2) una constante de integración e

$$y_2 = \beta_1 - \beta_2, \qquad \beta = \frac{\eta_{\max}}{\sqrt{m_0}}$$

la diferencia entre la amplitud de cresta y valle adimensionalizadas.

1.7.2.3. Si se adoptan las hipótesis 1, 2 y 5: distribución de crestas y valles

La correlación de los valores máximos positivos y negativos puede esperarse que esté entre 0 y 1. Rice (Rice, 1994) propuso la siguiente distribución conjunta:

$$p(H) = \frac{1}{m_0} e^{-\left(\frac{1}{2}\frac{H^2}{m_0}\frac{1}{1-k^2}\right)} \int_0^H \frac{H^2-u^2}{4m_0}\frac{1}{1-k^2} I_0$$

$$\left[\frac{H^2-u^2}{4m_0}\frac{1}{1-k^2}\right] e^{\left(\frac{H^2-u^2}{4m_0}\frac{1}{1-k^2}\right)} du$$

Siendo:

- I_0 la función de Bessel de orden cero.
- k el coeficiente de correlación entre β_1^2 y β_2^2:

$$k^2 = \frac{\mu_{13}^2 + \mu_{14}^2}{m_0^2}$$

Donde μ_{13} y μ_{14} son las autocorrelaciones de las partes de la señal separadas τ unidades.

La expresión anterior tiende a la expresión de Rayleigh y a la de Carter cuando el parámetro k tiende a 1 y a 0 respectivamente.

1.7.2.4. Si se adoptan las hipótesis 1, 2, 3 y 6: distribución de Tayfun

(Tayfun, *Distribution of large wave heights*, 1990) propone una ecuación para evaluar la densidad de probabilidad de alturas de olas que están limitadas por las mismas y por un parámetro N en el que tiene en cuenta la profundidad y el estado de mar; además, supone una correlación intermedia entre crestas y valles. Si N tiende a infinito se tiene un estado de mar tipo SWELL, y la distribución de Tayfun se iguala a la Rayleigh:

$$p(\xi, N) = \xi \int_0^\infty \left[u J_0^N \left(\frac{u}{N^{\frac{1}{2}}} \right) J_0(\xi u) \right] du \qquad 0 \le \xi \le N^{\frac{1}{2}}$$

$$p(\xi, N) = \xi \left[1 - \frac{4}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{N^{\frac{1}{2}}}{\xi} \right) \right] \int_0^\infty \left[u J_0^N \left(\frac{u}{N^{\frac{1}{2}}} \right) J_0(\xi u) \right] du \quad N^{\frac{1}{2}} \le \xi \le (2N)^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$$N = \left(\frac{\pi}{7\sqrt{2}} \frac{\tanh(k_0 h)}{k_0 \sqrt{2m_0}} \right) \qquad y \qquad \xi = \frac{H}{H_{rms}}$$

J_0 es la función de Bessel de orden 0 y k_0 es el numero de onda asociado a la frecuencia media, que se obtiene a partir de la ecuación de la dispersión:

$$\frac{\sigma^2 h}{g} = k_0 h \tanh(k_0 h)$$

Numerosos autores han estudiado qué distribuciones se ajustan más a qué fenómenos, (Green, 1994) establece que para estados de mar muy desordenados (tipo SEA) la ecuación de Carter es la que mejor representa el fenómeno, mientras que para estados de mar más ordenados, lo que se produce cuando salen del área de generación y se propagan, la distribución Tayfun es la que mejor se ajusta. Por último, en un estado de mar muy ordenado (tipo SWELL) la Rayleigh puede utilizarse de manera adecuada.

2. Variables aleatorias n-dimensionales

El diseño de estructuras marítimas requiere una estimación fiable de la distribución conjunta de las alturas de ola y períodos de un estado de mar. Las distintas distribuciones conjuntas altura – periodo más empleadas en la actualidad pueden dividirse en dos grupos: las escalares, en las que no se considera la dirección de propagación del oleaje y direccionales, en las que sí se considera dicha dirección de propagación.

A su vez, las escalares se pueden dividir en las que son eminentemente teóricas (Cavanie, Arhan & Ezraty, 1976), (Longuet-Higgins, 1983), y en aquellas obtenidas por ajuste de distribuciones teóricas a los datos registrados (por ejemplo datos registrados en boyas). Las direccionales por su parte son habitualmente de este segundo tipo.

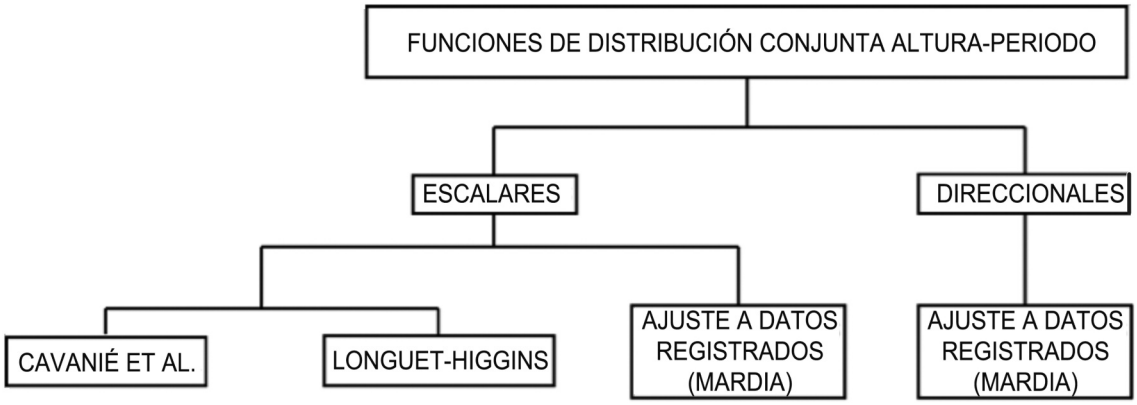


FIGURA 34. Clasificación de las funciones de densidad conjuntas

2.1. DISTRIBUCIÓN DE CAVANIÉ *ET AL*

(Cavanie, Arhan & Ezraty, 1976) propusieron una distribución teórica basada en el modelo gaussiano de banda estrecha y que tiene en cuenta la asimetría en la distribución de los periodos. Esta ecuación presenta una buena concordancia con los datos observados, pero tiene el defecto de presentar el parámetro de anchura de espectral ε, que depende del cuarto momento de la función de densidad espectral. Este momento tiene el inconveniente de estar asociado a la cuarta potencia de la función de densidad espectral, por lo que cualquier error en la distribución resulta muy amplificado, sobre todo para altas frecuencias.

Para la derivación de dicha distribución primero obtuvieron la distribución conjunta de los máximos y su aceleración asociada y entonces la transformaron en la distribución conjunta de altura de olas y periodos, asumiendo que los máximos positivos y negativos son simétricos. En aquellas situaciones con anchuras espectrales pequeñas, la distribución es aproximadamente simétrica alrededor del periodo medio.

La expresión de la distribución en su forma dimensional, es:

$$p(H,T) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \frac{\alpha^3 \overline{T}^4}{H_m^{3/2} \varepsilon (1-\varepsilon) \tau^{-4}} \frac{H^2}{T_z^5} \exp$$

$$\exp\left[-\frac{\overline{T}^4}{8 H_m \varepsilon^2 \tau^{-4}} \frac{H^2}{T_z^4} \left[\left(\tau^{-2} \frac{T_z^2}{\overline{T}^2} - \alpha^2 \right)^2 + \alpha^4 \beta^2 \right] \right]$$

donde:

$$\alpha = \frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{1-\varepsilon^2}\right)$$

$$\beta^2 = \frac{\varepsilon^2}{1-\varepsilon^2}$$

$$\varepsilon^2 = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4}$$

El valor de ε se encuentra entre 0 y 1, correspondiendo los valores próximos a 0 a los espectros de banda estrecha.

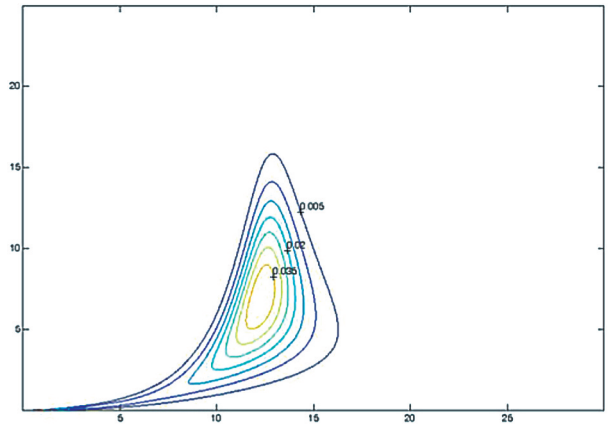


FIGURA 35. Función de distribución conjunta altura periodo de Cavanié et al., ε = 0,3

2.2. DISTRIBUCIÓN DE LONGUET-HIGGINS

Una de las distribuciones teóricas conjuntas de altura de ola-periodo más empleada es la propuesta por (Longuet-Higgins, 1983). La distribución obtenida asume que el espectro es de banda estrecha (SWELL), con un valor de $\nu^2 \leq 0{,}36$, donde es el parámetro de anchura espectral. Presenta la ventaja frente a la anterior de depender de un parámetro de ancho de espectral de orden menor (depende del segundo momento y no del cuarto). Además esta función también tiene en cuenta la asimetría de los periodos. De modo análogo a lo que sucedía en la distribución conjunta anterior, cuando la anchura espectral es pequeña, la distribución es aproximadamente simétrica alrededor del periodo medio.

La función de densidad conjunta dimensional tiene la forma:

$$f(H,T) = L(\nu)\left(\frac{H^2\overline{T}}{8\nu\sqrt{2\pi}m_0^{3/2}T^2}\right)^2 \exp\left\{-\frac{H^2}{8}\left[1+\frac{1}{\nu^2}\left(1-\frac{\overline{T}}{T}\right)^2\right]\right\}$$

Donde:

$$L(\nu) = \frac{1}{2}\left[1+(1+\nu^2)^{-\frac{1}{2}}\right]$$

$$\overline{T} = \frac{m_0}{m_1}$$

Además, con las relaciones entre descriptores estadísticos y espectrales del oleaje se puede conocer, para un estado de oleaje definido por *Hs* y *Tp*, la función de densidad conjunta.

Por ejemplo, si se trata de una distribución Rayleigh caracterizada por $H_s = 4{,}004\sqrt{m_0}$ Y $\overline{T} = 0{,}85T_p$, si se trabaja con un espectro JONSWAP con factor de forma de pico del espectro (apuntamiento) γ=3,3, que es el valor medio de γ se tiene lo siguiente:

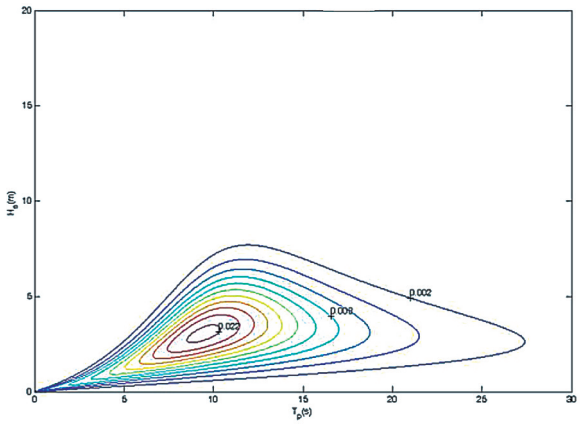


FIGURA 36. Función de distribución conjunta altura periodo de Longuet-Higgins. Oleaje de banda ancha $\nu^2 = 0{,}35$

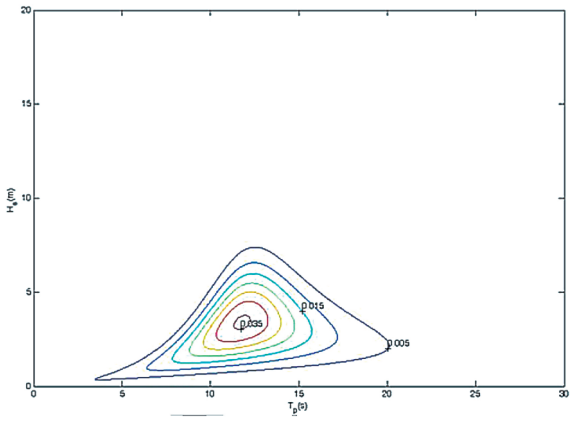


FIGURA 37. Función de distribución conjunta altura periodo de Longuet-Higgins. Oleaje de banda estrecha $\nu^2 = 0{,}1$

2.3. DISTRIBUCIONES DE PERIODOS DE OLA

Estas distribuciones se derivan a partir de las distribuciones conjuntas de periodo y altura de ola presentadas en los apartados anteriores, por lo que comparten la misma nomenclatura.

2.3.1. Distribución de (Cavanie, Arhan & Ezraty, 1976)

$$f(T) = \frac{\alpha^3\beta^2\overline{\delta}^2 T}{\overline{T}^2\left[\left(\frac{\overline{\delta}^2T^2}{\overline{T}^2}-\alpha^4\beta^2\right)\right]^{3/2}}$$

2.3.2. Distribución de (Longuet-Higgins, 1983)

$$f(T)=\frac{L(\nu)\bar{T}}{2\nu T^2}\left[1+\left(1-\frac{\bar{T}}{T}\right)^2\frac{1}{\nu^2}\right]^{-1/2}$$

2.3.3. Variable Normal n-dimensional

La distribución normal n-dimensional *Nn* (μ,$\sum$) es una generalización de la distribución normal unidimensional a dimensiones superiores, es decir se trata de un conjunto de variables normales correlacionadas.

En la práctica se emplea para modelar conjuntos de datos de más de una dimensión por ser de fácil manejo, y viene definida como:

$$f(x_1,x_2,\ldots x_n)=\frac{\sqrt{|\sigma^{ij}|}}{(2\pi)^{n/2}}e^{-Q(x_1,x_2,\ldots,x_n)/2},$$

$$Q(x_1,x_2,\ldots x_n)=\sum_{i,j=1}^{n}\sigma^{ij}(x_i-\mu_i)(x_j-\mu_j)$$

La matriz $\mu = \mu_i$ es la matriz columna de medias, y $\sigma_{ij} = \sum$ la es la inversa de varianzas-covarianzas σ^{ij}, matriz simétrica definida positiva en la que contiene las varianzas de cada variable en la diagonal y las covarianzas entre variables en el resto.

MEDIA:

$$\mu = E\begin{pmatrix}X_1\\ \cdot\\ \cdot\\ X_n\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}E(X_1)\\ \cdot\\ \cdot\\ E(X_n)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\mu_1\\ \cdot\\ \cdot\\ \mu_n\end{pmatrix}$$

VARIANZA:

$$\sum=\begin{pmatrix}\sigma_{11} & \sigma_{11} & \ldots & \sigma_{1n}\\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \ldots & \sigma_{2n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \ldots & \sigma_{nn}\end{pmatrix};\quad \sigma_{jj}=Var(X_j)$$

Ejemplo gráfico

En la se muestra una representación de funciones de densidad de Longuet-Higgins con las variables x_1 y x_2.

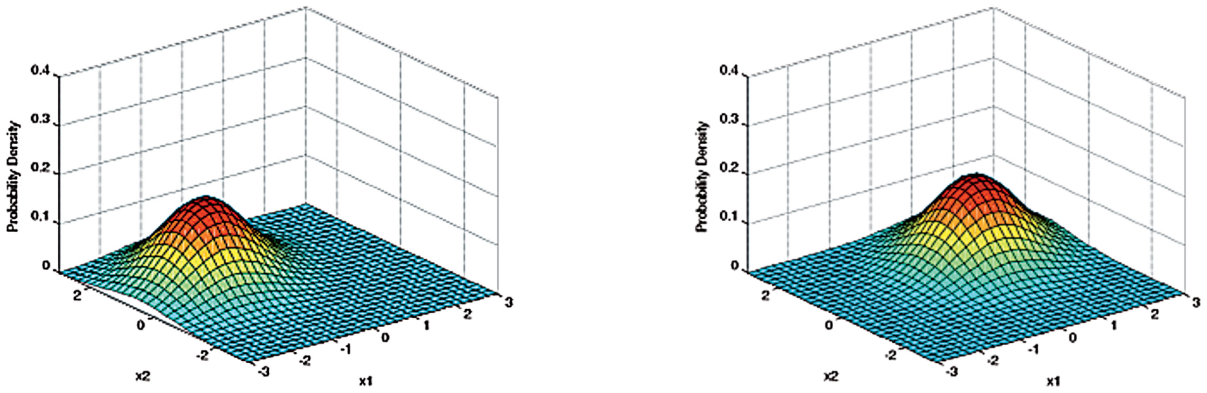


FIGURA 38. Funciones de densidad manteniendo la matriz de varianzas-covarianzas y cambiando la de medias de (-1,1) a (1,1)

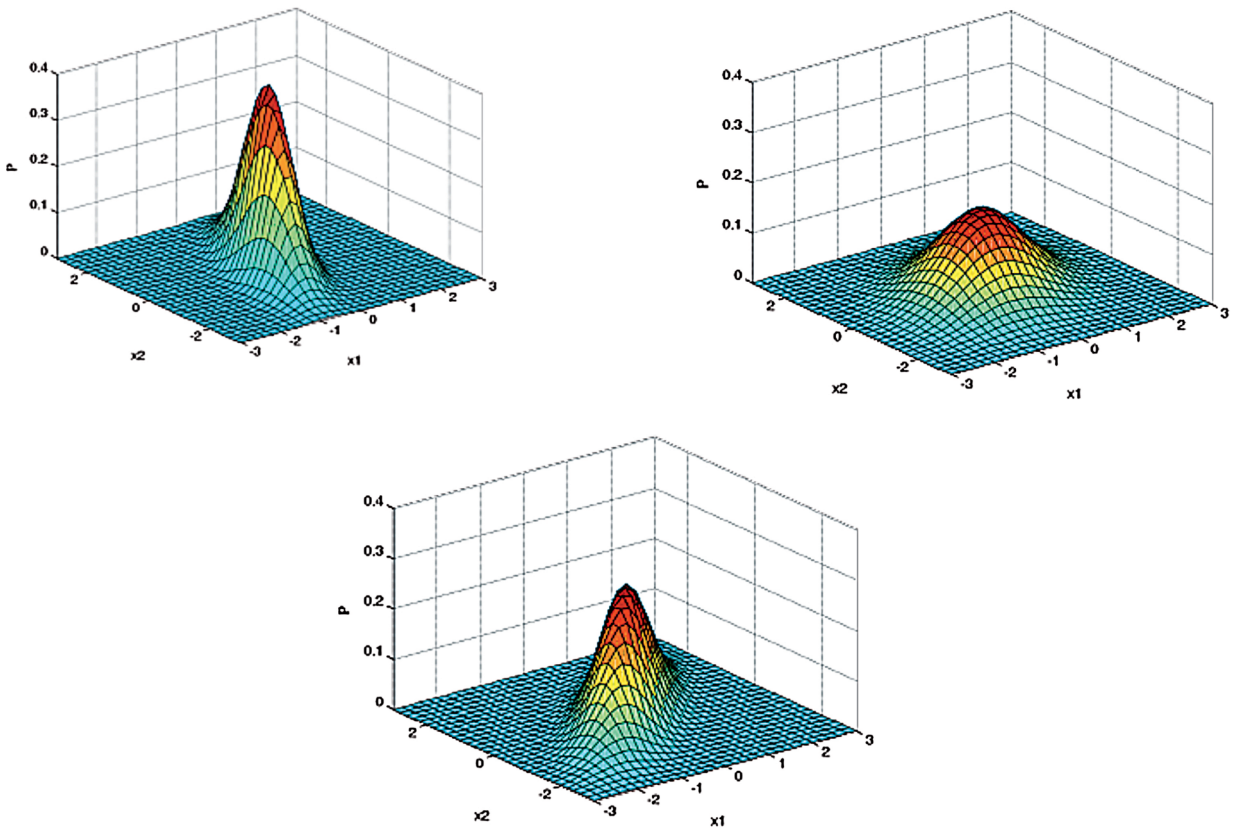


FIGURA 39. Funciones de densidad manteniendo la matriz de de medias a (0,0) y cambiando la de varianzas-covarianzas de (0.25 ,0 .3 ; 0.3, 1) a (1 ,0 .3; 0.3, 1) y (1 ,0 .8 ; 0.8, 1)

3. Datos observados y modelos probabilísticos: estimación de parámetros

A través de la muestra (datos) se pueden estimar los parámetros de la distribución con que se vaya a trabajar, y así se puede comprobar si se ajustan correctamente a ella.

3.1. PROCEDIMIENTO GENERAL

1. Se ordenan los datos de menor a mayor.

2. Se asignan probabilidades asociadas a cada valor mediante una técnica de punteo:

Fórmula de punteo	Autor
$\frac{i}{n+1}$	Weinbull-Gumbel
$\frac{i-3/8}{n+1/4}$	Blom
$\frac{i-1/2}{n}$	Hazen
$\frac{i-0.44}{n+0.12}$	Grigorten
$\frac{i-0.3}{n+0.4}$	Johnson Bernard

TABLA 17. Fórmulas de punteo propuestas por diversos autores

NOTA: Estos dos primeros pasos sólo son necesarios para el método de mínimos cuadrados

3. Se propone una familia de distribuciones.

4. Se estiman los parámetros de la muestra para la familia seleccionada:

   - Método de los momentos.
   - Método de la máxima verosimilitud.
   - Método de los mínimos cuadrados.
   - Papel probabilístico (método gráfico que se apoya en los mínimos cuadrados).

El papel probabilístico es uno de los métodos gráficos más utilizados para la interpretación y comprensión de una serie de datos. Se basa en la modificación de las escalas del dibujo de la variable aleatoria y de la probabilidad, de forma que una familia de distribuciones biparamétricas se transforme en una recta.

Es interesante que los datos se aproximen a una recta en toda su longitud, cosa que no sucede en todos los casos porque las zonas de máximos y de mínimos, que suelen presentar particularidades como previamente se ha comentado. Las figuras que se muestran en la página siguiente ilustran estas particularidades.

Al observar la representación, se ve cómo claramente los datos se ajustan mejor a la Normal que al resto de funciones. Esto significa que la función normal representa mejor que el resto el comportamiento de los datos de que se dispone.

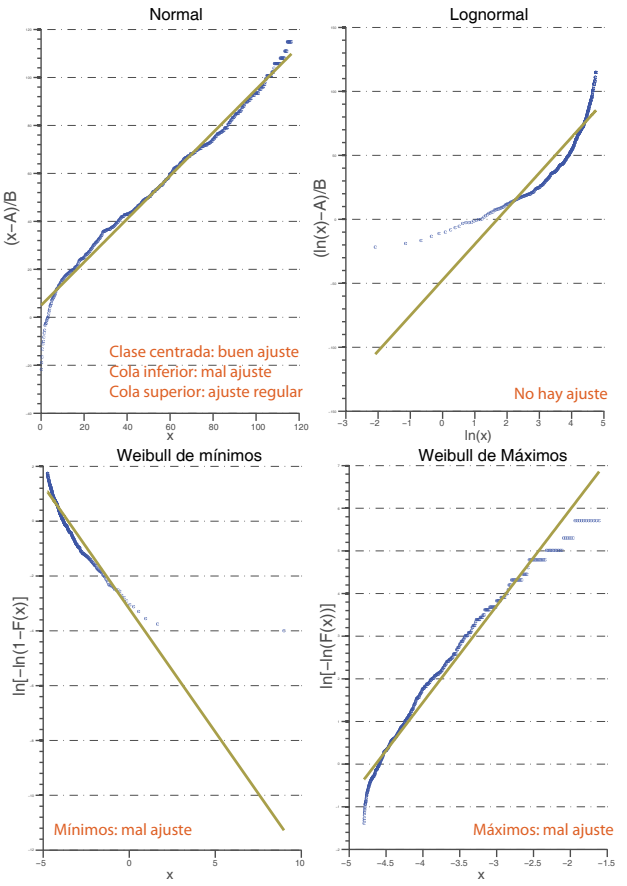


FIGURA 40. Ajuste de los datos pertenecientes a un registro de oleaje en laboratorio con las funciones de mejor ajuste. Espectro JONSWAP de Hs=8 cm, γ=3 y Tp=1.5 s

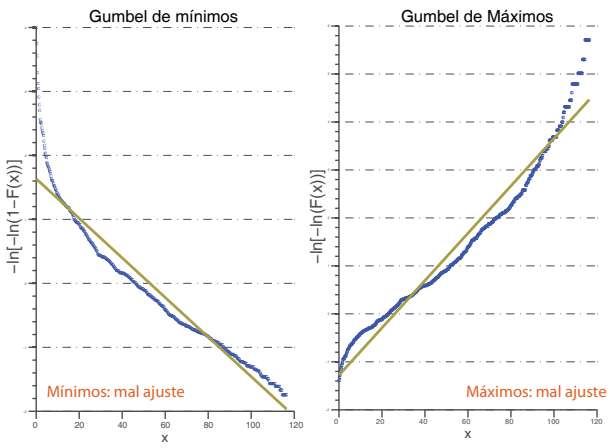


FIGURA 40 (Cont). Ajuste de los datos pertenecientes a un registro de oleaje en laboratorio con las funciones de mejor ajuste. Espectro JONSWAP de Hs=8 cm, γ=3 y Tp=1.5 s

3.2. FUNCIONES MÁS EMPLEADAS

3.2.1. Normal

$$y(x) = F(x;\mu,\sigma) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$$

$$h(y) = \Phi^{-1}(y)$$
$$g(x) = x$$

$$h(y) = \frac{1}{\sigma}g(x) - \frac{\mu}{\sigma}$$
$$g(x) = \mu + \sigma \cdot h(y)$$

3.2.2. Lognormal

$$y(x) = F(x;\mu,\sigma) = \Phi\left(\frac{\ln x-\mu}{\sigma}\right), \quad x \geq 0$$

$$h(y) = \Phi^{-1}(y)$$
$$g(x) = \ln x$$

$$h(y) = \frac{1}{\sigma}g(x) - \frac{\mu}{\sigma}$$
$$g(x) = \mu + \sigma \cdot h(y)$$

3.2.3. Weibull de máximos

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\lambda-x}{\delta}\right)^{\beta}\right] \quad x < \lambda$$

$$h(y) = -\ln\left[-\ln(y)\right]$$
$$g(x) = -\ln(\lambda - x)$$

$$h(y) = \beta g(x) + \beta \ln\delta$$
$$g(x) = \frac{1}{\beta}h(y) - \ln\delta$$

3.2.4. Weibull de mínimos

$$y(x) = F(x;\lambda,\delta,\beta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)^{\beta}\right] \quad x > \lambda$$

$$h(y) = \ln\left[-\ln(1-y)\right]$$
$$g(x) = \ln(x - \lambda)$$

$$h(y) = \beta g(x) - \beta \ln\delta$$
$$g(x) = \frac{1}{\beta}h(y) + \ln\delta$$

La distribución Weibull biparamétrica es un caso particular de ésta en la que el parámetro de localización es cero (λ=0).

Igualmente, la distribución de Rayleigh (usada para caracterizar a la altura de ola en un estado de mar) es otro caso particular en que el parámetro de localización es cero (λ=0) y el de forma, 2 (β=2).

3.2.5. Gumbel de máximos

$$y(x) = F(x;\lambda,\delta) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right\}$$

$$h(y) = -\ln\left[-\ln(y)\right]$$
$$g(x) = x$$

$$h(y) = \frac{1}{\delta}g(x) - \frac{\lambda}{\delta}$$
$$g(x) = \lambda + \delta \cdot h(y)$$

3.2.6. Gumbel de mínimos

$$y(x) = F(x;\lambda,\delta) = 1 - \exp\left\{-\exp\left(-\frac{\lambda-x}{\delta}\right)\right\}$$

$$h(y) = \ln\left[-\ln(1-y)\right]$$
$$g(x) = x$$

$$h(y) = \frac{1}{\delta}g(x) - \frac{\lambda}{\delta}$$
$$g(x) = \delta \cdot h(y) + \lambda$$

3.2.7. Frechet de máximos

$$y(x) = F(x;\lambda,\delta) = \exp\left\{-\left(\frac{\delta}{x-\lambda}\right)^{\beta}\right\} \quad x > \lambda$$

$$h(y) = -\ln\left[-\ln(y)\right]$$
$$g(x) = \ln(x - \lambda)$$

$$h(y) = \beta g(x) - \beta \ln\delta$$
$$g(x) = \frac{1}{\beta}h(y) + \ln\delta$$

3.2.8. Frechet de mínimos

$$y(x) = F(x;\lambda,\delta) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\delta}{\lambda - x}\right)^{\beta}\right\} \quad x < \lambda$$

$$h(y) = \ln\left[-\ln(1-y)\right]$$
$$g(x) = -\ln(\lambda - x)$$

$$h(y) = \beta g(x) + \beta \ln \delta$$
$$g(x) = \frac{1}{\beta} h(y) - \ln \delta$$

Donde:

- x es la variable a analizar.
- $y(x)$ es la variable transformada por las funciones de mejor ajuste.

Una vez identificada la función a través de la cual los datos se ajustan bien a una línea recta, se tienen identificadas las funciones de densidad y de distribución asociadas, ya definidas en el apartado anterior.

3.3. EJEMPLOS

3.3.1. Normal

Se dispone de una serie de marea compuesta por 38989 datos, donde se ha supuesto que en el intervalo de una hora la marea está representada por el valor medio registrado en dicha hora. Por este motivo en la representación de los datos se ve que presentan una forma escalonada. Esta serie oscila en el rango de –0,15 m a +0,15 m.

Si se calculan los estadísticos básicos de la muestra se obtiene que:

- Media: -0.0002070238 m.
- Desviación típica: 0.103871394.
- Varianza: 0.010789267.

En la siguiente gráfica se muestran los datos de que se dispone y el ajuste realizado mediante la función Normal.

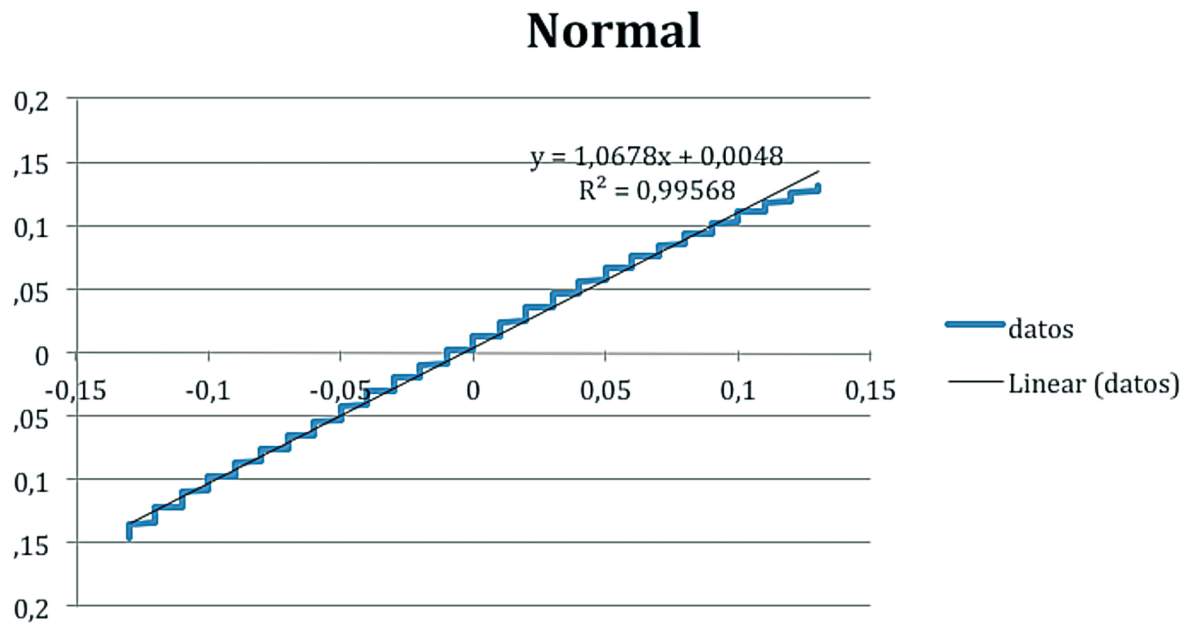


FIGURA 41. Ajuste de datos de marea mediante una función Normal

3.3.2. Lognormal

Se dispone de una serie de altura de ola significante *Hs* compuesta por 46091 datos que oscila en el rango de 0,01 m a 0,8 m.

En la siguiente gráfica se muestran los datos de que se dispone y el ajuste realizado mediante la función Lognormal.

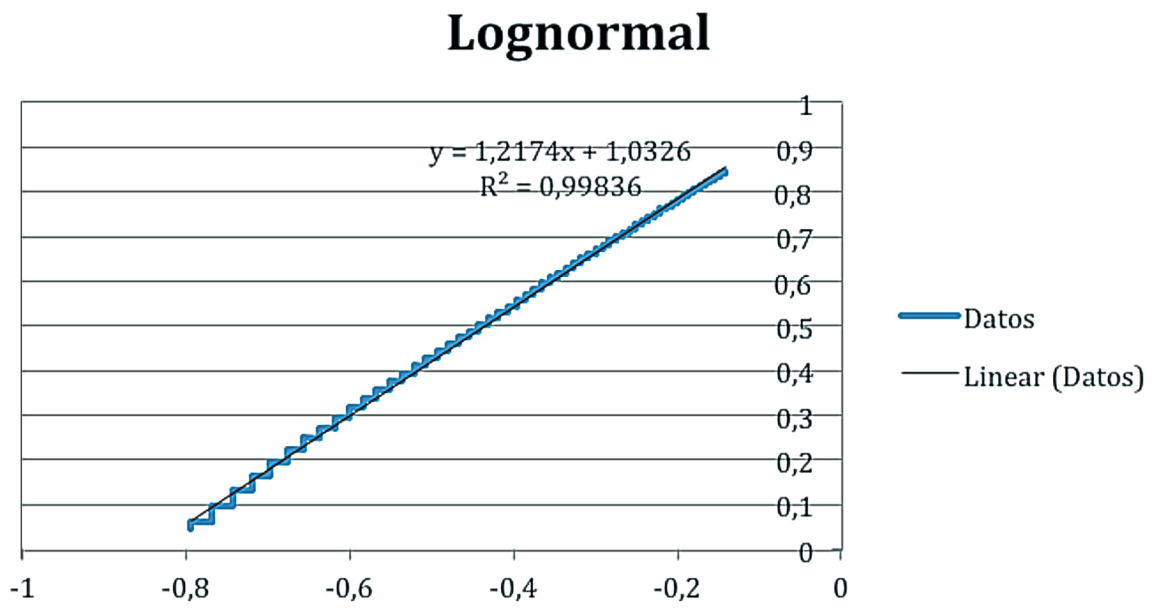


Figura 42. Ajuste de datos de altura de ola significante mediante una función lognormal

3.3.3. Gumbel de máximos

Se dispone de una serie de valores de altura de ola máxima, compuesta por 55 datos. Esta serie se ajusta mediante una función Gumbel de Máximos, con lo que se obtiene lo siguiente:

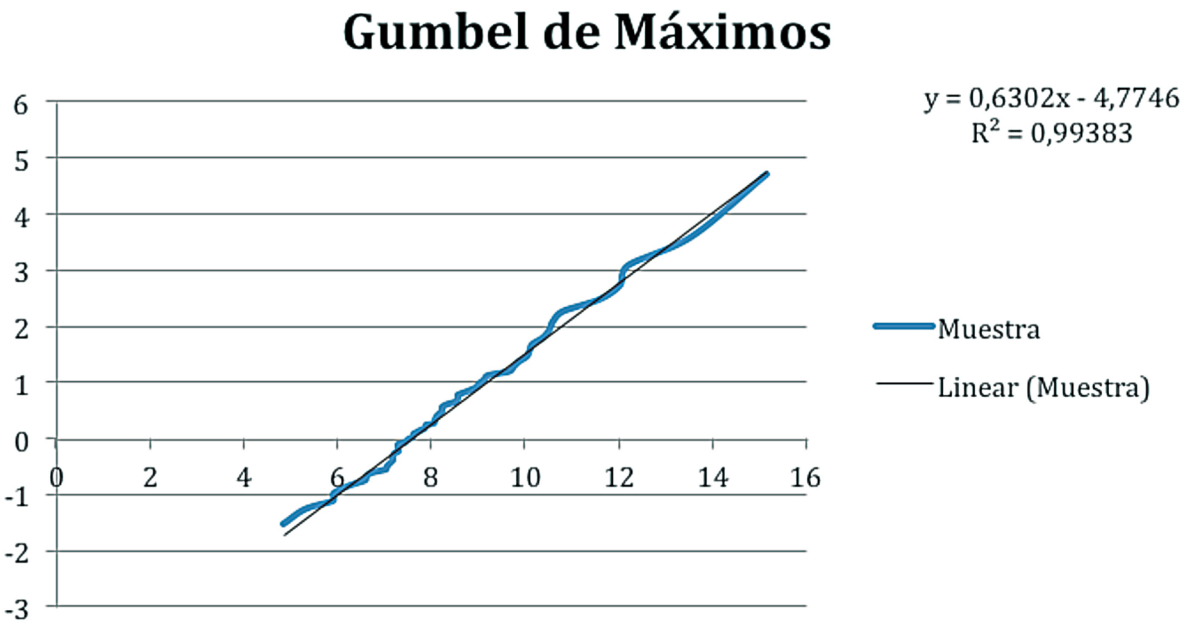


Figura 43. Ajuste de una serie de altura de ola máxima mediante una función Gumbel de Máximos

4. Parámetros espectrales

4.1. MOMENTOS ESPECTRALES

Los momentos espectrales m_i de orden *i*, se definen como:

$$m_i = \int_0^\infty f^i S(f) df$$

Donde:

- *f* es la frecuencia y *S*(*f*) es la función de densidad espectral.
- m_0 representa la energía total del registro de oleaje, pues constituye el área que encierra el espectro.

4.2. ANCHURA ESPECTRAL

El parámetro épsilon (ε) es una medida del ancho espectral definido a partir de los momentos de los espectros de frecuencia. Los parámetros de anchura espectral los podemos definir de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}\right]^{1/2}$$

$$v = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1\right]^{1/2}$$

El parámetro de amplitud espectral ε fue introducido por Cartwright y Longuet-Higgins (1956) en sus derivaciones teóricas de la distribución estadística de los máximos de la función aleatoria.

El parámetro de anchura espectral *v* fue definido por (Longuet-Higgins, 1983) para los análisis estadísticos de una superficie móvil, aleatoria.

Ambos parámetros, ε y *v*, están valorados entre 0 y 1, y sirven como índice de la anchura o estrechez del espectro: se dice que el espectro es estrecho cuando los valores de estos parámetros son muy pequeños.

EJEMPLO ANCHURA ESPECTRAL

Existen dos tipos principales de oleaje: el SEA (o mar de viento) y el SWELL (o mar de fondo). El primero de ellos es un oleaje generado en alta mar, donde raramente se pueden apreciar las crestas de cierta longitud y es difícil observar un periodo bien definido, ya que se caracteriza por una gran irregularidad. El oleaje SWELL, en cambio, es el propagado desde la zona de generación, observándose especialmente bien en profundidades reducidas, y se caracteriza por un oleaje más regular con una dirección, periodo y longitud de onda definidos.

Aislando cada tipo de oleaje y transformándolo del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, se obtendría que el oleaje tipo SWELL, que presenta condiciones de oleaje regular, se define por un oleaje de banda estrecha, debido a lo cual los valores de son cercanos a 0. En la naturaleza, el SWELL presenta valores $\varepsilon \approx 0{,}4 \sim 0{,}5$.

Por otro lado, el oleaje tipo SEA es muy irregular, de banda ancha y en la naturaleza presenta valores $\varepsilon \approx 0{,}8$. Es de esperar que los oleajes SWELL se caractericen por un periodo pico (inverso de la frecuencia pico) más alto que los periodos típicos del oleaje SEA. En tal caso se debería esperar que cuanto más grande sea el periodo, menor sea el valor de ε.

Se puede concluir que ε y v permiten identificar el tipo de oleaje que se da en una determinada zona: SEA, SWELL o una combinación de ambos.

4.3. FACTOR DE APUNTAMIENTO

El factor de apuntamiento presentado por Goda (1970) es un parámetro que representa lo apuntada que puede ser la forma del espectro (similar a la kurtosis estadística):

$$Q_P = \frac{2}{m_0^2} \int_0^\infty f\, S^2(f) df$$

Q_p aumenta cuanto más estrecho (apuntado) es el espectro, luego si la anchura espectral aumenta, Q_p disminuye y viceversa.

4.4. DISPERSIÓN DIRECCIONAL

Las expresiones de los espectros estándar son funciones que sólo dependen de la frecuencia, refiriéndose por tanto a oleajes unidireccionales. Cuando se quiere hacer uso de espectros tridimensionales, se han de aplicar funciones de direccionalidad con lo que se obtendrán espectros tridimensionales simplificados de energía.

$$S(\omega,\theta) = S(\omega) - D(\theta;\, \omega, p1, p2,...)$$

Donde D(θ; ω, *p*1, *p*2,...) es la función de dispersión direccional y p_i son los parámetros relacionados con el tipo de función de dispersión propuesto.

Algunas funciones de dispersión direccional son las siguientes:

- Potencias del coseno (Pierson, 1955):

$$D(\theta) = \frac{2}{\pi} cos^2\theta \qquad , \qquad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

Esta función de dispersión no se ajusta a la realidad porque produce la misma dispersión direccional para todas las frecuencias.

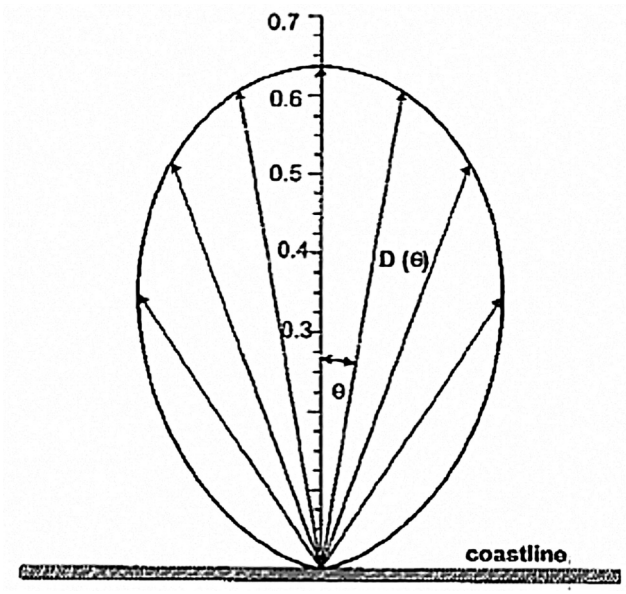


FIGURA 44. Función de dispersión direccional tipo coseno de Pierson (1955). figura tomada de Massel (1996)

- (Longuet-Higgins y Stewart, 1961)

$$D(\theta, s) = \frac{2^{2s-1}\Gamma^2(s+1)}{\pi\Gamma(2s+1)} cos^{2s}\left(\frac{\theta - \theta_0}{2}\right), \quad -\pi \leq \theta \leq \pi$$

Donde θ_0 es la dirección principal de propagación de la frecuencia pico, s es una función empírica (Hasselmann, Dunckel y Ewing, 1980) y Γ la función gamma.

$$s = s_p \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{\mu}$$

Para valores de frecuencia menores que la frecuencia pico ($\omega < \omega_p$)

$$s_p = 6.97 \pm 0.83$$

$$\mu = 4.06 \pm 0.22$$

Para valores de frecuencia mayores que la frecuencia pico ($\omega < \omega_p$)

$$s_p = 9.77 \pm 0.43$$

$$\mu = -(2.33 \pm 0.06) - (1.45 \pm 0.45)\left[\frac{U}{c(\omega)} - 1.17\right]$$

Donde $c(\omega)$ es la velocidad de fase de la frecuencia y $U=U_{19.5}$ es la velocidad media del viento medida o calculada a una altura de 19,5 metros. Estás fórmulas sólo son válidas para valores comprendidos entre $1 \leq U/c \leq 1{,}5$.

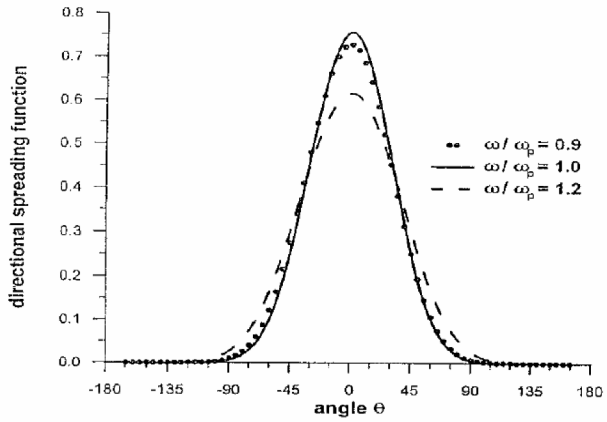


FIGURA 45. Cortes de la función de dispersión direccional de Longuet-Higgins por tres diferentes frecuencias. para valores de $\Omega < \Omega_p$, la dispersión direccional está determinada solamente por la relación ω/p. para valores $\Omega > \Omega_p$ la dispersión direccional depende también de la relación U/c entre la velocidad del viento y la de fase (edad del oleaje)

- (Mitsuyasu, Suhaya, Mizuno, Okhuso, Honda y Rikiishi, 1975)

$$D(f, \alpha) = G_0 cos^2\frac{\alpha}{2} \quad , \quad donde$$

$$G_0 = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)}$$

$$s = s_{max}(f/f_p)^5 \quad , para\ f \leq f_p$$

$$s = s_{max}(f/f_p)^{-2.5} \quad , para\ f \geq f_p$$

Los valores de s_{max} son:

- Para oleaje en zona de generación = 10
- Para oleaje SWELL peraltado = 25
- Para oleaje SWELL poco peraltado = 75

- Modelo hiperbólico: (Donelan, Hamilton y Hui, 1985) y (Banner, 1990)

$$D(\theta, \omega) = \frac{1}{2}\beta \cosh^{-2}[\beta(\theta - \theta_0)]$$

En función de los valores de frecuencia se obtendrán diferentes valores de β, siempre que se cumpla $1 \leq U/c \leq 4$.

$$\beta = 2.61(\omega/\omega_P)^{1.3} \qquad para\ 0.56 < \omega/\omega_P < 0.95$$

$$\beta = 2.28(\omega/\omega_P)^{-1.3} \qquad para\ 0.95 < \omega/\omega_P < 1.6$$

$$\beta = 10^{y} \qquad \omega/\omega_P > 1.6$$

Donde $y = -0{,}4 + 0{,}8393e^{-0{,}567\log e(\omega/\omega p)2}$

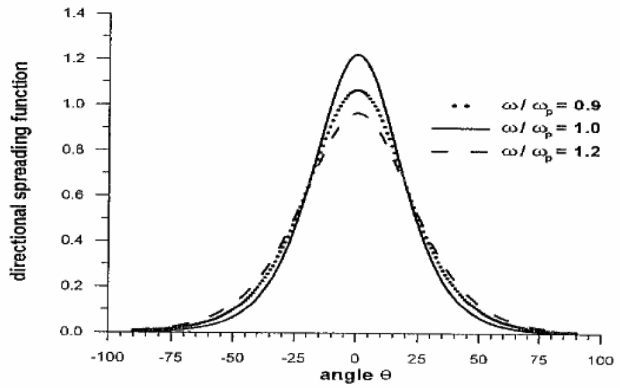


FIGURA 46. Función de dispersión direccional hiperbólica de Donelan, Hamilton y Hui (1985)

4.5. MODAS DEL ESPECTRO

En algunas costas españolas es frecuente que se presenten simultáneamente dos estados de oleaje: SEA y SWELL. En estos casos, el espectro frecuencial se puede representar por la superposición de los dos espectros frecuenciales,

$$S_w^*(f,\theta) = S_{w,SEA}(f,\theta) + S_{w,SWELL}(f,\theta)$$

Este tipo de espectros se conocen como bimodales. Además del caso de los espectros SEA y SWELL, hay otras situaciones en las que el espectro puede tener más de dos picos, como cuando el oleaje procede de varias direcciones o cuando se genera en zonas con efectos de configuración de fetch. En ausencia de información instrumental, se puede estimar el espectro de la oscilación total, bien superponiendo linealmente la energía en cada frecuencia y dirección de cada una de las fuentes generadoras, bien adoptando el espectro bimodal paramétrico de Ochi y Hubble (1976).

Ochi y Hubble revisaron y ampliaron la fuente de datos espectrales que sirvió para formular el espectro de Pierson-Moskowitz e incluyeron los oleajes bimodales y parcialmente desarrollados. A partir de esa base de datos formularon un espectro bimodal, con energía en bandas de baja y alta frecuencia, de seis parámetros (si bien todos ellos dependen, finalmente, de un único parámetro: la altura de ola significante).

5. Funciones de densidad espectral más comunes

5.1. INTRODUCCIÓN

Al igual que se analiza la serie temporal en el dominio del tiempo, es decir, sin modificar las unidades de medida del tiempo (se mantienen en segundos), se puede trabajar en otras unidades: los hertzios. El par (altura de ola, periodo) se transforma en (altura de ola, frecuencia). Si se repite el proceso de clasificación de las alturas de ola según su frecuencia se obtiene el llamado "espectro", que es una representación de la altura de ola que le corresponde a cada frecuencia.

Un espectro es una expresión que determina la energía media por unidad de superficie contenida en cada una de las infinitas ondas monocromáticas de frecuencia diferenciada de las componentes del oleaje. Cuando la distribución energética se expresa como función únicamente de la frecuencia, independientemente de la dirección de propagación, se denomina Espectro Unidimensional o Escalar. Es utilizado como modelo de descripción del estado de mar (Puertos del Estado, 1991).

Los espectros de oleaje presentan características similares que pueden ser relacionados con parámetros físicos como la velocidad y persistencia del viento, el fetch y la profundidad en la que se propaga el oleaje. La forma del espectro no es arbitraria, dado que existen propiedades físicas del oleaje que están representados en él.

La energía que aporta el viento a la superficie del mar no puede ser infinita, dado que el crecimiento del oleaje está limitado por la disipación de energía, en procesos como la rotura del oleaje en profundidades reducidas o la formación de espuma en aguas profundas, y por las interacciones de oleaje, donde se transfiere energía de unas frecuencias a otras. Por lo tanto, existe un límite superior para la densidad de la energía espectral conocido como estado de saturación, donde se produce un balance entre la energía suministrada por el viento y las pérdidas por disipación. Dicho estado debe ser exclusivamente descrito por parámetros físicos locales tales como la aceleración de la gravedad, la velocidad del viento sobre la superficie libre, la dimensión del fetch y la frecuencia local.

La densidad espectral de energía describe cómo la energía (o la variación) de una señal o una serie temporal se distribuye en frecuencia.

Si el número de los valores definidos es finita, la secuencia no tiene densidad de energía de por sí, pero la secuencia puede ser tratada como periódica, empleando la transformada discreta de Fourier para construir un espectro discreto, o puede extenderse con ceros y la densidad espectral se puede computar como el caso de la secuencia infinita.

Las definiciones anteriores de la densidad espectral de energía requiere que existan las transformadas de Fourier de la señal, es decir, que las señales sean integrables o sumables. Una alternativa frecuentemente más útil es la densidad espectral de potencia, que describe cómo la potencia de una señal o de una serie temporal se distribuye en frecuencia. En este caso la potencia puede ser física, o más frecuentemente, puede ser definida como el valor cuadrado de la señal, la potencia disipada en una carga si la señal fuese una tensión aplicada a ella.

El espectro de energía está compuesto generalmente por un máximo de energía para una determinada frecuencia pico. El decrecimiento de esta energía máxima hacia frecuencias menores suele ser más pronunciado que el que se produce en la banda de frecuencias mayores. Normalmente se observa una regularidad en la forma del espectro. Por ejemplo, para el caso de oleajes totalmente desarrollados, la banda inferior a la frecuencia de pico suele ser proporcional a f^{-4}, mientras que la rama superior suele estar asociada a f^{-5}.

Por tener un orden de magnitud, la menor frecuencia teórica para ondas de gravedad inducidas por viento es de 0,03 Hz. Valores menores corresponderían a surf beat, seiches o mareas. La mayor frecuencia teórica es de 13,6 Hz, de manera que frecuencias mayores serían consideradas ondas capilares, donde la fuerza restauradora predominante es la tensión superficial. En la práctica, no obstante, se considera una banda de frecuencia menor para las ondas gravitatorias generadas por viento.

Fuentes de consulta recomendadas:

- (Le Méhauté & Hanes, 1990).
- (Massel, Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction, 1996).

http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_density
http://en.wikipedia.org/wiki/Frequency_spectrum

5.2. EL MODELO DE PHILIPS

Philips (Philips, 1958) observó el estado de saturación descrito anteriormente al estudiar la variación de la energía del oleaje en función de la velocidad del viento y determinó que el espectro puede ser definido a partir de la frecuencia, la gravedad, la velocidad del viento y el fetch. Teniendo en cuenta el efecto de saturación en el espectro formuló la siguiente expresión en 1958, dependiente velocidad del viento y del fetch:

$$S_p(f) = \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4}$$

Donde:

- g es la aceleración de la gravedad.
- f es la frecuencia local.
- α depende del fetch y del viento.

Es importante remarcar que se trata de un modelo simplificado, pero que ha sido la piedra angular para desarrollos posteriores en la predicción del oleaje a través de información meteorológica, gracias a que aporta la forma del espectro de energía para frecuencias altas. De hecho es uno de los factores del espectro JONSWAP, de uso muy extendido, que será desarrollado más adelante junto con la expresión para el cálculo de α.

5.3. ESPECTROS

Los espectros que se recogen en el presente documento se enumeran a continuación:

→ Espectro de Neumann
→ Espectro de Bretschneider – Mitsuyasu
→ Espectro de Kitaigorodskii – Toba
→ Pierson - Moskowitz
→ ISSC
→ Krylov
→ ITTC
→ Jonswap
→ Davidian *et al*
→ Wallops
→ Ochi – Hubble
→ TMA

5.3.1. Espectro de Neumann

En 1953, Neumann (Neumann, 1953) desarrolló un modelo espectral analítico a partir de datos visuales de oleaje tomados desde barco en las costas de New Jersey, que fue el primero en ser usado para el diseño en ingeniería. Hizo depender su modelo únicamente de la velocidad del viento medida a diez metros sobre el nivel del mar (U_{10}) de la siguiente forma:

$$S_N(f) = 1.466\, H_{m0}^2 \frac{f_P^5}{f^6} \exp\left[-3\left(\frac{f}{f_P}\right)^{-2}\right]$$

Donde:

H_{m0} es la altura de ola del momento de orden cero, que es aproximadamente igual a la altura de ola significante, $H_S \approx H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$.

f_p es la frecuencia de pico espectral, que puede ser obtenida con la siguiente expresión:

$$f_P = \sqrt{\frac{1}{6}}\frac{g}{\pi U_{10}}$$

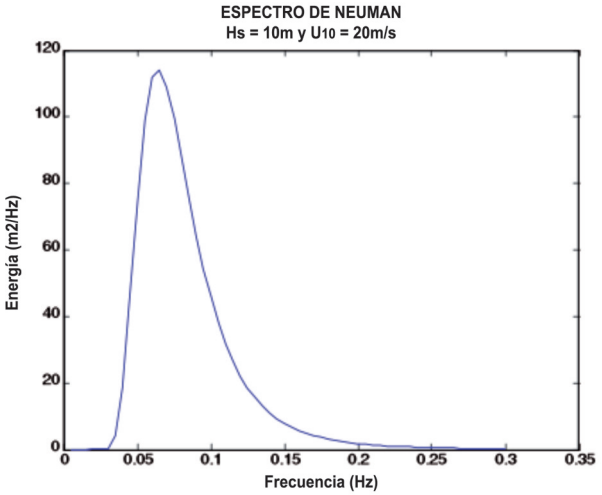


FIGURA 47. Forma del espectro de Neumann para Hs = 10 m y U10 = 20 m/s

5.3.2. Espectro de Bretschneider-Mitsuyasu

En 1959, Bretschneider (Bretschneider, 1959) desarrolló un modelo espectral asumiendo un espectro de banda estrecha y una distribución tipo Rayleigh de las alturas y periodos de olas individuales:

$$S_B(f) = 0.1687\, H_S^2 \frac{f_S^4}{f^5} \exp\left[-0.675\left(\frac{f_S}{f}\right)^4\right]$$

Donde:

$f_S = 1/T_S$, siendo T_s el periodo de la altura de ola significante.

(Silva, 2002) indica que de esta expresión es posible deducir que el periodo de pico espectral es $T_p \approx 1{,}057 T_S$.

Goda sin embargo sostiene que Mitsuyasu (coautor de la formulación) propuso establecer la relación $T_p \approx 1{,}05 T_S$, aunque a partir de medidas posteriores se consideró como una mejor aproximación.

Este modelo se realizó para oleaje totalmente desarrollado (OTD). Sin embargo, también puede aplicarse para estados de mar parcialmente desarrollados a través de ecuaciones empíricas, propuestas por el propio Bretschneider, que relacionan altura de ola, periodo de pico y velocidad del viento.

PARA ESTADOS DE MAR COMPLETAMENTE DESARROLLADOS:

$$\frac{gH_S}{U_W^2} = 0.282; \quad \frac{gT_S}{U_W} = 6.776$$

PARA ESTADOS DE MAR PARCIALMENTE DESARROLLADOS:

$$\frac{gH_S}{U_W^2} = 0.254\ (al\ 90\%); \quad \frac{gH_S}{U_W^2} = 0.226\ (al\ 80\%);$$

$$\frac{gT_S}{U_W} = 4.764$$

Para ilustrar el uso de las expresiones anteriores se plantea el siguiente ejemplo.

PLANTEAMIENTO:

Obtener los espectros de energía para un oleaje totalmente y parcialmente desarrollado sabiendo que la velocidad del viento es U_W=20 m/s:

RESPUESTA:

Para un oleaje totalmente desarrollado:

$$H_S = \frac{0.282U_W^2}{g} = 11.50\,m$$

$$T_S = \frac{6.776\,U_W}{g} = 13.81\,s$$

Para un oleaje parcialmente desarrollado:

$$H_S(90\%) = \frac{0.254U_W^2}{g} = 10.36\,m$$

$$H_S(80\%) = \frac{0.226U_W^2}{g} = 9.22\,m$$

$$T_S = \frac{4.764\,U_W}{g} = 9.71\,s$$

Aplicando ahora la ecuación de $S_B(f)$ para cada uno de los casos se obtienen los espectros de energía que aparecen representados a continuación:

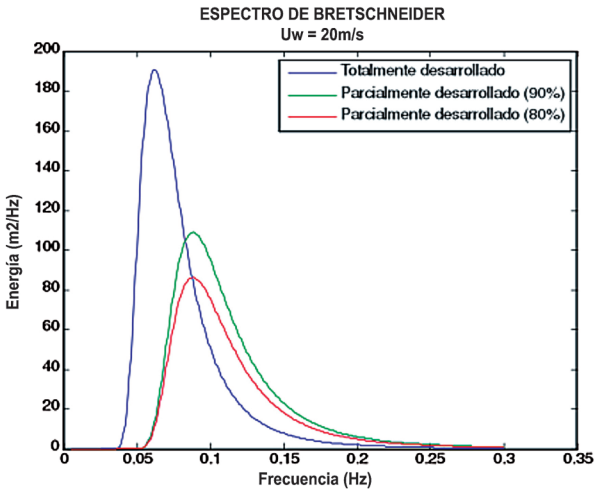


FIGURA 48. Espectros de Bretschneider generados por la misma velocidad de viento para distintos estados del oleaje

La principal aplicación de este espectro son los oleajes generados por tormentas y huracanes tropicales.

(Goda, Random seas and design of maritime structures, 2010) y otros proponen la siguiente expresión para el espectro de Bretschneider-Mitsuyasu, aplicable para oleaje totalmente desarrollado:

$$S_{BM}(f) = 0.257\,H_S^2\,T_S^{-4}\,f^{-5}\exp\left[-1.03\left(T_S f\right)^{-4}\right]$$

Esta expresión supone un cambio importante con respecto a la anterior: en este caso la formulación es aplicable directamente para ajustar datos de oleaje, mientras que en el caso anterior servía como modelo de predicción de oleaje a partir de datos de viento.

Por su parte, Goda propone una pequeña modificación del espectro anterior y lo denomina espectro Bretschneider-Mitsuyasu modificado:

$$S_{BM\ MODIFICADO}(f) = 0.205\,H_S^2\,T_S^{-4}\,f^{-5}\exp\left[-0.75\left(T_S f\right)^{-4}\right]$$

que curiosamente coincide con la expresión de $S_B(f)$ si fuera f_p en vez de f_s y tomando T_p=1.05 T_s.

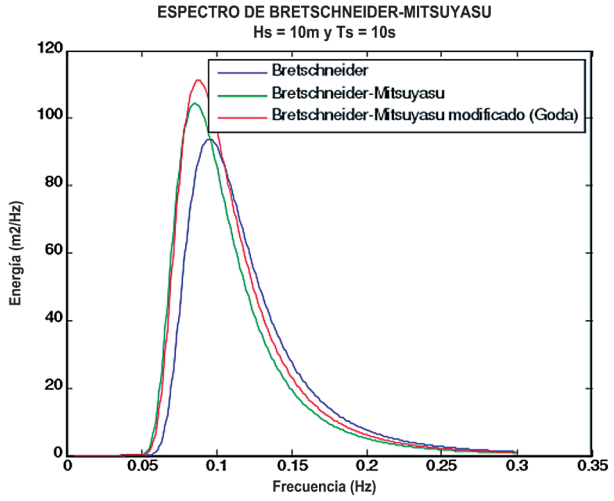


FIGURA 49. Espectro de Bretschneider - Mitsuyasu

5.3.3. Espectro de Kitaigorodskii-Toba

En 1961 Kitaigorodskii (Kitaigorodskii, 1961) presentó un modelo espectral dependiente de la velocidad cortante del viento y del fetch:

$$S(f) = \left(\frac{g^2}{f^5}\right)F\left(\tilde{f},\bar{x}\right)$$

donde:

$$\bar{f} = \frac{f\,u_*}{g}\ ;\ \bar{x} = \frac{g\,x}{u_*^2}$$

u_* = velocidad de fricción del viento (cortante)

x = fetch

En 1973 Toba (Toba, 1973), de forma empírica a través de un túnel de viento, encontró que la mejor aproximación al modelo de Kitaigorodskii, era la siguiente función espectral:

$$S_{KT}(f) = \beta u_*\, g\, f^{-4}$$
$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho_a}$$

Donde:

- ρ_0 es la densidad del aire
- τ_0 es la fricción tangencial del viento.
- A partir de datos de laboratorio se determinó que β=0,02.

Por otro lado, (Wu, 1969) obtuvo la velocidad cortante como una función de la velocidad del viento a diez metros de altura (U_{10}):

$$u_* = \sqrt{C_{10}} U_{10}$$

donde C_{10} es el coeficiente de superficie de arrastre y puede ser calculado a partir de la velocidad de viento a diez metros de altura (en m/s):

$$C_{10} = \left(0.8 + 0.065\ U_{10}\right) \times 10^{-3}$$

La evaluación del viento a cualquier altura puede hacerse a través de la siguiente expresión:

$$U_z = U_{10} + u_* \ln\left(\frac{z}{10}\right)$$

EJEMPLO

PROPUESTA

Calcular el espectro de oleaje asumiendo que se tiene una velocidad de viento sostenido de 20.6121 m/s a 19,5 m de altura.

PROPUESTA

El primer paso es el estimar el valor de u^* a partir de las expresiones anteriores. El valor de U_{10} no se encuentra de forma explícita, por lo que se ha optado por aplicar iterativamente la técnica de las aproximaciones sucesivas, obteniendo el siguiente valor:

$$U_{19.5} = U_{10} + u_* \ln\left(\frac{19.5}{10}\right) = U_{10} + \sqrt{C_{10}}\, U_{10} \ln\left(\frac{19.5}{10}\right) =$$

$$= U_{10} + \sqrt{\left(0.8 + 0.065\, U_{10}\right) \times 10^{-3}}\, U_{10} \ln\left(\frac{19.5}{10}\right)$$

$$U_{19.5} = 20.6121\, m/s \rightarrow U_{10} = 20\, m/s$$

5.3.4. Espectro de Pierson-Moskowitz

Basándose en la expresión obtenida por Kitaigorodskii, en 1964 Pierson y Moskowitz (Pierson & Moskowitz, 1964) propusieron un espectro para estados de mar completamente desarrollados generados por viento a partir del análisis dimensional y medidas directas del oleaje en el Atlántico Norte. Este espectro se obtuvo como "promedio" de espectros de estado de oleaje en condiciones de máximo desarrollo. Como en el caso de Neumann y Bretschneider, su modelo depende únicamente de la velocidad de viento, esta vez a 19,5 metros sobre el nivel del mar ($U_{19,5}$), según la siguiente expresión:

$$S_{PM}(f) = 0.0081\left(2\pi f\right)^{-5} g^2 \exp\left[-0.74\left(\frac{2\pi f U_{19.5}}{g}\right)^{-4}\right]$$

Según (Silva, 2002) el espectro se puede representar también como:

$$S_{PM}(f) = 0.0081\left(2\pi\right)^{-4} f^{-5} g^2 \exp\left[-0.24\left(\frac{2\pi f U_{19.5}}{g}\right)^{-4}\right]$$

Normalmente los registros aportan la velocidad del viento a diez metros sobre el nivel del mar, U_{10}, por lo que la siguiente relación puede resultar de utilidad:

$$U_W = U_{10}\left(0.1\, y\right)^{1/7}$$

donde y es la distancia en vertical sobre el nivel medio del mar.

Este espectro es recomendado por la (Puertos del Estado, 2009) para oleajes totalmente desarrollados y profundidades indefinidas, en la que también se recogen relaciones simplificadas del espectro asumiendo que representa un proceso de banda estrecha.

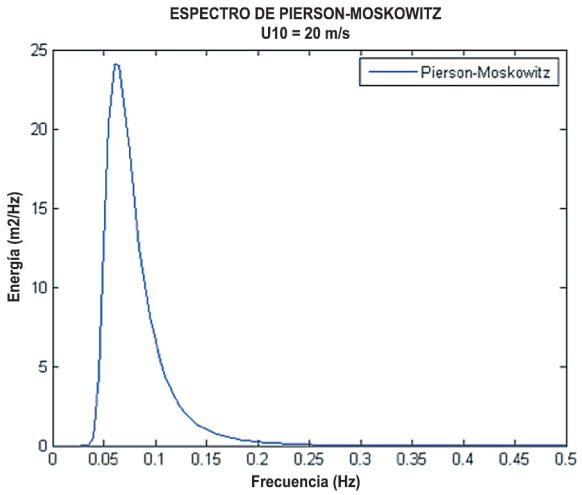


FIGURA 50. Espectro de Pierson-Moskowitz

5.3.5. Espectro ISSC

En el congreso "International Ship Structures Congress" de 1964 (ISSC, 1964) se sugirió la siguiente modificación a la forma del espectro proporcionado por Bretschneider:

$$S_{ISSC}(f) = 0.1107\, H_S^2 \frac{\bar{f}^4}{f^5} \exp\left[-0.4427\left(\frac{f_S}{f}\right)^4\right]$$

La relación entre la frecuencia de pico (f_p) y la frecuencia media ($\bar{f}$) para el espectro ISSC es:

$$\bar{f} = 1.296\, f_p$$

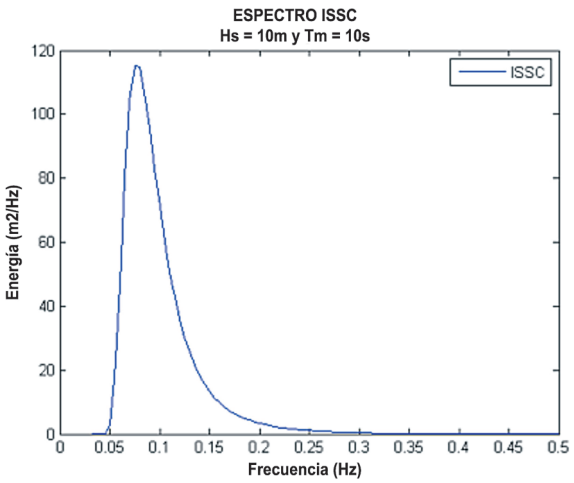


FIGURA 51. Espectro de ISSC

5.3.6. Espectro de Krylov

En 1966 Krylov (Krylov, 1966) propuso un modelo espectral en función de la frecuencia media:

$$S_K(f) = \frac{\pi m_0}{\bar{f}_0}\left(\frac{f}{\bar{f}_0}\right)^{-7} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{f}{\bar{f}_0}\right)^{-4}\right]$$

Donde:

$$\bar{f}_0 = \frac{1}{T_{02}} = \frac{1}{\sqrt{m_0 / m_2}}$$

Siendo m_0 y m_2 los momentos de orden cero y de orden dos respectivamente.

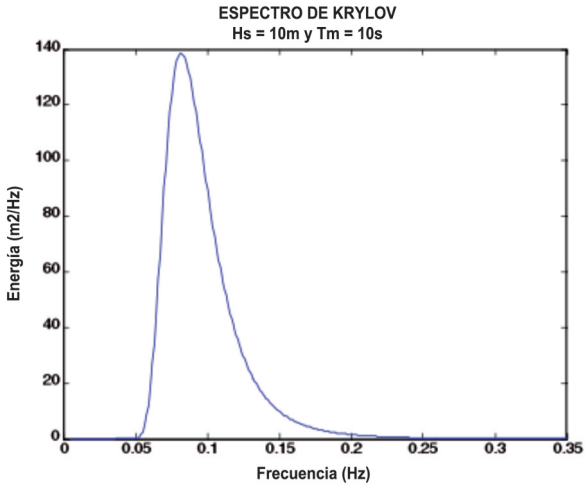


FIGURA 52. Espectro de Krylov

5.3.7. Espectro ITTC

Surge en el congreso "International Towing Tank Conference" de 1966 (IITC, 1966), donde se propusieron cambios en el espectro de Pierson-Moskowitz en términos de altura de ola significante y de la frecuencia media (f_z=1/T_{02}):

$$S_{ITTC}(f) = 1.272\, m_0\, f_z^4 f^{-5} \exp\left[-0.318\left(\frac{f_z}{f}\right)^4\right]$$

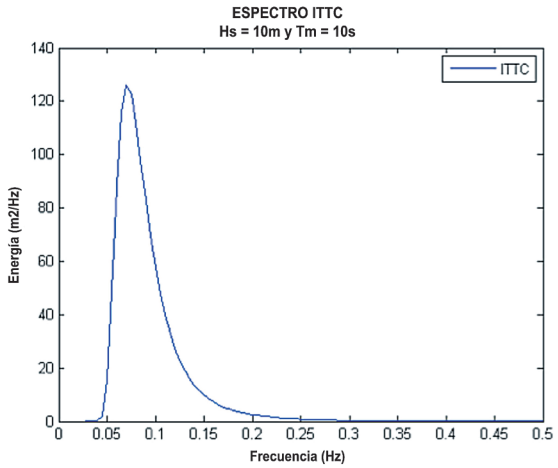


FIGURA 53. Espectro ITTC

5.3.8. Espectro JONSWAP

Surgió en base a los datos tomados a finales de los sesenta en un proyecto de medición de oleaje conocido como JONSWAP (*JOint North Sea WAve Project*). A partir de estos datos, en 1973 Hasselman *et al.* (Hasselman, 1973) propusieron un espectro para estados de mar formados por el viento, con fetch limitado y una profundidad indefinida. Hay que mencionar que, pese a que existen muchos estudios posteriores, el espectro JONSWAP es uno de los más utilizados ya que permite modificar la forma con la que se distribuye la energía.

$$S_J(f) = S_P(f)\phi_{PM}\left(\frac{f}{f_p}\right)\phi_J(f, f_P, \gamma, \sigma)$$

Donde:

$S_P(f)$ es la ecuación de Philips.

$\phi_{PM}(f/f_p) = e^{-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}}$ es la función de forma de Pierson-Moskowitz.

$\phi_J(f,f_P,\gamma,\sigma)=\gamma^{\alpha}$ es el factor de forma del espectro JONSWAP.

Donde:

$$a = \exp\frac{-(f-f_P)^2}{2\sigma^2 f_P^2}$$

$$\sigma = \begin{cases}\sigma_A & f \le f_P \\ \sigma_B & f > f_P\end{cases}$$

Sustituyendo las expresiones anteriores se tiene que:

$$S_J(f) = \alpha g^2 f^{-5}(2\pi)^{-4} e^{-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}} \gamma^{e^{\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_P^2}}}$$

γ es conocido como el factor de forma pico del espectro. En (Puertos del Estado, 2009) se indica que su valor medio es 3,3, su varianza de 0,62 y que el intervalo de valores que puede tomar oscila entre 1 y 7.

No obstante, Goda en 1983 (Goda, 1983), estudia la propagación del oleaje desde Nueva Zelanda hasta Costa Rica y obtiene valores de γ en torno a 8 y 9. Por ello se recomienda emplear un factor de forma de entre 3 y 10 para el oleaje tipo swell dependiendo de la distancia de propagación.

σ representa el ancho de la base del espectro antes (σ_A) y después (σ_B) de la frecuencia de pico. Los valores más habituales de estos parámetros son σ_A=0,07 y σ_B=0,09.

α se conoce como el factor de escala y está asociado con la energía total del espectro. Es función directa del fetch y de la velocidad de viento, tal y como recogen las siguientes expresiones para determinar su valor:

$$\alpha = 0.076(\bar{x})^{-0.22}$$

$$\bar{x} = \frac{gx}{U_{10}^2}$$

Donde:

- x=fetch.
- U_{10}= velocidad del viento a diez metros sobre la superficie.

De igual forma se ha observado que la frecuencia de pico del espectro está relacionada también con el fetch y la velocidad del viento:

$$f_P = 3.5\left(\frac{g}{U_{10}}\right)(\bar{x})^{-0.33}$$

En el capítulo III de la ROM 1.0-09 (Puertos del Estado, 2009) recomienda expresar el factor de escala y la frecuencia de pico tal y como se muestra a continuación, junto con algunas relaciones funcionales de los parámetros de apuntamiento del espectro con la frecuencia de pico:

$$\tilde{F} = \frac{gF}{\bar{u}_{10}^2}$$

$$\tilde{f}_p = \frac{f_p \bar{u}_{10}}{g} = 2.18\tilde{F}^{-0.27}$$

$$\alpha = 0.0317\tilde{f}_p^{0.67}$$

$$\gamma_J = 5.870\tilde{f}_p^{0.86}$$

$$\sigma_a = 0.0547\tilde{f}_p^{0.32}$$

$$\sigma_b = 0.0783\tilde{f}_p^{0.16}$$

En 1988 Goda (Goda, 1988) aporta una expresión aproximada del espectro JONSWAP en términos de altura de ola significante y de la frecuencia de pico espectral , recogida en la ROM 1.0-09, Capítulo III, Apartado 3.5.2.9.3:

$$S_J(f) = B_J H_S^2 f_P^4 f^{-5} e^{-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}} \gamma^{e^{\frac{-(f-f_P)^2}{2\sigma^2 f_P^2}}}$$

Donde:

$$B_j = \frac{0.0624\left(1.094 - 0.01915\ln\gamma\right)}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185\left(1.9+\gamma\right)^{-1}}$$

En ocasiones es difícil obtener una estimación del periodo de pico espectral , ya que es más usual encontrar valores del periodo de ola significante . Por ello se sugiere la siguiente relación:

$$T_P \approx \frac{T_S}{1 - 0.132\left(\gamma + 0.2\right)^{-0.559}}$$

Por su parte, (Puertos del Estado, 2009) aporta la siguiente aproximación:

$$H_S \approx 4\sqrt{m_0} \approx 4\sqrt{\int_{f_{INF}}^{f_{SUP}} S_J(f)df}$$

Es conveniente mencionar, según asegura Goda, que cuando γ=1 el espectro anterior se reduce al espectro $S_{BM\ MODIFICADO}$ y al espectro Pierson-Moskowitz. No obstante, (Puertos del Estado, 2009) advierte que no es correcto confrontar los espectros JONSWAP y Pierson-Moskowitz ya que cada uno de ellos se obtuvo en diferentes condiciones de desarrollo del oleaje y con distintos criterios.

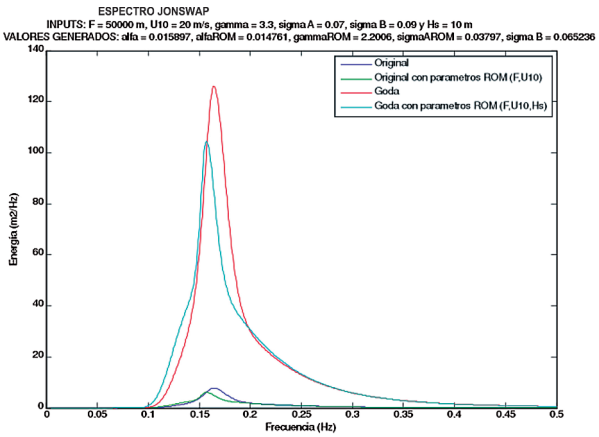


FIGURA 54. Espectro JONSWAP

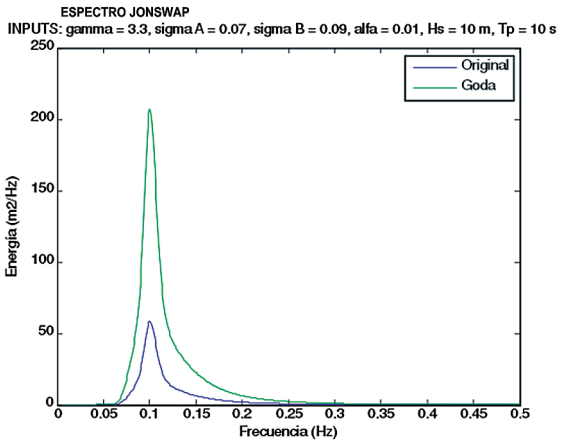


FIGURA 55. Espectro JONSWAP

La ROM 1.0-09 (Puertos del Estado, 2009) recomienda el empleo del espectro JONSWAP para oleajes en fase de desarrollo y profundidades indefinidas. No obstante, indica que a efectos prácticos es habitual admitir la validez del espectro JONSWAP para oleajes en el área de generación, tanto totalmente como parcialmente desarrollados, así como para oleajes que han abandonado el área de generación. Además, proporciona las siguientes expresiones para extender la aplicabilidad del espectro JONSWAP a cualquier tipo de profundidad:

$$\alpha_{Jh} = 0.0078\left(\frac{2\pi\overline{U}_{10}^2}{g\,L_P}\right)^{0.49}$$

$$\gamma_{Jh} = 2.47\left(\frac{2\pi\overline{U}_{10}^2}{g\,L_P}\right)^{0.39}$$

Donde:

L_P es la longitud de onda asociada a la frecuencia de pico f_P (L_P0 en profundidades indefinidas, L_{Ph} en la profundidad h).

Conocido el espectro JONSWAP en mar abierto con coeficientes de forma ( ), el espectro frecuencial en profundidades intermedias, por ejemplo h, tiene los siguientes coeficientes d la forma espectral:

$$\alpha_{Jh} = \alpha_{J0}\left(\frac{L_{P0}}{L_{Ph}}\right)^{0.49}$$

$$\gamma_{Jh} = \gamma_{J0}\left(\frac{L_{P0}}{L_{Ph}}\right)^{0.39}$$

5.3.9. Espectro Davidian *et al.*

En 1985 Davidian *et al.* (Davidian, Lopatukhin, & Rozhkov, 1985) Propusieron un modelo siguiendo

un procedimiento similar al de Krylov, pero en función de la frecuencia de pico espectral:

$$S_D(f) = \frac{6.5\, m_0}{f_P}\left(\frac{f}{f_P}\right)^{-6.5} e^{-1.18\left(\frac{f}{f_P}\right)^{-5.5}}$$

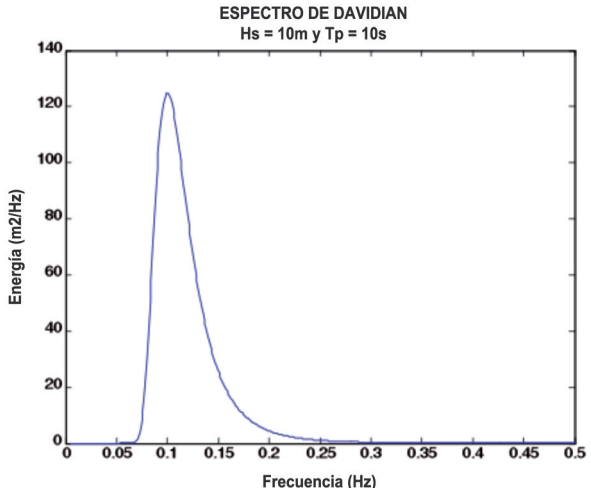


FIGURA 56. Espectro de Davidan

5.3.10. Espectro Wallops

Fue propuesto por Huang *et al.* en 1981 (Huang, Long, Tung, Yuen, & Bliven, 1981) a partir de datos de la NASA en Wallops Center. Se trata de un modelo espectral de dos parámetros, donde es posible considerar el efecto de las aguas someras, y está definido por la siguiente ecuación:

$$S_W(f) = \beta H_S^2 f^{-m} f_P^{m-1} e^{-\frac{m}{4}\left(\frac{f}{f_P}\right)^{-4}}$$

En este caso la relación aproximada entre el periodo de pico espectral T_P y el periodo de ola significante es la siguiente T_S:

$$T_P \approx \frac{T_S}{1 - 0.283(m - 1.5)^{-0.684}}$$

β y m son función de la pendiente significante sl:

$$sl = \frac{\sqrt{m_0}}{L_P}$$

donde m_0 es el momento de orden cero del espectro y L_P es la longitud de onda asociada al periodo de pico espectral. Huang *et al.* obtuvieron las siguientes relaciones para estimar el valor de β y m:

$$\beta = \frac{(2\pi\, sl)^2\, m^{\frac{m-1}{4}}}{4^{\frac{m-5}{4}}\,\Gamma\left(\frac{m-1}{4}\right)}$$

Donde para aguas profundas es:

$$m = \left|\frac{\log\left(\sqrt{2}\,\pi\, sl\right)^2}{\log 2}\right|$$

Y para aguas intermedias y someras se define como:

$$m = \left|\frac{\log\left(2\pi^2 (sl)^2 \coth^2(k_P h)\left(1 + \frac{3}{2\sinh^2 k_P h}\right)^2\right)}{\log 2}\right| \quad para\ 1 < k_P h$$

Posteriormente Goda propuso la siguiente ecuación, recogida en su libro Random Seas and Design of Maritime Structures, para estimar el valor de β:

$$\beta = \frac{0.0624\, m^{\frac{m-1}{4}}\left[1 + 0.7458(m+2)^{-1.057}\right]}{4^{\frac{m-5}{4}}\,\Gamma\left(\frac{m-1}{4}\right)}$$

En dicho libro afirma que cuando m=5, el espectro anterior se reduce al espectro $S_{BM\ MODIFICADO}$.

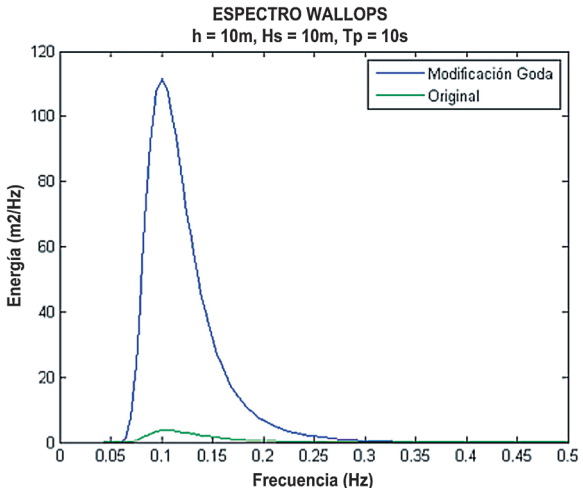


FIGURA 57. Espectro Wallops

5.3.11. Espectro de Ochi-Hubble

En 1976 Ochi y Hubble (Ochi & Hubble, 1976) desarrollaron un modelo espectral, a partir de una base

de datos de 800 espectros, que consta de dos partes: una para componentes de energía de baja frecuencia y otra para componentes de alta frecuencia. El espectro total es expresado como combinación lineal de ambas componentes (cada una con tres parámetros distintos). Esto hace posible la modelación de todos los estados de mar que se presentan durante una tormenta y permite la representación de un doble pico espectral. La expresión es la siguiente:

$$S_{OH}(f) = \sum_{j=1}^{2} \frac{\left((\lambda_j + 0.25)(f_{0j})^4\right)^{\lambda_j} H_{Sj}^2}{4\Gamma(\lambda_j) \cdot (f)^{4\lambda_j+1}} \exp\left[-(\lambda_j + 0.25)\left(\frac{f}{f_{0j}}\right)^{-4}\right]$$

donde H_{S1}, f_{01}, λ_1 representan la altura de ola significante, la frecuencia modal y el factor de forma para las componentes de baja frecuencia, mientras que H_{S2}, f_{02}, λ_2 corresponden a las componentes de alta frecuencia. A λ_1 se le conoce como el parámetro de forma espectral, de manera que si λ_1=1 y λ_2=0 se obtiene un espectro tipo Pierson-Moskowitz. En la fórmula anterior la altura de ola significante se obtiene de la siguiente fórmula:

$$H_S = \sqrt{H_{S1}^2 + H_{S2}^2}$$

Si se supone un espectro de banda estrecha, generalmente el valor de λ_1 es mucho mayor que el de λ_2. Los valores más comunes para estos parámetros son:

λ_1 = 2,72 y λ_2 =1,82$e^{-H_S/121,5}$ (H_s en metros)

La formulación de Ochi-Hubble se propone en la ROM 1.0-09 como alternativa para ajustar espectros bimodales, junto con la superposición lineal de la energía. Esta última es extensible a espectros con más de un pico, como por ejemplo aquellos casos en los que el oleaje provenga de más de dos direcciones o donde coexistan la propagación con la generación.

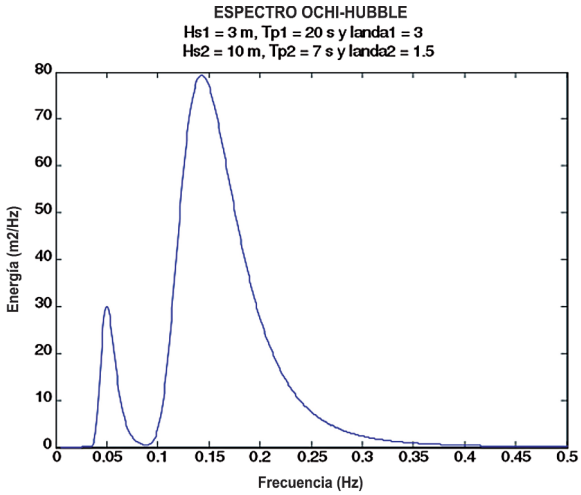


FIGURA 58. Espectro Ochi-Hubble

5.3.12. Espectro TMA

Se trata de un espectro para aguas poco profundas que fue propuesto por Bouws *et al*. en 1985 (Bouws, Günter, Rosenthal, & Vincent, 1985). Se basa en la validez del espectro tipo JONSWAP, pero incluyendo un factor de transformación $\phi(\omega_H)$ donde se encuentran implícitos los efectos de las aguas someras tales como la fricción con el fondo y la refracción:

$$S_{TMA} = S_J \cdot \phi(\omega_H)$$

$$\phi(\omega_H) = \tanh^2(kh)\left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right]$$

donde h es la profundidad del agua y kh puede ser obtenido para cada ω_H por medio de la siguiente expresión:

$$\omega_H = 2\pi f\left(\frac{h}{g}\right)^{0.5}$$

La ROM 1.0-09 recomienda el espectro TMA para el oleaje en fase de desarrollo y profundidades intermedias y reducidas, siempre y cuando no haya rotura por efecto del fondo. También es aplicable al oleaje generado en profundidades intermedias y reducidas bajo los mismos condicionantes.

Este espectro tiene gran difusión en los ensayos de laboratorio, dado que generalmente las olas frente a la pala de generación se encuentran en profundidades reducidas. No obstante Goda advierte de que este espectro debe utilizarse con precaución, dado que se trata de un espectro que contiene muchas frecuencias secundarias fruto de la interacción no lineal entre las componentes lineales del espectro, las cuales pueden llegar a ser mucho mayores en laboratorio que en prototipo.

6. Generación de series temporales a partir de un espectro

6.1. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA: DEFINICIÓN

La función de transferencia es una expresión matemática que relaciona la salida y la entrada de un sistema en términos de los parámetros del mismo. Es por tanto una propiedad del sistema, independientemente de cuál sea la función de entrada.

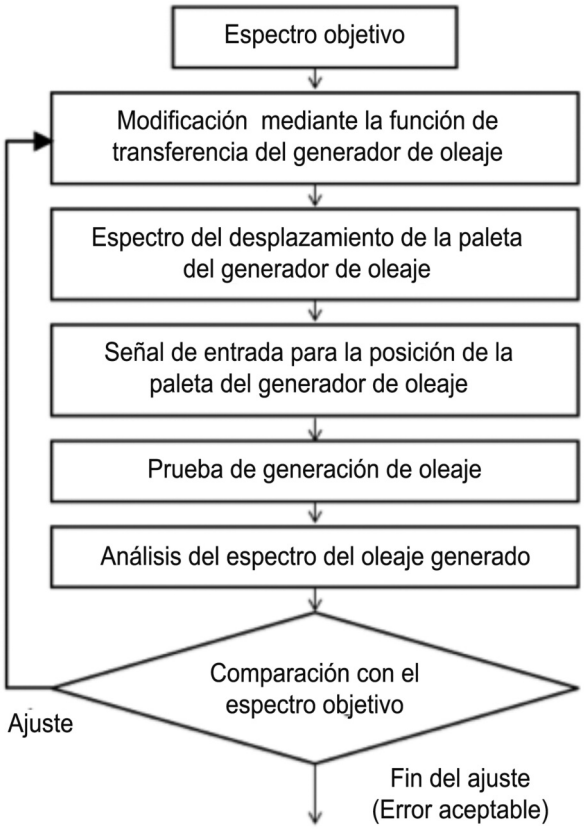


FIGURA 59. Procedimiento de ajuste del espectro generado al espectro objetivo

Suponiendo un sistema cualquiera definido por el diagrama de bloques de la Figura 59, la función de transferencia relaciona la señal de entrada $X(t)$ del sistema con la señal de salida $Y(t)$ a través de la siguiente expresión matemática:

$$G(t) = \frac{X(t)}{Y(t)}$$

Particularizando para el caso de un sistema de generación de corriente, se tiene que la señal de entrada $X(t)$ es la ecuación del movimiento del sistema de generación, mientras que la salida $Y(t)$ se corresponde con la variación temporal de la superficie libre del líquido que genera dicho movimiento.

6.2. ALCANCE Y OBJETO

La teoría que relaciona el desplazamiento del sistema de generación con las características del oleaje producido, ha sido tratada por ampliamente por diversos autores como (Biesel & Suquet, 1953), (Goda, 2010) y (Hughes, 1993).

Como se ha comentado anteriormente, la función de transferencia es una característica intrínseca del sistema, y por tanto depende tanto del sistema de generación, como de las características del vaso (altura de la lámina de agua, dimensiones, existencia de oleaje reflejado, etc.).

El alcance de este documento se limita a exponer la base teórica necesaria para obtener la función de transferencia cualquiera que sea el sistema de generación. Para ello se realizará en primer lugar una breve descripción de los diferentes sistemas de generación existentes, y se repasarán los conceptos básicos necesarios para la caracterización del oleaje.

6.3. OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Una vez conocido el oleaje que se desea generar, se determina la ecuación del movimiento que tiene que realizar la pala para generar dicho oleaje. Los métodos empleados para ello se pueden clasificar en dos grupos:

- Métodos analíticos: en los que se calcula analíticamente el movimiento de la pala. Este método es válido siempre que se cumplan las hipótesis planteadas en la formulación del problema, por lo que antes de aplicarse hay que verificar que se cumplen todos los supuestos.

- Métodos experimentales: en este caso la relación entre el oleaje generado y el stroke (desplazamiento hacia delante y hacia atrás de la pala) se determina de forma empírica, es decir, comparando el oleaje generado con el oleaje objetivo y ajustando iterativamente los valores de la función de transferencia. Es muy habitual que se adopte como valor inicial de la iteración, aquel que se obtiene de la función de transferencia analítica que mejor se ajusta a las condiciones del sistema.

En los siguientes apartados se han recogido en primer lugar, las diferentes soluciones analíticas junto con las hipótesis que han permitido llegar a dichas soluciones, y posteriormente se ha recogido una metodología para la determinación experimental de la función de transferencia de un sistema de generación.

6.4. FORMULACIÓN ANALÍTICA DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA: OLEAJE REGULAR

Las siguientes formulas analíticas se han obtenido aplicando teoría lineal, y por tanto son válidas en aquellos casos en los que se pueda considerar que el sistema de generación se encuentra en profundidades indefinidas.

Las funciones de transferencia resultantes dependen de las características del sistema de generación y del ensayo, por lo que los parámetros deben ajustarse a cada caso.

6.4.1. Solución para un caso general

Características del sistema de generación:

$$d_{pala} = 10{,}305 \text{ m}$$
$$h = 0{,}7 \text{ m}$$

Donde:

- d_{pala} es la distancia desde el fondo del vaso hasta el eje de giro de la pala. $d_{pala}=\infty$ para sistemas de generación de tipo pistón.
- h es la profundidad de la lámina libre en el frente de generación.

Características de la generación

$$H_s = 0{,}18 \text{ m}$$
$$T_p = 0{,}5 \text{ s}$$

La longitud de onda queda definida a partir del periodo por la ecuación de la dispersión:

$$L = 0.39\,m$$
$$kp = \frac{2\pi}{L} = 16{,}103\frac{1}{m}$$

En estas condiciones la relación entre la altura de ola generada y el stroke de la pala del sistema de generación viene dada por el ratio (Stroke/H_s):

$$Ratio = \begin{cases} 4\dfrac{\sinh(kp\cdot h)}{\sinh(2\cdot kp\cdot h)+2\cdot kp\cdot h}\cdot\left[\sinh(kp\cdot h)+\dfrac{\cosh(kp\cdot|dpala|)-\cosh(kp\cdot h)}{kp\cdot(h-|dpala|)}\right] & si\ \ dpala<0 \\ 4\dfrac{\sinh(kp\cdot h)}{\sinh(2\cdot kp\cdot h)+2\cdot kp\cdot h}\cdot\left[\sinh(kp\cdot h)+\dfrac{1-\cosh(kp\cdot h)}{kp\cdot(h-|dpala|)}\right] & si\ \ dpala\geq 0 \end{cases}$$

Siendo por tanto el stroke del sistema de generación el siguiente:

$$Ratio = 0{,}3 \text{ m}$$

Finalmente el movimiento de la pala queda definido como:

$$SRpala(t) = \frac{Stroke\cdot\sin\left(\dfrac{2\pi t}{T_p}\right)}{2}$$

6.5. FORMULACIÓN ANALÍTICA DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA: OLEAJE IRREGULAR

Cualquier estado de mar puede ser descompuesto en una suma finita de funciones seno y coseno, es decir de series de oleaje regular. Las formulaciones analíticas descritas anteriormente proporcionan, para cada oleaje regular, la serie temporal de los movimientos del sistema de generación, aplicando el principio de superposición podemos expresar por tanto la ecuación del movimiento de la pala como una suma finita de funciones sinusoidales.

Matemáticamente el movimiento del sistema de generación (expresado en su forma espectral) está relacionado con el espectro de energía del oleaje a partir de la siguiente ecuación, que se conoce como función de eficiencia del sistema de generación

$$B(f,h) = \frac{Soleaje(f)}{Spala(f)}$$

Donde:

- $S_{oleaje}(f)$ es el espectro de energía del oleaje.

- $S_{pala}(f)$ es el espectro del sistema de generación.
- $B(f,h)$ es la función de transferencia (depende de las variables frecuencia de la serie de oleaje y altura de la lámina de agua en el frente del sistema de generación).

Es importante tener en cuenta que las relaciones entre las alturas de ola y el stroke de la pala, dependen implícitamente del periodo de oleaje, ya que éste está relacionado con el número de onda (k) a partir de la ecuación de la dispersión.

La función de transferencia se obtendría analíticamente hallando la Transformada de Fourier de la ecuación que define el movimiento de la pala, dado que eso no es posible debido a que el ratio Stroke/Hs depende implícitamente del periodo del oleaje, es necesario por tanto calcular numéricamente dicho ratio para cada una de las frecuencias en las que esté descompuesto el espectro.

6.5.1. Ejemplo de aplicación

En este ejemplo se describe el procedimiento a seguir para obtener la serie temporal de un sistema de generación si se quiere generar un espectro de oleaje tipo JONSWAP.

En primer lugar se definen las características del sistema de generación y el vaso.

Características del sistema de generación y el vaso

$$d_{pala} = 10{,}305 \text{ m}$$

$$h = 0{,}7 \text{ m}$$

Donde al igual que antes:

- d_{pala} es la distancia desde el fondo del vaso hasta el eje de giro de la pala.
- h es la profundidad de la lámina libre en el frente de generación.

El oleaje a generar en este caso viene definido en su forma espectral, a partir de una función que puede ser continua, como es el caso de las expresiones matemáticas que definen el espectro de energía del oleaje a partir de ciertos parámetros estadísticos (ver apartado caracterización espectral), o discreta a partir de un conjunto de pares de valores Energía-frecuencia asociada.

En el primero de los casos tendremos que transformar el espectro continuo a uno discreto, para ello se seguirán los siguientes pasos:

1. Dividir la banda de frecuencias del espectro en N intervalos.
2. Se obtendrán N frecuencias haciendo para cada uno de esos intervalos la media de las frecuencias comprendidas en ellos.
3. A cada una de esas frecuencias se le asignará la energía asociada a su intervalo y que vendrá dada por el área que encierra el espectro entre dicho intervalo.

Condiciones de generación

Definición de diferentes espectros de oleaje. Para cada espectro, los parámetros que se introducen son:

JONSWAP-HASSELMANN

$$H_s = 0{,}18 \text{ m}$$
$$f_p = 2 \text{ Hz}$$
$$\gamma = 3{,}6$$

PIERSON-MOSKOWITZ

$$H_s = 3 \text{ m}$$
$$T_p = 8 \text{ s}$$

BRETCHNEIDER - MITSUYASU

$$H_s = 3 \text{ m}$$
$$T_p = 12 \text{ s}$$

NEWMANN

$$H_s = 3 \text{ m}$$
$$T_p = 12 \text{ s}$$

El espectro de oleaje teórico en el intervalo de frecuencias [a,b] y con paso de p responde a la siguiente función:

Intervalo de frecuencias: a=1,5 Hz, b = 3 Hz.

Paso del intervalo: df = 0,005 Hz

La energía asociada a cada intervalo de frecuencias se puede obtener integrando la función del espectro entre los valores que definen el intervalo. Para ello se define el número de intervalos en los que se desea dividir el espectro (N_{int}) y la banda de cada uno de estos intervalos (dN), estos valores se han tomado por defecto a partir del intervalo y paso definidos anteriormente.

$$N_{\text{int}} = \frac{b-a}{df} = 300$$

Una vez definido los intervalos se integra N_{int} veces obteniendo las siguientes parejas de valores:

$$\text{Vener} = \begin{bmatrix} 2.177\cdot10^{-7} \\ 4.921\cdot10^{-7} \\ 5.778\cdot10^{-7} \\ \dots \end{bmatrix} \text{m}^2 \qquad \text{Vfrec} = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 1.505 \\ 1.51 \\ \dots \end{bmatrix} \frac{1}{\text{s}}$$

Una vez se ha definido en forma discreta el espectro de potencia del oleaje que se desea generar se obtienen las alturas de ola asociadas a las distintas frecuencias del espectro como:

$$Volas = \sqrt{2 \cdot Vener}$$

Nota: esta ecuación es válida para el caso de espectros discretos.

Finalmente se obtiene el espectro de energía para el sistema de generación utilizando para ello las fórmulas analíticas descritas en el apartado anterior.

Las longitudes de onda asociadas a las frecuencias del espectro se determinan a partir de la funcion *Vnumonda*(tol), y que nos permite resolver la función de la dispersión para cada uno de las frecuencias dadas en el vector *Vfrec* en función de la tolerancia (tol) deseada

vkp = Vnumonda(0,000001)

Aplicando cada una de las componentes del vector *Vkp* a las ecuaciones analíticas desarrolladas anteriormente, se obtienen las diferentes componentes sinusoidales del movimiento del sistema de generación.

El vector de los strokes asociados a cada una de las frecuencias, se obtiene calculando para cada una de las componentes *Vkp* la variable Ratio que ha sido definida analíticamente en el apartado (oleaje regular). Se obtienen por tanto las siguientes funciones para el espectro de oleaje, el espectro del sistema de generación, y la función de transferencia.

La función de transferencia queda definida según la siguiente ecuación como:

$$Ftransf = \frac{Vener}{SIpala}$$

La serie temporal se obtiene a partir del espectro del sistema de generación (SIpala) haciendo la transformada de Fourier inversa.

6.6. MÉTODO EXPERIMENTAL

Para obtener la función de transferencia experimentalmente, suele partirse de unos valores iniciales dados por las ecuaciones analíticas descritas anteriormente. El procedimiento a seguir en este caso puede sintetizarse en los siguientes pasos:

1. Obtener los valores de la función de transferencia asociados a cada una de las alturas de ola y frecuencias del oleaje que se desea generar (ver apartado Oleaje Irregular).

2. A partir de esos valores queda definida la ecuación del movimiento del sistema de generación.

3. Comprobar que el movimiento de las palas se encuentra dentro de los límites mecánicos del sistema de generación.

4. Generar oleaje con el movimiento establecido registrando con sensores capacitivos el movimiento de la lámina libre donde se vaya a emplazar el modelo.

5. Comparar el oleaje deseado con el oleaje generado.

    5.1. En aquellas frecuencias para las que la energía deseada sea mayor que la energía generada habrá que aumentar el valor inicial dado por la función de transferencia.

    5.2. En aquellas frecuencias para las que la energía deseada sea menor que la energía generada habrá que reducir el valor inicial dado por la función de transferencia.

6. Se repetirá los puntos del 3 al 5 hasta que el espectro del oleaje generado coincida con el deseado.

Para el caso de sistemas de generación en tres dimensiones, el procedimiento a seguir es análogo al anterior, con la particularidad de que en este caso algunos fabricantes como HR Wallingford recomiendan que el registro de las variaciones de la lámina de agua se realice con al menos 4 sensores paralelos al frente de generación, y situados en el lugar donde va a ser emplazado el modelo. La comparación entre oleaje deseado y oleaje generado, se realizará en este caso comparando la media de los espectros registrados con el espectro del oleaje objetivo.

6.7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Battjes, J. (1974). *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves.* Delft: Delft University of Technology.

Biesel, F. & Suquet, F. (1953). *Laboratory Wave-generating Apparatus*. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratories.

Borgman, L. (1972). Statistical models for ocean waves and wave forces. *Advances in Hydroscience*, 8, 139-181.

Bouws, E., Günter, H., Rosenthal, W. & Vincent, C. (1985). Similarity of the wind-wave spectrum in finite depth water 1. *Spectral Form. Journal of Geophysical Research*, 975-986.

Bretschneider, C. (1959). *Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves.* Washington D.C.: Corps of Engineers.

Cartwright, D. & Longuet-Higgins, M. (1956). The statistical distribution of the maxima of a random function. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 237, 212-232.

Castillo, E. (1988). *Extreme Value Theory in Engineering.* San Diego: Academic Press, Inc.

Castillo, E. & Pruneda, R. (2001). *Estadística Aplicada.* Santander (España): Moralea.

Cavanie, A., Arhan, M. & Ezraty. (1976). A statistical relationship between individual heights and periods of storm waves. *Behaviour of Offshore Structures*, 235-244.

Dattatri, J., Raman, H. & Shankar, N. (1978). Height and period distributions for waves off Mangalore Harbour-west coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 84, 3767-3772.

Davidian, I., Lopatukhin, L. & Rozhkov, W. (1985). *Vetzovoye Volneniye kak Veroyatnostnyy Gidrodinamicheskiy Process*. Leningrado.

Glukhovsky, B. (1966). *Investigations of Wind Waves.*

Goda, Y. (1983). *Analysis of wave grouping and spectra of long-travelled swell.* Port and Harbor Research Institute.

Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures.* New Jersey: World Scientific.

Goda, Y. (1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of a wave spectrum. *Coastal Engineering in Japan*, 39-52.

Green, M. (1994). Wave height distribution in storm sea effect of wave breaking. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,* 283-301.

Grigoriu, M. & Harper, E. (1995). *Applied non-Gaussian processes: Ecamples, theory, simulation, linear random vibration and MATLAB solutions*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall.

Hasselman, K. e. (1973). Measurements of wind wave growth and swell decay during the joint North Sea wave project (JONSWAP). *Erganzugsh. Dtsch. Hydrogr.*

Huang, N., Long, S., Tung, G., Yuen, Y. & Bliven, L. (1981). A unified two parameter wave spectral model for a general sea state. *Journal of Fluid Mechanics,* 203-224.

Huang, N., Shen, Z., Long, S., Wu, M., Shih, H., Zheng, Q., *et al.* (1971). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences,* 454, 903-995.

Hughes, S. (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. Singapore: World Scientific.

IITC (1966). *Recommendations of the 11th International Towing Tank Conference*. Tokyo.

ISSC (1964). International Ship Structures Congress. *ISSC.* Delft (Netherlands).

Kitaigorodskii, S. (1961). *Application of the theory of similarity to the analysis of wind-generated wave motion as a stochastic process.*

Krylov, Y. (1966). *Spektralnyye Metody Issledovaniya i Razcheta Vetrovykh Voln.* Leningrado.

Le Méhauté, B. & Hanes, d. (1990). *Ocean Engineering Science.* John Wiley and Sons.

Longuet-Higgins, M. (1983). On the Join Distribution of Wave Periods and Amplitudes in a Random Wave Field. *Royal Society,* pp. 241-258.

Massel, S. (1996). *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction.* Singapore: World Scientific.

Massel, S. (1996). *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction.* Singapore: World Scientific.

Neumann, G. (1953). *On ocean wave spectra and a new method of forecasting wind-generated sea*. Vicksburg: Coastal Engineering Research Center.

Ochi, M. & Hubble, E. (1976). Sic parameter wave spectra. *International Conference on Coastal Engineering.* Honolulu: ASCE.

Philips, O. (1958). The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 426-434.

Pierson, W. & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research,* 5181–5190.

Puertos del Estado (2009). R.O.M. 1.0-99: *Recomendaciones del diseño y ejecución de las obras de abrigo.* Madrid: Puertos del Estado.

Puertos del Estado (1991). ROM 0.3-91: *Recomendación para Oleaje y Atlas de Clima Marítimo en Litoral Español.* Madrid: Puertos del Estado.

Rice, S. (1994). The mathematical analysis of random noise. *Bell System Technical Journal*, 282-332.

Silva, R. (2002). A*nálisis y descripción estadística del oleaje*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Simiu, E. & Ellinwood, B. (1977). Code calibration of extreme wind return periods. *Journal of the Structural Division,* 103 (3), 725-729.

Tayfun, M. (1990). Distribution of large wave heights. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 686-707.

Tayfun, M. (1993). Joint distribution of large wave heights and associated periods. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 261-273.

Toba, Y. (1973). Local balance in the air-sea boundary processes I: On the growth process of wind waves. *Journal of Oceanography*, 109-120.

Wu, J. (1969). Wind stress and surface roughness at air-sea interface. *Journal of Geophysical Research*, 209-220.0

ANEXO 5
Regímenes

En la caracterización del clima marítimo el ajuste de los regímenes permite centrar el análisis de los datos en todo su rango de valores, o bien en sus colas superior o inferior

1. INTRODUCCIÓN

Obtener un régimen consiste en ajustar los datos de una variable para representar la variabilidad estadística de la misma durante el intervalo de tiempo en que se está analizando. Para llevar a cabo esta caracterización se pueden emplear ajustes mediante papeles probabilísticos. Para obtenerlos, se realiza un cambio de escala de tal manera que las funciones de distribución de una cierta familia, cuando se dibujan en él, se convierten en una familia de líneas rectas.

Con los regímenes es posible conocer el comportamiento de los agentes en todo su rango, su cola superior y su cola inferior, así como realizar extrapolaciones. Para obtener el régimen se emplea la parte de los datos que cumple una serie de requisitos, según si se están analizando extremos o valores centrados. La obtención de regímenes mediante el ajuste de datos se puede asimilar a un cambio de variable que facilita la rápida obtención de datos, la interpolación de los mismos y la observación de tendencias.

Cuando al obtener el régimen los valores se ordenan de forma natural en torno a un nivel medio, se dice que el régimen es de valores medios. Por el contrario, si los valores se ordenan alrededor de ocurrencias máximas o mínimas, se trata de un régimen colas, superior e inferior respectivamente. Se pueden definir, por tanto, tres zonas del régimen en función de la magnitud de los valores del conjunto con respecto a un valor centrado del rango: de la cola inferior, centrada y de la cola superior. Los datos pertenecientes a estas clases se emplean en el método de verificación, según el régimen:

- **Cola inferior**: Se toman para el análisis los valores situados por debajo de un umbral inferior. Su excedencia (que el umbral inferior sea superado) es muy probable en el intervalo de tiempo considerado.

- **Régimen medio**: Existen dos corrientes a la hora de seleccionar los datos para el análisis del régimen medio. La primera consiste en tomar todos los datos disponibles, y la segunda, en tomar sólo los que se encuentren situados por debajo de un umbral superior y por encima de un umbral inferior. Al realizar este tipo de análisis, los datos se ordenan alrededor del valor medio, la moda y la mediana de la distribución.

- **Cola superior**: Se toman para el análisis los datos situados por encima de un umbral superior. Dependiendo del método utilizado, se aplicará seguidamente un segundo criterio de selección de datos de este subconjunto. Su excedencia (que haya datos que superen el umbral superior) es poco probable en el intervalo de tiempo considerado.

  NOTA: En la ROM 0.0-01 se distingue entre régimen medio y régimen extremo. Dentro de cada uno de ellos hay clases centradas, y se pueden hallar también colas inferiores o superiores. La ROM 1.0-09, por otro lado, asigna colas superior o inferior a regímenes extremales, y valores centrados a regímenes medios.

En aquellos casos en los que los valores de las colas estén asociados a probabilidades de no excedencia considerablemente pequeñas o grandes, será necesario realizar un ajuste de las colas con una función de distribución adecuada a su carácter particular.

El intervalo de tiempo máximo para el que se pueden definir las tres clases es la longitud de la serie temporal de los datos. Para proceder a los análisis estadísticos, se considera admisible emplear una serie de 3 años de duración (Puertos del Estado, 1991), pero lo recomendado para la Península Ibérica es que la duración sea, como mínimo, de un hiperciclo de variabilidad que oscile entre los 7 y los 11 años (Puertos del Estado, 2001). No obstante, se pueden elegir intervalos temporales que fluctúen entre los 3 años y la totalidad de los años de registro. La función de distribución con que se ajusten los datos debe servir para representar estadísticamente el factor de proyecto en la condición de trabajo elegida y para el estado límite al que esté adscrito el modo de fallo o parada operativa que se quiere verificar.

2. RÉGIMEN MEDIO

El régimen medio se describe habitualmente mediante una función de distribución teórica que ajusta los datos correspondientes a la zona media o central del histograma. Está fundamentalmente relacionado con las condiciones medias de operatividad.

El régimen medio se puede representar gráficamente mediante un histograma acumulado o mediante una función de distribución, y el correspondiente ajuste teórico, sobre papel probabilístico. Ajustar los datos a una función de distribución teórica en lugar de utilizar el histograma permite obtener una función que relacione la magnitud de la variable con su probabilidad de ocurrencia.

El rango de valores con el que analizar el régimen medio puede oscilar entre los siguientes valores, dependiendo del criterio que se desee seguir:

a) [min, max]: Se toman todos los valores para llevar a cabo el ajuste, desde el mínimo hasta el máximo de la serie (ver Figura 1).

b) [min Ui] (Ui, Us) [Us max]: Se realiza el ajuste por separado de las tres ramas (cola inferior, régimen medio y cola superior), de modo que cada una podrá estar mejor caracterizada por una función diferente. Nótese que no existen

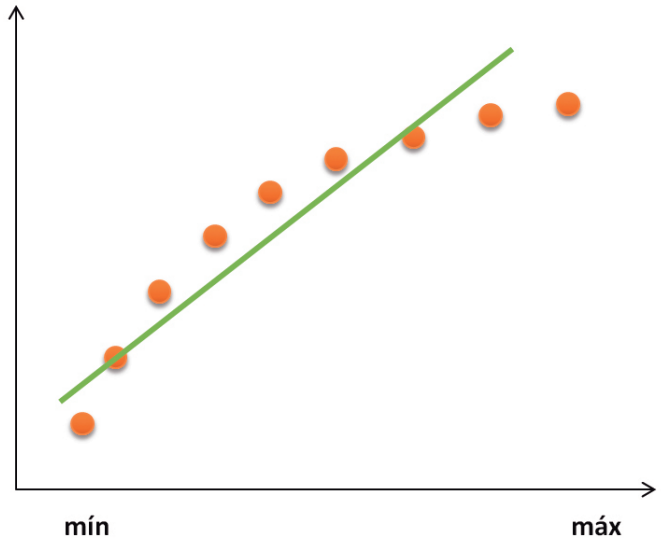


FIGURA 1. Representación del caso a) de selección de datos para el ajuste

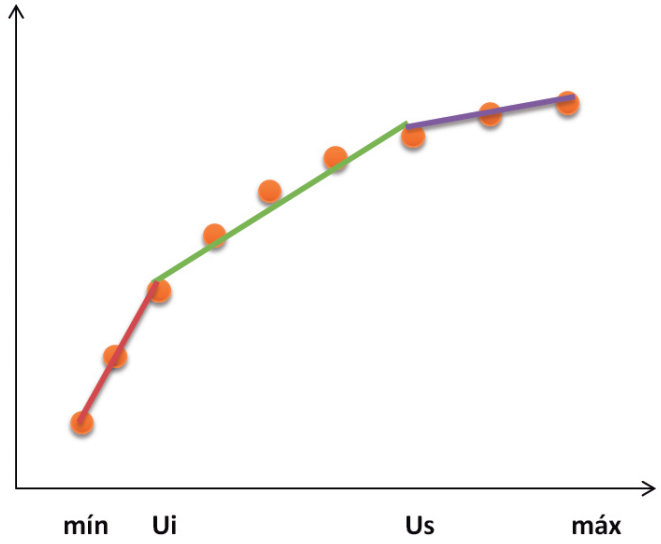


FIGURA 2. Representación del caso b) de selección de datos para el ajuste

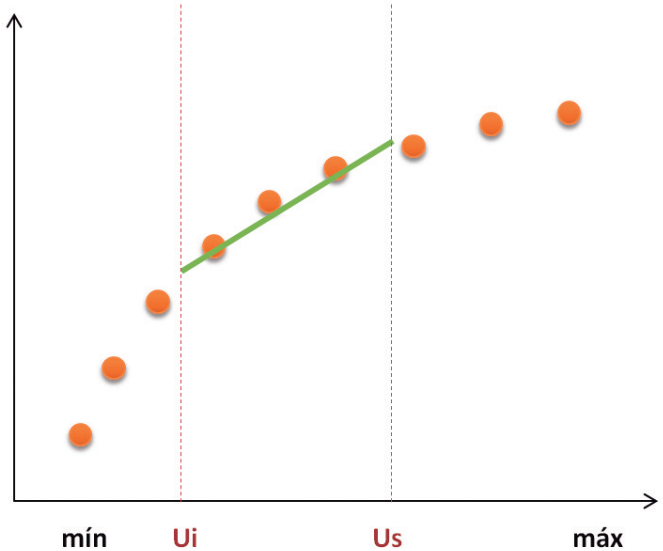


FIGURA 3. Representación del caso c) de selección de datos para el ajuste

funciones de ajuste que se acomoden perfectamente a las tres ramas simultáneamente (ver Figura 2).

c) [Ui Us]: Se realiza el ajuste con los datos centrales del histograma, es decir, eliminando para la búsqueda del mejor ajuste los datos que superen el umbral superior y que se encuentren bajo el umbral inferior (ver Figura 3).

Las distribuciones teóricas más empleadas para el ajuste del régimen medio (de oleaje) son las siguientes:

2.1. Log-normal

$$F(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_0^x\frac{1}{x}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]dx \quad para\ x>0 \qquad (1)$$

también expresada como:

$$F(x)=\Phi\left(\frac{\ln x-\mu}{\sigma}\right) \qquad para\ x>0 \qquad (2)$$

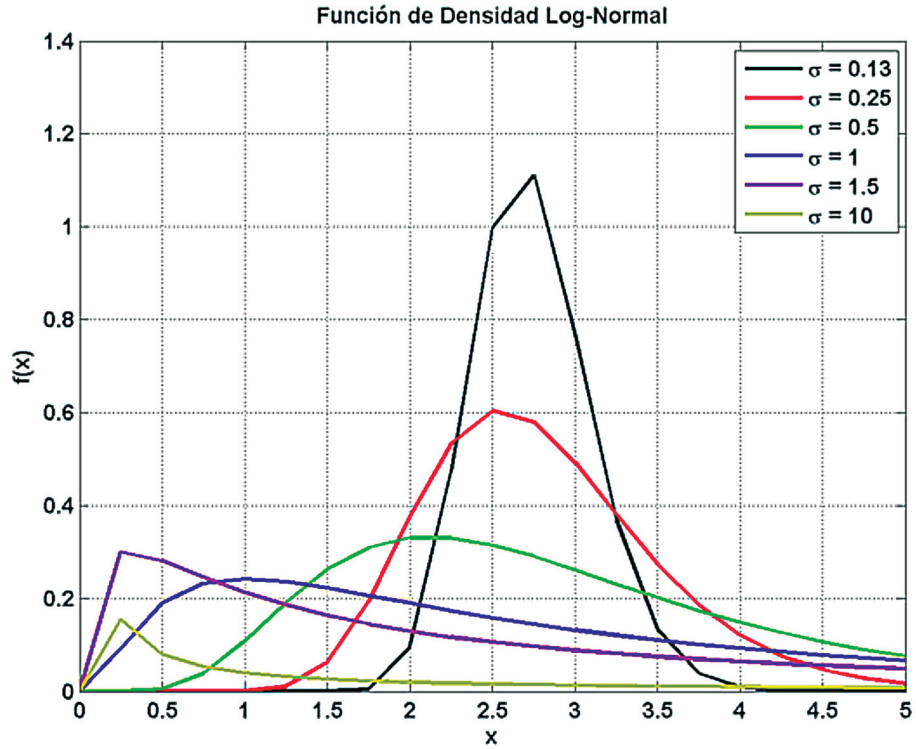


Figura 4. Funciones de densidad Log-Normales con distintos valores del parámetro σ y media μ=1

2.2. Weibull biparamétrica

$$F(x)=1-\exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right] \qquad (3)$$

En todas ellas:

- X es el valor de la variable.
- F(x) es el valor de la probabilidad acumulada correspondiente a cada valor de x.
- λ, σ y κ son los parámetros de localización, escala y forma de la función. En la función Log-Normal, el parámetro de escala es σ, y el de localización Q, mientras que en Weibull el parámetro de escala se denomina λ, el de forma es κ,

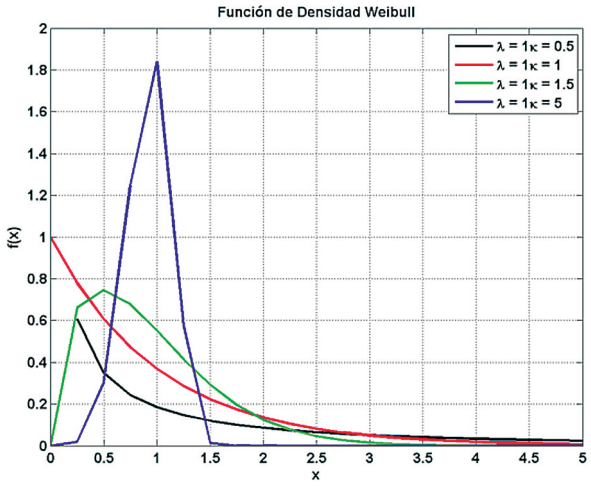


Figura 5. Funciones de distribución de Weibull, con variaciones del parámetro k y l constante

y no hay parámetro de localización. Los métodos existentes para su determinación se indican en los párrafos siguientes.

La función de los parámetros de localización, escala y forma de las funciones de densidad y distribución se puede ver gráficamente en las figuras 6, 7 y 8:

- Parámetro de escala: Como puede verse en la Figura 6, la modificación del parámetro de escala hace que el nivel de apuntamiento de la función cambie.

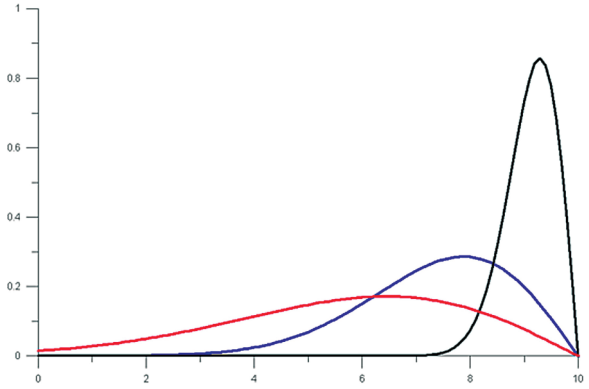


FIGURA 6. Función de densidad sobre la que se ha modificado el parámetro de escala

- Parámetro de forma: La Figura 7 muestra cómo la variación del parámetro de forma transforma la morfología de la función de densidad.

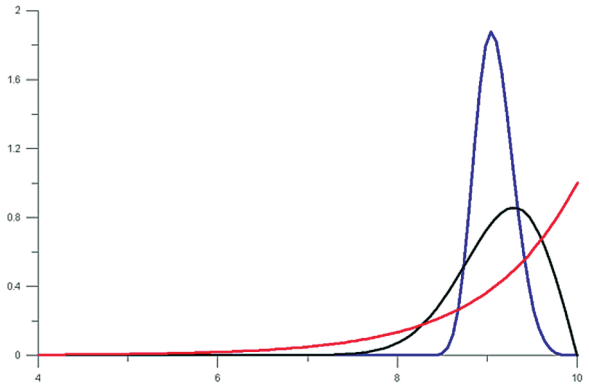


FIGURA 7. Función de densidad sobre la que se ha modificado el parámetro de forma

- Parámetro de localización: En la Figura 8 se observa cómo la variación del parámetro de localización produce el desplazamiento de la función.

Existen 3 métodos principales para estimar los parámetros λ, σ y k:

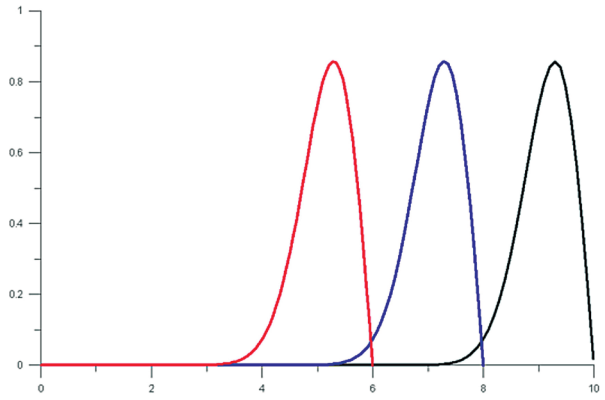


FIGURA 8. Función de densidad sobre la que se ha modificado el parámetro de localización

- **Método de los mínimos cuadrados** en papel probabilístico: se ajustan las funciones mediante el empleo de variables reducidas por el método de mínimos cuadrados.

- **Método de los momentos**: consiste en tomar los momentos de la muestra como estimadores de los momentos de la población. Los valores pueden ser determinados a partir de un determinado número de momentos de la muestra, como la media, varianza o momentos de orden superior.

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^r}{n} = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f_X(x)\,dx \tag{4}$$

Donde:

- n es el tamaño de la muestra.
- r es el orden del momento considerado.

Los momentos de orden p de la muestra y de la población se obtienen, respectivamente, de:

$$m_p = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} x_n^p = E\left[Z^p\right]$$
$$M_p = \int_{-\infty}^{\infty} x^p f_X(x)\,dx \tag{5}$$

Para una variable normal:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma}\exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \tag{6}$$

$$m_1 = M_1 \Rightarrow E[X] = \mu$$
$$m_2 = M_2 \Rightarrow E\left[X^2\right] = \mu^2 + \sigma^2 \tag{7}$$

Para una variable *Rayleigh:*

$$f_X(x) = \frac{2(x-\lambda)}{r^2}\exp\left\{-\left(\frac{x-\lambda}{r}\right)^2\right\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} m_1 = M_1 &\Rightarrow E[X] = \lambda + \sqrt{\frac{\pi}{2}}r \\ m_2 = M_2 &\Rightarrow E\left[X^2\right] = \lambda^2 + \sqrt{2\pi}\lambda r + 2r^2 \end{aligned} \quad (9)$$

A continuación se proporciona una tabla en la que se recogen los momentos de orden 1 y 2 de varias distribuciones:

Distribución	Media	Varianza
Uniforme	$\frac{\lambda+\beta}{2}$	$\frac{(\beta-\lambda)^2}{12}$
Exponencial	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$
Gamma	$\frac{\theta}{\lambda}$	$\frac{\theta}{\lambda^2}$
Beta	$\frac{\lambda}{\lambda+\theta}$	$\frac{\lambda\theta}{(\lambda+\theta+1)(\lambda+\theta)^2}$
Normal	μ	σ^2
Log-normal	$e^{\frac{\mu+\sigma^2}{2}}$	$e^{2\mu}\left(e^{2\sigma^2}-e^{\sigma^2}\right)$
Central c²	N	2n
Rayleigh	$\delta\sqrt{\frac{\pi}{2}}$	$\frac{\delta^2(4-\pi)}{2}$
T de Student	0	$\frac{n}{n-2}$
Weibull	$\lambda+\delta\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$	$\delta^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right)-\Gamma^2\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right]$
Weibull inversa	$\lambda-\delta\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$	$\delta^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right)-\Gamma^2\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right]$
Gumbel	$\lambda+0.57772\delta$	$\frac{\pi^2\delta^2}{6}$
Gumbel inversa	$\lambda-0.57772\delta$	$\frac{\pi^2\delta^2}{6}$
Frechet	$\lambda+\delta\Gamma\left(1-\frac{1}{\beta}\right)$	$\delta^2\left[\Gamma\left(1-\frac{2}{\beta}\right)-\Gamma^2\left(1-\frac{1}{\beta}\right)\right]$
Frechet inversa	$\lambda-\delta\Gamma\left(1-\frac{1}{\beta}\right)$	$\delta^2\left[\Gamma\left(1-\frac{2}{\beta}\right)-\Gamma^2\left(1-\frac{1}{\beta}\right)\right]$
Logística	α	$\frac{\pi^2\beta^2}{3}$

Tabla 1. Momentos de orden 1 y 2 de varias distribuciones. La formulación de las funciones de densidad y distribución, así como otros parámetros característicos se pueden encontrar en el Apéndice I

- **Método de máxima verosimilitud**: se busca λ, σ y k maximizando la probabilidad de encontrar el valor muestral. El estimador de máxima verosimilitud nos dará el valor de x que hace máxima la probabilidad de obtener un resultado concreto de una muestra, (x_1, ... , x_n). La función de máxima verosimilitud (que en inglés es *Likelihood*, *L*) se define como:

$$L(\boldsymbol{\theta}|x) = \prod_{i=1}^{N} f(x_i;\boldsymbol{\theta}) \tag{10}$$

Y su logaritmo:

$$\log L(\boldsymbol{\theta}|x) = \sum_{i=1}^{N} \log f(x_i;\boldsymbol{\theta}) \tag{11}$$

Para una variable exponencial

$$f_X(x) = \lambda \exp\{-\lambda x\} \tag{12}$$

La función de verosimilitud se define como:

$$L(\boldsymbol{\theta}|x) = \prod_{i=1}^{N} (\lambda \exp\{-\lambda x_i\}) \tag{13}$$

Y su logaritmo:

$$\log L(\boldsymbol{\theta}|x) = \sum_{i=1}^{N} \log(\lambda \exp\{-\lambda x_i\}) = \sum_{i=1}^{N} [\log \lambda + \\ + \log(\exp\{-\lambda x_i\})] = N \log \lambda - \lambda \sum_{i=1}^{N} x_i \tag{14}$$

Derivando e igualando a cero para obtener el máximo se tiene que:

$$\frac{\partial \left(N \log \lambda - \lambda \sum_{i=1}^{N} x_i \right)}{\partial \lambda} = \frac{N}{\lambda} - \sum_{i=1}^{N} x_i = 0 \Rightarrow \lambda = \frac{N}{\sum_{i=1}^{N} x_i} \tag{15}$$

Dependiendo de la fenomenología, las funciones que mejor se ajustan a los datos pueden no corresponderse con las descritas anteriormente. Por ello se recomienda realizar un ajuste de todas las funciones teóricas conocidas y seleccionar como válida aquélla cuyo nivel de ajuste sea el más elevado.

En el caso del método de los Mínimos Cuadrados, una vez determinada la población de las excedencias y asignada una probabilidad de no excedencia, el siguiente paso es determinar los coeficientes de la función de distribución elegida: / σ o κ (el parámetro κ sólo es necesario determinarlo si se trata de una función Weibull).

El análisis debe hacerse sobre todas las funciones disponibles, y se seleccionará la que tenga un grado de ajuste mayor con los datos reales. La forma más sencilla de abordar el problema es trabajar sobre la variable reducida, de forma que la transformación permita que los datos se ajusten a una recta, cuya ecuación genérica se puede expresar como:

$$h(y) = a \cdot g(x) + b \tag{16}$$

Donde:

- *a*: Pendiente.
- *b*: Ordenada en origen.

Las variables reducidas correspondientes a las funciones más empleadas para este tipo de análisis se recogen en tabla de la página siguiente.

3. RÉGIMEN DE COLA SUPERIOR

Un régimen de cola superior es un modelo estadístico que describe la probabilidad con la que se puede presentar una determinada excedencia. Este tipo de análisis trata de caracterizar los eventos extremos (de cola superior) para la zona de estudio, mediante el empleo de un subconjunto de datos dentro del total de los registros.

La realización de este análisis está motivada por el hecho de que la seguridad y la operatividad de una instalación portuaria pueden estar condicionadas por la acción de los agentes en situación de superación de un umbral, es decir, en situaciones donde el agente alcanza una intensidad poco frecuente.

Con el fin de acotar la pérdida de fiabilidad y operatividad debida a la manifestación extrema de un agente, es necesario tener una estimación de la frecuencia o probabilidad con la que se presentan superaciones de los umbrales establecidos.

No existe un criterio universal para determinar el umbral a partir del cual se deben tomar los datos para realizar el análisis de cola superior. La definición de los umbrales se realiza mediante procedimientos gráficos o basándose en normas de buena práctica, como los de Rosbjerg, Madsen y Rasmussen (1992) o Thompson, Cai, Reeve y Stander (2009). En el caso del oleaje, la ROM 03-91 (Puertos del Estado, 1991 y Puertos del Estado, 2009) proporciona una serie de valores de Hs que pueden ser tomados como umbrales mínimos a tener en cuenta para proceder al análisis de cola superior en función del área geográfica de estudio.

La ROM 0.0 (Puertos del Estado, 2001) ha incorporado otro criterio que está más en consonancia con el carácter probabilístico de este tipo de análisis. Se trata de seleccionar los umbrales a partir de percentiles. De este modo, independientemente de las características de la variable en cada emplazamiento, se toma un valor localizado en un punto extremal de la muestra, lo que hace comparables los umbrales obtenidos en distintos lugares.

Función de distribución F(x)	g(x)	h(y)
Normal	$g(x)=x$	$h(y)=\Phi^{-1}(y)$
Lognormal	$g(x)=\ln x$	$h(y)=\Phi^{-1}(y)$
Weibull biparamétrico	$g(x)=\ln x$	$h(y)=\ln[-\ln(1-y)]$
Weibull de máximos	$g(x)=-\ln(\lambda-x)$	$h(y)=-\ln[-\ln(y)]$
Weibull de mínimos	$g(x)=\ln(x-\lambda)$	$h(y)=\ln[-\ln(1-y)]$
Gumbel de máximos	$g(x)=x$	$h(y)=-\ln[-\ln(y)]$
Gumbel de mínimos	$g(x)=x$	$h(y)=\ln[-\ln(1-y)]$
Frechet de máximos	$g(x)=\ln(x-\lambda)$	$h(y)=-\ln[-\ln(y)]$
Frechet de mínimos	$g(x)=-\ln(\lambda-x)$	$h(y)=\ln[-\ln(1-y)]$

Tabla 2. Transformación de las variables en los ejes x e y para obtener una recta de ajuste (Castillo & Pruneda, 2001)

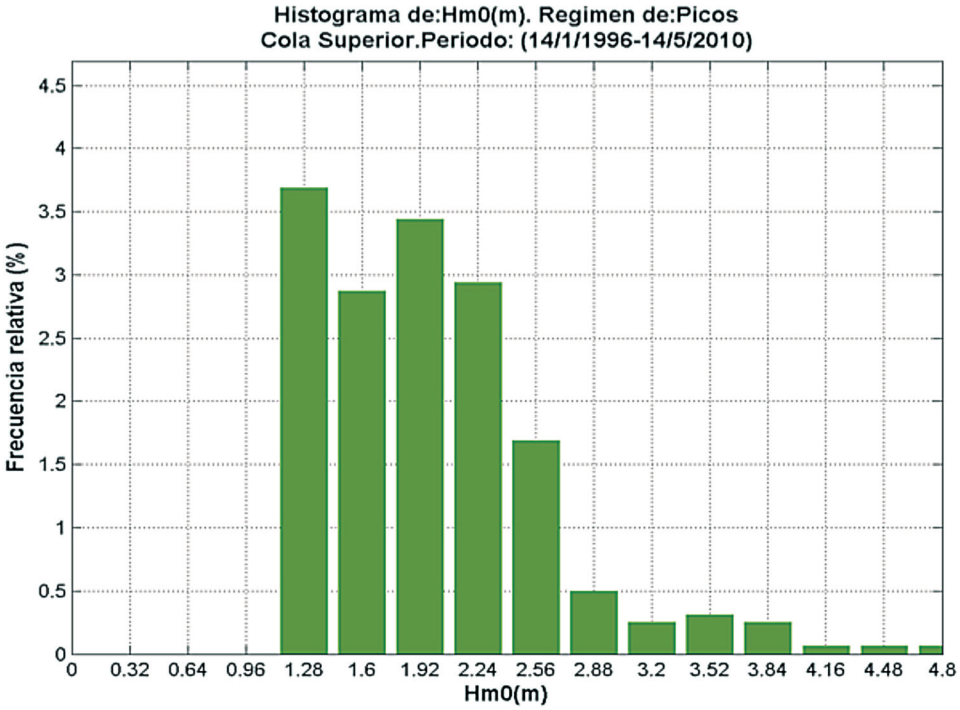
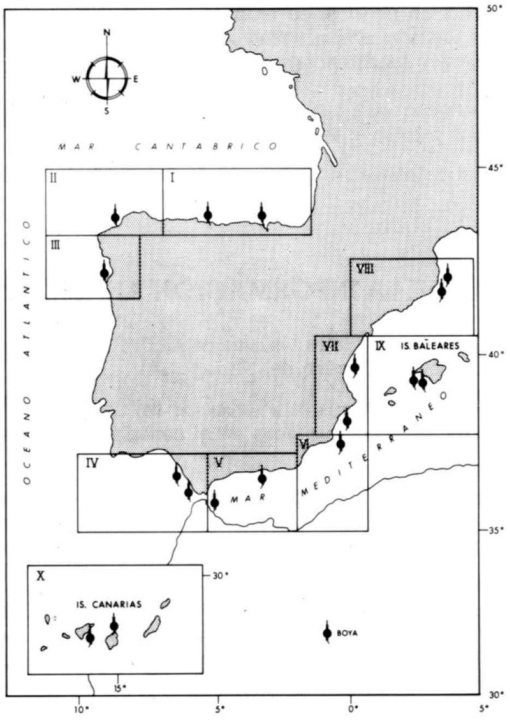


Figura 9. Representación de la frecuencia relativa de la altura de ola Hm0[m] que supera el umbral de u_{sup} [m]= 1.1, determinado a partir del percentil 90

TABLA 2.4.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA INFORMACIÓN INSTRUMENTAL ANALIZADA



Área	Boya de medida	Coordenadas de situación	Profundidad de fondeo en BMVE (m)	Período de medida	$H_{s,T}$ (m)
I	Bilbao (Morro)	43° 22' 55" N 3° 4' 24" N	35	1976-1984	3,0
	Bilbao (Ext.)	43° 24' N 3° 8' 36" W	50	1985-1990	
	Gijón	43° 34' N 5° 39' W	23	1981-1990	
II	Coruña	43° 24' 45" N 8° 23' W	50	1985-1990	3,0
III	Cabo Silleiro	42° 1' 48" N 8° 56' 30" W	75	1986-1990	3,0
IV	Sevilla	36° 44' 15" N 6° 29' 6" W	12	1983-1988	1,5
	Cádiz	36° 30' 20" N 6° 20' 10" W	22	1982-1990	
V	Ceuta	35° 54' 10" N 5° 19' 30" W	21	1984-1990	1,0
	Málaga	36° 41' 30" N 4° 25' W	25	1984-1990	
VI	Cabo de Palos	37° 39' 15" N 0° 38' 18" W	67	1985-1990	1,5
VII	Alicante	38° 15' N 0° 25' W	50	1982-1990	1,0
	Valencia I	39° 27 05" N 0° 17' 43" W	21	1982-1990	
VIII	Rosas	42° 11' 43" N 3° 11' 15" E	50 90	1986-1987	2,0
	Palamós	41° 49' 24" N 3° 10' 42" E		1988-1990	
IX	Palma de Mallorca	39° 24'/26,5' N 2° 39'/34,2' E	55/45	1983/ /1986-1987	1,5
X	Tenerife	28° 27' 18"N 16° 14' 54 "W	65	1981-1990	1,5
	Las Palmas I	28° 08' 30" N 15° 27' 30" W	42	1981-1990	2,0

LEYENDA:
$H_{s,T}$ = Altura de ola significante umbral establecida para la consideración de condiciones de temporal

FIGURA 10. Valores de Hs[m] recomendados como umbral para el análisis de cola superior por la ROM 0.3-91 (Puertos del Estado, 1991)

Los métodos más extendidos para caracterizar el régimen de cola superior son:

- Método de los máximos anuales.
- Método de Picos Sobre Umbral, más conocido como POT (*Peak Over Threshold* en inglés).
- Método de la muestra total.
- Método de persistencias.

Los dos primeros métodos requieren que los datos cumplan una serie de características:

1. Los eventos extremos deben ser independientes. Esto implica que cada excedencia, para ser considerada como evento extremo independiente del resto, debe tener una duración mínima sobre el umbral seleccionado y la duración entre excedencias debe ser superior a un valor mínimo, que varía según el emplazamiento.

2. Los eventos extremos deben de ser producidos por agentes climatológicos similares.

3. El clima de la variable no debe encontrarse afectado por tendencias producidas por cambios climáticos. Cuando se están analizando grandes escalas temporales, estas tendencias pueden falsear los datos.

Una vez que se han seleccionado los datos que cumplen las condiciones previamente establecidas, se puede aplicar el método de los Máximos Anuales o el Método P.O.T, o en su caso, el método de las persistencias. Es recomendable que el número de datos con que se realice el análisis de extremos sea igual o superior a 20 (N>20) años en máximo anuales. Si N<20 años, el método P.O.T. es más fiable. Además, en P.O.T. la extrapolación es razonable para un periodo de retorno inferior a 20 veces el tiempo efectivo de medida (ROM 0.3-91).

¿Se puede evitar/limitar la pérdida de funcionalidad y operatividad de las terminales portuarias acotando el riesgo?

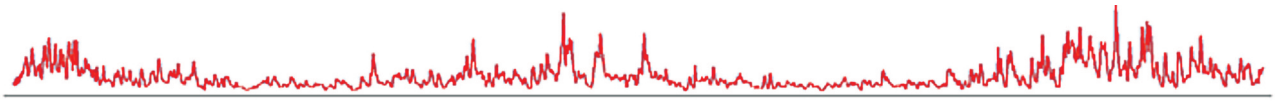


FIGURA 11. Valores de una serie temporal histórica de una variable X

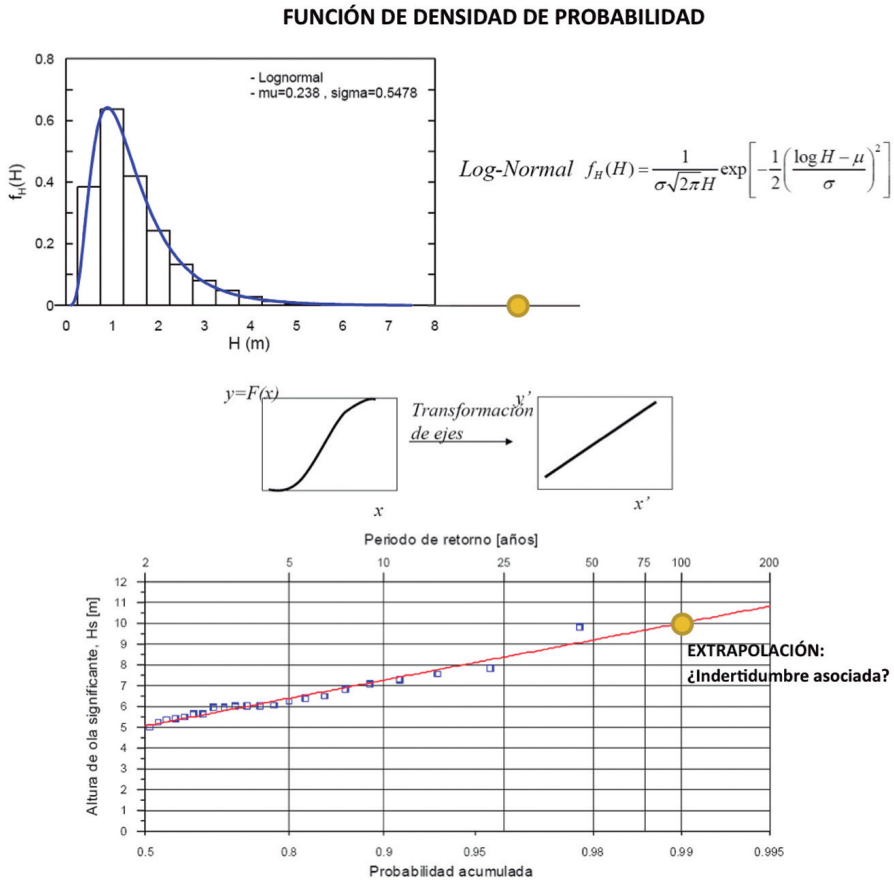


FIGURA 12. A) Función de densidad de la variable X y su ajuste a una función de densidad teórica Lognormal. B) Obtención de la función de distribución del suceso X y su representación en papel probabilístico. C) Criterio de fiabilidad de un suceso. D) Representación de datos de altura de ola significante en un papel probabilístico: el punto azul representa un punto interpolado del ajuste de los datos, y el rojo, un punto extrapolado (Molina, 2011)

Para la selección de umbrales existen varios criterios cuando se aplican métodos de análisis de extremos:

- Que el nº de datos a analizar (por encima o por debajo del umbral) sea mayor que la duración (en años) del registro multiplicado por un valor comprendido entre 1 y 3.
- El umbral es aquél superado por el 6% de los datos, lo que se corresponde con un valor de percentil 94% (Smith, 1987).
- Si sólo se analizan las colas de la muestra, se deben seleccionar √N datos, donde N es el número total de datos disponibles.
- El umbral se selecciona proporcionando un valor mediante criterio experto (Figura 10).
- El umbral se selecciona proporcionando un valor de percentil, que dependerá del criterio del que aplica el método.

3.1. Método de los máximos anuales para la selección de los datos con los que se realizará el análisis de cola superior

Dada la serie temporal de los datos seleccionados como válidos según el criterio descrito anteriormente, se seleccionan los máximos de cada año y se construye un subconjunto de datos.

Se ajusta una función de distribución sobre el conjunto de datos. Al no existir un criterio que indique cuáles son las funciones correspondientes a cada fenomenología y lugar, se deben realizar varios ajustes sobre las funciones teóricas disponibles y elegir la que ofrezca una mejor bondad de ajuste. Las funciones más empleadas son las siguientes:

Weibull de máximos

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\lambda - x}{\delta}\right)^{\beta}\right] \quad x < \lambda \qquad (17)$$

$$f(x) = \frac{\beta}{\delta}\left(\frac{\lambda - x}{\delta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{\lambda - x}{\delta}\right)^{\beta}\right] \quad x < \lambda \qquad (18)$$

Gumbel de máximos (Asíntota I)

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right]\right\}; \quad -\infty < x < \infty, \delta > 0 \qquad (19)$$

$$f(x) = \frac{1}{\delta}\exp\left\{-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right) - \exp\left[-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right]\right\}$$

$$-\infty < x < \infty, \delta > 0 \qquad (20)$$

Frechet de máximos (Asíntota II)

$$F(x) = \exp\left[-\left(\frac{\delta}{x-\lambda}\right)^{\beta}\right] \quad x \geq \lambda \qquad (21)$$

$$f(x) = \frac{\beta}{\delta}\left(\frac{\delta}{x-\lambda}\right)^{\beta+1} \exp\left[-\left(\frac{\delta}{x-\lambda}\right)^{\beta}\right] \quad x \geq \lambda \qquad (22)$$

Donde:

- x: es la variable de estudio.
- λ, β, δ, σ son parámetros definitorios de las funciones, que se deben ajustar.

3.2. Método POT para la selección de los datos con los que se realizará el análisis de cola superior

Se trata de un método de cálculo de regímenes extremales.

- A partir de la curva de estados de mar, se establece un primer umbral (temporal) U1 y se seleccionan los picos independientes que lo superan. Se consideran picos independientes aquéllos separados por un periodo de tiempo mínimo (suele ser 24 o 48 horas). De este modo, se obtienen n datos.
- Se define el nº medio de temporales por año como $\lambda = n/T_{ef}$ siendo T_{ef} el tiempo efectivo de medida.
- Se establece un 2º umbral $H_1 > U_1$ y se eligen nuevamente los picos independientes que lo superan obteniendo n_1 datos.
- Ordenando estos n_1 datos de menor a mayor y asignando la fórmula de punteo (la explicación se encuentra más adelante) considerando en el denominador n (y no n_1), se obtiene una primera función de distribución $P(x)$.
- La función de distribución definitiva se obtiene de modificar esta primera utilizando el nº medio de temporales por año: $1-\lambda[1-P(x)]$.

3.3. Método de persistencias

Este método se emplea para analizar situaciones en las que la duración de la excedencia es determinante en el fenómeno que se está analizando. Los datos de persistencia definen las distribuciones de probabilidad de las duraciones en las que las condiciones (climáticas) se mantienen sobre o bajo un umbral. Este análisis se emplea en arquitectura naval, navegación e ingeniería costera, y adquiere

relevancia en aspectos de diseño y planificación de operaciones en el cálculo de días no laborables por condiciones climáticas adversas (Kuwashima y Hogben, 1986). La duración de las excedencias sobre el umbral son denominadas por dichos autores como "persistencia de las tormentas" y bajo el umbral "persistencia de calmas".

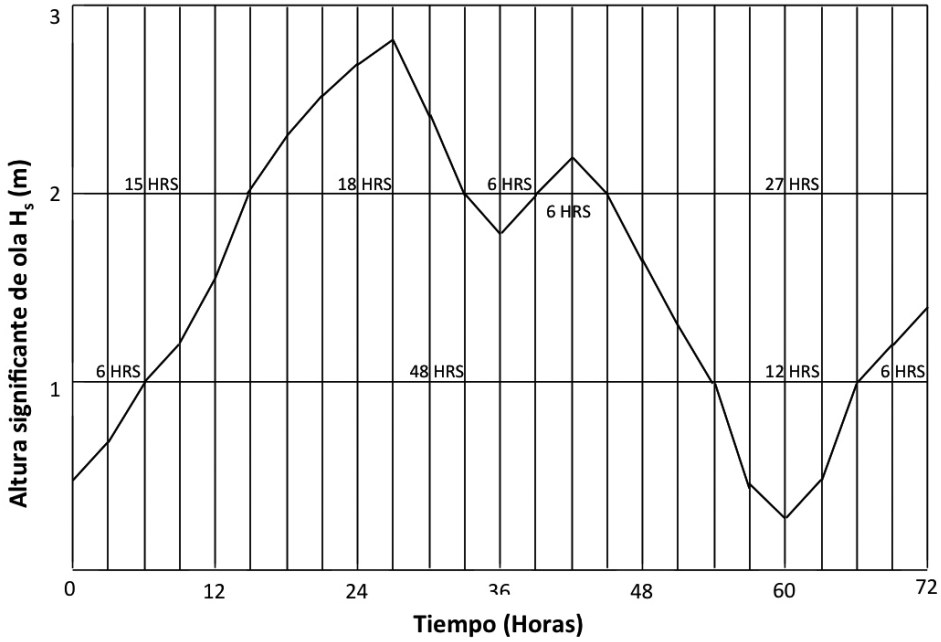


Figura 13. Ejemplo ilustrativo de persistencia sobre y bajo dos umbrales de 1 y 2 metros respectivamente (Kuwashima y Hogben, 1986)

Las persistencias pueden ser interpretadas en términos de duración con respecto a la duración total de la serie, o bien en términos de duración con respecto al número de veces que se registran.

Por ejemplo, en procesos de disolución de salmuera es importante el tiempo en el que la magnitud del oleaje se encuentra por encima de un valor, debido a que en los entornos costeros este agente es el que mayor capacidad tiene para producir la disolución. El tiempo que el oleaje cuenta con una intensidad es fundamental para que el proceso se complete. De igual modo, en los estudios sobre ventanas operativas en construcciones marítimas es básico conocer la duración o persistencia de los periodos de calma, que serán los que permitan realizar las maniobras necesarias. Los pasos a seguir son los siguientes:

Dada la serie temporal de los datos seleccionados como válidos según el criterio de duración de la persistencia, y habiendo definido previamente un umbral, se seleccionan todos los valores que superan el citado umbral. Con ellos se genera un nuevo subconjunto de datos con los que proceder al ajuste.

Se ajusta una función de distribución sobre el conjunto de datos con las funciones definidas en el apartado del método de Máximos Anuales.

Es importante destacar que en este tipo de análisis es necesario contemplar dos variables, la magnitud de la variable principal y el tiempo que la variable supera el umbral, a diferencia de los análisis anteriores, en los que no es necesario registrar la duración de la excedencia. Para este tipo de análisis de excedencias resulta útil representar la información en forma de probabilidad conjunta.

De forma similar al análisis del régimen medio, existen tres aproximaciones para realizar el ajuste de los datos, cuya descripción puede encontrarse en el apartado relativo al Régimen Medio:

- Momentos.
- Máxima Verosimilitud.
- Mínimos Cuadrados.

Sea cual sea el método que se use para el análisis de la cola superior (máximos anuales, POT, persistencias o muestra total), en el caso de realizar el ajuste por Mínimos Cuadrados es necesario dar un paso previo para obtener los ajustes de los datos: la obtención de los índices de punteo. Se dispone de tres métodos para calcularlos, que están basados en:

- La frecuencia de muestreo.

- La distribución de frecuencias.
- Los momentos estadísticos de la muestra.

A continuación se hace un breve repaso de los citados métodos:

Obtención de la probabilidad de no excedencia del suceso extremo basada en la frecuencia de muestreo

También es conocida como posición del punteo de California. Se basa en la frecuencia acumulada de la muestra y define la probabilidad de no excedencia como:

$$F(X) = 1 - \frac{i}{N};\ i = 1,2,...,N \qquad (23)$$

$F(X)$ representa que $F(X)=P(X \leq X_i)$, donde i es el orden que se le ha dado al suceso X (como se explica más abajo) y N el tamaño de la muestra. El proceso para otorgar una posición i a cada muestra de la variable es el siguiente:

- Se ordenan de mayor a menor los eventos registrados.
- Se asigna un orden i de forma creciente a cada uno de los eventos (1,2,3,...,N).
- Se determina la probabilidad de no excedencia aplicando la fórmula anterior.

Obtención de la probabilidad de no excedencia del suceso extremo basada en la distribución de frecuencias

La frecuencia de punteo obtenida por este método es independiente de la función de distribución elegida. Weibull (1939) determina que la frecuencia de punteo obtenida a partir de la media de la variable se define como:

$$F(X) = 1 - \frac{i}{N+1};\ i = 1,2,...,N \qquad (24)$$

Esta es la aproximación más empleada en el método de los Máximos Anuales.

Obtención de la probabilidad de no excedencia del suceso extremo basada en momentos estadísticos

Las siguientes fórmulas de punteo se obtienen a partir de la mediana, la moda y la mediana de la variable, y son dependientes de la función escogida:

Para la función NORMAL (Blom):

$$F(X) = 1 - \frac{i - \frac{3}{8}}{N + \frac{1}{4}};\ i = 1,2,...,N \qquad (25)$$

Para la función GUMBEL (Gringorten):

$$F(X) = 1 - \frac{i - 0.44}{N + 0.12};\ i = 1,2,...,N \qquad (26)$$

Para la función WEIBULL (Petrauskas):

$$F(X) = 1 - \frac{i - 0.3 - \frac{0.18}{c}}{N + 0.21 + \frac{0.32}{c}};\ i = 1,2,...,N \qquad (27)$$

Para la función WEIBULL (Goda):

$$F(X) = 1 - \frac{i - 0.3 - \frac{0.27}{\sqrt{c}}}{N + 0.20 + \frac{0.23}{\sqrt{c}}};\ i = 1,2,...,N \qquad (28)$$

Estas fórmulas de punteo se suelen emplear en los análisis de régimen extremal a partir del método P.O.T.

Autor	Expresión	N=10		N=50		N=100	
		Prob.	T	Prob.	T	Prob.	T
Hazen	$\frac{i-\frac{1}{2}}{N}$	0,95	20	0,99	100	0,995	200
Weibull-Gumbel	$\frac{i}{N+1}$	0,9090	11	0,9804	51	0,9901	101
Johnson Bernard	$\frac{i-0.3}{N+0.4}$	0,9327	14,9	0,9861	72	0,993	143,4
Blom	$\frac{i-\frac{3}{8}}{N+\frac{1}{4}}$	0,8805	8,4	0,9756	41	0,9878	81,8
Gringorten	$\frac{i-0.44}{N+0.12}$	0,9447	18,1	0,9883	89,5	0,9994	178,8

Tabla 3. Fórmulas del punteo definidas por varios autores y sus correspondientes periodos de retorno en función del número de datos de la muestra. Para el uso de estas fórmulas, se ordenan los sucesos de menor a mayor

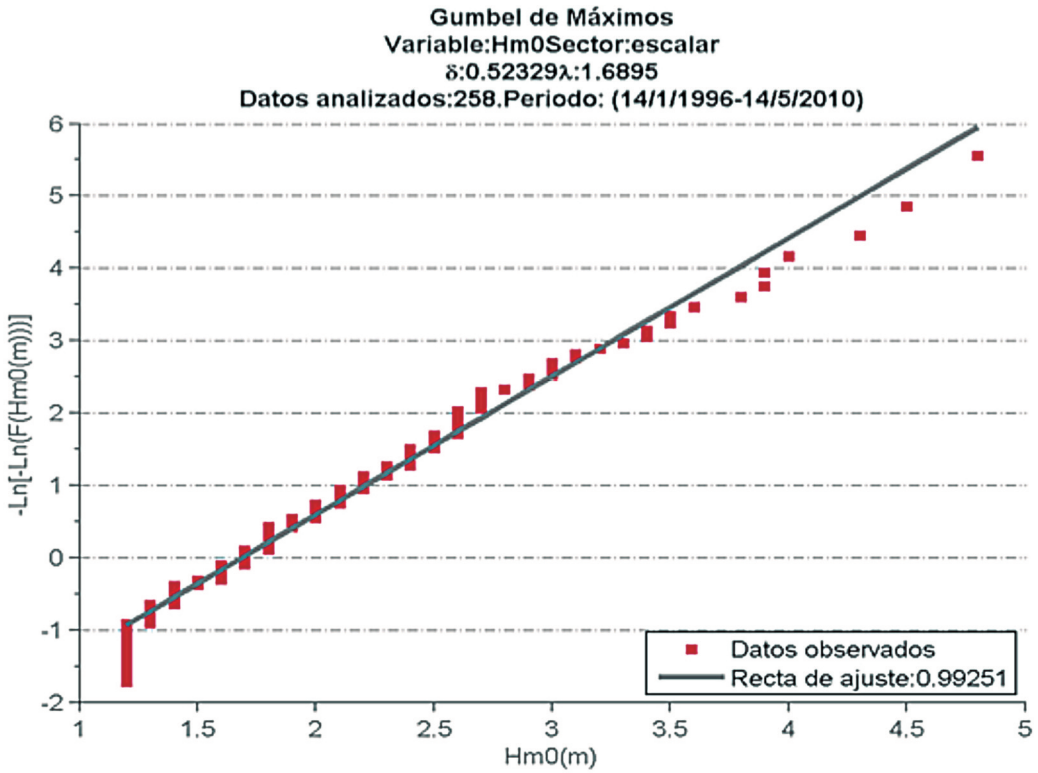


FIGURA 14. Representación en variable reducida de los datos observados (cuadrados rojos) y la recta de ajuste (línea gris). Los parámetros de Gumbel obtenidos son d y l, y el R^2 = 0,99251

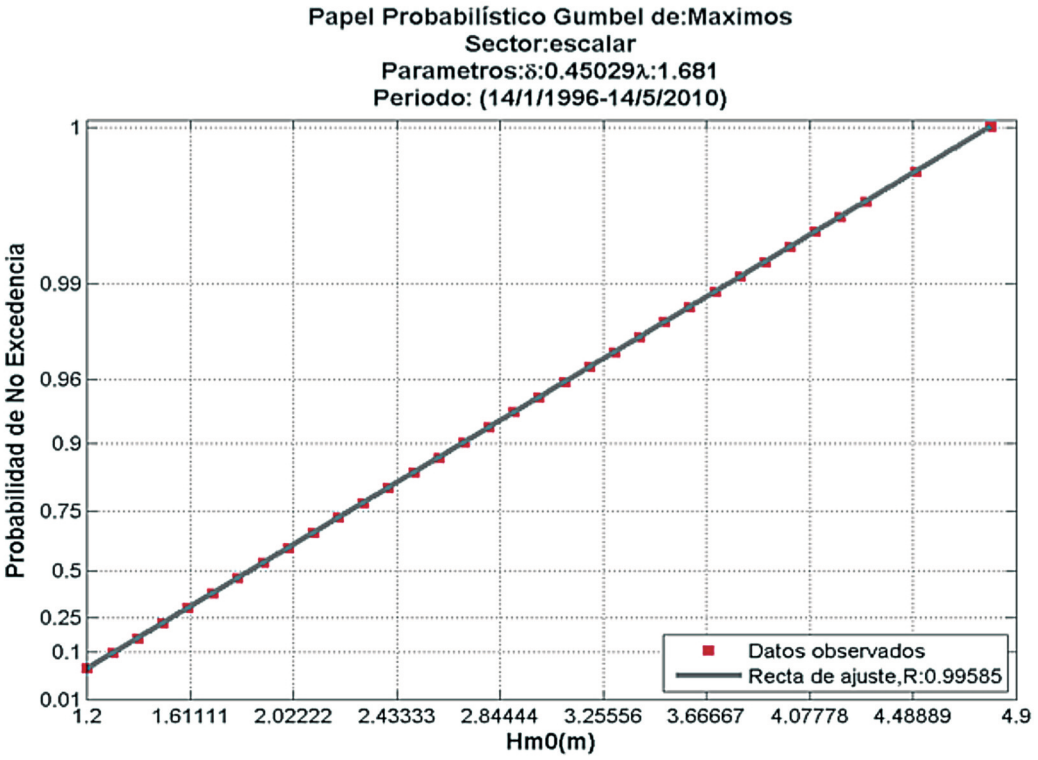


FIGURA 15. Representación en papel probabilístico de los datos observados (cuadrados rojos) y la recta de ajuste (línea gris). Los parámetros de Gumbel obtenidos son d y l, y el R2 = 0.99251. Esta recta permite relacionar la magnitud de la variable con su probabilidad de no excedencia

En resumen:

Para obtener el régimen de la cola superior, se propone seguir el siguiente esquema:

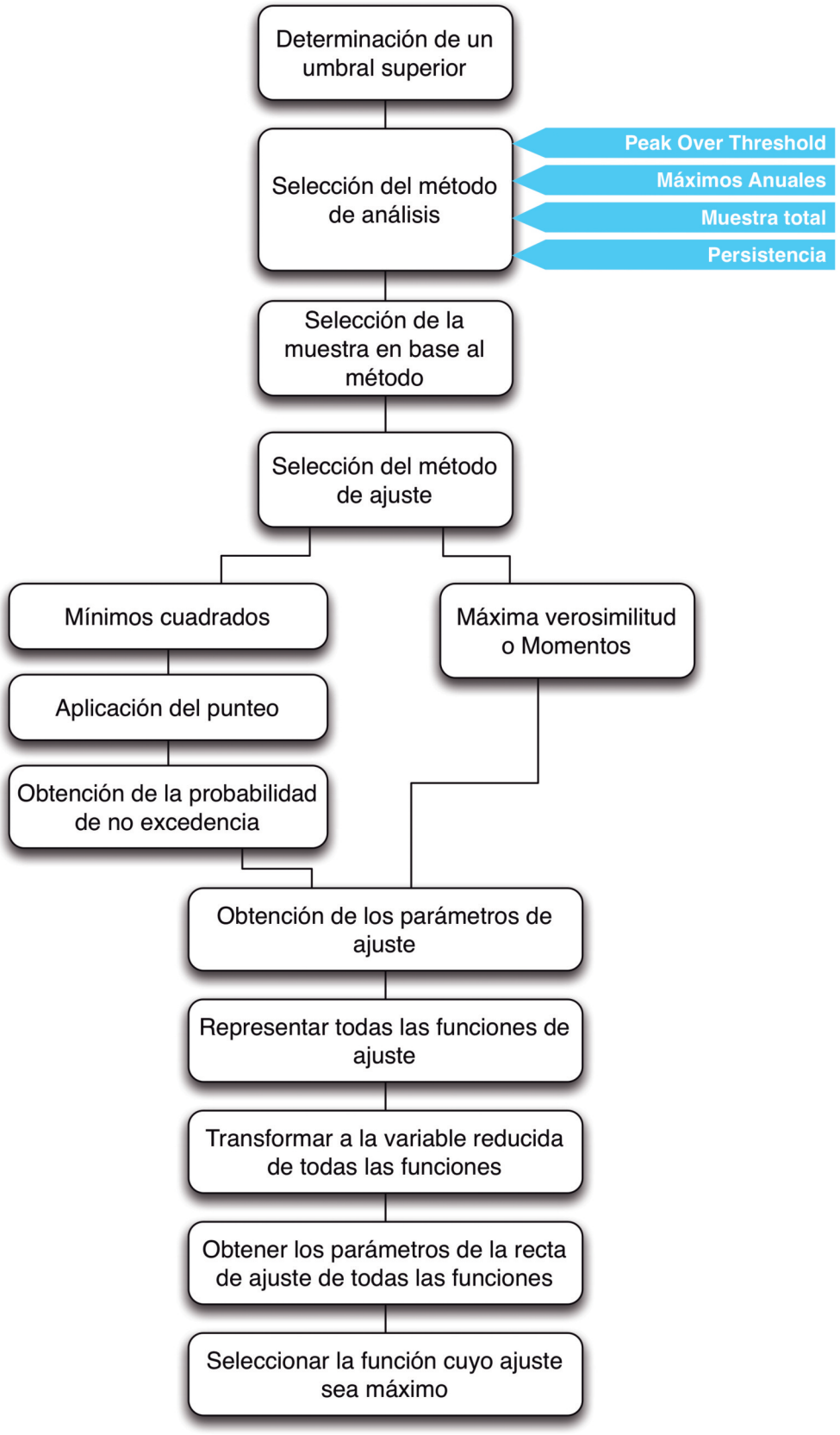


Figura 16. Esquema del procedimiento de obtención de un régimen

3.4. Ejemplos de ajuste de datos de la cola superior

Aplicación del método de máximos anuales, realizando el ajuste con mínimos cuadrados.

Se dispone de una serie temporal de 20 años de duración de altura de ola. Dado que se va a aplicar el método de máximos anuales, se identifica el máximo de cada año en el registro completo y se obtiene la siguiente tabla:

Año	*Hs* (m)
1990	6,9
1991	6,3
1992	6,0
1993	6,6
1994	7,0
1995	7,05
1996	7,4
1997	7,7
1998	9,2
1999	7,26
2000	6,85
2001	6,8
2002	8,6
2003	7,2
2004	8,15
2005	7,8
2006	8,3
2007	8
2008	7,5
2009	7,9

Tabla 4. Valores máximos anuales de Hs durante el periodo 1990-2009

Preparación de los datos para la aplicación de la fórmula del punteo: se ordenan los máximos anuales identificados de mayor a menor y se les asigna el orden "i".

Año	*Hs* (m)	*i*
1990	6,9	1
1992	6	2
1991	6,3	3
1993	6,6	4
2001	6,8	5
2000	6,85	6
1994	7	7
1995	7,05	8
2003	7,2	9
1999	7,26	10
1996	7,4	11
2008	7,5	12
1997	7,7	13
2005	7,8	14
2009	7,9	15
2007	8	16
2004	8,15	17
2006	8,3	18
2002	8,6	19
1998	9,2	20

Tabla 5. Asignación del valor de punteo a los valores de hs ordenados de mayor a menor, correspondientes a los máximos anuales del periodo 1990-2009

Aplicación de la fórmula del punteo. En este caso se ha elegido la Weibull:

$$F(X) = 1 - \frac{i}{N+1};\ i = 1, 2, ..., N \qquad (29)$$

Ajustar los datos a todas las funciones de probabilidad disponibles. Se pone como ejemplo el ajuste a la función Gumbel.

En primer lugar es necesario determinar los prámetros de ajuste de Gumbel λ y δ, puesto que la función de Gumbel está definida como:

$$F(H_s) = \exp\left[-\exp\left(\frac{H_s - \lambda}{\delta}\right)\right] \qquad (30)$$

Año	*Hs* (m)	*i*	*F(X)*
1998	9,2	1	0,9524
2002	8,6	2	0,9048
2006	8,3	3	0,8571
2004	8,15	4	0,8095
2007	8	5	0,7619
2009	7,9	6	0,7143
2005	7,8	7	0,6667
1997	7,7	8	0,6190
2008	7,5	9	0,5714
1996	7,4	10	0,5238
1999	7,26	11	0,4762
2003	7,05	12	0,4286
1995	7	13	0,3810
1994	6,9	14	0,3333
1990	6,85	15	0,2857
2000	6,8	16	0,2381
2001	6,6	17	0,1905
1993	6,3	18	0,1429
1991	6	19	0,0952
1992		20	0,0476

Tabla 6. Valor de la probabilidad asignada mediante la fórmula del punteo a los registros de Hs del periodo 1990-2009

Calcular los valores de la variable reducida según su fórmula correspondiente, que en este caso es la Gumbel de Máximos (es necesario recordar que este procedimiento se realizará con todas las funciones conocidas y se elegirá la que mejor se ajuste) en la que las variables reducidas $h(y)$ y $g(x)$ se definen como:

$$h(y) = -\ln\left(-\ln(y)\right)$$
$$g(x) = x \qquad (31)$$

Donde:

$$y = F\left(H_s\right)_{Gumbel}$$
$$x = \left(H_s\right)_{Gumbel} \qquad (32)$$

Por lo que:

$$h(y) = -\ln\left(-\ln\left(F\left(H_s\right)_{Gumbel}\right)\right)$$
$$g(x) = \left(H_s\right)_{Gumbel-Punteo} \qquad (33)$$

A su vez, la variable reducida debe poder representarse como una recta:

$$h(y) = \frac{g(x)-\lambda}{\delta} = \frac{1}{\delta}g(x) - \frac{\lambda}{\delta} \qquad (34)$$

Año	*Hs* (m)	*i*	*F(X)*	*h(y)*
1990	6,9	1	0,9524	3,0202
1992	6	2	0,9048	2,3018
1191	6,3	3	0,8571	1,8698
1993	6,6	4	0,8095	1,5544
2001	6,8	5	0,7619	1,3022
2000	6,85	6	0,7143	1,0892
1994	7	7	0,6667	0,9027
1995	7,05	8	0,6190	0,7349
2003	7,2	9	0,5714	0,5805
1999	7,26	10	0,5238	0,436
1196	7,4	11	0,4762	0,2985
2008	7,5	12	0,4286	0,1657
1997	7,7	13	0,3810	0,0355
2005	7,8	14	0,3333	-0,094
2009	7,9	15	0,2857	-0,2254
2007	8	16	0,2381	-0,3612
2004	8,15	17	0,1905	-0,5057
2006	8,3	18	0,1429	-0,6657
2002	8,6	19	0,0952	-0855
1998	9,2	20	0,0476	-1,1133

Tabla 7. Año de registro, valor de Hs, índice asignado a Hs, probabilidad de ocurrencia obtenida mediante la fórmula de punteo y su equivalencia en variable reducida

Calcular la recta de ajuste de los datos de la forma:

$$h(y) = m \cdot g(x) + n = m \cdot H_s + n \qquad (35)$$

$$h(y) = \frac{H_s - \lambda}{\delta} = \frac{1}{\delta} H_s - \frac{\lambda}{\delta} \qquad (36)$$

$$m = \frac{1}{\delta} \qquad n = -\frac{\lambda}{\delta} \qquad (37)$$

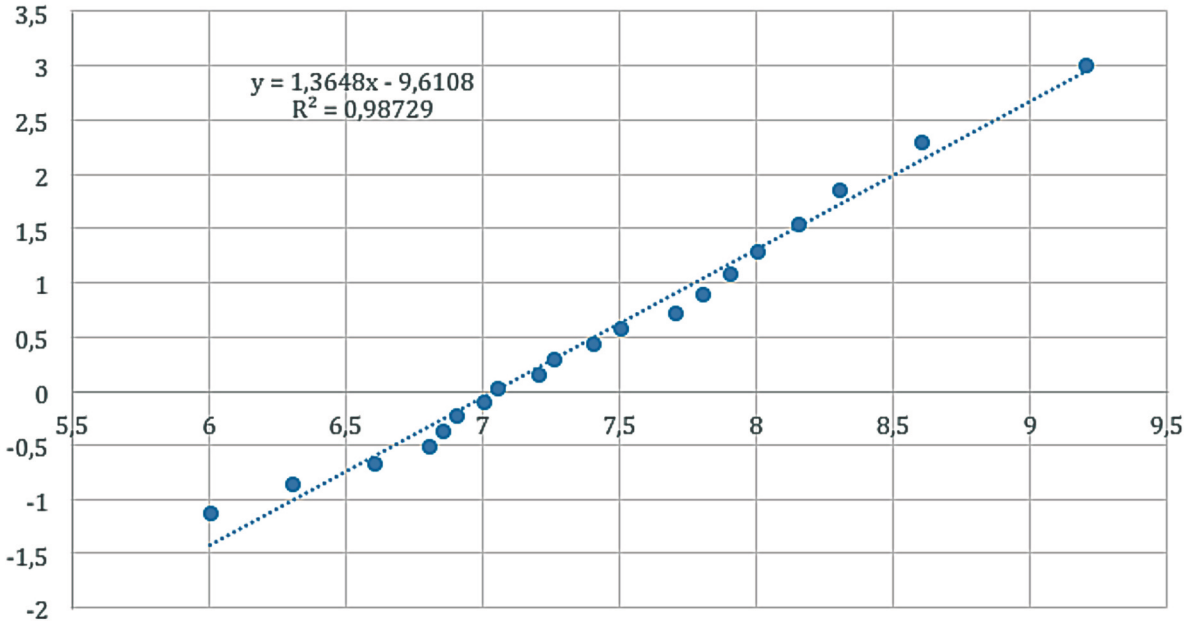


Figura 17. Representación del ajuste de los datos de la tabla 7 para la estimación de parámetros por mínimos cuadrados

Y por tanto:

$$y = \frac{1}{\delta} \cdot H_s - \frac{\lambda}{\delta} = \frac{1}{\delta} \cdot H_s - \frac{\lambda}{\delta} = -1.25 \cdot H_s + 8.85$$

Este proceso se repite con todas las funciones y se estiman los parámetros de la que mayor valor de R^2 obtenga.

4. RÉGIMEN DE COLA INFERIOR

El régimen de cola inferior se suele emplear para caracterizar la operatividad, entendida ésta como la combinación de variables climáticas que hace que las actividades puedan desarrollarse con normalidad. La operatividad representa el valor complementario del estado de parada operativa. Por lo tanto, en contra del uso que se le otorga al régimen de cola superior (el de caracterizar los agentes climáticos que dada su magnitud producen paradas operativas en las instalaciones portuarias), el régimen de cola inferior se emplea para caracterizar los estados climáticos que favorecen la operatividad. No obstante lo anterior, en algunos fenómenos tales como el proceso de disolución de salmuera, la operatividad entendida como la correcta disolución del efluente del emisario en el mar se alcanza cuando la magnitud de los agentes climáticos supera un determinado umbral, y por lo tanto podría considerarse análisis de cola superior. En este caso, el hecho de que la variable que se encuentra principalmente implicada en el proceso de disolución (el oleaje) se encuentre por debajo de un valor límite (el que determina su capacidad de disolución) tiene consecuencias medioambientales.

Realizar un análisis de cola inferior consiste en caracterizar estadísticamente los datos que se localizan por debajo de un determinado umbral, el cual puede definirse mediante la asignación de un percentil o directamente proporcionando un valor por encima del cual los datos son descartados, es decir, no se emplean en el análisis. Una vez que se ha tomado la muestra, se desarrolla una caracterización de la misma semejante a la llevada a cabo para el régimen medio. Dado que estos análisis permiten ajustar las muestras a una distribución conocida de probabilidad cuyos límites superior e inferior son 1 y 0 respectivamente, se obtendrán valores de probabilidad relativa. Por ello, y para poder conocer la probabilidad absoluta de los valores caracterizados será necesario ponderar dicha probabilidad con el peso relativo de la muestra perteneciente a la cola inferior analizada con respecto a la totalidad de los

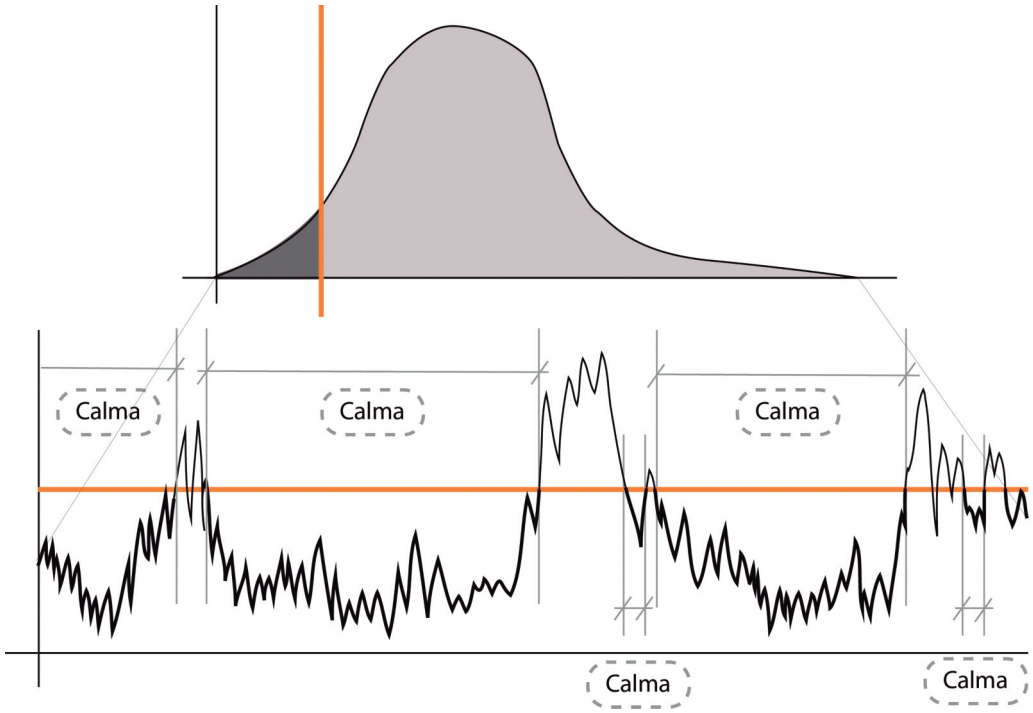


FIGURA 18. Representación de los ciclos de calma y su duración

datos disponibles. Uno de los agentes a los que se presta mayor atención en los análisis de calmas u operatividad es el oleaje, ya que suele ser uno de los mayores condicionantes a la hora de planificar una operación marítima. Algunos casos en los que es habitual caracterizar la cola inferior son los siguientes:

- Fondeos en mar abierto.
- Transporte de elementos flotantes.
- Instalaciones en mar abierto.
- Operaciones portuarias.

No obstante lo anterior, el viento también puede suponer un factor limitante en este ámbito, o al menos condicionante, de la velocidad de avance de las construcciones, tales como el avance en la construcción de un tablero de un puente que se extiende sobre un río o estuario.

Normalmente, los análisis de cola inferior se realizan junto con la duración de las calmas identificadas, ya que dicha duración es la que permite caracterizar las ventanas operacionales.

Como puede verse, una calma es todo aquello que se registra por debajo de un valor umbral. Sin embargo, a efectos prácticos es imprescindible asociar los valores de calma con la duración de las mismas, para poder caracterizar los intervalos de tiempo en los que las condiciones climáticas son adecuadas para realizar operaciones marítimas.

De igual modo es importante caracterizar la duración entre calmas, esto es, el periodo comprendido entre la finalización de una calma y el comienzo de la siguiente, ya que no es lo mismo tener una excedencia sobre umbral de 3 horas entre dos periodos de calma, a tener una excedencia de 24 horas de duración. Esto último modifica la planificación de las operaciones marítimas drásticamente, pues si bien en el primer caso se podría detener la operación durante 3 horas para después continuar, en el segundo caso habría que volver a puerto y desplazarse nuevamente en el momento en el que las condiciones climáticas fuesen favorables.

Es importante destacar que este tipo de caracterización es muy sensible al umbral de calma que se elija, ya que como se muestra en la Figura 19 es posible que se identifiquen como calmas episodios de corta duración, que a efectos prácticos no aportan información relevante en la caracterización de las ventanas operativas.

Los ciclos de calma y operatividad se caracterizan en la ROM 1.0 mediante el parámetro τ_{CO}, el cual define como "duración del ciclo que en general es igual al tiempo de no excedencia del umbral". En el caso de caracterizar el tiempo entre sucesos de forma analítica se puede emplear la función exponencial:

$$F(x) = 1 - \exp[-\mu x] \qquad (39)$$

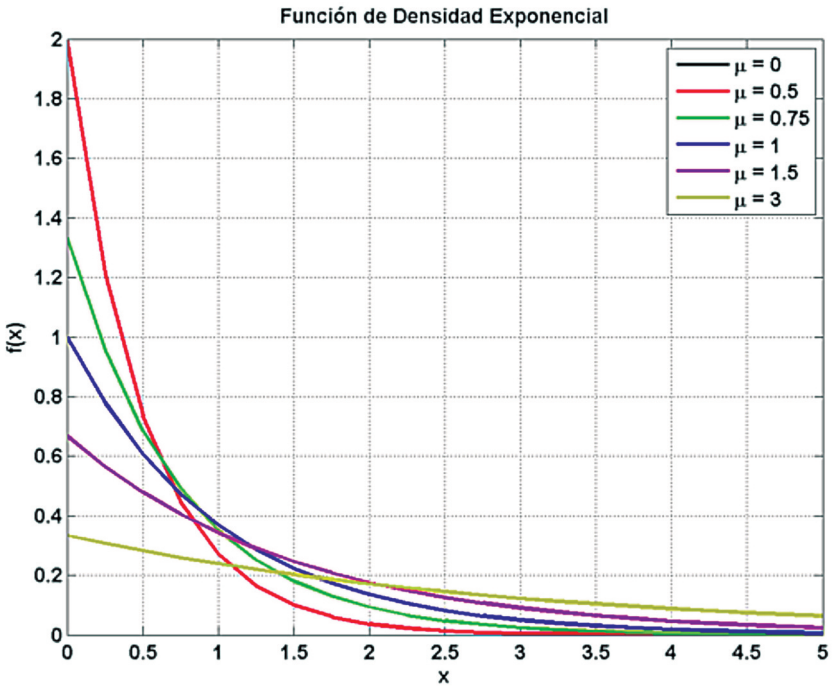


FIGURA 19. Distribuciones exponenciales con distintos valores del parámetro M

ANEXO 6

Incertidumbre y propagación de errores

En este anexo se aborda la definición de incertidumbre así como un breve repaso sobre la teoría de propagación de errores y formulaciones asociadas

1. INCERTIDUMBRES

El proyecto de una obra marítima, al igual que cualquier otra obra civil, se fundamenta en el uso de modelos matemáticos y físicos con los que se trata de conocer de la forma más fidedigna posible el comportamiento de la obra. Por ello es necesario determinar la magnitud de los fenómenos que interfieren con ella. Esta magnitud tan sólo puede determinarse a partir de medidas directas o indirectas. Toda medida de la naturaleza lleva asociada un cierto nivel de incertidumbre.

A las cantidades que *se obtienen* al utilizar un instrumento de medida se denominan mediciones directas. Ejemplo: temperatura.

A las medidas que se *calculan* a partir de mediciones directas se denominan indirectas. Ejemplo: salinidad.

1.1. Definiciones de incertidumbre

La incertidumbre es un parámetro que establece, alrededor del resultado de medición, un intervalo de los valores que también podrían haberse obtenido durante la medición con cierta probabilidad. En la determinación de la incertidumbre deben tenerse en cuenta todas las fuentes de variación que puedan afectar significativamente a la medida.

También se puede definir como el parámetro que caracteriza el intervalo de valores dentro del cual se espera que esté el valor de la cantidad que se mide.

Por ejemplo, las magnitudes aparentemente deterministas, como las dimensiones que debe tener un espaldón, siempre son susceptibles de variación durante el proceso constructivo que se trata de limitar mediante el establecimiento de unas tolerancias en los pliegos. En otros casos, como en el análisis del oleaje, las variables manifiestan una aleatoriedad tal que no es posible realizar una predicción para un instante determinado. Por ello, la descripción de su magnitud tan solo es factible a través de la probabilidad de ocurrencia del conjunto de posibles valores que la variable puede tomar, que a su vez se basan en series temporales medidas con algún tipo de instrumento.

Las incertidumbres se pueden definir como sigue:

- **Inherentes**: consecuencia de variabilidad en poblaciones observables, es decir, de la aleatoriedad en las muestras. En el caso de la naturaleza, esta aleatoriedad es imposible de reproducir.

- **Epistémicas**: causadas por ausencia de conocimiento de los fenómenos fundamentales, como las causas y efectos de los sistemas o la falta de información registrada sobre los mismos. Cuando el conocimiento sobre el fenómeno aumenta, la incertidumbre cambia.

La incertidumbre a la hora de determinar el valor de un factor de proyecto puede estar producida por:

- **La naturaleza de la magnitud que se mide**. La ocurrencia del fenómeno en sí puede estar sujeta a su aleatoriedad: por ejemplo, las manifestaciones extremas de la mayoría de los agentes del medio físico.

- **Errores debidos al instrumento de medición**.

- **El tratamiento estadístico que se le da a los datos**, que puede llegar a convertirse en una de las principales fuentes de incertidumbre. La distribución que se proponga para ajustar una serie de datos será en principio menos fiable cuanto menor sea la muestra de la que se disponga.

- **El modelo físico-matemático** que se emplee para estimar el valor de un factor de proyecto o para describir el comportamiento de la obra frente a los agentes, ya que se trata de una versión limitada o restringida de la realidad.

En principio, las incertidumbres mencionadas anteriormente se pueden clasificar en dos conjuntos, dependiendo del origen de los errores que las provocan:

- **Errores accidentales o aleatorios**: aparecen cuando al medir repetidas veces la misma variable se obtienen valores diferentes, y la probabilidad de estar por encima o por debajo del valor real es la misma. Cuando la dispersión de las medidas es pequeña, se dice que la medida es precisa.

- **Errores sistemáticos**: son una desviación constante de todas las medidas, ya sea por encima o por debajo del valor real. Pueden producirse, por ejemplo, por falta de calibración del instrumento de medición.

La variabilidad de los factores de proyecto se presenta tanto a nivel espacial (en las distintas partes de la obra), como a nivel temporal (a lo largo de la vida útil de la misma).

Con el objetivo de limitar la incertidumbre, lo primero que suele hacerse es definir los tramos y fases de obra. Esto permite caracterizar la variabilidad de los factores de proyecto y modelar la respuesta del tramo en el intervalo de tiempo seleccionado.

EJEMPLO (INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL CÁLCULO DEL REBASE)

El cálculo del caudal de rebase se obtiene a partir de la altura de ola significante a pie de dique Hs,

del periodo de pico Tp, del nivel del mar h y del ángulo de incidencia. La variable Hs se puede obtener a partir de medidas indirectas, ya que el valor de la altura se obtiene integrando los valores de aceleraciones registrados por un acelerómetro en el caso de tratarse de una boya. La variable Tp se obtiene a partir de las medidas directas tomadas con un cronómetro. La variable h se mide indirectamente a partir de los datos de los mareógrafos, etc.

Cada una de estas medidas tiene asociado un error. Por tanto, el caudal de rebase obtenido no se podrá dar como un valor único, sino que tiene asociado un error que se ha propagado mediante el empleo de variables cuya medida tiene a su vez errores asociados. Es importante destacar que la precisión en las medidas es fundamental, porque si no se emplean datos procedentes de instrumentos precisos, los valores obtenidos a partir de los mismos no serán fiables.

1.2. Incertidumbres asociadas al tipo de medida

Las **medidas directas**, que pueden ser reproducibles o no reproducibles, tienen asociada una incertidumbre:

- Cuando las medidas son reproducibles, se les asocia una incertidumbre igual a la mitad de la división más pequeña del instrumento, la resolución.
- Cuando las medidas no son reproducibles, la incertidumbre se obtiene a partir del estudio estadístico de las mediciones, que debe indicar cuál es la tendencia central de las medidas y su resolución.

Las **medidas indirectas** tienen asociada una incertidumbre que se origina de la propagación de la incertidumbre de las medidas directas de las que fueron derivadas.

2. TEORÍA DE PROPAGACIÓN DE ERRORES

2.1. Medidas indirectas

En ocasiones, la variable cuyo error se quiere conocer deriva de la combinación de una serie de variables con una magnitud que ya ha sido medida (medidas indirectas). Si estas variables que dan lugar a aquélla son independientes entre sí y siguen una distribución Gaussiana, se debe estudiar el error asociado a cada una de ellas de forma independiente. En este caso, el error total se calcula mediante la fórmula general de propagación de errores.

Consideraciones iniciales:

- Magnitudes que se calculan a partir de los valores encontrados en las medidas de otras magnitudes.
- Se conoce: $x + \delta x$, $y + \delta y$
- Se calcula $q = f(x,y,...)$
- Se quiere conocer el error de q, calculado a partir de x, y, ...

2.2. Propagación de errores

La propagación de errores es un conjunto de reglas que permite asociar un error a q, donde $q = f(x,y,...)$ conocidas las incertidumbres de x e y ($x + \delta x$, y + δy) y que:

- Permite asignar un error al resultado final.
- Indica la importancia relativa de cada una de las medidas directas.
- Ayuda a planificar mejor el experimento.

2.3. Hipótesis de partida

- **Medidas dependientes**: Es la hipótesis más pesimista, dado que plantea la situación más desfavorable. En este caso se aplica el conjunto de reglas prácticas.
- **Medidas independientes**: Se aplica la fórmula general de propagación de errores.

2.4. Fórmula general para la propagación de errores

Sean las medidas de $x, y,...,w$ con errores $\delta x, \delta y,...,\delta w$ usadas para calcular:

$$q = f(x,y,...,w)$$

Si los errores son independientes y aleatorios, entonces el error de z es la suma en la raíz cuadrada de:

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\delta y\right)^2 + ... + \left(\frac{\partial f}{\partial w}\delta w\right)^2}$$

En ocasiones, la variable z está formada por la combinación de x, y, etc. mediante sumas, restas, multiaplicaciones o divisiones. A continuación se dan algunas reglas prácticas para calcular el error de z asociado a los errores de las variables de partida.

2.5. Propagación de errores en sumas y diferencias

Datos iniciales: $x + \delta x$, $y + \delta y$

Sea su suma $q = x + y$ y su diferencia $q = x - y$

¿Cuál es su incertidumbre δq?

El error absoluto de la suma y de la diferencia de dos o más magnitudes es la suma de los errores absolutos de dichas magnitudes:

$$q = x - y \Rightarrow \delta q = \delta x + \delta y$$

	Suma	Diferencia
Valor máximo de q	$q_{max} = x + \delta x + y + \delta y$ $= x + y + (\delta x + \delta y)$	$q_{max} = x + \delta x + (y - \delta y)$ $= x - y + (\delta x + \delta y)$
Valor mínimo de q	$q_{min} = x - \delta x + y - \delta y$ $= x + y - (\delta x + \delta y)$	$q_{min} = x - \delta x - (y + \delta y)$ $= x - y - (\delta x + \delta y)$

Tabla 1. Propagación de errores en sumas y diferencias

2.6. Propagación de errores en productos

Datos iniciales:

$$x + \delta x = x\left(1 \pm \frac{\delta x}{|x|}\right), \quad y + \delta y = y\left(1 \pm \frac{\delta y}{|y|}\right)$$

Sea su producto $q = x \cdot y$

¿Cuál es su incertidumbre δq?

El error relativo del producto es igual a la suma de los errores relativos:

$$q = x \cdot y \Rightarrow \frac{\delta q}{|q|} \approx \frac{\delta x}{|x|} + \frac{\delta y}{|y|}$$

	Producto
Valor máximo de q	$q_{\max} = x\left(1 + \frac{\delta x}{\|x\|}\right) y\left(1 + \frac{\delta y}{\|y\|}\right) \cong xy\left(1 + \frac{\delta x}{\|x\|} + \frac{\delta y}{\|y\|}\right)$
Valor mínimo de q	$q_{\min} = x\left(1 - \frac{\delta x}{\|x\|}\right) y\left(1 - \frac{\delta y}{\|y\|}\right) \cong xy\left(1 - \left[\frac{\delta x}{\|x\|} + \frac{\delta y}{\|y\|}\right]\right)$

Tabla 2. Propagación de errores en productos

2.7. Propagación de errores en cocientes

Datos iniciales:

$$x + \delta x = x\left(1 \pm \frac{\delta x}{|x|}\right), \quad y + \delta y = y\left(1 \pm \frac{\delta y}{|y|}\right)$$

Sea su producto $q = \frac{x}{y}$

¿Cuál es su incertidumbre δq?

El error relativo del cociente es igual a la suma de los errores relativos:

$$q = \frac{x}{y} \Rightarrow \frac{\delta q}{|q|} \approx \frac{\delta x}{|x|} + \frac{\delta y}{|y|}$$

	Cociente
Valor máximo de q	$q_{max} = \frac{x\left(1+\frac{\delta x}{\lvert x\rvert}\right)}{y\left(1-\frac{\delta y}{\lvert y\rvert}\right)} \cong \frac{x}{y}\left(1+\frac{\delta x}{\lvert x\rvert}\right)\left(1+\frac{\delta y}{\lvert y\rvert}\right) \cong \frac{x}{y}\left(1+\frac{\delta x}{\lvert x\rvert}+\frac{\delta y}{\lvert y\rvert}\right)$
Valor mínimo de q	$q_{max} = \frac{x\left(1-\frac{\delta x}{\lvert x\rvert}\right)}{y\left(1+\frac{\delta y}{\lvert y\rvert}\right)} \cong \frac{x}{y}\left(1-\frac{\delta x}{\lvert x\rvert}\right)\left(1-\frac{\delta y}{\lvert y\rvert}\right) \cong \frac{x}{y}\left(1-\left[\frac{\delta x}{\lvert x\rvert}+\frac{\delta y}{\lvert y\rvert}\right]\right)$

Tabla 3. Propagación de errores en cocientes

2.8. Error del producto por una constante

Datos iniciales: $x + \delta x$

Sea $q = Ax$

¿Cuál es su incertidumbre δq?

Aplicando la regla del producto:

$$\frac{\delta q}{q} \approx \frac{\delta A}{|A|} + \frac{\delta x}{|x|} = \frac{\delta x}{|x|} \Rightarrow \delta q = q\frac{\delta x}{|x|} = Ax\frac{\delta x}{|x|} = |A|\delta x$$

El error absoluto del producto de una constante por una magnitud es igual al producto de la constante por el error absoluto de la magnitud:

$$\delta q = |A|\delta x$$

2.9. Error de una potencia

Datos iniciales: $x + \delta x$

Sea $q = x^n = x \cdot x \cdot \ldots \cdot x$

¿Cuál es su incertidumbre δq?

Aplicando la regla del producto:

$$\frac{\delta q}{q} \approx \frac{\delta x}{|x|} + \frac{\delta x}{|x|} + \ldots + \frac{\delta x}{|x|} = |n|\frac{\delta x}{|x|}$$

El error relativo de una potencia es el producto de la potencia por el error relativo de la magnitud:

$$\frac{\delta q}{q} = |n|\frac{\delta x}{|x|}$$

2.10. Error en funciones de una variable

Datos iniciales: $x + \delta x$

Sea $q = f(x)$ una función cualquiera

¿Cuál es su incertidumbre δq?

Gráficamente:

$$\delta q = \frac{q_{max} - q_{min}}{2}$$

Analíticamente:

$$\delta q = f(x+\delta x) - f(x) = \frac{df(x)}{dx}\delta x$$

Si x se mide con un error δx y se utiliza para calcular $q=f(x)$, el error absoluto de q viene dado por:

$$\delta q = \left|\frac{df(x)}{dx}\right|\delta x$$

2.11. Error en funciones de varias variables

Datos iniciales: $x + \delta x$, $y + \delta y$ usadas para calcular:

$$q = f(x,y)$$

Mediante un desarrollo en serie para el caso de diferentes variables:

$$f(x+\delta x, y+\delta y) = f(x,y) + \frac{\partial f}{\partial x}\delta x + \frac{\partial f}{\partial y}\delta y + \ldots$$

Con lo que:

$$\delta q(x+\delta x, y+\delta y) - f(x,y) \approx \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right|\delta x + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right|\delta y$$

ANEXO 7
Ejemplo metodológico

Análisis del riesgo derivado del rebase en el Contradique Ribera Norte del Puerto de Valencia

1. INTRODUCCIÓN

El objeto del presente anexo es mostrar una aplicación práctica de la metodología propuesta para la evaluación del riesgo, si bien en este caso se formula desde el punto de vista clásico, relacionando los términos probabilidad, vulnerabilidad y consecuencias a través del operador producto. Con este ejemplo se desea hacer tangible el concepto de riesgo, mostrar cómo evaluar los términos que lo constituyen y demostrar que su cálculo permite obtener valiosa información con la que desarrollar mejores planes de acción y gestión sobre la infraestructura. En el transcurso de la redacción de este libro se han abordado diferentes aproximaciones para el cálculo del riesgo. Una de ellas es la que se desarrolla con este ejemplo, gracias al cual se han podido identificar fortalezas y debilidades del planteamiento inicialmente adoptado, a raíz de las cuales se ha determinado que la gestión del riesgo es altamente dependiente del fenómeno que se esté estudiando y de cada instalación portuaria, y que por lo tanto no se puede dar, a día de hoy, una fórmula universal para cuantificarlo. Así pues, con la metodología finalmente desarrollada el cálculo del riesgo es más versátil y adaptable a cada realidad portuaria.

2. ANTECEDENTES

La inexistencia de áreas abrigadas y la necesidad de dar servicio a los grandes buques para aprovechar las economías de escala ha derivado en una gran cantidad de obras de abrigo altamente expuestas al oleaje. Dada la necesidad de amortizar las grandes inversiones realizadas, han aparecido áreas de explotación situadas al trasdós de estos diques que resultan vulnerables al rebase portuario.

FIGURA 1. Episodio de rebase sobre un dique de abrigo que supone una amenaza para un área de explotación que resulta vulnerable

El rebase se plantea como un modo de fallo que, presentándose con alta frecuencia tanto en las fases de construcción como de explotación de las obras, conlleva una serie de riesgos cuya evaluación se considera necesaria para el gestor de la infraestructura. Conocer la magnitud y la evolución de estos riesgos facilita la labor de realizar una planificación económica a lo largo de la vida útil de la obra para conseguir un aumento de la seguridad en cada una de las fases del proyecto.

En los capítulos anteriores, se ha realizado una profunda revisión del concepto de riesgo y de los términos relacionados con el mismo. Se ha planteado una nueva metodología que permite calcular, para el conjunto de modos de fallo, los riesgos presentes en un tramo de obra y su evolución temporal. En este último apartado, se aplica dicha metodología particularizada a la evaluación de los riesgos derivados del fenómeno rebase.

El desarrollo del planteamiento metodológico se apoya en un caso práctico de estudio: el Contradique Ribera Norte del Puerto de Valencia, y se concretan para el mismo las variables a considerar en el cálculo de cada uno de los términos de la formulación del riesgo: probabilidad, vulnerabilidad y coste.

3. DESCRIPCIÓN DEL TRAMO DE OBRA

El *Port America's Cup* fue construido con motivo de acoger los eventos deportivos de la Copa América. El diseño del mismo aprovecha la Dársena Interior del Puerto de Valencia conectada directamente con el mar a través de la apertura de un canal de uso exclusivo para las embarcaciones deportivas. La salida al mar de dicho canal fue conformada mediante un dique y un contradique (contradique Ribera Norte) construidos en el año 2004.

El contradique presenta una traza que arranca perpendicularmente de la costa y se curva hacia el sur en su tramo final para quedar solapado por el extremo del dique de abrigo. Su estructura es de tipo talud, con el extremo formado por cajones prefabricados de hormigón.

FIGURA 2. Port América's Cup, Valencia. Se puede ver el paseo peatonal situado al trasdós del dique, al final del cual se encuentra la zona de restauración

El contradique de abrigo, además de su función de proteger la antedársena y el canal de acceso de los oleajes procedentes del primer cuadrante, posee una función estética debido a la situación que ocupa y a las vistas que ofrece tanto hacia el mar y la playa de la Malvarrosa, como hacia la ciudad y el puerto.

En el año 2006, el contradique se sometió a un proceso de remodelación asociado a la decisión, por parte del Consorcio de Valencia, de implantar en él un paseo peatonal y dos zonas de restauración. El paseo peatonal sobrevuela la coronación de la estructura del espaldón del dique, coronando a la cota +6,00 m. Este paseo peatonal, de estructura metálica y hormigón en masa, se ensancha en dos de sus zonas para dar cabida a sendos módulos de restauración.

Este cambio de uso no pudo ser previsto en el proyecto de construcción originario, por lo que actualmente se están produciendo rebases que llegan a superar en un 20% los caudales permitidos, lo que, por motivos de seguridad, hace inviable la explotación de una de las zonas de restauración, pues los efectos previsibles sobre el paseo son incompatibles con la seguridad de las instalaciones y de las personas que frecuentan la zona.

Esta situación ya pudo apreciarse durante el temporal del Mediterráneo en el año 2007. Los eventos de rebase que tuvieron lugar provocaron la rotura de los cristales y pequeños daños estructurales sobre dicha área de restauración, por lo que finalmente no pudo ser dada en concesión, tal y como estaba previsto en la fase de diseño de la obra completa.

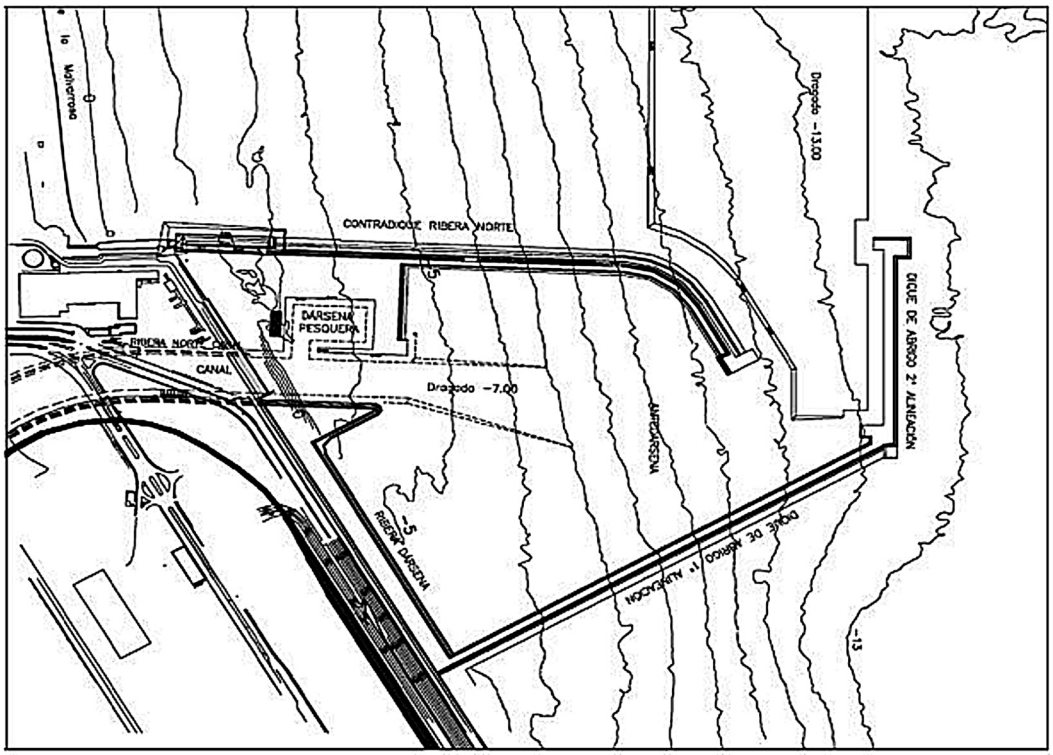


Figura 3. Planta general del Puerto de America's Cup. Fuente: Proyecto de construcción del Paseo Elevado del contradique del Port America's Cup

3.1. Paseo peatonal y áreas de restauración

Como ya se ha mencionado, tras la construcción de las obras de infraestructura, con motivo de la *32nd Americas's Cup*, se decidió instalar un paseo peatonal elevado: "Paseo Marítimo Elevado en la Marina Real Juan Carlos I".

Este paseo se dispone sobre una estructura metálica adosada al muro-espaldón que queda, en algunas zonas, volada sobre el borde de la coronación del mismo.

El proyecto y las obras correspondientes al "Paseo Marítimo Elevado en la Marina Real Juan Carlos I", que incluían un paseo marítimo elevado y unos edificios por encima del espaldón, fueron licitadas por el Consorcio de Valencia en el año 2007 y adjudicadas con un importe total de 8.016.300 €.

Con la construcción de estas instalaciones (que por resultar de interés local tienen una vida útil de 25 a 30 años), los condicionantes de diseño del tramo cambiaron, pues las tasas de rebase que en un principio se podían considerar aceptables por implicar

paradas operativas breves, no resultaron compatibles con la nueva estructura metálica y el uso para el que fue diseñada, es decir, entrañaban riesgos demasiado elevados.

Según el diseño, la zona del paseo peatonal se extiende a todo el desarrollo del contradique (vida útil, 50 años) mientras que las edificaciones de restauración se sitúan en los extremos. El paseo peatonal carece de elementos frágiles, pero la edificación posee paneles, cristales y otros elementos vulnerables frente a la rotura ante el impacto de pequeñas masas de agua.

4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL RIESGO DERIVADO DEL REBASE

Tras la descripción del tramo de obra objeto de estudio, se procede a aplicar la metodología para evaluar el riesgo derivado de la presentación de rebase en alguna zona del mismo.

De acuerdo con la formulación descrita en secciones anteriores de este capítulo, la evaluación del riesgo por rebase se realiza según la siguiente fórmula, particularizada para este modo de fallo:

$$\mathbf{Riesgo}_{\mathbf{Rebase}(q,A,t)} = \mathbf{Riesgo}_{\mathbf{Material}(q,A,t)} + \mathbf{Riesgo}_{\mathbf{Operativo}(q,A,t)} = P_q(A,t)\times\left[\sum_{i=1}^{n} V_{i(q)}\times C_{i(V,A,t)}\right] + P_q(A,t)\times\left[\sum_{j=1}^{m} V_{aj(q)}\times C_{aj(V,A,t)}\right]$$

donde:

- $\text{Riesgo}_{\text{Rebase}(q,A,t)}$ es el riesgo total por rebase, dado en términos económicos [€], al darse un episodio de rebase con un caudal medio asociado *q* [l/s/m] sobre un área A, en un periodo *t* de estudio.
- $\text{Riesgo}_{\text{Material}(q,A,t)}$ es el riesgo [€] por afección al material inmovilizado en A en el periodo *t*.
- $\text{Riesgo}_{\text{Operativo}(q,A,t)}$ es el riesgo [€] por parada operativa de las actividades económicas desarrolladas en A.
- $P_{q(A,t)}$ es la probabilidad de ocurrencia de un episodio de rebase con un caudal medio asociado *q* [l/s/m] en A.
- $V_{i(q)}$ es el nivel de vulnerabilidad de cada uno de los *n* elementos que forman el material inmovilizado en A ante un caudal medio *q* [l/m/s].
- $C_{i(V,A,t)}$ es la estructura de costes [€] asociada a cada uno de los n elementos del material inmovilizado que entra en la formulación del riesgo a causa de una afección material.
- $V_{ak(q)}$ es el nivel de vulnerabilidad ante un caudal *q* [l/m/s] de cada una de las k actividades económicas que se desarrollan en A. Esta vulnerabilidad es percibida como una pérdida operativa o como la imposibilidad de explotar la actividad.
- $C_{ak(A,t)}$ representa la pérdida de beneficios [€] o pérdida de tasas o cánones derivados de una parada operativa de la actividad *k*.

5. ANÁLISIS PREVIO

En un tramo de obra sobre el que se desarrollan actividades económicas, pueden participar distintos actores en las fases de construcción y explotación del mismo. Siguiendo uno de los modelos de gestión presentes hoy en día en el Sistema Español, las figuras que hay que tener en cuenta son la propiedad de la infraestructura y el concesionario encargado de explotar las actividades presentes.

Este estudio se centra en calcular los riesgos que debe asumir la propiedad, en este caso, el Consorcio de Valencia. Se ha considerado que se hace responsable del mantenimiento y conservación de todos los bienes materiales del tramo (paseo y edificios de restauración), y que responde ante la necesidad de que las instalaciones presentes sean funcionales y estén en condiciones óptimas para que el concesionario pueda desarrollar las actividades económicas que le corresponden (actividad de restauración).

Las responsabilidades de la propiedad determinan los riesgos que deberá asumir a lo largo de la vida útil de las instalaciones, así como las variables y los elementos que hay que considerar en el cálculo de cada uno de los términos presentes en la formulación del riesgo.

5.1. Áreas de estudio

La evaluación del riesgo que se realiza en este estudio parte de un análisis previo cuya finalidad es identificar las zonas sobre las que debe aplicarse la metodología propuesta de forma individualizada. Para ello es necesario llevar a cabo una tramificación del tramo de obra (en este caso, el contradique), distinguiendo aquellas zonas en las que puede esperarse diferente nivel de riesgo. Esta división del tramo se realiza sobre la base del nivel de solicitación esperable en cada área y de las posibles consecuencias derivadas del fallo de cada una. Se tramifica por tanto en función de una estimación previa de los riesgos esperables.

En el caso del ejemplo que aquí se expone, se distinguen cuatro áreas. Sobre las áreas 1 y 4 se desarrolla la actividad de restauración. Las áreas 2 y 3 están diferenciadas porque, dada la orientación del contradique y el oleaje predominante de la zona, el área 3 sufre mayores solicitaciones, y por ello, son esperables mayores tasas de rebase.

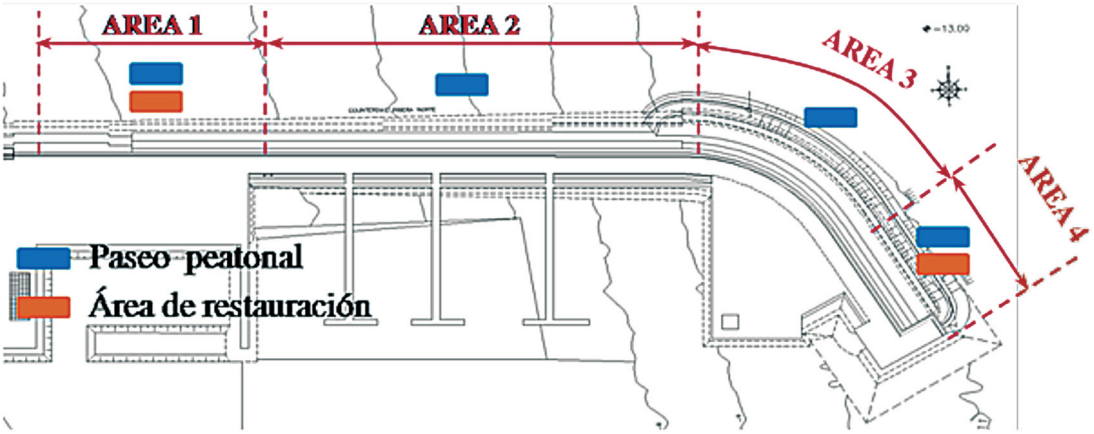


FIGURA 4. Áreas diferenciadas en el contradique Ribera Norte de Valencia. Sobre cada una de ellas se debe aplicar la metodología de evaluación del riesgo de forma individualizada

En cada uno de estos tramos se aplica la formulación propuesta según se describe en los siguientes apartados, que especifican la metodología seguida para obtener cada uno de los términos que maneja la misma: probabilidad de ocurrencia, vulnerabilidad y coste.

5.2. Solicitación climática

La caracterización de las condiciones locales de clima se realiza propagando la serie temporal de parámetros atmosféricos y oceanográficos obtenida de la base de datos de Puertos del Estado. En las inmediaciones del área de estudio se dispone de dos puntos de la red que resultan de interés: el punto SIMAR-44 (2046036), que corresponde al periodo comprendido entre el año 1958 y el 2001, procedente del modelado numérico de alta resolución de atmósfera, nivel del mar y oleaje que cubre todo el entorno litoral español; y la Boya Costera de Valencia II (1619), que contiene datos reales de 2005 a 2012 (Figura 5).

A pesar de que esta segunda serie no resulta estadísticamente significativa, será la empleada en este estudio, pues contempla los datos de los episodios que tuvieron lugar durante el año 2007.

6. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE CAUDALES DE REBASE

En la situación actual, el rebase se describe como un fenómeno local, condicionado tanto por la tipología de la obra de abrigo y sus características geométricas y físicas como por el comportamiento del medio físico en sus inmediaciones (nivel del mar, oleaje y viento). Es en este punto donde se deja ver la necesidad de caracterizar estos factores de proyecto (parámetros geométricos de la obra y agentes climáticos) que se presentan de forma simultánea durante la vida útil del tramo de obra.

En un tramo y en un intervalo de tiempo, un factor de proyecto puede considerarse determinista o aleatorio, dependiendo de su variabilidad con respecto a un valor representativo (Puertos del Estado, 2001).

En este estudio, a los parámetros geométricos que definen la obra y a las propiedades físicas de los materiales empleados en ella se les asigna un valor nominal, que se considera representativo y constante a lo largo de todo el proceso de verificación del fallo por rebase. Serán las variables del medio físico las que se manejarán como variables aleatorias y se caracterizarán asignando una probabilidad de ocurrencia a los estados de mar obtenidos a partir de la serie temporal de la Boya Costera.

A partir de esta serie de datos se establecen los vectores climáticos que definen la solicitación a la que se ve sometido el tramo de obra de estudio. Teóricamente, y según señala la literatura, las variables que hay que considerar para determinar los niveles de rebase son H, T, θ, u_{10}, θu_{10}, h; es decir, altura de ola, periodo, dirección del oleaje, velocidad del viento, dirección del viento y profundidad.

Como se verá más adelante, el modelo de predicción utilizado para calcular los niveles de rebase no incluye variables de viento, a pesar de ser la herramienta más actual que se encuentra disponible. Por esto, junto al hecho de que en la zona de Valencia la carrera de marea no alcance el medio metro y que por ello la profundidad pueda considerarse constante en cada punto del dique, los vectores climáticos que se utilizan en este estudio para definir los estados de mar son los siguientes: V (H, T, θ). Cada uno de estos vectores tiene asociada una probabilidad de ocurrencia que se obtiene a partir del análisis estadístico de la serie temporal.

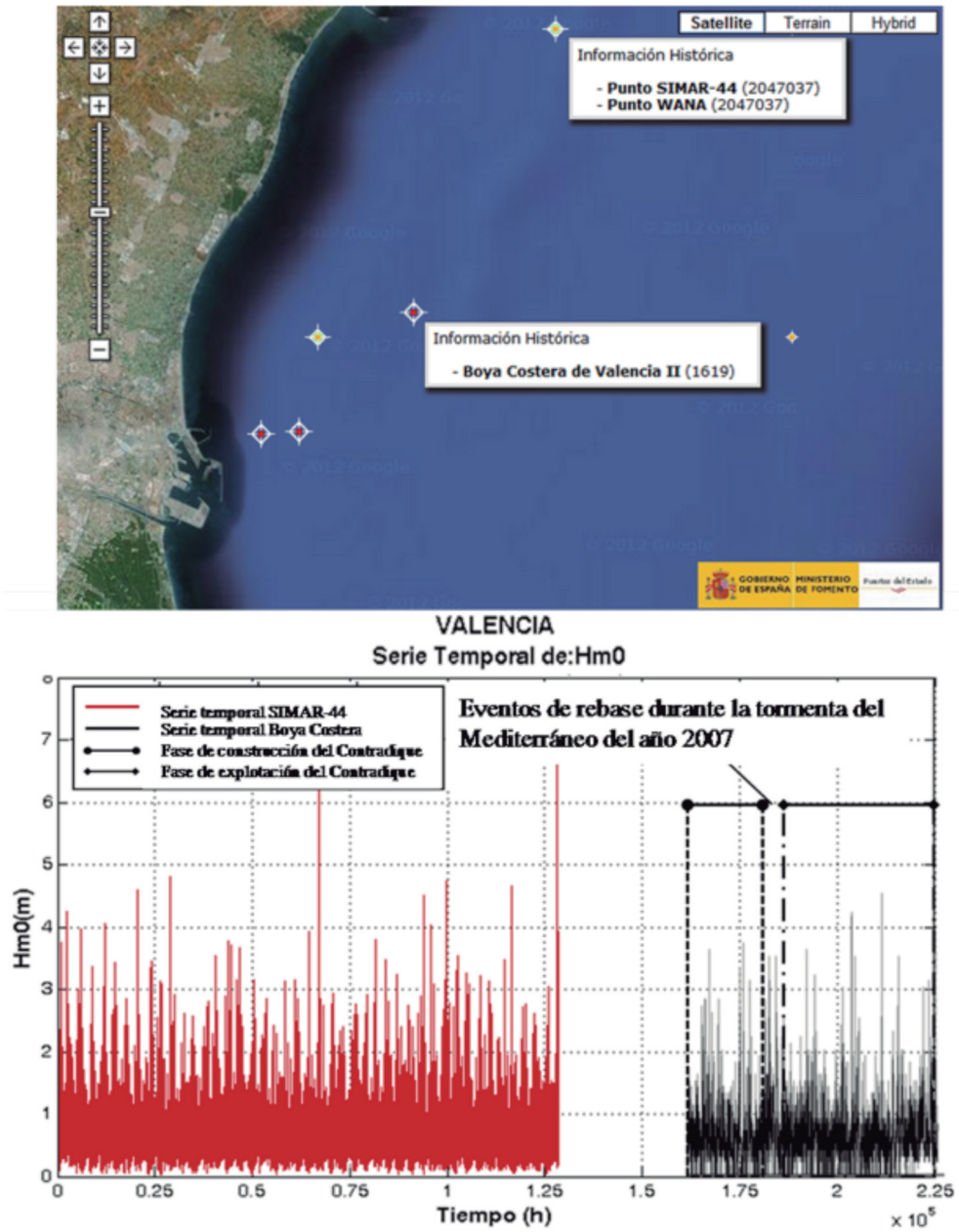


FIGURA 5. Arriba, vista satélite del puerto de Valencia. Abajo, situación del punto SIMAR-44 y de la Boya Costera II junto a series temporales correspondientes con la localización temporal de la construcción y explotación del Contradique Ribera Norte de Valencia

Dado que, como ya se ha comentado, el rebase es un fenómeno local, interesa obtener este conjunto de parámetros en profundidades someras y definir los vectores climáticos que aparecerán a pie de dique en cada una de las cuatro áreas de estudio que se han establecido anteriormente. Para ello es necesario recurrir a un modelo de propagación de oleaje.

La simulación numérica se realiza en este caso utilizando el modelo SWAN[1] ("*Simulating Waves*

[1] SWAN es un modelo numérico que obtiene estimaciones realistas de los parámetros del oleaje en áreas costeras y aguas interiores en función de las condiciones de viento indicadas y las condiciones batimétricas y geométricas del puerto de estudio (ver Booij, Ris y Holthuijsen, 1999). Es un modelo Euleriano en el que la onda evoluciona sobre una malla y los procesos relevantes se modelan como fuentes y sumideros. Simula la generación por viento, la disipación de energía del oleaje por rotura (por descrestamiento o por fondo) o por fricción con el fondo, y la interacción no lineal entre ondas. El modelo fue desarrollado en la Universidad Técnica de Delft (Países Bajos) y ha sido verificado y aplicado en mediciones en campo y pruebas con distintos modelos físicos. La información general del funcionamiento y limitaciones del software se encuentra en http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan

Nearshore"), ejecutado a través de CISNE que surgió como una interfaz del software programado en MATLAB para generar casos de simulación en los que se incluye la influencia de la reflexión del oleaje. Si se reconstruye el espacio frecuencial a pie de dique en cada uno de los puntos de control en los que se propaga el oleaje, se obtiene de esta forma la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los vectores climáticos que resultan de la propagación.

Cada una de estas combinaciones [*H, T, θ*] provocará un determinado caudal de rebase (l/s/m) que dará lugar a un mayor o menor nivel de riesgo. Este viene dado en función del grado de afección que es capaz de causar ese caudal sobre cada tramo y de la probabilidad que tenga asociada.

La herramienta más reciente para calcular los caudales de rebase es la red neuronal "*Neural Network Prediction of Wave Overtopping at Coastal Structures"* (Universidad de Ghent), que utiliza todas las variables resultantes de la revisión de las formulaciones empíricas del estado de la situación arte para predecir los niveles rebasados. Esta herramienta es resultado del proyecto (*Fifth Framework Programme of the EU,* 2001), que resulta el referente más importante en el estudio del fenómeno del rebase.

Las redes neuronales simulan el comportamiento del cerebro humano y son realmente útiles en los casos en los que existe un gran número de variables que condicionan el proceso y se cuenta con un importante volumen de datos. Por tanto, están especialmente indicadas para el estudio de este fenómeno.

En este punto en el que se plantea su uso para el desarrollo metodológico de este trabajo, en su versión Overtopping Predictor Version 1.1, programada en Matlab (Van der Meer, van Gent, Pozueta, Verhaeghe, Steendam & Medina, 2005) se hace necesaria una revisión del conjunto de variables que maneja.

Variables hidráulicas:

- $H_{m0\ toe}$ [m]: Altura de ola significante espectral a pie de dique.
- $T_{m-1,0\ toe}$ [s]: Periodo medio espectral a pie de dique.
- β [°]: Ángulo de incidencia relativo del oleaje contra la estructura.

Variables estructurales:

- h [m]: Profundidad en frente de la estructura.
- h_t [m]: Profundidad sobre el pie de la estructura (medida en el medio del pie)[2].
- B_t [m]: Anchura del pie del dique (medida en la parte superior del pie).
- h_b [m]: Profundidad sobre la berma.
- B_h [m]: Ancho de la berma.
- $\cot\alpha_d$ [-]: Cotangente del ángulo de inclinación de la berma con la horizontal.
- $\cot\alpha_u$ [-]: Cotangente del ángulo de inclinación del manto con la horizontal.
- γ_f [-]: Factor de rugosidad del manto o paramento de la estructura.
- R_c [m]: Francobordo del dique (desde el nivel del mar a la cota de coronación del dique).
- A_c[m]: Francobordo del manto (del nivel medio del mar a la cota de coronación del manto).
- G_c [m]: Anchura de la coronación.

La Figura 6 esquematiza todas las variables descritas:

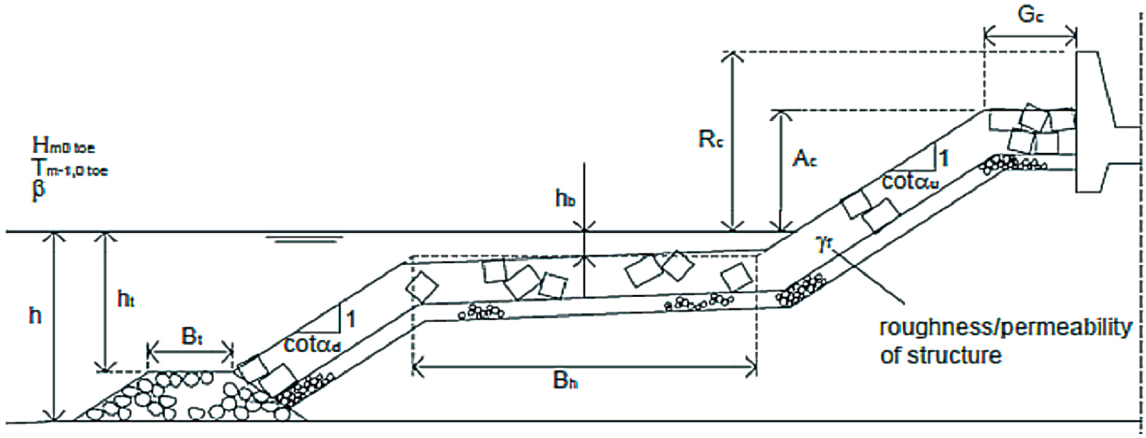


Figura 6. Sección transversal de un dique que esquematiza las 14 variables de entrada de la red neuronal "Neural Network Prediction of Wave Overtopping at Coastal Structures" (Fuente: Verhaeghe, 2005)

[2] Si la estructura no tiene pie, se cumplirá entonces que $h=h_t$.

Conociendo estas variables que el programa pide como datos de entrada ("*inputs*"), se obtiene el caudal rebasado promediado en el tiempo por metro lineal de infraestructura ("*output*") *q* [m^3/s/m].

Particularizando las variables estructurales de entrada en cada una de las cuatro áreas analizadas se calculan los caudales rebasados que aparecen con los vectores climáticos considerados. A cada uno de estos caudales se le asigna la probabilidad de ocurrencia correspondiente al vector climático local en el que tiene origen.

En el análisis de riesgo que se está llevando a cabo, interesa identificar aquellos caudales que superan el umbral establecido en el diseño de la obra y que comprometen la explotación de la misma. En el proyecto de construcción de las instalaciones del Contradique de Valencia se establecieron dos umbrales, asociados a la integridad de los elementos estructurales: 1 l/s/m para el paseo peatonal y 0,001 l/s/m para los edificios de restauración.

La Figura 7 representa los caudales de rebase obtenidos para cada una de las cuatro zonas sobre las que se pretende aplicar la metodología de evaluación de riesgo. Se puede ver cómo en las zonas 2 y 3 las tasas de rebase obtenidas no superan el máximo establecido para el paseo peatonal. En el área 1 existe un único caudal que supera el de 0,001 l/s/m admisible, mientras que en el área 4 existen un total de 11 casos que lo superan, por lo que se concluye que es el tramo con un mayor riesgo asociado. Se decide entonces centrar el estudio de riesgo únicamente en esta área, que fue la que se vio afectada durante los episodios reales que tuvieron lugar en el 2007, imposibilitando la explotación de la misma.

Dado que cada uno de estos caudales lleva asociado una probabilidad de ocurrencia, es posible obtener la cola superior de la función de distribución de esta variable *q* [l/s/m] en el área 4, que se representa en el siguiente gráfico (Figura 8).

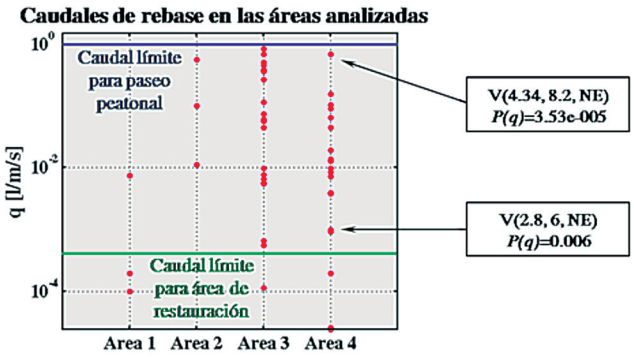


Figura 7. Caudales de rebase obtenidos para cada una de las cuatro áreas de estudio con los vectores climáticos definidos a partir de la serie temporal de la Boya Costera. En las áreas 1 y 4 se supera el caudal máximo admisible para explotar las instalaciones de restauración que se construyeron en las mismas

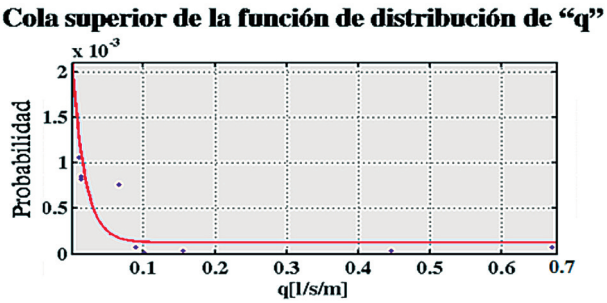


Figura 8. Cola superior de la función de distribución de los caudales de rebase en el área 4 de estudio

7. CONSECUENCIAS ESPERABLES

El estado del conocimiento actual permite estimar los daños esperables causados por el rebase a través de una única variable: el caudal medio medido en l/s/m.

En el apartado anterior se ha calculado la probabilidad de ocurrencia de los caudales medios de rebase que superan el umbral establecido para el área de restauración estudiada. De esta forma, la aplicación de la metodología de evaluación del riesgo por rebase requiere estimar los daños esperables por cada uno de estos caudales.

El concepto de riesgo, como se ha revisado en este capítulo, debe ser manejado en términos económicos para ser integrado en los procesos de planificación y organización de los proyectos. El fenómeno de rebase es capaz de causar daños materiales (degradación de la mercancía, rotura de la maquinaria, daños estructurales, etc.) que suponen pérdidas económicas para la propiedad de la obra. La afección operativa a las actividades desarrolladas al trasdós de las obras de abrigo conlleva a su vez una serie de costes y pérdida de beneficios.

Este conjunto de afecciones hace que la propiedad que concesiona una actividad económica sobre su dominio público, esté expuesta a dos clases de riesgos:

- **Riesgo material**: que se manifiesta por la necesidad de asumir gastos de conservación extraordinaria, reparación y desmantelamiento del inmovilizado material, dependiendo del nivel de afección al que se exponga el bien inmueble (es decir, en función de la vulnerabilidad del mismo).

- **Riesgo operativo**: en el caso de que la propiedad no cumpla con su responsabilidad de mantener y conservar las instalaciones utilizadas por el concesionario, y éste vea comprometida su capacidad de desempeño de la actividad económica que se le atribuye, la propiedad corre el riesgo de dejar de percibir las tasas económicas que están acordadas contractualmente. Este riesgo dependerá de las condiciones estableci-

das en el contrato de concesión, y en este estudio va a estimarse en función de la duración de la parada y del número de paradas operativas a las que se ve expuesto el concesionario.

Para resolver el caso práctico que nos ocupa en este apartado es necesario, como ya se ha indicado, manejar por un lado el término vulnerabilidad, y por otro, la serie de costes asociados a las instalaciones del paseo y del área de restauración. Gracias a esto es posible, como se verá en este apartado, estimar el valor de las consecuencias derivadas de la materialización de un caudal de rebase. Junto al valor de la probabilidad de este caudal, se pueden calcular los riesgos definidos.

7.1. Vulnerabilidad

Como ya se ha mencionado, los estudios realizados hasta el momento definen los umbrales de caudal rebasado promediado en el tiempo, a partir de los cuales se considera que los diques, edificios o infraestructuras pueden sufrir daños, así como los umbrales que, si se superan, pueden suponer un peligro para las personas o vehículos que se encuentren al trasdós de la obra en el momento del episodio (Owen, 1980; Goda, Kishira y Kamiyama, 1975; y Fukuda, Uno e Irie, 1974).

Estos umbrales se establecieron considerando caudales medios de rebase por metro lineal de dique, calculados a partir del volumen total de agua rebasada. Esta práctica es discutida por autores como (Besley, 1999), que asegura que establecer los niveles de seguridad a partir de valores medios es cuestionable, ya que la probabilidad de que a lo largo de un temporal exista un episodio que lleve asociado un caudal mayor que el caudal medio calculado es muy elevada. Por otro lado, este nivel máximo varía significativamente con el tipo de infraestructura (dique vertical, en talud o mixto), provocando daños diferentes (Franco, de Gerloni & van der Meer).

Los autores son conscientes de que la selección de la variable "tasa media de rebase" para caracterizar un episodio de rebase no resulta la opción más adecuada, ya que, como se expone en los párrafos anteriores, no es un valor totalmente representativo de la intensidad de la solicitación. A pesar de ello, el grado de conocimiento actual del fenómeno no permite utilizar otras variables (como la velocidad del flujo o la energía de la masa de agua) para estimar las afecciones provocadas por el rebase debido a que no existen apenas estudios que sirvan de base para este tipo de análisis.

En consecuencia, la estimación de la vulnerabilidad de los elementos que constituyen el material inmovilizado analizado en este trabajo se realiza en función de los umbrales de caudales rebasados promediados en el tiempo y fijados por el proyecto CLASH (Pullen, Allsop, Bruce, Kortenhaus, Schüttrumpf, & van der Meer, 2007), así como por los estudios anteriores ya mencionados. Basándose en

Nivel de vulnerabilidad	Caudal medio q[l/s/m]	Referencia
Dique de talud		
0	**2**	(Goda, Kishira & Kamiyama, 1975)
0,5	**20**	(Goda, Kishira & Kamiyama, 1975)
1	**50**	(Goda, Kishira & Kamiyama, 1975); (Eurotop Overtopping Manual, 2007)
Dique vertical		
0	**50**	(Goda, Kishira, & Kamiyama, 1975); (Eurotop Overtopping Manual, 2007)
0,5	**100**	
1	**200**	(Goda, Kishira & Kamiyama, 1975); (Eurotop Overtopping Manual, 2007)
Edificios e instalaciones		
0	**0,001**	(Goda, Kishira & Kamiyama, 1975); (Fukuda, Uno & Irie, 1974)
0,5	**0,03**	(Goda, Kishira & Kamiyama, 1975); (Fukuda, Uno & Irie, 1974)
1	**1**	(Eurotop Overtopping Manual, 2007)
Personas		
0	**0,03**	(Goda, Kishira & Kamiyama, 1975)
0,5	**0,01**	(Goda, Kishira & Kamiyama, 1975)
1	**0,03**	(Eurotop Overtopping Manual, 2007)

Tabla 1. Relación establecida entre caudal y nivel de vulnerabilidad para cada elemento del material inmovilizado

los mismos, se establece una escala de niveles de vulnerabilidad entre [0, 1] en función del caudal [l/s/m] para cada uno de los elementos materiales que pueden estar presentes en el área de estudio.

A partir de esta escala se obtiene un funcional V(qm) (Figura 9) que proporciona el valor de la vulnerabilidad para los caudales medios presentes en el área de estudio y calculados de la forma descrita en el apartado anterior.

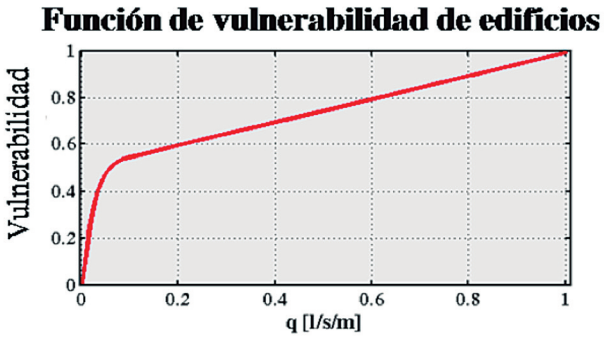


Figura 9. Funcional V(qm) establecido para las instalaciones que forman el material inmovilizado del área de estudio: paseo peatonal y edificio de restauración, identificados con el apartado de edificios e instalaciones de los umbrales que establecen los estudios de la literatura

En el caso de la vulnerabilidad operativa, ésta puede ser estimada en función del tiempo de parada. Este tiempo representa el periodo en el cual la actividad no puede ser explotada debido a la duración de la propia acción del rebase, sumada al tiempo necesario para recuperar las condiciones iniciales anteriores a los episodios.

Si el tiempo de parada resulta superior al tiempo que se considera tolerable en el diseño de la obra, la actividad económica se considera vulnerable a la acción de ese caudal de rebase, Vaj(q)=1, en caso contrario Vaj(q)=0, donde Vaj(q) es la vulnerabilidad operativa de la actividad j ante un caudal medio q[l/s/m].

Para desarrollar el ejemplo metodológico se asume que la actividad de restauración no podrá ser explotada bajo las condiciones de seguridad necesarias cuando aparezcan daños de tipo estructural en las instalaciones que conforman el edificio. Es decir, en el momento en el que se vea superado un caudal de rebase de q>0,001 l/m/s (Fukuda, Uno, & Irie, 1974); (Goda, Kishira, & Kamiyama, 1975), la actividad económica puede considerarse vulnerable.

7.2. Costes

Como ya se ha expuesto, un modo de fallo, y en particular el rebase, puede producir una serie de consecuencias económicas que en el caso de la propiedad se tienen en cuenta en las partidas financieras:

Costes de inmovilizado material, que incluyen los gastos de conservación, reparación, reposición y desmantelamiento de los bienes inmuebles.

7.3. Tasas portuarias (Organismo Público Puertos del Estado, 2011) o cánones

De este conjunto de partidas económicas que hay que tener en cuenta en el cálculo del riesgo, es necesario identificar cuáles serán las que entren a formar parte de la formulación en cada caso de análisis.

Intuitivamente observamos que cuando se presenta un mayor caudal de rebase, mayores serán los daños causados y, por consiguiente, mayores serán las consecuencias económicas, pues los elementos en riesgo se mostrarán más vulnerables ante esa amenaza. Con afecciones menores, debidas a niveles de vulnerabilidad más bajos, menores serán los costes a asumir, como pueden ser los costes de conservación ordinaria. Por lo tanto, según aumente el nivel de vulnerabilidad y las consecuencias causadas, irán incrementándose también los costes (por ejemplo, ante la destrucción total de un edificio de restauración, será necesario enfrentarse a costes de desmantelamiento, de reparación total, así como a una pérdida de las tasas correspondientes a la imposibilidad de explotación del mismo).

En otras palabras, se establece un vínculo entre la estructura de costes que debe emplearse en el cálculo del riesgo y entre el nivel de vulnerabilidad que se manifieste.

Vulnerabilidad	Tipo de gasto
[0 – 0.2)	Gastos de conservación extraordinaria
[0.2 – 0.5)	Gastos de reparación
[0.5 – 0.7)	Gastos de reparación
[0.7 – 1]	Gastos de desmantelamiento + Gastos de reparación

Tabla 2. Estructura de costes en el cálculo del riesgo material en función del nivel de vulnerabilidad que manifieste cada elemento del inmovilizado material analizado

Cuando es necesario asumir costes de reposición, estos pueden venir representados por costes de una nueva inversión necesaria tras los episodios de rebase (que puede estimarse como la inversión inicial del elemento dañado actualizada al año del evento con la tasa de interés oportuna), junto a los costes que implica el no haber amortizado completamente los elementos perdidos. Siendo t0 el año de la inversión inicial, y t1 el año en el que se dan los episodios de rebase, si un elemento del inmovi-

lizado material es destruido total o parcialmente, el coste de reposición puede expresarse como:

$$Cr_j = Ci0_j \times (1 + i)^{(t_1 - t_0)} + Cta_j \times (t1 - t0)$$

Donde:

- Cr_j es el coste de reposición del elemento j.
- $Ci0_j$ es el coste de inversión inicial del elemento.
- Cta_j es la tasa de amortización anual del elemento *j*.
- *i* es la tasa de interés.

Por otro lado, ya se ha visto cómo un evento de rebase es capaz de causar paradas operativas. Esto puede significar pérdidas en términos de costes, o retrasos para la propiedad y para el propio explotador de la actividad. El tiempo total de parada ante un episodio de rebase que causa este tipo de afección es la suma del tiempo que dura el episodio más el tiempo necesario para devolver la actividad a unas condiciones operativas óptimas.

Si la actividad económica va a ser explotada bajo la modalidad de concesión, la pérdida de beneficios que sufre el explotador puede originar a su vez negociaciones entre éste y la propiedad, y las tasas o cánones que inicialmente vienen fijados contractualmente pueden verse modificados hasta que vuelva a recuperarse el equilibrio económico-financiero de la concesión.

Con ello, para estimar el coste operativo, Caj(A, t) de la ecuación 16 puede utilizarse la siguiente expresión:

$$Ca_j(A,t) = Ca_j \times T$$

Con todo lo descrito, se pueden calcular las consecuencias derivadas de un episodio de rebase con un caudal medio asociado. Cada uno de los elementos analizados tendrá una vulnerabilidad en función del caudal medio de rebase que se presente en el tramo en el que se localiza, y esta vulnerabilidad, a su vez, estará vinculada con una determinada estructura de costes que se introducirá en la formulación:

$$\mathbf{Riesgo}_{\mathbf{Rebase}(q,A,t)} = \mathbf{Riesgo}_{\mathbf{Material}(q,A,t)} + \mathbf{Riesgo}_{\mathbf{Operativo}(q,A,t)} =$$
$$\boldsymbol{P_q(A,t)} \times \left[\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{V_{i(q)}} \times \boldsymbol{C_{i(V,A,t)}}\right] +$$
$$\boldsymbol{P_q(A,t)} \times \left[\sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{V_{aj(q)}} \times \boldsymbol{C_{aj(V,A,t)}}\right] =$$
$$\boldsymbol{P_q(A,t)} \times \left[\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{V_{i(q)}} \times \boldsymbol{C_{i(V,A,t)}} + \sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{V_{aj(q)}} \times \boldsymbol{C_{aj(V,A,t)}}\right]$$

La suma total para todos los elementos de inmovilizado material dará lugar a las consecuencias económicas de tipo material. A su vez, habrá que comprobar si ese caudal de rebase es capaz de causar un fallo operativo sobre las actividades desarrolladas en el área de estudio, lo que generaría consecuencias operativas asociadas a pérdidas económicas que habría que sumar a las anteriores. En el caso particular de estudio que aquí se presenta, existen bienes inmuebles (pasarela peatonal y edificios de área de restauración) y una actividad económica explotada por el sector privado. Por lo tanto, hay considerar los dos tipos de riesgos, material y operativo, y establecer qué costes se deberán asumir ante la amenaza del rebase utilizando las formulaciones e indicaciones descritas. Si se considera que el riesgo operativo surge cuando se ve superada la vulnerabilidad de 0,5 para el material inmovilizado (es decir, cuando el caudal medio supera el *q* = 0,03 l/s/m), las consecuencias económicas para los distintos caudales de rebase calculados aparecerán como se refleja en la Figura 10.

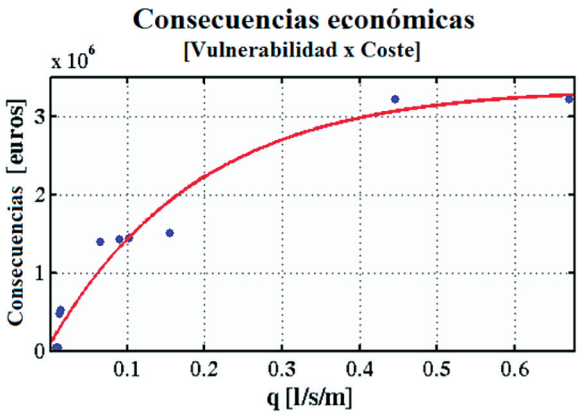


Figura 10. Consecuencias económicas asociadas a la materialización de una serie de caudales de rebase en el área de restauración del Contradique ibera Norte de Valencia

8. CÁLCULO DEL RIESGO POR REBASE

Aplicando la ecuación 16 se obtiene el riesgo por rebase mediante los tres factores calculados: probabilidad, vulnerabilidad y coste. Es decir, para un caudal q, el riesgo será el producto de su probabilidad de ocurrencia y sus consecuencias económicas.

En el caso del área de restauración de Valencia, la siguiente gráfica muestra los resultados de riesgo obtenidos. En la Figura 11 se observa cómo se alcanza un máximo en *q* = 0,047 l/s/m.

9. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La metodología propuesta para la evaluación del riesgo, particularizada para el modo de fallo rebase, ha sido aplicada al caso real del Contradique Ribera Norte del Puerto de Valencia. Al comparar los re-

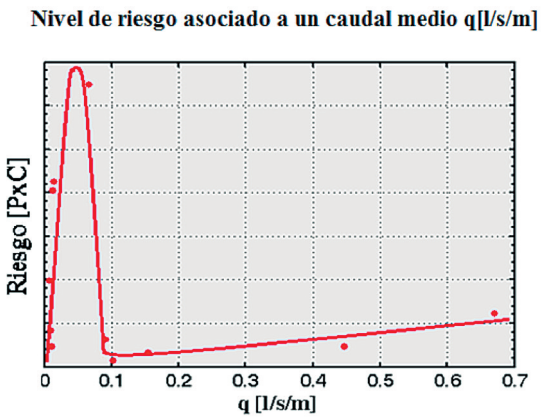


FIGURA 11. Nivel de riesgo obtenido para los caudales de rebase calculados en el área de restauración del Contradique Ribera Norte del Puerto de Valencia

sultados obtenidos con los eventos reales y las consecuencias que tuvieron lugar en 2007 en el área de restauración de la zona este del dique de abrigo, se observa concordancia entre ambos. La Figura 11 muestra que, para el área estudiada, resulta un nivel de riesgo máximo para un caudal medio de rebase de 0,047 l/m/s, el cual se corresponde con una vulnerabilidad de las instalaciones de 0,5076. Este valor indica que debieran haberse previsto unos costes de reparación y de reposición de los elementos de la obra que se vieron reflejados en la rotura de los cristales y en los pequeños daños estructurales que tuvieron lugar. Por otro lado, el caudal resultante para el riesgo máximo supera el admisible para explotar la actividad, lo cual indica que existía un riesgo operativo que debería haberse tenido en cuenta. Este riesgo llevó a que finalmente las instalaciones no pudieran darse en concesión porque no se cumplían los criterios de seguridad requeridos en la explotación.

Al analizar detalladamente la Figura 12, se diferencian claramente dos zonas. La primera está formada por el conjunto de caudales de rebase en torno al riesgo máximo que, a pesar de no suponer consecuencias económicas pésimas, tiene una probabilidad de ocurrencia que no puede ser despreciada durante la vida útil de la obra. La identificación de este conjunto de eventos hace que, sobre la base de sus consecuencias, deba dedicarse un esfuerzo en elaborar un modelo de aprovisionamiento económico capaz de hacer frente a los daños esperados durante las distintas fases de proyecto, lo que implica asumir ciertos riesgos, o por el contrario, tomar medidas para prevenirlos o mitigarlos.

La gestión del riesgo debe focalizarse en acotar o hacer asumibles las consecuencias de aquellos episodios probables durante la vida útil del proyecto.

Para caudales mayores se identifican a su vez un conjunto de eventos capaces de causar daños con altos costes asociados que, debido a la baja probabilidad de ocurrencia que muestran, adquieren un carácter excepcional y no esperable a lo largo de la vida útil. Dada la distribución espacial y temporal que presenta el rebase, eliminar totalmente la incertidumbre en torno a estos fenómenos excepcionales requeriría de inversiones demasiado elevadas y muy difícilmente asumibles por los promotores del proyecto. En estos casos se estudia entonces la necesidad de contratar seguros que cubran las posibles consecuencias.

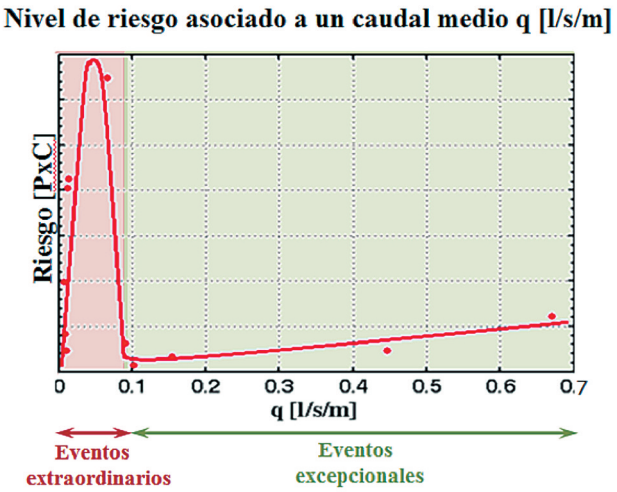


FIGURA 12. Identificación de eventos extraordinarios y eventos excepcionales durante la vida útil del proyecto, en función del nivel de riesgo

Según esta reflexión, a lo largo de la vida útil de un proyecto es probable que aparezcan episodios extraordinarios capaces de causar consecuencias negativas (Vulnerabilidad x Coste). En fases tempranas del proyecto (fase de construcción y primeros años de la fase de explotación), estos eventos implicarán riesgos muy elevados, mientras que en fases posteriores, el propio *cash flow* durante la fase de explotación aportará provisiones económicas capaces de hacer frente a las consecuencias, transformando el riesgo derivado del evento en un riesgo asumible por el proyecto (ver Figura 13). El objetivo del gestor del riesgo por rebase debe estar dirigido, por tanto, a tomar aquellas decisiones necesarias para limitar la magnitud de las consecuencias (VxC), además de elaborar un plan de contingencia y un modelo de aprovisionamiento económico que permita hacer frente a las mismas, de forma que el desarrollo del proyecto no se vea comprometido.

Debe asegurarse que en el desarrollo del proyecto los posibles riesgos puedan resultar asumibles. Tras comprobar la viabilidad del mismo, el reparto de riesgos llevará a los actores participantes en el mismo a tomar las decisiones oportunas que aseguren su continuidad: medidas de mitigación, medidas de prevención o contratación de seguros.

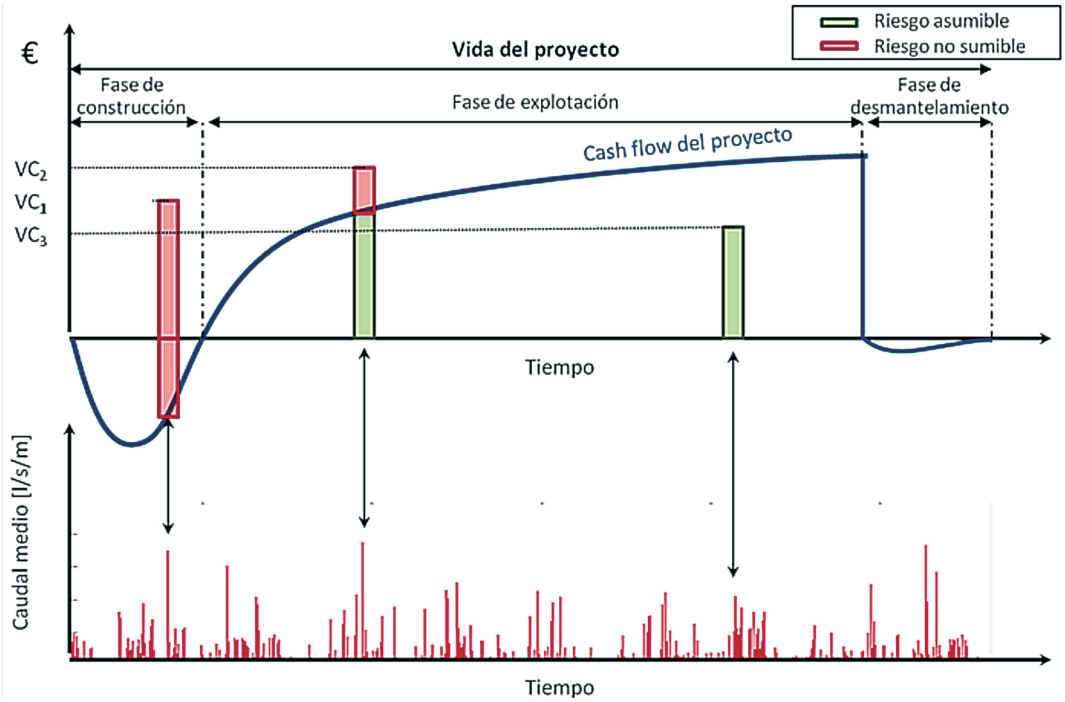


FIGURA 13. Representación del cash flow de un proyecto a lo largo de su vida útil. Los eventos de rebase son capaces de causar consecuencias que en parte pueden ser asumibles por el propio proyecto (riesgo asumible), y otras ante las cuales es necesario tomar medidas para mitigarlas o, en su caso, recurrir a seguros, como sucede en la fase de construcción del proyecto (riesgo del proyecto)

BIBLIOGRAFÍA

Alises, A., Molina, R., Gomez, R., Pery, P. & Castillo, C. (2014). Overtopping hazards to port activities: Application of a new methodology to risk management (POrt Risk MAnagement Tool). *Reliability Engineering and System Safety*, 123, 8-20.

Besley, P. (1999). *Overtopping of seawalls - design and assessment manual*. Environment Agency, Bristol.

Eurotop Overtopping Manual (2007). *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures Assessment Manual.*

Fifth Framework Programme of the EU (2001). *CLASH: Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Predicion and Hazard Analysis on Permisible Wave Overtopping.*

Franco, L., de Gerloni, M. & van der Meer, J. Wave overtopping on vertical and composite breakwaters. *25th International Conference on Coastal Engineering* (págs. 1030-1044). Kobe: ASCE.

Fukuda, N., Uno, T. & Irie, I. (1974). Field observations of wave overtopping of wave absorbing revetment. *Coastal Enigneering in japan*, 117-128.

Goda, Y., Kishira, Y. & Kamiyama, Y. (1975). Laboratory investigation on the overtopping rate of seawalls by irregular waves. *Report of the Port and Harbor Research Institute,* 3-44.

Organismo Público Puertos del Estado (2011). *Texto refundido de la ley de puertos del estado y de la marina mercante.* Madrid: Organismo Público Puertos del Estado.

Puertos del Estado (2001). *ROM 0.0: Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias.* Madrid, Madrid, España: Puertos del Estado.

Pullen, T., Allsop, N., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H. & van der Meer, J. (2007). *EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual.* Archive for Research and Technology on the North Sea and Baltic Coast.

Van der Meer, J., van Gent, M., Pozueta, B., Verhaeghe, H., Steendam, G.-J. & Medina, J. (2005). Applications of a neural network to predict wave overtopping at coastal structures. *ICE, Coastlines, Structures and Breakwaters* (págs. 259-268). London.