

“PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA INSTALACIÓN DE MUSEOS SUBMARINOS CERCA DE LA COSTA”

UNIVERSIDAD DE GRANADA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.



Proyecto fin de carrera realizado por: Ana Lardelli García

Directores del proyecto: Miguel Ortega Sánchez y Alejandro López Ruiz

Departamento: Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica.

RESUMEN

En el presente proyecto fin de carrera se ha procedido a analizar el proceso de instalación de arrecifes artificiales cerca de la costa y a valorar los efectos que pueda causar en ella. Concretamente, se ha orientado hacia el estudio de aquellos que fomentan la práctica de actividades tales como el submarinismo.

En general, se definen como aquellas estructuras que se sumergen en el medio marino con el fin de imitar ciertas funciones de los arrecifes naturales tales como la protección, la concentración, o el incremento de las poblaciones acuáticas, así como el fomento de la investigación.

Tradicionalmente, se han presentado como herramientas de ordenación y protección desde una perspectiva social y ecológica. Sin embargo, menos extendida está la posibilidad de emplearlos con fines recreativos, que implicaría una serie de ventajas:

- Aumento de los ingresos y de las actividades deportivas de buceo y pesca, así como de las industrias náuticas de la zona.
- Incremento del turismo.
- Ayuda a aumentar la biomasa marina, con los materiales convenientes.
- Alejar a turistas de áreas naturales.
- Posibilidad para la investigación marina y recogida de datos de campo.

La instalación de cualquier elemento artificial en el medio marino provoca, con el paso del tiempo, el crecimiento de organismos vivos, desarrollo de algas y fauna marina en su entorno. Se producen, así, unas variaciones en el medio que hay que tener en cuenta. Por ello, en el proyecto se ha realizado el estudio de una serie de parámetros que nos ayuden a valorar la compatibilidad o no del arrecife con la zona de instalación y con su función a cumplir.

En este sentido, se han estudiado algunos aspectos tales como: los materiales más convenientes para la fabricación de los módulos arrecifales, el diseño de los mismos en cuanto a forma, tamaño, si tienen cavidades o no, etc., su localización, evitando ubicarlos en la zona de rompientes o en zonas muy profundas que dificulten el acceso, el clima marítimo, a partir del cual se han estudiado las posibles variaciones inducidas en la dinámica litoral de la playa, estudios previos en cuanto al tipo de medio biótico, perceptual, etc., y otra serie de parámetros que aseguren que el proyecto del arrecife artificial se haga de una manera óptima, respetando al medio marino y a la dinámica litoral, para que cumpla adecuadamente los objetivos económicos y naturales que persigue su instalación.

ÍNDICE

Resumen	2
Índice de tablas	11
Introducción	13
PARTE I: GUÍA	15
1. Caracterización de los arrecifes artificiales	15
1.1. Tipos de módulos arrecifales	15
1.1.1. Estructuras diseñadas y construidas para conformar un arrecife artificial	15
1.1.2. Estructuras no diseñadas originalmente para servir como arrecife artificial	16
1.2. Clasificación de los arrecifes según su uso y finalidad	16
1.3. Arrecifes artificiales destinados a otros usos	18
1.3.1. Arrecifes artificiales con fines turísticos o de ocio	18
1.3.2. Arrecifes para la potencialidad educativa y científica	18
1.3.3. Finalidad, proyecto y materiales para arrecifes de buceo recreativo	18
1.3.4. Pecios con fines recreativos	19
1.4. Ejemplos de arrecifes artificiales recreativos en el mundo	20
2. Justificación y antecedentes	22
2.1. La tradición territorial de estas actividades	22
2.2. Análisis de la actividad de buceo existente	23
3. Estudios previos	23
3.1. Descripción del medio biótico	23
3.2. Descripción del medio socioeconómico	23
3.3. Descripción del medio perceptual	25
3.4. Estudio de la calidad de sedimentos	25
3.5. Calidad de las aguas	26
4. Descripción de la zona de estudio	27
4.1. Localización	27
4.2. Profundidad	27
4.3. Proximidad a la costa y puntos de acceso	28
4.4. Orientación	28
4.5. Distancia respecto a un arrecife natural	29
4.6. Batimetría	29
4.7. Geomorfología	29
5. Diseño de los módulos del arrecife	29
5.1. Funcionalidad	30
5.2. Compatibilidad ambiental	30

5.3.	Durabilidad y estabilidad	30
5.4.	Configuración, forma y tamaño.....	30
5.5.	Complejidad estructural	31
5.6.	Elementos disuasorios	31
6.	Proceso de ejecución	31
6.1.	Construcción de las estructuras	32
6.2.	Zona de embarcación	33
6.3.	Transporte marítimo	33
6.3.1.	Buques cargueros	34
6.4.	Fondeo.....	34
6.4.1.	Instrumentos: sistemas de posicionamiento	36
6.4.2.	Recomendaciones.....	37
6.4.3.	Técnicas de fondeo.....	37
6.4.4.	Ejemplos de instalación en arrecifes específicos.....	39
6.5.	Seguimiento.....	39
6.5.1.	Objetivos	39
6.5.2.	Control de calidad	40
6.5.3.	Garantías de calidad	41
6.5.4.	Alternativas de seguimiento	41
6.6.	Desmantelamiento	42
6.6.1.	Planificación de las obras de desmantelamiento	42
6.6.2.	Proceso de desinstalación, transporte y gestión	43
6.6.3.	Control de calidad de la obra.....	44
7.	Identificación de afecciones de los arrecifes artificiales en cada fase	44
7.1.	Fase construcción	44
7.1.1.	Efectos ambientales.....	44
7.1.2.	Efectos sociales	46
7.1.3.	Efectos sobre el medio histórico y cultural	46
7.2.	Fase de servicio	46
7.2.1.	Efectos ambientales.....	46
7.2.2.	Efectos sociales	48
7.2.3.	Efectos económicos.....	48
7.2.4.	Efectos sobre la infraestructuras y otros usos.....	48
7.3.	Fase de reparación o desmantelamiento.....	49
8.	Modos de fallo del arrecife artificial.....	50
8.1.	Fase de construcción	50

8.1.1.	Puntos críticos	50
8.1.2.	Cimentaciones de gravedad.....	51
8.1.3.	Cimentaciones profundas	53
8.2.	Fase de servicio	54
8.2.1.	Puntos críticos	54
8.2.2.	Cimentaciones de gravedad.....	55
8.2.3.	Cimentaciones profundas	57
8.3.	Fase de desmantelamiento.....	58
8.3.1.	Cimentaciones de gravedad.....	59
8.3.2.	Análisis por subfases.....	59
9.	Determinación del carácter general y operativo del arrecife: probabilidad de fallo ..	60
9.1.	Fase de construcción	60
9.2.	Fase de servicio	62
9.3.	Fase de desmantelamiento.....	64
9.4.	Carácter operativo	64
10.	Clima marítimo	66
10.1.	Conjunto de datos REDEXT	66
10.2.	Puntos WANA.....	68
10.3.	Descripción general del oleaje y del viento.....	69
10.4.	Régimen medio de altura de ola y velocidad de viento en profundidades indefinidas	69
10.5.	Régimen extremal de altura de ola y velocidad de viento en profundidades indefinidas	69
11.	Efectos sobre la dinámica litoral.....	70
11.1.	Efectos de la instalación del arrecife en la costa	70
11.2.	Modelado numérico Delft3D.....	71
12.	Cálculo de las estructuras.....	72
12.1.	Estabilidad de los arrecifes frente al oleaje y las corrientes.....	72
12.1.1.	Estabilidad frente al oleaje	72
12.1.2.	Acción dinámica de la corriente submarina frente al vuelco y deslizamiento de la estructura.	73
12.2.	Estabilidad de los módulos frente a las redes de arrastre	74
13.	Materiales.....	76
13.1.	Factores a considerar para la selección	77
13.2.	Hormigón	78
13.2.1.	Recomendaciones de la ehe08 para hormigones estructurales.....	79

13.3.	Madera.....	82
13.4.	Rocas.....	82
13.5.	Electrodepresión.....	83
13.6.	Materiales reciclados inertes.....	83
13.7.	Barcos.....	83
13.8.	Plataformas marinas.....	85
14.	Fouling.....	85
14.1.	Secuencia del fouling.....	85
14.2.	Factores físicos influyentes en el fouling.....	86
14.3.	Tipos de fouling.....	89
14.4.	Especies representativas.....	90
14.5.	Métodos anti-fouling.....	90
14.6.	Criterios de rendimiento.....	93
14.7.	Costes de pinturas antifouling.....	94
15.	Cimentaciones.....	95
15.1.	Naturaleza y variabilidad del fondo.....	95
15.1.1.	Cartas náuticas.....	95
15.1.2.	Batimetría y naturaleza del fondo.....	96
15.1.3.	Evolución espacial y temporal del fondo.....	96
15.1.4.	Evolución del fondo en presencia de las obras.....	96
15.1.5.	Procesos y evolución espacial y temporal de la morfología litoral.....	97
15.2.	Comportamiento del terreno.....	97
15.3.	Idoneidad frente a los condicionantes morfológicos.....	99
15.4.	Reconocimientos geotécnicos.....	99
15.4.1.	Tipos de reconocimiento.....	100
15.5.	Principios de diseño.....	100
15.6.	Clasificación de las cimentaciones.....	101
15.6.1.	Cimentaciones superficiales.....	101
15.6.2.	Cimentaciones profundas.....	102
15.7.	Cimentaciones más comunes en arrecifes artificiales.....	107
15.8.	Ejemplos de estructuras off-shore.....	109
16.	Valoración de impactos.....	110
16.1.	Geomorfología.....	110
16.2.	Calidad de las aguas.....	111
16.3.	Sedimentos.....	111
16.4.	Comunidades biológicas.....	111

16.5.	Patrimonio histórico	111
16.6.	Socioeconomía	111
16.6.1.	Influencia en las pequerías locales	111
16.7.	Paisaje	112
16.8.	Matrices de valoración de impactos	112
17.	Esquema	114
PARTE II: APLICACIÓN A LA PLAYA DE SAN JOSÉ		116
18.	Justificación de la actuación	116
19.	Medio biótico y caracterización de la vegetación marina	116
19.1.	Comunidades bióticas	116
20.	Medio socioeconómico	119
21.	Descripción de la zona de instalación	121
21.1.	Localización de los módulos arrecifales	122
21.1.1.	Batimetría	122
21.1.2.	Alternativa 1	122
21.1.3.	Alternativa 2	123
21.1.4.	Alternativa 3	124
21.1.5.	Alternativa 4	125
21.1.6.	Alternativa 5	126
22.	Diseño de los módulos del arrecife	127
23.	Materiales	127
24.	Clima marítimo	129
24.1.	Datos para el estudio en la zona	129
24.2.	Oleaje	129
24.2.1.	Descripción general del oleaje	129
24.2.2.	Régimen medio anual de altura de ola en profundidades indefinidas	137
24.2.3.	Régimen extremal de altura de ola en profundidades indefinidas	142
24.3.	Viento	146
24.3.1.	Descripción general del viento	146
24.3.2.	Régimen medio anual de velocidad de viento en profundidades indefinidas 150	
24.3.3.	Régimen extremal de velocidad de viento en profundidades indefinidas .	154
25.	Modelado numérico. Delft3D	158
25.1.	Datos de partida	158
25.1.1.	Datos del oleaje	158
25.1.2.	Batimetría	158

25.2.	Malla	158
25.2.1.	Escenario inicial	158
25.2.2.	Alternativa 1	159
25.2.3.	Alternativas 2 y 3	160
25.2.4.	Alternativas 4 y 5	160
26.	WAVE-SWAN	161
27.	FLOW	163
28.	Resultados	166
28.1.	Dirección este	166
28.1.1.	Régimen medio	166
28.1.2.	Régimen extremal	184
28.2.	Dirección sur	194
28.2.1.	Régimen medio	194
28.2.2.	Régimen extremal	209
29.	Conclusiones	219
30.	Anejo I: Criterios del proyecto y carácter de la obra. Metodología ROM.	221
30.1.	Bases de cálculo	221
30.1.1.	Estudio del comportamiento de la obra y sus tramos	221
30.1.2.	Descripción de los modos de fallo y parada	223
30.2.	Criterios generales de proyecto. Establecimiento de las condiciones de proyecto 224	
30.2.1.	Organización espacial.....	224
30.2.2.	Organización temporal	224
30.2.3.	Condicionantes del proyecto	227
30.2.4.	Carácter del tramo	228
30.3.	Requisitos de proyecto	228
30.3.1.	Requisitos en la vida útil	229
30.3.2.	Requisitos durante otras fases de proyecto.....	231
30.4.	Procedimiento de verificación.....	232
30.4.1.	Verificación de un modo y probabilidad de ocurrencia	232
30.4.2.	Verificación de la probabilidad conjunta frente a los modos principales..	235
30.4.3.	Condiciones de trabajo	236
31.	Bibliografía	238

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Módulo de protección</i>	18
<i>Figura 2: Módulo de producción</i>	18
<i>Figura 3: Módulo mixto</i>	18
<i>Figura 4: Pecio en el Mar Rojo</i>	20
<i>Figura 5. Módulo arrecifal en las Palmas</i>	22
<i>Figura 6: Módulo arrecifal en las Palmas</i>	22
<i>Figura 7: Zona de instalación del arrecife</i>	27
<i>Figura 8: Boya Wavescan</i>	67
<i>Figura 9. Boya SeaWatch</i>	67
<i>Figura 10: Esquema de fuerzas en módulo arrecifal tipo.</i>	74
<i>Figura 11: Cementos para obras portuarias y marítimas según la EHE.</i>	79
<i>Figura 12: Tipos de cementos en función de la aplicación del hormigón según la EHE.</i>	80
<i>Figura 13: Cementos en función las circunstancias de hormigonado según la EHE.</i>	81
<i>Figura 14: Cementos en función de la exposición según la EHE.</i>	81
<i>Figura 15: Reef Ball</i>	108
<i>Figura 16: Esquema de instalación de arrecife artificial</i>	115
<i>Figura 17: Playa de San José</i>	121
<i>Figura 18: Batimetría de San José</i>	122
<i>Figura 19: Escenario 1</i>	123
<i>Figura 20: Escenario 2</i>	124
<i>Figura 21: Escenario 3</i>	125
<i>Figura 22: Escenario 4</i>	126
<i>Figura 23: Escenario 5</i>	127
<i>Figura 24: Módulo arrecifal tipo</i>	127
<i>Figura 25: San José</i>	129
<i>Figura 26: Boya Cabo de Gata</i>	129
<i>Figura 27: Serie temporal de altura de ola</i>	130
<i>Figura 28: Histograma de altura de ola (m)</i>	130
<i>Figura 29: Histograma de Período de Pico (s).</i>	132
<i>Figura 30: Histograma de dirección media de procedencia del oleaje (°)</i>	133
<i>Figura 31: Gráfico de dispersión Hs-Tp.</i>	134
<i>Figura 32: Gráfico de dispersión Hs-Θ</i>	134
<i>Figura 33: Gráfico de dispersión Tp-Θ</i>	135
<i>Figura 34: Rosa del oleaje</i>	137
<i>Figura 35: Función de densidad escalar de Hs en régimen medio.</i>	138
<i>Figura 36: Función de distribución escalar de Hs en régimen medio.</i>	138
<i>Figura 37: Ajuste de la altura de ola en papel probabilístico</i>	139
<i>Figura 38: Función de densidad direccional de Hs en régimen medio, E.</i>	139
<i>Figura 39: Función de distribución de Hs en régimen medio, E.</i>	140
<i>Figura 40: Ajuste de la altura de ola en papel probabilístico</i>	140
<i>Figura 41: Función de densidad direccional de Hs en régimen medio, WSW.</i>	141
<i>Figura 42: Función de distribución de Hs en régimen medio, WSW.</i>	141
<i>Figura 43: Ajuste de la altura de ola en papel probabilístico</i>	142
<i>Figura 44: Gráfica de picos de altura de ola sobre umbral</i>	143
<i>Figura 45: Función de densidad escalar de Hs en régimen extremal.</i>	144
<i>Figura 46: Función de distribución acumulada de Hs en régimen extremal.</i>	144
<i>Figura 47: Función de densidad de Hs en régimen extremal, ENE.</i>	145
<i>Figura 48: Función de distribución acumulada de Hs en régimen extremal, ENE.</i>	145
<i>Figura 49: Función de densidad de Hs en régimen extremal, WSW.</i>	146
<i>Figura 50: Función de distribución acumulada de Hs en régimen extremal, WSW.</i>	146
<i>Figura 51: Histograma de velocidad del viento (m/s)</i>	147

Figura 52: Histograma de dirección media del viento ($^{\circ}$).....	148
Figura 53: Gráfico de dispersión $Vv-\Theta$	149
Figura 54: Rosa del viento.....	150
Figura 55: Función de densidad escalar de Vv en régimen medio.....	151
Figura 56: Función de distribución acumulada de Vv en régimen medio.....	151
Figura 57: Función de densidad de Vv en régimen medio, ENE.....	152
Figura 58: Función de distribución acumulada de Vv en régimen medio, ENE.....	152
Figura 59: Función de densidad de Vv en régimen medio, WSW.....	153
Figura 60: Función de distribución acumulada de Vv en régimen medio, WSW.....	153
Figura 61: Gráfica de picos de velocidad sobre umbral.....	154
Figura 62: Función de densidad escalar de Vv en régimen extremal.....	155
Figura 63: Función de distribución acumulada de Vv en régimen extremal.....	155
Figura 64: Función de densidad de Vv en régimen extremal, ENE.....	156
Figura 65: Función de distribución acumulada de Vv en régimen extremal, ENE.....	156
Figura 66: Función de densidad de Vv en régimen extremal, WSW.....	157
Figura 67: Función de distribución acumulada de Vv en régimen extremal, WSW.....	157
Figura 68: Malla base.....	159
Figura 69: Perspectiva de la batimetría.....	159
Figura 70: Malla de las alternativas 1,2 y 3.....	160
Figura 71: Malla de las alternativas 4 y 5.....	161
Figura 72: Altura de ola significativa en escenario inicial.....	167
Figura 73: Altura de ola significativa en régimen medio, este.....	168
Figura 74: Diferencia de altura de ola en régimen medio, este.....	170
Figura 75: $T_p=2.25s$	170
Figura 76: $T_p=3s$	171
Figura 77: $T_p=4s$	171
Figura 78: $T_p=5s$	171
Figura 79: $T_p=6s$	172
Figura 80: $T_p=7s$	172
Figura 81: $T_p=8s$	172
Figura 82: $T_p=9s$	173
Figura 83: $T_p=10s$	173
Figura 84: $T_p=11s$	173
Figura 85: $T_p=12s$	174
Figura 86: $T_p=13s$	174
Figura 87: $T_p=14s$	174
Figura 88: $T_p=15.4s$	175
Figura 89: Fuerza que induce el oleaje en los módulos en régimen medio, este.....	176
Figura 90: Dirección de procedencia del oleaje en régimen medio, este.....	178
Figura 91: Dirección del oleaje ($^{\circ}$).....	178
Figura 92: Módulos de observación de la alternativa 1.....	179
Figura 93: Tensión tangencial de la alternativa 1.....	180
Figura 94: Módulos de observación de la alternativa 2.....	181
Figura 95: Tensión tangencial de la alternativa 2.....	182
Figura 96: Módulos de observación de la alternativa 3.....	182
Figura 97: Tensión tangencial de la alternativa 3.....	183
Figura 98: Módulos de observación de la alternativa 4.....	183
Figura 99: Tensión tangencial de la alternativa 4.....	184
Figura 100: Altura de ola significativa en escenario inicial.....	185
Figura 101: Altura de ola significativa en régimen extremal, este.....	186
Figura 102: Diferencia de altura de ola en régimen extremal, Este.....	188
Figura 103: H_s en la línea batimétrica de 3m.....	188
Figura 104: Fuerza inducida por el oleaje en régimen extremal, este.....	190

<i>Figura 105: Dirección de procedencia del oleaje en régimen extremal, este</i>	191
<i>Figura 106: Dirección de procedencia del oleaje (°) en régimen extremal, este</i>	192
<i>Figura 107: Tensión tangencial de la alternativa 1</i>	192
<i>Figura 108: Tensión tangencial de la alternativa 2</i>	193
<i>Figura 109: Tensión tangencial de la alternativa 3</i>	193
<i>Figura 110: Tensión tangencial de la alternativa 4</i>	194
<i>Figura 111: Altura de ola significativa en escenario inicial</i>	195
<i>Figura 112: Altura de ola significativa en régimen medio, sur</i>	196
<i>Figura 113: Diferencia de altura de ola en régimen medio, sur</i>	198
<i>Figura 114: $T_p=2s$</i>	198
<i>Figura 115: $T_p=3s$</i>	199
<i>Figura 116: $T_p=4s$</i>	199
<i>Figura 117: $T_p=5s$</i>	199
<i>Figura 118: $T_p=6s$</i>	200
<i>Figura 119: $T_p=7s$</i>	200
<i>Figura 120: $T_p=8s$</i>	200
<i>Figura 121: $T_p=9s$</i>	201
<i>Figura 122: $T_p=10s$</i>	201
<i>Figura 123: $T_p=11s$</i>	201
<i>Figura 124: $T_p=12s$</i>	202
<i>Figura 125: $T_p=13s$</i>	202
<i>Figura 126: $T_p=14s$</i>	202
<i>Figura 127: $T_p=15s$</i>	203
<i>Figura 128: Fuerza inducida por el oleaje en régimen medio, sur</i>	204
<i>Figura 129: Dirección de procedencia del oleaje en régimen medio, sur</i>	206
<i>Figura 130: Dirección del oleaje (°) en régimen medio, sur</i>	206
<i>Figura 131: Tensión tangencial de la alternativa 1</i>	207
<i>Figura 132: Tensión tangencial de la alternativa 2</i>	207
<i>Figura 133: Tensión tangencial de la alternativa 3</i>	208
<i>Figura 134: Tensión tangencial de la alternativa 4</i>	208
<i>Figura 135: Altura de ola significativa en escenario inicial</i>	209
<i>Figura 136: Altura de ola en régimen extremal, sur</i>	211
<i>Figura 137: Diferencia de altura de ola en régimen extremal, sur</i>	212
<i>Figura 138: H_s en la línea batimétrica de 3m</i>	213
<i>Figura 139: Fuerza inducida por el oleaje en régimen extremal, sur</i>	214
<i>Figura 140: Dirección de procedencia del oleaje en régimen extremal, sur</i>	216
<i>Figura 141: Dirección de procedencia del oleaje (°)</i>	216
<i>Figura 142: Tensión tangencial de la alternativa 1</i>	217
<i>Figura 143: Tensión tangencial de la alternativa 2</i>	217
<i>Figura 144: Tensión tangencial de la alternativa 3</i>	218
<i>Figura 145: Tensión tangencial de la alternativa 4</i>	218

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Tipologías de módulos arrecifales, atendiendo al material y diseño</i>	16
<i>Tabla 2: Estructuras usadas como módulos arrecifales</i>	16
<i>Tabla 3: Clasificación de los arrecifes artificiales atendiendo a su finalidad</i>	18
<i>Tabla 4: Objetivos y valores de referencia para la eficacia de arrecifes de uso recreativo</i>	23
<i>Tabla 5: Valores de formación de tómbolos y salientes de Silvester y Hsu</i>	28
<i>Tabla 6: Dimensiones de los buques cargueros</i>	34
<i>Tabla 7: Efectos asociados a los arrecifes artificiales de otros usos</i>	50

Tabla 8: Valor numérico del ISA del tramo y máxima probabilidad de fallo admisible en la fase de construcción según la ROM.....	62
Tabla 9: Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio o vida útil para los E.L.S según la ROM.	64
Tabla 10: Duración de la medida de cada agente.....	67
Tabla 11: Profundidades relativas	73
Tabla 12: Velocidad del agua en función de la profundidad.	73
Tabla 13: Consumo de oxígeno de las distintas especies a una temperatura dada.....	88
Tabla 14: Ventajas y desventajas de cubiertas liberadoras de fouling	93
Tabla 15: Naturaleza más probable del fondo en función de su pendiente según la ROM.	96
Tabla 16: Tipología más adecuada en función de las propiedades del terreno según la ROM.	99
Tabla 17: Categoría de la obra según los índices IRE e ISA a los efectos de la definición de la intensidad de los reconocimientos geotécnicos según la ROM.	100
Tabla 18: Número de puntos de investigación en reconocimientos reducidos y mínimos según la ROM.	100
Tabla 19: Geometría de los pilotes según la ejecución.....	107
Tabla 20: Matriz genérica de valoración de impactos para arrecifes destinados a otros usos. Sistema físico-natural.	113
Tabla 21: Matriz genérica de valoración de impactos para arrecifes destinados a otros usos. Sistema perceptual.....	113
Tabla 22: Matriz genérica de valoración de impactos para arrecifes destinados a otros usos. Sistema socioeconómico.	113
Tabla 23: Especies marinas presentes en Cabo de Gata-Níjar.....	119
Tabla 24: Buques censados por modalidad de pesca.....	120
Tabla 25: Volumen de capturas de la provincia de Almería.	120
Tabla 26: Probabilidades de ocurrencia de H_s (m)	131
Tabla 27: Probabilidades de ocurrencia de T_p . (s).....	132
Tabla 28: Frecuencias de las direcciones del oleaje.....	133
Tabla 29: H_s (m)- T_p (s).....	135
Tabla 30: H_s - Θ	136
Tabla 31: T_p - Θ	137
Tabla 32: Parámetros de ajuste de los regímenes medios direccionales y escalar de altura de ola obtenidos según Weibull.....	138
Tabla 33: Resultados Régimen Medio	142
Tabla 34: Parámetros de ajuste	143
Tabla 35: Probabilidades de ocurrencia de V_v (m/s).....	147
Tabla 36: Frecuencias de las direcciones.....	148
Tabla 37: V_v - Θ	149
Tabla 38: Parámetros de ajuste	150
Tabla 39: Resultados Régimen Extremal.....	153
Tabla 40: Parámetros de ajuste	154
Tabla 41: Constituyentes de marea	164
Tabla 42: Datos introducidos en el WAVE	166
Tabla 43: Cuadro resumen de valores introducidos para el Régimen extremal	184
Tabla 44: Datos introducidos en el Wavecom.....	195
Tabla 45: Cuadro resumen de valores introducidos para el Régimen extremal	209
Tabla 46: Vida útil mínima en la fase de proyecto servicio para obras definitivas	226
Tabla 47: Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio o vida útil para los E.L.U.....	230
Tabla 48: Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio o vida útil para los E.L.S.....	230
Tabla 49: Operatividad mínima en la fase de servicio	230
Tabla 50: Número medio de paradas operativas en el intervalo de tiempo.....	231
Tabla 51: Valor más probable de la duración máxima de una parada operativa (horas).....	231
Tabla 52: Métodos de verificación en función del IRE e ISA	234

INTRODUCCIÓN

- **Motivación**

Dada la poca tradición de esta tipología de arrecife en la costa española y las grandes ventajas que aportan en la zona en la que se lleve a cabo la obra, se ha considerado oportuno realizar un análisis exhaustivo tanto del proceso de instalación, como de las posibles afecciones que pueda causar al medio ambiente y valorar, así, la compatibilidad o no de las obras y su uso generalizado en las zonas costeras.

- **Antecedentes**

La instalación de estas estructuras comenzó en los años setenta, aunque la mayoría surgieron a partir de los noventa, sobre todo en las comunidades mediterráneas como Valencia, Cataluña y Andalucía, siendo esta última la que mayor número de campos de arrecifes artificiales presenta por kilómetros de costa.

Han venido instalándose en aguas exteriores por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, con el objetivo de reducir la actividad pesquera de arrastre en zonas prohibidas, así como para ayudar en la conservación de ciertas especies marinas. En aguas interiores, son las comunidades autónomas así como algunos ayuntamientos en colaboración con empresas privadas, los encargados del desarrollo de la actividad. Igualmente, la Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente ha desarrollado actuaciones de restauración de la franja costera.

Cabe decir que la financiación de la mayor parte de estos proyectos es de tipo pública, si bien cada vez más se están financiando proyectos privados para la instalación de arrecifes con fines, fundamentalmente, recreativos y de turismo.

Como se ha mencionado anteriormente, la gran parte de estos arrecifes registrados son de tipo mixto, siguiéndoles los de protección y a continuación los de producción, siendo por tanto los más escasos los de finalidad turística y de ocio.

- **Objetivos**

El hecho de que estas instalaciones se ubiquen cerca de la línea de costa y a poca profundidad, para que sean accesibles, hace necesario que se cumplan una serie de objetivos:

- **Objetivos generales:** La realización de un estudio metodológico previo a la instalación, en el que se incluyan unas recomendaciones en cuanto a materiales, cimentación, etc., así como la especificación de los parámetros que se puedan ver afectados.
- **Objetivos específicos:** El análisis y la aplicación de los objetivos generales, a una situación real, que exponga los pasos más importantes a seguir en un proyecto de arrecife artificial de estas características y que demuestre la compatibilidad o no de estas estructuras en el medio marino.

- **Organización**

El proyecto se divide pues, en dos partes:

- **Parte I: *Guía metodológica*.** En ella se indican una serie de instrucciones fundamentales a seguir a la hora de llevar a cabo un proyecto para la instalación de

museos submarinos, u otras instalaciones recreativas similares, cerca de la costa. Dicha metodología se ha realizado de tal forma que satisfaga los requerimientos que establece la normativa ROM.

- **Parte II: *Aplicación práctica en la playa de San José.*** En la que se ha explicado y estudiado las variables más importantes que se puedan ver afectadas por la instalación de los módulos arrecifales, tales como la altura de ola, el cambio en la dirección de procedencia del oleaje, la fuerza inducida por el oleaje, las tensiones a las que se puedan ver sometidos los módulos arrecifales en su base, etc. De esta manera y en base a los resultados obtenidos, se pudo proceder a valorar el grado de afección que implican estas estructuras, tanto en el medio ambiente, como en la hidrodinámica de la playa, en los ecosistemas de la zona, etc., e indicar si es posible el uso generalizado de estos arrecifes bajo la seguridad de que no suponen ningún riesgo o que este es admisible, según las condiciones del lugar.

PARTE I: GUÍA

En esta primera parte del proyecto se procede a explicar los pasos a seguir para la instalación de un arrecife artificial cerca de la costa. Se ha considerado la *Guía Metodológica para la Instalación de Arrecifes Artificiales* del Ministerio de Medio Ambiente que relata, también, aspectos importantes relacionados con el tema. Sin embargo, el presente proyecto se centra más en una tipología específica, la recreativa.

1. CARACTERIZACIÓN DE LOS ARRECIFES ARTIFICIALES

Para empezar, conviene especificar los distintos tipos de módulos que pueden componer un arrecife artificial, así como los diferentes arrecifes según el uso al que estén destinados.

Hay que tener en cuenta que es distinta la clasificación de los tipos de módulos, a la finalidad o función del arrecife artificial en su conjunto. Además, conviene distinguir claramente los términos con los que se jerarquizan a los distintos elementos que llegan a formar un arrecife artificial. En orden creciente tenemos:

- **Módulo Arrecifal:** es la unidad o bloque individual
- **Cúmulo Arrecifal:** como el nombre indica, está constituido por módulos arrecifales amontonados en contacto unos con otros.
- **Polígonos Arrecifales:** cuando nos referimos a una unión ordenada de varios módulos arrecifales y/o cúmulos arrecifales. En este grupo se distingue a su vez:
 - **Polígonos de Protección:** en el caso de utilización de módulos de protección distribuidos en alineaciones.
 - **Núcleo Arrecifal o Alveolar:** si hablamos de un agrupamiento de varios módulos o cúmulos arrecifales de producción.
- **Zona Arrecifal:** constituido por varios polígonos arrecifales, con una escala local o regional.

1.1. TIPOS DE MÓDULOS ARRECIFALES

Comentado estos conceptos, se procede a detallar, brevemente, la clasificación de los arrecifes considerando, primero, los distintos tipos de módulos que se pueden instalar, así como las distintas funciones para las que pueden realizarse. Cabe destacar que tradicionalmente en España el uso de estas estructuras se ha ceñido, fundamentalmente, a fines de protección pesquera y producción biológica, sin embargo, en otros países, existen una gran variedad de diseños y usos.

1.1.1. ESTRUCTURAS DISEÑADAS Y CONSTRUIDAS PARA CONFORMAR UN ARRECIFE ARTIFICIAL

Atendiendo a los materiales y el diseño, distinguimos entre:

Bloques de hormigón	Unidades macizas de hormigón armado, de tipo cubico, cilíndrico, piramidal, etc., de gran estabilidad
Estructuras de hormigón con elementos	Similares a lo anterior, pero con unas estructuras anexas que los dotan de mayor complejidad para cumplir el fin disuasivo para

disuasorios o antiarrastre	el que se diseñaron. Estos elementos disuasorios suelen ser vigas de acero o de hormigón, atravesando los bloques horizontal y verticalmente.
Módulos de protección mixta	Es un módulo tanto de protección, por su relación peso/volumen aparente, así como por su distribución en el polígono arrecifal. Suelen tener una mayor superficie, característica propia de los módulos de producción. Se utilizan materiales que favorezcan el mayor crecimiento de la biomasa. Se emplean en protección de zonas previamente degradadas, ocupando fondos arenosos-fangosos.
Módulos de hormigón con orificios alveolares	Módulos de hormigón con fines productivos, compuestos de numerosas cavidades para que los organismos colonicen la superficie
Estructuras cerámicas ramificadas.	Similares a las de hormigón con elementos disuasorios para la protección de ecosistemas frente al arrastre.
Estructuras de PVC y hormigón con cavidades	Presentan un diseño complejo y una gran superficie, tienen una gran eficacia para los fines productivos y científicos.
Diques exentos	Son bloques de hormigón macizo, de múltiples diseños, que se colocan a cierta distancia de la costa protegiéndola de la erosión, además de servir para crear un oleaje adecuado para prácticas de deportes náuticos como el surf.

Tabla 1: Tipologías de módulos arrecifales, atendiendo al material y diseño

1.1.2. ESTRUCTURAS NO DISEÑADAS ORIGINALMENTE PARA SERVIR COMO ARRECIFE ARTIFICIAL

Pecios	Buques colocados en el fondo marino teniendo la capacidad de actuar como arrecifes artificiales. Aumentan la flora y fauna del lugar, además de ser muy empleados para los fines recreativos de buceo y submarinismo.
Rocas naturales	Para la protección de la línea de costa, además de crear un oleaje propicio para deportes acuáticos. Crean escolleras o diques exentos.
Estructuras en desuso	Plataformas de exploración o explotación submarina, vagones de tren, aviones, etc., para la protección del litoral y la producción biológica
Módulos a partir de cenizas de carbón, incineradoras o lodos de dragado	Simulan a los arrecifes naturales.

Tabla 2: Estructuras usadas como módulos arrecifales.

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ARRECIFES SEGÚN SU USO Y FINALIDAD

A la hora de tratar de que los arrecifes instalados cumplan con su función, hay que tener en cuenta aspectos como la forma, el tamaño, material, profundidad, etc. Así pues, procedemos a mencionar los distintos tipos de arrecifes artificiales atendiendo a su uso o finalidad:

TIPOS	APLICACIONES
De actuación en el medio físico	<p>De protección costera: diques exentos o diques-arrecifes, formados por bloques de hormigón. Disipan la energía del oleaje para proteger contra la erosión. Se componen de bloques de hormigón, con efectos en la hidrodinámica y la geomorfología.</p> <p>De turismo y ocio: Suelen ser diques exentos o determinados arrecifes creados con el fin de producir un oleaje propicio para la práctica del surf. Para ello, se deben colocar a una distancia concreta de la costa. Pueden construirse a partir de geotextil, que es un material flexible que evita o reduce los posibles accidentes de los submarinistas y forman, en el conjunto del arrecife, unos bloques denominados geocontenedores que consisten en grandes bolsas rellenas de arena y unidas entre sí para formar una malla de alta tenacidad. Estos diques suelen ser de baja coronación y constituyen una técnica muy empleada en todo el mundo, especialmente en Nueva Zelanda y en Australia. Igualmente, influyen sobre la hidrodinámica y la geomorfología litoral, aunque su principal función sea la práctica, en general, de actividades deportivas y el turismo.</p> <p>Polivalentes: Sirven tanto para la protección costera, como para el uso recreativo y deportivo. Se tratan de barreras artificiales sumergidas que se instalan en algunas playas creando las olas adecuadas para la práctica del surf. Se incluyen las barreras de escolleras exentas que permiten, a la vez, crear playas artificiales en las zonas en las que el transporte litoral no permite la creación de playas naturales y para crear zonas de baño seguras en aquellas playas muy expuestas al oleaje.</p> <p>Creación de zonas de fondeo: constituidas por diques exentos o diques-arrecife que disipan la energía del oleaje, proporcionando así áreas abrigadas para el fondeo de barcos.</p> <p>Protección de infraestructuras marinas: disipan la energía del oleaje, protegiendo infraestructuras marinas.</p>
Actuación sobre la biota	<p>Destinados a la gestión pesquera: pueden ser de protección (protegen los ecosistemas marinos), producción (aumentan la biomasa de los recursos pesqueros), de concentración y los mixtos (protección de los fondos frente a la pesca de arrastre y para aumentar la biomasa). Además, se pueden utilizar como biofiltros, para facilitar la descomposición de la materia orgánica o bien para el desarrollo de la maricultura.</p> <p>Fines ecológicos: incrementar la productividad, la recuperación de ecosistemas o para inducir cambios en ellos.</p>
Otros usos	<p>Buceo recreativo: promueven las actividades deportivas y con ello el turismo.</p> <p>Pesca recreativa: Como se indica, permiten aumentar o gestionar la actividad pesquera recreativa e incrementar el turismo de la zona. Como módulos, se pueden utilizar cualquier estructura de tipo alveolar, diseñada para fomentar la colonización de la estructura. Igualmente, contribuyen a descargar la presión pesquera recreativa que sufren los arrecifes naturales circundantes.</p> <p>Fines científicos: arrecifes de producción o concentración destinados al estudio del comportamiento de los ecosistemas, mediante un seguimiento de</p>

los organismos que colonizan los módulos a partir de diversas técnicas como el marcaje, telemetría, observación, técnicas bioacústicas, etc.

Tabla 3: Clasificación de los arrecifes artificiales atendiendo a su finalidad

A continuación se ilustra la forma típica de algunos de los módulos anteriormente mencionados:

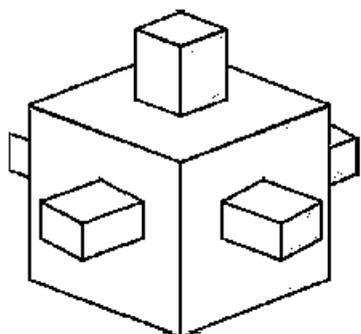


Figura 1: Módulo de protección

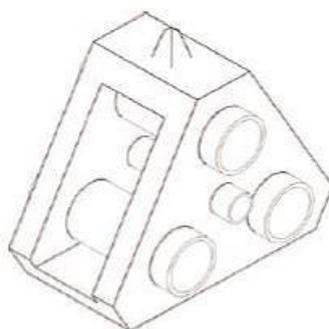


Figura 2: Módulo de producción

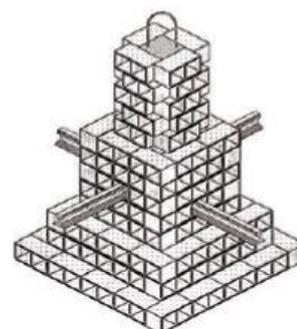


Figura 3: Módulo mixto

1.3. ARRECIFES ARTIFICIALES DESTINADOS A OTROS USOS

Una vez, realizada la clasificación de los distintos tipos de módulos que pueden componer el arrecife, así como los diferentes arrecifes que podemos encontrarnos atendiendo a su finalidad, nos centramos en los arrecifes destinados a otros usos.

1.3.1. ARRECIFES ARTIFICIALES CON FINES TURÍSTICOS O DE OCIO

Se definen como los arrecifes artificiales destinados a fomentar las actividades deportivas y con ello, el turismo y el medio socioeconómico. En este grupo se pueden incluir los pecios, puesto que es un gran atractivo para el submarinismo. Contribuyen, además, a relajar o reducir la presión turística que presentan los arrecifes naturales de la zona en la que se vayan a instalar, pudiendo desviar una gran parte de submarinistas y pescadores deportivos que suelen frecuentarla.

En definitiva, se trata de que sean estructuras atractivas para los usuarios, aunque igualmente son capaces de crear hábitats diversos y abundantes.

1.3.2. ARRECIFES PARA LA POTENCIALIDAD EDUCATIVA Y CIENTÍFICA

Están diseñados para facilitar el estudio de algún hábitat u organismo. Como ejemplo, se puede citar las estructuras Matrix. Este tipo de módulo está formado por distintos materiales y tratan de coleccionar invertebrados que estén asociados a los arrecifes de coral para la investigación. Presentan una forma paralelepípeda y se diferencia en dos partes: la superior, pretende simular las cabezas de los corales, mediante hormigón y algas, y la inferior, consistente en una cesta en la que se recogen dichos organismos para estudiarlos después.

1.3.3. FINALIDAD, PROYECTO Y MATERIALES PARA ARRECIFES DE BUCEO RECREATIVO

Los arrecifes para el submarinismo se pueden utilizar según dos categorías:

- **Los submarinistas interesados fundamentalmente en la actividad en cuestión**

En este caso, se suele mostrar una cierta preferencia por el submarinismo en zonas de naufragio por lo que, normalmente, con el objetivo de cumplir tal fin, se suelen utilizar embarcaciones en desuso en las que la atracción de especies no es un factor importante.

- **Los interesados en la biología del arrecife**

En este segundo grupo, el proyecto se realiza de manera similar al de los arrecifes con fines biológicos.

1.3.4. PECIOS CON FINES RECREATIVOS

Los pecios pueden ser estructuras antrópicas abandonadas en el medio marino accidentalmente, o bien ser estructuras deliberadamente hundidas, en desuso, para cumplir su finalidad principal de turismo y ocio.

Uno de las posibles funciones más comunes a la hora de fondear barcos como formación de arrecifes artificiales, es la práctica del submarinismo. Es, por tanto, necesario adecuar la embarcación a hundir de tal forma que no suponga ningún peligro para los buceadores. Los aspectos más relevantes para tal fin son:

- Sellar aquellas entradas de difícil acceso, así como de compartimentos restringidos como la sala de máquinas.
- Eliminar todos los elementos que sean susceptibles de suponer un peligro para los visitantes, tales como: los vidrios, objetos punzantes o cualquier objeto saliente en el que se puedan quedar enganchados.
- Ensanchar los pasillos, eliminando las paredes prefabricadas, con aperturas amplias hacia el exterior del barco, para facilitar el acceso y que entre más luz y por tanto haya una mayor visibilidad.
- Retirar las escotillas y las puertas del barco.
- Cálculo del lastrado colocando hormigón en masa en su interior. La cantidad se calculará una vez se haya desalojado todo lo habido en el interior del barco y se conozca el francobordo real y la flotabilidad en ese momento. De esta manera, se consigue compensar la flotabilidad positiva de la madera y aseguramos la estabilidad del buque cuando repose en el fondo. Por tanto, si hablamos de buques de acero, no suele ser necesaria esta operación.

Hay que tener en cuenta que, durante las operaciones de acondicionamiento como las anteriormente descritas, es posible que se expongan materiales contaminantes que antes permanecían sellados. En este caso es necesario proceder, nuevamente, a descontaminar la zona. La solubilidad de los materiales que finalmente componen el barco debe ser nula.

Igualmente, habrá que cuidar de la estabilidad del barco y de su integridad durante la fase de transporte, hasta la zona indicada, y el fondeo.

Es importante destacar que no todos los barcos hundidos son aptos para la práctica del submarinismo, pues pueden suponer, alguno de ellos o incluso ciertas partes del mismo, un peligro para los buceadores más inexpertos. Por ello, es necesario indicar, tanto en el proyecto

como en las cartas náuticas, el nivel o la experiencia requerida de los buceadores para poder acceder al arrecife artificial.

Se muestra en la siguiente imagen un ejemplo de pecio:



Figura 4: Pecio en el Mar Rojo

1.4. EJEMPLOS DE ARRECIFES ARTIFICIALES RECREATIVOS EN EL MUNDO

- **Los Cayos de Florida**

Es una zona en la que desde hace más de treinta años, se realizan hundimientos controlados. Entre ellos, reposa uno de los barcos hundidos más grandes del mundo, el Spiegel Grove, destinado en su momento al transporte de tropas de los marines de Estados Unidos. Presenta 170 metros de eslora y descansa apoyado sobre estribor, cerca de Cayo Largo, desde junio del 2002.

- **Scapa Flow**

En Escocia, constituye el mayor enclave europeo de barcos hundidos, provocados por las dos guerras mundiales. Situados concretamente entre las islas Orckney, suponen un paraíso de fauna debido a la vida acumulada en éstos pecios.

Yacen pues:

- Buques alemanes de 177 metros de eslora
- Una serie de cruceros como el Dresden o el Brummer
- Buques intencionadamente hundidos durante las guerras, para evitar el acceso a la zona.

- **Islas Caimán**

Destaca el buque Captain Tibbets, hundido en 1986. Se trata de una fragata soviética adquirida por el gobierno de las Caimán para, una vez limpiado de aceites, cables, etc., hundirlo a menos de 30 metros. Tiene una media de 100 buceadores al día, lo que supone un buen ingreso económico para la zona.

- **México**

Se sitúa en las aguas de Cancún, Islas mujeres y Punta Nizuc, desde el año 2009, el MUSA (Museo Subacuático del Arte). Este proyecto consta de unas 450 esculturas y supone, por tanto, una de las estructuras artificiales sumergidas más grandes del mundo. El museo se dispone dividido en dos galerías: el Salón Manchones y el Salón Nizuc. La primera, a 8 metros de profundidad y la segunda a 4 metros.

Se demuestra que la interacción entre el medio acuático y dichas esculturas forman estructuras arrecifales aptas para la colonización, incrementando así la biomasa. Cada pieza de cada escultura está formada por un material específico, apto para promover la vida acuática, así como para no suponer una contaminación al medio pues poseen un pH neutro con el fin de imitar el sustrato de roca natural. Concretamente, consiste en un cemento de alta calidad, con una vida útil en el medio marino de 300 años.

Estas áreas en las que se sitúan las esculturas, suponen un refugio y un espacio cerrado para la reproducción

Además, las esculturas instaladas disponen de una serie de orificios en las bases para el anclaje de los tornillos al sustrato y ser estables durante episodios de tormenta.

En total, ocupan un área de unos 420 metros cuadrados y suponen un peso total de unas 200 toneladas.

De esta manera, el complejo supone una media de 750.000 visitantes al año, lo que lo convierte en uno de los más visitados en todo el mundo. Además, la ubicación de las esculturas supone un alivio para los arrecifes naturales de la zona.

- **Gran Canaria**

Se disponen en esta zona una buena cantidad de pecios ubicados en distintas franjas costeras:

- **Cérmona II**

Se trata de un barco de 32 metros de eslora y con un casco de acero que se hundió en el año 2002. Está situado en el municipio de Mogán, frente al puerto deportivo, a una profundidad media de 18 metros. Reposa a estribor, sobre un fondo mixto de arena y pequeñas piedras. Presenta un nivel de dificultad para la práctica del submarinismo medio. Las fuerzas de las corrientes del lugar son, igualmente, de magnitud intermedia. Se tarda unos 5 minutos de navegación para llegar al lugar.

- **Meteor II**

Situado en la zona conocida como “El Pajar”, se trata de un hidrofoil de 30 metros de eslora y 8 de manga que se hundió en el año 2003 a una profundidad de 20 metros. La exigencia para la práctica del submarinismo es mínima pues el nivel de dificultad es reducido, así como la fuerza de las corrientes escasa.

- **Arona**

Ubicado en las Palmas de Gran Canaria, se trata de un barco de 110 metros de eslora que se hundió por accidente en el año 1972 debido a un incendio en la sala de máquinas. Se encuentra a una profundidad de unos 30 metros, dispuesto sobre su costado de estribor. La dificultad para

el desarrollo de las actividades de buceo es muy baja, puesto que la influencia de las corrientes es escasa, lo que lo convierte en un sitio idóneo tanto para buceadores expertos como inexpertos.

- **Arrecife Artificial de Arguinegún**

Localizado en el municipio de Mogán, a unos 40 minutos de tiempo de navegación. Se instalaron a una profundidad de entre 20 a 23 metros sobre un fondo arenoso. Están constituidos por unas estructuras de hormigón que conforman el arrecife artificial o biotopo. Además del buceo recreativo, favorecen la proliferación de diferentes especies.



Figura 5. Módulo arrecifal en las Palmas



Figura 6: Módulo arrecifal en las Palmas

2. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES

A la hora de instalar un arrecife artificial, es necesario razonar los motivos que justifiquen la necesidad del mismo.

Como se ha explicado previamente, un mismo tipo de arrecife puede tener múltiples prestaciones, de manera que su empleo se base en mejorar o solucionar los problemas existentes en una zona del territorio.

Así pues, en dicha justificación debe de incluirse los antecedentes del lugar y los puntos o problemas específicos que lleven a la utilización del mismo como la mejor herramienta para alcanzar unos objetivos concretos.

Para los arrecifes de otros usos, recreativos o científicos, se debe documentar:

2.1. LA TRADICIÓN TERRITORIAL DE ESTAS ACTIVIDADES

En este sentido, conviene conocer:

- **El número de usuarios potenciales directos**

Para conocer o estimar este dato, nos podemos basar en el número de licencias deportivas expedidas en la provincia en la que se vaya a instalar, así como en los alrededores, o bien según el número de empresas relacionadas con esta actividad.

- **Número de personas implicadas indirectamente**

Por ejemplo, en los hoteles, bares, restaurantes o servicios de mantenimiento.

- **Posibilidad de mejorar las actividades de la zona**

Explicando la actividad existente, y las carencias que presenta.

- **Valor económico de las actividades conexas**

Se trata de analizar la facturación que se genera y cómo se reparte entre los distintos sectores asociados a la actividad.

- **Realizar encuestas**

En las diferentes asociaciones de clubes que desarrollan la actividad para conocer la demanda existente.

2.2. ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD DE BUCEO EXISTENTE

A continuación, se especifica el grado de eficacia de estos arrecifes, atendiendo a unos valores de referencia, en base a las visitas realizadas:

Tipo de arrecife	Objetivos	Valores de referencia	Eficacia				
			Completa	Alta	Media	Baja	Nula
Otros usos	Fomentar el desarrollo de actividades deportivas o científicas	Número de visitas	Nº de visitas por encima del valor establecido	Nº de visitas entre el 100-75%	Nº de visitas entre el 75-50%	Nº de visitas entre el 50-25%	Nº de visitas entre el 25-0%

Tabla 4: Objetivos y valores de referencia para la eficacia de arrecifes de uso recreativo

3. ESTUDIOS PREVIOS

Se deberá de presentar un inventario descriptivo en el que se detallará:

3.1. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO BIÓTICO

Descripción de las comunidades biológicas existentes en la zona de instalación, con el objetivo de determinar el estado ecológico de la misma y justificar la conveniencia de la actuación.

En este tipo de arrecifes se busca la colonización y el asentamiento de macroinvertebrados bentónicos para sustentar a las comunidades ícticas demersales.

Así pues, será necesario un estudio básico que comprenda una valoración ecológica del medio y un estudio general de la biota afectada.

Para más información sobre la biocenosis propia de la zona consultar:

- “Guía interpretativa: Inventario español de hábitats marinos.”

3.2. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO SOCIOECONÓMICO

En este apartado se trata de detallar cuáles son los recursos, los usos y las infraestructuras presentes en el lugar. A tal efecto, conviene explicar:

- **Las rutas de navegación existentes**

A fin de no interferir con ellas, especialmente durante el proceso de transporte de los módulos a la zona de fondeo.

- **Estudio de la actividad pesquera de la zona**

Identificación de los puertos más cercanos, número de embarcaciones censadas y datos sobre la producción pesquera en los últimos años. Se incluirá además, datos sobre:

- **Caladeros de pesca**

Son los principales focos marinos de pesca. Se debe de describir su localización, el estado de los mismos y la conveniencia o no de instalar las estructuras para mejorarlos.

- **Artes de pesca empleados**

Para ver la compatibilidad del arrecife con dichas artes y determinar las variables de diseño, distribución, tamaño, etc.

- **Volumen de las capturas**

Para estudiar si la actividad de los posibles caladeros presentes es sostenible y adecuar, en base ello, el diseño del arrecife.

- **Especies objeto de captura o explotables**

Igualmente, influyen en el diseño del arrecife de tal manera que ayude a aumentar o concentrar estas especies.

Para obtener información en cuanto a la pesca de tipo recreativa en España y normativa consultar:

- *“Estudio del impacto socioeconómico de pesca recreativa en el Mediterráneo español”.*

- **Deportes náuticos**

Es importante explicar los deportes que se practican en la zona, tales como: surf, pesca recreativa, buceo, etc., para ver la potenciación que causaría la instalación de los arrecifes de uso recreativo tanto por el aumento económico y turístico, como en las actividades relacionadas o derivadas de las anteriores.

Por otro lado, resulta imprescindible estudiar que las condiciones de la zona sean las adecuadas para llevar a cabo estas prácticas. Por ejemplo, en el caso del surf, que el oleaje de la zona sea suficiente y para el buceo recreativo, que haya un mínimo de visibilidad y accesibilidad durante buena parte del año.

- **Emisarios, cables submarinos y cualquier tipo de infraestructura instalada previamente**

En el caso de que las haya, el área deberá de estar delimitada e indicar la tipología, además de evaluar la posible afección que causaría el arrecife en ellas. A la hora de definir los posibles vertidos, se consultarán los inventarios de las CCAA y para el estudio de infraestructuras, las

cartas náuticas, así como la consulta directa a la autoridad portuaria competente. Si no se dispone de datos suficientes, se puede obtener esta información mediante registros de sonar de barrido lateral.

- **Espacios protegidos**

Detallar si hay alguna zona que sea declarada como protegida. En el caso de que existan, se deberán de delimitar y detallar su figura de protección así como los hábitats que albergan.

- **Patrimonio histórico**

Según la Ley 16/1985, se refiere a *“los inmuebles y objetos inmuebles de interés artístico, histórico, paleontológico, arqueológico, etnográfico, científico o técnico. Igualmente forman parte del mismo el patrimonio documental y bibliográfico, los yacimientos y zonas arqueológicas, así como los sitios naturales, jardines y parque que tengan valor artístico, histórico o antropológico”*.

Así pues, antes de la instalación de la estructura, es conveniente revisar la bibliografía en cuanto a la existencia de yacimientos catalogados en la zona y el catálogo del patrimonio cultural de la administración competente. Dado que el arrecife se instalará, por lo general, en zonas someras, resulta conveniente realizar inspecciones visuales mediante buceadores especializados en arqueología submarina. Para profundidades superiores a los 25 metros, se recomienda el empleo del sonar de barrido lateral.

3.3. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO PERCEPTUAL

Se debe de caracterizar el paisaje costero o submarino a fin de ver cómo podría afectar la instalación del arrecife en el mismo.

Los estudios necesarios son:

- **Descripción de los elementos fundamentales definitorios del paisaje supralitoral**

Para saber las posibles incidencias que puedan provocar el proceso de ejecución.

- **Paisaje submarino**

Ya que se modificarán los elementos definitorios del mismo que serán observables por los buceadores deportivos.

A la hora de poder caracterizar el paisaje afectado, se puede consultar:

- *“Guía para la elaboración de estudios del medio Físico”*

3.4. ESTUDIO DE LA CALIDAD DE SEDIMENTOS

Los sedimentos de grano fino que tengan un alto contenido en materiales orgánicos pueden actuar como sumideros de contaminantes, como por ejemplo los metales pesados, pudiendo llegar a liberarse en la columna de agua durante la colocación del arrecife artificial.

Por este tipo de situaciones es importante conocer la calidad de los sedimentos de la zona en la que se pretende colocar el arrecife y comprobar que sea la adecuada para tal fin. Es

conveniente pues, tener información sobre la extensión de las arenas presentes y sus características físicas en cuanto a la granulometría y materia orgánica.

En función del tamaño de las partículas hablamos de:

- Gravas: $D \geq 2$ mm.
- Arenas: $2 \text{ mm.} > D > 0.08$ mm.
- Limos $0.08 \text{ mm.} \geq D > 0.002$ mm.
- Arcillas $D \leq 0.002$ mm.

Por otro lado, antes de proceder a la instalación de la estructura, conviene realizar un estudio de aplicación de modelos analíticos basados en las características de la arena de la zona y el oleaje, ya que este tipo de arrecifes influyen directamente en el transporte sedimentario y modifica las zonas de erosión y deposición. Todo este proceso favorece por un lado la creación de playas en zonas determinadas o el aumento de la superficie de las ya existentes aunque, por otro, puede elevar la batimetría del fondo sedimentario debido al aumento de la deposición en zonas concretas si el arrecife es para la práctica del surf.

Como documento relacionado, se aconseja consultar:

- *“Guía metodológica para la elaboración de estudios de impacto ambiental de las extracciones de arenas para la regeneración de playas”.*

3.5. CALIDAD DE LAS AGUAS

Se trata de conocer el estado de las aguas de la zona para ver, una vez instalado el arrecife, los efectos que provoca en ellas. Así pues, se debe describir:

- La temperatura, la turbidez y la salinidad
- Indicadores de contaminación fecal
- La concentración de oxígeno disuelto
- La concentración de materia en suspensión
- Los nutrientes inorgánicos disueltos.
- Los vertidos que se incluyen en el área de influencia

En el caso de que la información sobre la calidad del agua sea escasa o que directamente no exista, se realizarán tomas de muestras in situ mediante.

- **Medidas puntuales:** con botella oceanográfica en diversas estaciones comprendidas dentro del área extendida 100 metros más allá de la superficie de ocupacional arrecife.
- **Perfiles hidrológicos:** Se miden los parámetros que tipifican la estructura de la columna de agua desde el punto de vista físico-químico, así como la estimación de la transparencia con la medida de la turbidez o con el disco de Secchi.

A la hora de realizar las operaciones de transporte marítimo, será necesario dedicar una parte del presupuesto del proyecto a la calidad de la obra en cuanto a:

- Control de calidad de las obras y los procesos constructivos
- Control de calidad de los procesos de los trabajos marítimos.

4. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se debe de dar una descripción detallada de la zona de instalación indicando:

4.1. LOCALIZACIÓN

Como recomendaciones, a la hora de elegir el emplazamiento, cabe destacar:

- No deben de ubicarse en lugares poco profundos que supongan un peligro durante las mareas bajas y las tormentas
- Generalmente, se debe de evitar el emplazamiento en fondos detríticos estructurados, rocosos o que estén cubiertos de praderas de fanerógamas marinas o especies protegidas por la legislación.
- También, se debe de evitar las zonas rocosas y los emisarios submarinos en las proximidades. Un ejemplo de fondo idóneo sería el de sedimentos no consolidados.
- Se deben de construir e instalar de tal manera que la fuerza de los aparejos pesqueros, las corrientes o los procesos de erosión no desplacen a los módulos ni los vuelquen.
- No se deben construir en zonas afectadas por huracanes o grandes tormentas.

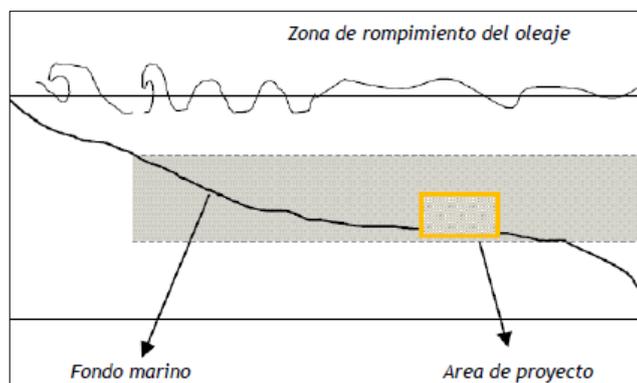


Figura 7: Zona de instalación del arrecife

Para considerar una ubicación u otra hay que tener en cuenta:

- La distancia a la costa más cercana
- Los sitios que sean designados para los vertimientos marinos
- Las vías de navegación o fondeaderos.
- La influencia sobre la estratificación
- Los movimientos de sedimentos
- Profundidades del agua
- El período mareal
- La dirección de las corrientes
- Condiciones de viento y olas
- Zonas recreativas e instalaciones costeras próximas
- Rutas de migraciones de peces
- Zonas comerciales y de pesca recreativa

4.2. PROFUNDIDAD

La profundidad de la instalación influye, entre otras cosas, en el tipo de hábitat que se pueda asentar en las estructuras. Sin embargo, en este tipo de arrecifes destinados al buceo recreativo,

se trata de que la profundidad no sea excesiva para facilitar el acceso a los mismos y tampoco escasa, para evitar daños o desplazamientos durante temporales. La profundidad adoptada debe permitir la realización de los correspondientes estudios de seguimiento del arrecife y, en el caso de que sea una zona de tránsito de buques con calado superior a los 10 metros, se requerirá de una capa de agua mínima de 25 metros por encima de los módulos. Por otro lado hay que tener en cuenta la posible interrupción o alteración de los procesos de la dinámica litoral, así como el transporte de sedimentos.

Una profundidad idónea es aquella que se basa en la iluminación de la zona sumergida, vital para estos arrecifes, la penetración de la luz, la turbidez de las aguas, etc.

4.3. PROXIMIDAD A LA COSTA Y PUNTOS DE ACCESO

Para este tipo de arrecife, es importante que el acceso sea fácil y rápido desde la costa, evitando colocarlos en la zona de rompientes.

Es necesario indicar los puntos habituales de inmersión en el caso de arrecifes de buceo, puesto que, no solo nos indica el grado de actividad en la zona, sino que además nos orienta para realizar una primera aproximación en cuanto a la ubicación del nuevo arrecife y preservar la seguridad de los submarinistas. De esta manera, se estudiará:

- La facilidad de los accesos
- La existencia de puertos cercanos
- La profundidad de instalación, que debe ser suficiente como para que no represente un peligro durante las tormentas o las mareas bajas.

A la hora de no afectar a la playa que está en el trasdós de la estructura se puede considerar, como primera estimación, los siguientes valores de la relación ancho de la estructura (B) y distancia a la costa (S) dados para estructuras emergidas:

B/S	Aparición de tómbolo
$1.33 < B/S < 5$	Con tiempo suficiente, formación de tómbolo
$0.2 < B/S < 1.33$	Aparición de saliente
$B/S \leq 0.2$	No habrá cambios significativos en la línea de orilla

Tabla 5: Valores de formación de tómbolos y salientes de Silvester y Hsu.

4.4. ORIENTACIÓN

La orientación en la que se dispongan los módulos, influye en la distribución de las especies ya que la circulación de agua a través de las posibles cavidades de estas estructuras es necesaria para el aporte de nutrientes, materia orgánica particulada, etc., además de que ayudan a reducir la sedimentación.

Por otro lado, si existen corrientes fuertes de elevada velocidad, se puede llegar a causar una degradación del sustrato y socavar la base de los módulos con la consiguiente pérdida de estabilidad.

4.5. DISTANCIA RESPECTO A UN ARRECIFE NATURAL

La presencia de un arrecife natural, en la zona de influencia de uno artificial puede llegar a provocar una dispersión de las especies, ejercer una fuerte competencia por recursos y, en definitiva, perder una de sus ventajas en cuanto a la disminución de la presión de los arrecifes naturales. Así pues, se sugiere, según Chang (1985), que la distancia mínima entre ellos sea de unos 0.8 kilómetros.

4.6. BATIMETRÍA

Es necesario disponer de la batimetría de la zona, a un nivel de detalle suficiente como para poder proceder a su correcta caracterización a la hora de utilizar el modelo numérico. Con ella podremos tener información sobre el relieve y las pendientes de los fondos donde se trata de implantar los módulos. Hay que tener en cuenta que la pendiente debe ser mínima para que haya una suficiente estabilidad en las estructuras.

Según la forma de las isobatas, tanto en aguas intermedias como someras, se influirá a la propagación del oleaje de una manera u otra.

En el caso de que no haya referencia previa de la batimetría de la zona, será necesario obtener unos registros sísmicos de alta resolución acústica. Para ello, se utilizan los siguientes equipos:

- Sistema de posicionamiento G.P.S. diferencial.
- Ecosonda
- Software de navegación y posicionamiento.
- Mareógrafo.
- Barcos de apoyo.

4.7. GEOMORFOLOGÍA

Se trata de conocer los fondos marinos en el lugar de fondeo, ya que influyen directamente en la estabilidad de los módulos. Además, ayuda a definir el tipo, el tamaño y el número de elementos a disponer. Es un apartado imprescindible en cualquier tipo de proyecto de arrecife que se quiera implantar.

En el caso de que no se tengan datos previos, una herramienta muy útil es el sónar de barrido lateral, que nos permite delimitar la ubicación del substrato rocoso, detrítico o sedimentario vegetado.

5. DISEÑO DE LOS MÓDULOS DEL ARRECIFE

Un adecuado diseño es fundamental para que el arrecife cumpla con sus objetivos. A la hora de definir la estructura y los materiales que componen los módulos del arrecife hay que tener en cuenta la función del mismo, así como los factores económicos o la disponibilidad del material.

En general, se montan sobre la tierra a menos que sean materiales naturales colocados de una forma no modificada.

Por tanto, para definir el diseño de este tipo de estructuras, se debe atender a los siguientes criterios:

5.1. FUNCIONALIDAD

Lo primero que se busca es su funcionalidad, es decir, que las estructuras sean fáciles de manipular, de adquirir, transportarlas, fondearlas, que sean seguras y además rentables. En general, un diseño adecuado sería aquel que atrae a la vida marina de manera que, pasado un tiempo, los módulos se mimeticen con el medio al cubrirse de algas y corales. Por otro lado, para este tipo de arrecifes recreativos que van a ser vistos por buceadores, se trata de que sean atractivos a la vista y, por tanto, que presenten una forma lo más natural posible, es decir, que disimulen su artificialidad evitando las formas simétricas o lisas, con aristas y puntas.

5.2. COMPATIBILIDAD AMBIENTAL

Se trata de que los arrecifes provoquen un beneficio ambiental neto con respecto a los objetivos definidos. Así pues, debe de evitarse aquellos materiales que supongan un riesgo ambiental documentado. Igualmente, hay que evitar construir demasiados arrecifes en una zona determinada de tal forma que superen la capacidad portante del lugar.

5.3. DURABILIDAD Y ESTABILIDAD

Deben ser estables y duraderos en un ambiente que normalmente es hostil. Se trata de mantener la posición de la estructura en las peores condiciones meteorológicas del lugar.

Hay que tener en cuenta, además, la geología del fondo sobre el que se va a instalar el arrecife ya que si los módulos son muy pesados, se pueden hundir en sedimentos, por ejemplo, lodosos. En este sentido, se recomienda que el peso del arrecife duplique la gravedad específica del mar o bien, emplear una adecuada cimentación.

5.4. CONFIGURACIÓN, FORMA Y TAMAÑO

En función de la complejidad que tengan, se tendrá un volumen y una diversidad de biomasa u otra puesto que determinadas especies tienen preferencias para formas muy concretas.

Igualmente, el tamaño, su forma, el peso, la distribución espacial, etc., se definirán según el objetivo que tengan, así como el tipo de fondo entre otros aspectos. Si se quiere atraer a una buena diversidad de organismos, los módulos deben de tener la máxima complejidad posible. Por tanto, la forma y el diseño deben de basarse en numerosas cavidades de las estructuras, que serían de tipo alveolar.

En cuanto al peso, suele oscilar entre las 2 toneladas, hasta las 7 u 8 toneladas.

Con respecto al perfil del arrecife, cuanto menor sea, más se atraerá a las especies demersales y en cambio, si lo que se quiere es la diversidad, una combinación de arrecifes altos y bajos sería lo más adecuado.

Para la distribución, si el arrecife está dividido en diversos grupos, polígonos o núcleos, se atraerá a una mayor cantidad de especies, además de proporcionar áreas para la pesca y el buceo.

Una distribución muy empleada es en líneas paralelas, con los módulos dispuestos en tresbolillo. El área de ocupación suele variar entre 1 kilómetro cuadrado o menos, hasta las decenas de kilómetros cuadrados para los arrecifes de protección.

Como ejemplos de pesos, dimensiones y formas de módulos ya instalados, podemos mencionar:

- Módulos de tipología rectangular, con dimensiones aproximadas de 4mx2m y 2m de altura formados con vigas de hormigón de 0.25m de arista.
- Módulos cúbicos de 2.6mx2.6m de base y 2m de altura y un peso de 6 toneladas.

5.5. COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL

• Espacios intersticiales

Según el número que se dispongan, influirán directamente en la naturaleza y la diversidad de los organismos que se asienten. Generalmente, los peces prefieren cavidades con muchas salidas y en las que penetre la luz para que pueda circular el agua y que les ayuden a protegerse de los depredadores. Además, el tamaño de estas cavidades determinará el tipo de especie, ya que: a menor tamaño, las especies atraídas serán más pequeñas y viceversa.

• Superficie de los elementos modulares

Influye directamente en el asentamiento de los organismos. La relación es tal que a mayor superficie disponible, mayor será el asentamiento de algas e invertebrados y, por tanto, la fuente de alimentación para otros niveles de la comunidad presente. Sin embargo, no siempre se cumple esta relación puesto que el asentamiento de las algas Kelp puede provocar que no se establezcan otras especies en las cercanías. Igualmente, hay que considerar la ocupación del espacio que suponen, que debe ser mínima y no interferir con los ecosistemas marinos.

• Aberturas en los materiales

Los materiales elegidos deberán de tener las suficientes aberturas para que el agua pueda circular por el interior del arrecife y evitar que se estanque y provoque una disminución de la actividad.

5.6. ELEMENTOS DISUASORIOS

Son los elementos que sobresalen de los módulos, que se colocan fundamentalmente en los arrecifes de protección para disuadir el empleo de ciertas artes de pesca. Normalmente, se suelen emplear vigas que se empotran a las estructuras. Estas vigas deben de ser calculadas para resistir el peso propio a flexión del conjunto del módulo, en el extremo del elemento, sobredimensionado con un coeficiente de seguridad.

6. PROCESO DE EJECUCIÓN

A la hora de proceder a la instalación de los módulos arrecifales es necesario definir, previamente, el ámbito de las obras a ejecutar para la construcción, el transporte y el hundimiento de estas unidades que conformarán el arrecife artificial. Hay que tener en cuenta, entre otras cosas, la localización, el tipo de estructura a hundir, así como la función del arrecife.

Así pues, se debe detallar los siguientes pasos:

6.1. CONSTRUCCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

La ejecución de las estructuras arrecifales, se puede llevar a cabo en:

- La propia dársena
- En la zona portuaria
- Fuera del recinto portuario

En este último caso, hay que realizar una valoración económica comparativa del transporte de los elementos al puerto, frente a la construcción en el mismo.

Si finalmente se opta por la zona portuaria, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Superficie disponible**

Se debe de prever la superficie necesaria para realizar la construcción, así como las infraestructuras presentes para facilitar los trabajos.

- **La distribución del área portuaria**

Es importante definir la distribución del área portuaria en: zonas de acopio de materiales, zonas para la construcción, ensamblaje y montaje, zona de almacenamiento, etc.

- **Acopio**

Hay que tener en cuenta que los elementos, una vez contruidos, deben de permanecer acopiados, al menos, 28 días.

- **Viabilidad portuaria**

Hay que dejar previamente definidas las calles y rotondas necesarias durante la construcción entre las distintas zonas de trabajo de manera que se permita las operaciones de carga y maniobra de las maquinarias.

- **Muelles de carga**

Se elegirán según las características del buque que transporta los módulos, así como la carga a transportar.

- **Medios auxiliares**

Se analizarán los medios auxiliares de los que se constan en el puerto, así como los sistemas más adecuados de carga para cada estructura.

- **Ubicación del puerto**

Es importante tener en cuenta la distancia que separa al puerto de los puntos de fondeo para reducir, en la medida de lo posible, los tiempos de transporte marítimo.

- **Administración**

Por último conviene estudiar cuáles son las facilidades que puede ofrecer el puerto en temas de trámites necesarios, permisos, tarifas, etc.

Aunque se explica detalladamente en otro apartado, se hace hincapié en los materiales de los que se debe componer los módulos. Es imprescindible que sean inertes, de manera que no causen contaminación por lixiviación, resistencia física o química a la intemperie y/o actividad biológica. En cuanto a la resistencia física o química mencionada, cabe destacar que puede provocar un incremento de las exposiciones de organismos sensibles a los contaminantes y producir efectos ambientales adversos.

Por otro lado, debido a que las estructuras a instalar se consideran de carácter permanente, los materiales serán voluminosos, por ejemplo, rocas, hormigón o acero. Además, deben tener una resistencia y fuerza técnica suficiente, tanto a nivel individual como en el conjunto del arrecife, como para poder resistir las tensiones físicas del medio marino y no romperse, lo que causaría graves problemas de interferencia en una amplia zona del lecho del mar.

6.2. ZONA DE EMBARCACIÓN

Hay que elegir la ubicación más adecuada para la embarcación de los módulos, teniendo en cuenta el calado del puerto más próximo en relación con las necesidades de maniobra de las embarcaciones remolcadoras que se vayan a emplear. Es necesario tener en cuenta, además, el gálibo y la anchura de los accesos.

Se debe solicitar al organismo portuario los datos sobre los niveles del mar en las distintas dársenas para determinar cuál es el porcentaje de días en los que no se podrá realizar la carga y su distribución a lo largo del año.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de seleccionar el muelle en el que realizar el embarque es que, el transporte de este tipo de estructuras suele requerir de una pontona de eslora superior a los 30 metros, con una grúa de considerable potencia que se instala en la cubierta. Esta pontona debe contar, al menos, de dos hélices y estar dotada de un sistema GPS diferencial de posicionamiento que se detallará más adelante.

6.3. TRANSPORTE MARÍTIMO

Es una fase delicada pues los módulos a remolcar poseen, generalmente, un peso importante que puede llegar a ocasionar balanceos durante el izado y, por tanto, provocar daños en la estructura del barco. En este sentido, es recomendable disponer de puntos de sujeción en los módulos que faciliten el transporte y fondeo de los mismos.

Así pues, una vez que han sido construidos y transportados al lugar de embarque, se procede a su carga a bordo de la embarcación, y se estiban para ser fondeados.

A la hora de elegir el medio de transporte marítimo hay que tener en cuenta la envergadura del proyecto, es decir, el número de estructuras proyectadas. En general, las embarcaciones serán del tipo:

6.3.1. BUQUES CARGUEROS

De pequeño tonelaje, entre los 1500 y 5000 t.p.m. que supondría el conjunto de la carga a transportar así como el peso del combustible. Las características que deben presentar este tipo de embarcaciones son:

- **Puntales**

Deberán de poseer unos puntales para la izada de los módulos para poder realizar las operaciones de carga y descarga en los puertos y los muelles en el caso de que no existan las grúas en los mismos. Estos puntales van a trabajar en función de la relación entre su capacidad de carga y el peso de la unidad de carga, de manera que es recomendable puntales entre 10 a 15 toneladas para asegurarnos de una correcta ejecución de las operaciones de carga.

- **Bodegas de carga**

Las bodegas de carga deberán ser corridas o, lo que es lo mismo, no compartimentadas, puesto que así se aumenta la facilidad operativa, lo que permite una mejor disposición de las estructuras arrecifales, así como la barrida en planta y elevación-descenso de las grúas o puntales.

- **Calado**

Deberá ser pequeño, para facilitar las operaciones de maniobra tanto en el puerto, entrada, atraque en muelles, etc., como en el fondeo de los módulos arrecifales. Como recomendación en cuanto a las dimensiones de estos buques, tenemos:

Eslora(metros)	Manga(metros)	Calado(metros)
70 a 125	12 a 18	4 a 7

Tabla 6: Dimensiones de los buques cargueros.

Como tripulación de la embarcación se suele constar de:

- Capitán de barco
- Marineros
- Maquinista
- Operador de grúa
- Cuadrilla de ayudantes

6.4. FONDEO

La colocación de los arrecifes artificiales se debe realizar considerando cualquier actividad que esté en curso o prevista de ser llevada a cabo en el sector de interés, ya sea la navegación, el turismo, actividades recreativas, la pesca, la acuicultura, la conservación de la naturaleza o la administración de la zona costera.

Previo a la colocación de los módulos arrecifales, es conveniente informar a todos los grupos de personas que sean afectadas o bien estén interesadas de las características de las estructuras, así como su ubicación y profundidad de colocación.

Es importante estudiar con detalle el emplazamiento del arrecife, así como el momento de su construcción y colocación en la etapa inicial de la planificación, concretamente con respecto a:

- La distancia a la costa más cercana
- Zonas de desove y viveros
- Rutas de migraciones de peces o mamíferos
- Zonas de deporte o pesca comercial
- Zonas recreativas
- Procesos que se producen en el litoral
- Zonas de interés cultural o natural
- Existencia de tuberías submarinas
- Zonas de exclusión militar
- Zonas de importancia científica o biológica
- Usos técnicos del fondo marino
- Profundidades del agua: máxima, mínima y media
- Período mareal
- Influencia sobre la estratificación
- Oleoductos submarinos
- Sitios designados por vertimientos marinos
- Etc.

Así pues, la autoridad competente se debe de encargar de que la posición, la profundidad y las dimensiones del arrecife artificial se especifiquen en las cartas náuticas.

A la hora de realizar el fondeo de los arrecifes hay que tener en cuenta una serie de aspectos que hacen que su colocación sea más complicada que si fuera una instalación en tierra firme. Cabe destacar los siguientes:

- **Efecto de las corrientes marinas y la acción del viento**

Pudiendo llegar a provocar la deriva de la embarcación en la que se transportan los módulos, así como el desplazamiento de los mismos y perdiendo, por tanto, el posicionamiento correcto incluso aunque en la superficie el buque se encuentre en la posición correcta. No se podrán instalar en aquellas zonas que hayan sido afectadas por huracanes o grandes tormentas.

- **Oleaje**

Causa el balanceo que puede poner en peligro la integridad física de los operarios, así como del buque y de las propias estructuras. De esta forma, los trabajos de montaje e instalación se suspenderán cuando la altura de ola sobrepase un límite, que suele ser del orden del metro.

- **Visibilidad**

En general, el fondo marino no será visible en la zona de instalación, lo que dificulta las operaciones de implantación de los módulos arrecifales en el área exacta prevista en el proyecto, que es en la que se han realizado todos los estudios pertinentes. Con este respecto, es importante señalar que el error máximo que se admite, en cuanto a la distribución relativa del arrecife sobre el fondo marino, es de 10 metros.

En cuanto al rango de tolerancia permitido para el hundimiento de los módulos en el fondo marino, asciende, como máximo, a los 5 metros de radio respecto a la posición de proyecto de cada pieza.

6.4.1. INSTRUMENTOS: SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO

- **Global Positioning System**

Debido a la dificultad y la precisión que se necesita en esta fase del proyecto, es de uso generalizado y a escala mundial la instalación de un sistema de navegación y posicionamiento por satélite GPS (Global Positioning System). Es un sistema de navegación que utiliza una serie de 24 satélites para ofrecer una disponibilidad de navegación las 24 horas del día con una precisión de hasta 15 metros. Estos satélites funcionan enviando una señal de radio que contiene información sobre la posición y la hora de cada uno. Conociendo cualquiera de estas tres posiciones y teniendo en cuenta las diferencias horarias entre señales transmitidas, el G.P.S. es capaz de determinar la posición actual en cualquier parte de la Tierra.

- **G.P.S. Diferencial**

Del equipo anterior descrito, se derivó en la utilización de una corrección terrestre al sistema llamada corrección Diferencial (GPSD).

- **Sónar de barrido lateral**

Otro equipo muy utilizado en las operaciones de instalación y fondeo de arrecifes artificiales con el objeto de conseguir la máxima precisión es el Sonar de Barrido lateral. Es un equipo derivado de los sonar submarinos que obtiene la información a partir de la energía acústica que se refleja por los materiales y las irregularidades del fondo cuando inciden en ellas un haz oblicuo de señales acústicas que se emiten por dos transductores situados a ambos lados de un sensor que se encuentra sumergido. Producen un registro continuo de una vista plana del área barrida. Según sean las irregularidades del fondo marino y la naturaleza de los materiales que lo componen, tendremos distintas intensidades de ecos acústicos, que se recogen por estos transductores, las amplifican y las registran gráficamente a medida que el barco avanza.

Como desventaja de este método cabe mencionar el proceso de restitución de las distorsiones laterales y transversales, por lo que se recomienda trabajar adecuando la velocidad de avance del papel de la impresora a la velocidad del barco en función de la escala de trabajo a obtener, eliminándose en gran parte el problema de esta distorsión transversal mencionada.

- **Trisponder**

Es un sistema de posición microondas y UHF de corto y medio alcance, que permite medir las distancias entre embarcaciones y estaciones costeras. Además, calcula la posición del buque en el que se transportan los módulos arrecifales por trilateración y suministra información sobre la dirección al timonel de la misma.

Igualmente, consta de un equipo en la embarcación y otro en la costa.

Consigue unas precisiones en las mediciones del orden de +/- 1 metro sobre la línea de máxima visión de 80 kilómetros del sistema, y la distancia de resolución es de 0.1 metros. Es

importante calibrar el equipo antes de ser utilizado para evitar las posibles variaciones en los circuitos que miden el tiempo en los transpondedores remotos.

- **Ecosonda**

Su principio de funcionamiento es similar al del sónar. Se trata de transmitir impulsos sonoros para, a continuación, captar y clasificar los ecos que nos permitirán ubicar la posición del objeto que los produce. Requiere de un operador que esté pendiente del aparato para enviar las señales en la dirección adecuada en busca del objeto en cuestión, a diferencia del sónar que es automático. Además, el sónar se instala de manera fija en el casco de la embarcación, mientras que la ecosonda es un equipo portátil, para embarcaciones más pequeñas.

Nos aporta información sobre la arqueología submarina, localización de masas de fluido, búsqueda de objetos enterrados, trazados de emisarios, etc.

- **Plataforma de fondeo**

Con el objetivo de conseguir una máxima precisión en la colocación final de los arrecifes artificiales en la zona prevista en el proyecto, se han dado casos de utilización de una plataforma de fondeo que igualmente cuenta de un receptor G.P.S. para mantener la posición lo más exacta posible. Esta plataforma, de mínimas dimensiones, es remolcada por una pequeña embarcación auxiliar que es la que lleva los equipos de precisión para el fondeo. Una vez llegados a la zona y desembarcado el módulo a instalar, será la plataforma la que soporte su peso y, mediante una compuerta de fácil apertura que se abre una vez situados en la zona exacta, el elemento va bajando por su propio peso hasta la posición final.

6.4.2.RECOMENDACIONES

- Cada estructura que se vaya a implantar debe ser adecuadamente numerada y el punto donde se fondea, identificado. De esta manera, el posterior seguimiento que se haga del módulo mostrará, de una manera clara, la evolución del mismo o si se ha desplazado respecto a su posición inicial.
- Es recomendable la instalación en los distintos módulos, de diversas fijaciones y placas de muestreo y de seguimiento científico de la colonización de estructuras, para facilitar y cumplimentar el programa de seguimiento que se realiza una vez ubicados en el fondo.
- Debido al carácter recreativo de los arrecifes del presente proyecto, es igualmente conveniente la colocación de carteles, que indiquen el lugar donde se encuentran estos módulos, en las zonas de salidas de las embarcaciones.
- Una vez llegados a las coordenadas exactas de fondeo de los módulos, es recomendable realizar una medida batimétrica de rectificación para obtener la profundidad del lecho marino en ese punto mediante un equipo de ecosonda digital. De esta manera, nos aseguramos de que el hundimiento cumplirá con el requisito de profundidad mínima a la que se tienen que instalar los módulos arrecifales para la obtención de una columna de agua lo suficientemente amplia como para que no suponga la estructura una obstrucción para el tráfico marítimo.

6.4.3.TÉCNICAS DE FONDEO

Generalmente, el fondeo se realiza mediante dos técnicas distintas:

- **Buzos**

En este caso, el descenso se hará mediante un cable que será guiado por los buzos que, mediante un sistema de comunicación con el barco, dirigen el módulo, realizan los ajustes finales de las piezas y el desenganche definitivo. En el caso de que no se pueda realizar correctamente esta operación y, por tanto, no poder ajustar en el lugar indicado los módulos, ya sea por el efecto de las corrientes o por movimientos incontrolados del barco, se suelen utilizar unos globos de levantamiento que reducen el peso de las estructuras, permitiendo así su colocación.

Ventajas del empleo de buzos:

- En el caso de que manejemos estructuras que se ensamblan entre sí o que requieran un ajuste con mayor precisión, este sistema se hace imprescindible
- El empleo de buzos, aumenta la actividad económica de la zona por la creación, temporal, de puestos de trabajo

- **Caída libre desde la superficie**

Este segundo método consiste en que el buque, mediante su sistema de carga, eleva el arrecife y lo deposita en la superficie del mar y lo suelta con un dispositivo de ganchos de disparo simultáneo, fondeándose el módulo por su propio peso. Es importante, en este caso, calcular las sollicitaciones a la que estará sometida la estructura al recibir el impacto sobre el fondo marino.

A la hora de elegir entre una técnica u otra, cabe destacar, igualmente, las ventajas que presenta este segundo sistema:

- Reduce los riesgos ocasionados por la permanencia de hombres en el fondo marino durante el manejo de las estructuras.
- El rendimiento durante la colocación aumenta, por lo que se reduce el tiempo en la instalación
- Disminuyen los costes de mantenimiento y conservación de los sistemas de izado (cables, ganchos, etc.) necesarios con el empleo de buzos.

De esta manera, el requerimiento de buzos se ha visto reducido actualmente en España. Por todo esto, lo que se hace es diseñar módulos de tal forma que se puedan manipular con seguridad, y funcionales en cualquier posición en la que caigan en el fondo.



Figura 9. Fondeo mediante buzo



Figura 10. Fondeo en caída libre

6.4.4.EJEMPLOS DE INSTALACIÓN EN ARRECIFES ESPECÍFICOS

Existen técnicas concretas para realizar el hundimiento de los arrecifes artificiales en función de su tipología, como es el caso de los ReefBalls. En ellos, lo que se hace es colocarles un globo de Polyform dentro del hueco que se forma en el interior de la estructura, lo que les permite flotar para poder ser remolcados mediante una lancha de cualquier tamaño. Una vez llegados al lugar de colocación de los mismos, se desinfla y se remueve dicho globo. Igualmente, se puede emplear la técnica de los buzos, y realizar así un descenso controlado.

6.5. SEGUIMIENTO

Definimos esta etapa del proceso de ejecución como una serie de mediciones repetidas de unos efectos, directos o indirectos, que se realizan para ver el grado de impacto o interferencias que tienen las estructuras instaladas en el medio marino o con otros usos legítimos del mar. Así pues, se trata de establecer y analizar cuáles son las repercusiones que tendrán a nivel ambiental y con otras actividades de la zona. Según sean los resultados del seguimiento, se pueden llegar a realizar modificaciones sobre las estructuras arrecifales o incluso planificar su retirada. Concretamente, para el caso de módulos definitivos o que vaya a ser instalados por un período de años, como es el caso que se está estudiando, éste proceso de seguimiento deberá realizarse simultáneamente a la construcción, con el objetivo de influir en la modificación del arrecife en el caso de que sea necesario.

Así pues, una vez que han sido instalados los arrecifes artificiales, lo siguiente que se debe hacer es el monitoreo de los mismos con el objetivo de conocer la evolución de la colonización que vayan sufriendo, aterramiento, estado, etc.

La normativa establece que para todo proyecto de arrecife artificial, se realice un programa de seguimiento científico de, al menos, cinco años.

Se suelen escoger varios módulos al azar por etapa, considerando que la instalación de todos ellos no es simultánea así como la zona donde se ubiquen, por lo que cada uno de ellos puede presentar distintas influencias ambientales y de desarrollo.

6.5.1.OBJETIVOS

Es importante especificar claramente los objetivos finales que tiene esta etapa de proyecto, para poder llevarla a cabo de una manera eficaz según los recursos de los que se disponga:

- Como ya se ha comentado, son igual de importantes las operaciones de seguimiento que se hagan antes de la colocación, para ayudarnos en la selección del emplazamiento o a confirmar que la zona elegida es la adecuada.
- Una vez instalados, los estudios realizados seguirán unos objetivos de verificación de:
 - Cumplimiento de las condiciones del permiso (Seguimiento de cumplimiento).
 - Las hipótesis hechas durante la concesión del permiso se han cumplido y los procesos de selección del lugar son válidas para que no se den efectos ambientales negativos por la instalación. (Seguimiento sobre el Terreno).

En función de los resultados obtenidos de ambos procesos, se procederá a las modificaciones de los criterios de emisión de nuevos permisos para futuras operaciones de instalación en lugares de colocación ya existentes y propuestos.

En última instancia, se evalúa los efectos de la actividad de colocación en el entorno biótico y abiótico.

6.5.2.CONTROL DE CALIDAD

Se define como el conjunto de las técnicas y actividades operativas que se realizan para cumplir con los requisitos de calidad establecidos. Es importante especificar:

- Los criterios del seguimiento y las directrices
- Los métodos de muestreo
- Las localizaciones y frecuencias de las muestras
- Procedimientos de presentación de los informes

En general, todas las observaciones hacen referencia a las características físicas, químicas y biológicas del sitio de la instalación.

- **Observaciones químicas**

Están relacionadas con el tipo de material del que se trate. En el caso de que haya algún tipo de material contaminante y que no se pueda eliminar produciendo, por tanto, efectos químicos, será necesario realizar un análisis en la microcapa de superficie del mar, por ser una zona biológicamente muy activa en la que, además, tiende a concentrarse una gran parte de esta contaminación, como pueden ser los metales pesados o sustancias solubles en petróleo. Igualmente, habrá que analizar en el lecho marino y en las comunidades bénticas próximas a la zona de colocación.

- **Observaciones físicas**

Normalmente consisten en realizar una serie de estudios hidrológicos sobre las propiedades de la masa de agua: temperatura, salinidad o densidad, en toda la columna de agua y extendida horizontalmente a toda la región susceptible de ser afectada por la instalación. Si se consideran que los efectos son en su mayoría físicos, se podrá realizar el seguimiento mediante: mediciones acústicas, sónar de barrido lateral, etc.

- **Frecuencia de las observaciones biológicas**

Se trata de indicar la escala de la operación de colocación, así como el peligro que se pueda dar en los recursos potenciales de la zona. En el caso de que se prevea que se puedan presentar estos efectos físicos en el lecho marino, es recomendable realizar una evaluación de la biomasa y productividad del fitoplancton y el zooplancton antes de la colocación. Igualmente, es de utilidad el seguimiento de la flora y la fauna béntica y epibéntica, puesto que no solo están sometidas a la influencia de la columna de agua situada encima, sino que también a los cambios en los materiales geológicos inertes e inorgánicos que resulten de los sólidos presentes en el desecho.

Posteriormente a la colocación, el seguimiento a realizar tendrá un doble objetivo de:

- Determinar si la zona afectada difiere de la zona sobre la que se hace las predicciones
- Ver si la amplitud de los cambios producidos fuera de la zona de repercusión difieren de los previstos.

6.5.3.GARANTÍAS DE CALIDAD

Son aquellas actividades que se llevan a cabo para asegurar y confirmar que el seguimiento realizado cumple con las prescripciones relativas a la calidad.

Los resultados obtenidos de los procesos de seguimiento deberán ser revisados cada cierto tiempo para, en el caso de que proceda:

- Modificar o finalizar el programa de seguimiento en el terreno
- Reubicar el lugar de colocación o cerrarlo
- Revocar o cambiar el permiso de colocación
- Cambiar la base para evaluar el permiso de colocación en el caso de que se ubiquen los módulos arrecifales en el Mediterráneo.

Todos los resultados se prepararan en informes en los que se deben detallar: las mediciones realizadas, los resultados obtenidos y la forma en que estos datos están relacionados con los objetivos del seguimiento y confirman las hipótesis de impacto.

6.5.4.ALTERNATIVAS DE SEGUIMIENTO

- **Inmersiones**

Se puede realizar el seguimiento mediante una serie de inmersiones de buceo de 15 minutos de duración para registrar la actividad de poblamiento de los módulos mediante videos y/o fotografías. Se realiza, además, la toma de muestras de los organismos que se fijan a ellos para analizarlos posteriormente, y se capturarán mediante una red o con arpones con el objetivo de identificarlos y registrarlos. De esta manera, estaremos en condiciones de estimar la diversidad y abundancia de las especies colonizadoras y podremos calcular el posible incremento de la biomasa.

Es importante llevar a cabo, también, el registro de las condiciones ambientales en cuanto a salinidad, temperatura y oxígeno disuelto, al igual que se evalúan los potenciales impactos al ambiente para poder disponer de datos para la elaboración de informes ambientales, en caso de que las autoridades así lo soliciten.

El grado de productividad resultante se considera bajo los criterios de biomasa que se de en el arrecife artificial al paso del tiempo, así como por la diversidad y biomasa de especies de organismos en las zonas circundantes a cada sector de dichos arrecifes.

Igualmente, estos resultados derivados del monitoreo pueden ser de utilidad en el caso de la planificación de estrategias para el aprovechamiento del complejo de estructuras.

- **Sónar de barrido lateral**

Como ya se ha explicado, permite conocer con exactitud la ubicación de las estructuras ya instaladas. De esta manera, los aspectos más relevantes sobre el fondo marino: barras de roca, praderas de fanerógamas marinas, módulos arrecifales, etc., se digitalizan para poder ser introducidos en el Sistema de Información Geográfica (SIG), y elaborar mapas detallados del relieve del fondo marino.

- **Encuestas al sector pesquero**

Las encuestas al sector pesquero afectado por el arrecife nos ayuda a recoger información sobre la respuesta frente a las actuaciones de protección de los recursos litorales realizadas con la instalación del arrecife artificial.

- **Pescas experimentales**

Permiten obtener información sobre las capturas que se llevan a cabo en el área ordenada, tratando de establecer comparaciones, cualitativas o cuantitativas, con las realizadas en zonas próximas no ordenadas.

6.6. DESMANTELAMIENTO

En aquellas ocasiones en las que los resultados del seguimiento realizado evidencien que la eficacia del arrecife es escasa o nula para los fines para los que se propuso, si provoca una serie de efectos negativos, o bien por razones de interés público de primer orden, será conveniente realizar la retirada de las estructuras fondeadas. De esta manera y llegados a este punto, a la hora de realizar el desmontaje y retirada de los módulos arrecifales hay que tener en cuenta que conforman una serie de operaciones que entrañan una mayor dificultad que la del montaje inicial. Los aspectos más relevantes que supondrán una mayor o menor complejidad del proceso son:

- Batimetría del fondo
- Tipo de arrecife
- Profundidad

6.6.1. PLANIFICACIÓN DE LAS OBRAS DE DESMANTELAMIENTO

Se deben definir las obras necesarias para ejecutar la desinstalación, el embarque y el transporte del arrecife al muelle más cercano fijado en el proyecto. Además, es importante dejar indicado la localización actual de los módulos y el estado en el que se encuentran y la metodología de extracción del fondo marino sin que provoque interferencias con la navegación ni se altere la calidad ambiental del ecosistema.

Así pues, el procedimiento que se llevará a cabo para esta fase del proyecto dependerá, fundamentalmente, del tipo de arrecife instalado. Se debe tener en cuenta el hecho de que no se puede realizar el desmantelamiento de la misma manera que la instalación, ya que ésta se lleva a cabo lanzando los módulos desde la superficie, mientras que para su retirada, es necesario el empleo de buceadores que enganchen los módulos unitariamente.

Por todo esto, hay que realizar un estudio de los principales aspectos y medidas a tener en cuenta durante la extracción de las estructuras una vez que hayan sido delimitadas en el fondo marino. Concretamente, se abarcarán los siguientes aspectos:

- Estudio de optimización de los costes de operación.
- Propuesta del sistema de control de calidad de la obra.
- Estudio de la situación y el estado en el que se encuentran los módulos, teniendo en cuenta: el tiempo transcurrido, la dinámica del fondo marino, etc., mediante un sistema de georreferenciación. Para ello, hay que evaluar el peso, el tamaño y la forma de las estructuras que hay que retirar, las características del fondo marino de la zona, las corrientes mareales y la acción del viento.

- Optimización del transporte en cuanto a: el sistema utilizado, procedimiento, metodología y utensilios, etc., partiendo desde la zona de desmantelamiento, hasta la de acopio a pie de muelle, para el almacenamiento y gestión de las estructuras desmanteladas.
- Medios de desinstalación necesarios en cuanto a: barcos capaces de realizar estas operaciones, grúas para la izada de los módulos, así como el equipo humano y técnico.
- Análisis de las alternativas de desembarque, teniendo en cuenta los lugares para realizar el almacenamiento y la limpieza.
- Seleccionar los parámetros que nos ayuden a ver el grado en el que la obra ejecutada se ajusta a lo previsto en el proyecto inicial.
- Propuesta para el sistema de gestión una vez retirados todos los módulos, que dependerá de la tipología de los mismos, así como de su composición estructural.
- Propuesta de regeneración y restauración de los ecosistemas que se hayan dañados durante la vida útil del arrecife o su colocación.

Al igual que en la fase de colocación, se debe de solicitar al gestor de la autoridad portuaria los datos sobre los niveles del mar en las distintas dársenas que componen el puerto en cuestión, para saber el porcentaje de días en los que no se podrá realizar la carga, así como su distribución anual. Igualmente, se deben analizar los accesos, para ver que cumplen con los requisitos de gálibo y anchura para las embarcaciones empleadas y las zonas de almacenaje y limpieza.

En el caso de que se haya definido el sistema de desmantelamiento antes de la fase de colocación, es posible que deba ser ajustado en función de:

- El cambio de las condiciones del lugar
- El movimiento del arrecife respecto a su posición inicial en el fondo marino
- Si se considera que el estudio inicial no es exacto.

6.6.2.PROCESO DE DESINSTALACIÓN, TRANSPORTE Y GESTIÓN

Se debe de estudiar adecuadamente los factores más importantes que van a intervenir en la extracción y el transporte de los módulos desde el fondo marino hasta el muelle en el que se desembarquen, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- La posible socavación y el asentamiento en el sustrato, así como los métodos de remoción.
- Masa propia actual y el peso dentro del agua
- Identificación de las corrientes marina predominantes, señalando la dirección y la velocidad.
- El tipo de sedimento sobre el cual se asienta el arrecife.
- Forma actual y medidas de la estructura
- Grado en el que se afecta al fondo marino y la columna de agua por los temporales.

Según el tipo de módulos instalados, el proceso de desinstalación, el transporte, así como la gestión de los bloques, se realizarán de diferentes maneras. Concretamente, para el caso de estudio del presente proyecto de arrecifes recreativos, el proceso es el siguiente:

- 1) Separación de los módulos.
- 2) Elevación de cada uno, mediante la grúa, a la embarcación.

- 3) Fijación de los bloques a la cubierta de la embarcación, de acuerdo a un plan establecido, con el objetivo de asegurar la estabilidad de la misma.
- 4) Transporte hasta el puerto.
- 5) Descarga en el muelle y traslado al lugar habilitado para el almacenamiento.
- 6) Reciclaje o reutilización, en función de las características de los módulos.

6.6.3.CONTROL DE CALIDAD DE LA OBRA

Una parte del presupuesto debe ser destinada al concepto de calidad de la obra, que contemplará los siguientes trabajos:

- Análisis del estado y de la calidad de los materiales del arrecife.
- Replanteo de la obra, utilizando instrumentos como el sónar de barrido lateral, que cubra el área del proyecto e indique la posición de los módulos en el fondo.
- Realizar un documento audiovisual de las labores de desmantelamiento y transporte de las estructuras, así como de la zona cuando se haya finalizado la extracción de todos los módulos.

7. IDENTIFICACIÓN DE AFECCIONES DE LOS ARRECIFES ARTIFICIALES EN CADA FASE

A continuación se especifican los efectos que van a suponer la construcción, instalación y servicio de esta tipología de estructuras.

7.1. FASE CONSTRUCCIÓN

7.1.1.EFECTOS AMBIENTALES

- **Medio atmosférico**

Habrà que tener en cuenta el aumento de gases en la zona, producido por el flujo de las embarcaciones durante la duración de la fase. Por otro lado, el hecho de que estas operaciones se realicen en espacios abiertos hace que la influencia de las brisas y vientos favorezcan la dispersión de estos agentes.

Se debe de tener en cuenta, también, los efectos atmosféricos que se producen por la construcción en tierra de los módulos que componen el arrecife, si hay acopio de materiales, o bloques de escollera, arenas para la explanación, explanación y desbroce de las superficies de construcción de dichos módulos, etc.

- **Medio terrestre**

Se pueden distinguir efectos sobre la forma en planta y el perfil de la playa que esté situada en el resguardo del arrecife si se utilizan para el fondeo grandes barcos a una distancia reducida de la costa o en una zona en la que la relación entre la altura del objeto sumergido con respecto a la profundidad de la instalación y su extensión en planta altere la forma en la que se propaga el frente de oleaje.

- **Calidad de las aguas**

Estos efectos serán mayores cuanto menor sea la granulometría del sedimento en el que se va a realizar el fondeo del arrecife, debido a que un mayor tamaño del grano dificulta la resuspensión de los granos de arena, y a que la mayoría de los agentes contaminantes que se incorporan en el sedimento se ubican en la fracción fina del mismo.

- **Contaminación del medio marino**

El fondeo de los arrecifes artificiales contribuye a la contaminación del agua presente en la zona cercana al fondeo del mismo, puesto que durante la colocación se produce una resuspensión de los sedimentos de tal forma que si poseen agentes contaminantes, pasarían a la columna de agua. Así mismo, hay que tener en cuenta la posible contaminación que se puede producir a consecuencia de derrames de combustibles de las embarcaciones durante el transporte marítimo de los módulos, hasta la zona de fondeo.

Por último, conviene que los materiales de dichas estructuras no liberen al medio sustancias incompatibles con el mismo.

- **Alteraciones en la calidad físico-química de las aguas**

Concretamente, durante el fondeo de las estructuras, se puede provocar un aumento de la turbidez y, por tanto, una disminución de la transparencia del agua circundante.

- **Contaminación del sedimento**

La resuspensión de sedimentos que se va a producir puede liberar ciertos contaminantes que se encuentran en las capas profundas del sedimento, quedando incorporados en la columna de agua en fase disuelta o en fase particulada, depositándose, en este último caso, en los alrededores de la instalación.

De todas maneras, la resedimentación de los agentes contaminantes se producirá sobre sedimentos ya contaminados, esperándose un aumento casi despreciable en la concentración de los mismos, no siendo por tanto frecuente la contaminación de aguas limpias.

- **Comunidades bentónicas y pelágicas**

Estos organismos se pueden ver afectados por la incorporación de partículas a la columna de agua durante las labores de fondeo. Por un lado, este factor repercutirá en la disminución de la transparencia del agua que implica una merma de la tasa fotosintética de algas y fanerógamas marinas. Además, hay que considerar el efecto de tapizado que se puede producir tras la resedimentación de las partículas incorporadas a la columna de agua, pudiendo llegar a dificultar la respiración de algunos organismos presentes en esas aguas, disminuir la capacidad de alimentación, etc.

- **Incidencias sobre el paisaje marino**

Habrà que tener en cuenta las afecciones que se producen en el paisaje de la lámina de agua debido a la presencia de las embarcaciones del transporte y fondeo de los módulos arrecifales que destacaràn sobre el horizonte marino debido, entre otras cosas, a que el arrecife se va a colocar en una zona cercana al litoral.

- **Niveles sonoros y vibraciones**

Se producirán durante las labores de fondeo, provocado por el uso de grúas, embarcaciones, pontonas, etc.

No obstante, dado el carácter temporal de esta fase, no suele considerarse como un impacto irreversible para las comunidades biológicas implicadas.

7.1.2.EFECTOS SOCIALES

Esta actividad va a generar una serie de beneficios empresariales que se concretará en el sector de servicios. Durante la fase de instalación, se beneficiarán aquellas empresas que presten los servicios de embarcaciones y maquinaria necesaria para el transporte y fondeo de las estructuras, lo que conlleva, a su vez, a una serie de beneficios indirectos para los encargados del mantenimiento de estas maquinarias.

7.1.3.EFECTOS SOBRE EL MEDIO HISTÓRICO Y CULTURAL

Las actuaciones de fondeo, movimientos de áridos, etc., pueden llevar a incidir sobre posibles yacimientos arqueológicos presentes en la zona, así como derivarse en una modificación estratigráfica y estructural de los registros arqueológicos e impedir el acceso a dichos yacimientos, con la consecuente pérdida del potencial científico y sociocultural del mismo.

Por ello es importante, antes de comenzar con esta fase, realizar un estudio de los yacimientos catalogados de la zona para evitar esta situación.

A continuación se resumen estos impactos, para la primera fase de construcción:

7.2. FASE DE SERVICIO

7.2.1.EFECTOS AMBIENTALES

- **Forma en planta y perfil de la playa situada a resguardo del arrecife artificial**

En función de la zona en la que se ubique la estructura, así como su densidad de distribución, se pueden ocasionar una modificación en el sistema de corrientes locales, pudiendo afectar a la deriva litoral y el transporte de sedimentos de la zona y, por tanto, a los perfiles y plantas de cordones arenosos próximos.

En este caso, la mayor influencia la ejercerán aquellos arrecifes destinados a actuar sobre el medio físico, puesto que su objetivo directo es el de disipar/modificar/potenciar la energía del oleaje-corrientes con la consiguiente alteración en el sistema dinámico de la zona.

Para estudiar el grado de afección, será necesario un seguimiento de un ciclo estacional completo que se base en datos de corrientes y oleaje existente en la zona.

Tener en cuenta que en el caso de instalarlos para la práctica del surf, conlleva el concentrar la energía que llega a la costa y aumentar la altura de ola, de manera que habrá un incremento de la erosión en las áreas de incidencia. Se prevé pues, un retroceso de la línea de costa y un aumento en las zonas aledañas a las anteriores.

- **Transporte litoral de sedimentos**

Según sea la dirección del transporte litoral y teniendo en cuenta la profundidad a la que se ubique el arrecife, así como de sus dimensiones y propiedades de permeabilidad a las corrientes, este podrá ejercer de barrera al flujo lo que implica, si no está bien dimensionado, un déficit de arena en las playas aguas abajo del arrecife, además de un posible desequilibrio de los ecosistemas circundantes.

- **Contaminación de las aguas**

Hay que tener en cuenta la posibilidad que los materiales de los que están hechos estos módulos arrecifales puedan desprender al medio marino sustancias indeseadas, puesto que cualquier material va a sufrir cierta degradación física, química y biológica. También experimentarán una interacción con el medio de tal forma que se hace necesario prever un adecuado diseño de los mismos, con sus respectivas campañas de comprobación de la calidad de los sedimentos afectados y con labores de mantenimiento e inspección.

- **Alteraciones en la calidad físico-química de las aguas**

Las estructuras sumergidas van a ser colonizadas a medio plazo. El aumento pues de la carga biológica conllevará ciertas alteraciones en la calidad físico-química de las aguas de la zona como puede ser: la concentración de materia orgánica y nutrientes, el oxígeno disuelto, las partículas en suspensión o la turbidez. De todas maneras, estas afecciones no suelen modificar el estado preoperacional de las condiciones hidrológicas de la zona. Serán más influyentes en espacios del litoral confinados o en sistemas de aguas semicerrados.

- **Alteraciones en la calidad físico-química del sedimento**

Debido al asentamiento de estas comunidades bentónicas mencionado anteriormente, así como por el aumento de materia orgánica del sedimento, la calidad del mismo también se puede ver afectada.

- **Comunidades bentónicas y pelágicas**

Aquellas comunidades bentónicas situadas justo sobre o debajo del sedimento de la zona de colocación del arrecife pueden llegar a desaparecer al verse sepultadas. Por ello, es importante ubicar el arrecife en fondos poco vegetados, donde la variabilidad de las comunidades que estén asentadas suela ser muy baja. Tener en cuenta, también, que la colonización que se va a producir durante la vida útil del arrecife sustituirá cualquier disminución de estas comunidades, quedando así compensada dicha incidencia.

- **Alteraciones derivadas de la presencia de arrecifes en el medio marino**

En general, estos módulos arrecifales instalados, pueden servir como refugio y alimento a diversas especies bentónicas o pelágicas, además de zonas de cría, de desove, etc. Todos estos efectos dependerán, directamente, del diseño de las estructuras, así como de los materiales utilizados para su construcción. Por ejemplo, a mayor superficie útil, mayor será la fijación de las especies colonizadoras y la capacidad de refugio. También hay que tener en cuenta la textura del material, puesto que influye en la cantidad y tipo de organismos que colonicen el módulo, prefiriendo, generalmente, los de textura natural y no los excesivamente lisos o desnaturalizados.

- **Incidencias sobre el paisaje marino**

Por un lado, cabe destacar las incidencias asociadas a fenómenos de acreción, como puede ser el aumento de la playa seca o la presencia de otros elementos geomorfológicos como la aparición de tómbolos o islas, etc. Y por el otro, hacer mención a las incidencias asociadas a fenómenos de erosión como acantilados, rasas litorales, etc. Por último, tener en cuenta el fenómeno de basculamiento, en el que intervienen las dos afecciones anteriores y por el cual una playa lineal cambia su morfología de manera que, apoyará la mayor parte de su potencia sedimentaria en un extremo de la misma, coincidente con algún elemento estructural que se encuentre transversalmente a la línea de costa. El resultado final será el retrocedimiento de las zonas centrales de la misma, formando así una especie de media luna. Estos efectos descritos se suelen presentar en un período de medio a largo plazo.

- **Incidencias sobre el paisaje submarino**

Generalmente, supone una mejora del paisaje con respecto al escenario inicial ya que la mayoría de las zonas en las que se ubican estas estructuras suelen ser amplias llanuras carentes de elementos que rompan la monotonía visual. Además, la presencia de la fauna y flora que se va a asociar a dichos elementos, hará de ellos elementos más atractivos visualmente hablando.

7.2.2.EFECTOS SOCIALES

Debido al carácter principal de la estructura a instalar, se van a generar una serie de benéficos, dotando a la comarca receptora de nuevos espacios dedicados al uso lúdico del litoral. Se podrán mejorar las áreas donde la práctica del buceo recreativo es tradición, pudiendo además potenciar este deporte en lugares no habituales de inmersión. También, podrán servir de elementos de regulación de las actividades pesqueras en un espacio territorial determinado.

7.2.3.EFECTOS ECONÓMICOS

- **Actividad pesquera y acuícola**

Esta actividad puede verse mejorada o empeorada por la presencia del arrecife. Normalmente las artes artesanales de pesca se beneficiarán de la presencia de la estructura, ya que sus características permiten su calado en las proximidades de los arrecifes, que suelen atraer a especies comerciales. Por otro lado, pueden suponer también un impedimento para las artes basadas en la pesca de arrastre o incluso estar destinados concretamente a limitar su uso, para proteger los fondos marinos.

- **Turismo**

Igualmente, la presencia de este tipo de estructuras con fines mayoritariamente recreativos, provocará un aumento del turismo en la zona, que busca la actividad promovida por la instalación de estas estructuras.

7.2.4.EFECTOS SOBRE LA INFRAESTRUCTURAS Y OTROS USOS

- **Infraestructuras**

Se puede llegar a ocasionar interferencias con otras infraestructuras instaladas previamente, como los emisarios o aliviaderos o cableado submarino, pudiendo resultar afectados durante esta fase de la obra. Por ello, se hace necesario desarrollar un cartografiado de las

infraestructuras existentes para poder proyectar un desarrollo constructivo que salvaguarde la incidencia sobre ellas.

- **Navegación**

Hay que tener en cuenta que estos arrecifes se van a instalar en aguas someras, con cotas de coronación muy cercanas a la superficie, por lo que si se instalan en aguas navegables pueden llegar a interferir y ser un riesgo para embarcaciones de navegación de la zona. Por ello, es importante realizar, antes de la instalación de las estructuras, un estudio sobre las rutas de navegación existentes procediendo, en el caso de que exista alguna cercana, a realizar su balizado.

7.3. FASE DE REPARACIÓN O DESMANTELAMIENTO

Se deberá realizar un proyecto de desmantelamiento del arrecife, definiendo las obras a ejecutar para las labores de desinstalación, embarque y transporte al muelle más cercano. Habrá que prever las distintas operaciones para evitar incidencias sobre:

- **Navegación**

Es importante definir la localización exacta de los módulos de arrecife, así como el estado actual de los mismos y la metodología de extracción del fondo marino para que no suponga una interferencia con las rutas de navegación de la zona, ni se altere la calidad ambiental del ecosistema.

- **Medio marino**

Tener en cuenta los posibles desplazamientos, enterramientos, etc., que han podido sufrir los módulos arrecifales, lo que puede conllevar a ciertos destrozos del fondo marino. Por ello, es importante utilizar la georreferenciación para estudiar el estado actual del medio.

También es importante realizar una propuesta de restauración y regeneración de los ecosistemas que hayan podido ser afectados durante la colocación o período operativo del arrecife.

- **Medio económico**

Se debe realizar un estudio sobre los costes económicos que van a suponer todas estas operaciones de desmantelamiento para tratar de optimizar los mismos. Además, se necesitará de un equipo técnico y humano para llevar a cabo estas labores, lo que se traduce en puestos de trabajo temporales.

- **Transporte**

Se necesitará de una serie de medios de transporte que hay que prever para, al igual que en el caso anterior, optimizar su uso evitando el aumento innecesario de la emisión de combustible al medio marino, así como los costes que suponen su utilización. Todo esto, desde la zona de desmantelamiento hasta la de acopio de las estructuras a pie de muelle para su almacenamiento y posterior gestión.

A modo resumen, se muestra la siguiente tabla, con las afecciones más representativas para los arrecifes destinados a otros usos:

	Efectos en el medio ambiente	Efectos en el medio marino	Efectos sociales
Fines turísticos y de ocio	Sobre playas y transporte litoral de arena	Alteración de la hidrología y batimetría. Cambios físico-químicos del agua y del sedimento	Potencian las actividades deportivas y el turismo
Fines educativos y científicos	Sobre playas y transporte litoral de arena	Aumentan la supervivencia, el crecimiento y la reproducción	Estudio de los ecosistemas

Tabla 7: Efectos asociados a los arrecifes artificiales de otros usos.

8. MODOS DE FALLO DEL ARRECIFE ARTIFICIAL

Como ya se mencionó en los apartados anteriores, a la hora de seleccionar los distintos modos de fallo, se tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

- Hablamos de modo de fallo principal cuando este reduce significativamente la fiabilidad, seguridad y operatividad de la operación.
- Los modos de fallo seleccionados deben ser mutuamente excluyentes.
- Los criterios basados en la adecuada práctica permiten despreciar la probabilidad de fallo de algunos modos.

8.1. FASE DE CONSTRUCCIÓN

A continuación se definen los puntos críticos que van a afectar a cada una de las subfases en las que se divide esta etapa de construcción, en función de la cimentación.

8.1.1.PUNTOS CRÍTICOS

- **Condiciones climáticas**

Se debe realizar un estudio para saber cuáles son las condiciones climáticas que se puedan presentar de una manera fiable.

Derivado de este estudio se obtienen los factores que van a determinar la ocurrencia de fallo:

- Altura significativa de ola
- Velocidad de viento
- Velocidad de las corrientes

Definidos los umbrales para cada condición de trabajo, se obtiene la probabilidad de fallo o parada que provocan los agentes climáticos para cada subfase.

- **Fallo de suministro**

Este punto crítico lo que provoca es una pérdida en cuanto a la seguridad, fiabilidad y operatividad durante esta fase de proyecto, concretamente, al proceso de ejecución de la cimentación.

La red eléctrica debe proporcionar la suficiente seguridad para el suministro y alimentación de todos los equipos y maquinaria a emplear.

- **Interferencia con la navegación**

Es uno de los puntos a tener en cuenta puesto que puede derivar en paradas y retrasos de la obra. Por ello, es importante analizar, previamente, las rutas de navegación de la zona y prever un plan de transporte marítimo.

- **Fallo geotécnico**

Es necesario estudiar las características del terreno donde se va ubicar la obra puesto que su comportamiento frente a los esfuerzos, tensiones y deformaciones a los que le va a someter el arrecife pueden provocar el fallo. Concretamente, se pueden considerar los siguientes modos de fallo del terreno:

- Hundimiento de la cimentación
- Deslizamiento local del terreno
- Rechazo durante la hincada del pilote en el caso de que se empleen cimentaciones profundas

- **Estabilidad hidrodinámica**

Será un punto crítico sobre todo en el caso de cimentaciones de gravedad de estos elementos. Los factores que pueden causar el fallo serán los debidos a la acción de las corrientes marinas, las presiones de la lámina de agua, así como el empuje del terreno.

Una de las comprobaciones a realizar para evitar este tipo de fallos es la comprobación al vuelco.

- **Fallo estructural**

Referido, concretamente, al transporte del módulo arrecifal hasta la ubicación final, puesto que se le puede someter a una serie de esfuerzos que produzcan su rotura, que serán específicos según el tipo de cimentación utilizada

8.1.2.CIMENTACIONES DE GRAVEDAD

8.1.2.1. MODOS PRINCIPALES DE FALLO

Teniendo en cuenta los puntos críticos explicados, se detallan a continuación los principales modos de fallo adscritos a ELU, para esta fase de proyecto, especificando para cimentaciones de gravedad:

- **Fallo geotécnico**

- MFPcp₁: Hundimiento de la cimentación
- MFPcp₂: Deslizamiento local del terreno

- **Estabilidad hidrodinámica**

- MFPcg₃: vuelco rígido del módulo arrecifal

- **Fallo estructural**
 - MFPcg 4: Rotura del módulo arrecifal debido a sobrecargas y esfuerzos en la estructura y/o anclajes.

8.1.2.2. ANÁLISIS POR SUBFASES

Las subfasas en las que se divide esta etapa de proyecto, en el caso de empleo de cimentaciones de gravedad, son:

- Fabricación del módulo
- Transporte marítimo
- Enrasar la banqueta de cimentación
- Fondeo de los módulos arrecifales

Teniendo en cuenta esta secuencia, los puntos críticos principales que van a afectar a dichas subfasas son:

- **Condiciones climáticas**

Afectarán a las subfasas de transporte, enrase y fondeo de los módulos. No afecta a la subfase de fabricación pues se considera que las operaciones que componen este proceso se realizan en aguas someras o zonas protegidas frente al oleaje.

- **Fallo de suministro**

Es un modo de fallo que afecta a la subfase de fabricación de los módulos. El factor humano se presenta como el posible causante de este modo de fallo.

- **Interferencia con la navegación**

Influye en la subfase de transporte. Los factores de los que depende son: el volumen del tráfico marítimo de la zona, la maquinaria específica que se necesita y la planificación de las rutas de trabajo.

El modo de fallo a tener en cuenta es el de parada operativa por el tráfico marítimo.

- **Fallo geotécnico**

Influyente en el fondeo de los módulos. Los factores de los que depende son: las características esfuerzo-deformación del terreno, el diámetro y la distribución granulométrica del sedimento, el tipo y geometría de la cimentación, la densidad del agua, la velocidad de las corrientes y la profundidad de la cimentación.

El modo de fallo asociado es el hundimiento de la cimentación y el deslizamiento local del terreno.

- **Fallo por condiciones hidrodinámicas**

Afecta a la subfase de fondeo de los módulos arrecifales. Los factores influyentes son: el empuje del terreno, las presiones de la lámina de agua, y la acción del oleaje. El modo de fallo principal es el vuelco rígido del módulo.

- **Fallo estructural**

Afecta al transporte. El factor del que depende es el dimensionamiento del módulo del arrecife a ubicar. El modo de fallo asociado es el de rotura de dicho módulo por sobrecargas y esfuerzos de la estructura y los anclajes.

8.1.3.CIMENTACIONES PROFUNDAS

8.1.3.1. MODOS PRINCIPALES DE FALLO

- **Fallo geotécnico**
 - MFPcp₁: Hundimiento de la cimentación
 - MFPcp₂: Deslizamiento local del terreno
 - MFPcp₃: Rechazo del pilote
- **Fallo estructural**
 - MFPcp₄: Rotura del pilote o estructura durante la hinca

8.1.3.2. ANÁLISIS POR SUBFASES

- Construcción de la estructura de cimentación
- Transporte
- Instalación de la cimentación
- Instalación de la pieza de transición

De igual manera, se presentan los siguientes puntos críticos que pueden afectar a cada subfase, así como los factores de los que dependen y el modo de fallo asociado:

- **Condiciones climáticas**

Afectan a las subfasas siguientes: transporte, instalación de la cimentación e instalación de la pieza de transición. Los factores de los que dependen son los agentes climáticos del oleaje y el viento.

- **Fallo de suministro**

Influye en la subfase de Fabricación de la estructura de cimentación. En cuanto a los factores de los que depende, se hace referencia al humano, a nivel de planificación y previsión de los posible errores.

- **Interferencia con la navegación**

Subfase de Transporte. Los factores que intervienen son: el volumen del tráfico marítimo, la maquinaria necesaria y la planificación de las rutas de trabajo. El modo de fallo asociado es el de parada operativa del proceso, provocada por el tráfico marino.

- **Fallo geotécnico**

Este punto crítico, afecta a la subfase de Instalación de la cimentación. Los factores de los que depende son: las características esfuerzo-deformación del terreno, la resistencia del terreno, el diámetro y la distribución granulométrica del sedimento y la profundidad de la cimentación.

Los modos de fallo principales son: el de hundimiento de la cimentación, el deslizamiento local del terreno y el rechazo del pilote.

- **Fallo estructural**

Influye en la subfase de instalación de la cimentación y depende del dimensionamiento del pilote o estructura. El modo de fallo identificado es el de rotura del pilote o la estructura, durante la hinca del mismo.

8.2. FASE DE SERVICIO

Se definen los siguientes puntos críticos para esta fase:

8.2.1.PUNTOS CRÍTICOS

- **Condiciones climáticas**

Concretamente, para las subfases de inspección y reparación que se detallarán en el siguiente apartado, es importante prever unas condiciones climáticas lo suficientemente largas como para asegurarnos de la correcta realización de estas operaciones y evitar las posibles paradas operativas.

- **Deterioro de la estructura**

Durante la vida útil de la obra, esta sufrirá una continua degradación por su inevitable interacción con el medio marino, pudiendo llegar a causar la corrosión y la erosión por la acción continuada del oleaje, lo que deriva en una reducción de la fiabilidad y la seguridad y, por tanto, en los correspondientes modos de fallo.

Así pues, los modos de fallo considerados se deberán al:

- Fallo por pérdida de la capacidad estructural
- Fallo por paradas en el funcionamiento

- **Fallo geotécnico**

Depende de las características del terreno en el que se ubique el arrecife artificial. Las variables que influyen directamente son:

- Características esfuerzo-deformación del terreno
- Ángulo de rozamiento
- Resistencia del terreno
- Diámetro y distribución granulométrica del sedimento
- Profundidad de la cimentación

Atendiendo a la probabilidad de ocurrencia, la socavación y la erosión que provoca el oleaje en los módulos, serán los que, principalmente, provoquen la reducción de la fiabilidad y seguridad.

Concretamente, para la socavación, hay que estudiar los distintos factores que pueden influir directamente en la presentación de la misma:

- Tipo y geometría de la cimentación

- Densidad del agua
- Velocidad de las corrientes
- Profundidad de la cimentación
- Diámetro medio de los sedimentos
- Tipo y distribución granulométrica de los sedimentos

Así pues, los distintos modos de fallo que se pueden presentar, debido al fallo geotécnico, en función de la cimentación son:

- **Cimentación de gravedad**
 - Deslizamiento local del terreno
 - Erosión superficial del lecho
 - Deslizamiento profundo del terreno
 - Hundimiento de la cimentación
 - Agotamiento resistente del terreno
 -
- **Cimentación profunda**
 - Erosión superficial del lecho
 - Rotura por arranque
 - Hundimiento del pilote
 - Estabilidad global
 - Rotura del terreno por cargas transversales
- **Fallo estructural**

Es importante determinar las acciones que van a producir los principales esfuerzos en la estructura para asegurar la funcionalidad de la misma.

Por ejemplo, si hablamos de que la cimentación es de gravedad, hay que tener en cuenta las acciones inducidas por las presiones dinámicas e hidroestáticas. En el caso de cimentaciones profundas, serán los pilotes los que sufran los mayores esfuerzos en la punta, el fuste o la cabeza.

- **Estabilidad hidrodinámica**

Se tiene en cuenta, sobre todo, en las cimentaciones de gravedad, ya que puede haber esfuerzos que supongan el vuelco del módulo arrecifal.

- **Operaciones de inspección y reparación**

Es importante que las condiciones climáticas sean las adecuadas para poder realizar estas labores sin problemas. Habrá que analizar la maquinaria a emplear, así como sus umbrales de operación.

8.2.2.CIMENTACIONES DE GRAVEDAD

8.2.2.1. MODOS PRINCIPALES DE FALLO

A continuación se detallan los modos principales de fallo adscritos a ELU, que formarán un conjunto de modos mutuamente excluyentes.

- **Fallo geotécnico**

- MFPcg 5: Hundimiento
- MFPcg 6: Deslizamiento
- **Estabilidad hidrodinámica**
 - MFPcg 7: Vuelco rígido del módulo arrecifal.
- **Fallo estructural**
 - MFPcg 8: Fallo estructural de la sección

8.2.2.2. ANÁLISIS POR SUBFASE

Las subfases en las que se va a dividir esta fase de servicio son:

- Uso y explotación
- Inspección
- Reparación

Conocidos los puntos críticos y las subfases, podemos asociar qué puntos afectan a cada etapa, los factores de los que depende y los modos de fallo relacionados.

- **Condiciones climáticas**

Afectan a las subfases de: uso y explotación, inspección y reparación. Los factores influyentes serán los agentes climáticos, que causan como modo de fallo, respecto a la subfase de uso y explotación, la parada operativa del funcionamiento, y respecto a la subfase de inspección y reparación, la parada operativa de estas labores.

- **Deterioro de la estructura**

Subfase de uso y explotación. Los factores a tener en cuenta son las condiciones del agua, así como los agentes erosivos. Los modos de fallo son la pérdida de capacidad estructural y la parada de funcionamiento del sistema.

- **Fallo geotécnico**

Influye en la subfase de Uso y explotación. Los factores a considerar son: las características del esfuerzo-deformación del terreno, el ángulo de rozamiento, la resistencia del terreno y el diámetro y la distribución granulométrica del sedimento.

Los modos de fallo posibles son: el agotamiento resistente del terreno, el deslizamiento local del terreno, el deslizamiento profundo de terreno, la erosión superficial del lecho y el hundimiento de la cimentación.

- **Fallo estructural**

Afecta a la subfase de uso y explotación. El modo de fallo a considerar es el estructural de la sección.

- **Estabilidad hidrodinámica**

Influye igualmente a la subfase de uso y explotación. Los factores destacables son: el empuje del terreno, las presiones de la lámina de agua y la acción del oleaje. El modo de fallo asociado es el vuelco rígido de la cimentación.

- **Inspección**

Relacionado con la subfase de inspección. Los factores influyentes son las condiciones climáticas. El modo de fallo derivado es el de parada operativa de las operaciones de inspección

- **Reparación**

Subfase de reparación. El factor destacable son las condiciones climáticas. Igual que en el caso anterior, el modo de fallo asociado es el de parada operativa de las operaciones de reparación.

8.2.3.CIMENTACIONES PROFUNDAS

8.2.3.1. MODOS PRINCIPALES DE FALLO

Los modos principales de fallo asociados a esta fase, para el caso de cimentaciones profundas son:

- **Fallo geotécnico**
 - MFPcp₅: Hundimiento
 - MFPcp₆: Rotura por arranque
 - MFPcp₇: Rotura del terreno por cargas transversales
 - MFPcp₈: Estabilidad global
- **Fallo estructural**
 - MFPcp₉: Capacidad estructural del pilote

8.2.3.2. ANÁLISIS POR SUBFASE

Las subfases en la que se divide esta etapa del proyecto son las mismas que para las cimentaciones de gravedad anteriormente comentadas. Así pues, se procede a comentar los puntos críticos que afectarán a cada una de ellas, así como los factores y modos de fallo principales.

- **Condiciones climáticas**

Afecta a las subfases de uso y explotación, inspección y la reparación. Los factores serán los agentes climáticos causando los siguientes modos de fallo: parada operativa del funcionamiento, respecto a la subfase de uso y explotación, y la parada operativa de las operaciones de inspección y reparación, respecto a la subfase de inspección y reparación.

- **Deterioro de la estructura**

Subfase de uso y explotación. Los factores a destacar son: las condiciones del agua y los agentes erosivos. Los modos de fallo derivados: la pérdida de capacidad estructural y la parada operativa de funcionamiento.

- **Fallo geotécnico**

Relacionado con la subfase de uso y explotación. Los factores influyentes son: el dimensionamiento de la estructura de cimentación, las características esfuerzo-deformación del

terreno, la resistencia del terreno, el diámetro y la distribución granulométrica del sedimento y la profundidad de la cimentación.

De esta manera, los modos de fallo principales son: el hundimiento del pilote, en caso de su uso, la rotura por arranque, la rotura del terreno por cargas transversales, la estabilidad global y la erosión superficial del lecho.

- **Fallo estructural**

Igualmente, afecta a la subfase de uso y explotación. Los factores a tener en cuenta son: el dimensionamiento de la estructura de cimentación y las cargas transmitidas al pilotaje en su cabeza, en caso de uso. El modo de fallo será la capacidad estructural del pilotaje.

- **Operaciones de inspección**

Influyente en la subfase de inspección. Los factores serán las condiciones climáticas.

El modo de fallo es el de parada operativa de las operaciones de inspección

- **Operaciones de reparación**

Relacionado con la subfase de reparación. Como en el caso anterior, los factores son las condiciones climáticas. El modo de fallo principal es el de parada operativa de las operaciones de reparación.

8.3. FASE DE DESMANTELAMIENTO

En esta fase hay que tener en cuenta el tipo de estructura y su ubicación, en lo que se refiere al peso de la misma, la profundidad y la distancia a la costa. Atendiendo al reglamento, distinguimos varias alternativas:

- Retirada de toda la estructura
- Retirada de algunos componentes y hundimiento de otros
- Corte de la estructura y retirada de la parte superior
- Abandono de la estructura

De entre todas, la más desfavorable, y que por ello se analizará, es la de la retirada total de la estructura.

Así pues, las subfases que se identifican para esta última etapa del proyecto son:

- **Preparación de la estructura**

Se deben realizar las operaciones necesarias para garantizar la seguridad, revisando todos los elementos que influyan en el comportamiento estructural.

- **Reflotación de la estructura**

Es necesario realizar diversas pruebas tales como la comprobación de la estanqueidad, bombeo de agua, monitorización de operaciones, etc.

- **Transporte**

Se realiza de igual forma que en el proceso de construcción, solo que en sentido inverso.

8.3.1.CIMENTACIONES DE GRAVEDAD

8.3.1.1. MODOS PRINCIPALES DE FALLO

Se especifican a continuación los correspondientes modos de fallo adscritos a ELU, para formar un conjunto completo de modos mutuamente excluyentes.

- **Fallo geotécnico**
 - MFPcg₉: Hundimiento
 - MFPcg₁₀: Deslizamiento local del terreno
- **Estabilidad hidrodinámica**
 - MFPcg₁₁: Vuelco rígido del módulo arrecifal
- **Fallo estructural**
 - MFPcg₁₂: Agotamiento resistente de la estructura.

8.3.1.2. CIMENTACIONES PROFUNDAS

Para esta solución, los modos de fallo son:

- **Fallo geotécnico**
 - MFPcp₁₀: Hundimiento
 - MFPcp₁₁: Deslizamiento local del terreno
- **Fallo estructural**
 - MFPcp₁₂: Agotamiento resistente de la estructura.

8.3.2.ANÁLISIS POR SUBFASES

- **Condiciones climáticas**

Se relaciona con las subfases de preparación, refltación y transporte. En este caso, los factores a tener en cuenta son los agentes climáticos del oleaje y el viento.

- **Interferencia con la navegación**

Afecta a la subfase de transporte y los factores influyentes son el volumen de tráfico marítimo, la maquinaria necesaria y la planificación de las rutas de trabajo. El modo de fallo derivado es el de parada operativa del proceso, provocada por el tráfico marítimo.

- **Fallo geotécnico**

Condicionando a la subfase de refltación, los factores más importantes son las características esfuerzo-deformación del terreno, el diámetro y la distribución granulométrica del sedimento, el tipo y la geometría de la cimentación, la densidad del agua, la velocidad de las corrientes y la profundidad de la cimentación. Los modos de fallo principales son el hundimiento de la cimentación y el deslizamiento local del terreno.

- **Estabilidad hidrodinámica**

En el caso de cimentaciones de gravedad, la subfase que se verá afectada es la reflotación, y los factores influyentes son: el empuje del terreno, la presión de la lámina de agua y la acción del oleaje. El modo de fallo asociado es el de vuelco rígido del módulo arrecifal.

- **Fallo estructural**

Influye en la subfase de transporte. El factor del que depende directamente es el dimensionamiento del módulo. El modo de fallo principal es el de rotura de dicho módulo por sobrecargas y esfuerzos en la propia estructura y/o en los anclajes en caso de uso.

9. DETERMINACIÓN DEL CARÁCTER GENERAL Y OPERATIVO DEL ARRECIFE: PROBABILIDAD DE FALLO

Mediante las instrucciones detalladas por la ROM, en este apartado se determina:

- **Carácter general:**

- IRE: Vida útil mínima
- ISA: Máxima probabilidad conjunta de fallo en la vida útil
 - Estados límite últimos
 - Estados límite de servicio

9.1. FASE DE CONSTRUCCIÓN

El conjunto de los modos de fallo o parada satisfacen el requisito de proyecto frente a la seguridad, el servicio, el uso y la explotación, siempre y cuando la superposición lineal de las probabilidades de ocurrencia en la fase de proyecto sea menor o igual que la probabilidad conjunta de fallo o parada exigible en el proyecto. Se tiene entonces que:

$$\sum_{j=1}^N p_{f,EL,j} \leq p_{f,EL}$$

$P_{f,EL,j}$ Se define como la probabilidad de fallo del modo en la fase de proyecto y $p_{f,EL}$ sería la probabilidad de fallo o parada del conjunto de los N modos de fallo o parada adscritos a los estados límite últimos o de servicio y de parada operativa respectivamente.

Así pues, a la hora de calcular la probabilidad conjunta en esta fase de construcción, se debe determinar el ISA de la fase o subfase, en función del modo de fallo pésimo.

Con todo esto, se procede a calcular el ISA, que es el índice de repercusión ambiental y social. Para calcularlo hace falta tres índices:

- **ISA₁**: posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas.

Se asignan los siguientes valores según la posibilidad y alcance:

- Remoto, (0), improbable que se produzcan daños a personas
- Bajo, (3), la pérdida de vidas humanas es posible aunque poco probable (accidental), afectando a pocas personas
- Alto, (10), la pérdida de vidas humanas es muy probable pero afectando a un número no elevado de personas.

- Catastrófico (20), la pérdida de vidas humanas y daños a las personas es tan grave que afecta a la capacidad de respuesta regional.

Por el tipo de obra que se está describiendo en el presente proyecto, se considera un subíndice $ISA_1=0$

- **ISA₂**: estimación de los daños en medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico.

En este segundo caso, se pueden atribuir los siguientes valores en función de la posibilidad, persistencia e irreversibilidad de daños en el medio ambiente o en el patrimonio histórico-artístico.

- Remoto (0), es improbable que se produzcan daños ambientales o al patrimonio.
- Bajo, (2), daños leves reversibles (en menos de un año) o pérdidas de elementos de escaso valor.
- Medio (4), daños importantes pero reversibles (en menos de cinco años) o pérdidas de elementos significativos del patrimonio.
- Alto (8), daños irreversibles al ecosistema o pérdidas de unos pocos elementos muy importantes del patrimonio.
- Muy alto (15), daños irreversibles al ecosistema, implicando la extinción de especies protegidas o la destrucción de espacios naturales protegidos o un número elevado de elementos importantes del patrimonio.

Se le atribuye un valor de:

$$ISA_2=2$$

- **ISA₃**: alarma social.

Teniendo en cuenta la intensidad de la alarma social generada, elegimos entre:

- Bajo, (0), no hay indicios de que pueda existir una alarma social significativa asociada al fallo de la estructura.
- Medio (5), alarma social mínima asociada a los valores de los subíndices ISA_1 e ISA_2 altos.
- Alto, (10), alarma social mínima debida a valores de los subíndices ISA_1 , catastrófico e ISA_2 , muy alto.
- Máxima (15), alarma social máxima.

Y este tercer subíndice tiene un valor de:

$$ISA_3=0$$

El ISA total, se define como la sumatoria de los tres anteriores:

$$ISA = \sum_{i=1}^3 ISA_i = 0 + 2 + 0 = 2$$

Implica obras con **repercusión social y ambiental baja**.

Por tanto, la probabilidad de fallo en la fase de construcción es:

$$P_{f,c} = 0.2$$

En base a la siguiente tabla:

ISA del tramo en servicio o en construcción	Máxima $p_{f,c}$ subfase construcción
No significativo, <5	≤ 0.20
Bajo, 5 - 19	≤ 0.10
Alto, 20 - 29	≤ 0.05
Muy alto > 30	≤ 0.01

Tabla 8: Valor numérico del ISA del tramo y máxima probabilidad de fallo admisible en la fase de construcción según la ROM.

9.2. FASE DE SERVICIO

Se trata de analizar el carácter general de la obra con el cálculo del IRE y el ISA para, a partir de ellos, determinar la probabilidad de fallo admisible durante la fase de servicio.

El IRE se define como el índice de repercusión económica y se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\text{IRE} = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_0}$$

- **C_{RD}** : Valora cuantitativamente las repercusiones económicas por reconstrucción de la obra.

Es, en definitiva, el coste de la inversión de las obras de reconstrucción de la obra marítima a su estado previo, en el año en el que se valoren los costes por cese o afección de las actividades relacionadas con dicha obra. Este coste podrá considerarse, a falta de estudios, igual a la inversión inicial actualizada al año citado.

- **C_{RI}** : Representa las repercusiones económicas por el cese o afección de las actividades económicas directamente relacionadas con la obra, ya sean oferentes de servicios creados tras su puesta en servicio o demandantes y causadas por daños en los bienes definidos.

Se valora en términos de pérdida de Valor Bruto Añadido (VAB), a precios de mercado durante el período estimado de duración de la reconstrucción, tras la destrucción o pérdida de operatividad de la obra, teniendo en cuenta que ésta se produce una vez que se han consolidado las actividades económicas directamente relacionada con la obra.

- **C_0** : Es un parámetro económico adimensional.

El valor de dicho parámetro depende de la estructura económica y del nivel de desarrollo económico del país en el que se vaya a construir la obra, variando con el transcurso del tiempo. En España se toma para el año horizonte en los que se valoran los costes C_{RD} y C_{RI} , $C_0=3$ Millones de euros.

El cociente C_{RI}/C_0 , se puede estimar cualitativamente y de forma aproximada según la siguiente ecuación:

$$\frac{C_{RI}}{C_0} = (C) * [(A) + (B)]$$

- (A): es la valoración del ámbito del sistema económico y productivo. Se calcula asignándole los siguientes valores dependiendo de dicho ámbito:
 - Local, (1)
 - Regional, (2)
 - Nacional/Internacional, (5)

Así pues, tenemos que: A=2

- (B): se define como la importancia estratégica del sistema económico y productivo. Se valora según sea:
 - Irrelevante, (0)
 - Relevante, (2)
 - Esencial, (5)

Le asignamos B=2.

- (C): la importancia de la obra para el sistema económico y productivo al que sirve.
 - Irrelevante, (0)
 - Relevante, (1)
 - Esencial, (2)

Con un valor final de C=1

Con todo definido, se puede sacar el valor final de la repercusión económica que se da por el cese de las actividades económicas relacionadas con la obra.

$$C_{RI} = 1 * 3 * (2 + 2) = 12 \text{ Millones de euros}$$

El IRE queda definido, pues, en función de C_{RD} :

$$IRE = \frac{C_{RD} + 12}{3}$$

En función del valor que resulte, hablamos de:

- R1, obras de repercusión económica baja: $IRE < 5$
- R2, obras de repercusión económica baja: $5 < IRE \leq 20$
- R3, obras de repercusión económica baja: $IRE > 20$

Normalmente, para este tipo de obras, tendremos un **IRE < 5**, que supone una repercusión económica baja.

En función del IRE, establecemos la **duración de la fase de servicio o vida útil igual a 15 años**.

Por otro lado, para un **ISA=2**, tenemos que la máxima probabilidad de fallo en la fase de servicio es de:

$$P_{f,s} = 0.2$$

De acuerdo a la *Tabla 9. Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio o vida útil para los E.L.U.*

Por otro lado, la probabilidad conjunta de fallo frente a los modos principales de fallo adscritos a los estados límite de servicio no podrán exceder de:

$$P_{f,s} = 0.2$$

Según la tabla:

ISA	Pf,ELU	βELU
<5	0.20	0.84
5-19	0.10	1.28
20-29	0.07	1.50
≥30	0.07	1.50

Tabla 9: Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio o vida útil para los E.L.S según la ROM.

9.3. FASE DE DESMANTELAMIENTO

En esta última fase del proyecto, para calcular la probabilidad de fallo admisible, procedemos de la misma manera que en la fase de construcción anteriormente detallada. De esta manera, el índice de repercusión social y ambiental ISA, sería el mismo que el de dicha fase.

Por tanto quedaría:

$$P_{f,desm} = 0.2$$

9.4. CARÁCTER OPERATIVO

Se determina el IREO y el ISAO para obtener:

- IREO: Operatividad mínima en la vida útil
- ISAO: Número medio de paradas operativas en el intervalo de tiempo
- IREO, ISAO: duración máxima admisible de una parada operativa.
- **Índice de Repercusión Económica Operativo IREO**

Valora cuantitativamente los costes ocasionados por la parada operativa del tramo de obra. En función de este índice, las obras marítimas se clasifican en tres tipos correspondientes a tres subintervalos, RO_i , $i=1, 2,3$

- RO_1 : obras con una repercusión económica operativa baja: $IREO \leq 5$
- RO_2 : obras con repercusión económica operativa media $5 < IREO \leq 20$
- RO_3 : obras con repercusión económica operativa alta: $IREO > 20$

Así pues, este índice se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$IREO = (F) * [(D) + (E)]$$

Estos coeficientes evalúan la simultaneidad, intensidad y adaptabilidad de la demanda a la situación de parada.

- (D): caracteriza la simultaneidad del periodo de la demanda afectado por la obra y con el periodo de intensidad del agente que define el nivel de servicio. Se valora por
 - Periodos no simultáneos (0)
 - Periodos simultáneos (5)
- (E): caracteriza la intensidad de uso de la demanda en el periodo de tiempo considerado, de acuerdo a :
 - Poco intensivo, (0)
 - Intensivo (3)
 - Muy intensivo (5)
- (F): caracteriza la adaptabilidad de la demanda y del entorno económico al modo de parada operativa, según:
 - Adaptabilidad alta, (0)
 - Adaptabilidad media, (1)
 - Adaptabilidad baja, (3)

En aquellos casos en los que no se determinen estos costes, ya sea por complejidad desproporcionada respecto a la magnitud de la obra o por falta de estudios previos, el IREO se puede estimar igual que el IRE. De esta manera, hablamos de una obra con una repercusión económica operativa baja:

IREO ≤ 5

▪ **Operatividad mínima**

Teniendo en cuenta que el IREO es menor a 5, la operatividad mínima exigida es del: **85%**.

• **Índice de repercusión social y ambiental operativo ISAO**

Estima de manera cualitativa la repercusión social y ambiental que se puede esperar, en el caso de que se produzca un modo de parada operativa de la obra marítima, teniendo en cuenta el alcance y la posibilidad de: (1) pérdidas de vidas humanas, (2) daños en el medio ambiente y el patrimonio histórico-artístico y (3) la alarma social generada. La ecuación es de la forma:

$$\mathbf{ISAO} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{ISAO}_i$$

Donde \mathbf{ISAO}_1 , es el subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas; \mathbf{ISAO}_2 , es el de daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico e \mathbf{ISAO}_3 , el de alarma social.

Así pues, dependiendo del valor de este índice de repercusión social y ambiental, los tramos de la obra marítima se clasifican en cuatro tipos en función de cuatro subintervalos $S_{0,i}$, $i=1, 2, 3,4$.

- $S_{0,1}$: obras sin repercusión social y ambiental significativa, $\mathbf{ISAO} < 5$
- $S_{0,2}$: obras con repercusión social y ambiental baja, $5 \leq \mathbf{ISAO} < 20$
- $S_{0,3}$: obras con repercusión social y ambiental alta, $20 \leq \mathbf{ISAO} < 30$
- $S_{0,4}$: obras con repercusión social y ambiental muy alta, $\mathbf{ISAO} \geq 30$

Decir tiene que, en la inmensa mayoría de obras marítimas, el ISAO es nulo puesto que una vez que se ha producido la parada operativa, cesa la causa del impacto ambiental, en el caso de que lo haya.

Igualmente, se puede estimar este índice, de manera cualitativa, con el método propuesto para el cálculo del ISA. De esta forma, la obra no tiene una repercusión ambiental y social significativa:

ISAO<5

▪ Número medio de paradas

Igualmente, para el valor establecido del ISAO, el número medio de paradas operativas es de: **10**.

• Duración máxima de una parada

Por último, mediante los valores obtenidos, se puede considerar **24 horas**, como la duración más probable de una parada operativa.

10. CLIMA MARÍTIMO

Es imprescindible realizar un análisis del clima marítimo de la zona de emplazamiento del arrecife artificial a fin de conocer el movimiento de las masas de agua para poder predecir, entre otras cosas, el transporte de sedimentos, el empuje que tendrá que soportar el arrecife, etc.

Para ello, nos basaremos en los datos registrados por los puntos WANA o las Boyas de la zona de emplazamiento, durante un intervalo de años dado.

10.1. CONJUNTO DE DATOS REDEXT

En este caso, los datos de los que se parten para analizar el clima marítimo de una zona concreta, provienen de las medidas de la Red de Boyas de Aguas Profundas (Red Exterior).

Este tipo de boyas están fondeadas lejos de la costa, a más de 200 metros de profundidad, de manera que no hay perturbaciones ni alteraciones en las medidas del oleaje y, por tanto, proporcionan observaciones representativas de grandes zonas litorales.

En esta red, existen dos tipos de Boyas:

- Wavescan: miden el Oleaje y variables Atmosféricas.
- SeaWatch: miden el Oleaje y los parámetros Atmosféricos y Oceanográficos.



Figura 8: Boya Wavescan

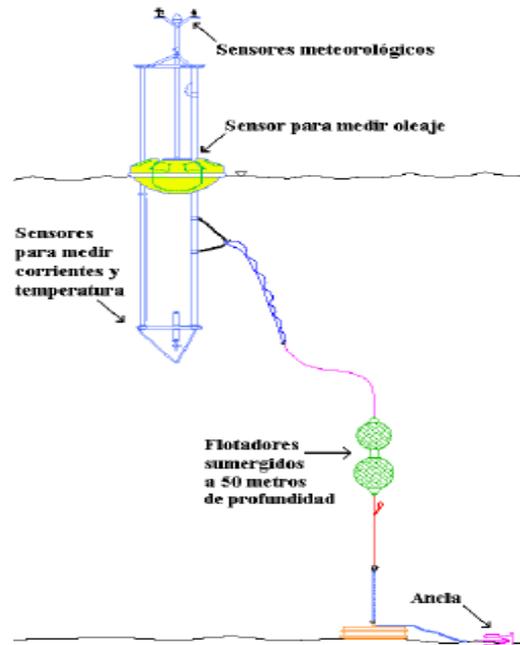


Figura 9. Boya SeaWatch

Ambas constan de unos sensores que procesan y almacenan los valores medidos. De esta manera, la boya genera un conjunto de parámetros estadísticos que caracterizan los agentes. Además, estos parámetros se transmiten vía satélite con una periodicidad horaria. A parte de generar estos parámetros, en el caso del oleaje, almacena las series brutas de desplazamientos inducidos por el oleaje, que son procesadas por Puertos del Estado, generando así un segundo conjunto de parámetros de estado del oleaje.

La cadencia de medida es de un dato por hora, sin embargo, los parámetros proporcionados no se miden a lo largo de una hora. A continuación, se detalla la duración de la medida para cada agente

Agente	Duración de la medida
Oleaje	30 minutos.
Velocidad del viento	10 minutos
Velocidad de Corriente	10 minutos
Temperatura del Aire	Instantánea
Presión del Aire	Instantánea
Salinidad del Agua	Instantánea
Temperatura del Agua	Instantánea

Tabla 10: Duración de la medida de cada agente.

Los parámetros de los que se disponen son:

- **Parámetros del Oleaje.**
 - Parámetros escalares de cruce por cero y espectrales.
 - Altura significativa Espectral y de Cruce por cero.
 - Periodo Medio Espectral y de Cruce por cero.
 - Altura máxima y Período asociado.
 - Periodo significativo.
 - Parámetros direccionales.

- Dirección media
- Dirección media en el pico de energía
- Dispersión de la Dirección en el Pico de Energía.
- Espectros direccionales codificados en bandas de frecuencia.
- **Parámetros Meteorológicos.** (datos registrados a 3 metros sobre la superficie)
 - Velocidad y dirección media del Viento
 - Velocidad de Racha y del Viento
 - Temperatura del Aire.
 - Presión del Aire.
- **Parámetros Oceanográficos.** (datos registrados a 3 metros bajo la superficie)
 - Velocidad y dirección media de Corriente
 - Temperatura del agua
 - Salinidad (a partir de medidas de conductividad)

10.2. PUNTOS WANA

En este caso, los datos WANA están formados por series temporales de parámetros de viento y oleaje que proceden del modelado numérico. Son, pues, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza. Concretamente, estas series provienen del sistema de predicción del estado de la mar de Puertos del estado junto con la Agencia Estatal de Meteorología. Así pues, los datos WANA son datos de análisis o de diagnóstico, pero no de predicción.

Las series temporales de viento y oleaje no son homogéneas, ya que los modelos se van modificando de manera periódica a fin de introducir mejoras.

Los modelos numéricos empleados para generar las series de viento y oleaje son:

- **Viento:** Se utiliza el modelo HIRLAM de AEMET. Es un modelo atmosférico mesoescalar e hidrostático. Los datos de viento facilitados son 10 metros sobre el nivel del mar.
- **Oleaje:** Se utilizan los modelos WAM y WaveWatch, alimentados por los campos de viento del modelo HIRLAM: son modelos espectrales que resuelven la ecuación de balance de energía sin establecer ninguna hipótesis sobre la forma del espectro del oleaje.

Los parámetros disponibles son:

- **Oleaje**
 - Altura significativa espectral
 - Periodo de pico espectral
 - Periodo medio espectral (momentos 0 y 2)
 - Dirección media de procedencia del oleaje.
 - Altura y dirección de mar de viento.
 - Altura, periodo medio y dirección de mar de fondo.
- **Viento**
 - Velocidad media
 - Dirección media de procedencia del viento.

10.3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL OLEAJE Y DEL VIENTO

Lo primero que se hará es una descripción general del oleaje y del viento en profundidades indefinidas. Concretamente, se obtendrá los histogramas de altura de ola y velocidad del viento con sus correspondientes frecuencias de ocurrencia.

Igualmente, se representará el histograma de periodo de pico para ver cuáles son los más representativos, y el de las direcciones medias de procedencia del oleaje y del viento, para caracterizar las direcciones predominantes de ambos.

Mediante las gráficas de dispersión, sabremos la probabilidad conjunta de ocurrencia para cada altura de ola y período pico, altura de ola y dirección media, periodo de pico y dirección media y velocidad del viento y dirección de procedencia.

Por último, a modo resumen, se muestran las rosas de oleaje y la de velocidad del viento, que indican la probabilidad de ocurrencia de la altura de ola o de la velocidad del viento para cada dirección.

10.4. RÉGIMEN MEDIO DE ALTURA DE OLA Y VELOCIDAD DE VIENTO EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS

Se define como el conjunto de estados de oleaje que más probablemente nos podemos encontrar. Caracteriza el comportamiento probabilístico del régimen del oleaje en el que, por término medio, se va a desenvolver una actividad influida por uno de estos agentes.

Así pues, en este apartado del análisis del clima marítimo, se obtiene el régimen medio anual en profundidades indefinidas para H_s y V_v , considerando todas las direcciones. Después, se calcula de nuevo para las dos predominantes.

Los regímenes medios de altura de ola y de velocidad del viento se ajustan a la distribución de probabilidad de Weibull, cuya función de densidad viene dada por:

$$Y = f(x|a, b) = (ba^{-b}) * (x^{b-1}) * e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} I_{(0, \infty)}(x)$$

Se representará los histogramas de frecuencias junto con su función de densidad, que nos indica la probabilidad de ocurrencia de H_s y de V_v , y el de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que nos indica la probabilidad de no excedencia de H_s y V_v .

Además, se indicará, en papel probabilístico normal, la función de distribución escalar de altura de ola y en las dos direcciones principales de procedencia de altura de ola.

Estas operaciones se repetirán para las dos direcciones predominantes tanto en altura de ola como en la velocidad del viento.

10.5. RÉGIMEN EXTREMAL DE ALTURA DE OLA Y VELOCIDAD DE VIENTO EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS

Es importante garantizar que la seguridad y la operatividad de una instalación no se vea condicionada por las acciones de un temporal, en el que las alturas de ola y las velocidades del viento sobrepasan un umbral poco frecuente.

Así pues, en este apartado se trata de realizar un modelo estadístico que describa la probabilidad con la que se puede presentar un temporal.

Para analizarlo, se usará el método POT (Peaks Over Threshold). Para ello, se deberá de fijar unos umbrales de altura de ola y de velocidad del viento que, según la ROM 0.0, serán los que sean superados en menos del 1% del tiempo del año medio. Además, para asegurar la independencia estadística entre temporales, se deberá de suponer una duración mínima entre temporales que suele ser de 36 horas o 48 horas.

Para caracterizar el régimen de picos sobre umbral, se utilizará la distribución de valores extremos generalizada representativa del régimen:

$$Y = f(x|k, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} * \exp\left(-\left(1 + k * \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k * \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}}$$

En la que μ y σ son los parámetros de localización y escala, y k es el parámetro de forma. Según sea el valor de k , tendremos un tipo de distribución u otra:

- Tipo I ($k=0$, Gumbel)
- Tipo II ($k>0$, Frechet)
- Tipo III ($k<0$, Weibull)

Con todo esto, se podrá representar la función de densidad escalar y la de distribución acumulada, tanto en régimen escalar, como para las dos direcciones predominantes.

11. EFECTOS SOBRE LA DINÁMICA LITORAL

Es importante estudiar las posibles afecciones que causa la implantación del arrecife artificial en los procesos litorales. Estos procesos comprenden las interacciones dinámicas que se dan en el área de contacto entre la masa de agua y la tierra que la rodea.

Así pues, la zona litoral es una interfase dinámica en continua evolución debido a los agentes que en ella actúan, mareas, corrientes litorales, oleaje, etc., además de una intensificación de la actividad humana en ella.

11.1. EFECTOS DE LA INSTALACIÓN DEL ARRECIFE EN LA COSTA

La colocación del arrecife artificial cerca de la costa puede causar:

- **Efectos en la forma en planta o perfil de la playa que esté al resguardo del arrecife**

En función del lugar que finalmente ocupen los módulos, así como de la densidad de distribución, se puede llegar a provocar cambios en el sistema de corrientes de la zona que influye, a su vez, en la deriva litoral y el transporte de sedimentos y, finalmente, en los perfiles y plantas de las playas próximas. Estos efectos se incrementarán en el caso de que las estructuras a instalar sean de gran tamaño, como los pecios, que se sitúan a una distancia reducida de la costa o bien a una profundidad tal que la relación entre la altura del objeto sumergido respecto a la profundidad de la instalación y su extensión en planta sea capaz de alterar la forma en la que se propaga el frente del oleaje. Los efectos serán más negativos en zonas de bahías y ensenadas.

- **Efectos sobre el transporte de sedimentos**

Dependiendo de la dirección del transporte litoral, la profundidad a la que se disponga el arrecife artificial y de las corrientes de la zona, los módulos pueden ejercer de barrera al flujo provocando un déficit de arena en las playas que estén situadas aguas debajo de los mismos o, por el contrario, un exceso o un desequilibrio en los ecosistemas de alrededor.

El movimiento de los sedimentos situados en zonas cercanas a la costa va a estar influido por el movimiento de las olas y las corrientes y abarca los movimientos a lo largo de la costa, así como los movimientos en la costa y en mar abierto. Este movimiento puede ser de carácter estacional y variar según las condiciones meteorológicas.

Así pues, es necesario tener en cuenta esta variable a la hora de ubicar el arrecife artificial, a fin de que:

- Los módulos no acaben enterrados después de un tiempo de la instalación.
- El arrecife no debe de intervenir en las pautas naturales del transporte de sedimentos
- **Efectos concretos de los arrecifes para el turismo y el ocio**

En el caso de que el arrecife a instalar esté destinado a potenciar el oleaje para la práctica de deportes acuáticos como el surf, se provocará un aumento de los fenómenos erosivos, siendo previsible que se produzca un retroceso de la línea de costa en el área incidente y un aumento de la playa seca en zonas aledañas o un incremento de la potencia de las barras litorales.

11.2. MODELADO NUMÉRICO DELFT3D

A la hora de evaluar todos estos factores se utilizará, a partir de las condiciones climáticas, el modelo Delft3D.

Este modelo numérico permite estudiar la dinámica litoral en cuanto a las corrientes, el transporte de sedimentos, oleaje, etc.

Para ello, se partirá de una batimetría de detalle de la zona a analizar, puesto que es indispensable en cualquier estudio de corrientes y propagación del oleaje.

Este programa consta de dos módulos:

- **Flow**: con el que se obtiene las variables hidrodinámicas a partir de datos de marea, oleaje y viento. Se puede simular el flujo y el transporte en aguas someras debido a las mareas y a los forzamientos meteorológicos.
- **Wave**: para propagar el oleaje desde profundidades indefinidas.

Concretamente, el modelo permite estudiar:

- La altura de ola, el período y la dirección del oleaje en el emplazamiento, propagándolo a partir de datos en profundidades indefinidas.
- El efecto en la elevación de la superficie libre de las mareas astronómicas y meteorológicas y el oleaje.
- Los valores de las tensiones tangenciales que el flujo provoca en el lecho, para estimar las tasas de transporte de sedimentos, así como la erosión o el aterramiento que se pueden producir.

Así pues, resulta esencial analizar este apartado para asegurar que el arrecife no interviene de manera negativa en el transporte litoral y, además, que los módulos no quedarán enterrados al cabo de un cierto tiempo de su instalación, suponiendo la pérdida de su funcionalidad.

12. CÁLCULO DE LAS ESTRUCTURAS

A la hora de asegurar que los arrecifes cumplen con su función, es necesario comprobar que son capaces de soportar los esfuerzos a los que se van a ver sometidos durante su vida útil.

12.1. ESTABILIDAD DE LOS ARRECIFES FRENTE AL OLEAJE Y LAS CORRIENTES

Es fundamental que sean estables frente a estas acciones para evitar volcamientos, desplazamientos o la rotura del propio módulo arrecifal que causarían:

- Cese de las funciones del arrecife por el desplazamiento sufrido o bien por rotura o vuelco, modificándose su configuración.
- El arrecife artificial se ve arrastrado sobre fondos productivos de manera que daña a los ecosistemas presentes.
- El arrecife o alguna de sus partes, una vez desplazado, se sitúa en una zona que interfiere con otros usos como la navegación.
- Los fragmentos del arrecife provoca el aumento de los objetos que están a la deriva en el mar.

12.1.1. ESTABILIDAD FRENTE AL OLEAJE

Se sugiere los siguientes cálculos para comprobar la estabilidad frente al oleaje:

Se debe de partir de los siguientes datos:

- La profundidad mínima a la que se encuentra el arrecife artificial (d).
- La altura de ola (H) y con ella el período (T).

Definimos la profundidad relativa como el cociente entre la profundidad de la estructura y la longitud de onda

$$\text{Profundidad relativa} = \frac{d}{L}$$

A continuación se esquematiza en la siguiente tabla, las fórmulas que definen cada profundidad:

Profundidad indefinida	Zona de transición	Profundidad reducida
$\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$	$\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	$\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$
$\frac{d}{g} * T^2 > 0.08$	$0.08 > \frac{d}{g} * T^2 > 0.0025$	$\frac{d}{g} * T^2 < 0.0025$

$v \cong 0$	$L = \frac{g * T^2}{2 * \pi} * tgh \left(2 * d * \frac{\pi}{L} \right)$	$v \cong cte$
-------------	--	---------------

Tabla 11: Profundidades relativas

Teniendo en cuenta la velocidad horizontal del agua según la profundidad relativa, tenemos:

$\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$	$\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$
$V \cong 0$	$V \cong cte$
No se realiza ningún calculo pues la velocidad del agua es casi nula	La velocidad es constante para toda la profundidad.

Tabla 12: Velocidad del agua en función de la profundidad.

Considerando que la estructura se sitúa en la zona de transición, obtenemos T , d y L mediante:

$$L = \frac{g * T^2}{2 * \pi} * tgh \left(2 * d * \frac{\pi}{L} \right)$$

Y con las características del oleaje, ya estamos en disposición de calcular la estabilidad de la estructura mediante la fórmula propuesta de Djounkovski y Bojitch:

$$G(f * \cos\alpha - \sin\alpha) = S * \omega * \pi * h^2 / L * e^{-2*\pi*z/L}$$

Siendo:

- G : el peso del Arrecife Artificial por unidad de superficie.
- f : el coeficiente de rozamiento entre el arrecife y el fondo $f \approx 0.79$ (arenas)
- α : la pendiente del fondo en grados.
- S : coeficiente de seguridad.
- ω : peso específico del agua del mar $\omega = 1.035 \frac{Kg}{m^3}$
- h : semialtura de la ola de cálculo.
- L : semilongitud de la ola de calculo
- z : la profundidad.

Con todo esto, se saca el coeficiente de seguridad (S).

12.1.2. ACCIÓN DINÁMICA DE LA CORRIENTE SUBMARINA FRENTE AL VUELCO Y DESLIZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA.

Dada una corriente submarina de velocidad dada (V), se puede provocar en la estructura una fuerza (F) tal que:

$$F = C_o * A * W_o * V^2 / 2 * g$$

Siendo:

- C_o : el coeficiente de forma del arrecife, de tal forma que puede valer 1 si es circular, 2 si es cuadrado y 3 si es trabado.

- A : la sección perpendicular a la corriente.
- W_0 : la densidad del agua del mar.
- V : la velocidad de la corriente.

La suma de las resistencias que se oponen a este empuje es:

$$R = N * tg(\varphi)$$

En donde:

- N : es el peso del módulo sumergido en el agua del mar.
- φ : es el coeficiente de rozamiento entre el material y el fondo. Por ejemplo, si tenemos el hormigón con la arena, $\varphi = 30^\circ$

Así pues, las condiciones de deslizamiento y vuelco son:

- El módulo arrecifal deslizará si se da que $F > R$
- Volcará cuando se cumpla que $F * d > N * e$

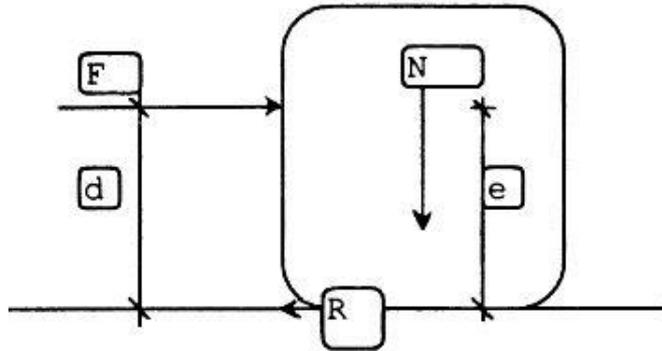


Figura 10: Esquema de fuerzas en módulo arrecifal tipo.

12.2. ESTABILIDAD DE LOS MÓDULOS FRENTE A LAS REDES DE ARRASTRE

En aquellos casos en los que el arrecife se vaya a instalar en una zona en la que la pesca de arrastre esté extendida, será necesario asegurar la estabilidad del mismo para evitar que sea llevado por las redes.

Es necesario saber previamente:

- La abertura máxima de las redes de arrastre y la maniobrabilidad de las embarcaciones, para determinar la distribución de los elementos estructurales del arrecife.
- La máxima potencia de las embarcaciones.

Además, es necesario conocer la capacidad máxima de arrastre de la flota pesquera y el anclaje necesario de las estructuras al fondo.

Así pues, la resistencia del arrecife artificial frente a estas redes de arrastre, quedará asegurada si se cumple la siguiente expresión:

$$P_d < \frac{R * V}{75}$$

Siendo:

- P_d : la potencia de arrastre de cálculo en CV.
- R : la fuerza de rozamiento.
- V : la velocidad de arrastre en m/s

Para calcular P_d , se utiliza la siguiente expresión:

$$P_d = P_n * C_u * C_p * C_m$$

Siendo:

- P_n : la potencia nominal del arrastrero. Se puede obtener del censo de la flota susceptible de faenar en las aguas del proyecto.
- C_u : coeficiente de utilidad (rendimiento del motor) $0.7 < C_u < 0.9$
- C_p : coeficiente de propulsión, que varía con el número de revoluciones, el tipo de hélice, etc., de tal forma que tendremos:
 - Hasta las 300 r.p.m. 0.22-0.28
 - Más de 300 r.p.m. 0.20
 - Para una hélice de paso variable 0.24-0.30
- C_m : coeficiente del estado de mar:
 - Mar en calma: 1.0
 - 2-3: 0.9
 - Ligeramente agitado 3-4: 0.8
 - Agitado 4-6: 0.7

En cuanto a la fuerza de rozamiento total, utilizamos:

$$R = [(R_r + R_c + R_p) * F] + R_a$$

En la que:

- R_r : es la fuerza de rozamiento de la red de arrastre, definida por:

$$R_r = 191 * \frac{d}{l} * V^2 * S_v * \sin(\alpha)$$

- d : diámetro de los hilos de la red (mm)
- l : lado medio de las mallas (mm)
- V : la velocidad media de arrastre en m/s.
- S_v : superficie media total de los paños de red (m²).
- α : ángulo de ataque del paño (°)
- R_c : es la fuerza de rozamiento de los cables, que se puede obtener mediante:

$$R_c = k * \gamma * D * L * V^2$$

- k : es el coeficiente de arrastre
- γ : densidad del agua marina en (mks).

- D : Diámetro de los cables. En el caso de los grandes arrastreros, el diámetro viene definido por la potencia del motor en CV., que de manera aproximada es:

$$D = 18 + 0.0034 * P$$

- L : longitud del cable en metros. Se puede estimar mediante la siguiente expresión experimental:

$$L = \left(3 + \frac{25}{profundidad} \right) * profundidad$$

- R_p : es la fuerza de rozamiento de las puertas

$$R_p = 0.25 * R_r$$

- R_a : fuerza de rozamiento del arrastre de la estructura:

$$R_a = f * N$$

- f : es el coeficiente de rozamiento.
- N : peso sumergido del módulo.

F : Coeficiente de reducción debido al enganche.

13. MATERIALES

A la hora de seleccionar el material con el que se construyen los módulos arrecifales, es necesario tener en cuenta diversos aspectos para asegurar su adecuado funcionamiento y salvaguardar la integridad de los mismos y del medio circundante.

Se deben de construir con materiales inertes, es decir, que no contaminen por lixiviación, y con resistencia a la actividad física y química a las que están sometidos por situarse a la intemperie y/o la actividad biológica.

Debe de tener una fuerza técnica suficiente a nivel individual y en grupo como para soportar las tensiones físicas del medio marino y no romperse.

Por otra parte, deben de ser voluminosos, como el material geológico, hormigón o acero.

Se pueden emplear materiales naturales, reciclables, de segunda mano, o bien estructuras prefabricadas. También, es posible combinar distintas tipologías, que aportan mayor variedad para las comunidades biológicas y para los usuarios.

En el caso de que se utilicen los materiales reciclables, la principal ventaja que se deriva es la disponibilidad de los mismos. Además, se utilizan estructuras desechadas de forma productiva. Tener en cuenta que en el empleo de estas estructuras como arrecifes, pueden existir materiales que no son adecuados, tales como la fibra de vidrio, los neumáticos, el plástico, vehículos ligeros, vagones, barcos de fibra de vidrio, así como chatarra metálica como los frigoríficos, lavadoras, etc.

Por otro lado, si se pretende la finalidad de formar un fondo de sustrato rocoso para que se asienten ciertas especies, las rocas naturales son las más adecuadas. Como inconveniente, se presentan la dificultad para todas las operaciones de transporte, fondeo, instalación, en el caso

de que no haya disponibilidad en la zona, que contengan metales pesados que se puedan liberar, etc.

Al instalar estructuras prefabricadas, el coste de producción será mayor que en otros casos, que se pueden compensar con los costes de preparación y acondicionamiento.

A continuación, se procede a describir los aspectos influyentes en la elección de uno u otro, así como las tipologías que se suelen emplear en cada caso.

13.1. FACTORES A CONSIDERAR PARA LA SELECCIÓN

- **Funcionalidad**

El material influye directamente en que el arrecife cumpla los objetivos por los cuales se instala. Por ejemplo, en aquellos destinados a actuar sobre la biota, hay que considerar la rugosidad y la composición química en cuanto al pH se refiere puesto que, si empleamos una superficie muy lisa se complica el asentamiento o la colonización de los organismos en los módulos ya que prefieren superficies naturales y semejantes a las rocas.

- **Compatibilidad**

En este sentido, se trata de reducir al máximo cualquier tipo de riesgo que pueda suponer la instalación de estas estructuras en el medioambiente, así como los posibles conflictos entre los usuarios. Igualmente, deben de ser compatibles con los usos a los que están destinados.

No se pueden emplear aquellos que supongan una tasa elevada de descomposición química en el medio marino o desprender productos nocivos alterando así la calidad biológica y fisico-química del ecosistema. Por otro lado, es importante que resistan bien el paso del tiempo y que no se desgasten excesivamente.

- **Estabilidad**

Hay que tener en cuenta la estabilidad frente al oleaje y las corrientes para que los módulos arrecifales no sufran desplazamientos, se vuelquen o se rompan, con el objetivo de que sigan cumpliendo con su funcionalidad, además de que no supongan una amenaza en el medio a nivel de los ecosistemas y de interrupción con otros usos de pesca, navegación, en las playas, etc.

Por ejemplo, si se estudia la colocación de arrecifes con una forma piramidal, el hecho de que la base de los mismos sea hueca aumenta el riesgo de que vuelquen debido a la socavación por las corrientes. En este caso, es importante analizar una buena cimentación que asegure la estabilidad de las estructuras. Normalmente en estos casos, se suele hacer uso de los anclajes mediante cables que permiten cierta movilidad frente a las corrientes siempre y cuando no se instalen cerca de la costa, con oleajes de rompientes. Así pues, si se instalan en profundidades reducidas, es conveniente el empleo de estructuras muy porosas, que previamente sean sometidas a ensayos hidrodinámicos.

- **Longevidad**

Por último, es importante considerar la resistencia y durabilidad del arrecife para asegurar su funcionalidad. Los materiales deben de ser químicamente estables frente al agua del mar para que no sean deteriorados rápidamente.

En el caso de empleo de materiales que no sean comunes, es necesario realizar los ensayos pertinentes para medir la resistencia y el deterioro que puedan sufrir con el paso del tiempo.

- **Logística**

Es necesario organizar todo lo relacionado con el aprovisionamiento, posible acopio en la obra, y la colocación. El suministro de materiales debe estar relacionado con los medios de colocación en obra de manera que no se amontonen o falten.

- **Meteorología**

Para prevenir posibles daños, tanto en la construcción de la obra como en su transporte y su vida útil, es necesario tener en cuenta los aspectos del clima marítimo y prever el tipo de protección más adecuada para los materiales.

13.2. HORMIGÓN

Debe cumplir con una serie de condicionantes previos:

- Los conglomerantes hidráulicos que se utilicen en la puesta en obra deben de cumplir con la normativa e instrucciones vigentes.
- Los cementos que se emplean serán, preferentemente, puzolánicos y resistentes al agua de mar de manera que el hormigón pueda resistir a las sales que el agua lleva disuelta.
- El cemento debe presentar un bajo contenido en aluminato tricálcico, puesto que reacciona con los sulfatos formando sulfoaluminato cálcico hidratado, cuyas moléculas aumentan de volumen, lo que deriva en un compuesto de carácter expansivo que provocaría la disgregación del hormigón. Así pues, este contenido en aluminato debe de ser inferior al 8%.
- Los cementos que sean resistentes al agua de mar y a los sulfatos, se deben de elegir atendiendo a la composición y la constitución de su Clinker.
- La adición de las puzolanas, bien naturales o bien artificiales, aumentan la resistencia al ataque de los sulfatos. Como recomendación, los cementos puzolánicos de tipo IV ofrecen buenos resultados.
- Para la dosificación, se aconseja que no sea inferior a 350Kg de cemento por cada metro cubico de consistencia plástica.
- La resistencia característica del hormigón empleado no puede ser menor a 200Kg/cm².
- En cuanto al tamaño del árido, se aconseja que sea de tal manera que no dificulte la compactación. Un tamaño recomendable sería no mayor a los 20mm.
- En el amasado del hormigón, el agua no debe producir eflorescencia, perturbación o agrietamiento del fraguado.
- El uso de aditivos queda, en general, prohibido debido a la dificultad que entraña el controlar su comportamiento a lo largo del tiempo una vez que ya ha sufrido los efectos de la agresividad marina. En el caso de su uso, se debe de comprobar que no se modifican sus características con los correspondientes ensayos.
- Por último, si se emplean armaduras en las estructuras, se aconsejan las barras corrugadas de acero de, al menos, 4200Kp/cm².

13.2.1. RECOMENDACIONES DE LA EHE08 PARA HORMIGONES ESTRUCTURALES

- **Cementos recomendados para obras marítimas y portuarias**

Según la EHE 08, los cementos recomendados para fabricar hormigones que estén destinados a la construcción de estructuras que formen parte de obras marítimas y portuarias son:

APLICACIÓN	TIPO DE HORMIGÓN	CEMENTOS RECOMENDADOS
Obras portuarias y marítimas	En masa	Cementos comunes, excepto los tipos CEM III/C, CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T,
	Armado	Cementos comunes, excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM III/C y CEM V/B
	Pretensado	Cementos comunes(*) de los tipos CEM I, CEM II/A-D, CEM II/A-P, CEM II/A-V y CEM II/A-M(V-P)

Figura 11: Cementos para obras portuarias y marítimas según la EHE.

- **Cemento según la aplicación del hormigón:**

En función del hormigón a utilizar, se recomienda:

APLICACIÓN	CEMENTOS RECOMENDADOS
Hormigón en masa	Todos los cementos comunes, excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T y CEM III/C Cementos para usos especiales ESP VI-1 (*)
Hormigón armado	Todos los cementos comunes excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM III/C, CEM V/B
Hormigón pretensado incluidos los prefabricados estructurales	Cementos comunes (**) de los tipos CEM I, CEM II/A-D, CEM II/A-V, CEM II/A-P y CEM II/A-M (V-P) (***)
Elementos estructurales prefabricados de hormigón armado	Resultan muy adecuados los cementos comunes (**) de los tipos CEM I, CEM II/A y adecuado el cemento común tipo CEM IV/A cuando así se deduzca de un estudio experimental específico.
Hormigón en masa y armado en grandes volúmenes	Resultan muy adecuados los cementos comunes CEM III/B y CEM IV/B y adecuados los cementos comunes tipo CEM II/B, CEM III/A, CEM IV/A y CEM V/A, Cementos para usos especiales ESP VI-1 (*) Es muy recomendable la característica adicional de bajo calor de hidratación (LH) y de muy bajo calor de hidratación (VLH), según los casos
Hormigón de alta resistencia	Muy adecuados los cementos comunes tipo CEM I y adecuados los cementos comunes tipo CEM II/A-D y CEM II/A 42,5 R. El resto de cementos comunes tipo CEM II/A pueden resultar adecuados cuando así se deduzca de un estudio experimental específico.
Hormigones para reparaciones rápidas de urgencia	Los cementos comunes tipo CEM I, CEM II/A-D, y el cemento de aluminato de calcio (CAC),
Hormigones para desencofrado y descimbrado rápido	Los cementos comunes (**) tipo CEM I, y CEM II,
Hormigón proyectado	Los cementos comunes tipo CEM I, y CEM II/A
Hormigones con áridos potencialmente reactivos (****)	Resultan muy adecuados los cementos comunes tipo CEM III, CEM IV, CEM V, CEM II/A-D, CEM II/B-S y CEM II/B-V, y adecuados los cementos comunes tipo CEM II/B-P y CEM II/B-M

Figura 12: Tipos de cementos en función de la aplicación del hormigón según la EHE.

(*): En el caso de grandes volúmenes de hormigón en masa.

(**): Dentro de los indicados son preferibles los de alta resistencia inicial.

(***): La inclusión de los cementos CEM II/A-V, CEM II/A-P y CEM II/A-M (V-P) como utilizables para la aplicación de hormigón pretensado, es coherente con la posibilidad, contemplada en el articulado de esta Instrucción, de utilización de adición al hormigón pretensado de cenizas volantes en una cantidad no mayor del 20 % del peso de cemento.

(****): Para esta aplicación son recomendables los cementos con bajo contenido en alcalinos o aquellos citados en la tabla.

- **Cementos según las circunstancias de hormigonado**

Atendiendo a las condiciones de puesta en obra, se tienen los siguientes:

CIRCUNSTANCIAS DE HORMIGONADO	CEMENTOS RECOMENDADOS
Hormigonado en tiempo frío (*) (**)	Los cementos comunes tipo CEM I ,CEM II/A y CEM IV/A
Hormigonado en ambientes secos y sometidos al viento y, en general, en condiciones que favorecen la desecación del hormigón (**)	Cementos comunes tipo CEM I y CEM II/A
Insolación fuerte u hormigonado en tiempo caluroso (**)	Los cementos comunes tipo CEM II, CEM III/A, CEM IV/A y CEM V/A,

Figura 13: Cementos en función las circunstancias de hormigonado según la EHE.

(*): En estas circunstancias no conviene emplear la característica adicional de bajo calor de hidratación.

(**): En estas circunstancias, resulta determinante tomar, durante el proceso de ejecución o puesta en obra, las medidas adecuadas especificadas en la reglamentación correspondiente.

- **Cementos según el tipo de exposición**

Por último, atendiendo al tipo de exposición, para este tipo de obras se recomienda:

CLASE DE EXPOSICIÓN	TIPO DE PROCESO (agresividad debida a)	CEMENTOS RECOMENDADOS
I	Ninguno	Todos los recomendados según la aplicación prevista
II	Corrosión de las armaduras de origen diferente de los cloruros	CEM I, cualquier CEM II (preferentemente CEM II/A), CEM III/A, CEM IV/A.
III (*)	Corrosión de las armaduras por cloruros de origen marino	Muy adecuados los cementos CEM II/S, CEM II/V (preferentemente los CEM II/B-V), CEM II/P (preferentemente los CEM II/B-P), CEM II/A-D, CEM III, CEM IV (preferentemente los CEM IV/A) y CEM V/A
IV	Corrosión de las armaduras por cloruros de origen no marino	Preferentemente, los CEM I y CEM II/A y, además, los mismos que para la clase de exposición III.
Q (**)	Ataque al hormigón por sulfatos	Los mismos que para la exposición III
Q	Lixiviación del hormigón por aguas puras, ácidas, o con CO ₂ agresivo	Los cementos comunes de los tipos CEM II/P, CEM II/V, CEM II/A-D, CEM II/S, CEM III, CEM IV y CEM V
Q	Reactividad álcali-árido	Cementos de bajo contenido en alcalinos (***) (óxidos de sodio y de potasio) en los que $(Na_2O)_{eq} = Na_2O (\%) + 0,658 K_2O (\%) < 0,60$

Figura 14: Cementos en función de la exposición según la EHE.

(*): En esta clase de exposición es necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia al agua de mar (MR), tal y como establece la Instrucción de Hormigón Estructural EHE.

(**): En esta clase de exposición es necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia a los sulfatos (SR), en el caso de la clase específica Qb o Qc, tal y como establece el articulado de esta Instrucción. En los casos en que el elemento esté en contacto con agua de mar será necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia al agua de mar (MR).

(***): También son recomendables los cementos citados en la tabla 2, para hormigones con áridos potencialmente reactivos (que necesitarían cementos con bajo contenido en alcalinos)

Descritas las consideraciones a tener en cuenta para el correcto funcionamiento de las estructuras, se describen, a continuación, las ventajas y los inconvenientes que derivan del empleo de este material:

- **Ventajas**

- Es un material que reúne las características necesarias para que sea compatible con el medio ambiente marino.
- Proporciona una superficie adecuada para la colonización de organismos que se incrusten en las estructuras, dotando así de un sustrato y refugio para otros peces e invertebrados.
- Es estable y de fácil disposición, además de tener una buena vida útil.
- Gracias a su moldeabilidad se pueden adoptar diversas formas, característica muy importante a la hora de diseñar módulos arrecifales atractivos para el buceo.

- **Inconvenientes**

- Uno de los más importantes es el relativo a su gran peso, de manera que es necesaria maquinaria específica para manipularlo, con los consiguientes incrementos en los costes de transporte marítimo y terrestre.
- El empleo de estas maquinarias de elevado tonelaje en el mar supone cierto riesgo.
- Derivado también del peso, reside el hecho de que las estructuras ya instaladas pueden hundirse en el sedimento marino, dejando la posición inicial que se había calculado previamente.

13.3. MADERA

- **Ventajas:**

- Es de fácil disposición.
- Shinn y Wichlund descubrieron que los moluscos bivalvos perforadores de la madera, al excavar sus túneles en ella, aumentaban la complejidad de los hábitats y proporcionan pues, espacios para otros organismos.
- Igualmente observaron que las grandes cantidades de alimento, así como la estructura que se deriva del deterioro de este material, atraen a grandes concentraciones de peces.

- **Inconvenientes**

- La vida útil de la madera en ambientes marinos es bastante corta, debido precisamente al deterioro que sufre por los organismos perforadores. En este caso, la estructura podría llegar a dividirse en piezas que ascenderían a la superficie y provocarían interferencia con la navegación.
- Es importante que el módulo esté bien lastrado puesto que la madera es un material muy ligero.
- En el caso de uso de madera lastrada para evitar que se pudra, cabe el riesgo de que contenga compuestos tóxicos para los organismos marinos.

13.4. ROCAS

- **Ventajas**

- Las rocas de cantera atraen a los peces y proporcionan una superficie adecuada para los organismos bentónicos incrustantes. Además, es un material muy duradero, denso y estable.
- Las rocas caliza, compuestas de carbonato cálcico, son las más compatibles con el medio ambiente, puestas compuestas de igual forma que los arrecifes naturales.
- Se pueden emplear diferentes tamaños de partículas de roca para el asentamiento en las diferentes etapas de las vidas de las especies.
- **Inconvenientes**
 - En cuanto a las rocas de cantera, decir tiene que no es un material que se suela ceder, por lo tanto supone un mayor coste.
 - Igualmente, los coste para el transporte y fondeo hasta el lugar indicado serán mayores, necesitándose de equipamiento especializado.

13.5. ELECTRODEPRESIÓN

- **Ventajas**
 - Provoca poco impacto en el medio.
 - El procedimiento de instalación es sencillo.
 - Se pueden crear estructuras de distinto tamaño y forma.
 - Las estructuras se sueldan al arrecife natural, de manera que se integran con rapidez.
 - Este campo eléctrico atrae a la fauna y la flora.
 - Permite crear arrecifes de coral significativos.
- **Inconvenientes**
 - Tiene un coste elevado.
 - Requiere de suministro eléctrico.
 - Su consistencia impide que se utilice para ciertos usos como el de protección.

13.6. MATERIALES RECICLADOS INERTES

- **Ventajas**
 - Los reciclados de origen biológico y marino no tienen problemas de asimilación por el medio.
 - Tienen un coste económico bajo.
 - La investigación y desarrollo de nuevos productos a partir de materiales reciclados permite muchas opciones.
- **Inconvenientes**
 - Se debe de garantizar el carácter inerte del material.
 - Puede suponer un alto coste en el acondicionamiento y descontaminación.
 - Hay algunos materiales reciclados que se han mostrado inadecuados para la incrustación de organismos, como por ejemplo con la fibra de vidrio, neumáticos, plásticos, etc.

13.7. BARCOS

- **Ventajas**

Las ventajas derivadas de la utilización de pecios como arrecifes artificiales se resumen en:

- Aumentan la economía de la zona.
- Proporcionan estructuras complejas y zonas atractivas para el submarinismo así como de pesca recreativa.
- El casco de acero del barco presenta una gran integridad, por lo que es de gran duración, siempre que se haya tenido en cuenta todas las consideraciones en cuanto al fondeo e instalación del mismo.
- Su reutilización como arrecife artificial puede llegar a ser incluso más económica que el desguace.
- Pueden proporcionar zonas de desove para algunas especies.
- Atraen a especies pelágicas y demersales gracias a su alto perfil vertical.
- Las superficies verticales del barco contribuyen a que se produzcan afloramientos y alteraciones de la velocidad y la dirección de las corrientes que atraen a ciertas especies.
- Contribuyen a la disminución de la presión que existe en los arrecifes naturales próximos y, por lo tanto, reducen los daños que se causan por anclas de embarcaciones, entre otros.
- La utilización de estos pecios como arrecife, está regulada internacionalmente.

- **Inconvenientes**

Igualmente, presentan una serie de desventajas que hay que tener en cuenta antes de considerar su utilización:

- Si se produce algún daño causado por un temporal, la pérdida de integridad del barco puede suponer un riesgo importante para los buceadores en cuanto a enganches, desorientación, cortes, etc. Igualmente, puede dañar el medio por su desintegración.
- Su duración puede verse reducida por las operaciones de limpieza, recuperación o por el uso de explosivos como método de hundimiento.
- En el caso de temporales muy extremos, puede ser complicado asegurar su estabilidad puesto que depende de varios factores, dígame la profundidad a la que se instale, la altura de ola, la dirección del barco, su peso, las fuerzas de fricción, el perfil vertical, o las corrientes existentes.
- La superficie del casco no es propicia para la colonización del epibentos, al contrario que el uso de rocas o el hormigón.
- La corrosión puede impedir la colonización.
- El barco puede presentar una serie de contaminantes en los materiales de los que esté hecho, cuya eliminación puede resultar difícil y costosa.
- En la normativa internacional, solo se establecen unas condiciones mínimas que deben de tener estas estructuras, que no tienen en cuenta su instalación como arrecife artificial.
- En el caso de que una vez hundido y colocado se tenga que retirar o desplazar, resulta muy costoso de mover.
- Su perfil vertical, los hace más propicios al deterioro y movimiento debido a la fuerza de las corrientes.
- Las operaciones de fondeo en barcos muy deteriorados son más dificultosas.
- Los explosivos que se utilicen en el hundimiento pueden ocasionar daños estructurales o esparcir desechos y provocar riesgos para la vida marina.

13.8. PLATAFORMAS MARINAS

• **Ventajas**

- Su reutilización puede ser más económica que el desguace.
- Incrementan la colonización de zonas con baja diversidad de organismos marinos.
- Se utilizan como lugares de pesca recreativa y turismo subacuático.
- Ayudan a reducir la presión sobre otros puntos naturales y ayudan a la economía de la zona.
- Los componentes de acero que la constituyen se presentan como un material estable, poco degradable y perdurable en el tiempo, por lo que en zonas de temporales son fiables.
- Dependiendo de la actividad que hayan llevado a cabo previamente, pueden ser más limpias que los barcos.
- Atraen a especies pelágicas y demersales debido a su perfil vertical elevado que produce afloramientos y alteraciones de velocidad y dirección de las corrientes.
- Su empleo está regulado internacionalmente.

• **Inconvenientes**

- No se pueden reubicar.
- Al igual que con los barcos, pueden contener materiales contaminantes como hidrocarburos, materiales radioactivos, plomo, mercurio, zinc, etc.
- Pueden provocar conflictos con el sector pesquero debido a la ocupación de determinadas zonas de pesca.
- Los problemas derivados del uso de explosivos para la vida marina.
- Deben de ser convenientemente gestionadas y que no resulten en un montón de chatarra en medio del fondo marino.

14. FOULING

El fouling es un fenómeno que sufren los cuerpos sumergidos en el medio marino y que se traduce en una incrustación o recubrimiento de su superficie. Este recubrimiento será directamente proporcional al tamaño de dicha superficie, así como al volumen que desaloja. Se trata, por tanto, de un proceso por el cual se forma un ecosistema muy dinámico y complicado de erradicar.

Se estima que tras la inmersión de una superficie en el agua marina, es cuestión de horas que se recubra el objeto sumergido de una capa de organismos unicelulares y al cabo de unos meses, de macroorganismos del lecho marino.

14.1. SECUENCIA DEL FOULING

Es un proceso que se compone de una serie de fases que se superponen en el tiempo:

• **Acondicionamiento bioquímico**

Se trata de la adsorción de compuestos químicos tras el contacto con el medio acuoso. Es un proceso físico y espontáneo que conduce a la posterior colonización de micro y macroorganismos.

- **Colonización bacteriana**

Las bacterias colonizan la superficie, primero por adsorción y luego por adhesión. Esta relación abarca una serie de fuerzas físicas como la electrostática o de gravedad.

- **Colonización de eucariotes unicelulares**

Se produce la colonización de células de organismos como los protozoos o las algas, unos cuantos días después de la inmersión de la estructura.

- **Colonización de eucariotes multicelulares**

Pasadas unas cuantas semanas, el sustrato está recubierto por una comunidad microbiológica que da comienzo al desarrollo del macrofouling. Comienza primero con el asentamiento de algas e invertebrados como corales blandos o esponjas, y le sigue la colonización de cirrípedos, moluscos, etc.

14.2. FACTORES FÍSICOS INFLUYENTES EN EL FOULING

Debido a su ubicación, generalmente en zonas desiertas y de baja producción, los módulos arrecifales atraen a una gran cantidad de organismos.

Esta colonización depende de diversos factores, pudiendo destacar los más limitantes como:

- **La estacionalidad**

El momento en el que se realiza la inmersión, es determinante del tipo de sucesión a obtener, puesto que existe una correlación entre la época y la de reproducción de los organismos colonizadores.

- **La luz**

A medida que la luz atraviesa la columna de agua, menor será su intensidad a expensas del grado de turbidez que determina la profundidad a la que se encuentra el nivel de compensación. Este nivel de compensación se define como aquel en el que la cantidad de luz necesaria para que el oxígeno producido y el CO₂ respirado por los vegetales verdes, tales como algas o fitoplancton, se encuentren en equilibrio. Por debajo de esta profundidad, la productividad primaria se considera nula ya que la relación de la actividad fotosintética y el consumo de materia orgánica de los heterótrofos es menor a uno $\frac{F}{R} \ll 1$. De todas maneras, siempre hay excepciones y se han podido ver comunidades de algas que se han adaptado a esta falta de luz, menos del 1% de la que incide en la superficie marítima.

Así pues, a medida que la radicación solar va penetrando en la columna de agua, va disminuyendo exponencialmente. La pendiente de la curva varía según cada cuerpo de agua teniendo en cuenta, además, la cantidad de materia particulada en suspensión y de la materia disuelta.

- **La temperatura**

Es igualmente un factor importante puesto que juega un papel principal en la vida de los organismos. Así, en aguas septentrionales, la época de reproducción ocurre, fundamentalmente,

en las épocas cálidas de primavera-verano mientras que en zonas tropicales, se da a lo largo de todo el año.

Dentro de los intervalos de temperatura adecuados para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos, existe una temperatura óptima a la cual la reproducción ocurre a una máxima velocidad.

Así pues, según los distintos intervalos de temperatura, hablamos de variedad de tipologías: psicrófilos (0-20°C), mesófilos (14-45°C), termófilos (42-69°C), y los hipertermófilos hasta los 110°C. Los mesófilos se encuentran en latitudes templadas y tropicales, los psicrófilos y los termófilos, en ecosistemas usualmente fríos y calientes respectivamente y los hipertermófilos, en géiseres o fuentes hidrotermales.

El aumento relativo de las temperaturas está relacionado con la absorción de radiación solar en la superficie, de tal forma que este incremento se distribuye hacia abajo por mezcla turbulenta y procesos convectivos, pudiendo llegar hasta los 50 metros de profundidad.

- **La materia orgánica en suspensión**

Incluyendo en este concepto al plancton, es un factor limitante en el crecimiento de los microorganismos heterótrofos, ya que algunos necesitan concentraciones altas de materia orgánica (copiotrofos), y otros crecen en bajas concentraciones (oligotróficos). Los primeros, suelen vivir en aguas costeras, mientras que los segundos se ubican en aguas ya alejadas de tierra.

- **La existencia de un sustrato blando**

Puesto que actúa como catalizador del resultado. Concretamente, a partir de diversos estudios, se ha podido comprobar que, de entre varios sustratos de distinta naturaleza como: el cristal liso, cristal rugoso, o el poliestireno, es este último el más adecuado para llevar a cabo estudios de colonización.

- **La presión hidrostática**

Tanto la osmótica como la hidrostática influyen en la velocidad del crecimiento microbiano de tal forma que, por cada 10 metros de profundidad, se aumenta la presión en 1 atm, por lo que son pocos los organismos que pueden llegar a habitar en aguas oceánicas que sean demasiadas profundas ya que la presión sería del orden de 400 veces la existente en la superficie. Estas presiones elevadas lo que hacen es inactivar las enzimas y el sistema de transporte provocando la ruptura de las membranas.

- **pH**

Afecta puesto que muchas enzimas se pueden inactivar para valores muy altos o muy bajos de pH, aunque también influyen los intervalos de tolerancia del pH que tengan los distintos organismos. Es un factor que determina, también, la disponibilidad de nutrientes, la solubilidad del CO₂ y la velocidad a la que se produzca el proceso de fotosíntesis.

- **Las corrientes marinas y las mareas**

Muchos organismos viven libres o asociados a organismos del plancton de manera que su traslado depende de la dinámica marina. Otros, viven asociados a peces y las migraciones se

dan, en este caso, por el movimiento de estos últimos. En general, las corrientes marinas provocan la dispersión pasiva de los microorganismos, de los nutrientes necesarios para su crecimiento, etc. De tal forma que es un factor igualmente influyente en cuanto a su abundancia, distribución y diversidad. En las capas más superficiales del mar, la tensión superficial favorece las comunidades microbianas conocidas como neuston en las que influye, además, la adsorción.

- **La salinidad**

Los organismos que toleran o que necesitan una alta concentración de salinidad se denominan halotolerantes y halófilos respectivamente. En estas condiciones, el ambiente hipertónico, provoca la deshidratación de los microorganismos no tolerantes. Por otro lado, la presión osmótica puede desnaturar las proteínas, de tal forma que se rompen las estructuras terciarias de estas y afectando a las actividades enzimáticas.

La mayoría de bacterias marinas requieren al menos un 3% de ClNa para crecer. Son moderadamente halófilas.

- **Oxígeno disuelto**

Las aguas marinas contienen ciertas cantidades de los gases atmosféricos disueltos: oxígenos, nitrógeno, argón, anhídrido carbónico e hidrógeno. Concretamente, el oxígeno viene de dos fuentes como son: la difusión que hay a través de la interfase aire-océano y de la fotosíntesis. Como es lógico, ambos procesos tienen lugar en las capas superiores del agua donde se pueden alcanzar valores de hasta 5 ml de oxígeno disuelto por litro en la capa subsuperficial.

En estas capas fóticas, la actividad fotosintética del fitoplancton y las algas verdes puede provocar una sobresaturación temporal de oxígeno al producirse más cantidad de lo que se consume. Por otra parte, en el caso de que las temperaturas sean elevadas, la disolución de este gas será menor en el agua de mar.

En la siguiente tabla se muestra el consumo de oxígeno a 15°C de temperatura del mar:

Consumo de oxígeno (ml O₂/gr peso seco/hora a 15°C)	
Bacterias	110
Ciliados	0.5-10
Erizos, medusas, anélidos	0.005-0.02
Crustáceos	0.1-0.2
Pequeños peces	0.2-0.24
Peces grandes	0.05-0.1

Tabla 13: Consumo de oxígeno de las distintas especies a una temperatura dada.

- **El stock de fauna y flora circundante**

Si se instalan los módulos en una zona de poca profundidad y, por tanto, con una gran iluminación y elevadas temperaturas, se potencian los primeros niveles tróficos derivando en comunidades en las que dominan las algas, ciertos herbívoros y muy pocos carnívoros. Por otro lado, con las mismas condiciones que en el caso anterior y con un alto contenido en materia orgánica, lo que predomina es la presencia de organismos filtradores, bivalvos, hidroideos, ascidias, etc., y por lo tanto decae la diversidad de especies en pro de la abundancia de unas pocas.

En estas circunstancias y considerando que la tasa de materia orgánica es más influyente que la temperatura o la luminosidad, es posible explotar los arrecifes denominados como monoespecíficos, cuya producción principal es la facies dominante del sistema. De esta manera, en arrecifes del tipo producción/concentración, podemos hablar de módulos específicos de ostra o de mejillón, que han sido los principales ejemplos probados de explotabilidad.

De todas maneras, la profundidad y la transparencia del agua se deben de considerar en cuanto al rendimiento biológico se refiere, puesto que la productividad primaria de la etapa colonizadora de cobertura algal depende específicamente de estos factores.

14.3. TIPOS DE FOULING

En función del tipo de depósitos acumulados, hablamos de diferentes tipos de fouling:

- **Fouling por precipitación o scaling**

Cuando el depósito es materia inorgánica precipitada.

- **Fouling orgánico**

En el que la acumulación se forma por sustancias orgánicas como pueden ser las proteínas, sustancias húmicas, etc.

- **Fouling particulado**

En el que se depositan arcillas, sílice y otras partículas.

En estos tres casos, el aumento de la acumulación de materiales proviene del transporte y la deposición abiótica de la fase acuosa sobre la superficie, de manera que el fouling se puede controlar al eliminar los materiales acumulables en la fase líquida.

- **Biofouling**

Se adhieren microorganismos a superficies, desarrollando biopelículas. En este tipo de fouling, los microorganismos se pueden multiplicar. En la mayoría de los casos, está causado por organismos heterotróficos de forma que convierten la materia orgánica disuelta en biomasa.

Generalmente se atañe el problema del Biofouling a la formación de biopelículas formadas por comunidades de microorganismos que se adhieren a una superficie inerte o a un tejido vivo. La composición de estas biopelículas se basa, fundamentalmente, en agua y células bacterianas. Así pues, dos son los aspectos más importantes a tener en cuenta para combatir este tipo de fouling:

- La estabilidad mecánica de la matriz de sustancias poliméricas extracelulares a la que se embeben los microorganismos, que es la que mantiene la biopelícula adherida a la superficie colonizada.
- El incremento de la resistencia de los microorganismos dentro de la biopelícula a los biocidas.
 - **Estrategias antifouling**

A la hora de controlar el fouling que se produce por la adhesión de los organismos a superficies sumergidas, existen tres principios fundamentales:

- Combatir el asentamiento inicial.
- Prevenir el desarrollo del fouling con inhibidores del crecimiento.
- Remover el Biofouling limpiando y reduciendo las fuerzas de adhesión o superficies liberadoras de fouling.

14.4. ESPECIES REPRESENTATIVAS

Normalmente, este fenómeno está constituido por los siguientes grupos: las Bacterias, los Hongos, los Poríferos, Cnidarios, Ectoproctos, Anélidos, Artrópodos, Moluscos, Equinodermos y Cordados.

Concretamente, para el mar Mediterráneo, podemos destacar:

- **Hidrozoos**

Dentro del grupo de los Cnidarios, destacan como pioneros en la colonización de sustratos artificiales. Como ejemplo, se puede citar el de la *Clytia hemisphaerica*, que se caracteriza por su carácter fugitivo, presentar una alta tasa de renovación y colonizar rápidamente una gran superficie del sustrato. Puede ser recubierta por organismos coloniales tardíos.

- **Briozoos**

Incluidos en el grupo de los Ectoproctos, son los más representativos dentro de los colonizadores de los sustratos artificiales. Presentan una serie de características morfológicas y fisiológicas como son: su pequeño tamaño, la precocidad reproductiva, el crecimiento rápido y sus generaciones de vida corta. Generalmente, no se adaptan a para competir por el sustrato base en forma duradera. Los más representativos en las aguas de los puertos son: *Bugula neritina*, *Bugula simplex* y *Schizoporella errata*.

- **Poliquetos**

Enmarcados en el grupo de los Anélidos, son el más abundante en número de individuos aunque, como en el ejemplo anterior, se muestran pobres competidores en el recubrimiento y se caracterizan por tener una alta tasa de crecimiento muy variable estacionalmente y por ser de pequeño tamaño. En los puertos, las especies más destacables son: la *Serpula elegans* y la *Serpula uncinata*.

- **Cirrípedos**

Dentro del grupo de los Artrópodos, son muy representativos del fouling de zonas del puerto y son muy abundantes en la época de primavera-verano.

14.5. MÉTODOS ANTI-FOULING

En el caso de que se quiera evitar la aparición de este fenómeno, existen varias alternativas que se pueden abordar:

- **Cloración con hipoclorito de sodio**

El agente actúa en la capa intermedia al sustrato y sobre toda la masa de agua.

- **Radicaciones beta**

Se trata de agregar compuestos radiactivos a las pinturas o los revestimientos. No suele ser una solución adoptada puesto que las altas radiaciones necesarias para que el método fuera eficiente, provocarían una progresiva contaminación radiactiva del medio marino.

- **Pinturas**

Se utilizan unos productos líquidos de manera que, cuando se aplican a una superficie que previamente ha sido preparada, secan y forman una película consistente, actuando como barrera para las comunidades incrustantes.

Están compuestas por pigmento, ligante y solvente, y un agente activo que es el que combate los organismos, que es el biocida. Según como se libere el biocida, podemos hablar de distintos tipos de antifoulings o antiincrustantes:

- Autopulimentables: se desgastan con el roce del agua. Son de una gran eficiencia y por tanto, de coste elevado. Implican una superficie lisa, evitando la acumulación de viejas capas y facilitando la limpieza.
- Matriz dura: absorben el agua mientras que la parte soluble de la resina se va desintegrando dejando una estructura insoluble que disuelve los productos biocidas.
- Matriz blanda: se trata de una mezcla de los dos anteriores, de tal forma que la pintura se va disolviendo.

A la hora de elegir el más adecuado, habrá que tener en cuenta la durabilidad del mismo en función del espesor de la capa aplicada, así como una serie de factores que dependen del agua de la zona como son: la temperatura, la riqueza, el nivel de polución de la misma, etc.

Se comenzó empleando pinturas económicas con compuestos metálicos, como el organoestaño, conocido como tributilestaño (TBT). Los ingredientes activos se dispersaban en la matriz resinosa y de ahí se lixiviaban al agua del mar. De esta manera, se destruían los crustáceos y demás organismos que se hubiesen fijado a la superficie de la estructura hundida. Como inconveniente, la tasa de desprendimiento del biocida en estas pinturas de asociación libre era incontrolada, inicialmente rápida y tras 24 meses dejaba de surtir efecto, perdiendo así su eficacia.

A finales de los años sesenta, se produjo un avance en el empleo de las pinturas como método antifouling, al aparecer las de tipo autolimpiantes. Se caracterizan por poseer un enlace químico entre el organoestaño y la base del polímero. De esta forma, se consigue que el índice de lixiviación sea controlado y constante, pudiendo llegar a durar 60 meses puesto que el biocida se desprende cuando el agua de mar reacciona con la capa de esta pintura hasta que se agota y entra en juego la siguiente capa.

Igualmente, presentaban algunos inconvenientes puesto que los compuestos de organoestaño permanecen en el agua y los sedimentos, lo que implica la destrucción de otros organismos marinos, además de los que se fijan a las estructuras implantadas. Por ello, se prohibió su uso generalizado como método antiincrustante.

Como alternativa al empleo del organoestaño, surgen las pinturas antiincrustantes mediante cobre que son menos tóxicas que el tributilestaño, siendo eficaces, únicamente, contra la fauna marina. También se usan los revestimientos antiadherentes que hacen que la superficie sea muy resbaladiza y evita que se incrusten los organismos.

En general, el empleo de biocidas presenta las siguientes ventajas e inconvenientes:

- **Ventajas**
 - Existe una gran disponibilidad de productos, principalmente basados en cobre.
 - Presentan un rendimiento aceptable.
 - Tiene un coste aproximado de cuatro euros el litro.
- **Inconvenientes**
 - No es lo suficientemente efectivo contra las algas.
 - Se necesita de unas limpiezas periódicas y retratamientos que requieren un alto costo.
 - Contienen biocidas que pueden ser peligrosos para las personas y para el medio ambiente.
 - Limitados como máximo a una temporada.

- **Limpieza**

Limpiar periódicamente la superficie de la estructura, puede ser una ayuda en zonas donde la incrustación no sea excesiva. Este sistema genera un daño menor y una baja mortalidad en comparación con otros métodos, aunque resulta una labor muy intensiva, siendo comercialmente poco viable puesto que provoca altos costos laborales.

- **Revestimiento con púas**

Son revestimientos con púas microscópicas, de tal forma que la eficacia de este método dependerá de la distribución de dichas púas así como de su longitud. Evitan que ciertos crustáceos y algas se fijen al casco sin causar ningún daño al medio.

Decir tiene que para evitar en general el fouling, los organismos marinos deben ser atacados en sus fases larvianas o de zoosporas. Si resultase que la cesión del tóxico es baja al producirse la metamorfosis y posterior fijación, este ejercería una acción sobre el metabolismo del organismo que impediría su desarrollo normal, pero sin dejar de desaparecer los problemas de incrustaciones.

- **El color**

Hay ciertos colores que tienen un efecto antifouling de manera que afectan a la sensibilidad de las larvas marinas. Por ejemplo, se ha comprobado que los cirrípedos tienen preferencia a los asentamientos en los colores negros o rojos. Así pues, los colores como el azul oscuro, el amarillo o el blanco, reducen el asentamiento de las especies en las superficies tratadas.

De todas maneras, es una técnica a emplear combinadamente con otras estrategias para que realmente sea efectiva.

- **Cubiertas liberadoras de fouling**

Se basan en el principio de que el fouling se da en la capa más superficial, de manera que es fácil removerlo, debido a una baja bio-adhesión. La mayoría de estos productos, contienen silicona, sin ingredientes activos. De esta manera, se provoca que el agua resbale sobre la superficie, deteniendo así el fouling en una primera fase, debido a la reducción en la fuerza de adhesión de organismos bajo el flujo.

La aplicación de este sistema requiere, normalmente, de tres componentes para producir una buena adhesión al sustrato: la base, una capa de adhesión y la capa de recubrimiento.

En la siguiente tabla se detallan las ventajas e inconvenientes del empleo de este método:

	Ventajas	Inconvenientes
Disponibilidad	Existe cierta variedad de productos que se pueden utilizar, fundamentalmente para embarcaciones	No existen productos comerciales disponibles para la acuicultura
Aplicabilidad	La infraestructura también se puede usar en redes	La mayoría de los productos tienen componentes con fecha de caducidad. Son sensibles a la humedad.
Rendimiento	El fouling es fácil de remover	Propensos a daños mecánicos
Costo	Pueden ser por muchos años	Elevados costes
Salud, seguridad e implicaciones	Libre de biocidas	Contienen solventes orgánicos

Tabla 14: Ventajas y desventajas de cubiertas liberadoras de fouling

14.6. CRITERIOS DE RENDIMIENTO

- **Eficacia del fouling**

Se trata de evaluar la reducción de la cobertura sobre las superficies de aplicación que sufren el Biofouling. La eficacia de las tecnologías empleadas para tal fin está basada en los cambios en la composición o densidades de las comunidades que se adhieren a la estructura en cuestión.

El rendimiento de los antifouling puede alcanzar altos niveles, reduciendo la colonización o incluso eliminándola. Así pues, esta reducción debe apuntar a los diferentes tipos de organismos que lo componen.

- **Adhesión del Biofouling**

Para los sistemas de control del Biofouling, el rendimiento se mejora con las operaciones de limpieza de las estructuras expuestas. Aplicando las técnicas antifouling, se consigue debilitar las fuerzas de adhesión de los organismos en los sustratos facilitando así las labores de limpieza.

- **Aplicación**

Es otro factor que influye en el rendimiento de los antifouling. A la hora de aplicar estos tratamientos, prima la facilidad, con un tiempo de secado corto y sin afectar negativamente a la integridad de la aplicación.

- **Integridad de la cubierta**

En estos casos, el rendimiento se mide según la adhesión y la integridad de las cubiertas. Esta integridad es variable y está relacionada con los diferentes aditivos que se pueden utilizar en cada caso. Un mal rendimiento se traduce en la pérdida de la cubierta y su fragilidad, que

resultan en el agrietamiento de la misma. Un buen rendimiento puede ser medido según la maleabilidad, resistencia y la persistencia, evitando las roturas y pérdidas de material.

- **Durabilidad**

La durabilidad de las cubiertas antifouling depende del tipo de tecnología empleada así como de las condiciones locales. Los productos utilizados deben tener una durabilidad mínima de un año o una temporada.

- **Costo**

El coste de estas tecnologías debe ser considerado puesto que es asequible a pequeña escala por los productores. El coste por litro, los costes de aplicación, la eficacia y la durabilidad deben de ser evaluados.

- **Funcionamiento del equipo**

Se debe medir el rendimiento de las infraestructuras de las instalaciones. Un bajo rendimiento de las tecnologías puede derivar en grietas, roturas y distorsión del material. Así pues, se deben realizar pruebas mecánicas e inspecciones visuales de todo el equipamiento utilizado para determinar el rendimiento físico del mismo.

- **Mortalidad**

Otro factor a tener en cuenta es el efecto que las soluciones antifouling tienen sobre el stock. También es importante que los productos no deterioren la calidad del agua que, indirectamente, puede afectar a las especies circundantes.

- **Comercialización**

El efecto de estos tratamientos antifouling puede provocar una disminución de los costos y de otros directos atribuidos al manejo del Biofouling.

- **Sostenibilidad**

Un buen rendimiento se traduce, igualmente, en el uso de estrategias ambientalmente poco agresivas, sin biocidas, y bajo un estatus regulador consistente. Se trata de no dañar la calidad de las aguas ni generar efectos perjudiciales en el ambiente.

- **Compatibilidad con otros métodos**

Es importante conocer también si las tecnologías antifouling son compatibles con otros métodos de control de la colonización. Un buen resultado sería el poder utilizar dos o tres estrategias compatibles sinérgicamente, ya que el efecto acumulativo puede culminar en un óptimo rendimiento.

14.7. COSTES DE PINTURAS ANTIFOULING

Como ya se ha comentado, la mayoría de métodos utilizados para evitar los procesos de colonización que se dan en embarcaciones, redes, y en cualquier estructura sumergida en agua de mar, son las pinturas. En este caso, los costos se miden por litros, en función de la superficie que se necesite cubrir y del rendimiento de cada pintura, establecido por el fabricante.

Una vez que sabemos la superficie a tratar, los litros necesarios de pintura se obtienen aplicando la siguiente operación:

$$\text{Litros necesarios} = \frac{\text{Superficie total}}{\text{Rendimiento práctico por m}^2 \text{ de pintura}}$$

15. CIMENTACIONES

Se define como aquella parte de la estructura que se encarga de transmitir las cargas al terreno. Hay que tener en cuenta que, en la mayoría de los casos, la rigidez y la resistencia que presenta el suelo en el que se van a instalar los módulos arrecifales será menor que la de dichos módulos. En general, deben de ser piezas con un volumen considerable.

A la hora de elegir el tipo de cimentación más adecuada para el arrecife artificial a instalar, es necesario tener en cuenta varios aspectos como son: el terreno de la zona, los esfuerzos a transmitir, etc.

Así pues, comenzamos realizando una breve descripción de los aspectos más relevantes a tener en cuenta en la morfología del lecho marino en el que se vaya a implantar el proyecto, a continuación se analizará el tipo de terreno que se suele presentar y con ello las estructuras más convenientes según su transmisión de esfuerzos, centrándonos, por último, en las cimentaciones más comunes que se utilizan en la instalación de los arrecifes artificiales.

15.1. NATURALEZA Y VARIABILIDAD DEL FONDO

Antes de comenzar con la ejecución del proyecto, es necesario analizar la información disponible en el emplazamiento, con el objetivo de proyectar una adecuada cimentación en cuanto a:

- Naturaleza del fondo.
- Geomorfología.
- La estructura geológica.

15.1.1. CARTAS NÁUTICAS

En ellas se recoge la naturaleza de la superficie del fondo en el momento en el que se realizó el levantamiento base de la carta correspondiente. Es recomendable analizar la distribución de las indicaciones de la naturaleza del fondo, viendo si muestra o no uniformidad alternando las zonas de arena, fango, piedra, etc., e identificar las posibles fuentes de materiales sueltos, acantilados, ríos, etc.

Usualmente, la heterogeneidad indica pequeños espesores de materiales sueltos. Aunque en las cartas no se proporciona esta información, si se analizan conjuntamente con la estructura geología y la pendiente del lecho se puede llegar a una idea general de la capacidad portante del terreno, la deformabilidad y la erosionabilidad. Igualmente, gracia a los mapas geológicos así como del buzamiento de las estructuras geológicas, se puede acotar el espesor del manto de sedimentos.

Con todo esto, se tendrá en cuenta que, en la plataforma continental expuesta al oleaje, la pendiente del fondo nos puede dar una primera información sobre su naturaleza:

Tipo de terreno	Pendiente del fondo
Roca	Cualquiera
Grava	$1/30 < \tan\beta < 1/10$
Arena gruesa	$1/60 < \tan\beta < 1/30$
Arena fina	$1/120 < \tan\beta < 1/60$
Arena-fango	$1/600 < \tan\beta < 1/120$
Fango	$1/600 < \tan\beta$

Tabla 15: Naturaleza más probable del fondo en función de su pendiente según la ROM.

En el caso de terrenos en los que se dispongan intervalos de grava-arena fina, a medida que mayor sea la magnitud de la dinámica marina, fundamentalmente el oleaje, más suave será la pendiente del fondo de tal forma que cuando sea menor a $1/120$, generalmente el fango comienza a presentarse.

15.1.2. BATIMETRÍA Y NATURALEZA DEL FONDO

Este punto se analiza detenidamente en otro apartado del presente proyecto por lo que simplemente se trata de comentar, el hecho de que las líneas batimétricas nos van a proporcionar una primera información de la naturaleza del fondo. Por ejemplo, si las líneas son muy irregulares y muestran cambios bruscos de fondo, probablemente, este sea rocoso. De igual manera, si se disponen de una manera regular, la probabilidad de que el fondo sea de arena, arena-fango o fango, es mayor.

15.1.3. EVOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL FONDO

Las oscilaciones propias del mar así como las corrientes, generan fuerzas de superficie, tensiones tangenciales y de masa en las partículas del fondo y del terreno. Todo esto puede provocar la erosión, el transporte y la sedimentación de las partículas del suelo, ya sean o no cohesivas. A medida que menor sea la profundidad relativa a la que se instale el arrecife artificial y mayor sea la velocidad del agua, esta acción será más influyente.

Por ello, es importante tener presente que la batimetría y la composición de los fondos puede cambiar espacial y temporalmente con los agentes climáticos marinos.

15.1.4. EVOLUCIÓN DEL FONDO EN PRESENCIA DE LAS OBRAS

La implantación de estas estructuras modifica, sustancialmente, el campo de oscilaciones y de corrientes, y los campos de fuerzas de superficie y de masa, de tal forma que se influye en el patrón de erosión-transporte-deposito en la zona circundante a la obra. Como consecuencia negativa destaca el hecho de que se puede repercutir, seriamente, en la estabilidad del módulo.

Igualmente, es recomendable prestar atención en aquellas zonas en la que haya presencia de vegetación, puesto que la magnitud de la obra puede incidir en la extensión y desarrollo. En este caso, hay que evaluar las alteraciones del medio vegetal y sus implicaciones en la dinámica marina y en la estabilidad del fondo.

15.1.5. PROCESOS Y EVOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA MORFOLOGÍA LITORAL

La implantación de estas estructuras influye en el campo de oscilaciones del entorno alterando los gradientes y, como consecuencia, el sistema circulatorio litoral. Por ello, es importante tener en cuenta que las obras afectan, igualmente, a la circulación en el litoral y zona de rompientes y que pueden modificar su morfología. Se deduce, pues, que los levantamientos batimétricos solo son representativos del instante en el que se realizaron.

15.2. COMPORTAMIENTO DEL TERRENO

Es importante conocer cuáles son los materiales que están presentes en la zona de ubicación de la estructura así como las propiedades que poseen mediante, por ejemplo, muestras representativas del fondo marino.

Así pues, la correcta clasificación del terreno es un paso importante porque proporciona los primeros datos sobre las experiencias que se puedan presentar durante y después de la construcción. El nivel de detalle con el que se describan, se prueben y se valoren las muestras, depende del tipo de estructura así como de condicionantes económicos, naturaleza de los suelos presentes y el método por el que se haga el muestreo.

A la hora de elegir la tipología de cimentación así como la estructura a implantar, es fundamental adecuar el suelo marino de la zona en la que se vaya a instalar el arrecife, de tal forma que sea capaz de transmitir los esfuerzos transmitidos por el módulo arrecifal y por las oscilaciones del mar. Nos centramos, concretamente en:

- La compresibilidad o capacidad de deformarse variando su volumen cuando se aplican cargas de compresión en su superficie.
- Resistencia al esfuerzo cortante o la capacidad que tiene el suelo para resistir el deslizamiento relativo entre las partículas adyacentes, cuando se le somete a un esfuerzo de corte.
- La capacidad de las partículas del fondo para permanecer en él, a pesar de la dinámica marina.

Se muestra a continuación, los diferentes tipos de suelo que se pueden presentar comúnmente:

- **Roca y suelos granulares**

Sin necesidad de tener en cuenta el grado de deterioro de estos suelos rocosos, en general son aptos para recibir cualquier tipología de arrecife artificial. Igualmente, los suelos y rellenos de materiales sueltos no cohesivos y las arenas gruesas y gravas son adecuados para recibir éstas estructuras, ya que poseen una alta permeabilidad haciendo que se drene el fluido intersticial en el caso de que sean sometidos a cargas cíclicas. Habrá que tener en cuenta el tiempo que se necesita para que el suelo expulse el agua intersticial con la obra ya instalada, considerando que se puede crear un exceso de presión intersticial en el interior del suelo. Como consecuencia, esta sobrepresión intersticial puede provocar una variación en las tensiones efectivas del suelo. Con todo esto, en presencia de suelos granulares flojos, se deberá prestar atención a los efectos dinámicos asociados a los movimientos oscilatorios marinos por su posible licuefacción.

- **Suelos cohesivos blandos**

En los suelos con abundancia de fracción fina y muy fina, debido a su baja permeabilidad, la resistencia al corte y a la elevada comprensibilidad están muy condicionadas por el drenaje, la velocidad de aplicación de la acción y la historia tensional del terreno. Por ello, es necesario estudiar la acumulación y el exceso de presión intersticial en el interior del terreno puesto que se puede llegar a crear una disminución en el módulo de rigidez del mismo si estamos ante una arcilla NC, o bien, al aumento si se trata de una arcilla SC. No serán adecuados estos suelos si se trata de recibir cargas concentradas y controlar los asientos.

- **Interacción suelo-arrecife**

Ante cualquier tipo de suelo, hay que considerar el hecho de que la presencia de la obra puede modificar las propiedades resistentes del mismo así como los regímenes oscilatorios en su exterior e interior. Por tanto, es recomendable evitar los arrecifes artificiales que impliquen una importante concentración de cargas y asientos diferenciales, en suelos y rellenos cohesivos o de baja calidad, debido a la acción del oleaje. Es necesario, en este caso, una cimentación más resistente y menos deformable.

En el caso de que los módulos arrecifales, ya sea por su geometría o por su forma constructiva, sean impermeables al flujo, pueden llegar a modificar el patrón de drenaje del suelo y los rellenos. De esta manera, cuanto menos permeable sea el terreno, más perjudicial será este efecto.

- **Banquetas y rellenos**

En aquellas estructuras que utilicen como cimentación las banquetas y los rellenos de granulometría gruesa y alta permeabilidad, se facilita el reparto de cargas y la liberación de presiones intersticiales ofreciendo una buena resistencia al esfuerzo cortante y una baja deformabilidad.

En el caso de que el fondo marino sea de roca, se puede enrasar con hormigón sumergido. Así pues, cuanto más apto sea el suelo para cumplir esta función, menores serán los espesores de la cimentación necesarios. Por otro lado, si el suelo satisface los requisitos geotécnicos, exceptuando en las condiciones de gran profundidad, los espesores de las banquetas y los rellenos serán los necesarios para homogeneizar y enrasar los apoyos y las cimentaciones.

- **Erosión superficial**

La erosión del terreno depende, fundamentalmente, de la composición del mismo, así como de su granulometría, además del régimen oscilatorio superficial y profundo. Hay que tener en cuenta que la presencia de la obra modifica, en mayor o menor medida, este régimen. Por ello, exceptuando el caso de que se presente un terreno rocoso, es necesaria la protección del mismo frente a la erosión.

Con todo esto, en la siguiente tabla se resume las obras que se pueden implantar en función del suelo y sus características:

Tipo de suelo	Tipología
Roca	Todas
Granulares flojos	Algunas

Granulares duros	Todas
Cohesivos blandos o rellenos de baja calidad	Evitar las que impliquen cargas concentradas
Rellenos homogéneos y permeables	Todas

Tabla 16: Tipología más adecuada en función de las propiedades del terreno según la ROM.

15.3. IDONEIDAD FRENTE A LOS CONDICIONANTES MORFOLÓGICOS

En este sentido, incluimos los siguientes aspectos que pueden condicionar la tipología:

- La disponibilidad del espacio en planta
- Las pendientes del fondo marino
- Los calados naturales existentes en las coordenadas de localización de los arrecifes artificiales

Generalmente, en función del tamaño de los módulos, así como de la cimentación empleada, pueden llegar a ocupar un espacio considerable en planta, en cuyo caso no es recomendable su colocación en zonas de área limitada o afección de los fondos marinos.

Igualmente, hay que estudiar las pendientes del terreno natural que nos condiciona en el caso de que sean muy grandes, así como la calidad del suelo por si implica la realización de dragados excesivos.

15.4. RECONOCIMIENTOS GEOTÉCNICOS

El número de muestras a tomar, mediante sondeos mecánicos, su ubicación y el número de ensayos in situ, se especifican en función de los siguientes factores:

- **Condiciones geotécnicas**

El terreno en el que se va a ubicar la estructura puede presentar unas condiciones más o menos favorables respecto a la obra en cuestión. Se entiende como favorable cuando no se temen problemas de rotura del terreno, ya sea por falta de estabilidad o de capacidad portante. Además, los problemas que se pueden presentar son comunes, de tal forma que ya han sido resueltos en ocasiones anteriores con facilidad y se dispone de diversa información para definir adecuadamente la forma de cimentación más adecuada en el tipo de terreno presente.

En cambio, se considerara como desfavorable, a las condiciones geotécnicas en las que se espera que las características del terreno sean claramente críticas para el proyecto en cuestión o bien cuando la obra a realizar requiera la utilización de técnicas poco usuales y de reducida experiencia.

Uno de los aspectos que nos pueden llevar a estas condiciones desfavorables, es la heterogeneidad del terreno, como es el caso de aquellos en los que pueden ofrecer características bien diferenciadas entre unos puntos y otros o bien, presentar fallos locales en los que las características resistentes puedan ser muy deficientes.

- **Carácter de la obra**

La intensidad con la que realizar los pertinentes reconocimientos geotécnicos deberá fijarse tras conocer el carácter de la obra que queda definido a partir de la ROM 0.0.

Así pues, a partir del IRE y del ISA ya definidos, podemos clasificar la obra según las tres categorías que se muestran en la siguiente tabla:

IRE \ ISA	Bajo ≤ 5	Medio 5 a 20	Alto >20
No significativo <5	C	B	A
Bajo 5 a 19	B	B	A
Alto y muy alto ≥ 20	A	A	A

Tabla 17: Categoría de la obra según los índices IRE e ISA a los efectos de la definición de la intensidad de los reconocimientos geotécnicos según la ROM.

De esta manera, dado que tenemos un IRE no significativo y un ISA bajo, la obra sería de categoría C.

15.4.1. TIPOS DE RECONOCIMIENTO

A efectos de establecer los criterios para decidir sobre la intensidad de los reconocimientos más adecuados, definimos los siguientes tres de manera básica: detallados, reducidos y mínimos.

Categoría de la obra	Condiciones geotécnicas		
	Desfavorables	Normales	Favorables
A	Detallado	Detallado	Detallado
B	Detallado	Reducido	Reducido
C	Detallado	Reducido	Mínimo

Tabla 4. Tipo de reconocimiento recomendado según la ROM.

Un reconocimiento geotécnico mínimo para las obras de Categoría C, en condiciones geotécnicas favorables, consiste en establecer las líneas generales de la estructura del terreno sin llegar a caracterizarlos en profundidad. Se pueden realizar explorando el terreno mediante perfiles de geofísica y mediante sondeos ejecutados según alineaciones y/o perfiles espaciados indicados a continuación:

Tipo de obra	Tipos de reconocimiento	
	Reducidos	Mínimos
Áreas de gran extensión	Malla 50 x 50 m	Malla 75 x 75 m
Estructuras concentradas	Malla 50 x 50 m	Malla 75 x 75 m
Estructuras lineales	Un punto cada 50 m	Un punto cada 100 m
Edificios o instalaciones ligeras	Malla 25 x 25 m	Malla 40 x 40 m
Taludes de excavación o relleno	Un punto cada 50 m	Un punto cada 100 m

Tabla 18: Número de puntos de investigación en reconocimientos reducidos y mínimos según la ROM.

15.5. PRINCIPIOS DE DISEÑO

A la hora de elegir una cimentación, hay que tener en cuenta que debe ser capaz de transmitir adecuadamente los distintos esfuerzos que genera el conjunto del módulo al lecho marino, garantizando la integridad de la estructura durante la vida útil de la misma.

- **Resistencia de la estructura**

Durante la vida útil prevista, frente a los efectos deteriorantes de carácter mecánico, físico y químico.

- **Fabricación e instalación**

Se debe realizar en base a técnicas y practicas reconocidas. En el caso de que se utilicen técnicas de innovación, deben de estar previamente testificadas.

- **Inspección, mantenimiento y reparación**

La cimentación propuesta debe contemplar el conjunto de estas operaciones a lo largo de la vida útil del arrecife, así como su posterior desmantelamiento.

- **Corrosión**

Es imprescindible utilizar un adecuado sistema de protección de la cimentación frente a la corrosión marina para asegurar el correcto funcionamiento de la misma a los largo de la vida útil de la misma.

- **Erosión**

Tener en cuenta que el tamaño de la protección contra la erosión proyectada es proporcional a la superficie de apoyo utilizada por la cimentación sobre el lecho marino.

- **Profundidad**

La profundidad de penetración en el lecho marino para ciertas tipologías de cimentaciones, dependerá, entre otros, de las cargas que tenga que soportar la estructura, la profundidad de las aguas y las características propias del suelo marino.

15.6. CLASIFICACIÓN DE LAS CIMENTACIONES

15.6.1. CIMENTACIONES SUPERFICIALES

Se definen como aquellas en las que el plano de contacto entre la estructura y el terreno está bajo el terreno, a poca profundidad en relación con el ancho de la cimentación.

Se utilizarán cuando a nivel de la zona inferior de la estructura el terreno presente las características necesarias desde los puntos de vista técnico y económico para cimentar sobre él.

Así pues, podemos encontrarnos los siguientes tipos de cimentaciones superficiales más comunes:

- **Zapatas**

Las características principales que debe de cumplir esta tipología de cimentación, a modo general son:

- Conducir las cargas al terreno a través de los elementos estructurales.
- Repartir uniformemente las cargas para no superar las tensiones superficiales del terreno

- Limitar los asientos de la estructura a los máximos admisibles y evitar, además, los asientos diferenciales.

En general, son soluciones económicas, fáciles de ejecutar y que se suelen adaptar bien a terrenos de relativa resistencia.

- **Zapatas aisladas o arriostradas**

En el caso de utilizar riostras, éstas no reducen especialmente las cargas verticales que actúan en cada zapata, de manera que a la hora de considerar el hundimiento y los asientos, se podrá considerar cada zapata individualmente.

- **Zapatas corridas y rígidas**

Comunes en el caso de estructuras de gravedad, su propia rigidez implica que para calcular los asientos, se pueda despreciar su deformación.

- **Zapatas corridas flexibles**

Utilizadas, frecuentemente, en terrenos de baja capacidad portante que no permiten las cimentaciones aisladas. Las vigas corridas pueden ir en una sola dirección, arriostradas o no, en dos o más direcciones, cruzándose y arriostrándose entre sí.

- **Losa**

Empleadas en suelos de reducida capacidad portante para cimentaciones aisladas o con vigas corridas. Estas losas pueden ser planas, de canto variable o nervado. Es necesario tener en cuenta que el espesor del hormigón a emplear implica considerar el efecto de interacción suelo-estructura para evaluar los esfuerzos en la cimentación.

15.6.1.1. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA

La cimentación se define por sus dimensiones nominales. En el caso de que no tenga forma rectangular, se pueden asimilar a rectángulos equivalentes. En cuanto a la profundidad de la cimentación, será una estimación del valor mínimo que cabe esperar en cada situación de proyecto.

15.6.2. CIMENTACIONES PROFUNDAS

Se suelen emplear en el caso de suelos que sean poco resistentes cerca de la superficie del terreno, entre otros factores, de manera que las cargas se transmiten a un material más resistente, situado a mayor profundidad. En este sentido, las cimentaciones profundas más empleadas es mediante pilotes.

Se trata de elementos de cimentación de gran longitud comparada con su sección transversal que, enterrado, consigue una cierta capacidad de carga, suma de su resistencia por rozamiento con el terreno y su apoyo en punta. Pueden llegar a alcanzar profundidades de hasta 50 metros y diámetros de 2 a 4 metros con cargas por encima de las 200 toneladas.

15.6.2.1. TIPO DE TERRENO

En función del terreno que nos encontremos en la zona de instalación de esta tipología de cimentación, basaremos la elección del pilote teniendo en cuenta, además, otros factores.

Con frecuencia, el tipo de terreno que se presenta suele ser heterogéneo y, por tanto, requiere una clasificación por zonas en una de las categorías mencionadas en el apartado anterior. Por otra parte, suele ser común suelos de transición difíciles de clasificar en una u otra categoría, con lo que hay que realizar una serie de comprobaciones con varias hipótesis de clasificación.

Así pues, especificamos las siguientes categorías

- **Rocas**

Consideraremos dentro de este grupo, a aquellos terrenos que posean las siguientes características:

- La resistencia a compresión simple de los testigos sanos, supera la carga de 1 MPa.
- En sondeos realizados a rotación que permitan recuperar más del 50% del testigo
- Los agregados minerales que forman las rocas, son estables en el tiempo, de manera que no presenten cambios importantes durante la vida útil de la obra.

Por ejemplo, dentro de esta categoría se pueden incluir las arcillas sobreconsolidadas y excluir las rocas que estén muy alteradas.

Como ya se ha comentado, es fundamental conocer la topografía del fondo, su naturaleza, el diaclasamiento, grado de alteración y la resistencia a compresión simple, a la hora de proyectar una adecuada cimentación.

- **Suelos granulares**

Son aquellos que carecen de cohesión, con una cierta permeabilidad mínima entre 10^{-4} a 10^{-5} cm/s, de tal forma que los procesos de variación de las presiones intersticiales tendrán lugar en plazos despreciables si se comparan con los de aplicación de las cargas de cimentación.

Podemos incluir en esta categoría a las arenas y las gravas con un contenido máximo de finos limosos del orden del 15%, así como rocas alteradas o fracturadas, solo cuando el producto de su alteración no sea arcilloso y, en conjunto, tenga cohesión e impermeabilidad.

- **Suelos cohesivos**

En relación con este tipo de cimentaciones, se entiende como suelos cohesivos a aquellos que tengan cohesión, con una resistencia a compresión simple inferior a 1 MPa y que sean lo suficientemente impermeables como para no catalogarlos dentro de los granulares.

Será preciso conocer, mediante ensayos de identificación, la naturaleza de estos suelos, su densidad y la resistencia tanto a corto como a largo plazo y algún dato sobre la deformabilidad.

Su utilización será requerida cuando:

- Las cargas no puedan transmitirse al terreno con una cimentación superficial
- Asientos imprevisibles pero existiendo terreno profundo resistente.
- Cuando el terreno de cimentación pueda sufrir grandes variaciones como la retracción.
- En el caso de que haya cargas inclinadas.
- Las cargas son muy fuertes y están concentradas.

15.6.2.2. TIPOS DE PILOTES A EMPLEAR

- **En función del proceso de ejecución**
 - **Pilotes hincados o de desplazamiento**

Se caracterizan por la compactación de los suelos del entorno que su ejecución puede inducir, puesto que el pilote se introduce sin una excavación previa.

Presentan las siguientes ventajas:

- El material del pilote se puede inspeccionar antes de introducirlo en el suelo.
- Se pueden hundir en grandes longitudes
- No sufre daños con el levantamiento del terreno que se puede ocasionar con el hundimiento de pilotes adyacentes
- Pueden ser llevados por encima del nivel del terreno, sobre todo en estas estructuras marinas.

Al igual que algunos inconvenientes:

- En el caso de que los hundimientos sean difíciles, pueden llegar a romperse.
- Si la cantidad de material en el pilote depende de los esfuerzos de manejo y hundimiento más que de los esfuerzos de carga permanente, no resultan económicos.
- No se pueden hundir en condiciones de poco espacio o en diámetros muy grandes
- El ruido, así como las vibraciones producidas durante su hundimiento, pueden causar molestias y daños.
- Si hay pilotes adyacentes, el desplazamiento de suelo producido durante el hundimiento, puede causar levantamiento de terreno, afectando a los pilotes ya instalados.

- **Pilotes excavados o perforados, hormigonados in situ.**

Se construyen en excavaciones previas.

Existen también los pilotes hincados en preexcavaciones parciales de menor tamaño que el pilote. Al igual que los pilotes excavados con ayudas de lanzas de agua.

Como ventajas, destacan:

- No existe riesgo de levantamiento del terreno
- Se pueden instalar en condiciones de escasa altura libre
- Se puede modificar su longitud para adecuarse lo mejor posible a las condiciones del suelo
- Pueden tener un diámetro grande
- No provocan en su instalación grandes vibraciones o ruidos molestos

- El material de que estén formados, no depende de las condiciones de hundimiento

Como desventajas, cabe destacar las siguientes:

- Son susceptibles al desgaste o estrechamiento.
- Tener cuidado con los métodos de perforación, porque pueden aflojar suelos que sean gravosos o arenosos
- No se pueden extender de una manera sencilla al nivel del suelo, en estos casos de instalación en zona marítima
- El hormigón no se puede inspeccionar después
- El agua, bajo presión, puede empujar al cuerpo del pilote, lavando el cemento
- En materiales no cohesivos, no se pueden formar extremos alargados.
- **En función del material que los constituyen**

Es necesario detallar la diferencia entre los pilotes de hormigón y los metálicos, así como los de madera, puesto que el rozamiento de las tierras con cada uno de ellos puede ser diferente:

- **Pilotes de madera**

Proporcionan cimentaciones económicas. No pueden soportar el esfuerzo debido a un fuerte hincado, en ocasiones necesario para penetrar en mantos muy resistentes. Pueden estar sujetos al ataque de organismos marinos como el teredo y la limnoria, pudiendo llegar a deteriorarse en unos cuantos años o bien, en condiciones muy desfavorables, en unos cuantos meses.

- **Pilotes de hormigón**

La mayoría pueden hincarse hasta alcanzar una alta resistencia sin daño, por lo que es posible asignarles mayores cargas admisibles que a los pilotes de madera. Las sales y la humedad marina atacan el refuerzo en los pilotes a través de las grietas en el hormigón, pudiendo llegar a desconcharse al formarse el óxido. Por ello, es conveniente utilizar un hormigón denso y de alta calidad.

- **Pilotes de acero**

Se suelen utilizar como pilotes los tubos de acero, que normalmente se llenan de hormigón, así como los perfiles en H, si las condiciones requieren un hincado violento, longitudes muy grandes o elevadas cargas de trabajo. Los perfiles en H, penetran en el suelo más fácilmente que otros tipos, entre otras cosas, porque desalojan poco material. Por ello, se utilizan, frecuentemente, para alcanzar un estrato de alta capacidad de carga a gran profundidad. En el caso de que el hincado sea difícil o si el material superior presenta obstrucciones o gravas gruesas, puede suceder que los patines se dañen y que los pilotes se tuerzan y se doblen. En estos casos, es imprescindible reforzar las puntas de los pilotes. Igualmente, puede ser conveniente, para conseguir una buena defensa del acero frente a la corrosión, el recubrimiento de las zonas más vulnerables con hormigón.

En cuanto a la estructura interna del pilote, como por ejemplo, entre el hormigón armado frente al pretensado, o los de estructura mixta hormigón –perfiles de acero o los pilotes metálicos tubulares rellenos de hormigón, tendrá una importancia secundaria a la hora de evaluar los aspectos geotécnicos, aunque no los estructurales.

Por último, con respecto a su forma, se tendrá en cuenta para el procedimiento de evaluación de su capacidad portante. Concretamente, se tiene en cuenta la forma de la punta para los pilotes hincados, en el caso de que la hincada se lleve hasta entrar en la roca o en un estrato resistente.

- **En función de cómo resistan las cargas**

Distinguimos, también, dos tipologías de pilotes

- **Pilotes de punta**

Obtienen su capacidad de carga de la roca o suelo circundante a la punta y la mínima resistencia del suelo que rodea el fuste. En el caso de que el estrato de apoyo no sea muy firme, se tendría que colocar una punta muy grande.

- **Pilotes de fuste**

Trabajan de una manera opuesta a los de punta. Su capacidad de carga nace de la resistencia al corte que se desarrollan entre el suelo y el fuste, de tal forma que la capacidad de estos pilotes proviene de las características del material que los rodea.

Así pues, es importante elegir bien la tipología de pilote a emplear, según diferentes aspectos como son, en este caso, la manera en la que el pilote transmite las cargas al terreno.

15.6.2.3. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA

Los datos geométricos más relevantes a la hora de evaluar el comportamiento de un pilote aislado son: la longitud dentro del terreno y su diámetro.

Dentro del grupo de pilotes, es necesario conocer su número y distribución, indicando la separación entre ellos.

Para un pilote aislado, el efecto de las cargas puede producirse bajo la punta, poco más allá de cinco veces el diámetro del pilote. En el caso de que se emplee un grupo de pilotes, estos efectos, pueden ser importantes hasta profundidades bajo sus puntas de más de vez y medio el ancho del grupo medido en planta. Para los pilotes que no sean circulares, esta dimensión se asimila como el diámetro del pilote circular de igual perímetro externo de igual sección transversal.

Como casos especiales, destacan:

- Pilotes de sección rectangular alargada: se suelen realizar con maquinaria de ejecución de pantallas continuas de hormigón armado.
- Tablestacas metálicas: la sección transversal de la punta puede considerarse rectangular y con un ancho igual a la distancia horizontal que existe entre los planos verticales que inscriben al tablestacado.

En un pilote se distinguen, fundamentalmente, dos zonas: la activa y la pasiva, cerca de la punta. En estas zonas es donde se rompe el terreno, donde se alcanza la condición de fluencia plástica, durante el proceso de hundimiento vertical.

La amplitud de dichas zonas depende fundamentalmente del ángulo de rozamiento del terreno. Así pues, se puede llegar a suponer que:

- La zona activa inferior afecta hasta una profundidad bajo la punta del pilote igual a: 2D para terrenos cohesivos y 3D en los granulares o de rocas.
- La zona pasiva superior afecta hasta una altura sobre la punta igual a: 4D en terrenos cohesivos y 6D en granulares y rocas.

A modo resumen, a continuación se muestra una tabla con la geometría de pilote más común en función de la ejecución que se lleve a cabo:

Ejecución	Material	Geometría
Hinca	Hormigón	Cilíndricos Cuadrados Hexagonales
Hinca	Metálicos	Tubo Perfil laminado
In situ	Hormigón de extracción de tierras Hormigón de desplazamiento	

Tabla 19: Geometría de los pilotes según la ejecución.

15.6.2.4. ELECCIÓN DEL TIPO DE PILOTE

Para realizar la mejor elección del pilote a utilizar en la obra, se tienen en cuenta los siguientes factores más relevantes:

- **Las posibilidades de ejecución**

En general, cualquier tipología de pilote se puede construir en cualquier terreno, aunque por ejemplo, en el caso de que existan niveles duros o de roca, la mejor elección sería la de pilotes hormigonados in situ o hincados con ayuda de lanzas de agua.

- **Aprovechamiento de la capacidad resistente**

La capacidad estructural de los pilotes a instalar debe ser consecuente con la resistencia del terreno en el que se ubiquen. De manera general, en los casos en los que la mayor parte de la resistencia del terreno se movilice por fuste, serán más adecuados los pilotes de menor tamaño. En cambio, los pilotes que transmiten la carga por punta se realizan de mayor tamaño para aprovechar su capacidad de carga estructural.

- **Comportamiento a largo plazo**

Para elegir los materiales que forman los pilotes, hay que tener en cuenta la durabilidad durante las condiciones de servicio. Por ejemplo, si utilizamos un hormigón de baja calidad o una madera no tratada, se puede llegar a una pérdida de la capacidad estructural.

15.7. CIMENTACIONES MÁS COMUNES EN ARRECIFES ARTIFICIALES

- **Anclajes**

Es un tipo de fijación que se ha desarrollado para asegurar la estabilidad de los módulos arrecifales al fondo marino.

Útiles para sustratos rocosos, arenosos y lodosos, son sistemas de gran eficiencia y capacidad de carga, ambientalmente sustentables y de reducido impacto ambiental, asegurando la permanencia de estos anclajes marinos aun en condiciones climáticas adversas.

Además, son sistemas de rápida instalación y una valoración económica accesible en contraposición de cimentaciones de tipo concretos de hormigón, de gran pesaje y que por tanto requieren de gran volumen para obtener capacidades de carga aceptables, derivando en unos costos económicos inevitablemente mayores, provocados, también, por su proceso de fabricación y maniobras complejas requeridas.

Así pues, las ventajas específicas de este sistema se pueden enumerar en las siguientes:

- Cualquier capacidad de carga que se requiera
- Fabricación inmediata
- Embarcaciones menores
- Sistema listo para el uso en dos días
- Impacto ambiental nulo puesto que no existe ningún tipo de desplazamiento
- Impacto visual mínimo
- Costos accesibles
- Alta resistencia

- **Reef Ball**

Son módulos arrecifales que se asemejan a una semiesfera hueca de hormigón con una serie de perforaciones. Estos agujeros, presentan una abertura de tamaño mayor en la cara exterior y menor en la interior, además de agujeros que se pueden conectar entre sí, en caso necesario. En la zona de la corona del módulo, se tiene una abertura de mayores dimensiones. Además, se diseñan de tal forma que más de la mitad del peso del mismo esté en la parte inferior. Todo esto, aumenta la estabilidad y neutraliza el efecto de las corrientes, sin la necesidad del empleo de anclajes u otros medios de fijación.



Figura 15: Reef Ball

Se construyen con cemento que rodea un globo de Polyform que permite que flote el módulo para que sea remolcado mediante una lancha, hasta el punto de fondeo. Una vez llegados al sitio exacto, se procede a desinflar y remover el globo y, mediante ayuda de buzos, se colocan en el fondo. A la hora de realizar el transporte marítimo, hay que tener en cuenta que la altura de la máxima será menor a tres pies y la velocidad de remolque será de 2 a 3 nudos, hasta un máximo de 5 nudos.

En cuanto a la textura de los mismos, se realizara en función de si se pretende una mayor o menor colonización.

- **Peso propio**

En el caso de que se emplee únicamente el peso propio del módulo arrecifal para asegurarlo al fondo marino sin que se vea sometido a posibles desplazamientos o inestabilidades, se recomienda que el peso del mismo sea, como mínimo, del orden del doble de la gravedad específica del agua del mar.

Es importante colocar, en este caso, la estructura fuera de la línea de rotura del oleaje para evitar estas inestabilidades, así como diseñar los módulos con una serie de agujeros para el paso de las corrientes.

15.8. EJEMPLOS DE ESTRUCTURAS OFF-SHORE

• Gravedad

Se diseñan para ser sumergidas y ubicadas en el lecho marino, con un peso suficiente como para que puedan soportar las cargas durante la vida útil de la estructura, así como las condiciones climatológicas más extremas que se puedan dar en la zona de la instalación, solo mediante el peso propio de los módulos.

Se utilizan en profundidades reducidas, menores a 20 metros, como es el caso del presente proyecto.

Su instalación requiere que previamente se prepare el terreno donde se van a ubicar las obras teniendo, generalmente, que eliminar la capa superficial del fondo marino.

Consiste en una gran base de hormigón que descansa sobre el fondo marino. El módulo se mantiene en vertical por gravedad y por la forma plana y alargada de la base, que evita que se gire por los momentos soportados en ella debido a las fuerzas a las que está sometido el otro extremo del módulo.

• Monopilote

Se aplica en zonas de poca profundidad, menos de 15 metros. Depende mucho del suelo en el que se ubique puesto que se puede llegar a derivar en problemas de resonancia o vibraciones. La profundidad de penetración en el lecho marino dependerá de las cargas que tenga que soportar la estructura, profundidad de las aguas y las características propias del suelo marino.

○ Métodos de fijación:

El monopilote se puede fijar al lecho marino por diversos métodos, atendiendo a la composición del suelo:

▪ Dirigido

Se realiza cuando la composición del lecho no presenta estratos duros, de manera que se puede hincar el pilote mediante un martillo neumático situado en una plataforma tipo Jack-up o embarcaciones similares.

▪ Perforado

En este caso el suelo es de tipo rocoso, por lo que se recomienda realizar una camisa en el lecho marino, donde se coloca el monopilote. A continuación, se llena por bombeo la cavidad

existente, con mortero de alta resistencia. Antes del curado, se nivela la cimentación evitando así el uso de la pieza de transición.

- **Mixto**

El suelo presenta algunos estratos duros que impiden la hinca en algunas fases. Por ello, se combina la técnica de hincado con martillo neumático con la de perforación, que utiliza una broca que desciende por el interior del monopilote y perfora los sustratos más duros.

- **Fases de instalación**

A la hora de valorar el impacto ambiental que se puede provocar, hay que tener en cuenta las distintas fases de ejecución de dicha cimentación:

- **Primera fase**

Se deposita una capa de 0.5 metros de espesor por 25 metros de diámetro de gravas para disminuir la erosión producida por la perforación e inca del pilote.

- **Segunda fase**

Se procede a realizar la hinca hasta la profundidad de diseño del proyecto, y para ello se necesitará de una embarcación dotada de un martillo hidráulico y de un sistema de guía para garantizar y rectificar la alineación del pilote durante las maniobras.

- **Tercera fase**

Se procedería al sellado de una pieza de transición que se coloca para corregir posibles desviaciones de la vertical producidas durante la colocación del monopilote y garantizar una superficie de trabajo para montar el módulo, así como para la operación y el mantenimiento del mismo. También se sella el pilote con una pasta de alta resistencia.

- **Cuarta fase**

Por último, se debe colocar una segunda capa de gravas sobre el fondo marino para asegurar una adecuada y correcta protección contra la socavación. El espesor que se debe tener entre ambas capas de gravas será de 0.8 metros con el mismo tamaño de gravas en las dos.

- **Trípode**

El módulo descansa sobre tres o más pilotes. Se pueden utilizar para profundidades mayores, hasta los 40 metros. Se trata de adaptar el diseño del monopilote y con el mismo mecanismo de perforación, realizar tres pilotes en lugar de uno. El hecho de tener tres puntos de apoyo, aumenta la estabilidad de la estructura que se apoya en el lecho y resiste mejor las cargas.

16. VALORACION DE IMPACTOS

16.1. GEOMORFOLOGÍA

Para valorar el grado de afección que provoca el arrecife en la geomorfología, se realizará un seguimiento de al menos dos años para ver las posibles modificaciones sufridas en la línea de

costa. Para ello, se podrán utilizar fotografías aéreas o con estudios topobatimétricos, así como con los sonar de barrido lateral.

16.2. CALIDAD DE LAS AGUAS

Durante la fase de construcción y desmantelamiento, para poder cuantificar las alteraciones producidas, se podrá medir semanalmente, durante el transcurso de las obras, los parámetros establecidos previamente para su caracterización, concretamente, en la turbidez y los compuestos tóxicos contenidos en el sedimento. Una vez concluido el primer mes de después de la finalización de las obras, se ratificará la ausencia de afección. Para la fase de funcionamiento, se podrá medir semanalmente la temperatura, turbidez, salinidad, oxígeno disuelto y pH, para valorar las alteraciones producidas en las propiedades físico-químicas del agua, provocadas por el aumento de la carga biológica.

16.3. SEDIMENTOS

En la fase de construcción y desmantelamiento, los efectos se producen por la retirada de los sedimentos, cuando se necesiten operaciones de dragado. En este caso, se recomienda consultar:

- *“Guía metodológica para la elaboración de estudios de impacto ambiental de las extracciones de arenas para la regeneración de playas.”*

En cuanto a la fase de servicio, se pueden producir ciertos problemas, si el arrecife está constituido por materiales que no son inertes, puesto que se podrían pasar a la columna de agua. Así pues, conviene analizar los sedimentos aledaños a los módulos. Por otro lado, para cuantificar el aumento de materia orgánica, se realizará mediante tres muestras de sedimentos anexos a las estructuras.

16.4. COMUNIDADES BIOLÓGICAS

Se realizará el seguimiento, mediante muestreos semanales con inmersión para comprobar el estado de las comunidades, en aquellos arrecifes situados en una zona de alto valor ecológico.

16.5. PATRIMONIO HISTÓRICO

Si el fondeo se realiza en zonas que tienen un elevado potencial arqueológico, conviene la presencia de una especialista para ofrecer una respuesta inmediata si aparece algún resto de valor.

16.6. SOCIOECONOMÍA

Para este tipo de arrecife, el estudio se basará en datos socioeconómicos anuales del buceo recreativo y del desarrollo turístico que conlleva, o bien una valoración de las capturas realizadas por la flota en el caso de la pesca recreativa. Se realizará a largo plazo, en un mínimo de tres años, de manera anual.

16.6.1. INFLUENCIA EN LAS PEQUERÍAS LOCALES

Se trata de analizar los impactos positivos que provoca la instalación del arrecife en el sector de la pesca recreativa, en el caso de que el arrecife sea para tal fin. Para ello, se pueden realizar

encuestas para ver la evolución y la opinión sobre el arrecife. Un modelo de encuesta sería el siguiente:

Arrecife artificial:
Fecha:
Nombre del puerto base, patrón y embarcación:
Modalidad de pesca:
¿Dónde se pesca con más frecuencia?:
¿Cuánto pesca en cada jornada?:
Evolución de las capturas en los últimos años: 1/0/-1
Problemática con otros sectores pesqueros
¿Faenan en la zona de los arrecifes?: S/N
¿Han notado la presencia de los arrecifes?: S/N
¿Están de acuerdo con su ubicación y funcionamiento?: S/N
¿Les han pedido opinión anteriormente? S/N
¿Pescan las mismas opciones siempre?: S/N

16.7. PAISAJE

En el caso de que se prevea una modificación sustancial del paisaje costero, se recomienda realizar semestralmente inspecciones visuales complementadas con las labores de seguimiento de la geomorfología.

16.8. MATRICES DE VALORACIÓN DE IMPACTOS

A continuación se muestra las matrices genéricas de comprobación de impactos, para sintetizar los impactos asociados a cada fase de proyecto, los elementos que los generan y la valoración del grado de importancia de cada uno:

Sistema físico-natural	Fase de construcción		Fase de servicio			Fase de desmantelamiento	
	Transporte	Fondeo	Actividad biológica	Funcionalidad del arrecife artificial	Retirada de elementos	Trasporte	Presencia de residuos
Calidad del aire	N	N			N	N	
Morfología costera			N	N			N
Morfología submarina		N	S	S	S		S
Calidad hidrológica	N	S	N	N	S	N	N
Calidad sedimentaria		S	N	N	S		N

Tabla 20: Matriz genérica de valoración de impactos para arrecifes destinados a otros usos. Sistema físico-natural.

Sistema perceptual	Fase de construcción			Servicio	Desmantelamiento			
	Transporte	Fondeo	Instalación	Presencia de la estructura fondeada	Retirada	Transporte	Labores	Residuos
Paisaje marino y submarino			S	P	C	N	S	P
Niveles sonoros y vibraciones	S	S		S	S	S		N

Tabla 21: Matriz genérica de valoración de impactos para arrecifes destinados a otros usos. Sistema perceptual

Sistema socioeconómico	Construcción			Servicio			Desmantelamiento			
	Tran.	Fon	Insta	Act.Bi.	Presenci	Funciona	Retirad	Tras	Desma.	Presenc. Elemento
Empleo	P	P				P	P	P		
Espacios recreativos				P	P	P			N	P
Actividad pesquera	S	S		P		N	S	S		P
Turismo	S	S	S	P	P	P			S	P
Infraestructuras		S		S						
Navegación	S	S			S		S	S		S
Caladeros	S	S		P		P	S	S		P

Tabla 22: Matriz genérica de valoración de impactos para arrecifes destinados a otros usos. Sistema socioeconómico.

- **Leyenda:**

[N]: Impacto nulo o poco significativo. Puede llegar a manifestarse, pero su incidencia se verá asumida inmediatamente por el entorno de forma natural.

[S]: Impacto significativo. Se manifiesta de forma relevante en el entorno de instalación del arrecife artificial. Suelen ser asumidos de forma natural a medio largo plazo o a corto plazo si se utilizan acciones correctoras. Serán por tanto, objeto de estudio y/o seguimiento.

[P]: Impacto positivo. Favorecen al entorno receptor del arrecife, mejorando las condiciones naturales de su estado preoperacional. No será objeto de estudio y/o seguimiento específico a no ser que las mejoras comentadas coincidan con el fin de la instalación del arrecife artificial.

[C]: Impacto no asumible. Se manifiestan de forma irreversible y continua sobre el medio receptor del arrecife artificial. Será objeto de estudio específico en las primeras etapas de la toma de decisiones de la definición del proyecto, a fin de modificar los parámetros definitorios causantes de tales impactos. Se deben de redefinir dichos parámetros para minimizar la afección detectada, a no ser que se logren con ellos beneficios significativos sobre otras variables ambientales que sopesen la afección primera.

17. ESQUEMA

A continuación se muestra un esquema con los pasos a seguir a la hora de realizar la instalación de un arrecife artificial, en función de las características que se presenten:

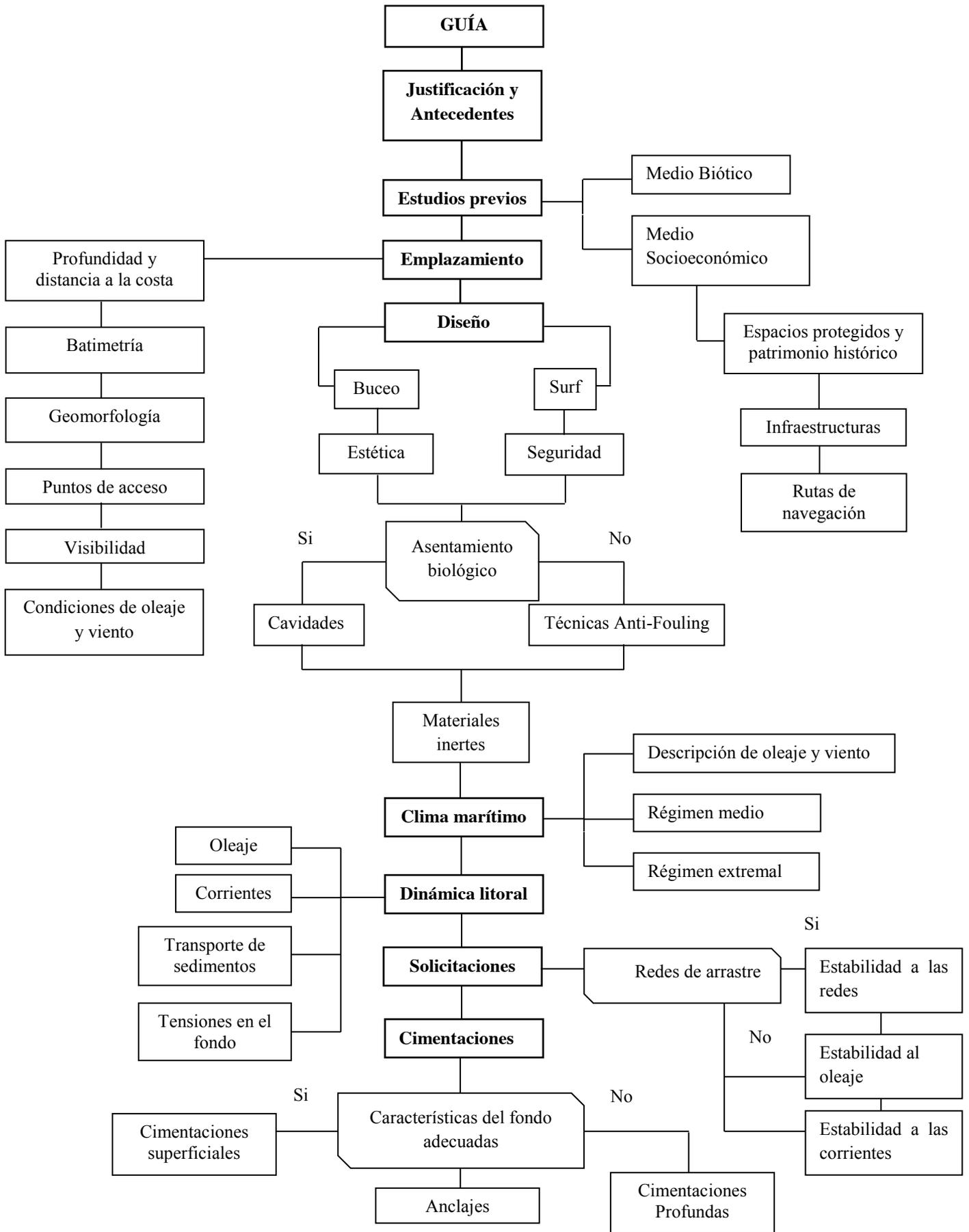


Figura 16: Esquema de instalación de arrecife artificial

PARTE II: APLICACIÓN A LA PLAYA DE SAN JOSÉ

En esta segunda parte, se trata de llevar a cabo un ejemplo de instalación del arrecife artificial en una playa concreta y estudiar en qué medida afecta la instalación.

18. JUSTIFICACIÓN DE LA ACTUACIÓN

La actuación consiste en llevar a cabo la instalación de una serie de módulos arrecifales en la playa de San José, en la provincia de Almería. El objetivo es el de fomentar el buceo recreativo en una zona en la que la práctica de la actividad está ya extendida debido a las buenas condiciones climáticas, de oleaje, visibilidad y tipología de playas. Además, se prevé una disminución de la presión en otras áreas naturales de buceo y la potenciación económica de los sectores relacionados.

19. MEDIO BIÓTICO Y CARACTERIZACIÓN DE LA VEGETACIÓN MARINA

San José se sitúa en el Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar, en la provincia de Almería.

19.1. COMUNIDADES BIÓTICAS

Se pueden distinguir varias comunidades en función de la zona en la que nos centremos:

- **Zona Supralitoral**

En esta parte, nos encontramos con *Melaraphe neritoides* y *Verrucaria symbalana*, además de *Chthamalus depressus* y *Melaraphe punctata*, en la parte inferior.

- **Zona Mediolitoral**

Domina la comunidad de feofíceas *Mesospora macrocarpa*, el cirrípedo *Chthamalus stellatus*, además de diversas cianofíceas. Las conchas de cirrípedos y lamelibranquios, presenta una comunidad de cianofíceas endolíticas, como la *Mastigocoleus testarum* o la *Plectonema terebrans*. En la zona Mediolitoral inferior se pueden encontrar el *Ceramietum ciliati*, que se presenta bajo numerosas facies. En esta zona de cabo de Gata, la Isleta y Las Negras, destaca un horizonte de *Laurencia sp.*

- **Zona Infralitoral**

- **Sustrato rocoso**

En modo batido superficial, se puede destacar una serie de especies del género *Cystoseira* del grupo *stricta*. Abundan la *Jania Rubens*, la *Corallina granifera* o la *Ceramium rubrum*. En modo calmado, se presentan comunidades incluíbles en el *Cystoseiretum crinitae*. En la zona entre Cabo de Gata y la Isleta del Moro, entre las que se ubica la playa de San Jose, dominan la *Cystoseira ercegovicii* y *Cystoseira cf. Baleárica var. claudiae*, además de la *Halopteris scoparia*, *Cladostephus hirsutus* o la *Padina pavonica* en los primeros metros de profundidad y la comunidad de *Enteromorpha*.

Para profundidades superiores a los 12 o 14 metros, aparece la *Cystoseira spinosa*, en la que se distingue un sustrato de algas esciáfilas y un estrato de algas fotófilas.

Las comunidades esciáfilas de la zona Infralitoral son asimilables al *Udoteo-Peyssonnelietum*, destacando la abundancia de las coralináceas *Mesophyllum lichenoides* y *Lithophyllum expansum* y la presencia de diversas *Peyssonnelia*.

○ **Sustrato blando**

Está formado por partículas sueltas de diversos tamaños. Debido a su continua dinámica, impide que se asienten la mayoría de las especies macrobentónicas sésiles. Así pues, los organismos que predominan son los de comportamiento endobentónico, así como la fauna móvil.

Hablamos de fondos de sedimentos gruesos (gravas y arenas) y de sedimentos finos (fangos). Los primeros están bien oxigenados, son pobres en materia orgánica y bacterias pero ricos en organismos intersticiales. Por el contrario los fangos no están bien oxigenados, de manera que si abunda la materia orgánica.

Concretamente en la zona de proyecto, se desarrollan las praderas de fanerógamas marinas. Se pueden encontrar pequeñas praderas de *Cymodocea nodosa*, aunque la *Posidonia oceánica* es la predominante. La vegetación epifita de las hojas sigue la pauta de otras praderas del Mediterráneo. Abundan la *Myrionema magnusii*, la *Fosliella lejolisii* o la *Giraudia sphacelariodes*.

En la siguiente tabla, se resumen las especies más representativas:

Nombre Científico	Nombre Vulgar	Clasificación
<i>Acetabularia acetabulum</i>	Seta de mar (Green seaweed)	Algas
<i>Anadyomene stellata</i>	Alga verde Anadyomene (<i>Anadyomene stellata</i>)	Algas
<i>Codium bursa</i>	Codio o Boina (Mediterranean codium)	Algas
<i>Codium vermilara</i>	<i>Codium vermilara</i> (Olivi) (<i>Codium vermilara</i>)	Algas
<i>Corallina elongata</i>	Coralina (Mediterranean red alga)	Algas
<i>Cystoseira compressa</i>	<i>Cystoseira compressa</i>	Algas
<i>Cystoseira mediterranea</i>	Cistoseira	Algas
<i>Cystoseira spinosa</i>	Alga parda <i>Cystoseira</i> (<i>Cystoseira spinosa</i>)	Algas
<i>Halimeda tuna</i>	Halimeda (Green seaweed Clorophyta halimeda)	Algas
<i>Laminaria rodriguezii</i>	Alga laminaria (Sea alga laminaria)	Algas
<i>Nemalion helminthoides</i>	Alga nemalion (Sea noodles)	Algas
<i>Spongites notarisii</i>	Alga calcárea (Mediterranean seaweedspongites)	Algas
<i>Aplidium proliferum</i>	Ascidia (Ascidians)	Ascidias
<i>Adeonella calveti</i>	Briozoo Adeonela (<i>Adeonella calveti</i>)	Briozoos
<i>Myriapora truncata</i>	Falso coral (False coral)	Briozoos
<i>Actinia equina</i>	Tomate de mar (Beadlet anemone)	Cnidarios
<i>Anemonia sulcata</i>	Anémona de mar común (Snakelock anemone)	Cnidarios
<i>Astroides calycularis</i>	Coral naranja, coral estrellado (Orange coral)	Cnidarios

<i>Cerianthus membranaceus</i>	Cerianto o anémona de arena	Cnidarios
<i>Cladocora caespitosa</i>	Madrepora mediterránea (Mediterranean coral <i>Cladocora caespitosa</i>)	Cnidarios
<i>Rhizostoma pulmo</i>	Aguamala, acalefo azul (<i>Rhizostome jellyfish</i>)	Cnidarios
<i>Aristeus antennatus</i>	Gamba roja (Red shrimp)	Crustáceos
<i>Nephrops norvegicus</i>	Cigala (Norway lobster)	Crustáceos
<i>Arbacia lixula</i>	Erizo de mar negro (Black sea urchin)	Equinodermos
<i>Astropecten aranciacus</i>	Estrella de arena (Sea star)	Equinodermos
<i>Diadema antillarum</i>	Erizo de lima (Long Spined Sea urchin)	Equinodermos
<i>Anchinoe tenacior</i>	Esponja incrustante azul (Mediterranean marine sponge)	Esponjas
<i>Aplysina cavernicola</i>	Esponja de mar (Sea sponge <i>aplysina</i>)	Esponjas
<i>Axinella polypoides</i>	Esponja cornuda común (<i>Sponge axinella</i>)	Esponjas
<i>Crambe crambe</i>	Esponja roja o anaranjada (<i>Sponge Crambe</i>)	Esponjas
<i>Posidonia oceanica</i>	Posidonia, alga de vidrieros o Lijo (<i>Neptune grass</i>)	Fanerógamas
<i>Arca noae</i>	Arca de Noe (Bivalve <i>arca noae</i>)	Moluscos
<i>Chamelea gallina</i>	Chirla (<i>Striped venus</i>)	Moluscos
<i>Charonia lampas</i>	Bocina, Caracola (<i>Trumpet shell</i>)	Moluscos
<i>Dendropoma petraeum</i>	Molusco vermético gasterópodo (Mediterranean vermetid gastropod)	Moluscos
<i>Loligo vulgaris</i>	Calamar (European squid)	Moluscos
<i>Octopus vulgaris</i>	Pulpo (Common octopus)	Moluscos
<i>Pinna nobilis</i>	Nacra (Noble pen shell)	Moluscos
<i>Pinna rudis</i>	Nacra de roca (<i>Pinna rudis</i>)	Moluscos
<i>Sepia officinallis</i>	Sepia, choco, jibia (Common cuttlefish)	Moluscos
<i>Apogon imberbis</i>	Salmonete real, alfonsiño (Cardinal fish)	Peces
<i>Auxis rochei</i>	Melva (Bullet tuna)	Peces
<i>Balistes carolinensis</i>	Pez ballesta o pez gallo (Grey triggerfish)	Peces
<i>Belone belone gracilis</i>	Aguja o bicuda (Mediterranean garfish)	Peces
<i>Boops boops</i>	Boga (bogue)	Peces
<i>Cetorhinus maximus</i>	Tiburón peregrino (Basking shark)	Peces
<i>Chelon labrosus</i>	Lisa (Thicklip grey mullet)	Peces
<i>Conger conger</i>	Congrio (European conger)	Peces
<i>Coryphaena hippurus</i>	Lampuga o Llampuga (Dolphinfish)	Peces
<i>Dentex dentex</i>	Dentón (Common <i>dentex</i>)	Peces
<i>Dicentrarchus labrax</i>	Lubina, róbalo. (European seabass)	Peces
<i>Diplodus puntazzo</i>	Sargo picudo (Sharpsnout seabream)	Peces
<i>Diplodus sargus</i>	Sargo (White seabream)	Peces
<i>Diplodus vulgaris</i>	Mojarra o seiffo (Common two-banded seabream)	Peces
<i>Epinephelus caninus</i>	Mero gris (Dogtooth grouper)	Peces
<i>Epinephelus costae</i>	Falso abadejo (Goldblotch grouper)	Peces
<i>Epinephelus marginatus</i>	Mero (Dusky grouper)	Peces
<i>Mullus surmuletus</i>	Salmonete de roca (Surmullet)	Peces
<i>Muraena helena</i>	Morena (Mediterranean muray)	Peces

Sarpa salpa	Salema (Salema)	Peces
Sciaena umbra	Corvina o Corvallo (Browm meagre)	Peces
Scorpaena porcus	Rascacio (Black scorpionfish)	Peces
Scorpaena scrofa	Cabracho (Red scorpionfish)	Peces
Seriola dumerilii	Pez limón, serviola, lecha o medregal (Greater amberjack)	Peces
Serranus scriba	Vaca serrana (Painted comber)	Peces
Sphyaena sphyaena	Espetón (European barracuda)	Peces
Thalassoma pavo	Fredi, pez verde (Ornate wrasse)	Peces
Xyrichtys novacula	Pejepeine, Galán o Raor (Pearly razorfish)	Peces

Tabla 23: Especies marinas presentes en Cabo de Gata-Níjar.

20. MEDIO SOCIOECONÓMICO

- **Las rutas de navegación existentes:**

La playa de San José es una zona de fondeo, que consta de un Puerto deportivo desde el cual salen las embarcaciones, deportivas o de recreo, con una eslora máxima de 12 metros y calado máximo de 6.3m. Así pues, no existen líneas regulares de cruceros ni embarcaciones mayores. Siguiendo la carta náutica de esta área, se ve que es una zona de navegación costera.

- **Estudio de la actividad pesquera de la zona:**

- **Caladeros de pesca:**

Son los principales focos marinos de pesca. Cerca de la playa de San José se encuentran:

- El caladero en Canto Morrón, a unas 4,5 millas de la costa.
- El caladero de Canto Mónsul a 6 millas de la costa.
- Caladero de Cala Higuera, situado a unas 3-5 millas de la costa.
- Caladero en Canto de los Hermanos y Cantos de los Escullos a 4-6 millas de la costa.

- **Artes de pesca empleados:**

Las principales modalidades de la provincia son:

- Aparejos de anzuelo: es el arte más selectivo a la hora de pescar. Destaca la pesca de Palangre, en la que se utiliza un aparejo con una línea paralela al fondo ramificada con líneas de anzuelos conectadas a ella, formando así una unidad. Los Palangres pueden ser de fondo o de superficie.
- Artes de marisqueo: en el que se engloban las artes y artilugios que se utilizan para extraer moluscos. Concretamente destacan los rastros, que arañan el fondo en la maniobra de arrastre, o la draga hidráulica, en la que se combina el chorro de agua a presión y un artilugio en forma de cajón en el que se almacenan las especies desenterradas.
- Artes fijas: son aquellas que, una vez caladas, permanecen en esa posición hasta que son levantadas. Destacan las artes de trampa, como la Almadraba, que consiste en una estructura de redes que se sitúan cerca de la costa donde permanecen caladas por un tiempo, o la Moruna, de dimensiones menores. Se incluyen también en este grupo las Artes de red, formadas por redes rectangulares que se calan verticalmente de manera que se forma una pared. Por último, citamos las Artes de deriva, en las que se apresan

por enmalle a las especies, pero ninguno de sus elementos están en contacto con el fondo, de manera que se mueven por las corrientes y mareas.

- Artes móviles: en ellas, la captura involucra una persecución dirigida de la especie objetivo. Las más usadas son las artes de arrastre y el arte de cerco.

En la siguiente tabla, se resumen el número de barcos censados que practican cada modalidad:

Tipo de pesca	Número de buques
Arrastre de fondo	82
Cerco	46
Palangre de superficie	48
Artes menores	82
Total de embarcaciones	258

Tabla 24: Buques censados por modalidad de pesca.

○ **Volumen de las capturas:**

En la tabla siguiente, se detalla las especies capturadas y el volumen total que se registró en el año 2010 en la provincia:

Especie capturada	Peso en Kg	Valor en €
Melvas	1.257.167	840.610
Sardina	962.710	1.119.358
Jurel del Mediterráneo	947.609	596.374
Caballa del Sur	502.517	286.343
Pez Espada	447.300	2.191.068
Alacha	432.741	117.967
Paparda	214.904	368.420
Merluza	167.428	861.120
Bacaladilla	140.836	277.007
Salmonetes	120.585	992.283
Gamba roja o alistado	101.286	3.827.464

Tabla 25: Volumen de capturas de la provincia de Almería.

● **Deportes náuticos:**

En el pueblo de San José nos encontramos varios centros de buceo, revelando así la tradición de la actividad en la zona, debido a las perfectas condiciones de visibilidad, playas y calas, y las condiciones climatológicas. También existen prácticas de actividades como el surf, aunque menos extendida, el remo, la vela, etc.

● **Emisarios, cables submarinos y cualquier tipo de infraestructura instalada previamente:**

En la provincia de Almería, nos encontramos los siguientes puntos de vertido, según la Consejería de medio Ambiente y Ordenación del Territorio:

- Forma de emisario: 18 puntos localizados.
- Forma de conducción de desagüe: se localizan 121 puntos de vertido.

- Otros: 17 puntos de vertido.

La naturaleza del vertido predominante es la urbana y la industrial. Sin embargo, en el pueblo de San José no se localiza ninguno actualmente.

En base a las cartas náuticas, no se presenta ningún tipo de cable o estructura submarina en la zona de instalación.

- **Espacios protegidos:**

San Jose se sitúa en el Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar siendo, además, zona de reserva marina, que tiene como objetivo la protección, regeneración y el desarrollo de los recursos de interés pesquero para el mantenimiento de las pesquerías artesanales que permitan a los pescadores preservar su modo de vida tradicional.

21. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE INSTALACIÓN

Se ha seleccionado esta playa debido a las buenas condiciones para el desarrollo de la actividad. Es una playa urbana, localizada en el centro del pueblo. Tiene una longitud de 850 metros y está compuesta de arena fina.

Hasta la línea batimétrica de 15 metros de profundidad, se cuenta con una pendiente de 0.022.

A continuación se muestra la situación exacta:

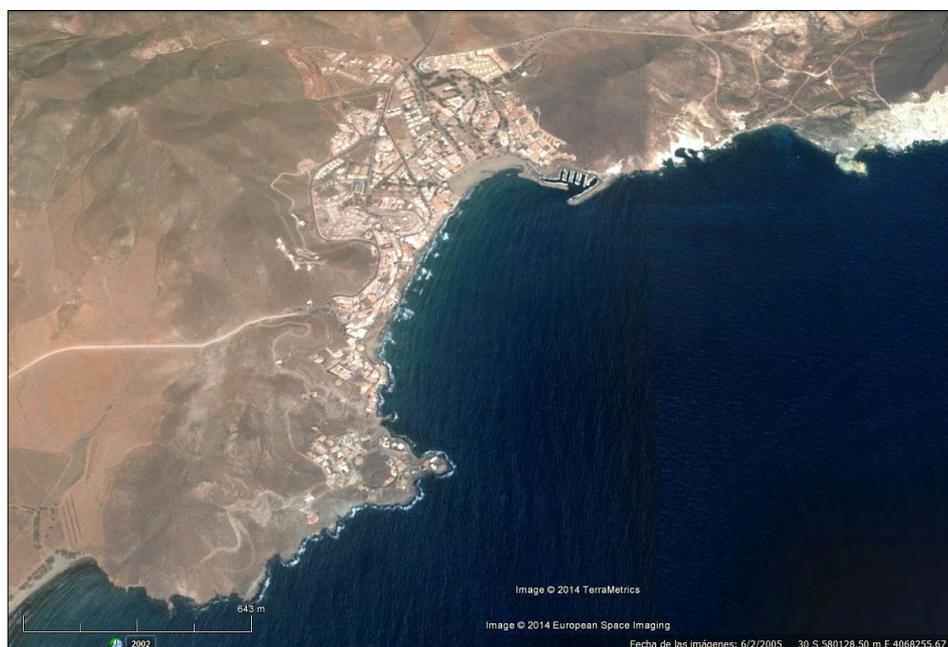


Figura 17: Playa de San José

Como se puede apreciar, la playa consta del Club Náutico de San José garantizando la accesibilidad a la zona de buceo.

21.1. LOCALIZACIÓN DE LOS MÓDULOS ARRECIFALES

En el presente proyecto se han planteado y analizado 6 escenarios de estudio, uno inicial sin la actuación llevada a cabo, y cinco alternativas.

21.1.1. BATIMETRÍA

Se muestra la batimetría de la zona de San José y Genoveses, que se empleará en el programa de análisis numérico Delft3D. Esta batimetría, ha sido completada con el programa AutoCad, a partir de cartas náuticas.

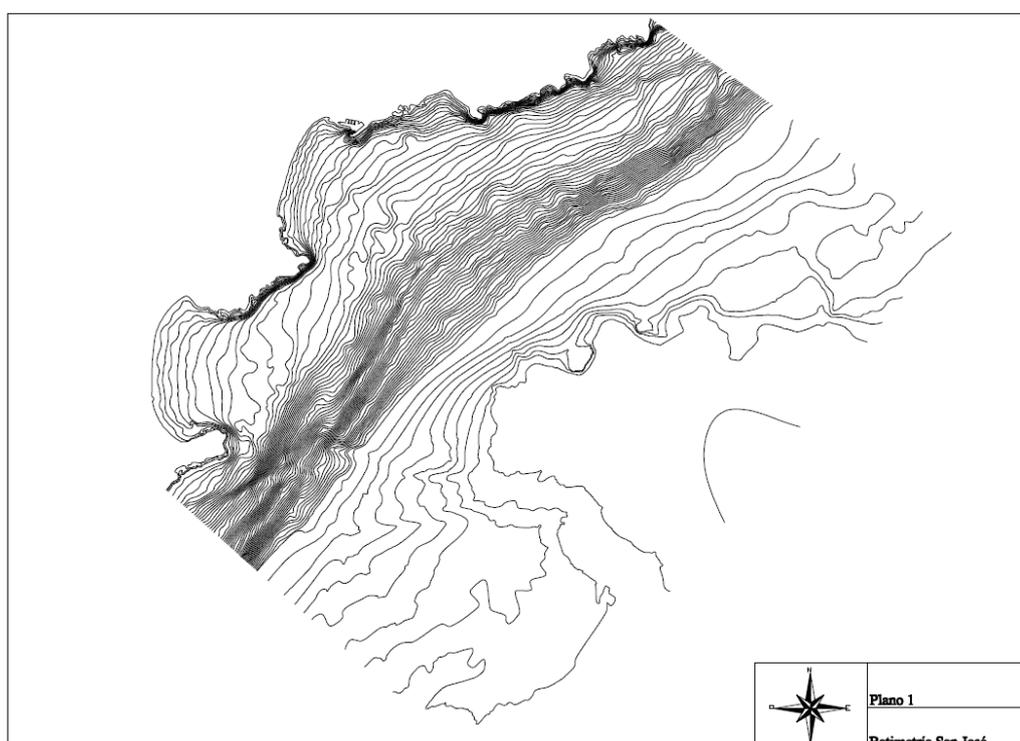


Figura 18: Batimetría de San José

21.1.2. ALTERNATIVA 1

La primera alternativa consiste en distribuir 36 módulos de 2mx2mx2m, en un área de 42mx42m, separados 6m en filas y columnas. Se encuentran entre la línea batimétrica de 7 y de 8 metros de profundidad, a una distancia de 231.6 metros de la costa de manera que se asegura la estabilidad de los mismos al evitar la zona de rompientes de la playa.

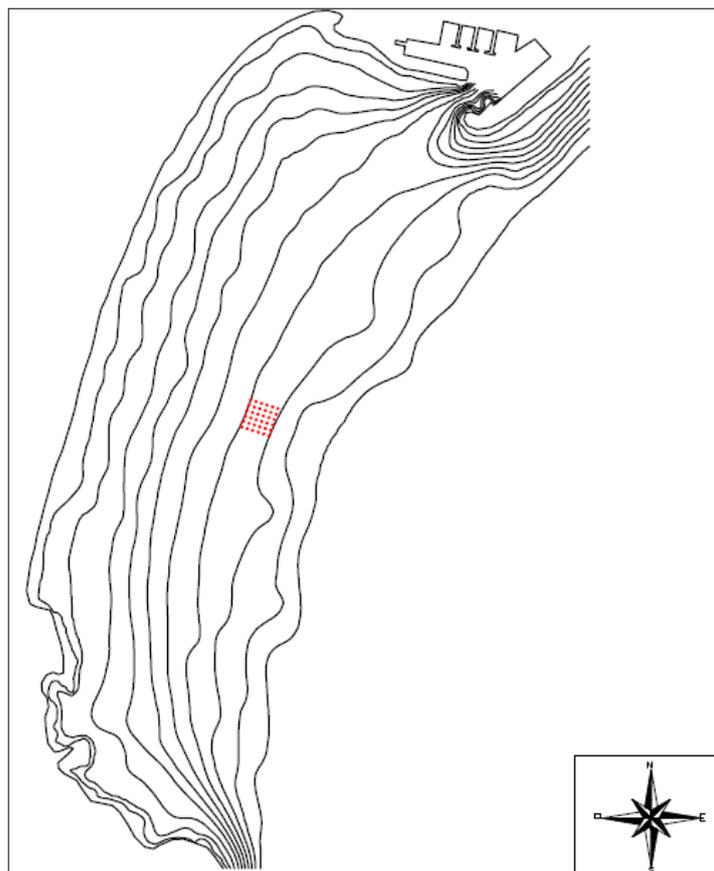


Figura 19: Escenario 1

21.1.3. ALTERNATIVA 2

En este segundo caso, se han dispuesto la misma tipología de módulos, con la misma ubicación con respecto a la playa, pero en un área rectangular, de 18mx90m. En la dirección de los 18 metros, se cuenta con tres filas y en la perpendicular, se disponen de 12 filas. La distancia entre filas para ambas direcciones es de 6 metros.

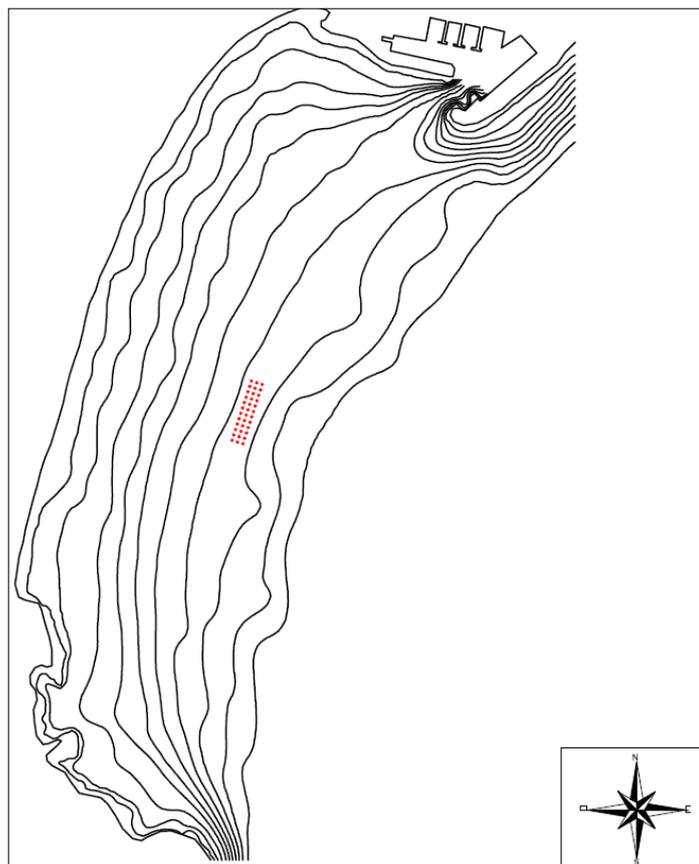


Figura 20: Escenario 2

21.1.4. ALTERNATIVA 3

Con los mismos módulos, dispuestos esta vez en tresbolillo. El área ocupada es de 21.97mx46.04m. La distancia entre módulos en ambas direcciones principales es de 6 metros. Se sitúa, igualmente entre las líneas batimétricas de 7 y 8 metros.

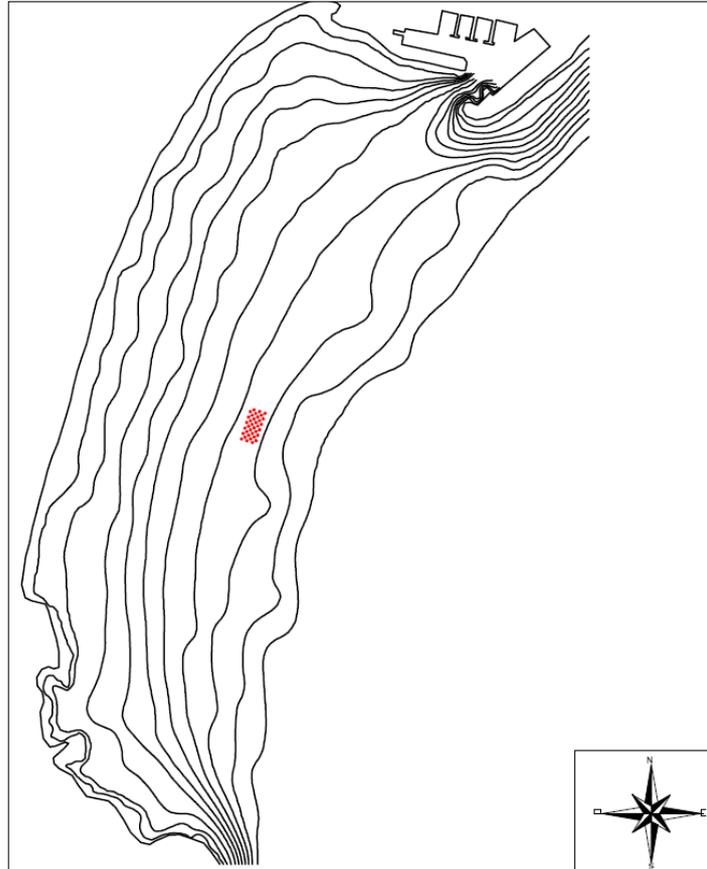


Figura 21: Escenario 3

21.1.5. ALTERNATIVA 4

Con esta cuarta alternativa, se quiere analizar cómo influye en el medio la colocación de unos módulos el doble de grande, ocupando un área mucho mayor. Para ello, se disponen de 36 módulos arrecifales, pero de 4mx4mx2m, formando un área cuadrangular de 74mx74m. La distancia entre filas y columnas es de 10 metros. Se sitúa entre las líneas batimétricas de 7, 8 y 9 metros de profundidad.

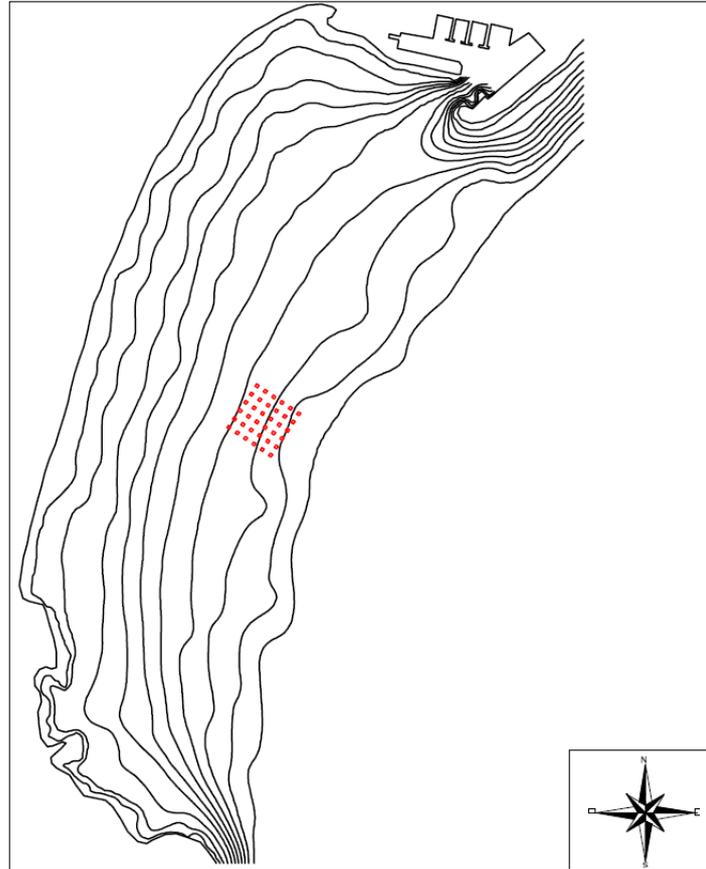


Figura 22: Escenario 4

21.1.6. ALTERNATIVA 5

En esta última alternativa, se planteó la posibilidad de instalar uno de los módulos con 4 metros de parte emergida sobre la superficie del mar, de manera que la gente desde la playa los pueda ver. Se basa en la alternativa cuarta, añadiendo un módulo central que actuaría de hito.

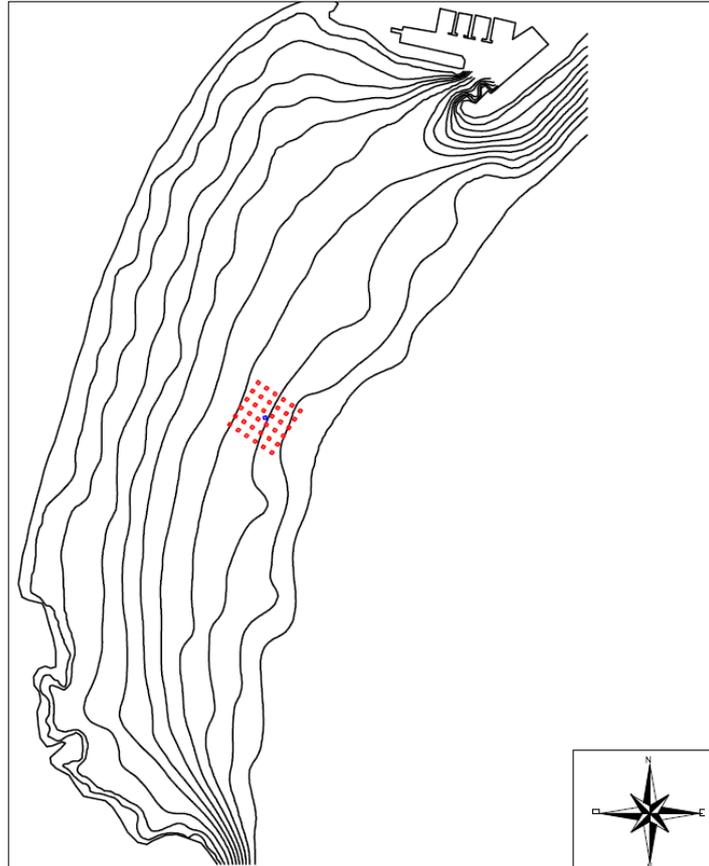


Figura 23: Escenario 5

22. DISEÑO DE LOS MÓDULOS DEL ARRECIFE

Para todas las alternativas, los módulos seleccionados tienen forma cúbica, con unas aristas de hormigón armado. El peso aparente en el agua es de 2.7 toneladas.

Gracias a las cavidades, se favorece el asentamiento de las especies, además de que permite la circulación del agua a través de los mismos aumentando su estabilidad.

No posee ningún tipo de elemento disuasorio, puesto que su finalidad no consiste en evitar artes de pesca ilegales.

23. MATERIALES

Como ya se ha comentado, los módulos están realizados con hormigón armado. Estas armaduras consisten en barras corrugadas de acero de 4200Kp/cm^2 , de acuerdo a las recomendaciones.

Con este tipo de material se consigue la compatibilidad con el medio ambiente, siguiendo las recomendaciones y normativa especificadas en la guía, además de proporcionar una

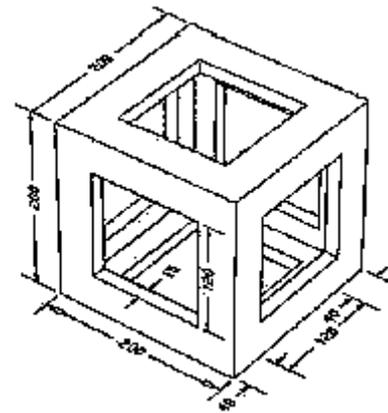


Figura 24: Módulo arrecifal tipo

superficie que permite la colonización de los organismos. Se permiten adoptar diversas formas, en función de la finalidad que tenga el arrecife artificial.

Debido a su elevado peso aparente y a las bajas corrientes de la zona, no se hace necesario el empleo de ninguna cimentación, pues por peso propio resiste.

24. CLIMA MARÍTIMO

24.1. DATOS PARA EL ESTUDIO EN LA ZONA

Se ha utilizado los datos de la Boya de Cabo de Gata cedidos por Puertos del Estado. En el siguiente mapa, se puede ver la localización exacta:



Figura 25: San José

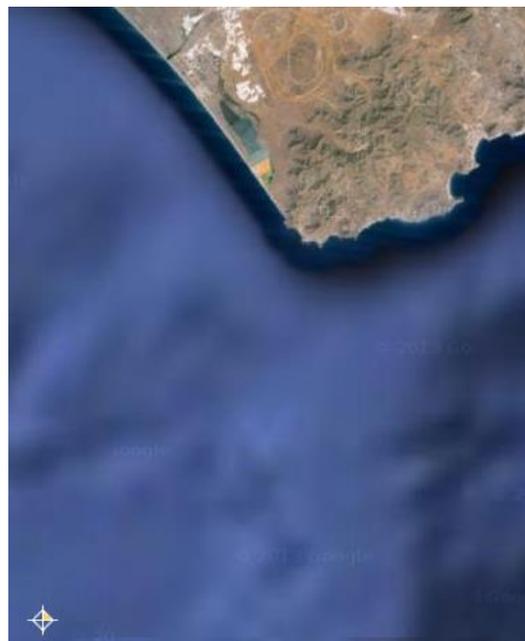


Figura 26: Boya Cabo de Gata

Así pues, se trata de analizar para oleaje y viento:

- Descripción general en profundidades indefinidas
- Régimen medio
- Régimen extremal

24.2. OLEAJE

24.2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL OLEAJE

En este primer apartado, se realiza una descripción del oleaje en profundidades indefinidas, en el que se muestra:

a) Serie temporal del oleaje

En este primer gráfico, se muestra la serie temporal de los datos de la Boya que comprende desde el año 1998 hasta el año 2013:

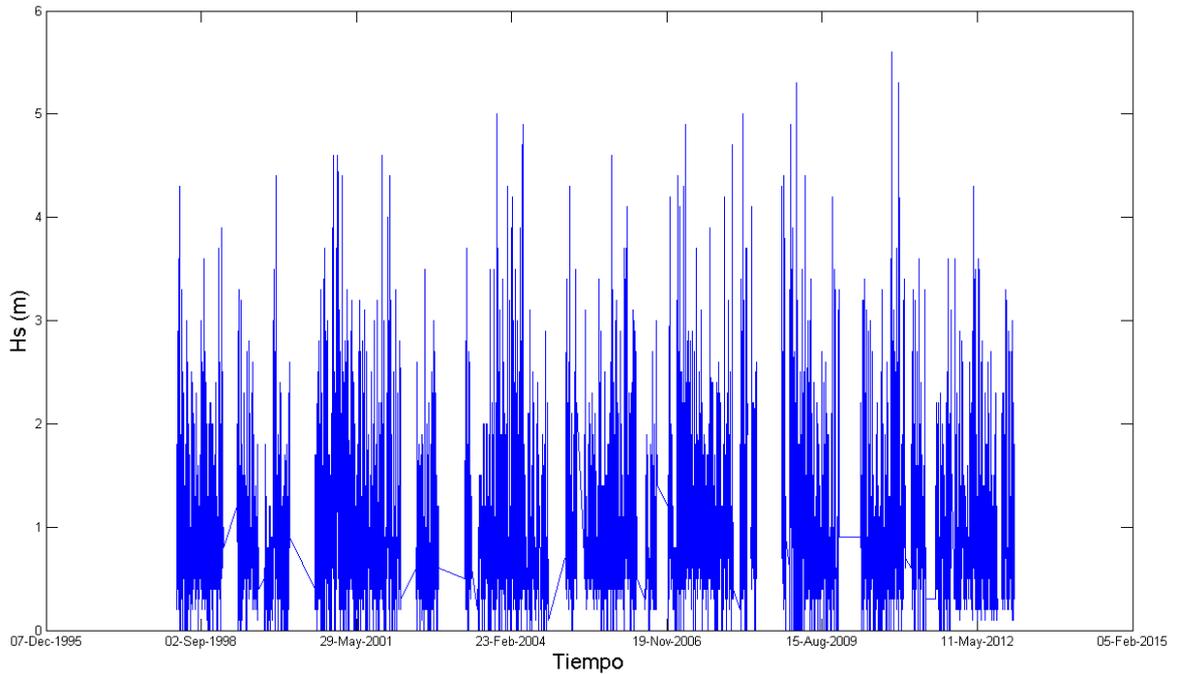


Figura 27: Serie temporal de altura de ola

b) Histograma de altura de ola y tabla de frecuencias

En este primer histograma, se representa el rango de alturas de ola significante registradas por la Boya, divididas en intervalos de 0.25m y la frecuencia de ocurrencia de cada intervalo:

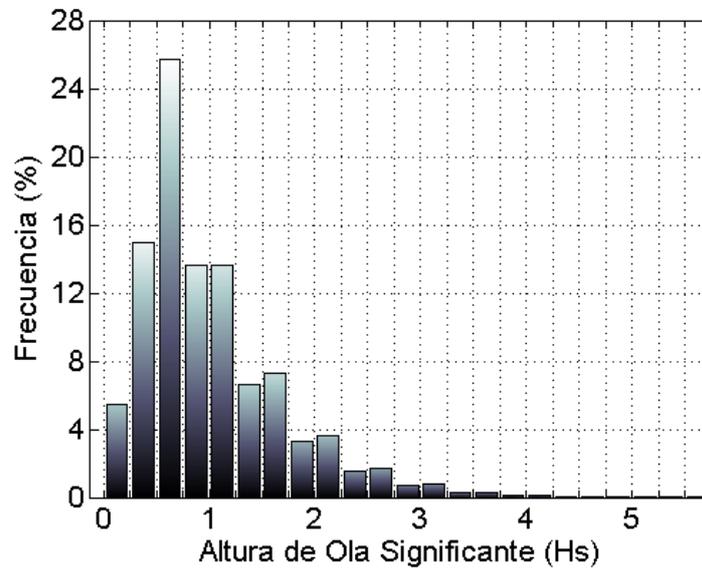


Figura 28: Histograma de altura de ola (m)

Hs (m)	Fr (%)
0-0,25	5,48088175
0,25-0,5	14,921408
0,5-0,75	25,7313641
0,75-1	13,6510748
1-1,25	13,6078518
1,25-1,5	6,62787143
1,5-1,75	7,3173303
1,75-2	3,30497486
2-2,25	3,65181273
2,25-2,5	1,53494207
2,5-2,75	1,68464109
2,75-3	0,70738058
3-3,25	0,78223009
3,25-3,5	0,30783179
3,5-3,75	0,27515102
3,75-4	0,1085845
4-4,25	0,14021105
4,25-4,5	0,07063264
4,5-4,75	0,05481936
4,75-5	0,02424702
5-5,25	0,00843375
5,25-5,5	0,00421687
5,5-6	0,00210844

Tabla 26: Probabilidades de ocurrencia de Hs (m)

Vemos que el rango de altura de ola va desde los 0m a los 6 metros. El intervalo de altura de ola más frecuente es el de 0.5-0.75 metros.

c) Histograma de Período de pico y tabla de frecuencias

Al igual que con la altura de ola, se representa el histograma de periodo de pico registrados, divididos en intervalos de 1 segundo, y la frecuencia con la que se da cada uno:

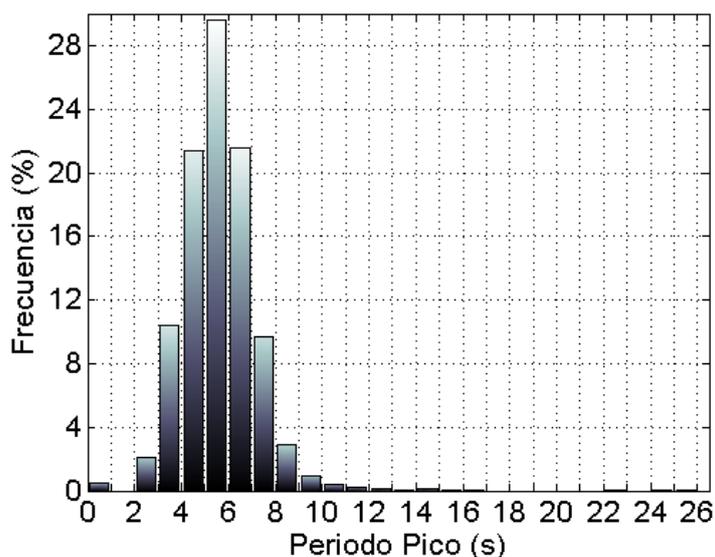


Figura 29: Histograma de Período de Pico (s).

Tp (s)	Fr (%)
0-1	0,53289154
1-2	0
2-3	2,09568833
3-4	10,3834709
4-5	21,3642024
5-6	29,5971129
6-7	21,5604753
7-8	9,70495747
8-9	2,91243695
9-10	0,97397801
10-11	0,40309816
11-12	0,20049385
12-13	0,09497077
13-14	0,02849123
14-15	0,096026
15-16	0,02110462
16-17	0,02532554
22-23	0,00211046
24-25	0,00211046
25-26	0,00105523

Tabla 27: Probabilidades de ocurrencia de Tp. (s)

Los períodos de pico van desde los 1s hasta los 26 segundos y el intervalo más frecuente es el de 5-6 segundos

d) Histograma de dirección del oleaje y frecuencias

Se muestra, a continuación, el histograma correspondiente a la dirección media de procedencia del oleaje, dividido en sectores direccionales de 22.5° de amplitud, junto con sus frecuencias:

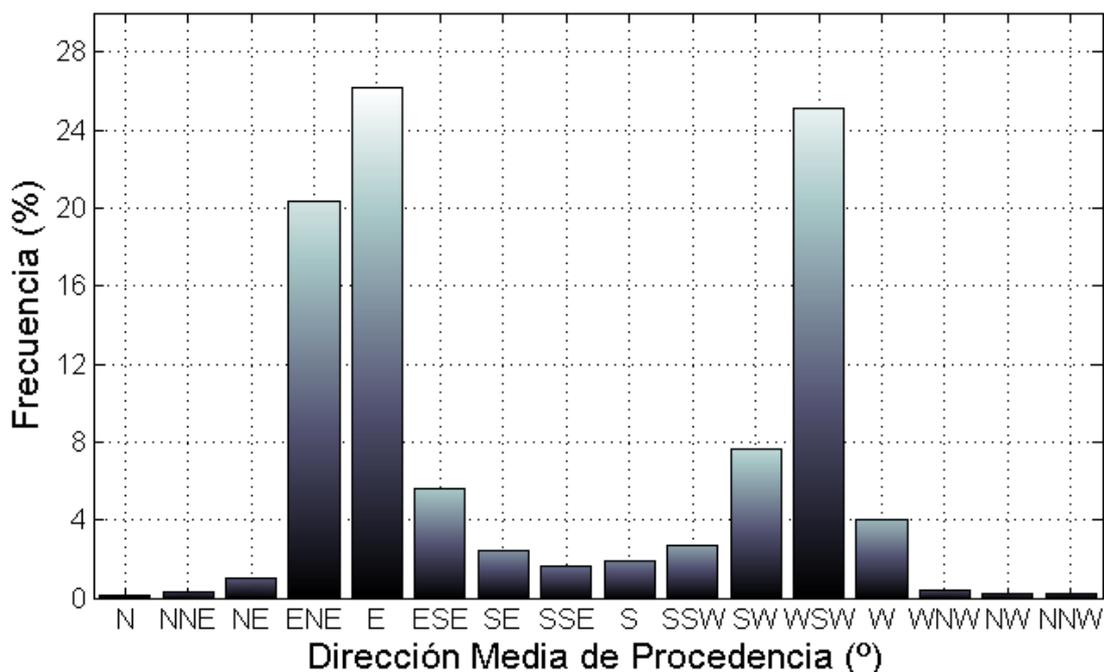


Figura 30: Histograma de dirección media de procedencia del oleaje (°).

Dirección Hs	Sector	Porcentaje tiempo %
N	$348.75^\circ < \Theta \leq 11.25^\circ$	0,133454241
NNE	$11.25^\circ < \Theta \leq 33.75^\circ$	0,352456071
NE	$33.75^\circ < \Theta \leq 56.25^\circ$	0,997484901
ENE	$56.25^\circ < \Theta \leq 78.75^\circ$	20,31413075
E	$78.75^\circ < \Theta \leq 101.25^\circ$	26,18611734
ESE	$101.25^\circ < \Theta \leq 123.75^\circ$	5,577702876
SE	$123.75^\circ < \Theta \leq 146.25^\circ$	2,409020138
SSE	$146.25^\circ < \Theta \leq 168.75^\circ$	1,669888959
S	$168.75^\circ < \Theta \leq 191.25^\circ$	1,933375537
SSW	$191.25^\circ < \Theta \leq 213.75^\circ$	2,66737386
SW	$213.75^\circ < \Theta \leq 236.25^\circ$	7,62229028
WSW	$236.25^\circ < \Theta \leq 258.75^\circ$	25,11848341
W	$258.75^\circ < \Theta \leq 281.25^\circ$	4,029291495
WNW	$281.25^\circ < \Theta \leq 303.75^\circ$	0,359299879
NW	$303.75^\circ < \Theta \leq 326.25^\circ$	0,25664277
NNW	$326.25^\circ < \Theta \leq 348.75^\circ$	0,229267542

Tabla 28: Frecuencias de las direcciones del oleaje.

De todo esto, se deriva que las dos direcciones predominantes son la Este y WSW.

e) Gráficos de dispersión y tablas

En este apartado se indica la probabilidad conjunta de ocurrencia para cada altura de ola y período pico, altura de ola y dirección media y, por último, período de pico y dirección media:

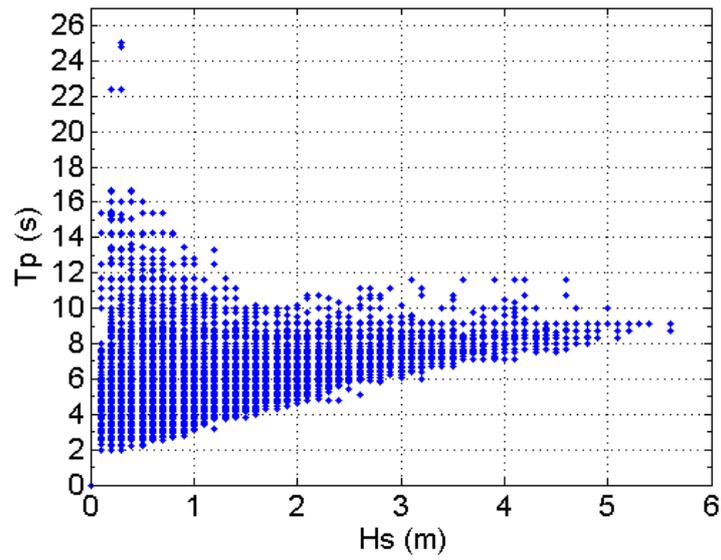


Figura 31: Gráfico de dispersión Hs-Tp.

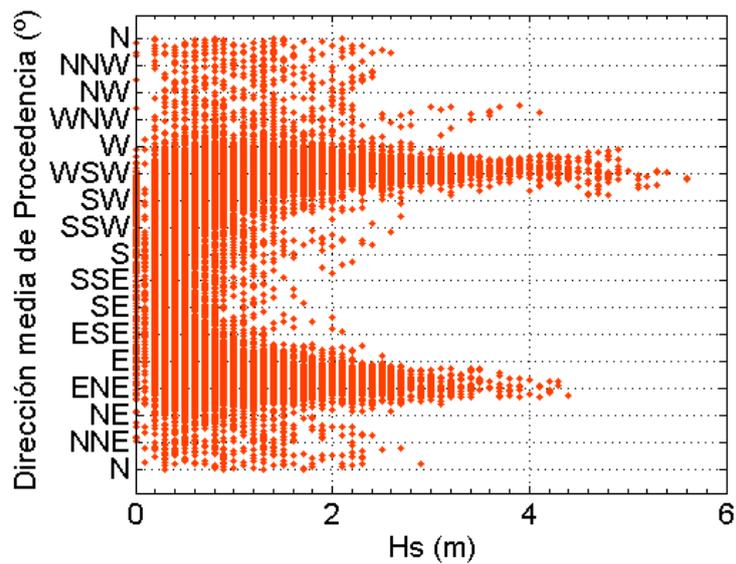


Figura 32: Gráfico de dispersión Hs- θ

Se puede apreciar las dos direcciones predominantes del oleaje E y WSW, y que la máxima altura de ola se da para la dirección WSW, con un valor de 5.6 metros.

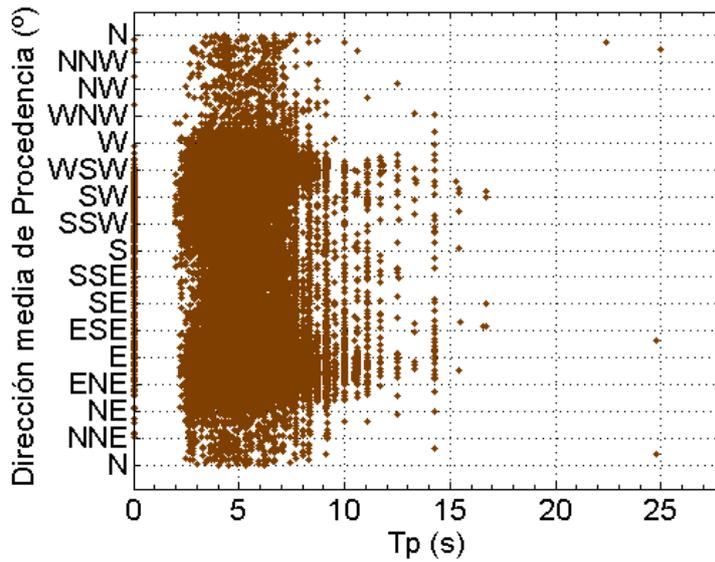


Figura 33: Gráfico de dispersión $T_p-\theta$

Así como tres tablas que representan los diagramas de dispersión de forma numérica:

Hs/ Tp	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Total (%)
0	0,53	0	0,19	0,62	1,02	1,29	0,88	0,55	0,09	0,03	0,05	0,04	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	5,3901188
0,25	0	0	1,03	2,3	3,74	3,62	2,26	1,44	0,25	0,1	0,05	0,05	0,03	0,01	0,04	0,01	0,01	14,935736
0,5	0	0	0,86	5,29	7,42	6,77	2,86	1,4	0,65	0,26	0,11	0,06	0,04	0	0,02	0	0	25,756073
0,75	0	0	0,01	1,84	4,09	4,72	1,8	0,67	0,33	0,13	0,05	0,02	0,01	0	0	0	0	13,664183
1	0	0	0	0,32	3,71	5,85	2,6	0,66	0,3	0,12	0,06	0,01	0	0	0	0	0	13,620919
1,25	0	0	0	0,01	0,99	2,84	2,17	0,43	0,13	0,04	0,02	0	0	0	0	0	0	6,6342359
1,5	0	0	0	0	0,35	3,04	3,08	0,66	0,13	0,05	0,02	0	0	0	0	0	0	7,3243568
1,75	0	0	0	0	0,03	0,9	1,74	0,52	0,09	0,03	0	0	0	0	0	0	0	3,3081485
2	0	0	0	0	0,01	0,48	2,18	0,82	0,13	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	3,6553194
2,25	0	0	0	0	0	0,07	0,9	0,47	0,07	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0	1,536416
2,5	0	0	0	0	0	0,02	0,77	0,72	0,12	0,03	0,01	0,01	0	0	0	0	0	1,6862588
2,75	0	0	0	0	0	0	0,2	0,41	0,08	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0,7080599
3	0	0	0	0	0	0	0,12	0,51	0,11	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0,7829812
3,25	0	0	0	0	0	0	0,02	0,21	0,07	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0,3081274
3,5	0	0	0	0	0	0	0	0,16	0,1	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0,2754152
3,75	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,06	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0,1086888
4	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,08	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0	0,1403457
4,25	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,05	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0,0707005
4,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0,054872
4,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0242703
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0084418
5,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0042209
5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0021105
5,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total (%)	0,53	0	2,1	10,4	21,4	29,6	21,6	9,7	2,91	0,97	0,4	0,2	0,09	0,03	0,1	0,02	0,03	100

Tabla 29: $H_s(m)-T_p(s)$

Hs (m) / Ø	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	Total (%)
0	0,026	0,113	0,385	1,059	0,895	0,609	0,539	0,488	0,52	0,344	0,077	0,015	0,005	0,003	0,021	0,005	5,114
0,25	0,046	0,392	2,556	3,987	1,418	0,842	0,686	0,847	1,237	1,429	0,375	0,058	0,026	0,027	0,017	0,015	14
0,5	0,118	1,189	8,824	5,328	0,635	0,418	0,33	0,63	1,41	4,589	1,99	0,188	0,051	0,05	0,044	0,017	25,85
0,75	0,063	0,811	5,397	1,47	0,12	0,075	0,094	0,12	0,392	2,982	1,768	0,137	0,048	0,022	0,033	0,026	13,59
1	0,062	1,025	5,802	0,714	0,048	0,033	0,034	0,101	0,176	2,647	2,531	0,154	0,038	0,034	0,041	0,014	13,47
1,25	0,043	0,541	2,837	0,25	0,014	0,01	0,014	0,019	0,067	1,341	1,574	0,11	0,034	0,036	0,038	0,012	6,969
1,5	0,031	0,553	3,201	0,166	0,009	0,007	0,005	0,014	0,043	1,271	2,108	0,118	0,017	0,019	0,022	0,014	7,609
1,75	0,017	0,21	1,218	0,044	0,002	0	0,002	0,01	0,015	0,657	1,208	0,062	0,014	0,012	0,009	0,01	3,491
2	0,009	0,231	1,109	0,046	0,005	0	0,005	0,007	0,01	0,736	1,624	0,043	0,027	0,029	0,014	0,014	3,915
2,25	0,005	0,135	0,382	0,002	0	0	0	0,005	0,003	0,313	0,684	0,017	0	0,012	0,005	0,007	1,572
2,5	0	0,115	0,385	0,002	0	0	0	0,002	0,003	0,351	0,905	0,014	0,005	0	0,003	0	1,788
2,75	0	0,048	0,099	0	0	0	0	0	0	0,139	0,436	0,005	0,002	0	0	0,002	0,731
3	0	0,086	0,118	0	0	0	0	0	0	0,151	0,481	0,003	0,005	0	0	0	0,844
3,25	0	0,031	0,029	0	0	0	0	0	0	0,055	0,212	0	0,003	0	0	0	0,33
3,5	0	0,009	0,031	0	0	0	0	0	0	0,038	0,187	0	0,007	0	0	0	0,27
3,75	0	0,009	0,009	0	0	0	0	0	0	0,017	0,075	0	0,002	0	0	0	0,111
4	0	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0,041	0,087	0	0,002	0	0	0	0,151
4,25	0	0,002	0,003	0	0	0	0	0	0	0,026	0,048	0	0	0	0	0	0,079
4,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,024	0,039	0	0	0	0	0	0,063
4,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,022	0,017	0	0	0	0	0	0,039
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,002	0	0	0	0	0	0,012
5,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,005	0	0	0	0	0	0,007
5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0	0	0	0	0	0	0,003
5,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total																	
(%)	0,187	0,419	5,508	32,4	13,07	3,145	1,993	1,709	2,242	3,877	17,19	16,43	0,924	0,286	0,245	0,246	100

Tabla 30: Hs-Ø

Ø	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	Total (%)
1	0,01	0,021	0,056	0,068	0,034	0,041	0,05	0,089	0,116	0,091	0,019	0	0,002	0,002	0,007	0	0,606
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,038	0,198	0,501	0,233	0,044	0,027	0,038	0,096	0,234	0,505	0,207	0,024	0,003	0,007	0,007	0,009	2,188
4	0,065	0,695	3,196	1,177	0,322	0,19	0,163	0,243	0,619	1,764	1,353	0,135	0,021	0,024	0,031	0,019	10,04
5	0,07	1,176	6,208	2,912	0,71	0,394	0,366	0,594	1,162	4,042	2,692	0,231	0,053	0,067	0,077	0,034	20,85
6	0,08	1,499	9,572	4,305	0,897	0,568	0,527	0,626	0,999	5,713	5,003	0,27	0,086	0,062	0,038	0,027	30,3
7	0,065	0,83	7,282	2,384	0,537	0,392	0,248	0,33	0,436	3,415	4,543	0,171	0,068	0,062	0,062	0,022	20,88
8	0,043	0,63	3,485	1,266	0,402	0,236	0,2	0,156	0,21	1,275	2,094	0,08	0,026	0,015	0,012	0,01	10,16
9	0,029	0,308	1,259	0,399	0,079	0,06	0,038	0,034	0,033	0,231	0,412	0,009	0,017	0,005	0,005	0,01	2,934
10	0,014	0,125	0,524	0,154	0,05	0,036	0,031	0,033	0,021	0,055	0,063	0,002	0,005	0	0	0,002	1,114
11	0,002	0,015	0,216	0,12	0,029	0,024	0,017	0,019	0,014	0,039	0,012	0	0	0	0,003	0	0,51
12	0,002	0,007	0,063	0,024	0,021	0,017	0,022	0,012	0,021	0,027	0,021	0	0,002	0	0	0	0,238
13	0,002	0,002	0,012	0,007	0,003	0,003	0,005	0,002	0,003	0,007	0,005	0	0	0,002	0	0	0,053
14	0	0	0,007	0,002	0,002	0	0	0	0,003	0,005	0,003	0	0,002	0	0	0	0,024
15	0	0,003	0,012	0,015	0,01	0,003	0,005	0,007	0,003	0,009	0,005	0,002	0,002	0	0	0	0,079
16	0	0	0,002	0	0,002	0	0	0,002	0,002	0,007	0	0	0	0	0	0	0,014
17	0	0	0	0	0,003	0,002	0	0	0	0,003	0	0	0	0	0	0	0,009
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0	0,003
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,002	0,005
Total																	
(%)	0,187	0,419	5,508	32,4	13,07	3,145	1,993	1,709	2,242	3,877	17,19	16,43	0,924	0,286	0,245	0,246	100

Tabla 31: $T_p-\theta$

f) Rosa del oleaje

Por último, a modo resumen, se muestra la rosa de oleaje que muestra la probabilidad de ocurrencia de la altura de ola para cada dirección.

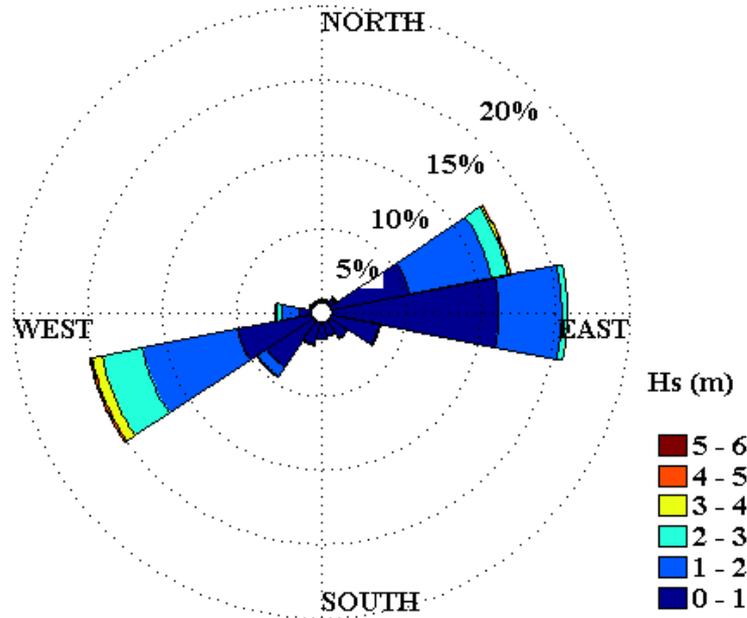


Figura 34: Rosa del oleaje

24.2.2. RÉGIMEN MEDIO ANUAL DE ALTURA DE OLA EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS

En este apartado del análisis del clima marítimo, se obtiene el régimen medio anual en profundidades indefinidas para H_s , considerando todas las direcciones. Después, se calcula de nuevo para las dos predominantes.

Los regímenes medios de altura de ola, se ajustan a la distribución de probabilidad de Weibull, cuya función de densidad viene dada por:

$$Y = f(x|a, b) = (ba^{-b}) * (x^{b-1}) * e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} I_{(0, \infty)}(x)$$

En la siguiente tabla, se muestran los parámetros de ajuste de Weibull:

	a	b
Escalar	1.1116	1.5888
Dirección E	0.9245	1.9561
Dirección WSW	1.6339	1.9029

Tabla 32: Parámetros de ajuste de los regímenes medios direccionales y escalar de altura de ola obtenidos según Weibull.

a) Régimen medio escalar

Se representa el histograma de frecuencias junto con su función de densidad, que nos indica la probabilidad de ocurrencia de Hs:

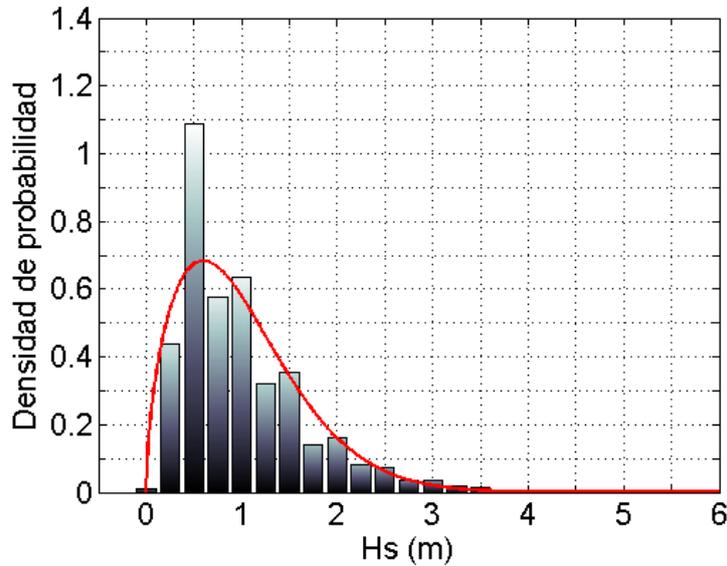


Figura 35: Función de densidad escalar de Hs en régimen medio.

En la siguiente figura, tenemos el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que nos indica la probabilidad de no excedencia de Hs.

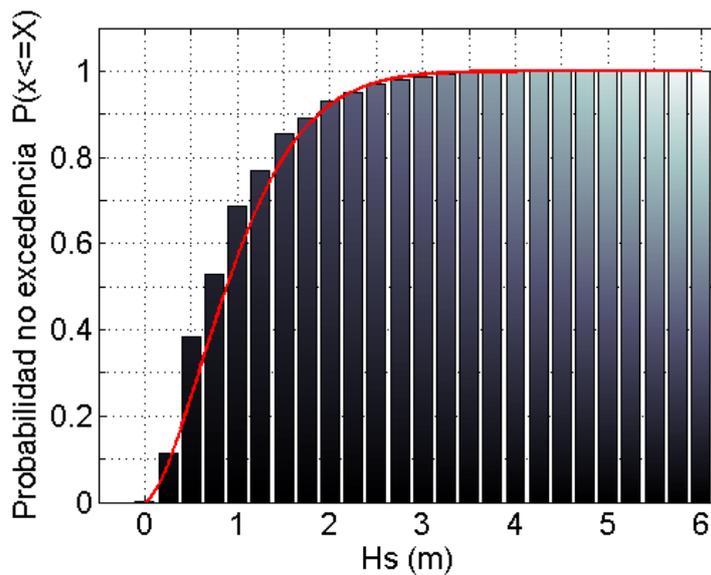


Figura 36: Función de distribución escalar de Hs en régimen medio.

Por último, se representa en papel probabilístico normal la función de distribución escalar:

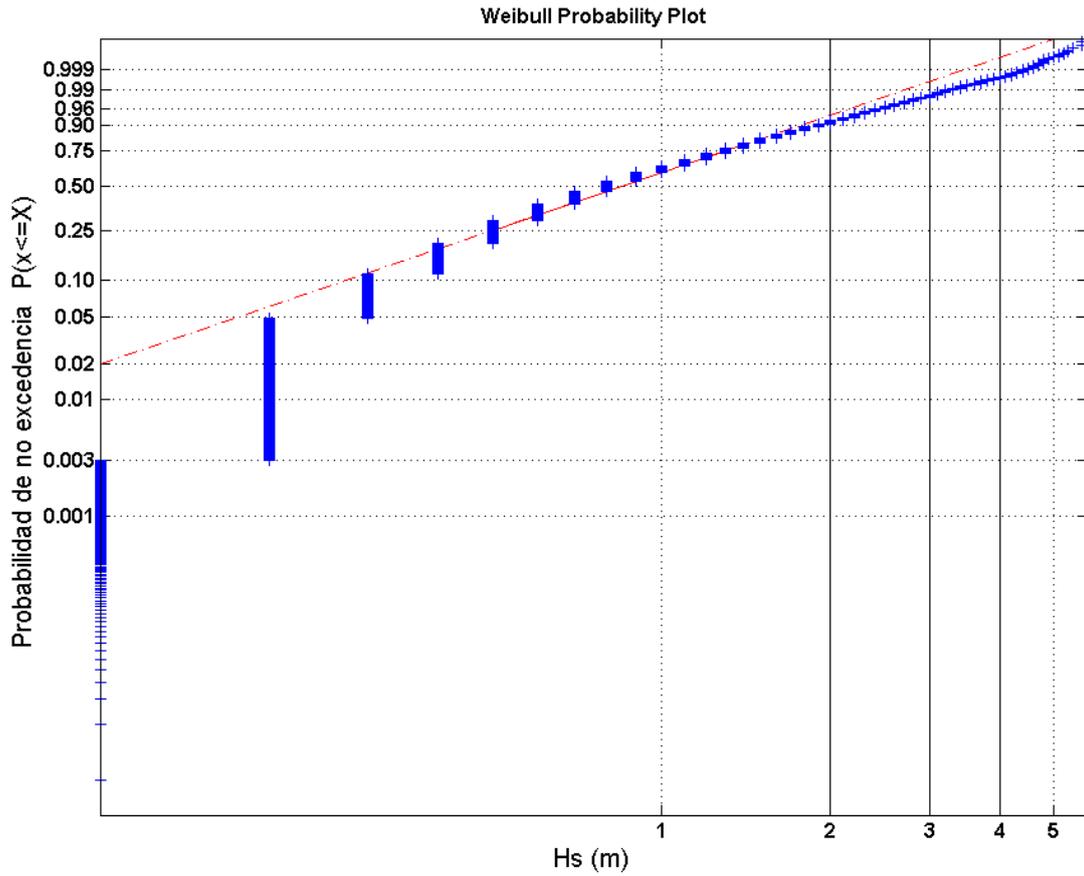


Figura 37: Ajuste de la altura de ola en papel probabilístico.

b) Régimen medio direccional Este

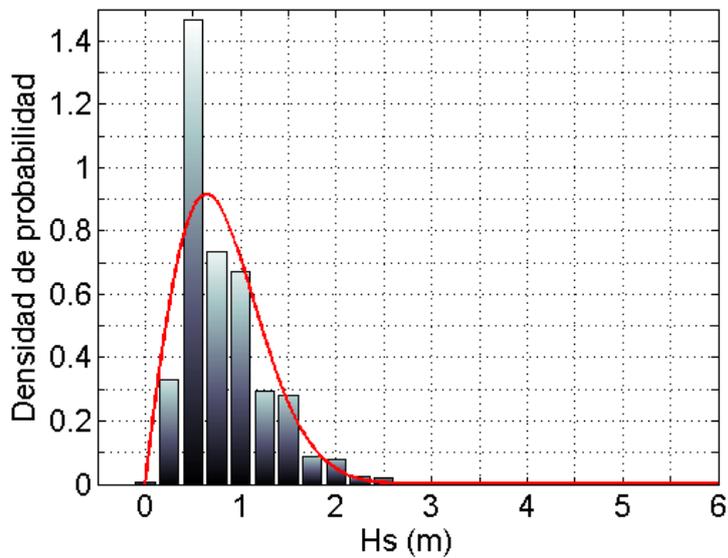


Figura 38: Función de densidad direccional de H_s en régimen medio, E.

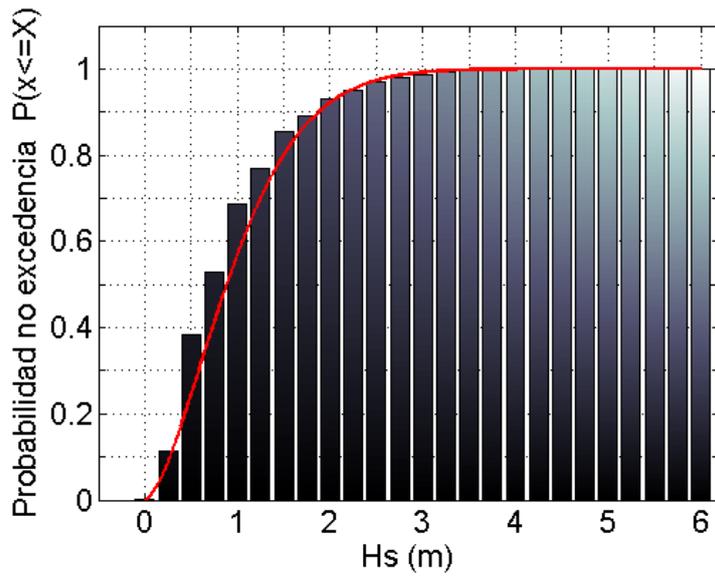


Figura 39: Función de distribución de Hs en régimen medio, E.

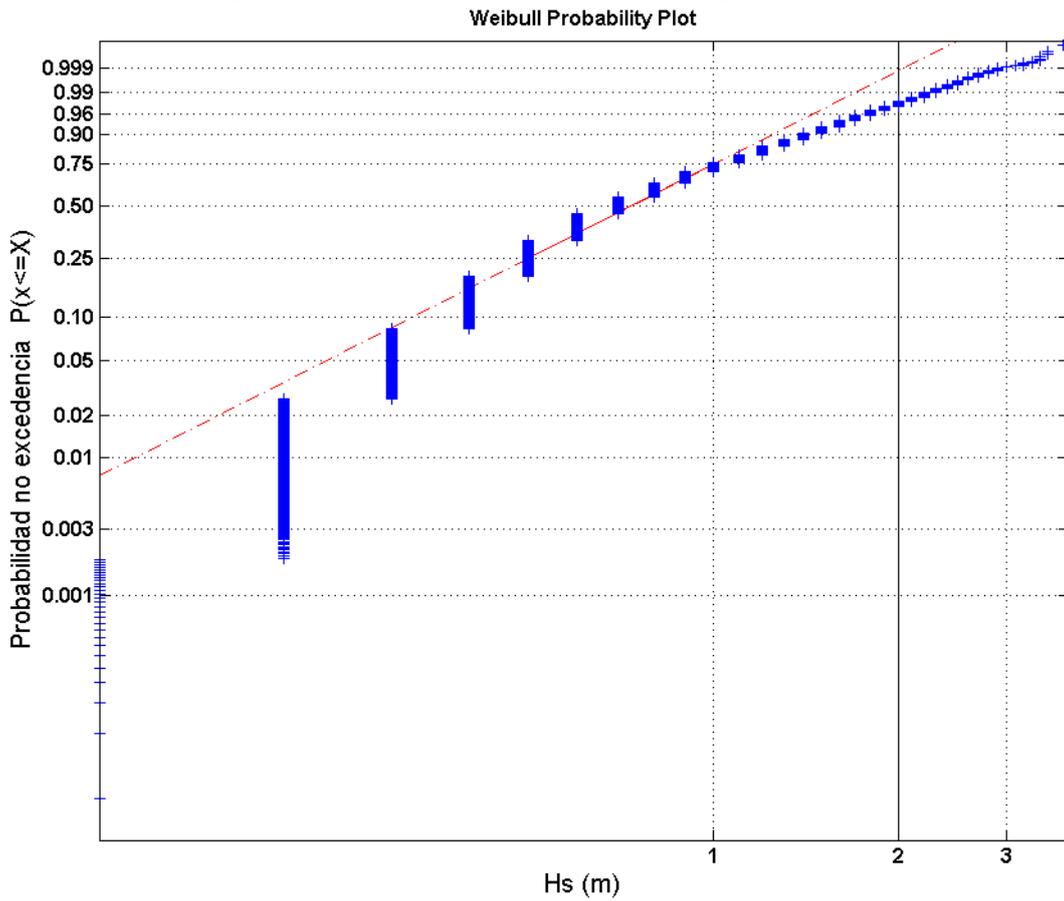


Figura 40: Ajuste de la altura de ola en papel probabilístico

c) Régimen medio direccional WSW

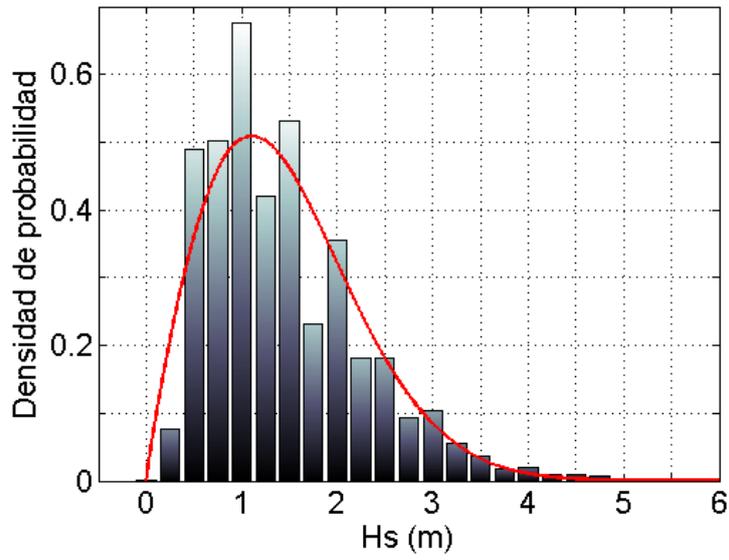


Figura 41: Función de densidad direccional de Hs en régimen medio, WSW.

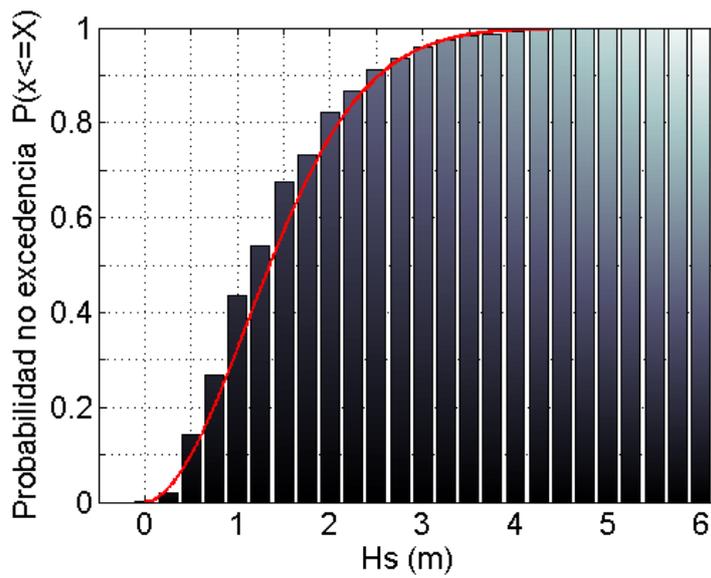


Figura 42: Función de distribución de Hs en régimen medio, WSW.

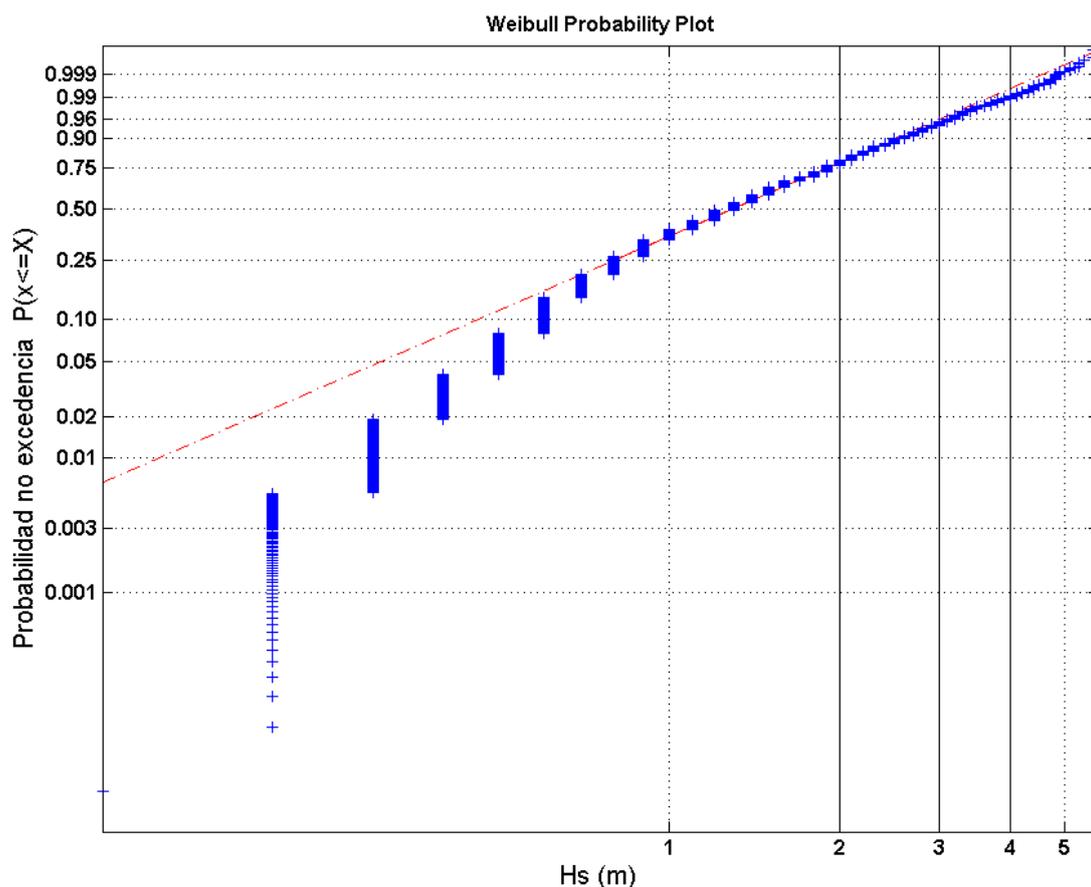


Figura 43: Ajuste de la altura de ola en papel probabilístico.

d) Resumen de los resultados

	Hs (metros)	
	Prob. de no excedencia 50%	Prob. de no excedencia 85%
Escarlar	1	1.75
Direccional E	0.75	1.25
Direccional	1.25	2.25
WSW		

Tabla 33: Resultados Régimen Medio

24.2.3. RÉGIMEN EXTREMAL DE ALTURA DE OLA EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS

Para analizar el régimen extremal, se ha usado el método POT (Peaks Over Threshold). Se ha fijado la altura de ola umbral correspondiente a 3 metros. A la hora de garantizar la independencia estadística entre temporales se ha supuesto una duración mínima entre temporales mayor a 36 horas.

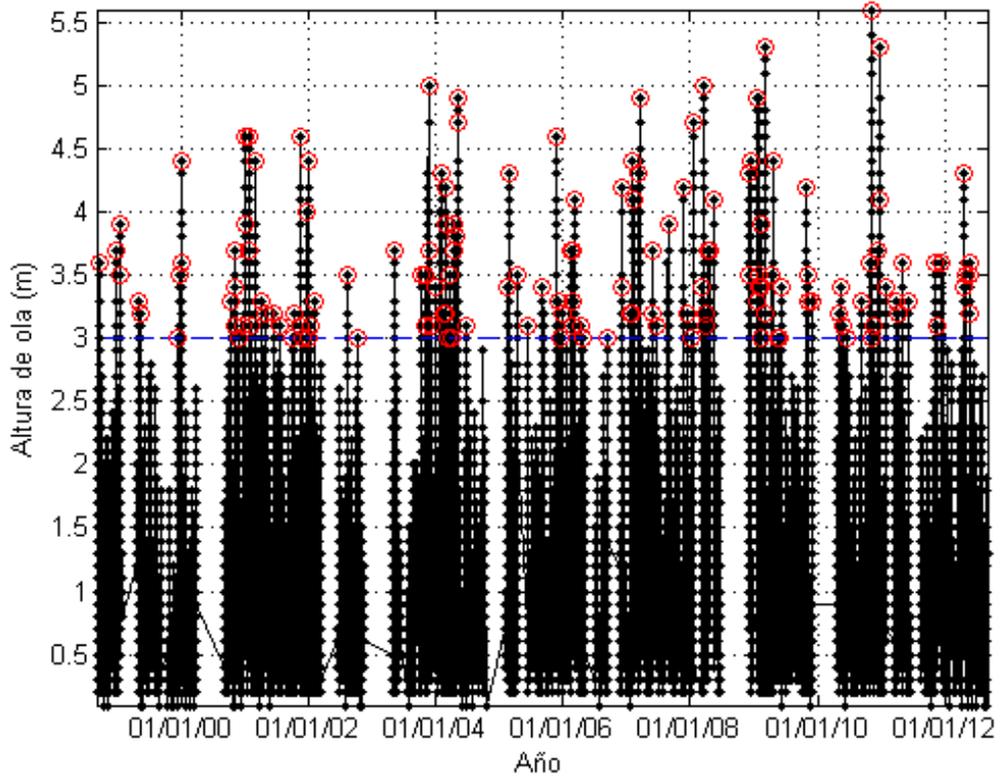


Figura 44: Gráfica de picos de altura de ola sobre umbral.

Para caracterizar el régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de valores extremos generalizada representativa del régimen:

$$Y = f(x|k, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} * \exp\left(-\left(1 + k * \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k * \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}}$$

μ, σ son los parámetros de localización y escala, y k es el parámetro de forma. Según sea el valor de k , tendremos un tipo de distribución u otra:

- Tipo I ($k=0$, Gumbel)
- Tipo II ($k>0$, Frechet)
- Tipo III ($k<0$, Weibull)

En la siguiente tabla, se resumen los parámetros de ajuste para el Régimen Extremal:

	k	σ	μ	Tipo de distribución	Número de eventos
Régimen extremal escalar	0.3962	0.3150	3.2880	Frechet	150
Dirección ENE	0.1672	0.3178	3.2740	Frechet	17
Dirección WSW	0.3923	0.3270	3.3160	Frechet	72

Tabla 34: Parámetros de ajuste

A continuación, se representan la función de densidad escalar y la de distribución acumulada:

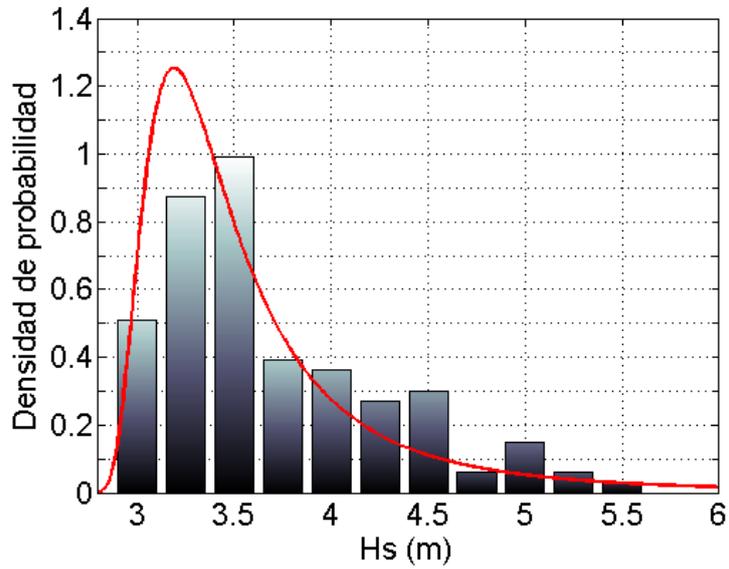


Figura 45: Función de densidad escalar de Hs en régimen extremal.

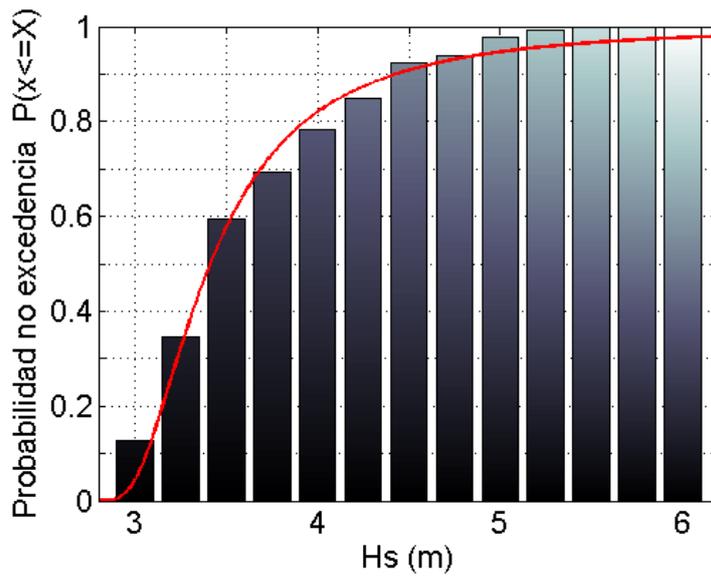


Figura 46: Función de distribución acumulada de Hs en régimen extremal.

a) Dirección ENE

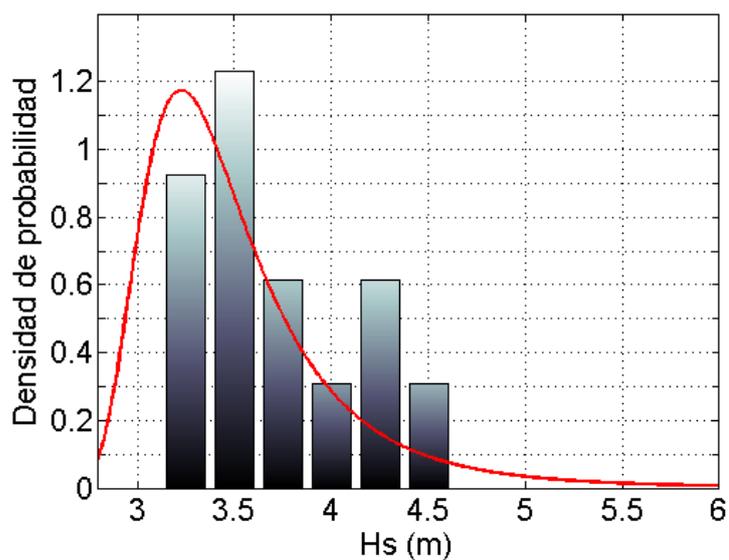


Figura 47: Función de densidad de Hs en régimen extremal, ENE.

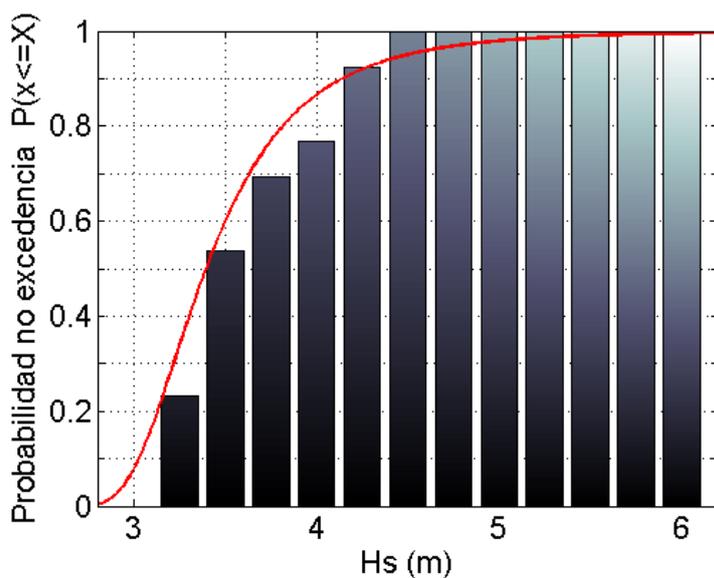


Figura 48: Función de distribución acumulada de Hs en régimen extremal, ENE.

b) Dirección WSW

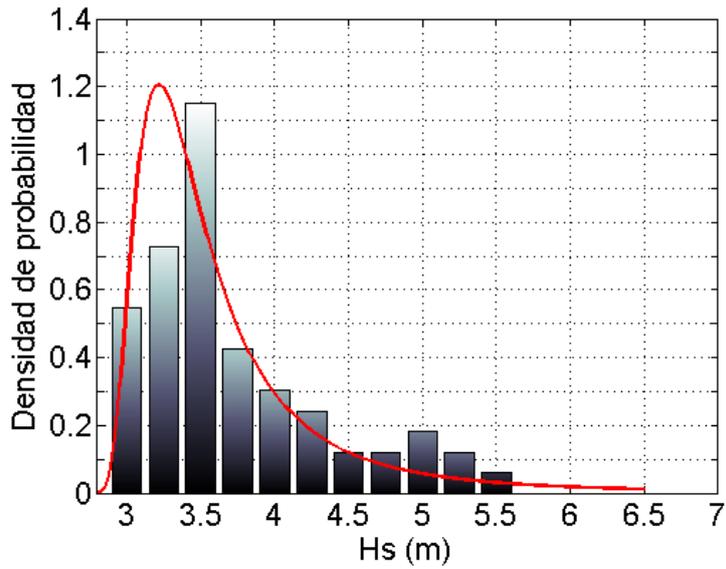


Figura 49: Función de densidad de Hs en régimen extremal, WSW.

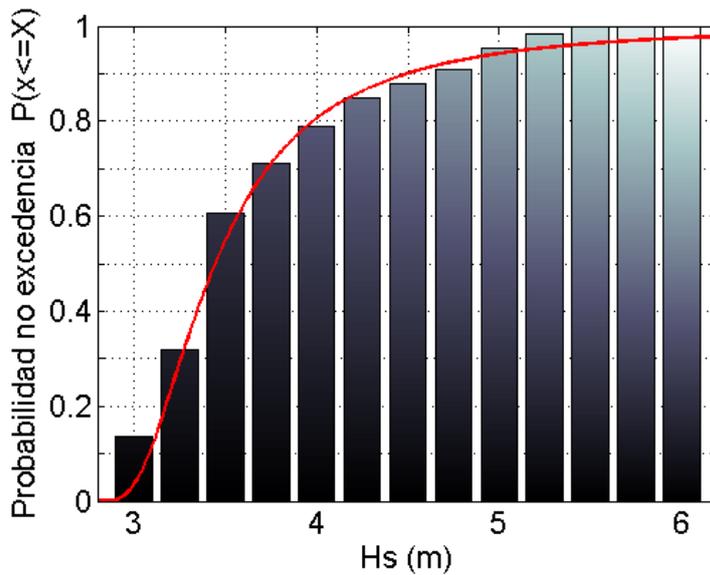


Figura 50: Función de distribución acumulada de Hs en régimen extremal, WSW.

24.3. VIENTO

24.3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL VIENTO

Se realiza, al igual que con el oleaje, una descripción general de las características del viento en profundidades indefinidas en la zona.

a) Histograma de velocidad del viento y tabla de frecuencias

En este primer histograma se representa el rango de velocidades del viento registradas por la Boya, divididas en intervalos de 1m/s y la frecuencia de ocurrencia de cada intervalo:

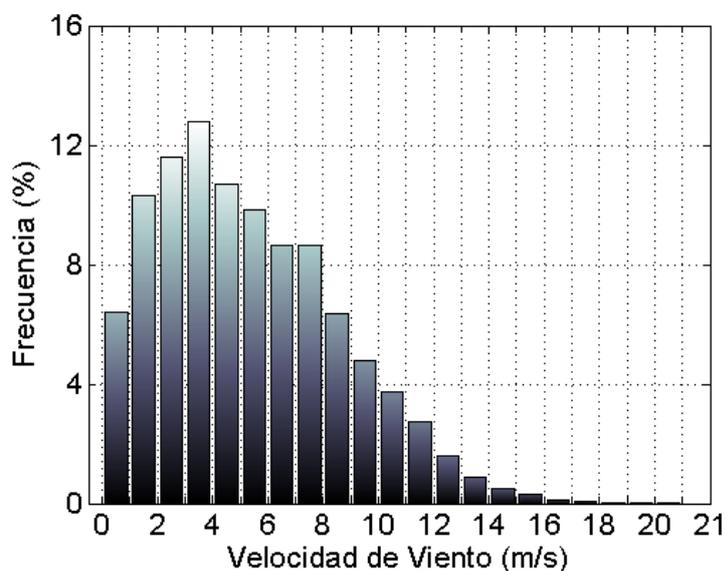


Figura 51: Histograma de velocidad del viento (m/s)

Vv(m/s)	Fr (%)
0-1	6,42660635
1-2	10,3136272
2-3	11,6109311
3-4	12,7712906
4-5	10,6694382
5-6	9,81475821
6-7	8,62016262
7-8	8,65317601
8-9	6,35813413
9-10	4,79916855
10-11	3,74763098
11-12	2,73032952
12-13	1,58953353
13-14	0,87057529
14-15	0,51231888
15-16	0,30812496
16-17	0,13327627
17-18	0,05135416
18-19	0,01711805
19-20	0,00122272
20-21	0,00122272

Tabla 35: Probabilidades de ocurrencia de Vv (m/s)

Vemos que el rango de velocidades va desde los 0m a los 21 metros por segundo. El intervalo de velocidad más frecuente es el de 3-4 metros por segundo.

b) Histograma de dirección del viento y frecuencias.

Se muestra, a continuación, el histograma correspondiente a la dirección media del viento, dividido en sectores direccionales de 22.5° de amplitud, junto con sus frecuencias:

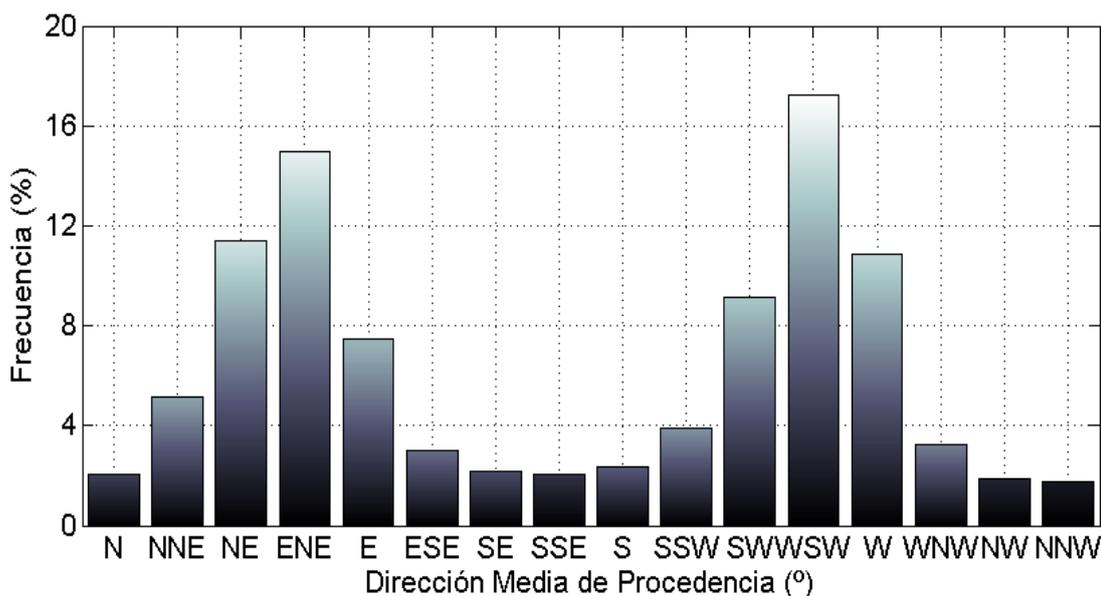


Figura 52: Histograma de dirección media del viento (°).

Dirección Vv	Sector	Porcentaje tiempo %
N	$348.75^\circ < \Theta \leq 11.25^\circ$	2,08326002
NNE	$11.25^\circ < \Theta \leq 33.75^\circ$	5,169440828
NE	$33.75^\circ < \Theta \leq 56.25^\circ$	11,39810677
ENE	$56.25^\circ < \Theta \leq 78.75^\circ$	14,94879825
E	$78.75^\circ < \Theta \leq 101.25^\circ$	7,468534093
ESE	$101.25^\circ < \Theta \leq 123.75^\circ$	3,027530469
SE	$123.75^\circ < \Theta \leq 146.25^\circ$	2,163024481
SSE	$146.25^\circ < \Theta \leq 168.75^\circ$	2,072702959
S	$168.75^\circ < \Theta \leq 191.25^\circ$	2,349532557
SSW	$191.25^\circ < \Theta \leq 213.75^\circ$	3,88382541
SW	$213.75^\circ < \Theta \leq 236.25^\circ$	9,141241745
WSW	$236.25^\circ < \Theta \leq 258.75^\circ$	17,25141054
W	$258.75^\circ < \Theta \leq 281.25^\circ$	10,87963778
WNW	$281.25^\circ < \Theta \leq 303.75^\circ$	3,225768613
NW	$303.75^\circ < \Theta \leq 326.25^\circ$	1,862734748
NNW	$326.25^\circ < \Theta \leq 348.75^\circ$	1,755991132

Tabla 36: Frecuencias de las direcciones.

De todo esto se deriva que las dos direcciones predominantes son: ENE y la WSW

c) Gráfico de dispersión entre Vv y Θ y tabla de frecuencias

En este gráfico se puede observar la probabilidad conjunta de la velocidad y la dirección del viento.

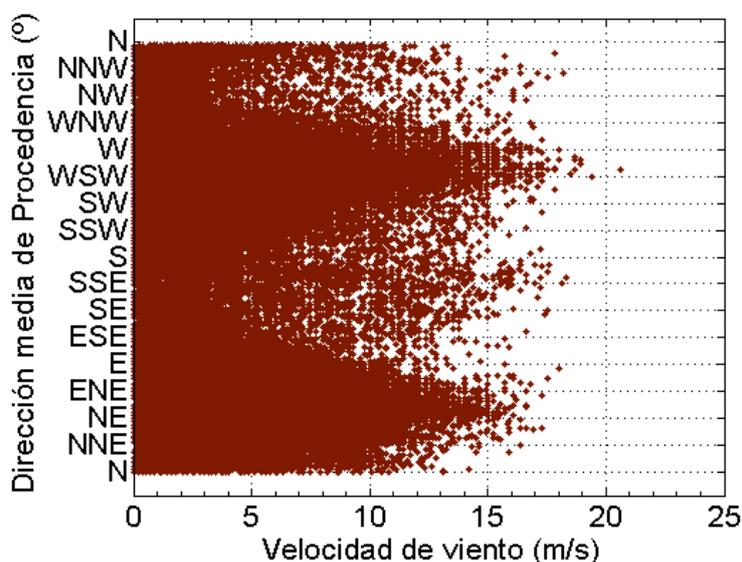


Figura 53: Gráfico de dispersión Vv-Θ

Así como la tabla que expresa numéricamente el gráfico anteriormente mostrado:

Vv/ Θ	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	Total (%)
1	0,353	0,406	0,378	0,416	0,306	0,316	0,312	0,391	0,391	0,597	0,532	0,541	0,365	0,326	0,384	0,187	6,402
2	0,63	0,687	0,683	0,621	0,488	0,454	0,401	0,553	0,704	1,068	1,029	0,872	0,503	0,503	0,492	0,305	10,32
3	0,634	0,88	0,897	0,919	0,482	0,35	0,335	0,461	0,888	1,508	1,404	0,93	0,416	0,306	0,386	0,346	11,57
4	0,674	1,236	1,288	0,926	0,338	0,212	0,202	0,385	0,906	2,186	2,01	0,988	0,247	0,161	0,291	0,33	12,8
5	0,52	1,381	1,405	0,71	0,153	0,12	0,128	0,209	0,699	1,836	1,777	0,64	0,135	0,09	0,185	0,258	10,56
6	0,547	1,62	1,575	0,553	0,09	0,12	0,113	0,154	0,478	1,791	1,646	0,49	0,1	0,058	0,122	0,128	9,76
7	0,539	1,736	1,422	0,355	0,079	0,111	0,118	0,139	0,376	1,393	1,427	0,436	0,08	0,048	0,076	0,115	8,593
8	0,605	2,268	1,432	0,25	0,064	0,082	0,093	0,094	0,254	1,252	1,458	0,528	0,073	0,045	0,065	0,065	8,731
9	0,525	1,753	0,791	0,12	0,065	0,077	0,088	0,08	0,164	0,844	1,14	0,368	0,043	0,038	0,058	0,069	6,341
10	0,39	1,407	0,492	0,046	0,043	0,046	0,071	0,06	0,093	0,61	1,034	0,336	0,043	0,022	0,058	0,037	4,868
11	0,377	1,201	0,313	0,047	0,047	0,071	0,05	0,058	0,072	0,374	0,81	0,229	0,03	0,029	0,042	0,031	3,822
12	0,194	0,841	0,183	0,027	0,048	0,056	0,042	0,027	0,047	0,336	0,695	0,181	0,027	0,014	0,025	0,022	2,789
13	0,086	0,351	0,069	0,018	0,035	0,048	0,043	0,035	0,033	0,209	0,454	0,126	0,012	0,014	0,017	0,01	1,572
14	0,041	0,175	0,016	0,005	0,022	0,025	0,035	0,027	0,033	0,1	0,263	0,058	0,014	0,016	0,008	0,001	0,848
15	0,022	0,103	0,014	0,005	0,007	0,026	0,026	0,01	0,018	0,068	0,149	0,042	0,007	0,004	0	0,001	0,508
16	0,018	0,038	0,009	0,007	0,005	0,009	0,026	0,003	0,012	0,029	0,093	0,038	0,007	0,01	0,001	0	0,306
17	0,005	0,01	0,008	0	0,001	0,004	0,012	0,001	0,001	0,02	0,039	0,018	0,003	0,008	0,001	0	0,134
18	0,001	0,001	0,001	0	0,001	0,004	0,008	0,001	0,001	0,005	0,022	0,003	0	0,003	0,001	0	0,054
19	0	0	0,001	0	0	0	0,003	0	0	0	0,012	0,001	0	0,001	0	0	0,018
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0,001
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0	0	0	0	0,001
Total (%)	2,395	6,163	16,09	10,98	5,025	2,277	2,133	2,104	2,69	5,17	14,23	16	6,824	2,105	1,697	2,211	100

Tabla 37: Vv- Θ

d) Rosa del viento

Por último, se representa la rosa del viento que nos indica la probabilidad de ocurrencia de la velocidad según cada dirección.

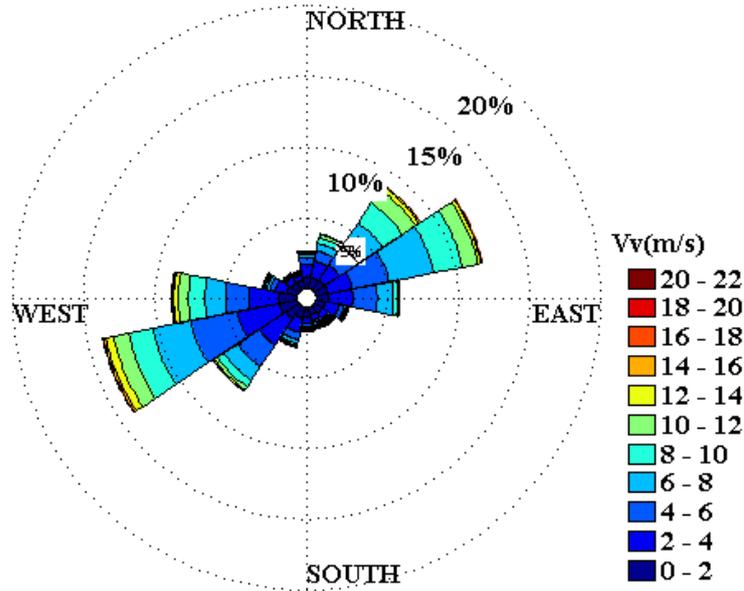


Figura 54: Rosa del viento.

Se distingue claramente la dirección principal WSW.

24.3.2. RÉGIMEN MEDIO ANUAL DE VELOCIDAD DE VIENTO EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS

Se obtiene el Régimen medio anual de la velocidad del viento en profundidades indefinidas considerando todas las direcciones. Después se calcula para las dos predominantes.

De la misma manera que con el oleaje, los regímenes medios de velocidad se ajustan a la distribución de Weibull cuya función de densidad viene dada por:

$$Y = f(x|a, b) = (ba^{-b}) * (x^{b-1}) * e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} I_{(0,\infty)}(x)$$

La tabla con los parámetros de ajustes es la siguiente:

	a	b
Escalar	5.9371	1.6451
Dirección ENE	7.1777	2.3210
Dirección WSW	6.7839	1.8886

Tabla 38: Parámetros de ajuste

a) Régimen medio escalar

Se representa el histograma de frecuencias con la función de densidad, así como el histograma de frecuencias acumuladas con la función de distribución.

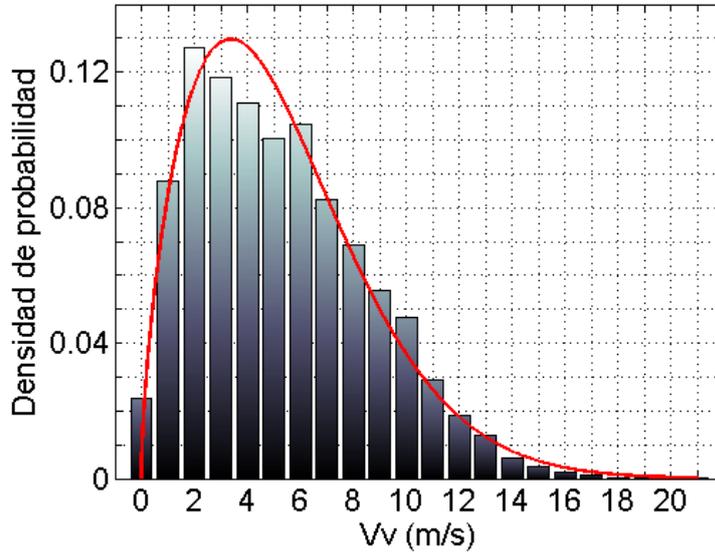


Figura 55: Función de densidad escalar de V_v en régimen medio.

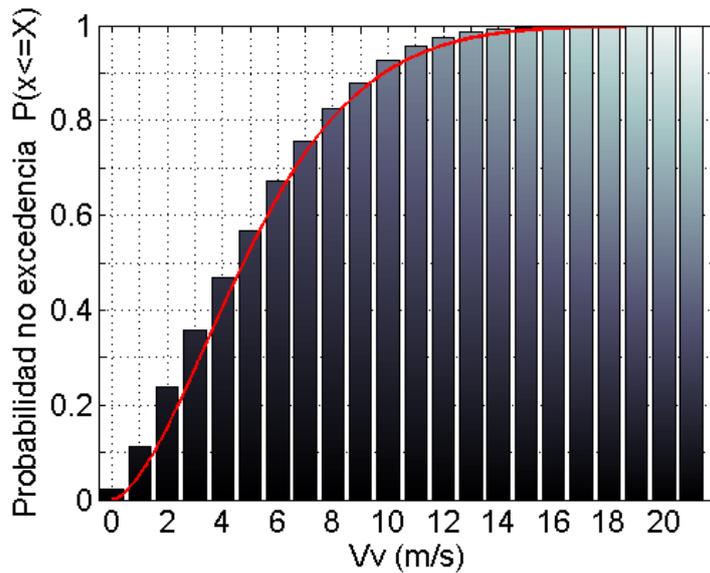


Figura 56: Función de distribución acumulada de V_v en régimen medio.

b) Régimen medio según ENE

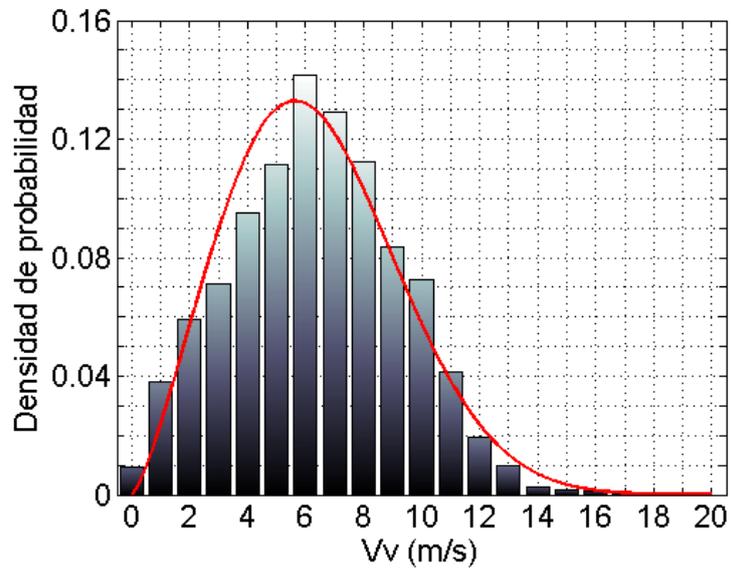


Figura 57: Función de densidad de V_v en régimen medio, ENE.

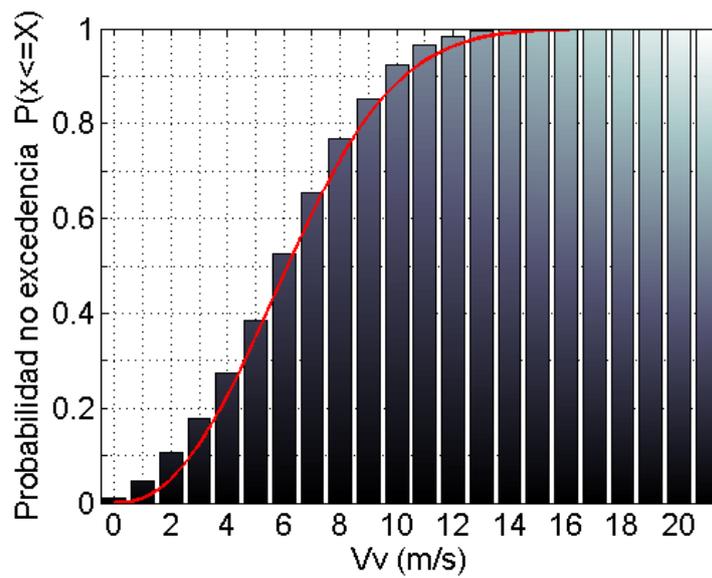


Figura 58: Función de distribución acumulada de V_v en régimen medio, ENE.

c) Régimen medio según WSW

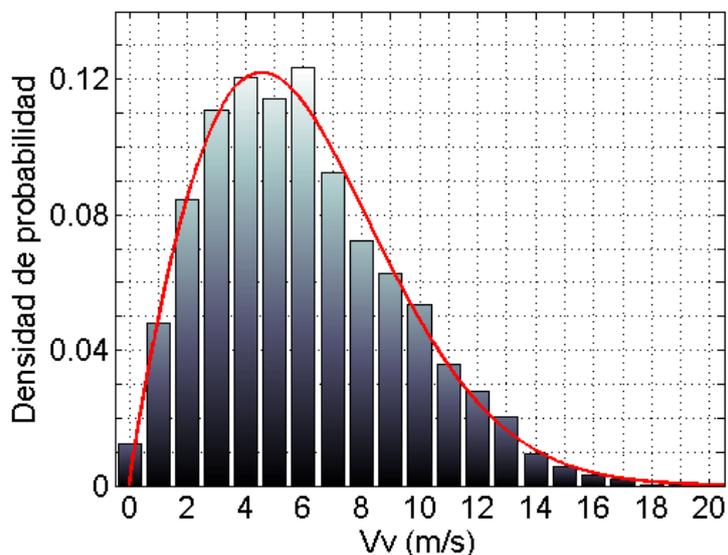


Figura 59: Función de densidad de Vv en régimen medio, WSW.

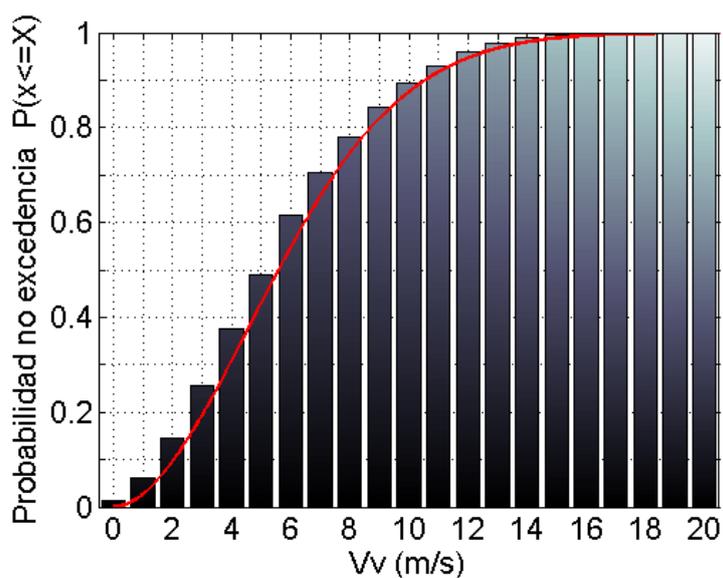


Figura 60: Función de distribución acumulada de Vv en régimen medio, WSW.

d) RESUMEN DE RESULTADOS

	Vv (m/s)	
	Prob. de no excedencia 50%	Prob. de no excedencia 85%
Escalar	5	9
Direccional ENE	6	10
Direccional WSW	6	9

Tabla 39: Resultados Régimen Extremal

24.3.3. RÉGIMEN EXTREMAL DE VELOCIDAD DE VIENTO EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS

Se procede de igual manera que se hizo con el oleaje. Se trata de obtener el régimen de temporales en profundidades indefinidas, mediante el método POT (Picos Sobre Umbral). El umbral de velocidad de viento fijado es de 12m/s. Igualmente, para garantizar la independencia estadística se establece una duración mínima entre temporales de 36 horas.

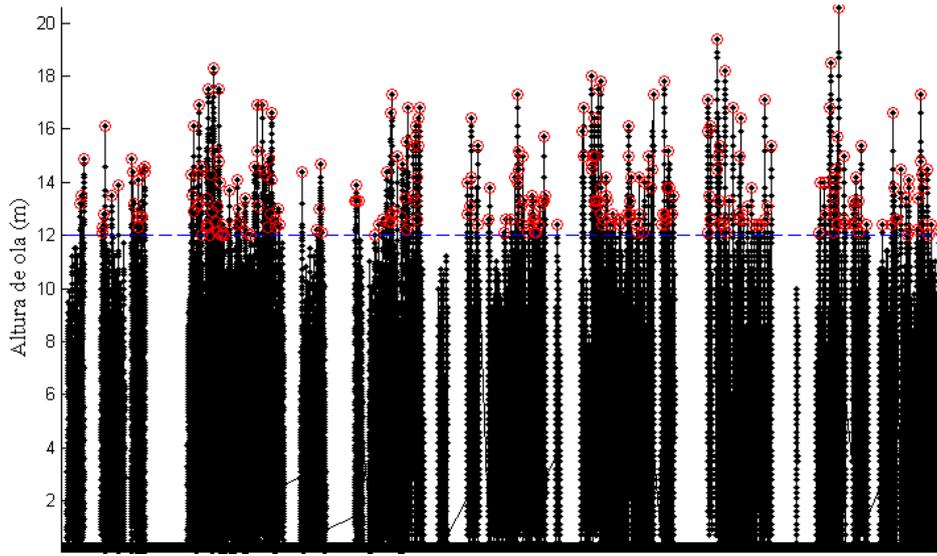


Figura 61: Gráfica de picos de velocidad sobre umbral.

Para caracterizar el régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de valores extremos generalizada representativa del régimen:

$$Y = f(x|k, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} * \exp\left(-\left(1 + k * \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k * \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}}$$

En la siguiente tabla, se resumen los parámetros de ajuste para el Régimen Extremal:

	k	σ	μ	Tipo de distribución	Número de eventos
Régimen extremal escalar	0.4338	0.8652	12.8662	Frechet	295
Dirección ENE	0.5408	0.4633	12.4235	Frechet	39
Dirección WSW	0.3967	0.9898	13.1319	Frechet	72

Tabla 40: Parámetros de ajuste

a) Régimen escalar

A continuación, se representan la función de densidad escalar y la de distribución acumulada:

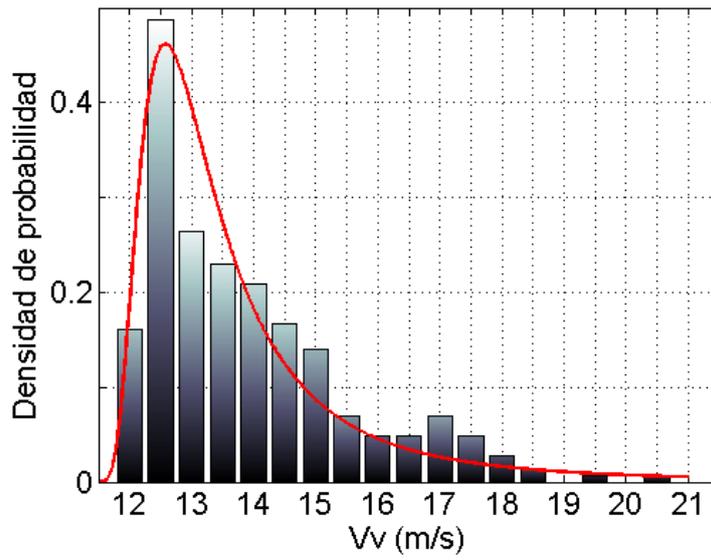


Figura 62: Función de densidad escalar de Vv en régimen extremal.

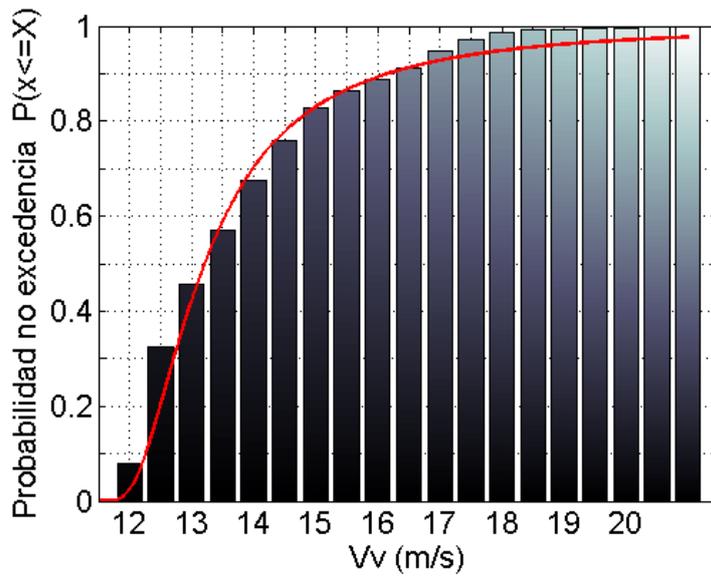


Figura 63: Función de distribución acumulada de Vv en régimen extremal.

b) Dirección ENE

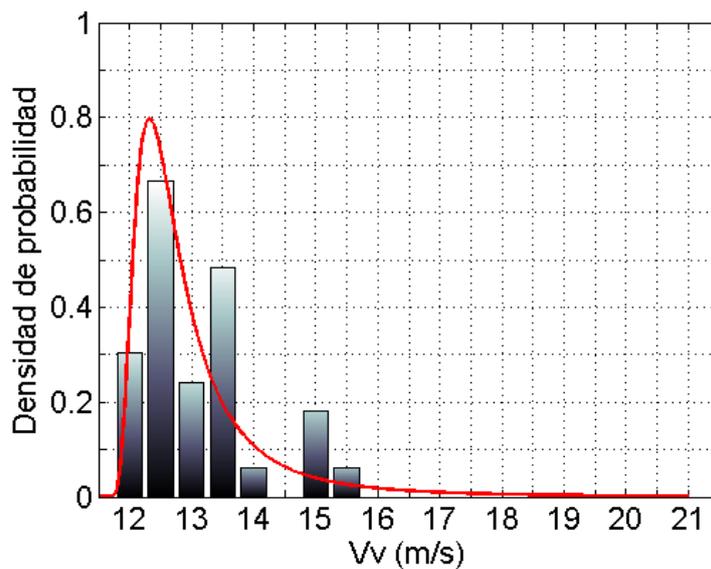


Figura 64: Función de densidad de V_v en régimen extremal, ENE.

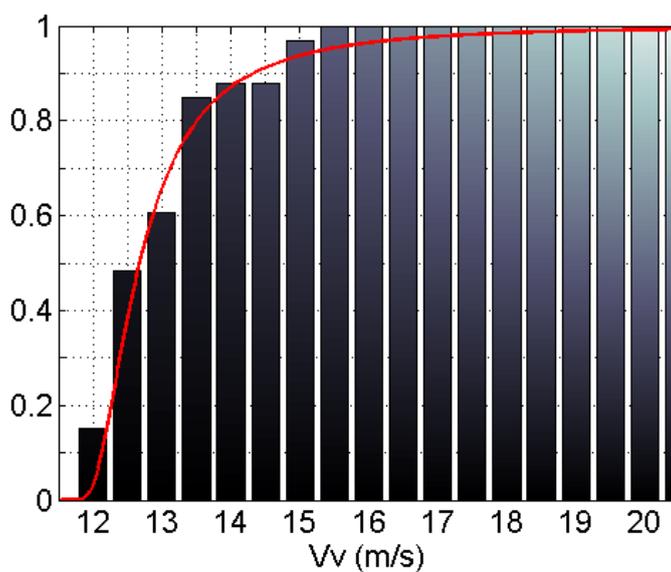


Figura 65: Función de distribución acumulada de V_v en régimen extremal, ENE.

c) Dirección WSW

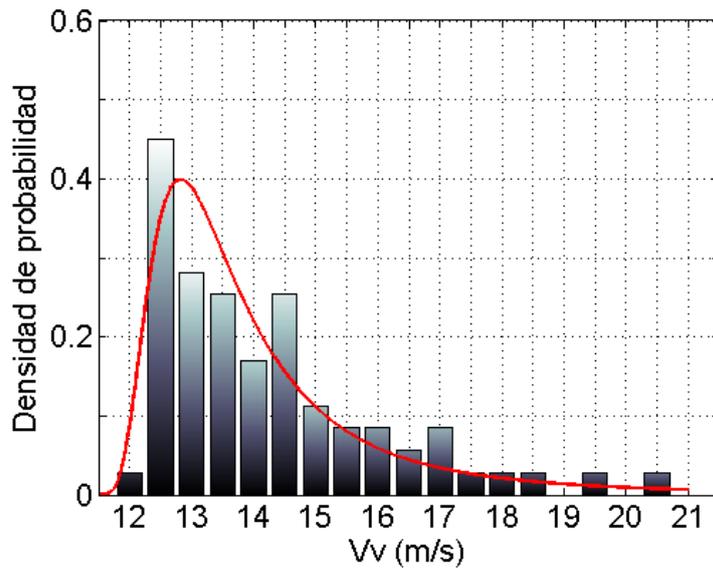


Figura 66: Función de densidad de V_v en régimen extremal, WSW.

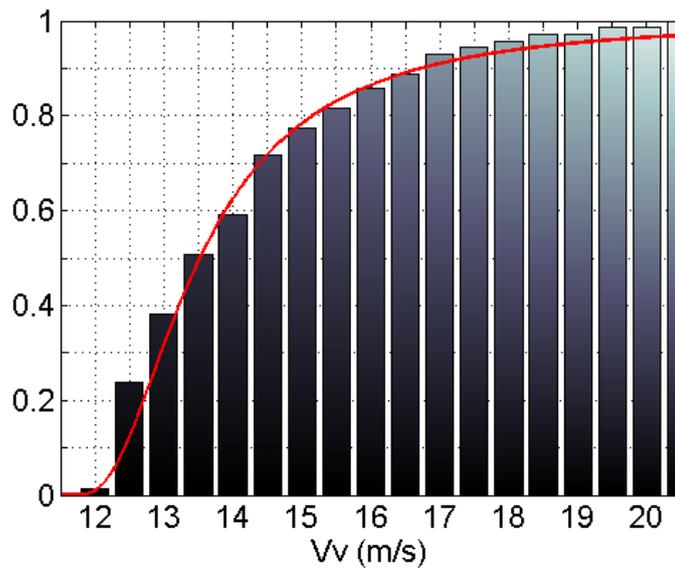


Figura 67: Función de distribución acumulada de V_v en régimen extremal, WSW.

25. MODELADO NUMÉRICO. DELFT3D

A la hora de estudiar la hidrodinámica de la playa de San José, se ha empleado el modelo numérico de propagación del oleaje Delft3D, que consta de dos módulos: WAVE y FLOW.

25.1. DATOS DE PARTIDA

25.1.1. DATOS DEL OLEAJE

Analizados los datos de la Boya de Cabo de Gata para el estudio del clima marítimo, se pueden elegir los datos de altura de ola significativa, viento, período, marea, etc., más frecuentes tanto en Régimen Medio como Extremal y utilizarlos en el programa para propagarlos en ambas direcciones principales.

25.1.2. BATIMETRÍA

La batimetría fue completada con el programa AutoCAD utilizando herramientas como la polilínea, para trazar aquellas líneas batimétricas que faltaran e introducirles sus respectivas profundidades. Con la batimetría finalizada, se procedió a pasar el archivo de AutoCAD, a un archivo de texto en el que vienen definidos los puntos de cada polilínea, con sus coordenadas x, y, z. Finalmente, mediante el programa Matlab se prepararon los archivos en formato de texto de la parte de mar, de la línea de costa y de la parte de tierra en el contorno de la playa para que pudieran ser leídos por el Delft3D.

25.2. MALLA

Con la batimetría completa, el siguiente paso es el de realizar la malla, en la que se van a propagar los datos de la boya.

25.2.1. ESCENARIO INICIAL

La malla utilizada para estudiar las condiciones hidrodinámicas del escenario inicial, sin las estructuras implantadas, es la siguiente:

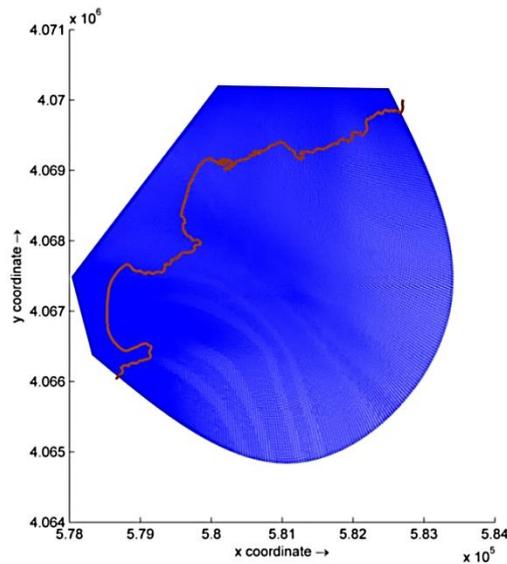


Figura 68: Malla base

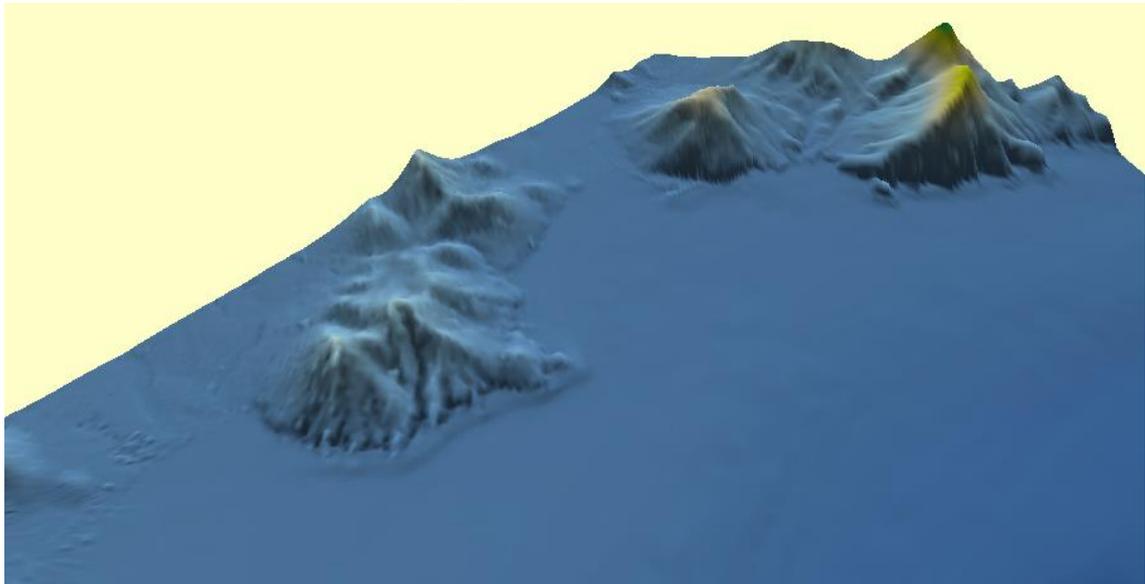


Figura 69: Perspectiva de la batimetría.

Se puede observar, como en la parte del mar, la malla tiene un contorno curvilíneo, para que al propagar, no coja un único punto como foco de propagación.

25.2.2. ALTERNATIVA 1

A la hora de que el programa note la presencia de los módulos en la playa, se ha refinado la malla base del escenario inicial en la zona donde se ubican, de manera que cada celda en esta parte tenga una extensión de 2x2 y abarque exclusivamente a cada módulo. A continuación, se modificaron las profundidades de dichas celdas, reduciéndolas en los dos metros correspondientes a la altura de los módulos. La malla resultante fue la siguiente:

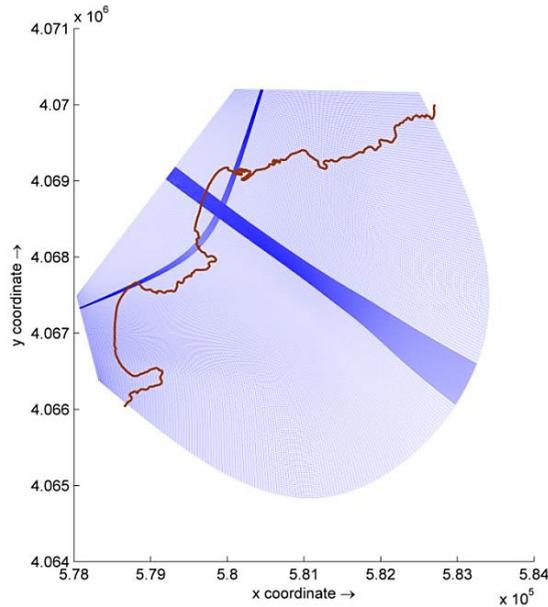


Figura 70: Malla de las alternativas 1,2 y 3

25.2.3. ALTERNATIVAS 2 Y 3

De la misma manera, se procedió con la segunda y tercera alternativa. La malla utilizada es la misma que en el caso anterior y solo cambia la extensión *.dep* en la que se modifican las profundidades de cada celda, acorde con la ubicación de cada módulo.

25.2.4. ALTERNATIVAS 4 Y 5

Para estas dos últimas alternativas, hubo que refinar la malla en la zona de la instalación, pero en menor medida que en los casos anteriores, pues los módulos son el doble de grande, 4x4m. La separación entre filas y columna es de 10 metros. Para la alternativa 4, la altura de los módulos se mantiene en 2 metros, y para la quinta, todos son de 2 metros, exceptuando el central, que está emergido 4 metros sobre la superficie del mar.

La malla quedó de la siguiente manera:

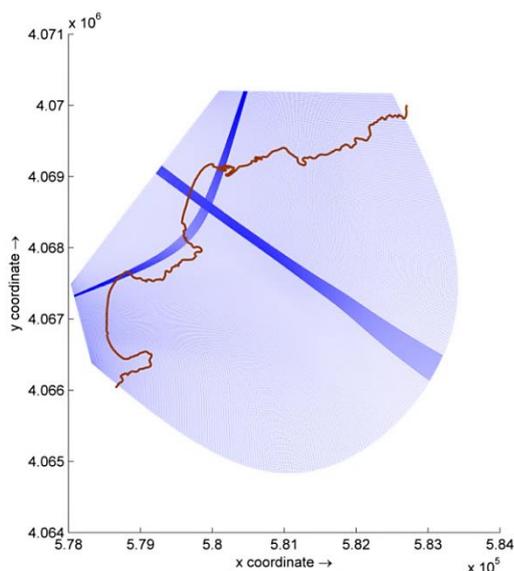


Figura 71: Malla de las alternativas 4 y 5

26. WAVE-SWAN

Se ha empleado el módulo WAVE para poder estudiar cómo varía la altura de ola para cada segundo de período de pico, los cambios en la dirección de procedencia del oleaje y la fuerza inducida por él, las tensiones que induce en la cimentación de los módulos, etc. Todas estas variables, comparándolas con el escenario inicial para cuantificar el grado de afección que puede provocar la obra.

A continuación, se procede a explicar cada apartado de este módulo:

- **Description**

En este primer paso, simplemente se introduce una breve descripción del proyecto para identificarlo fácilmente.

- **Hydrodynamics**

Se indica en el caso de que el WAVE se simule conjuntamente con el FLOW.

- **Grids**

En este apartado, se importa el grid en el que el SWAN resuelve la ecuación de balance de la acción del oleaje.

- **Computational Grid:** se importan los grid a emplear en la simulación.
- **Bathymetry:** en este caso, se importa el archivo *.dep* de la malla, referido a las profundidades.
- **Spectral Resolution:** SWAN asigna la energía del oleaje a las frecuencias y la dirección espacial especificadas.
 - **Directional space:** A la hora de indicar las dirección, se dan dos opciones: *Circle* o *Sector*. En este proyecto, se ha mantenido la inicial *Circle*, de manera que las direcciones espectrales cubren el círculo completamente. Al mantener esta opción, *Number of directions* viene referido al número de subdivisiones del círculo, de tal forma que la resolución de la dirección espectral es:

$$\Delta\theta = 360^\circ / \text{Number of Directions}$$

- **Frecuency space:** se indica la frecuencia discreta más baja y alta que serán usadas en el cálculo, y el *Number of Frecuency bins*, que define la resolución de la frecuencia espacial entre las discretas más bajas y las más altas. Para todos los casos, se han dejado las de defecto.
- **Nesting:** este apartado se utiliza en el caso de que se hubiera empleado una malla anidada dentro de otra.
- **Hydrodynamics:** si se emplea WAVE y el FLOW conjuntamente, se tiene que habilitar la opción *use and extend*, para utilizar los resultados del FLOW en el WAVE y aumentar así la precisión del mismo.

- **Time frame**

En este apartado, se indica el tiempo de simulación durante el cual el programa propagará los datos de la boya que se hayan seleccionado. En todos los casos, se ha simulado para una hora. Mediante un archivo a parte llamado *Wavecom*, se incluye el tiempo de simulación, con sus respectivos datos de: altura de ola en profundidades indefinidas, periodo de pico en profundidades indefinidas, dirección de procedencia del oleaje en profundidades indefinidas, la desviación direccional de la energía en grados, la elevación de la superficie libre por la marea, la velocidad de viento y la dirección de viento. No se ha especificado ningún *Water level correction*, ni *X-velocity* o *Y-velocity*, que indican una velocidad constante a aplicar en el modelo WAVE.

- **Boundaries**

Para introducir las condiciones de contorno, se puede emplear: *Orientation*, las *Grid Coordinates* o las *X, Y Coordinates*. En este proyecto, se ha empleado la opción *Orientation*, y se ha simulado para ambas direcciones principales. En *Boundaries Conditions*, se ha dejado que las condiciones varíen en el espacio. Por último, en *Specification of spectra*, las condiciones de contorno se han especificado en términos de parámetros espectrales, *Parametric*, dado por defecto.

- **Obstacles**

En el caso de que en la playa o en general en la zona a analizar haya algún tipo de obstáculo como una escollera, etc., se pueden considerar mediante esta opción. En este proyecto, los módulos arrecifales, se han introducido en el programa, no por *obstacles* sino modificando la profundidad justo en la zona en la que están colocados en función de la altura de los mismos en el apartado QUICKIN, en el que se define el *.dep*.

- **Physical parameters**

En este apartado, se presentan cuatro pestañas:

- **Constants:** Sirve para variar el valor numérico de la gravedad, densidad del agua, etc. No se ha tocado ninguno de ellos al no tener datos específicos, de la zona. Por tanto, se han dejado los del programa por defecto.
- **Wind:** Aquí se indica tanto la velocidad del viento como la dirección del mismo.
- **Processes:** igualmente, se han dejado los valores por defecto de *3rd Generation*, *Depth-induced breaking*, *Non-linear triad* y *Bottom friction*, y se ha modificado la

Diffraction, por los siguientes valores, debido a la validez demostrada en otros proyectos ya simulados con este programa.

- Smoothing coef.= 0.6
- Smoothing steps=900
- **Various:** para este apartado se han mantenido, también, los valores y pestañas activadas por defecto.

- **Numerical parameters**

La única modificación ha sido en *Maximum number of iterations*, aumentado hasta 50, para asegurar que el programa consta de las suficientes iteraciones como para poder llegar al porcentaje *wet grids points* de 98%.

- **Output curves**

De la misma manera, no se ha modificado nada de este apartado.

- **Output parameters**

Aquí se carga el archivo con extensión *.loc*, en el que se incluyen las coordenadas de puntos específicos en los que se quieren ver los resultados del WAVE, una vez simulado. Para todos los casos, se han establecido puntos de observación a lo largo de toda la línea batimétrica de 3 metros.

- **Additional parameters**

En esta última pestaña, se pueden añadir otros datos no incluidos previamente.

27. FLOW

En cuanto al módulo FLOW, se presentan los siguientes apartados:

- **Description:** al igual que con el WAVE, en él se indica breve mente una explicación del proyecto.
- **Domain:**
 - **Grid parameters:** se importa la malla con extensión *.grd*. y la extensión *.enc*. Además, es importante introducir la latitud de la zona a estudiar, 36.45°. La orientación y el número de capas se dejan con los valores por defecto del programa.
 - **Bathymetry:** se importa desde file el *.dep*
 - **Dry points:** en este apartado se indica si se presenta en la zona de estudio algún área seca, como por ejemplo un islote, de manera que el programa lo pueda tener en cuenta y acercarse más a la realidad
 - **Thin Dams:** se representan mediante esta opción a pequeños obstáculos lo suficientemente largos como para influir en el modelo. En este proyecto, al no existir tales elementos, no se ha tenido en cuenta.
- **Time frame:** al igual que con el Wave, en este apartado se indica el tiempo de simulación. Se ha simulado durante 9 horas de manera que nos aseguramos de que el

programa dispone de horas suficientes para converger bien y llegar al porcentaje deseado.

- **Processes:**
 - **Constituents:** aquí se indica, en el caso de disponer de ellos, valores concretos de salinidad, temperatura, sedimentos y contaminantes para que el programa los tenga en cuenta. Para el presente proyecto, al no disponer de esta información, no se han empleado.
 - **Physical:** se activaron las pestañas de *Wind* y *Wave*, para que el programa lea los archivos de texto en los que se incluyen las horas de simulación, la velocidad y dirección del viento por un lado, y en otro el ya mencionado archivo *Wavecom*.
 - **Man-made:** por último, en el caso de que hubiera presencia de dragado o descargas, se activaría esta opción. En San José, al no disponer de ninguna, no se tuvo en cuenta.
- **Initial conditions:** en este apartado se especifican los valores iniciales con los que se comenzará la simulación. Se mantuvo la opción *Uniform values*. En cuanto al *Water level*, al incluirlo en el archivo externo *Wavecom*, no es necesario indicarlo otra vez en el programa.
- **Boundaries:** es necesario definir el contorno desde el cual se va a propagar los parámetros introducidos. El tipo de condición utilizada para el contorno ha sido el de *water level*. Se necesita también introducir una serie de condiciones de flujo y transporte que representan la influencia de toda la zona que queda más allá del área modelada. Las fuerzas hidrodinámicas quedan prescritas utilizando las componentes astronómicas, contenidas en un archivo de texto con extensión *.bca* y que han sido facilitadas por el mareógrafo de Almería de la página web Puertos del Estado. En este archivo se incluye la amplitud en metros y la fase en grados.

Constituyente	Amplitud (cm)	Fase (°)
NU2	0.35	40.11
M2	9.55	50.20
S2	3.89	75.50
K2	1.03	72.24
M3	0.28	177.96
MK3	0.05	164.82
N2	1.9	35.44
SK3	0.08	110.22
MN4	0.45	118.36
M4	1.19	160.35
O1	2.17	118.29
P1	1.16	140.79
K1	3.51	154.94
2N2	0.25	17.51
MU2	0.32	14.82

Tabla 41: Constituyentes de marea

- **Physical parameters:** en esta pestaña, se especifica el número de parámetros relacionados con las condiciones físicas del área modelada. Estos se pueden dividir en distintas clases, algunos son necesarios de indicar y otros dependen de si los procesos con los que están relacionados se han utilizado o no.
 - **Constants:** se especifican los valores de las constantes como la gravedad, la densidad del agua y del aire, etc. Se han mantenido los valores por defecto del programa.
 - **Roughness:** se refiere a la rugosidad del fondo y a la fricción. Se han dejado los valores dados según Chezy, en la dirección U y V. *Wall Roughness* se ha dejado como *free*.
 - **Viscosity:** se ha utilizado una viscosidad horizontal uniforme de $25\text{m}^2/\text{s}$, por ser un valor aproximado para la zona de San José.
 - **Wind:** esta pestaña se activa, ya que se ha dispuesto de un archivo de texto *.wnd* en el que se incluyen los datos de velocidad y dirección del viento, además de las horas de simulación a utilizar. Se ha considerado un viento uniforme.
- **Numerical parameters:** Se puede añadir parámetros relacionados con drying y flooding. Para todos los casos, se mantuvieron los valores por defecto del programa.
- **Operations:** en esta pestaña, solo se activa la opción de descargas, pues no se ha utilizado la opción de sedimentos ni se activó el proceso *Dredgin and dumping* en *Man-made*. Como en la zona del proyecto no existe ningún tipo de descarga, no se empleó este proceso.
- **Monitoring:** los resultados de la simulación se pueden monitorizar en función del tiempo en puntos específicos de la malla en los que queramos obtener los resultados. Para el proyecto, se han utilizado los *observation points*, colocados en cada uno de los módulos para poder evaluar, entre otros, el *bed shear stress* que se producen en ellos.
- **Additional parameters:** se pueden introducir una serie de parámetros adicionales no incluidos en el programa. Para el proyecto, no se añadió ninguno más de los ya mencionados.
- **Output:** por último, en esta opción se especifica qué resultados serán almacenados para un mayor análisis o para otras computaciones y cuáles serán mostrados. Así pues, en *Storage*, se definen los intervalos de tiempo para los distintos archivos utilizados, en *Print*, cuándo y cuáles de los datos serán mostrados y en *Details*, se hace una selección de todos los datos que serán almacenados en los archivos o mostrados. Lo único modificado fue la opción de *Storage*, en la que se especificó que, tanto para *Store map results* como para *Store communication file*, el tiempo en el que se comienza a almacenar los resultados y el de finalización sería desde las 0 horas hasta las 9 horas.

28. RESULTADOS

Par ambas direcciones principales de procedencia del oleaje, E y S, y para el régimen medio y extremal, se han simulado los dos módulos a fin de analizar las consecuencias y afecciones que induce la obra en la hidrodinámica de la playa, además de estudiar cuáles son los esfuerzos a los que se van a ver sometidos los módulos arrecifales.

28.1. DIRECCIÓN ESTE

28.1.1. RÉGIMEN MEDIO

Analizando los resultados obtenidos del clima marítimo, se introdujeron los siguientes valores en el archivo de texto Wavecom:

Altura de ola significativa en profundidades indefinidas	0.5 metros
Período de pico del oleaje en profundidades indefinidas	5s
Dirección de procedencia del oleaje en profundidades indefinidas	90°
Desviación direccional de la energía en grados	1°
Water Level	0.5 metros
Velocidad del viento	6m/s
Dirección de procedencia del viento	67.5°

Tabla 42: Datos introducidos en el WAVE

28.1.1.1. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE

Mediante el QUICKPLOT, una vez simulado el caso, se pueden analizar las distintas variables obtenidas.

En la siguiente imagen, se representa la altura de ola significativa en toda la malla, para un **período de 5 segundos**, correspondiente al régimen medio.

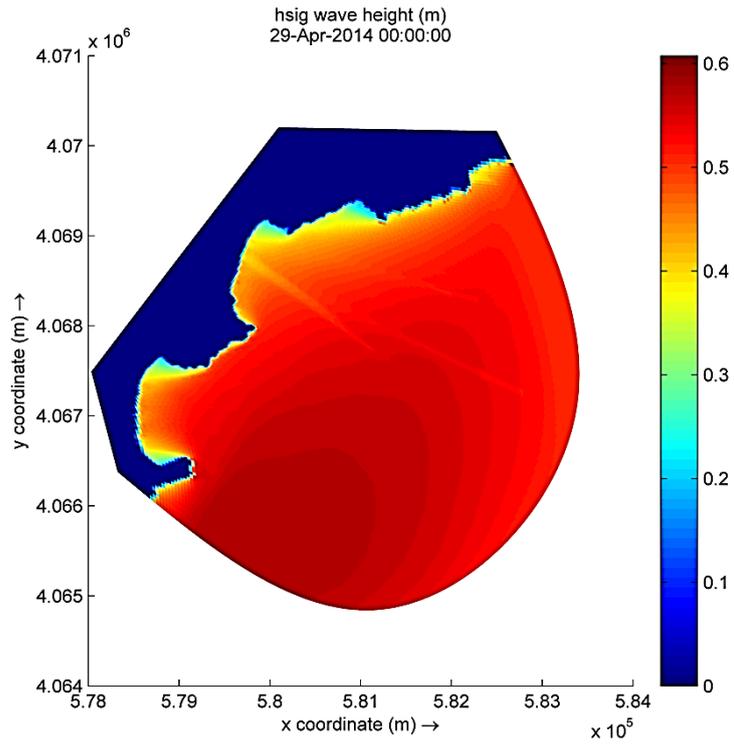
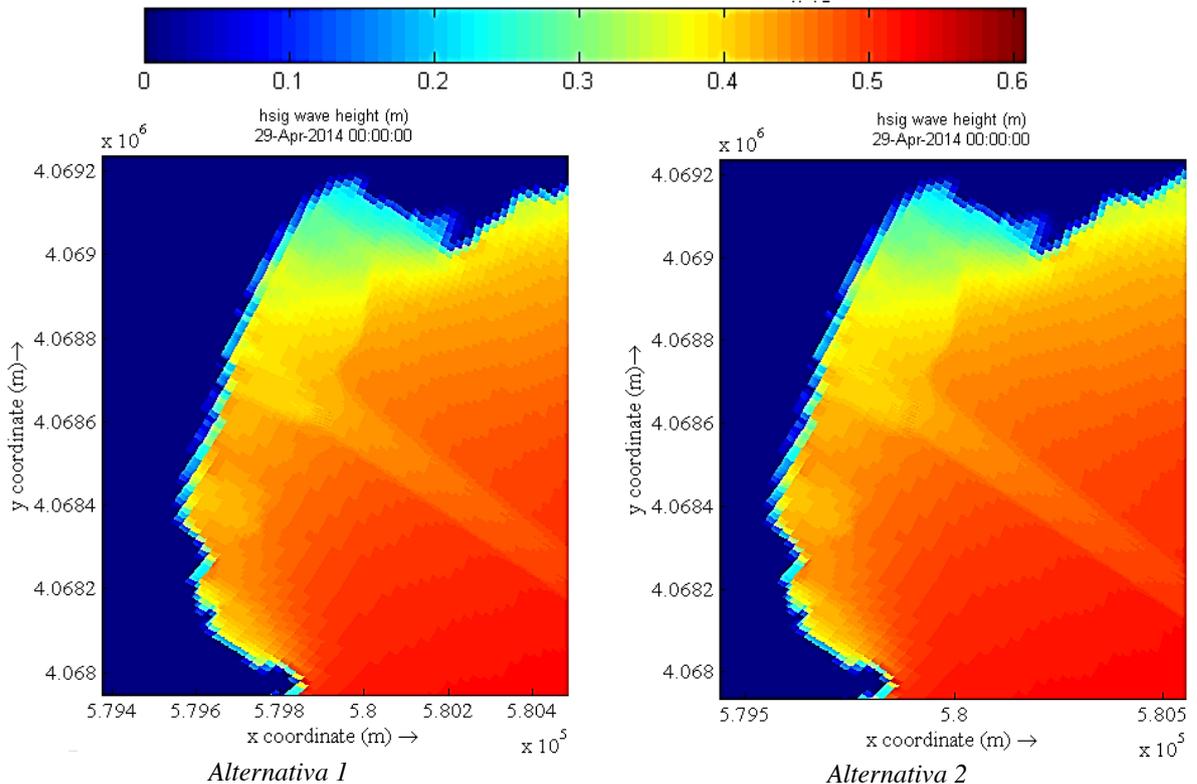


Figura 72: Altura de ola significativa en escenario inicial

Se puede ver como la altura de ola va aumentando hacia la dirección WSW. Se colocó el arrecife en la zona de la playa que coincide con el cañón que se muestra en la figura, aprovechando que en él la altura de ola es ligeramente menor. A continuación, se muestra este mismo escenario, pero con el arrecife ya instalado, para ver en qué medida afecta.



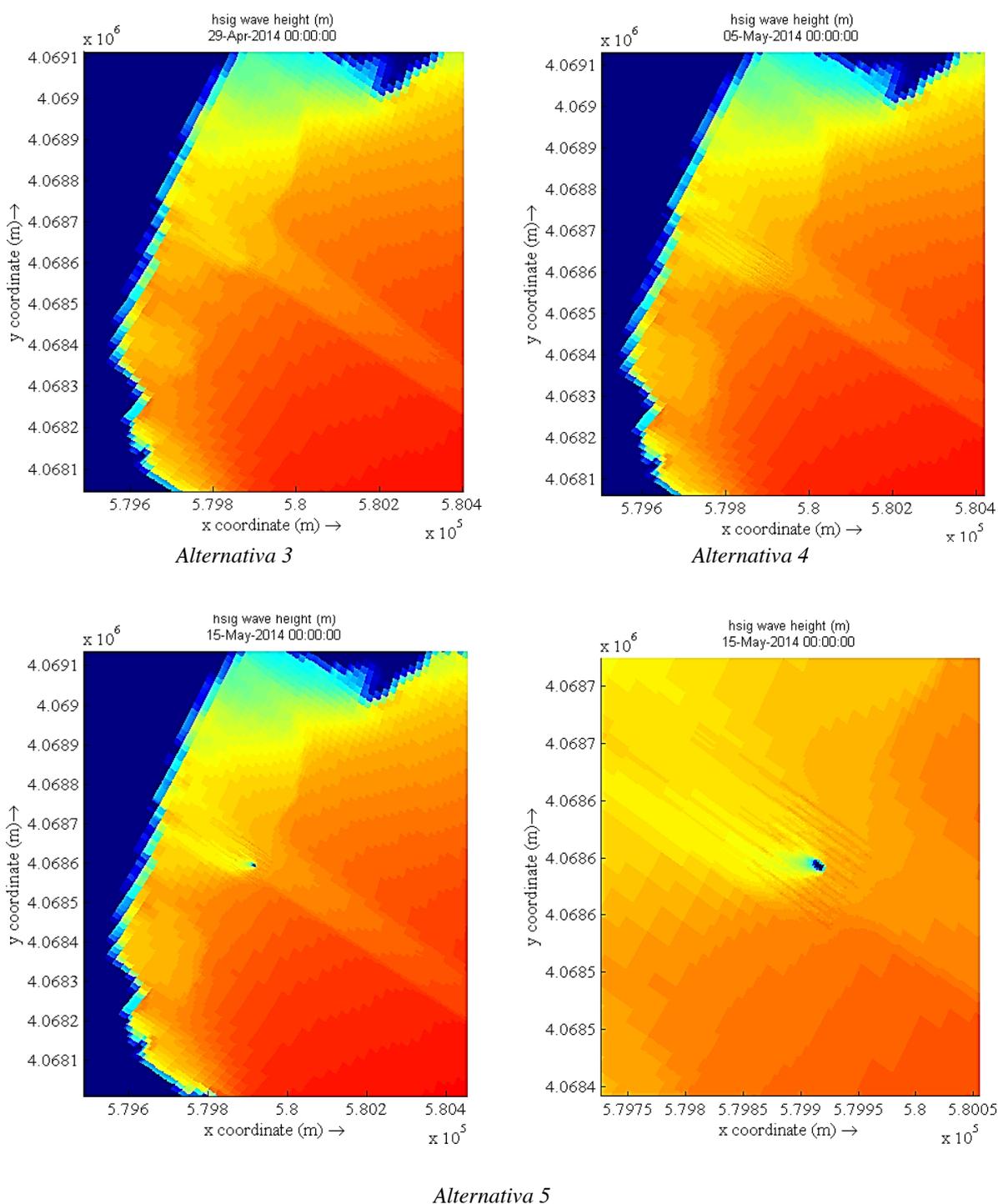
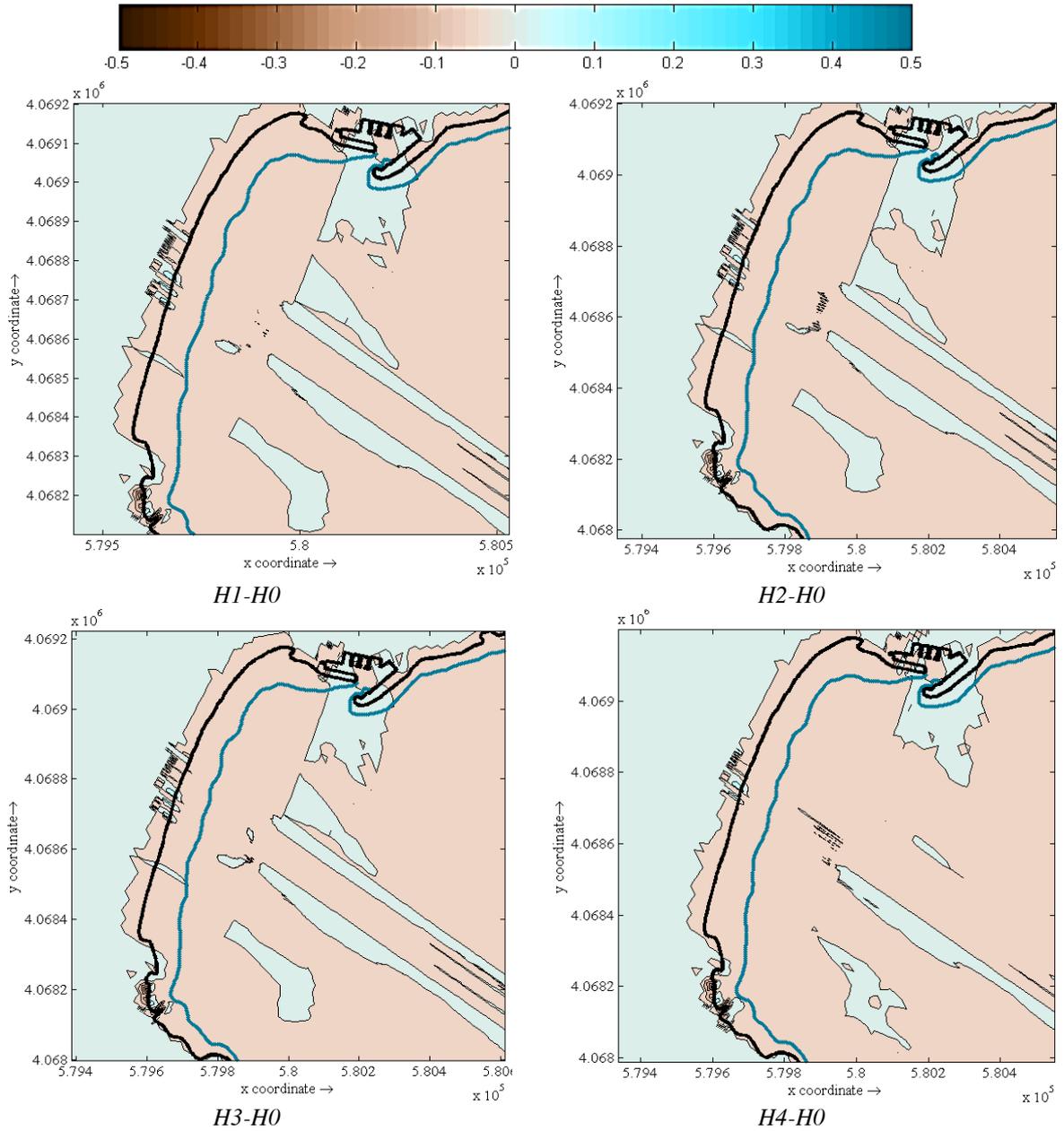


Figura 73: Altura de ola significativa en régimen medio, este.

Bajo estas condiciones, la instalación del arrecife provoca una leve reducción de la altura de ola, desde los 0.45 metros a los 0.4 metros, a su paso por el mismo. En las dos últimas, la diferencia es ligeramente mayor, de unos 7cm. Se aprecia en la quinta alternativa el módulo emergido bordeado por el oleaje. En general, estas variaciones no son muy significativas de una alternativa a otra, por lo que se puede concluir que para todas ellas se provoca una afección similar y por tanto, no es una variable influyente a la hora de decantarse por una opción u otra.

28.1.1.2. DIFERENCIA DE ALTURA DE OLA

En los siguientes gráficos se va a mostrar en qué zonas de la playa la altura de ola se va reducida por la instalación:



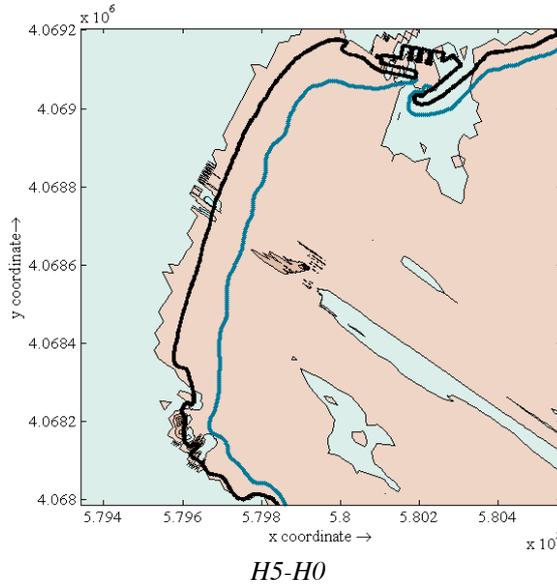


Figura 74: Diferencia de altura de ola en régimen medio, este.

Se aprecia, sobre todo para esta última alternativa, un descenso de la altura de ola de entre 5cm apreciable en la última alternativa.

28.1.1.3. ALTURA DE OLA DE LAS ALTERNATIVAS CON RESPECTO A LA DEL ESCENARIO INICIAL

A continuación, se muestra cómo va variando la relación de la altura de ola que provoca las alternativas y la del escenario inicial sin ellas, a lo largo de la línea batimétrica de 3 metros de profundidad, aumentando el período pico cada segundo.

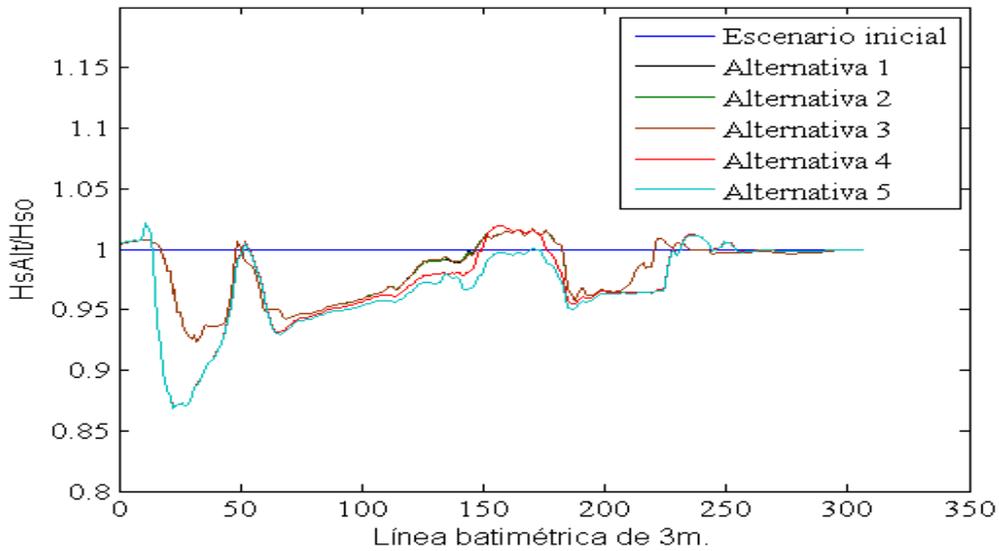


Figura 75: $T_p=2.25s$

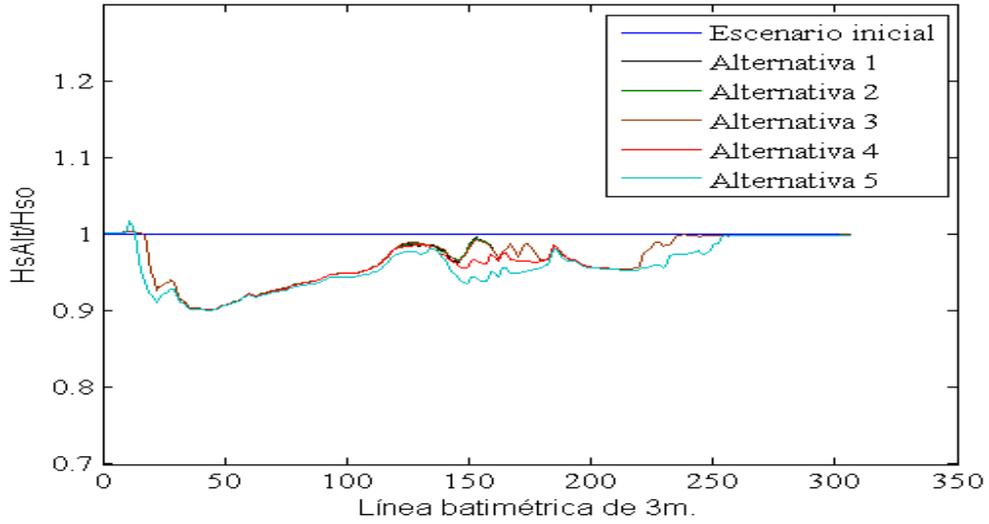


Figura 76: $T_p=3s$

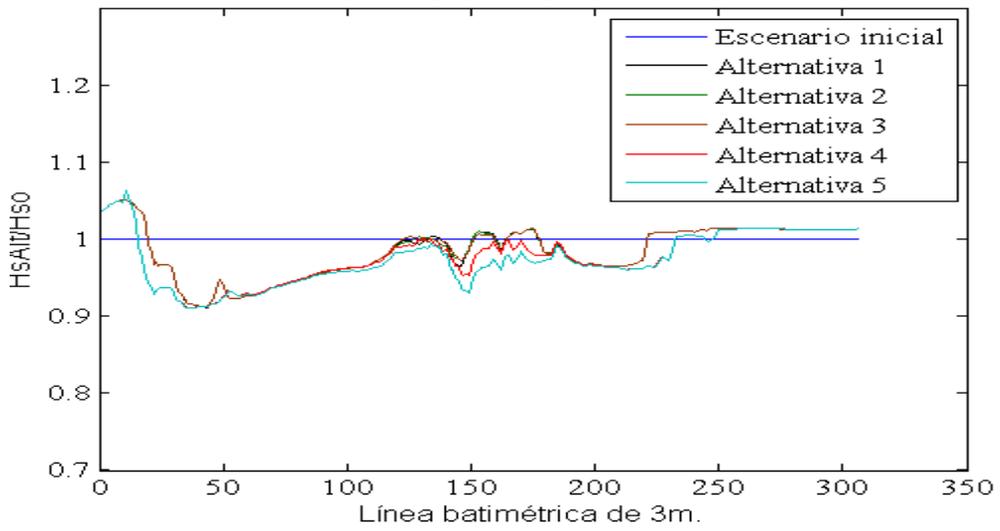


Figura 77: $T_p=4s$

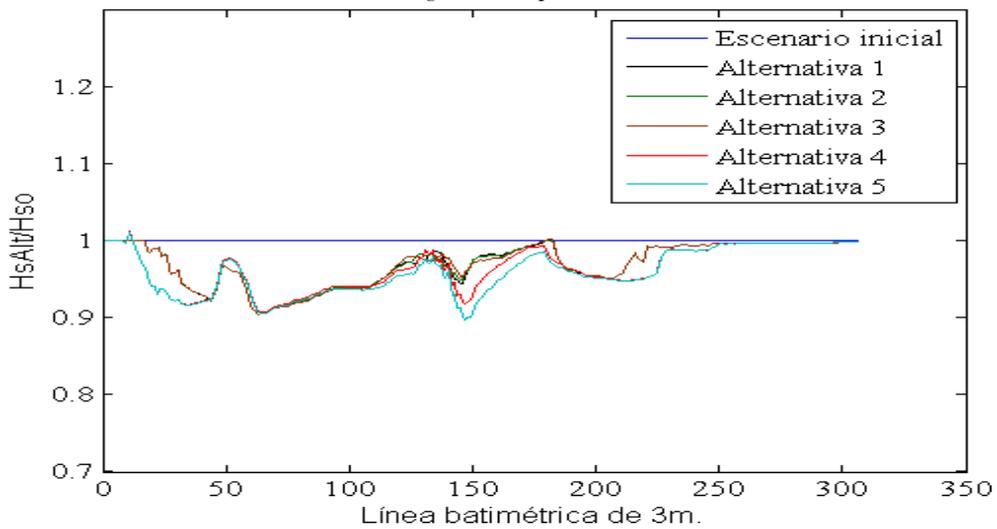


Figura 78: $T_p=5s$

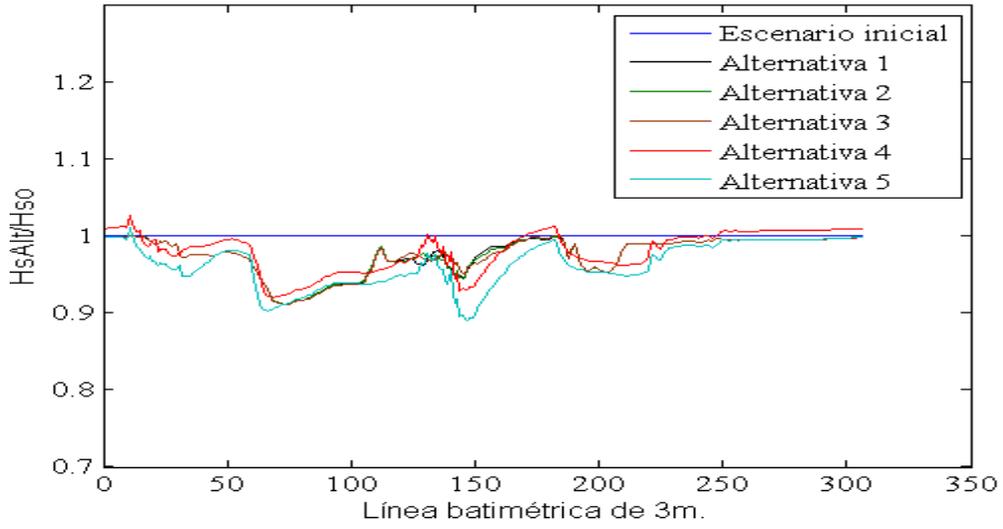


Figura 79: $T_p=6s$

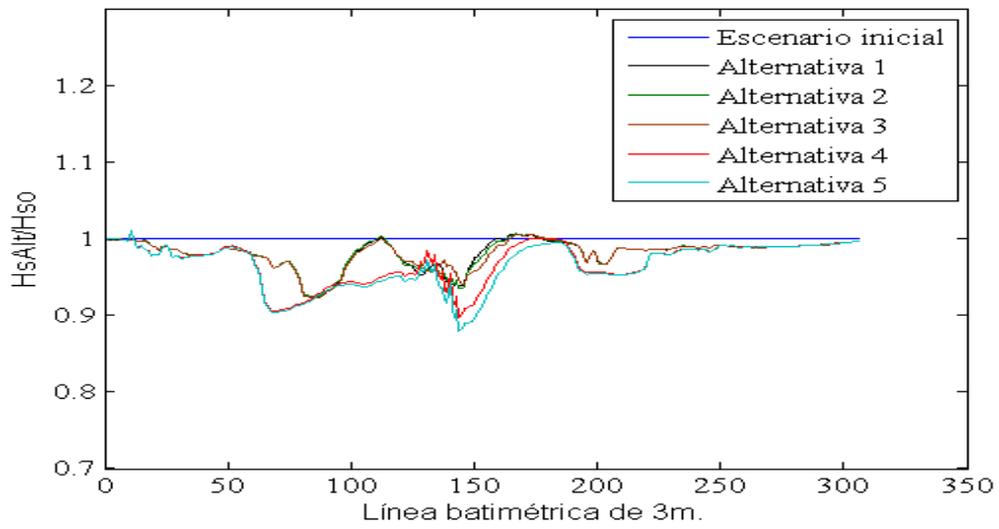


Figura 80: $T_p=7s$

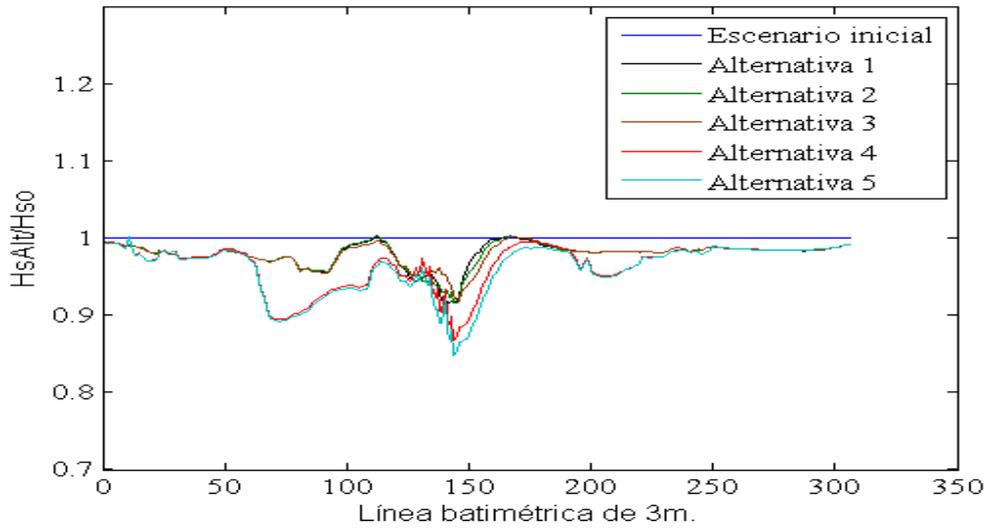


Figura 81: $T_p=8s$

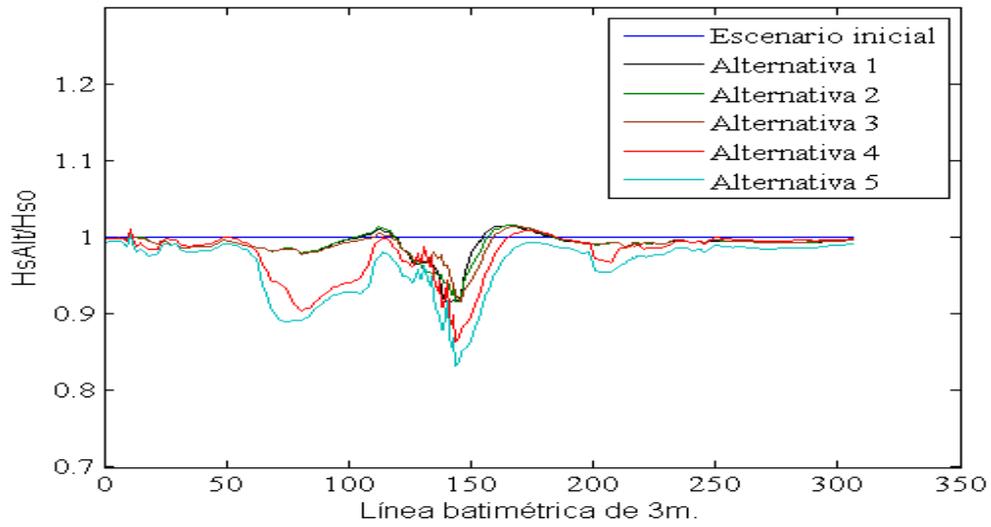


Figura 82: $T_p=9s$

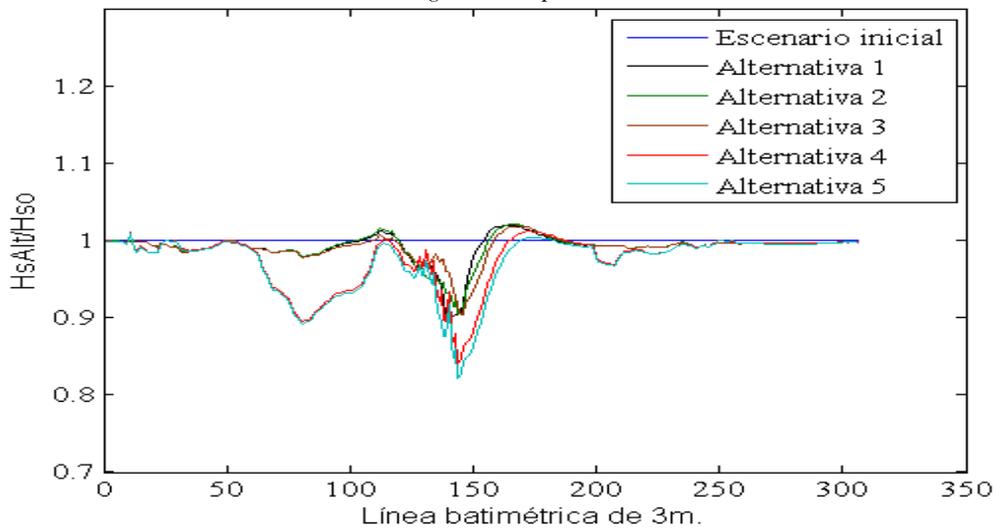


Figura 83: $T_p=10s$

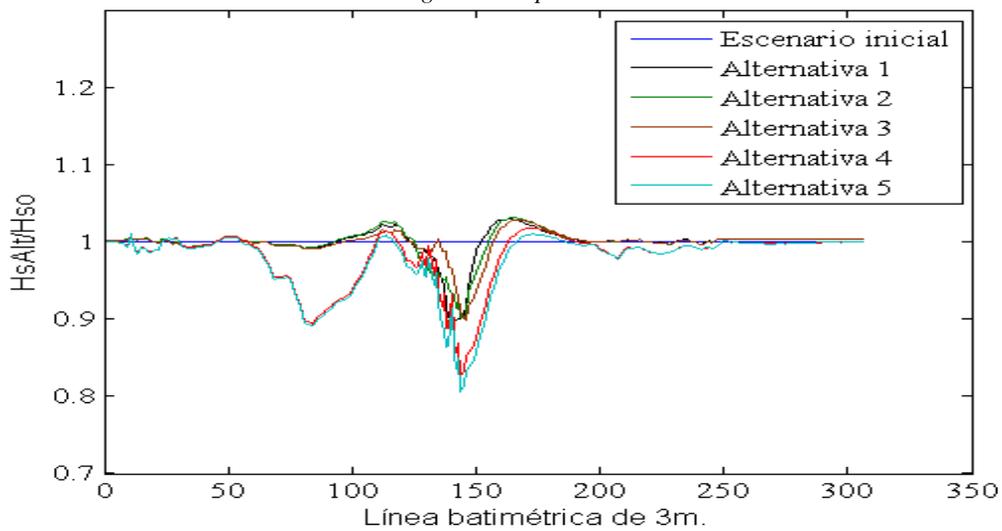


Figura 84: $T_p=11s$

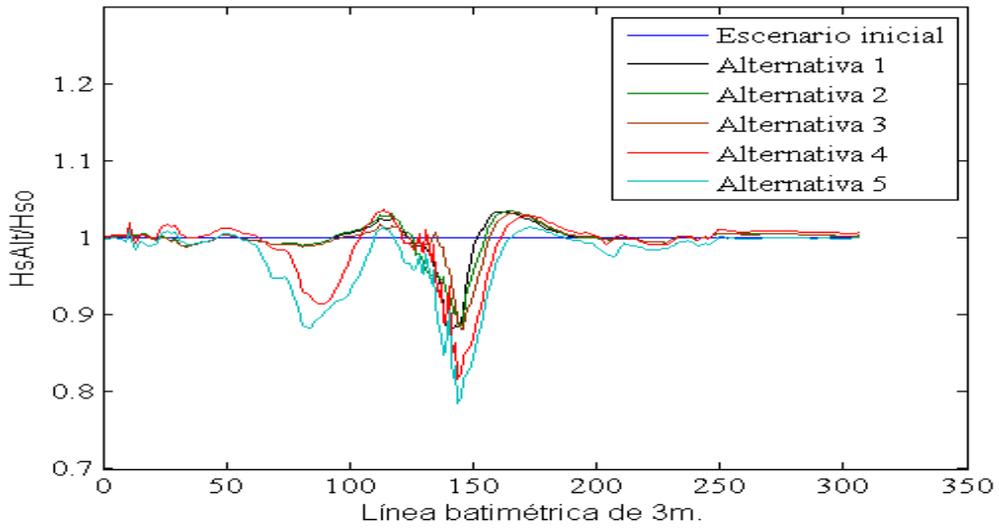


Figura 85: $T_p=12s$

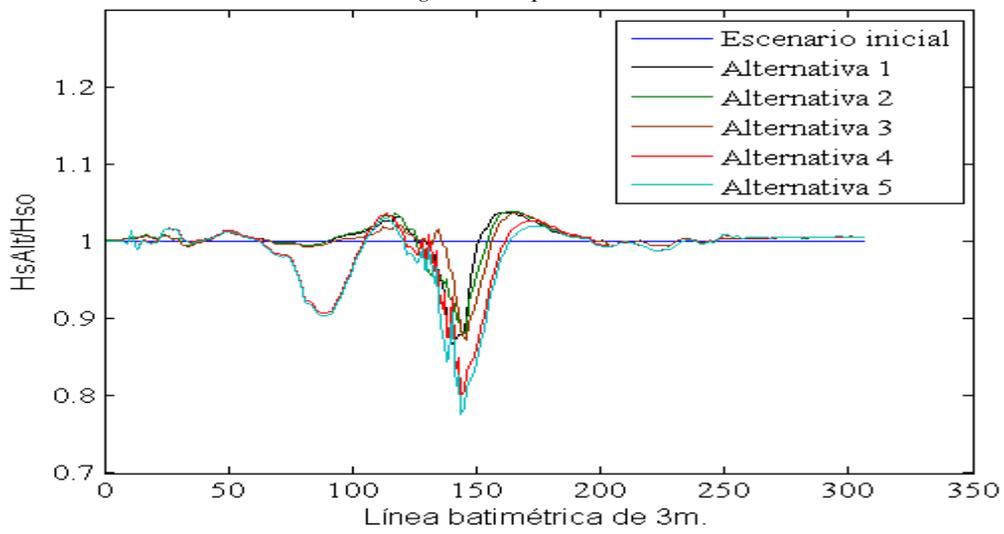


Figura 86: $T_p=13s$

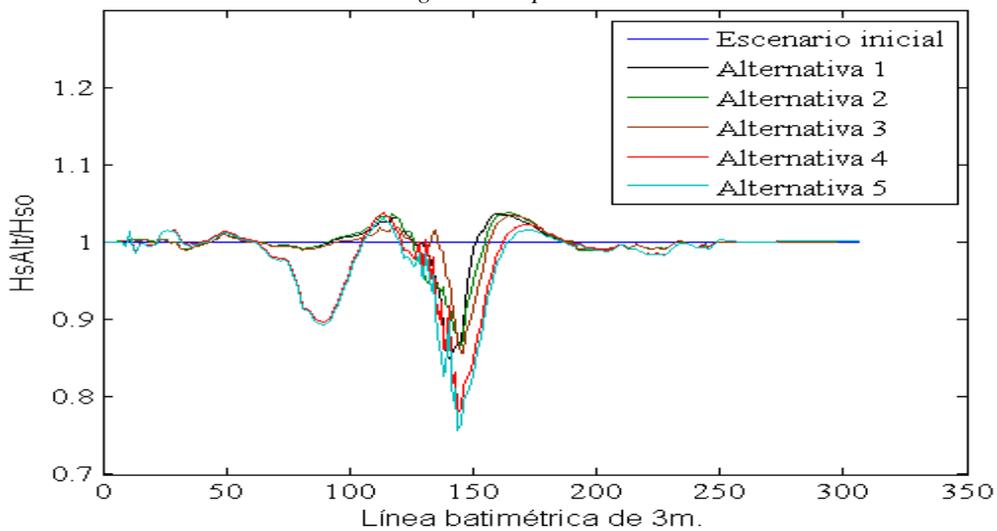


Figura 87: $T_p=14s$

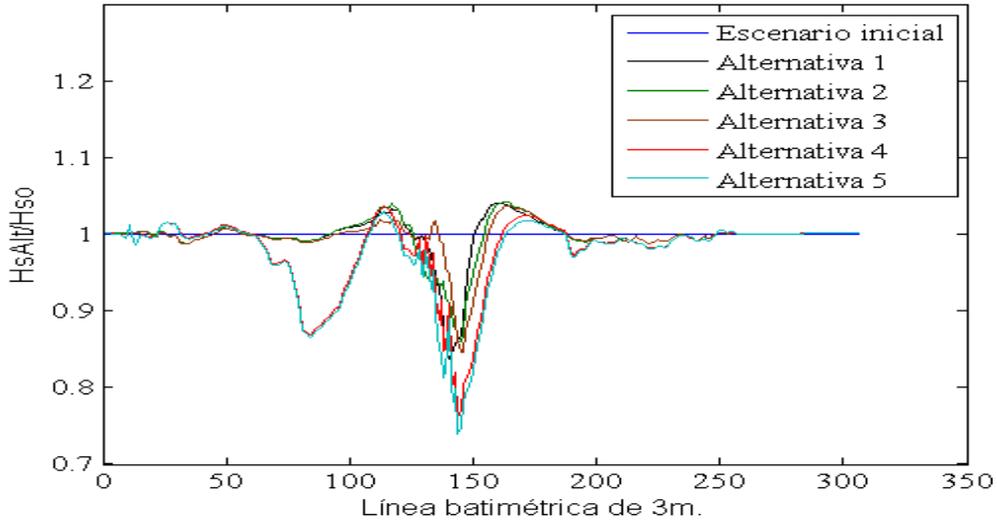
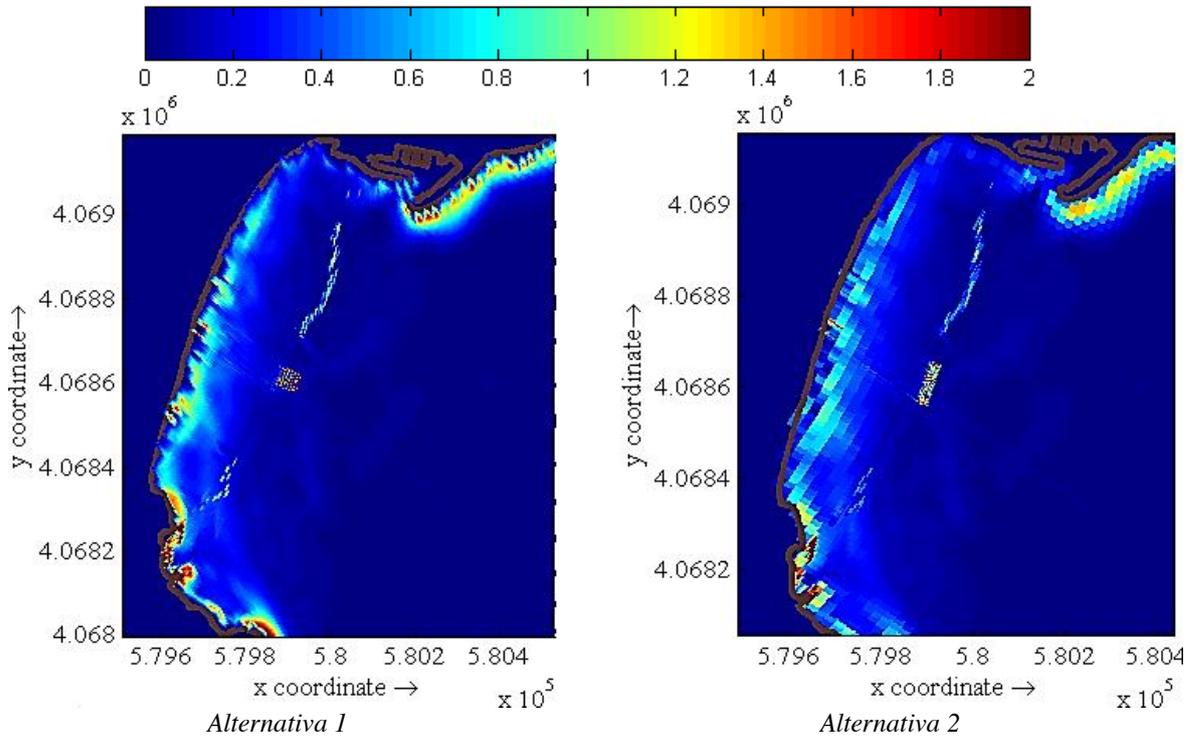


Figura 88: $T_p=15.4s$

A la vista de las gráficas se puede concluir que: a períodos bajos, la presencia de los módulos provoca una leve reducción, de entre el 5% hasta el 10% de la altura de ola. A medida que el período va aumentando, se observa un incremento de la altura de ola del orden del 5% justo en el contorno exterior de la zona donde se ubica el arrecife. En cambio, a su paso a través de ellos la altura de ola se ve reducida hasta en un 20% para el mayor periodo registrado, 15.4segundos.

28.1.1.4. FUERZA INDUCIDA POR EL OLEAJE

La siguiente variable que se estudia es la de la fuerza que induce el oleaje en la costa y en los módulos:



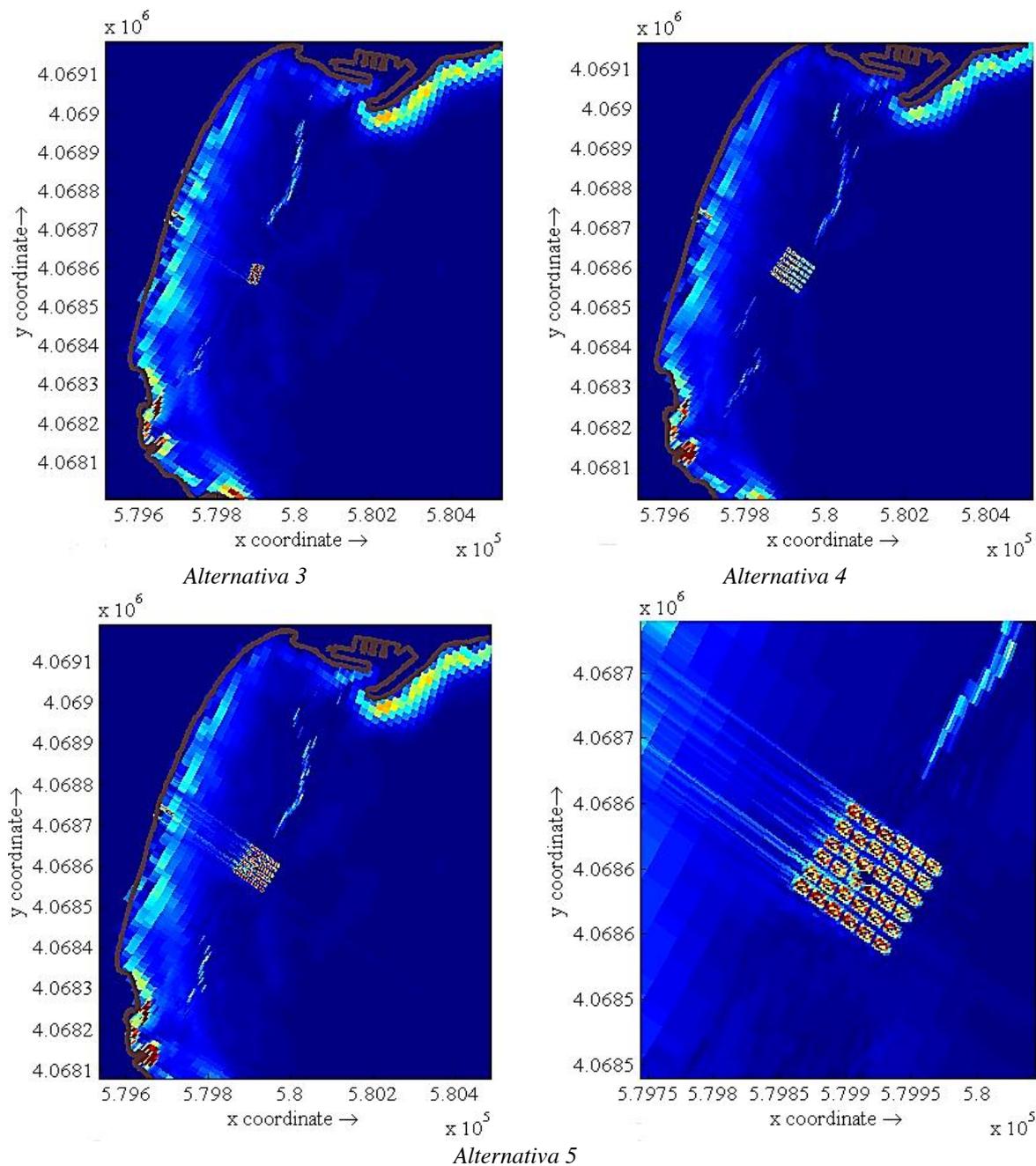
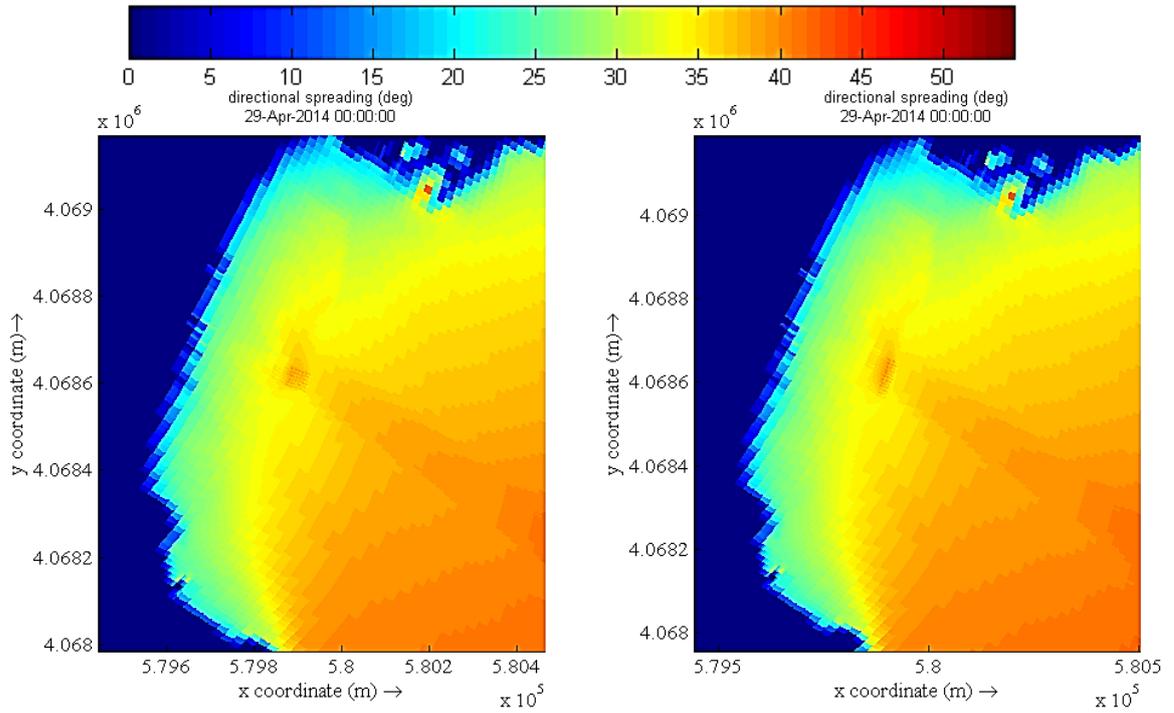


Figura 89: Fuerza que induce el oleaje en los módulos en régimen medio, este

Se ve que el oleaje provoca una fuerza que varía desde los 3N/m^2 hasta los 2N/m^2 en los módulos arrecifales.

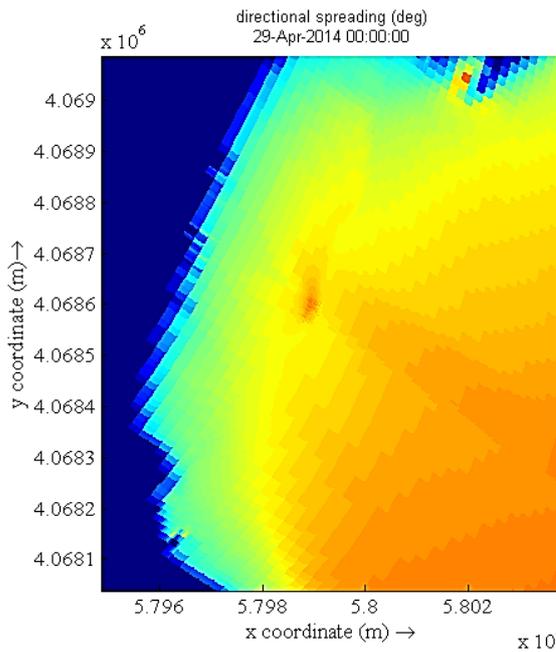
28.1.1.5. DIRECCIÓN DE PROCEDENCIA DEL OLAJE

Se analiza ahora el posible cambio en la dirección de procedencia del oleaje, antes y después de la actuación, para cada alternativa.

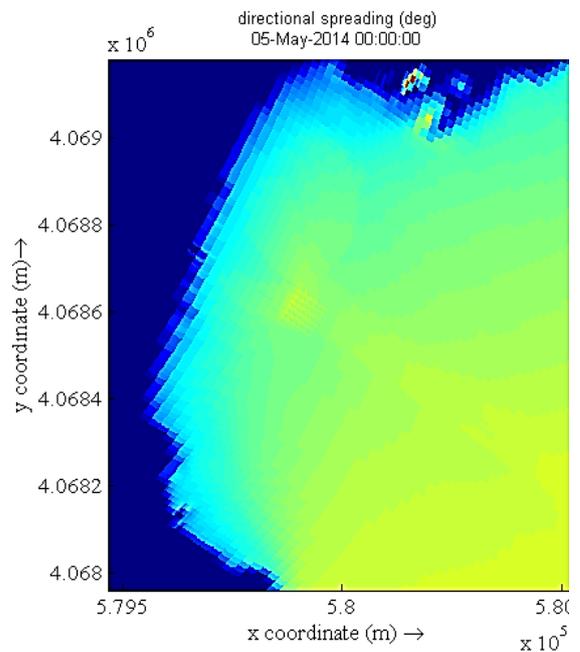


Alternativa 1

Alternativa 2



Alternativa 3



Alternativa 4

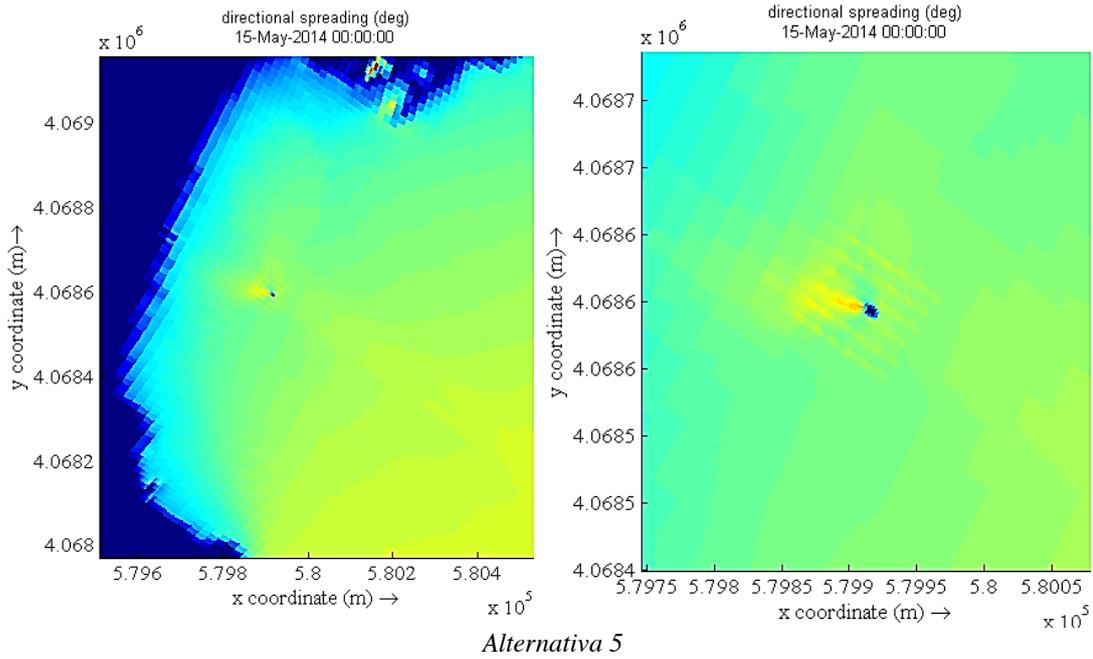


Figura 90: Dirección de procedencia del oleaje en régimen medio, este.

Se distingue un pequeño cambio de dirección, de los 34° a los 38°, en la zona del arrecife, para las tres primeras alternativas, y una variación desde los 27° a los 35° para las dos últimas. Se puede ver como el modulo emergido de la quinta alternativa frena el oleaje en ese punto y lo desvía desde los 30° hasta los 40°.

A continuación, se muestra esta variación a lo largo de la línea batimétrica de 3 metros de profundidad:

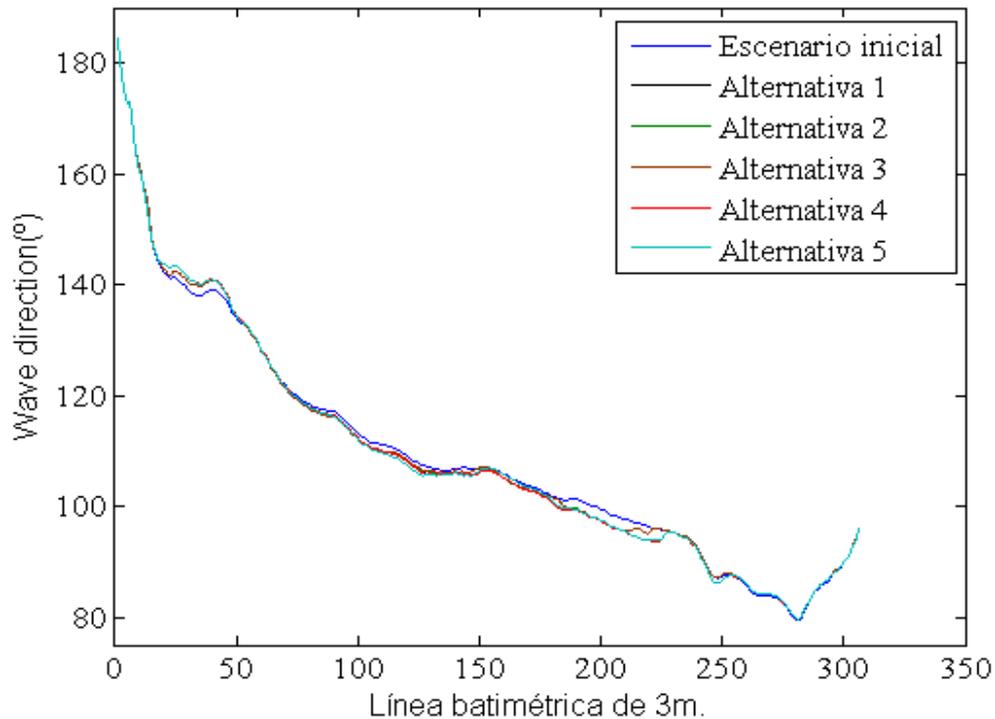


Figura 91: Dirección del oleaje (°)

En este último gráfico la variación es menor, 3°, pues se está analizando a una cierta distancia del arrecife.

28.1.1.6. TENSIÓN TANGENCIAL EN EL FONDO

Por último, se analiza la tensión que soportará el arrecife en sus cimientos debido a la acción del oleaje. Para ello, se han seleccionado distintos módulos dentro de una misma alternativa, con el fin de estudiar cuáles serán los que soporten mayores tensiones.

- **Alternativa 1**

A continuación se muestran los módulos arrecifales en los que se estudia este parámetro.

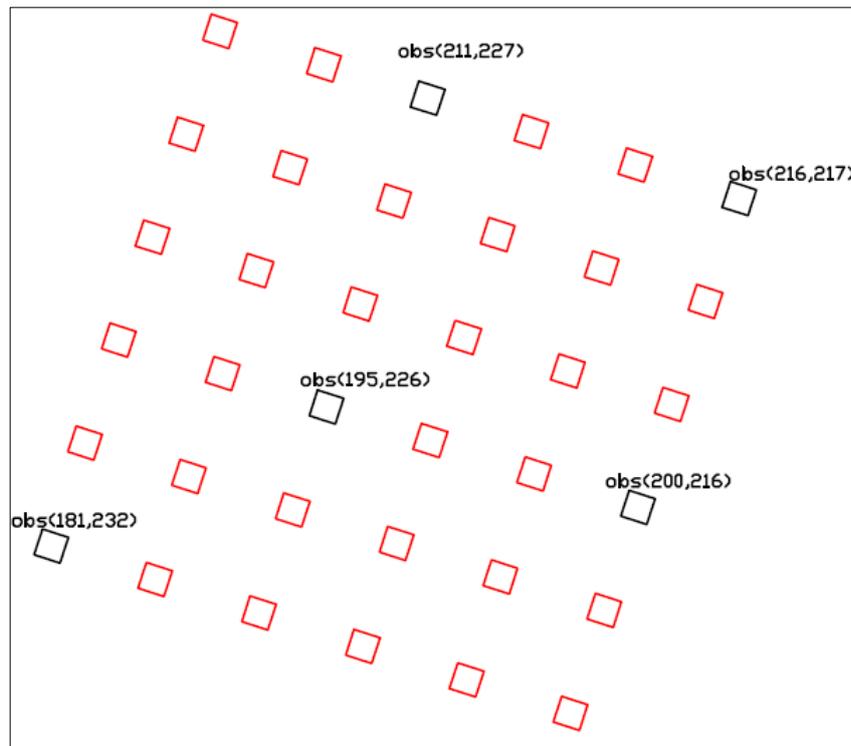


Figura 92: Módulos de observación de la alternativa 1.

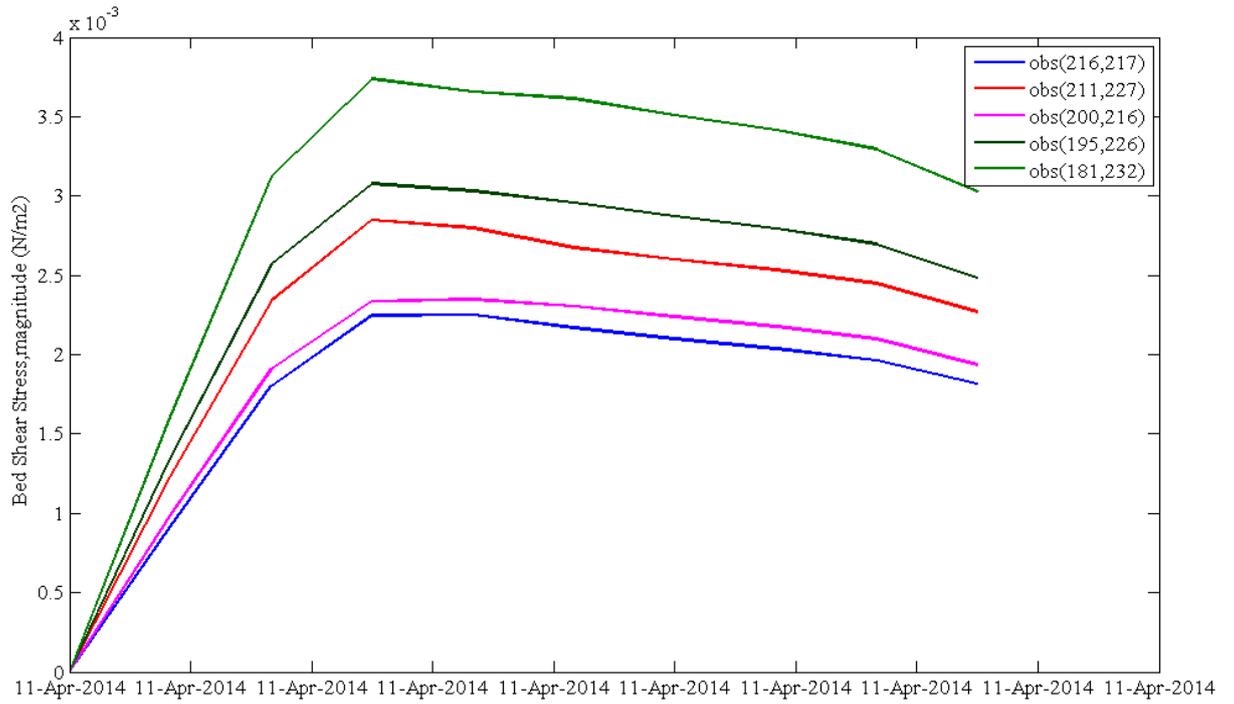


Figura 93: Tensión tangencial de la alternativa 1

Se ve como las tensiones aumentan a medida que se avanza hacia la dirección Oeste. De esta forma, el módulo “obs (181,232)”, que es el más esquinado, es el que soporta mayores tensiones de hasta $3.7 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}^2$

- **Alternativa 2**

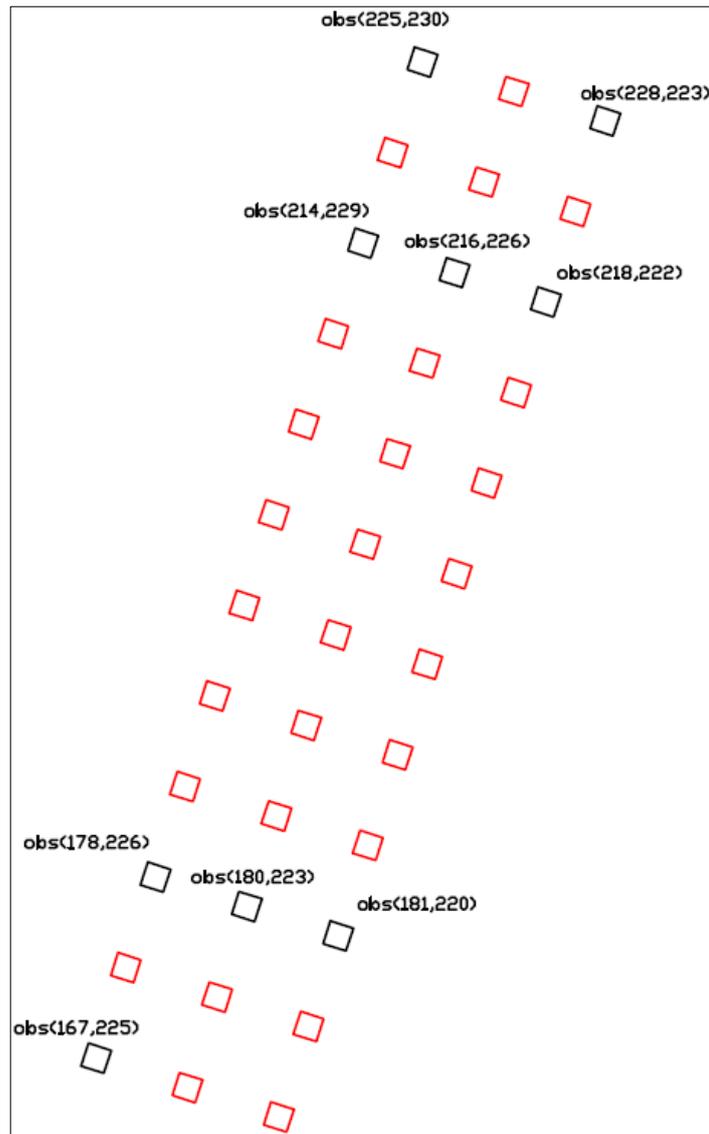


Figura 94: Módulos de observación de la alternativa 2

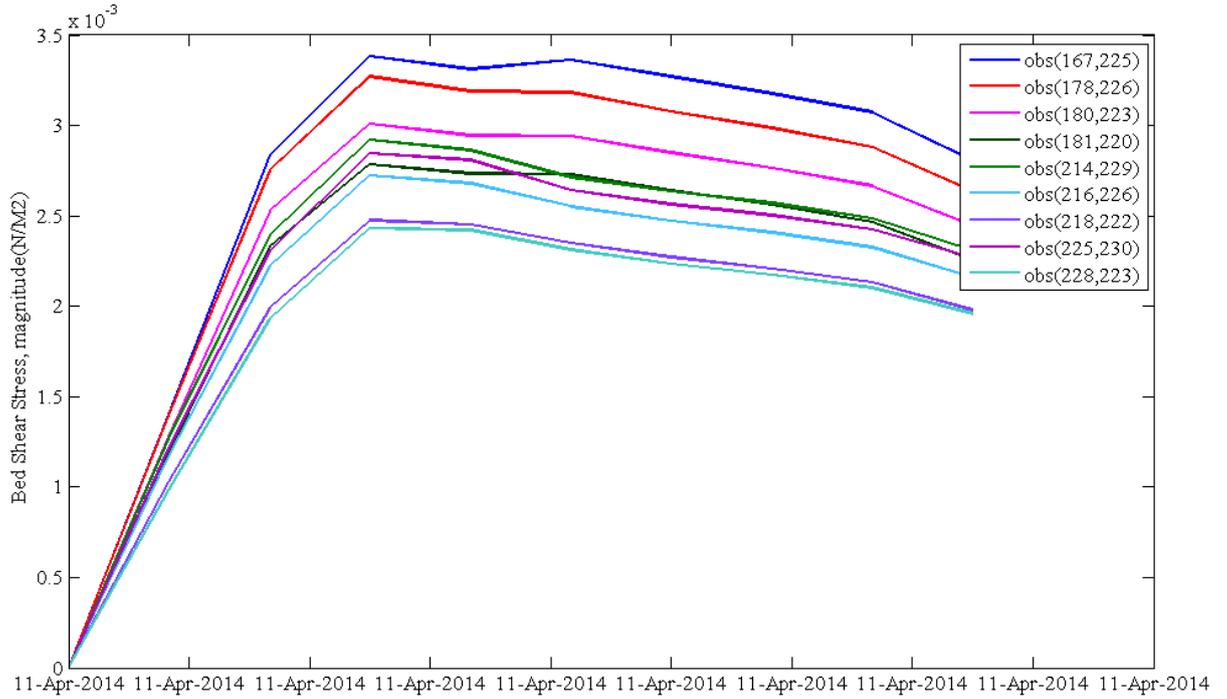


Figura 95: Tensión tangencial de la alternativa 2

De la misma manera que en el caso anterior, la tensión aumenta en los arrecifes a medida que se avanza hacia el Oeste. Para esta segunda alternativa, el rango de tensiones se ve reducido en $0.5 \cdot 10^{-3} \text{N/m}^2$.

- **Alternativa 3**

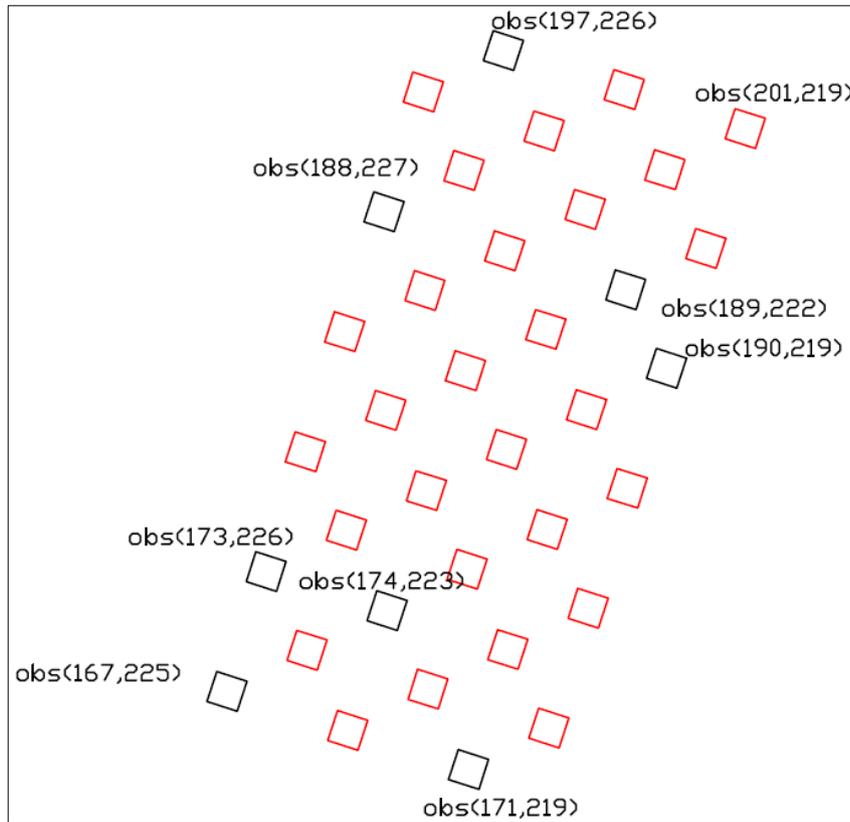


Figura 96: Módulos de observación de la alternativa 3

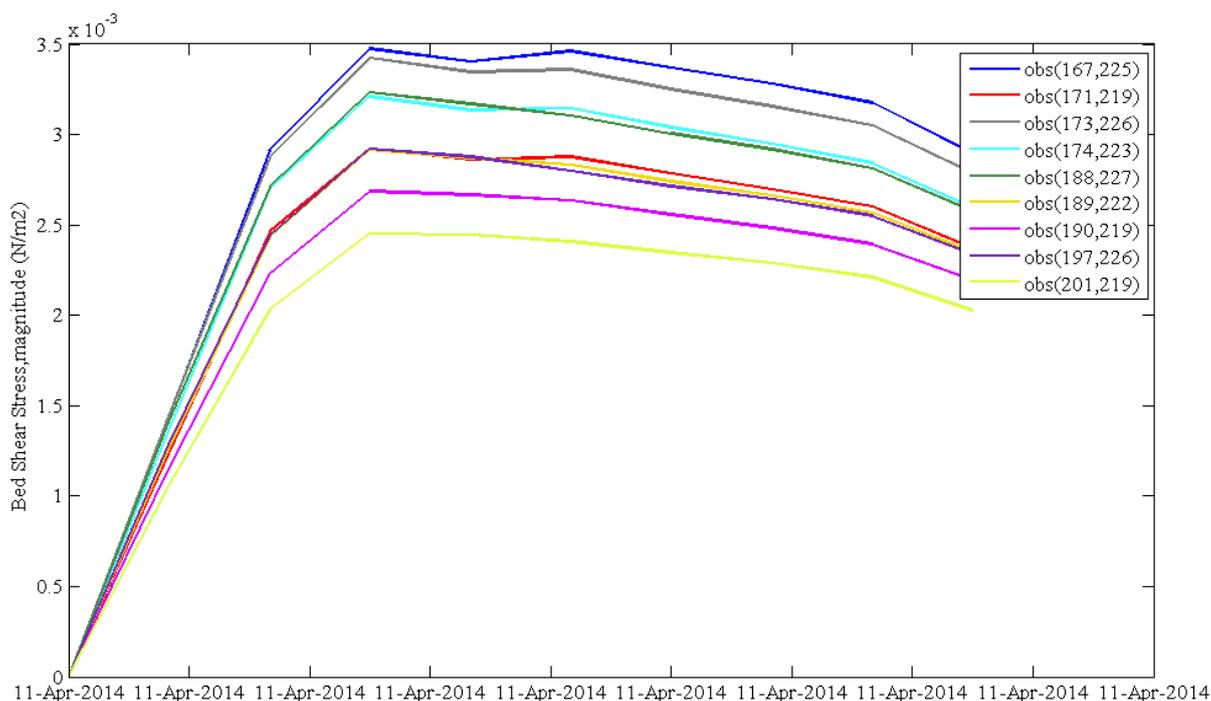


Figura 97: Tensión tangencial de la alternativa 3

El rango de tensiones no varía con respecto a la alternativa 2. Igualmente, la mayor se da en el módulo más esquinado, con $3.5 \cdot 10^{-3} \text{N/m}^2$.

- **Alternativa 4**

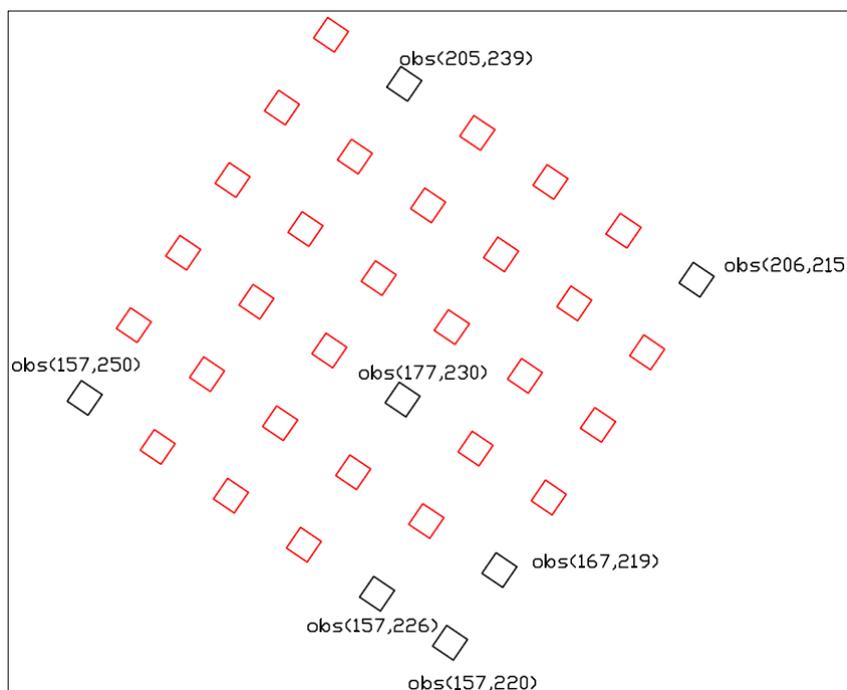


Figura 98: Módulos de observación de la alternativa 4

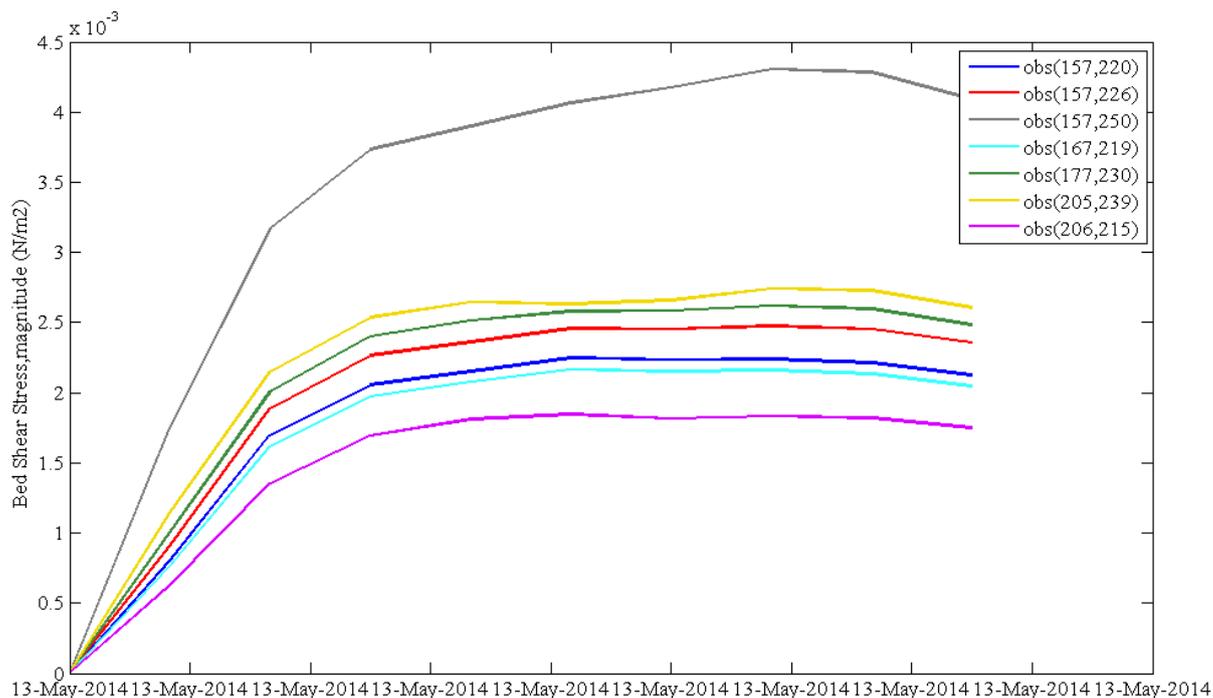


Figura 99: Tensión tangencial de la alternativa 4

En el módulo situado en la esquina más hacia el Oeste, la tensión aumenta hasta los $4.25 \cdot 10^3 \text{N/m}^2$ y la menor se produce en el que está situado en la esquina Este, con un valor de $1.75 \cdot 10^3 \text{N/m}^2$.

28.1.2. RÉGIMEN EXTREMAL

Para el régimen extremal, se utilizaron los siguientes valores:

Altura de ola significativa en profundidades indefinidas	2.25 metros
Período de pico del oleaje en profundidades indefinidas	7 segundos.
Dirección de procedencia del oleaje en profundidades indefinidas	90°
Desviación direccional de la energía en grados	1°
Water Level	0.5 metros
Velocidad del viento	12.5m/s
Dirección de procedencia del viento	67.5°

Tabla 43: Cuadro resumen de valores introducidos para el Régimen extremal

28.1.2.1. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE

Para estos valores, la altura de ola en toda la malla, varía de la siguiente manera:

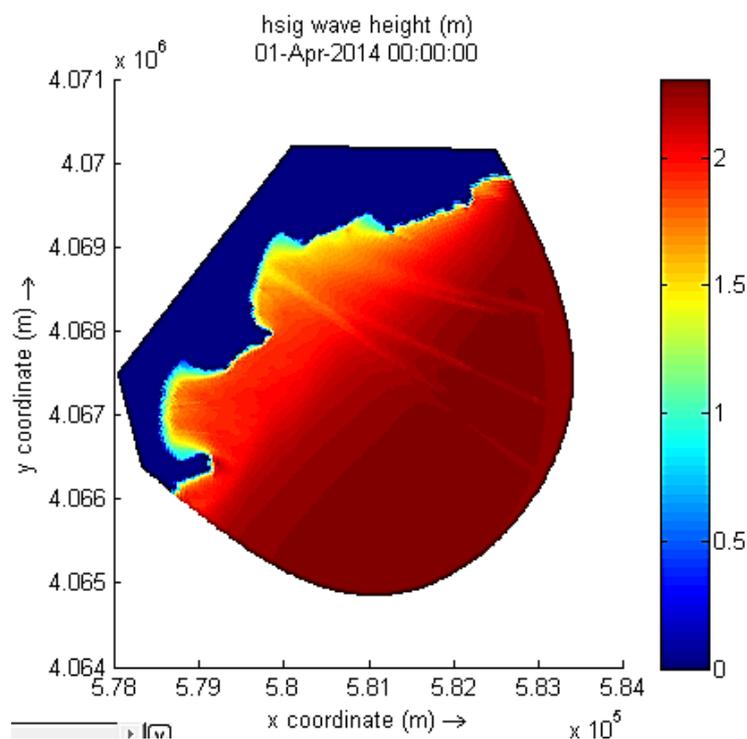
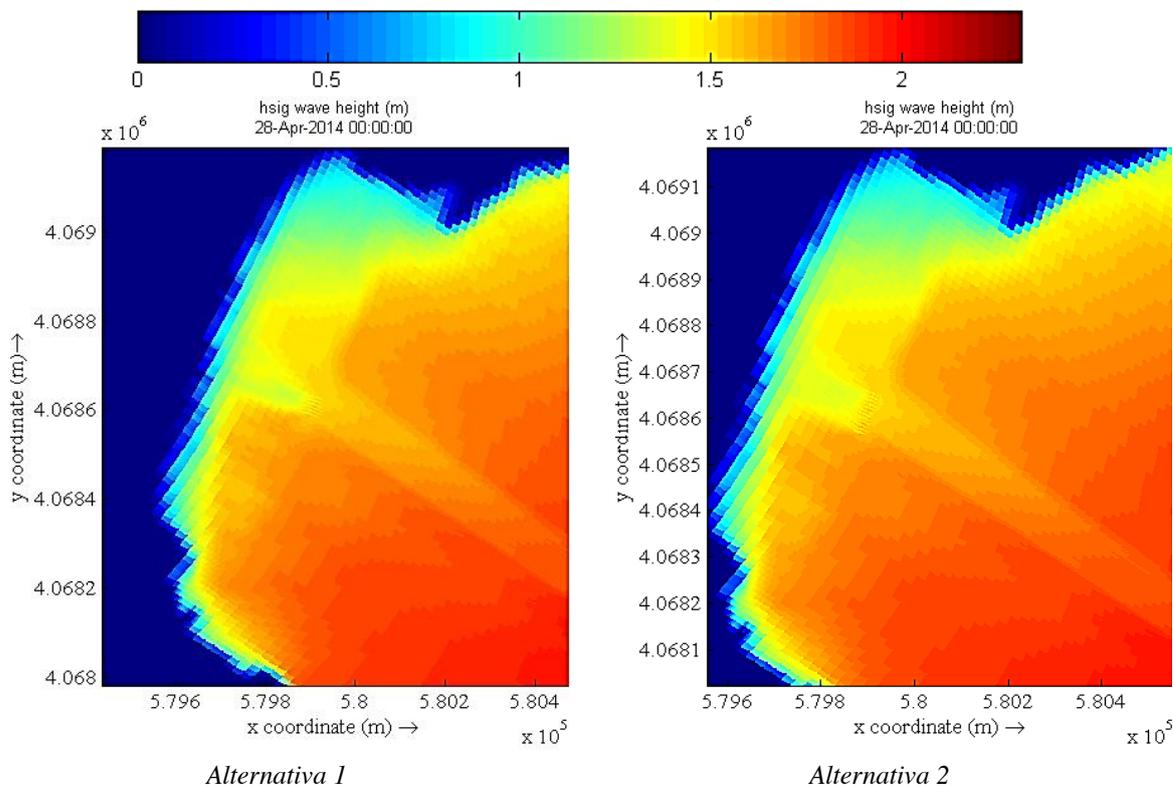


Figura 100: Altura de ola significativa en escenario inicial

En este caso, la altura de ola aumenta hacia la dirección SE. En el cañón en el que se sitúa la estructura, existe un descenso inicial de altura de ola de medio metro. A continuación se analiza, al igual que para el régimen medio, la afección que provoca la instalación del arrecife:



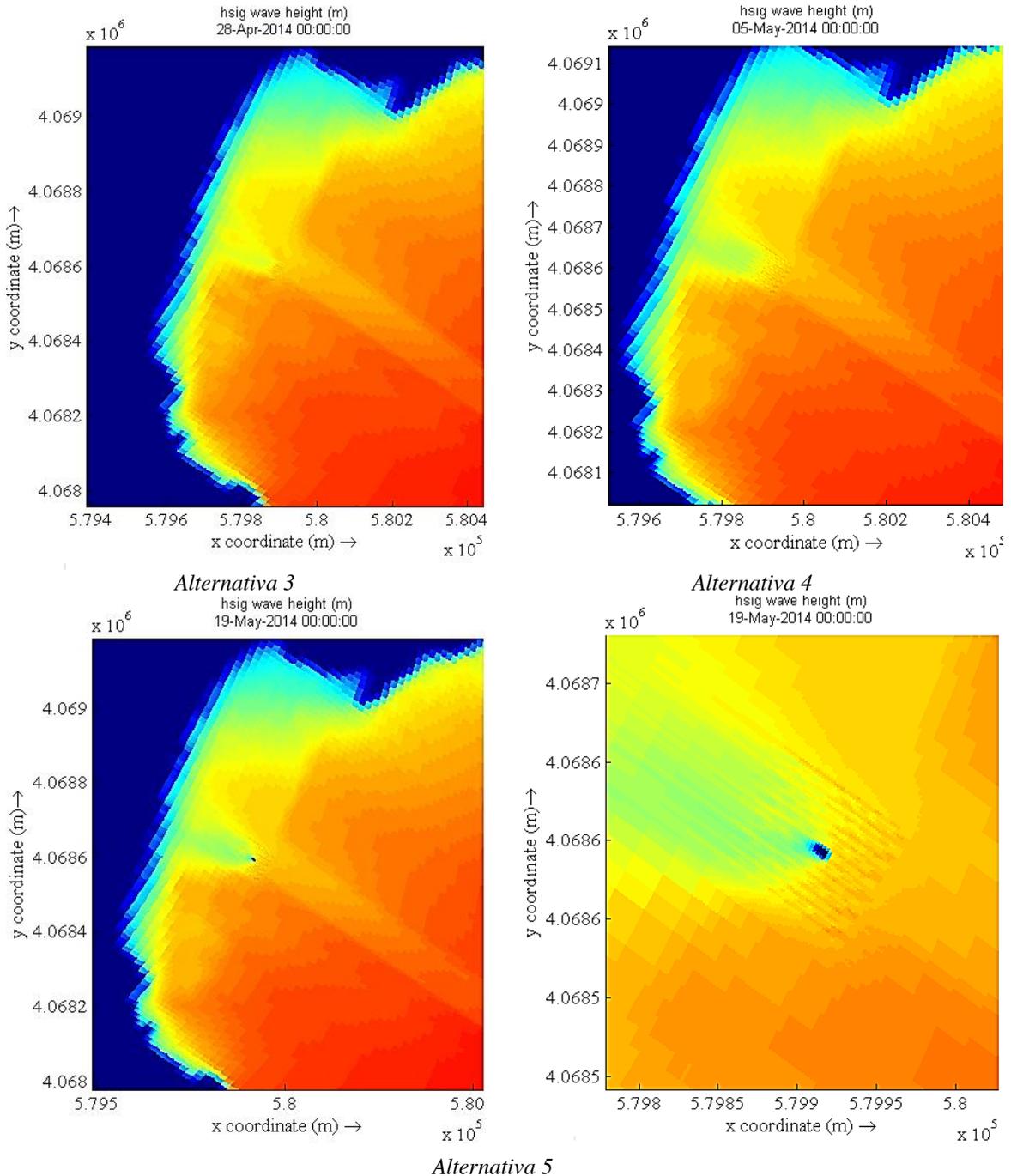


Figura 101: Altura de ola significativa en régimen extremal, este.

En este caso, si se aprecia una mayor reducción en la altura de ola, desde 1.75 metros hasta 1.4 metros aproximadamente. Las dos últimas alternativas se diferencian de las primeras en que la zona afectada es mayor al estar los módulos más espaciados entre ellos.

28.1.2.2. DIFERENCIA DE ALTURA DE OLA

Se muestra ahora los gráficos de la diferencia de altura de ola antes y después de la actuación

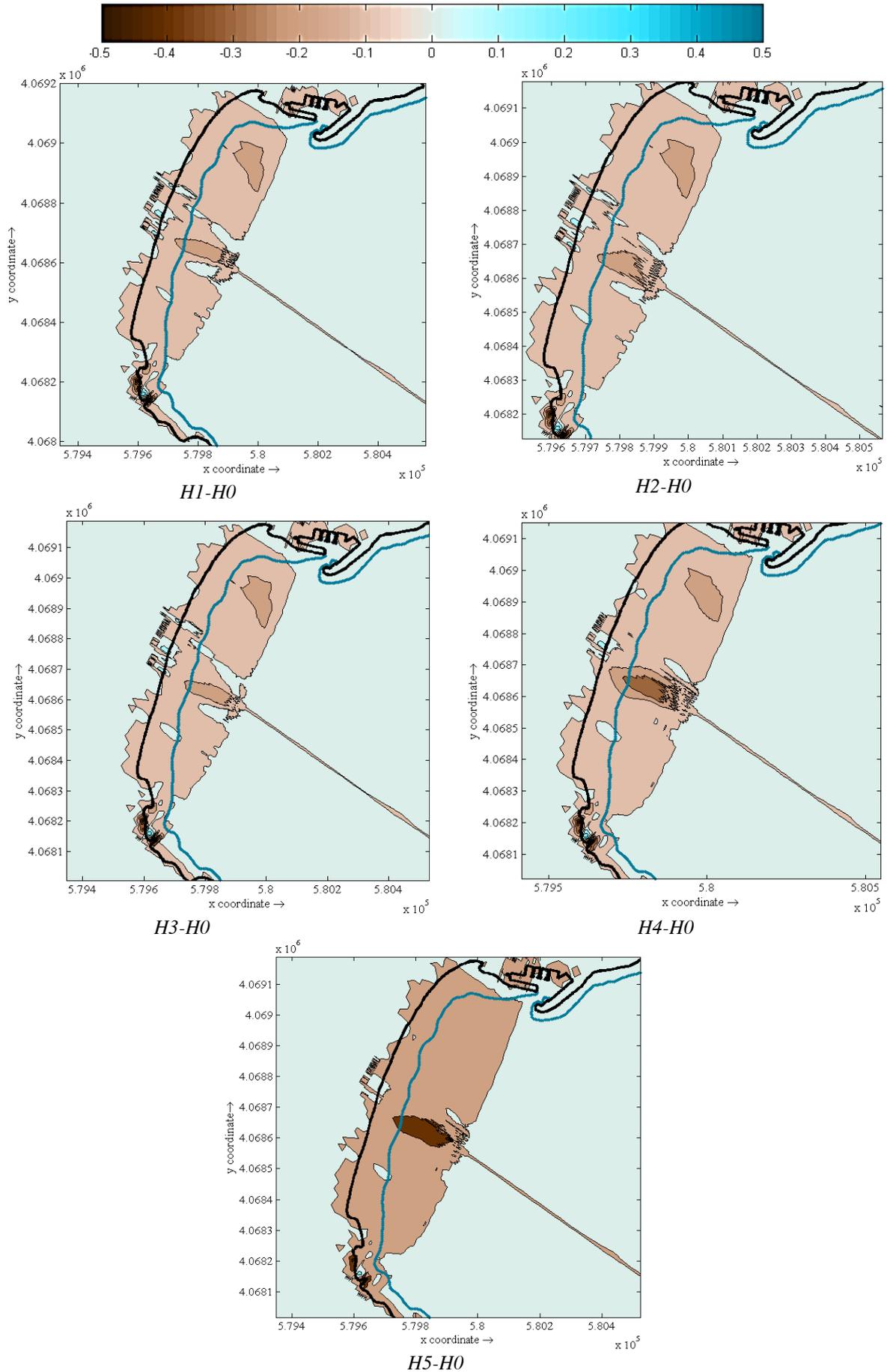


Figura 102: Diferencia de altura de ola en régimen extremal, Este

Para el régimen extremal, los cambios en la altura de ola son mayores, desde los 10cm hasta los 20cm para la quinta alternativa.

A continuación se muestra la reducción de altura de ola para la línea batimétrica de tres metros:

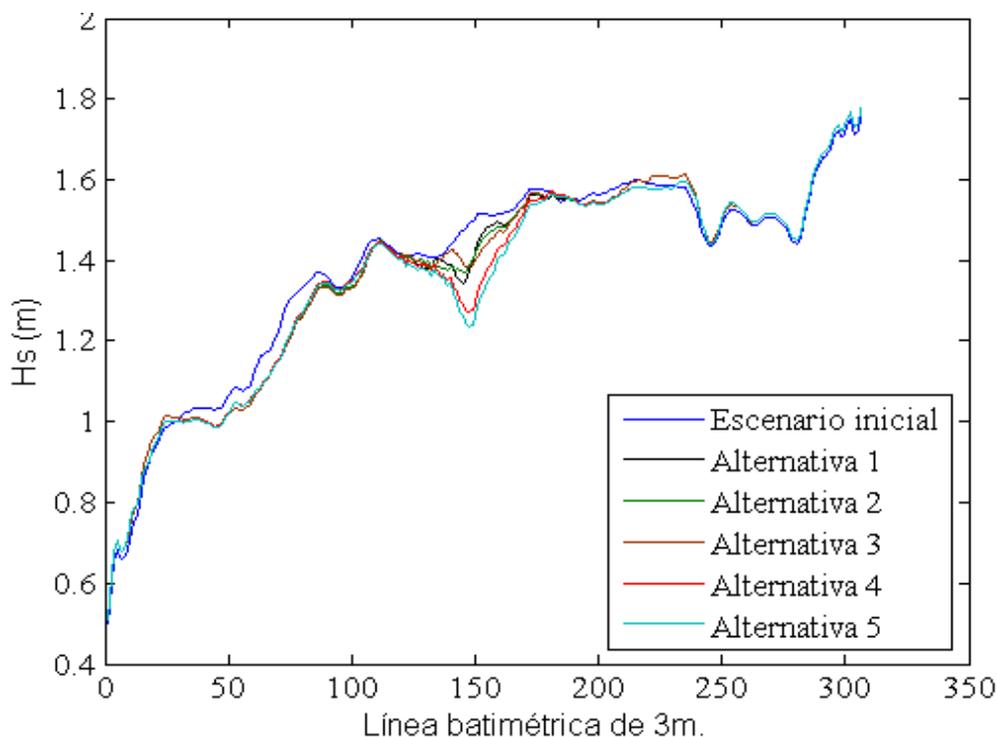
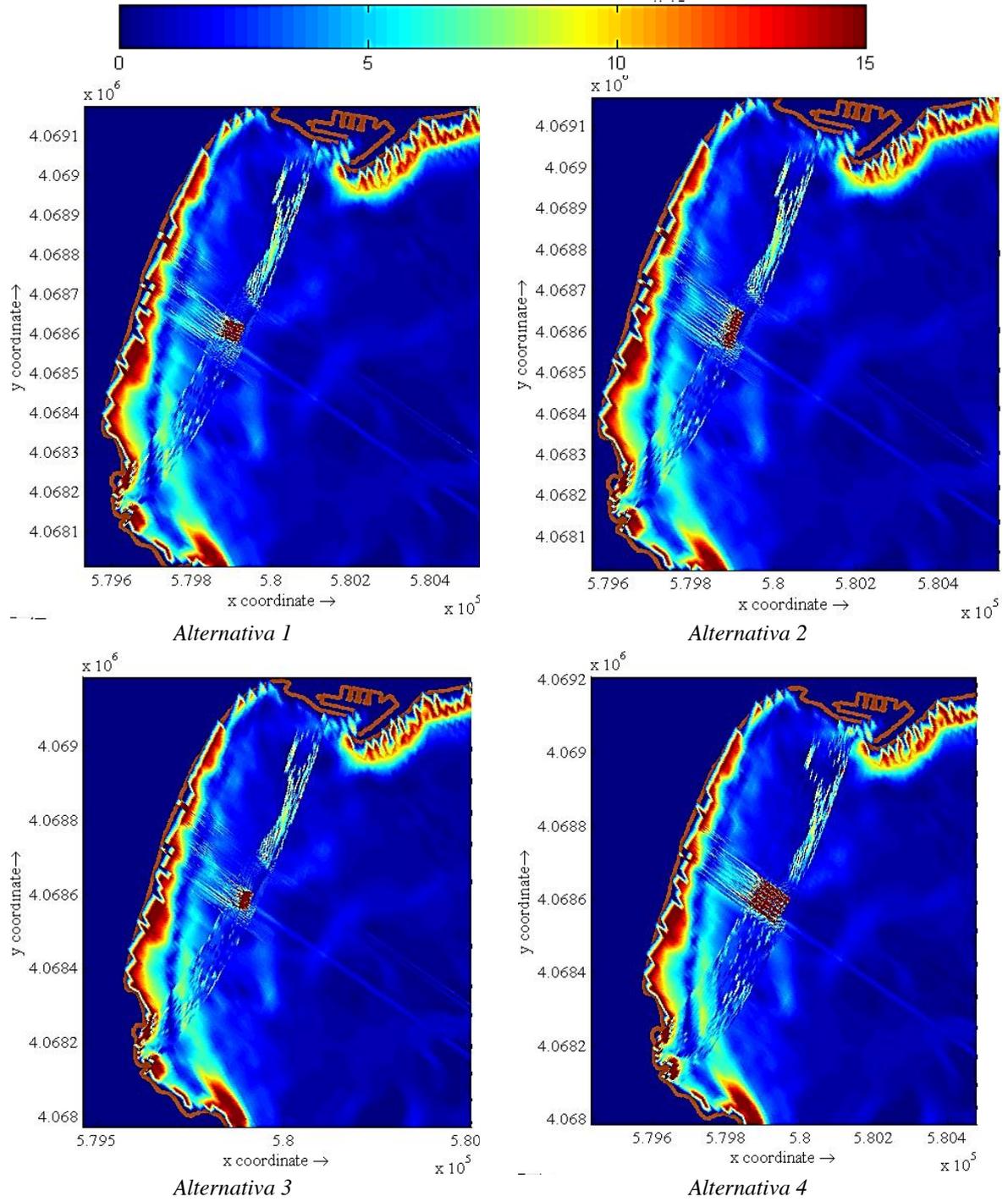


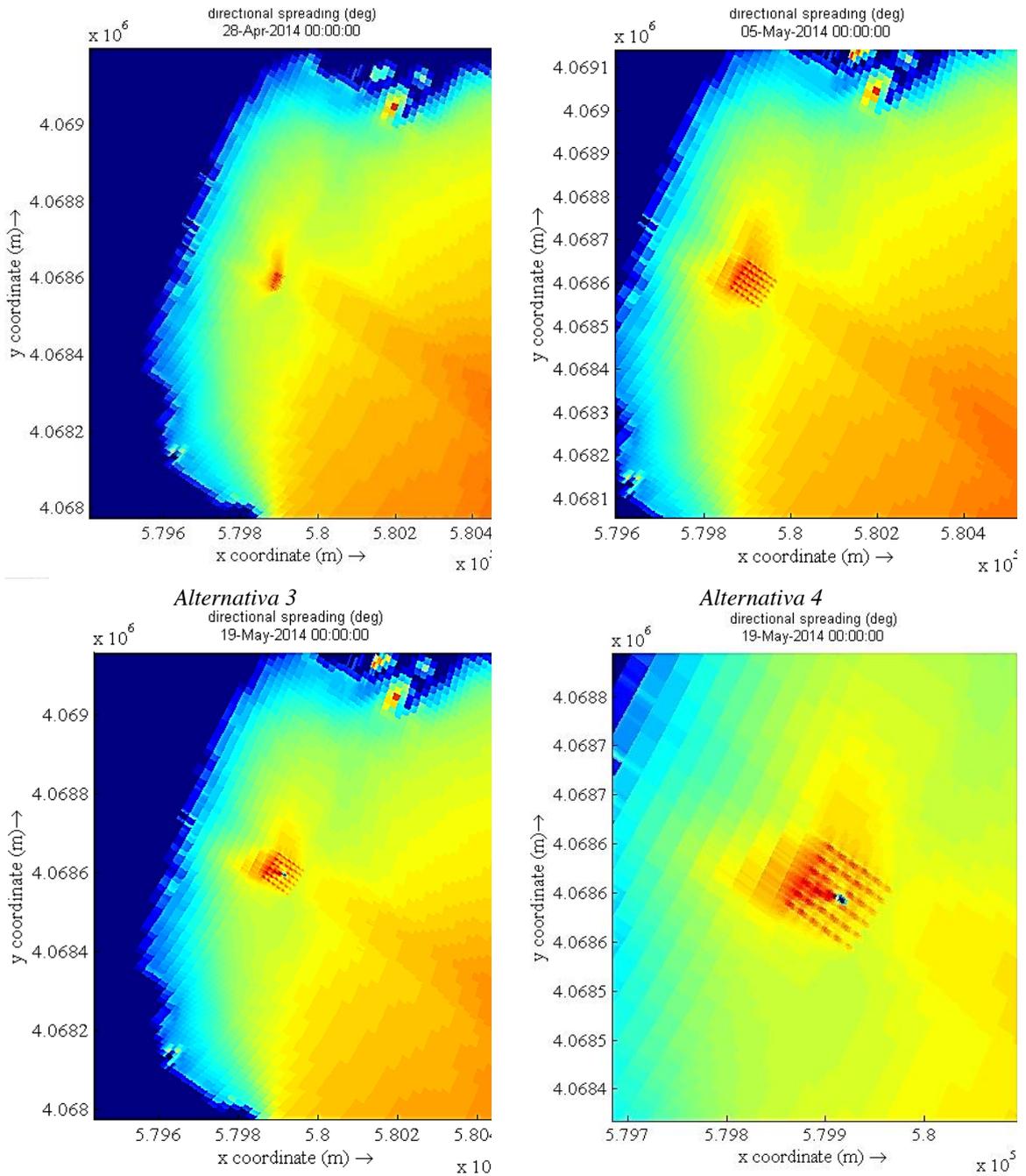
Figura 103: Hs en la línea batimétrica de 3m

Se ve como en el área del arrecife se produce un descenso de la altura de ola. Este descenso se va haciendo mayor desde la primera alternativa hasta la última, que llega a los 15 cm de diferencia con respecto al escenario inicial.

28.1.2.3. FUERZA INDUCIDA POR EL OLEAJE

Se estudia ahora la fuerza que induce el oleaje (N/m^2) en los módulos, en este régimen extremal:





Alternativa 5

Figura 105: Dirección de procedencia del oleaje en régimen extremal, este.

Para este régimen extremal sí que se observa una mayor variación, en torno a los 10° , de la dirección de procedencia del oleaje de las distintas alternativas con respecto al escenario inicial. A continuación se muestra en un gráfico, las variaciones sufridas en la línea batimétrica de 3 metros de profundidad.

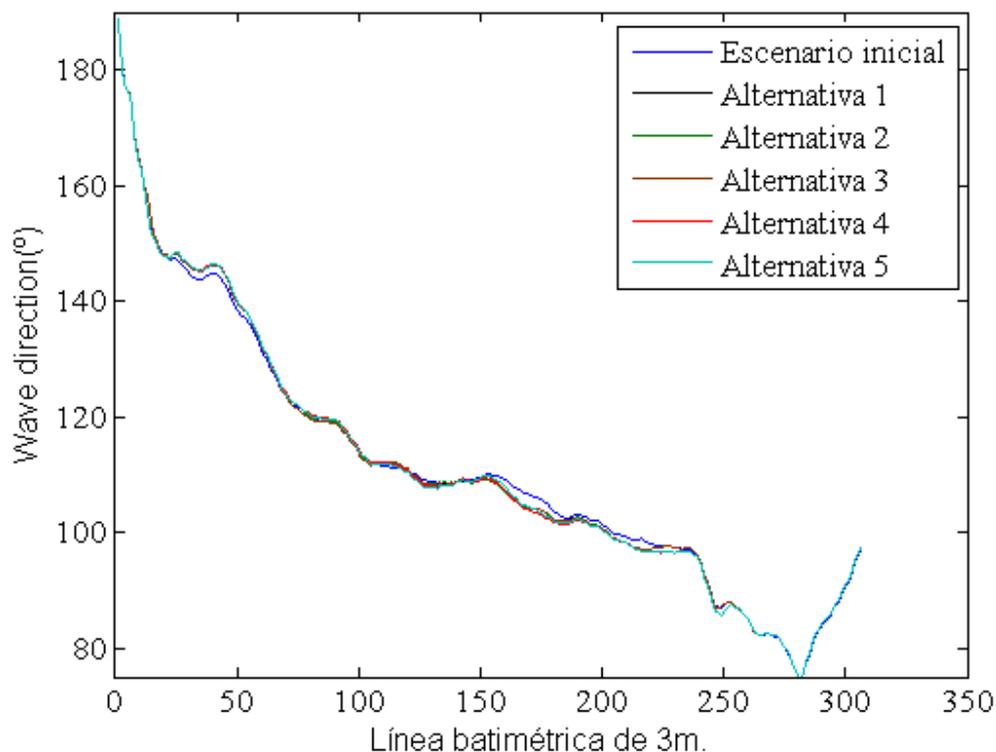


Figura 106: Dirección de procedencia del oleaje (°) en régimen extremal, este

Se ve como a esta altura de la playa, cerca ya de la línea de costa, existe una menor variación de la dirección, de apenas 4°.

28.1.2.5. TENSIÓN TANGENCIAL EN EL FONDO

• **Alternativa 1**

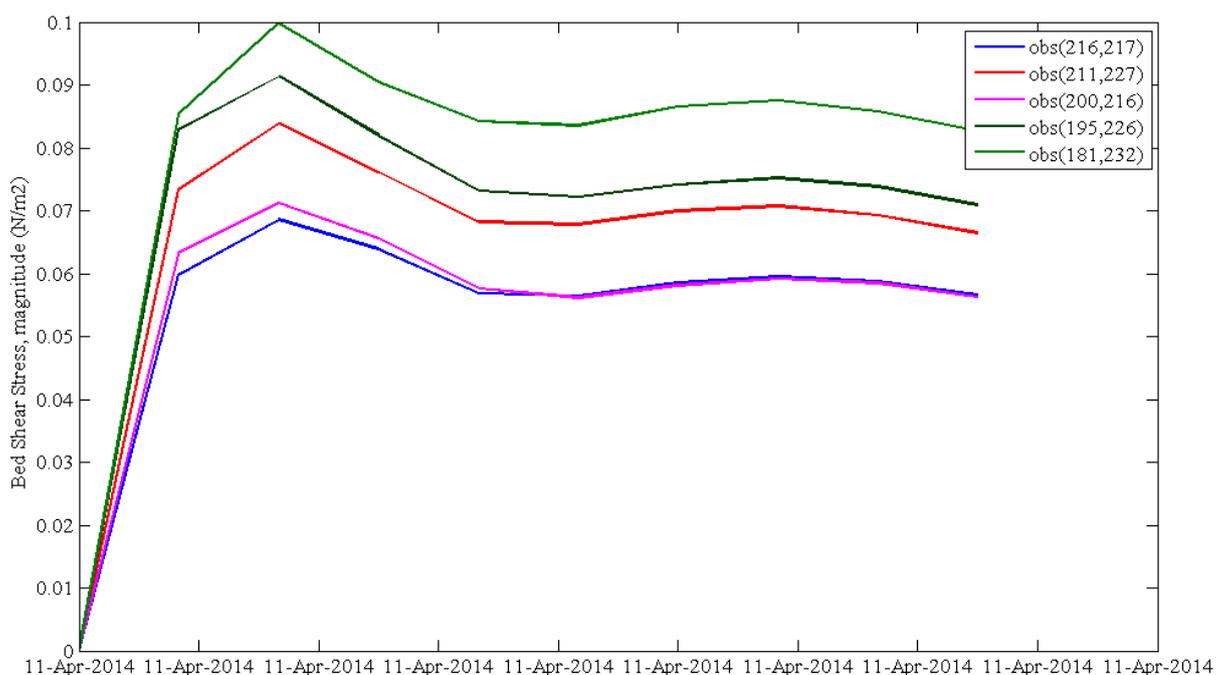


Figura 107: Tensión tangencial de la alternativa 1

Existe un aumento del valor de las tensiones en el régimen extremal. De la misma manera que en el medio, estas tensiones se hacen mayores a medida que se avanza al Oeste.

• **Alternativa 2**

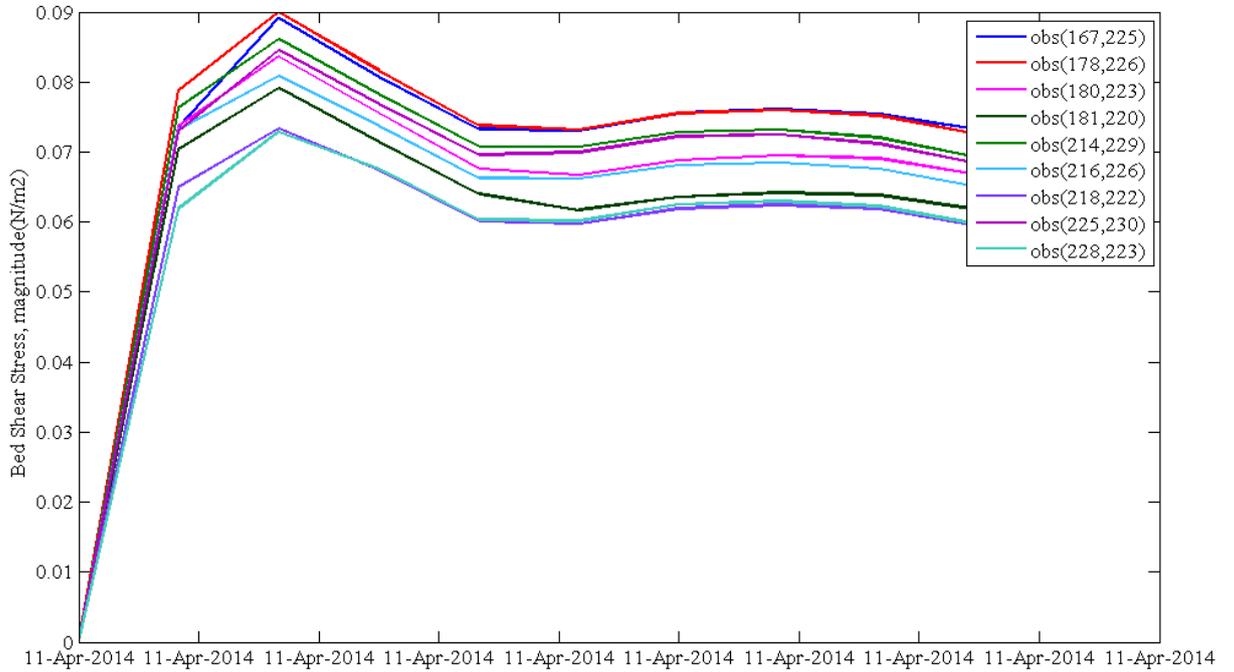


Figura 108: Tensión tangencial de la alternativa 2

En esta vemos que no es el más esquinado el de mayor tensión, sino uno cerca del mismo, aunque seguido casi con los mismos valores del habitual de mayor tensión.

• **Alternativa 3**

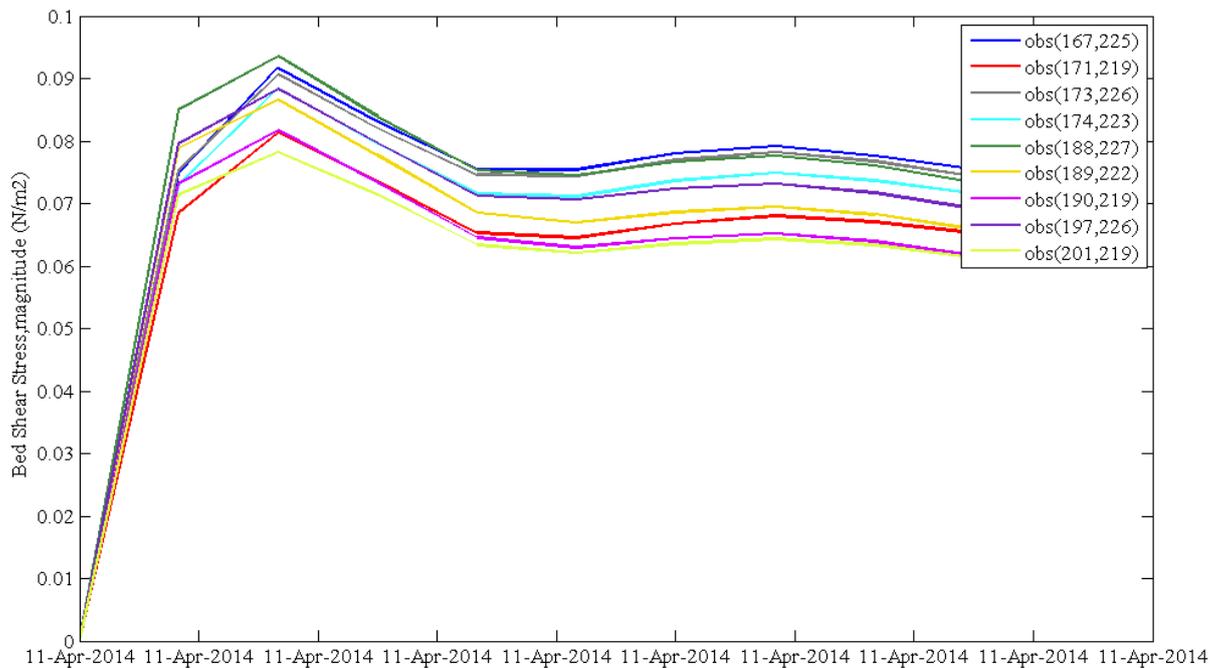


Figura 109: Tensión tangencial de la alternativa 3

Aquí se ve que el módulo “obs (188,227)”, situado hacia la esquina superior, es el que está sometido a mayores fuerzas del oleaje. Va seguido del módulo de la esquina Oeste y el de menores valores, igualmente es el de la esquina Este con unos 0.08N/m² como valor máximo.

• **Alternativa 4**

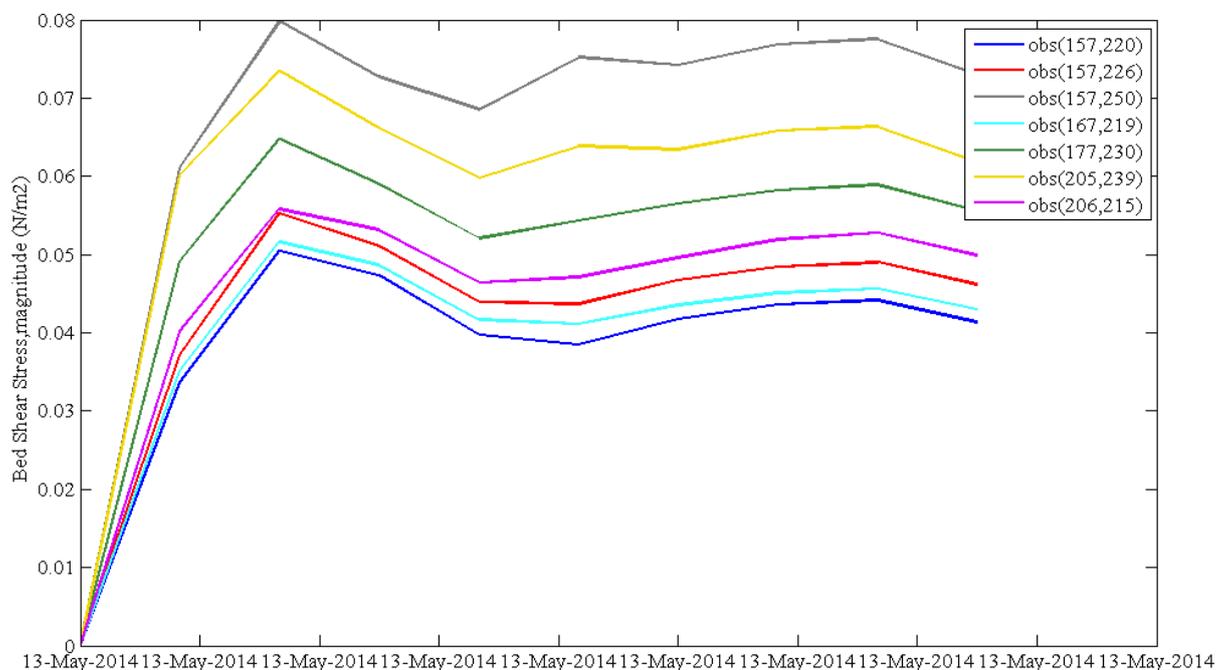


Figura 110: Tensión tangencial de la alternativa 4

A la vistas de las gráficas, se puede concluir que, tanto para régimen extremal como para el medio las tensiones aumentan hacia la dirección principal y por tanto, serán esos módulos que estén situados en las esquinas Este de las alternativas, los que deberán tener una mejor cimentación.

28.2. DIRECCIÓN SUR

De la misma manera que con la dirección este, se procede a analizar los parámetros descritos anteriormente y ver si existe una diferencia significativa.

28.2.1. RÉGIMEN MEDIO

Los valores introducidos en el Wavecom, para simular los casos de esta dirección son los siguientes:

Altura de ola significativa en profundidades indefinidas	0.5 metros
Período de pico del oleaje en profundidades indefinidas	5s
Dirección de procedencia del oleaje en profundidades indefinidas	180°
Desviación direccional de la energía en grados	1°
Water Level	0.5 metros
Velocidad del viento	6m/s
Dirección de procedencia del viento	2477.5°

Tabla 44: Datos introducidos en el Wavecom.

28.2.1.1. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE

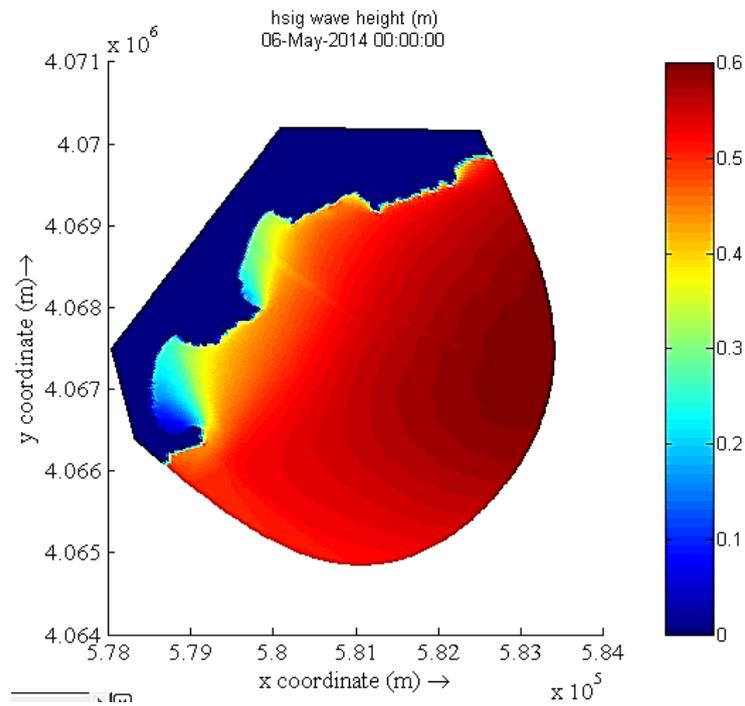
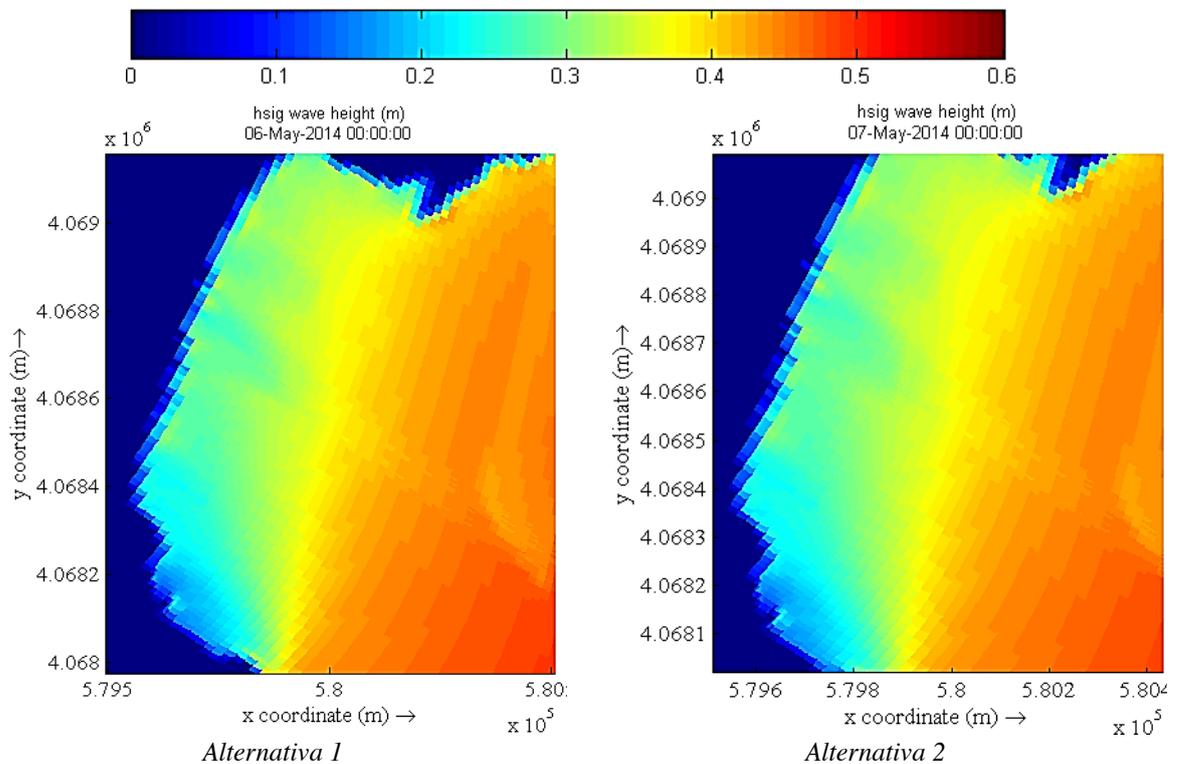


Figura 111: Altura de ola significativa en escenario inicial

En este caso, la altura de ola aumenta hacia el oeste. Se ve como ambas playas, Genoveses y San José, están resguardadas al venir el oleaje del sur.



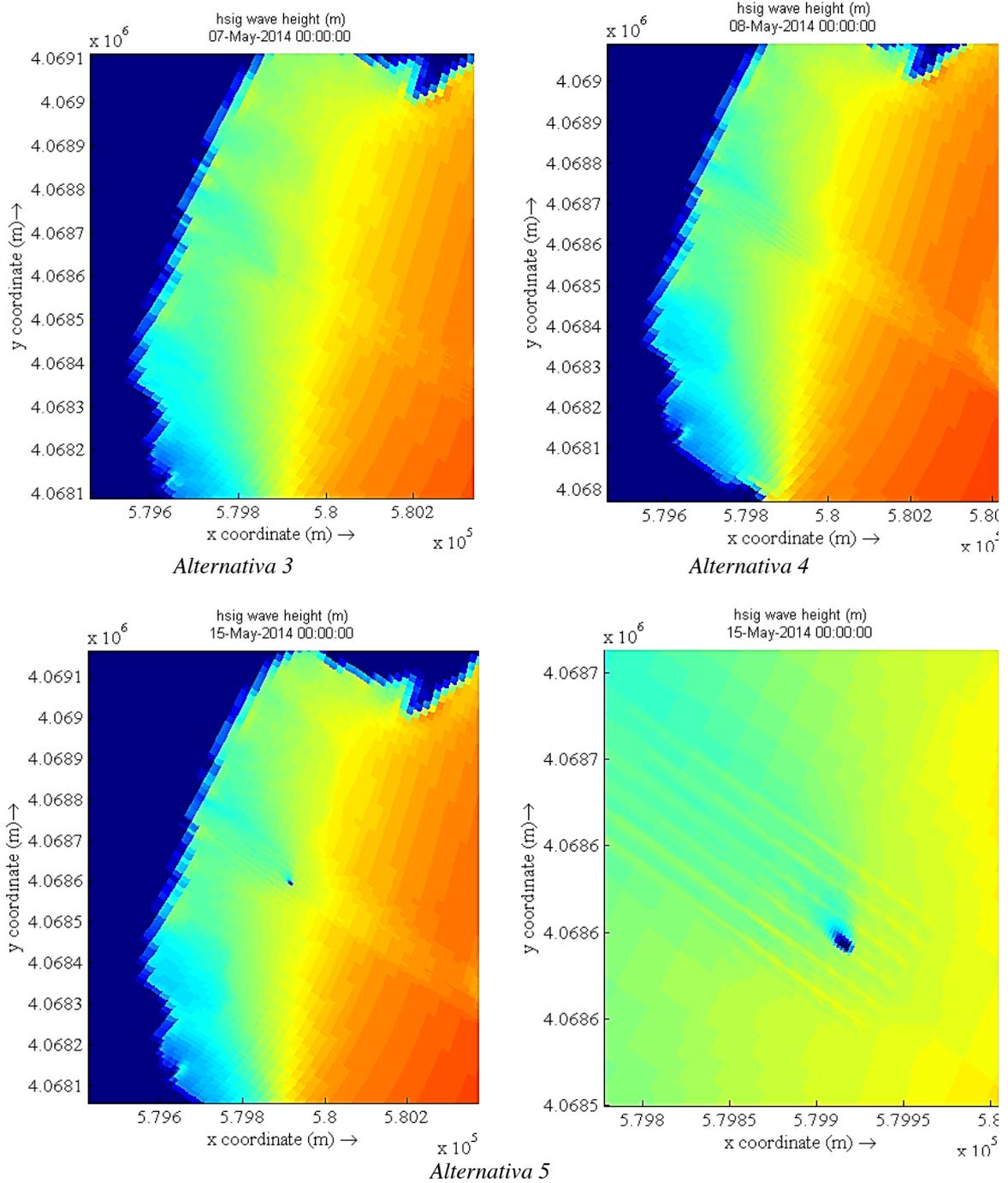
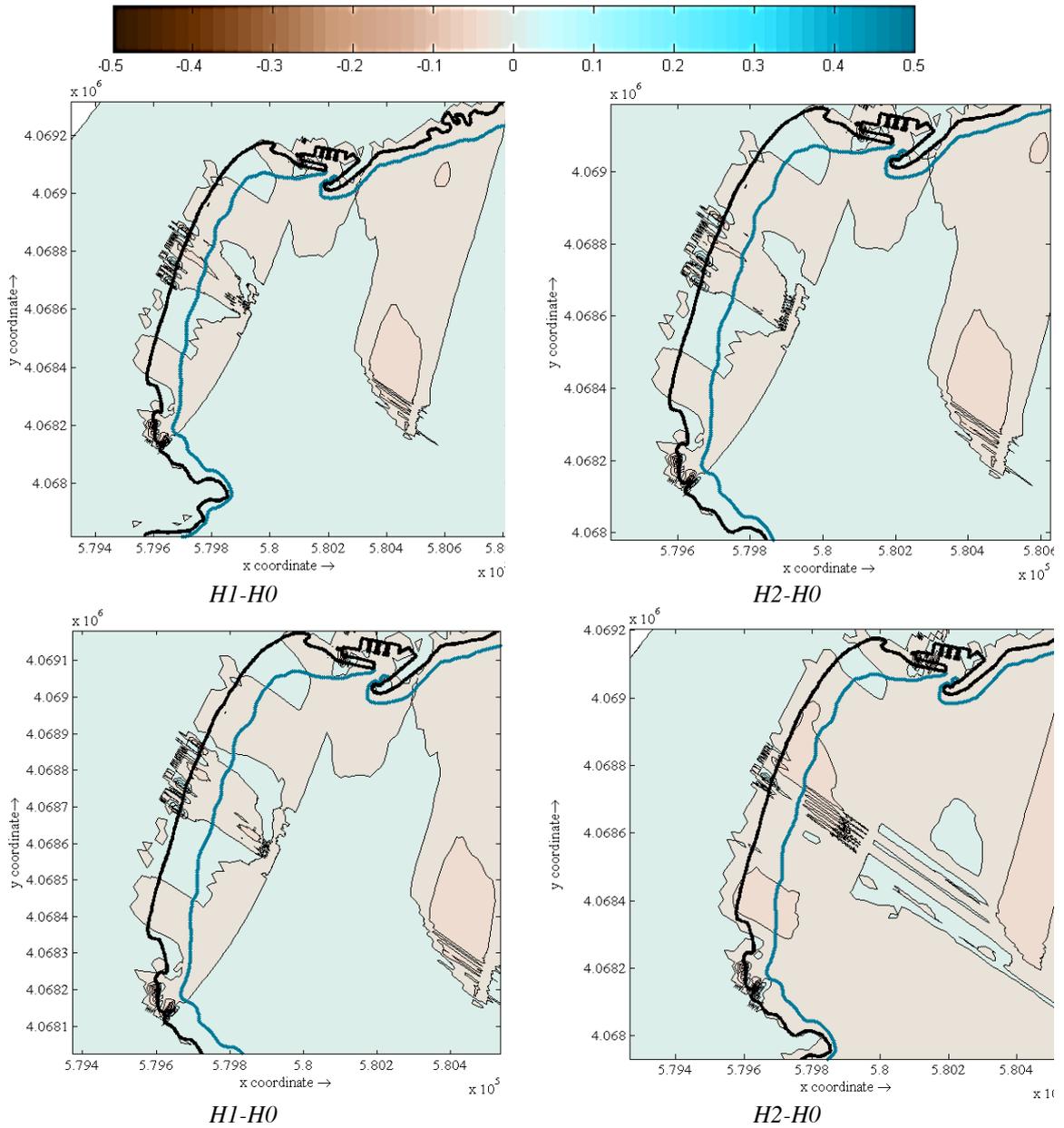


Figura 112: Altura de ola significativa en régimen medio, sur.

Se ve una reducción desde los 0.375 metros a los 0.3 metros aproximadamente, y hasta los 0.2m en la última.

28.2.1.2. DIFERENCIA DE ALTURAS DE OLA



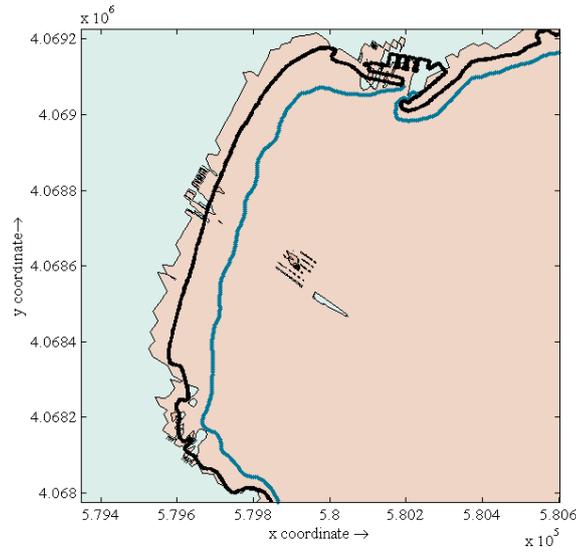


Figura 113: Diferencia de altura de ola en régimen medio, sur.

Se aprecian reducciones de unos 2cm, hasta los 10 cm en la última alternativa.

28.2.1.1. ALTURA DE OLA DE LAS ALTERNATIVAS CON RESPECTO A LA DEL ESCENARIO INICIAL

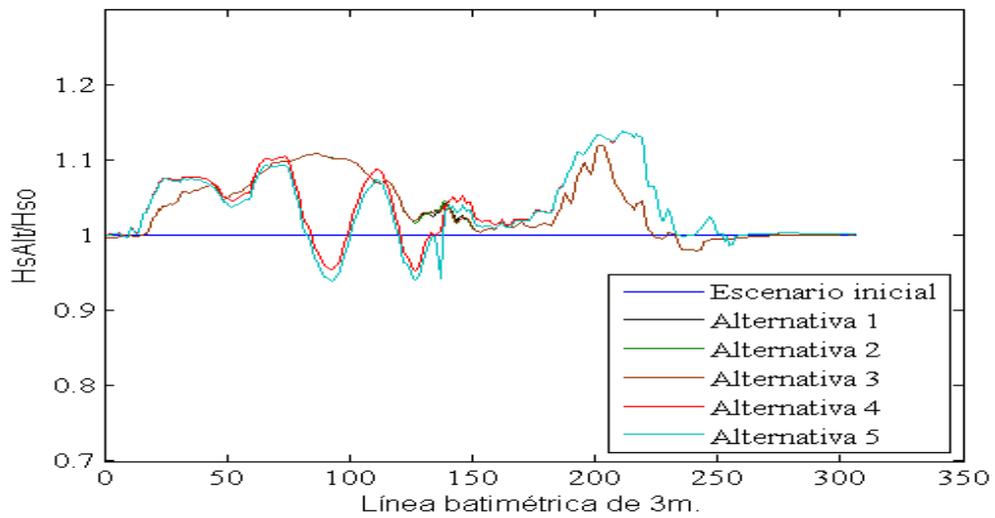


Figura 114: $T_p=2s$

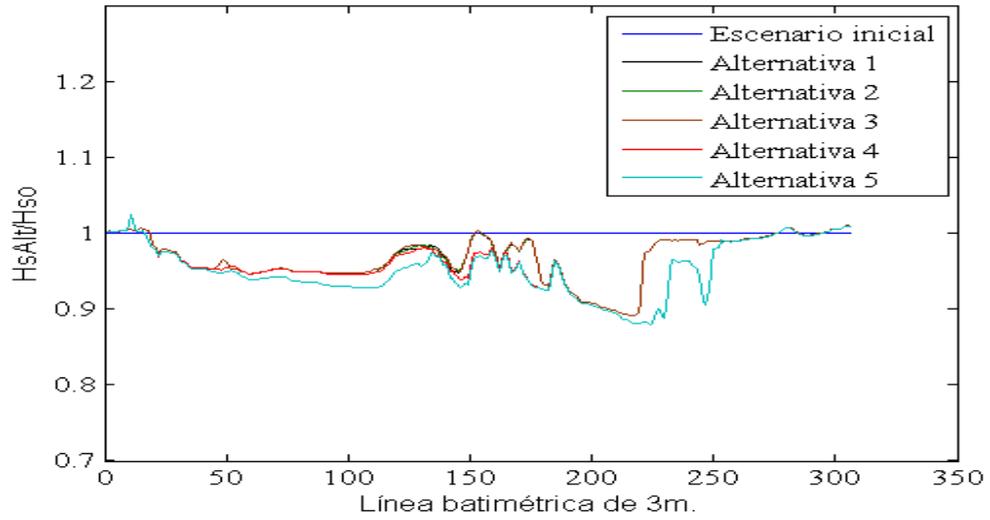


Figura 115: $T_p=3s$

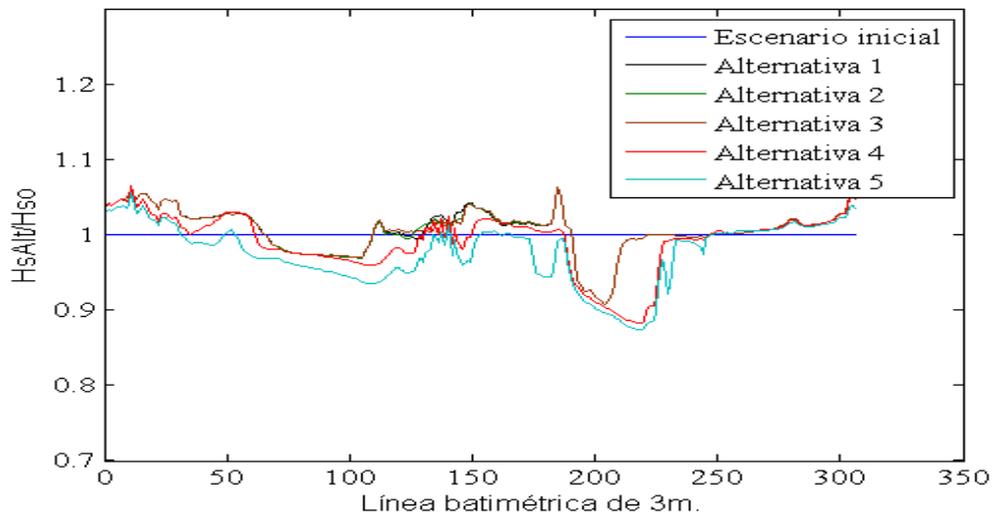


Figura 116: $T_p=4s$

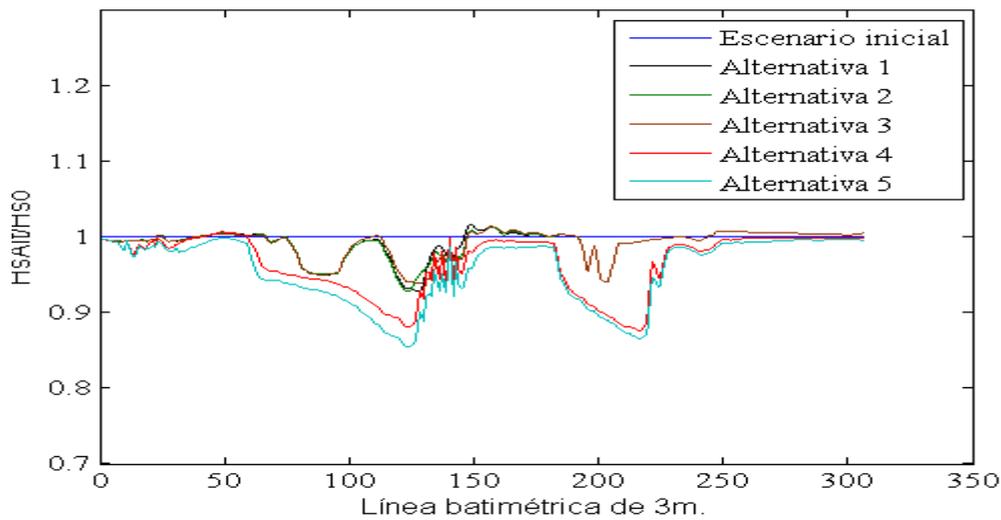


Figura 117: $T_p=5s$

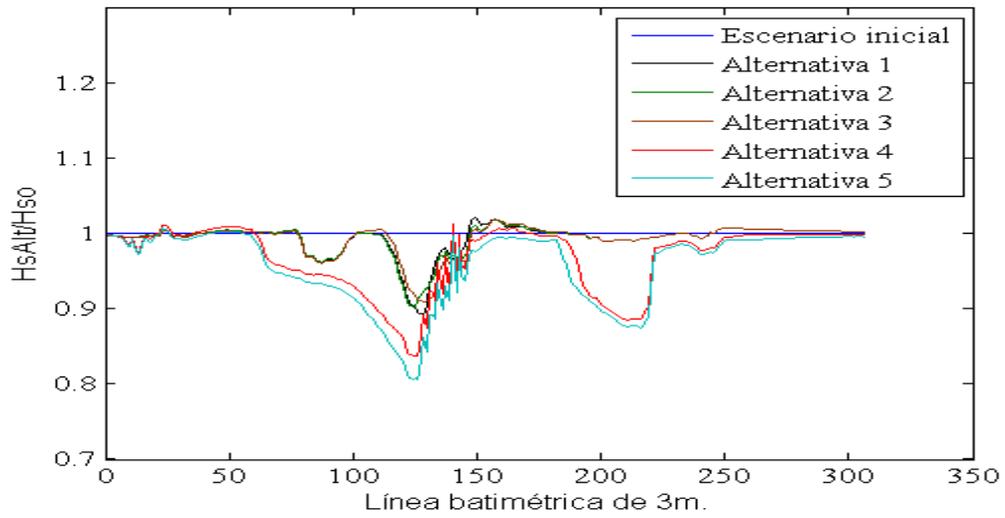


Figura 118: $T_p=6s$

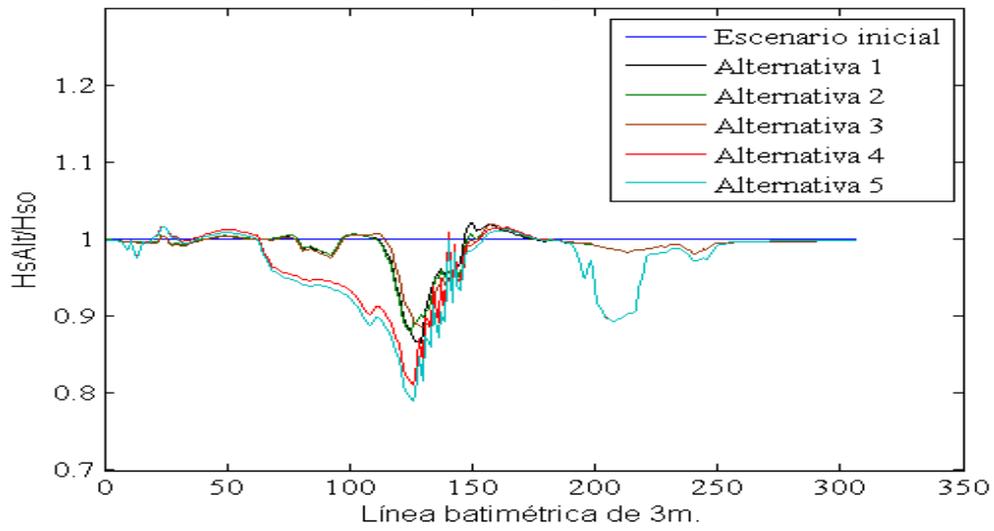


Figura 119: $T_p=7s$

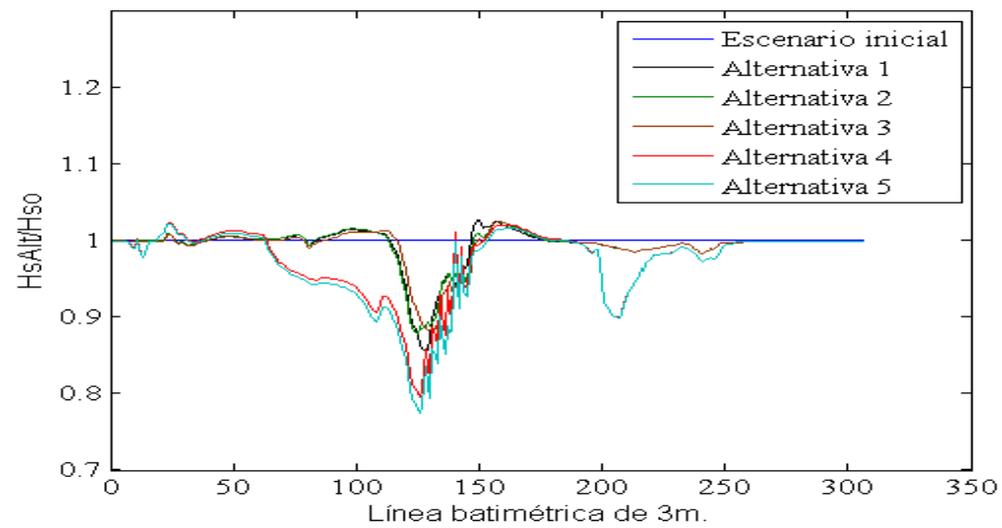


Figura 120: $T_p=8s$

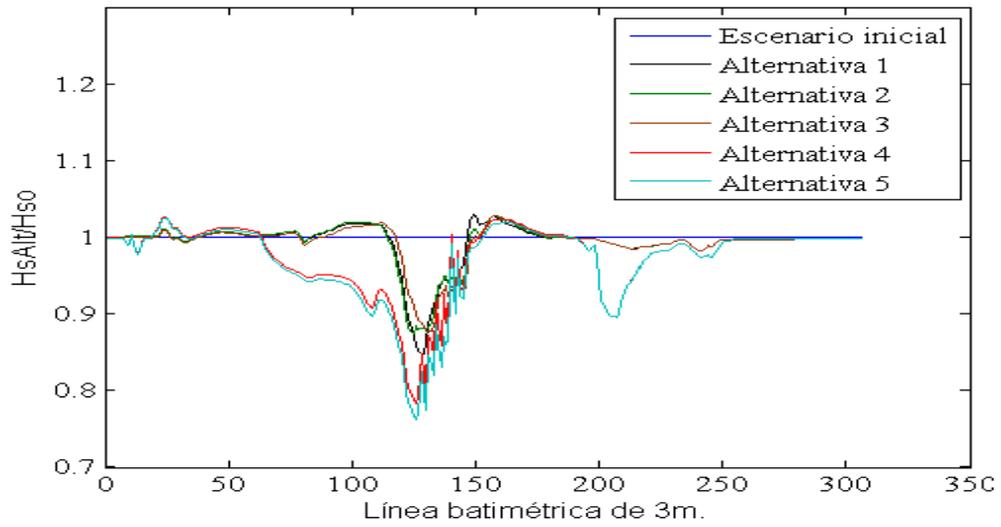


Figura 121: $T_p=9s$

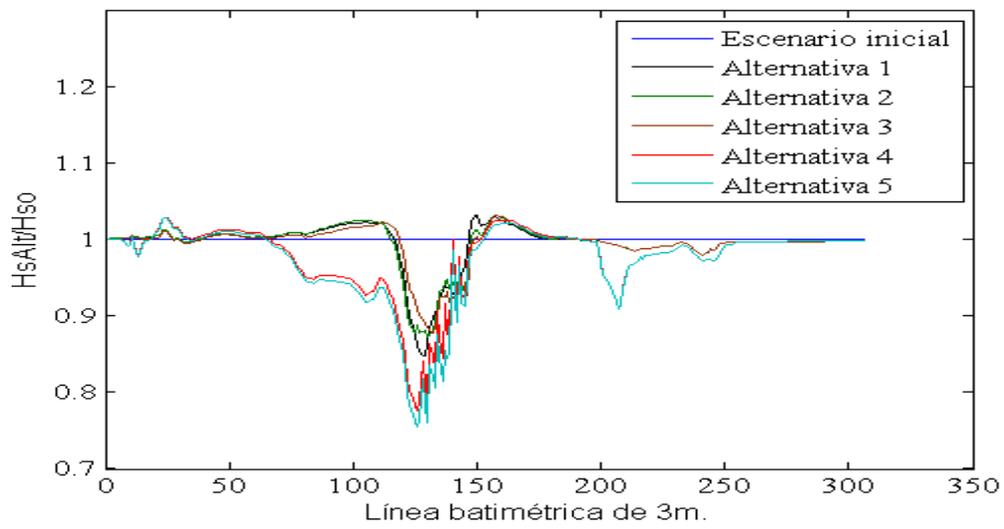


Figura 122: $T_p=10s$

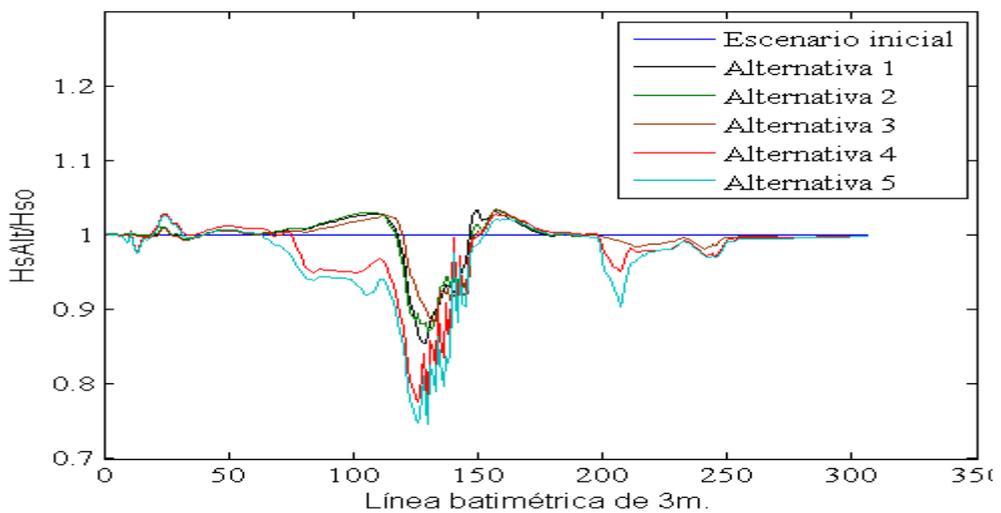


Figura 123: $T_p=11s$

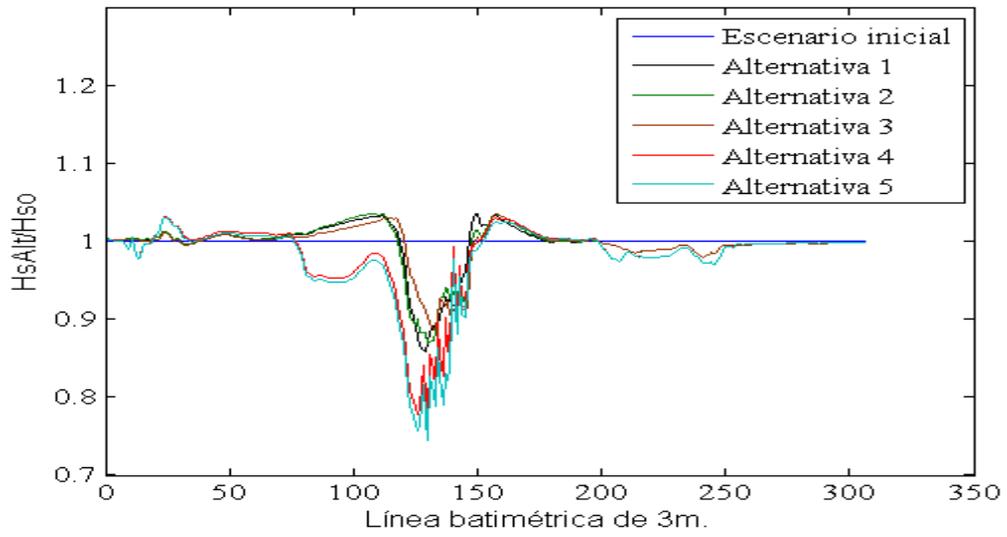


Figura 124: $T_p=12s$

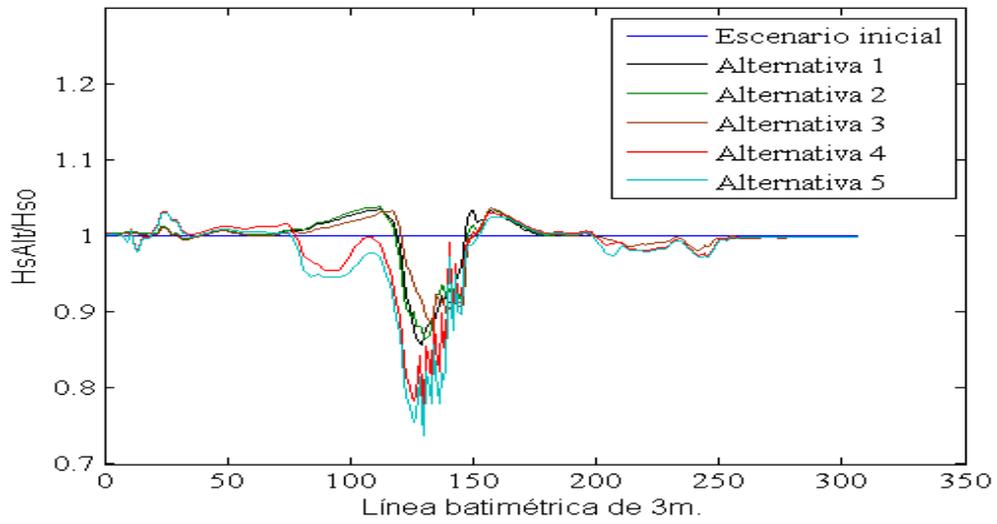


Figura 125: $T_p=13s$

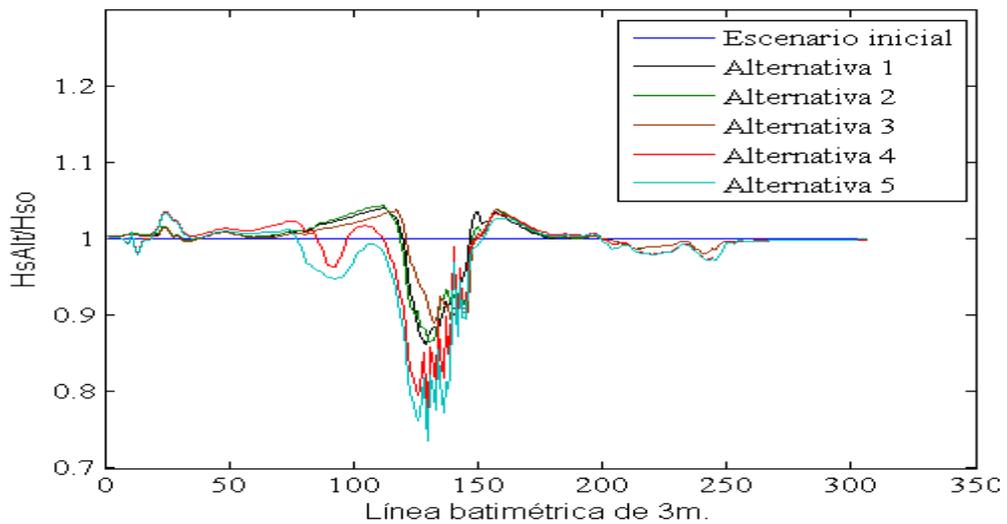


Figura 126: $T_p=14s$

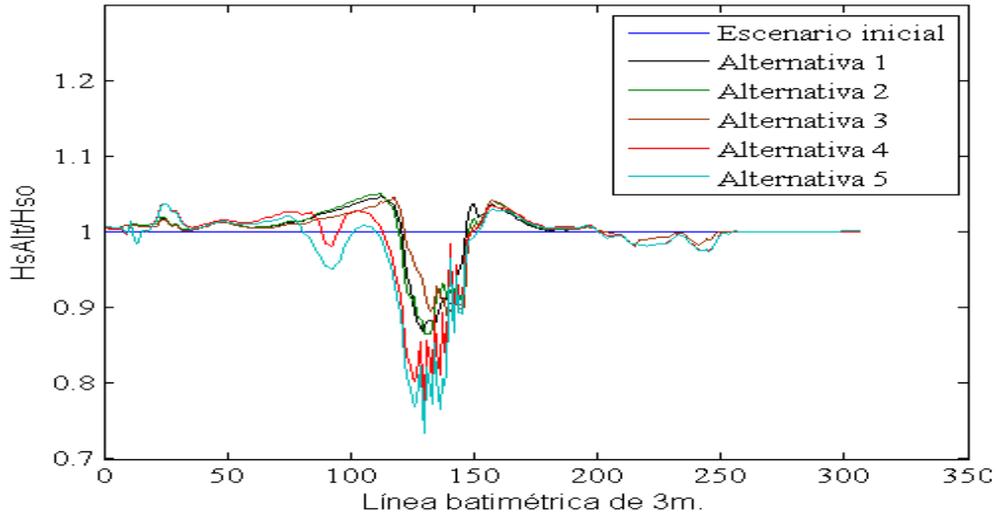
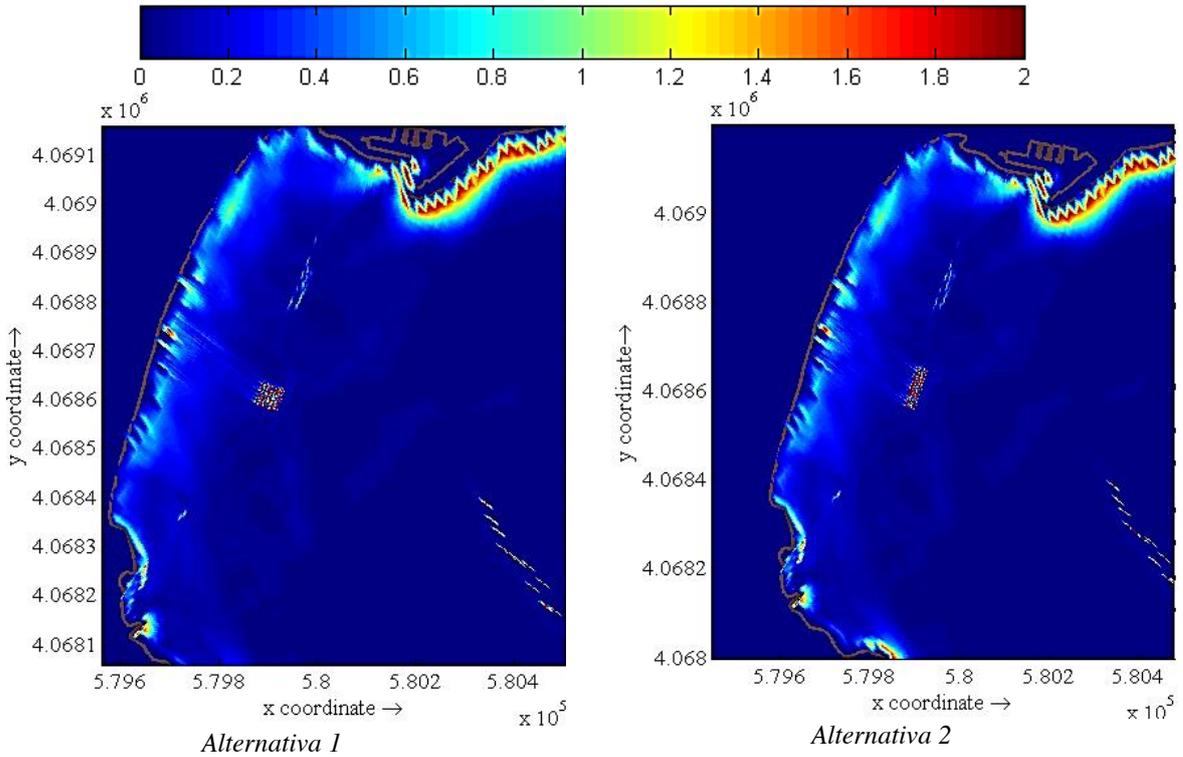


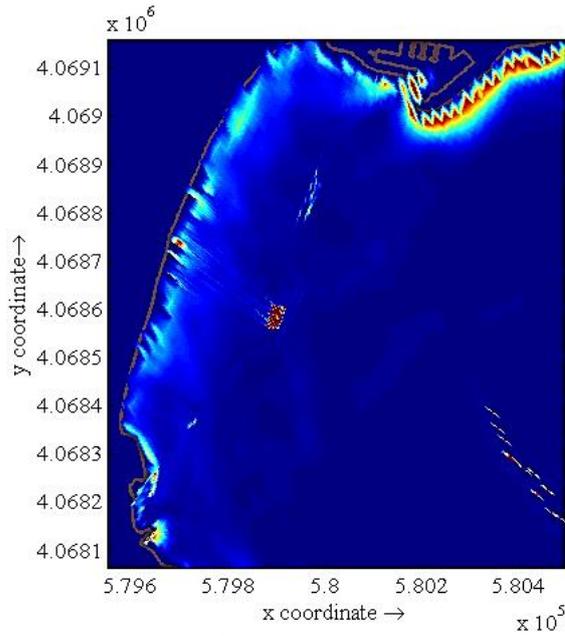
Figura 127: $T_p=15s$

Para los períodos más bajos, la reducción de la altura de ola es del orden del 10%, siendo la mayor para la alternativa 5 y la menor para las tres primeras, que provocan valores muy similares entre sí. A partir de los 7 segundos, se ve como la altura de ola aumenta un 5% en los bordes del área que ocupa el arrecife, para las tres primeras alternativas. En las dos últimas, sin embargo, no se presenta este aumento, hasta llegado los 14 segundos. En la última grafica se ve como la altura de ola se reduce hasta en un 25%, a su paso por los módulos de la quinta alternativa.

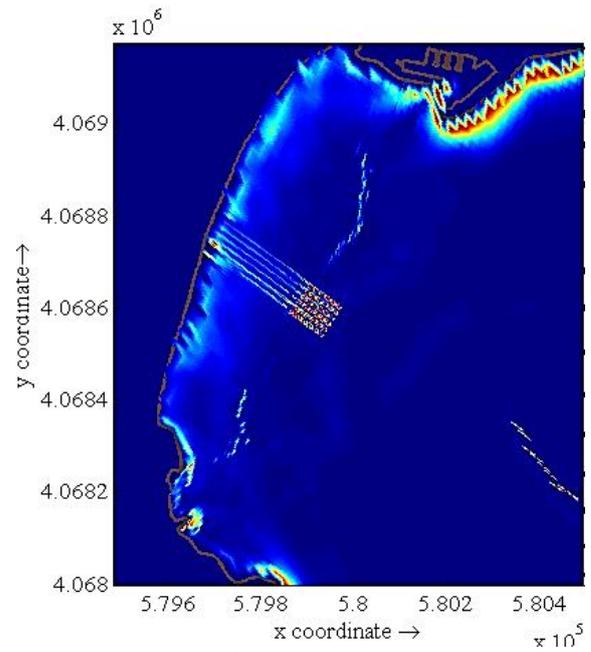
28.2.1.2. FUERZA INDUCIDA POR EL OLEAJE

Se analiza la fuerza inducida por el oleaje en (N/m^2):

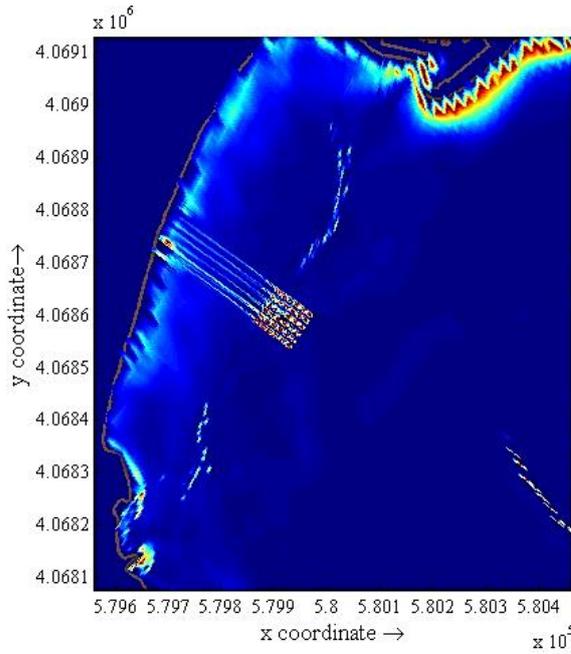




Alternativa 3



Alternativa 4



Alternativa 5

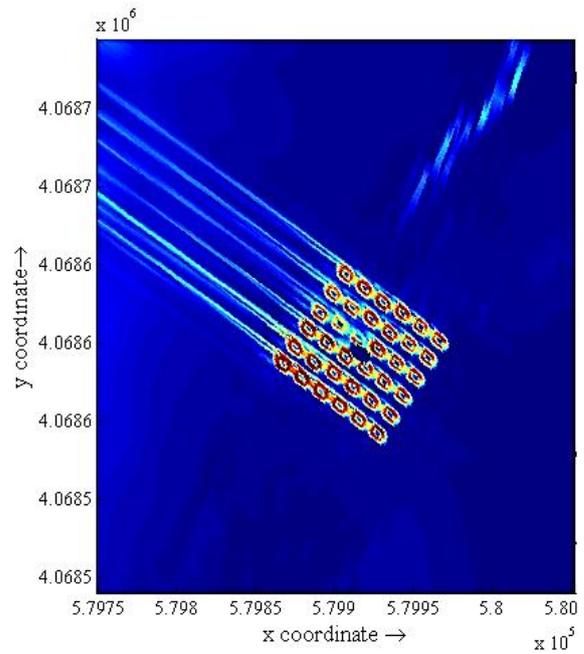
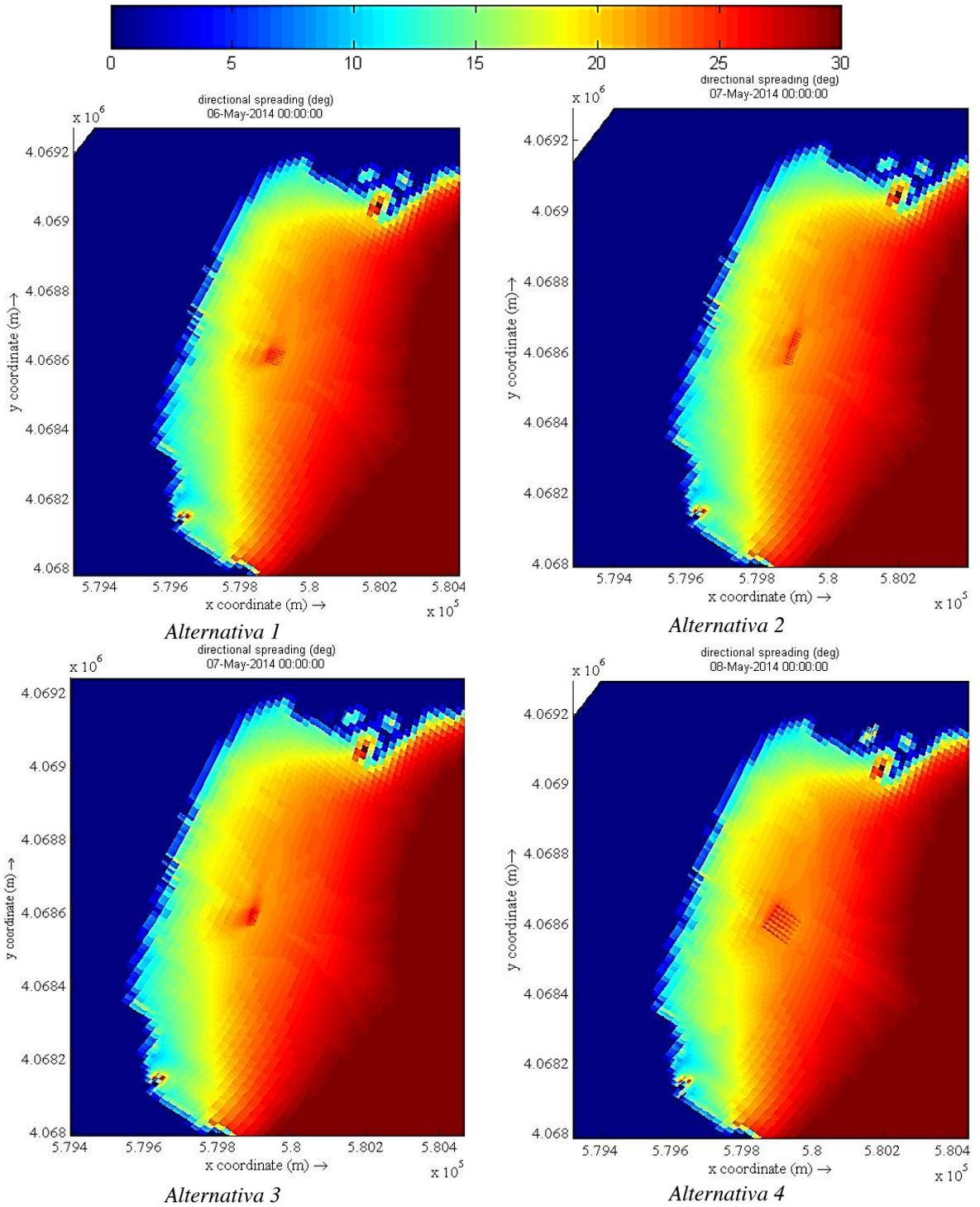


Figura 128: Fuerza inducida por el oleaje en régimen medio, sur.
La fuerza que se produce en los módulos arrecifales, es del orden de los 2.5N/m^2 .

28.2.1.3. DIRECCIÓN DE PROCEDENCIA DEL OLAJE



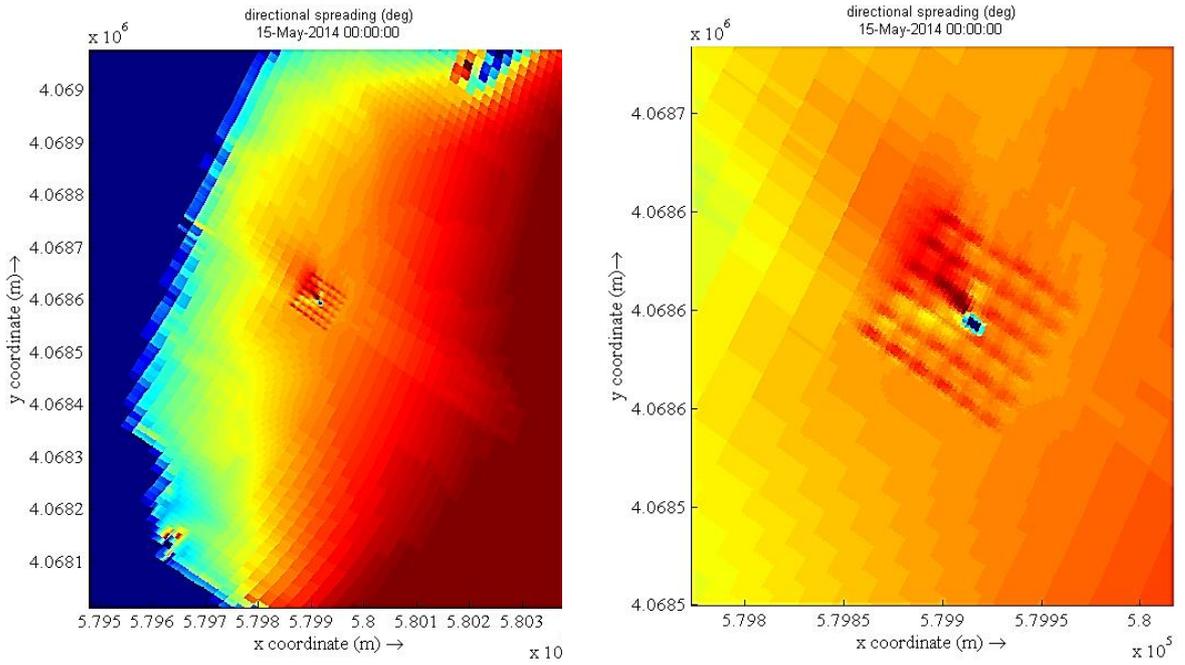


Figura 129: Dirección de procedencia del oleaje en régimen medio, sur.

Se aprecian unas variaciones de dirección desde los 5° en la alternativa 1, hasta los 7.5° en la última.

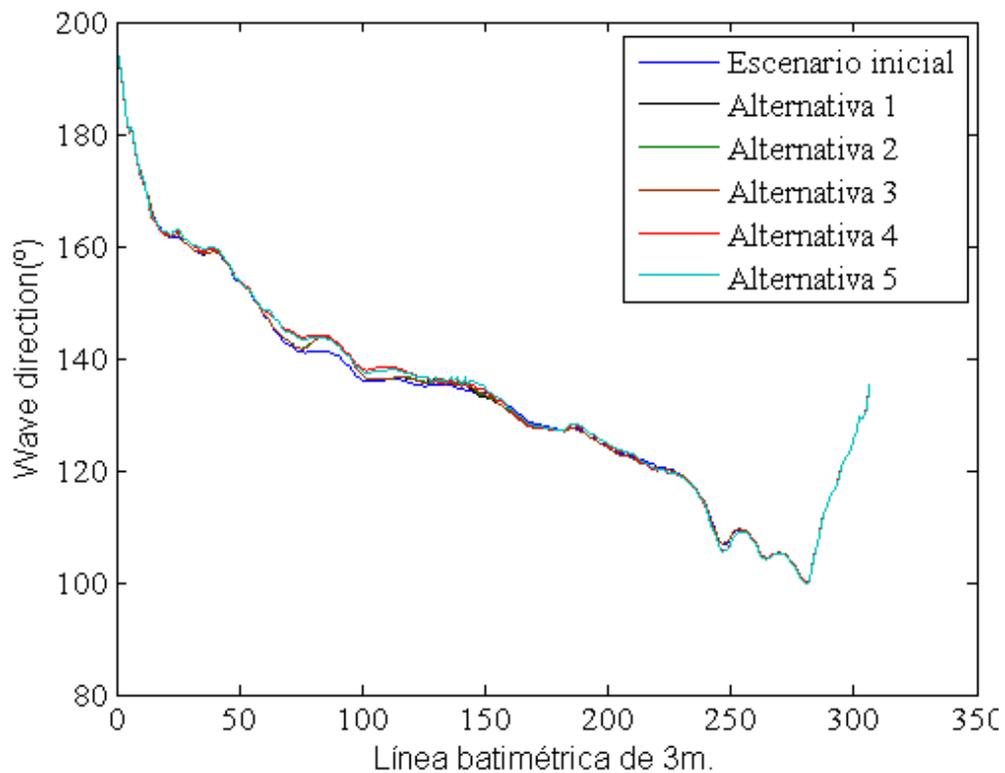


Figura 130: Dirección del oleaje (°) en régimen medio, sur

Como se ve en esta última gráfica, el cambio de dirección es casi nulo, 2°, fuera ya de la zona de influencia del arrecife.

28.2.1.4. TENSIÓN TANGENCIAL EN EL FONDO

• **Alternativa 1**

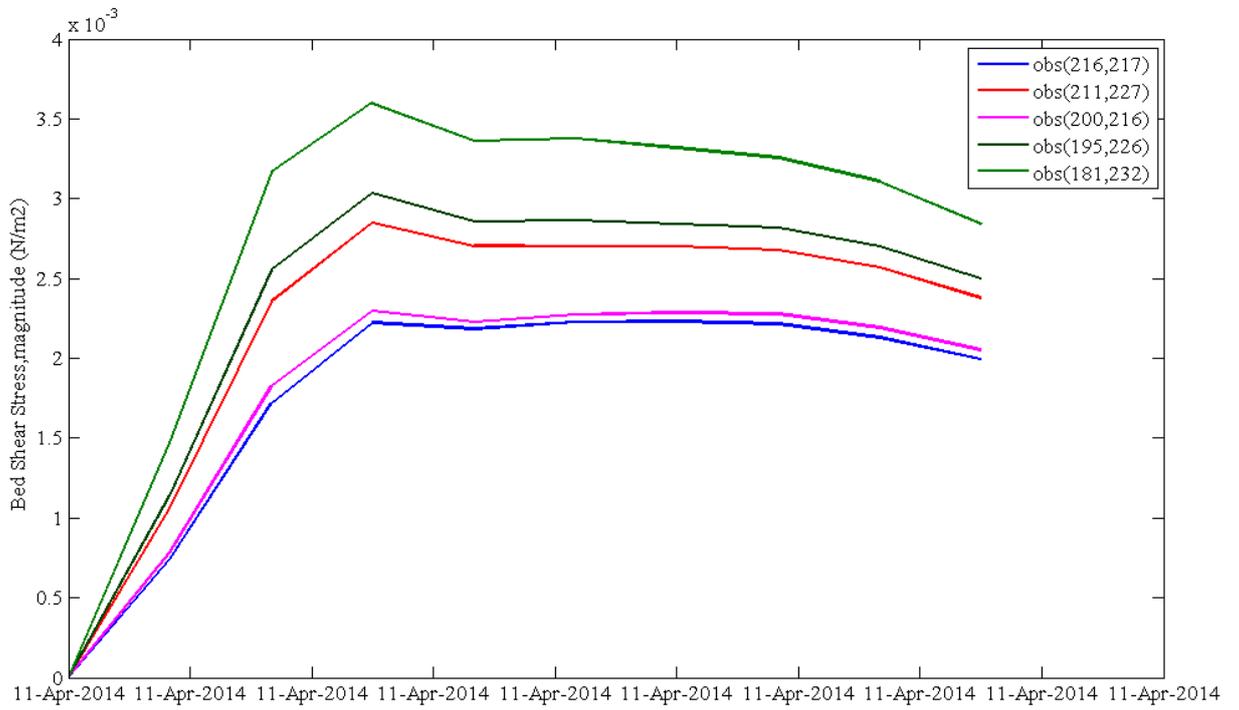


Figura 131: Tensión tangencial de la alternativa 1

• **Alternativa 2**

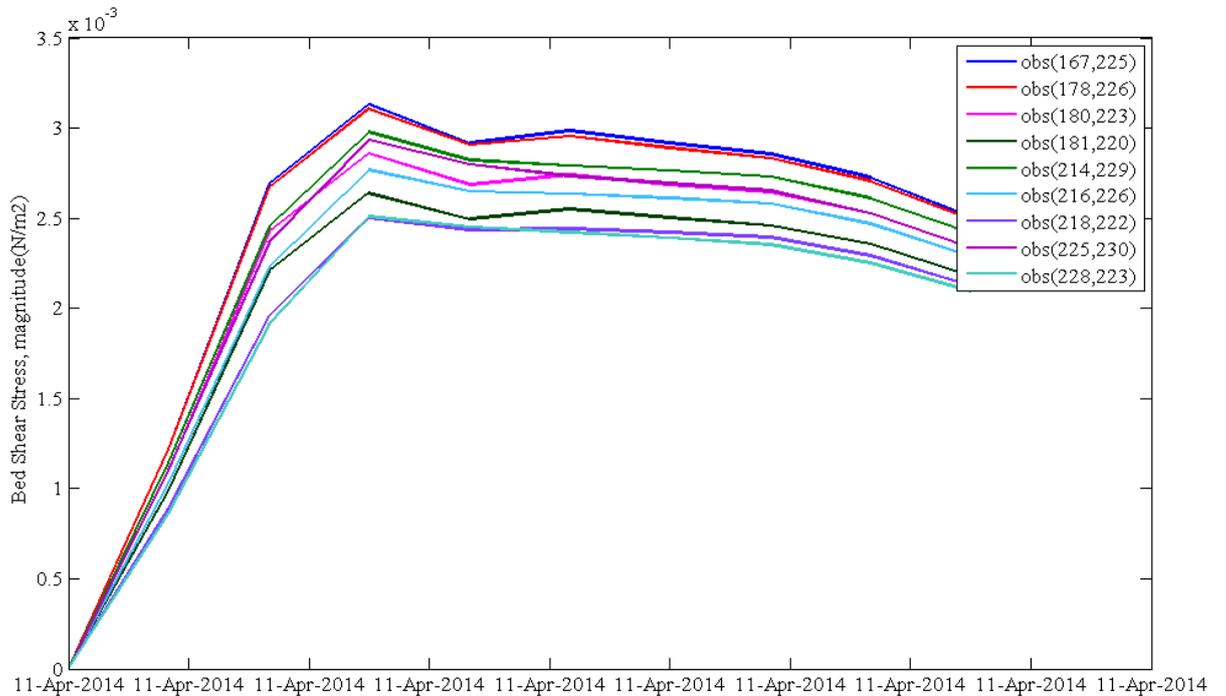


Figura 132: Tensión tangencial de la alternativa 2

• **Alternativa 3**

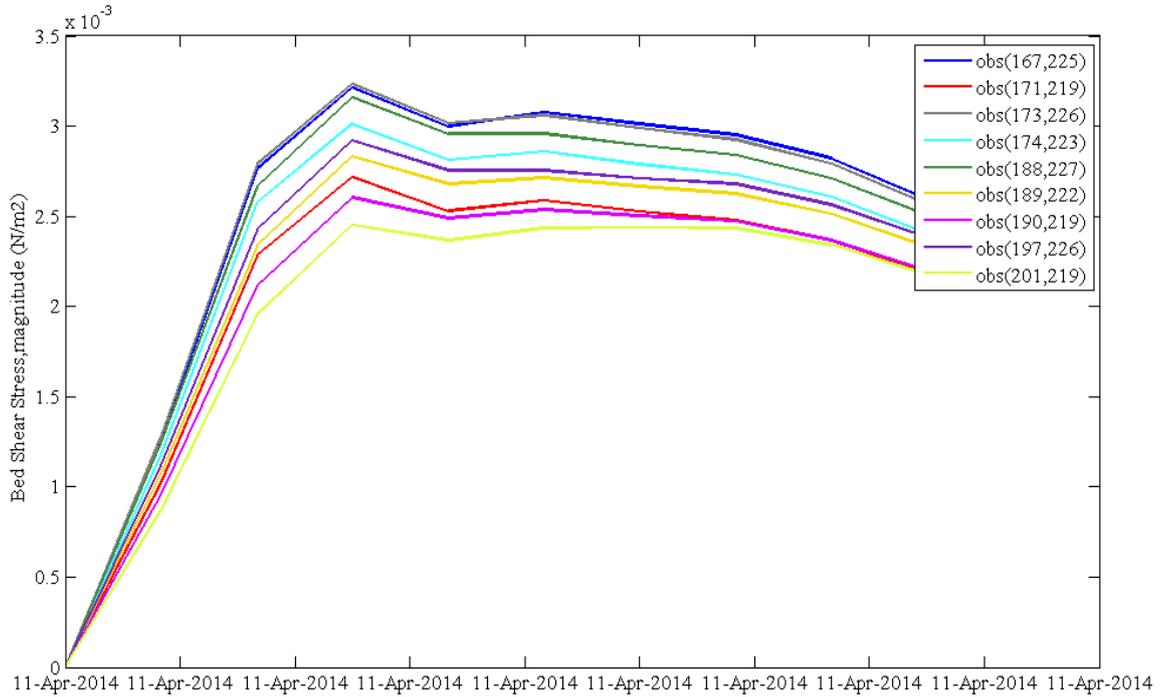


Figura 133: Tensión tangencial de la alternativa 3

• **Alternativa 4**

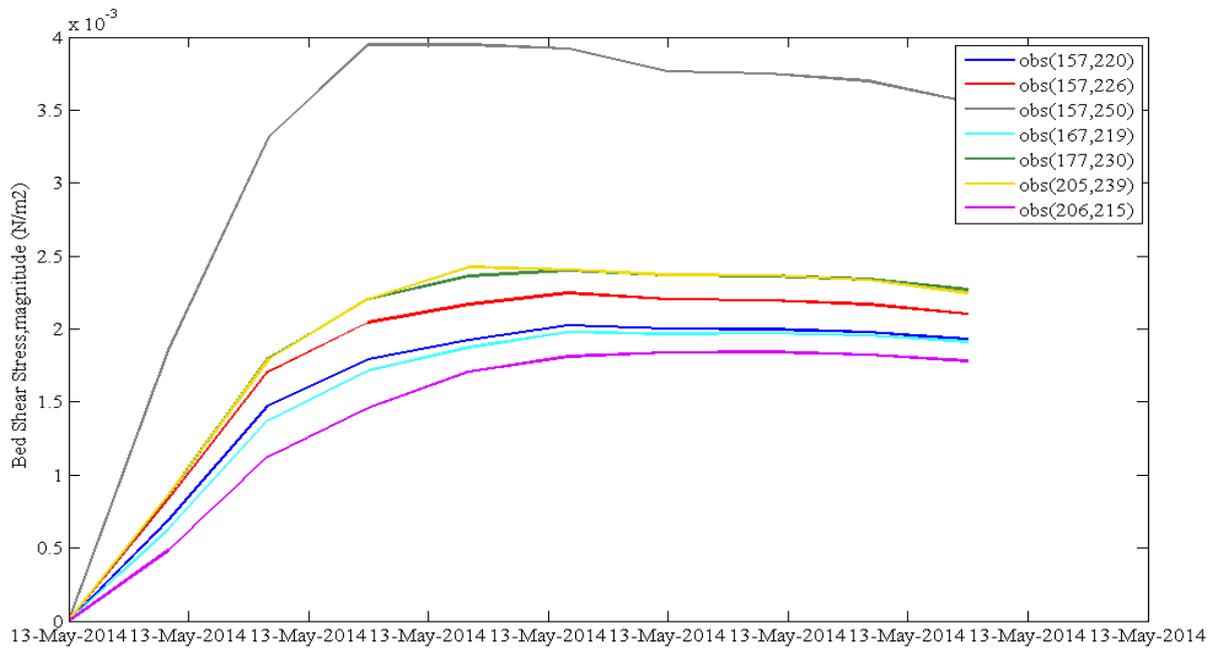


Figura 134: Tensión tangencial de la alternativa 4

En esta dirección, la magnitud de las tensiones es muy similar a la de la dirección Este. Igualmente, para el módulo situado en la esquina Oeste, las tensiones a soportar son mayores que en los otros. En la última alternativa se ve un salto desde los 2.4×10^{-3} N/m² hasta los 4×10^{-3} N/m² para el módulo arrecifal “obs (157,250)”.

28.2.2. RÉGIMEN EXTREMAL

Para el régimen extremal en esta dirección, se han utilizado los siguientes valores:

Altura de ola significativa en profundidades indefinidas	2.4 metros
Período de pico del oleaje en profundidades indefinidas	7 segundos.
Dirección de procedencia del oleaje en profundidades indefinidas	180°
Desviación direccional de la energía en grados	1°
Water Level	0.5 metros
Velocidad del viento	12.5m/s
Dirección de procedencia del viento	247.5°

Tabla 45: Cuadro resumen de valores introducidos para el Régimen extremal

28.2.2.1. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE

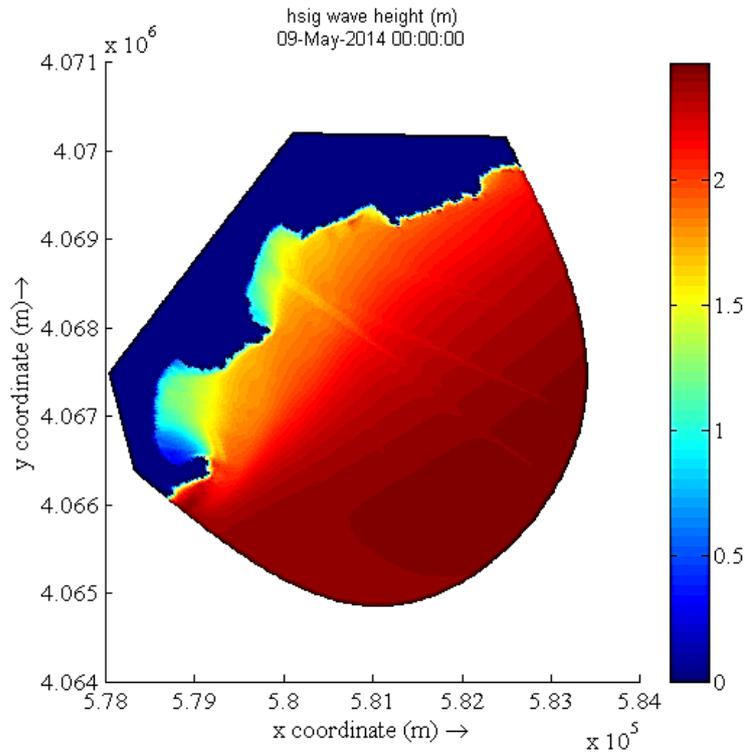
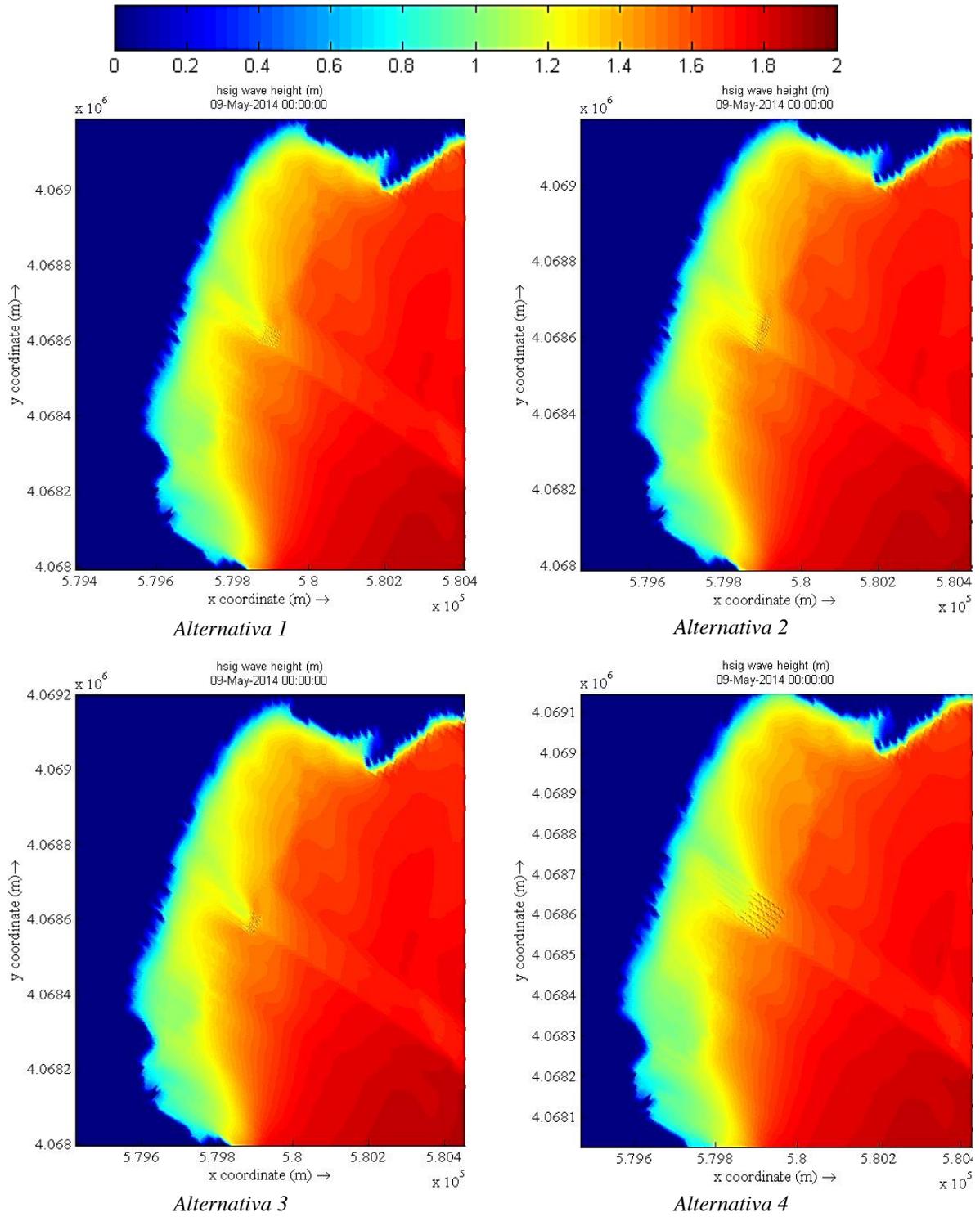
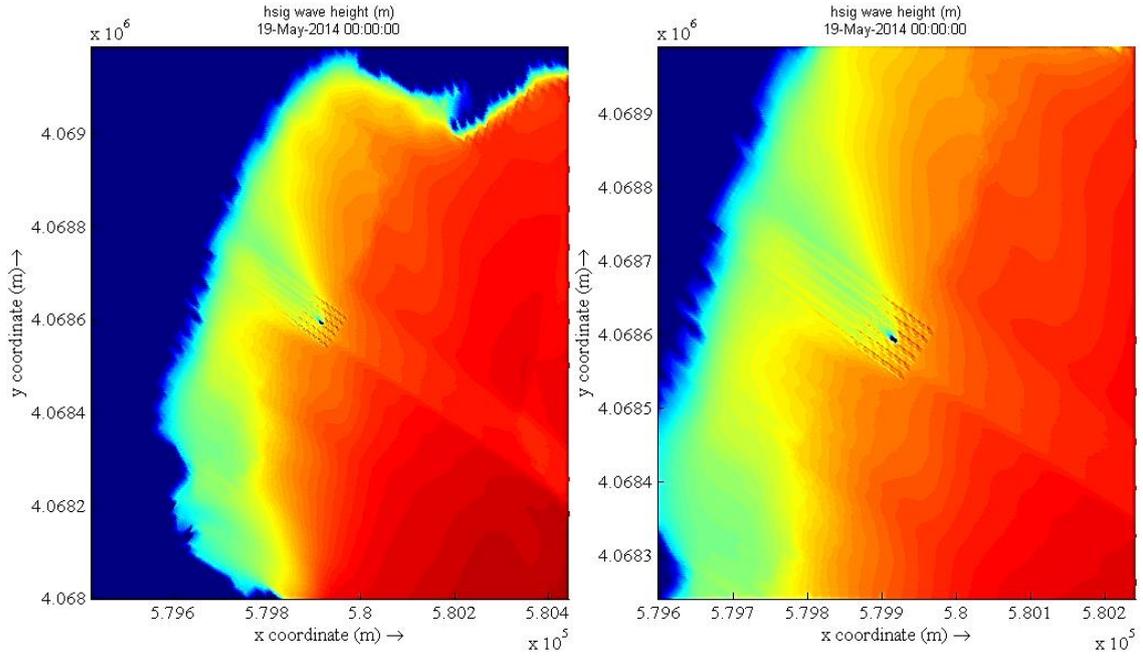


Figura 135: Altura de ola significativa en escenario inicial



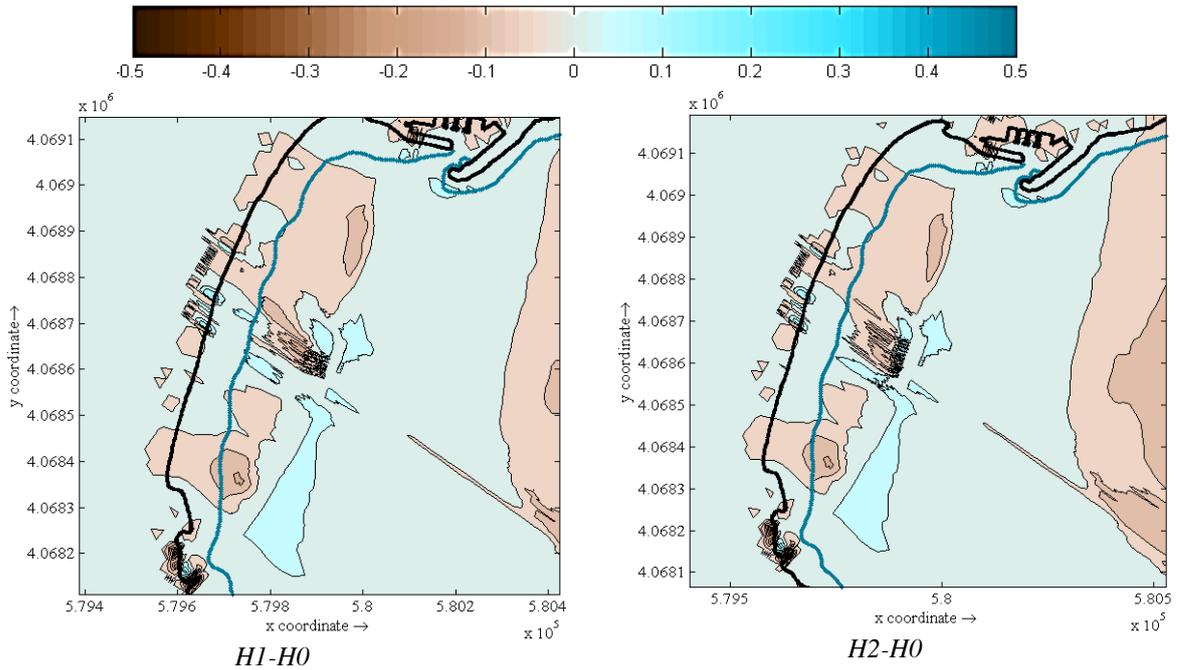


Alternativa 5

Figura 136: Altura de ola en régimen extremal, sur

La altura de ola se ve reducida en unos 20cm.

28.2.2.2. DIFERENCIA DE ALTURA DE OLA



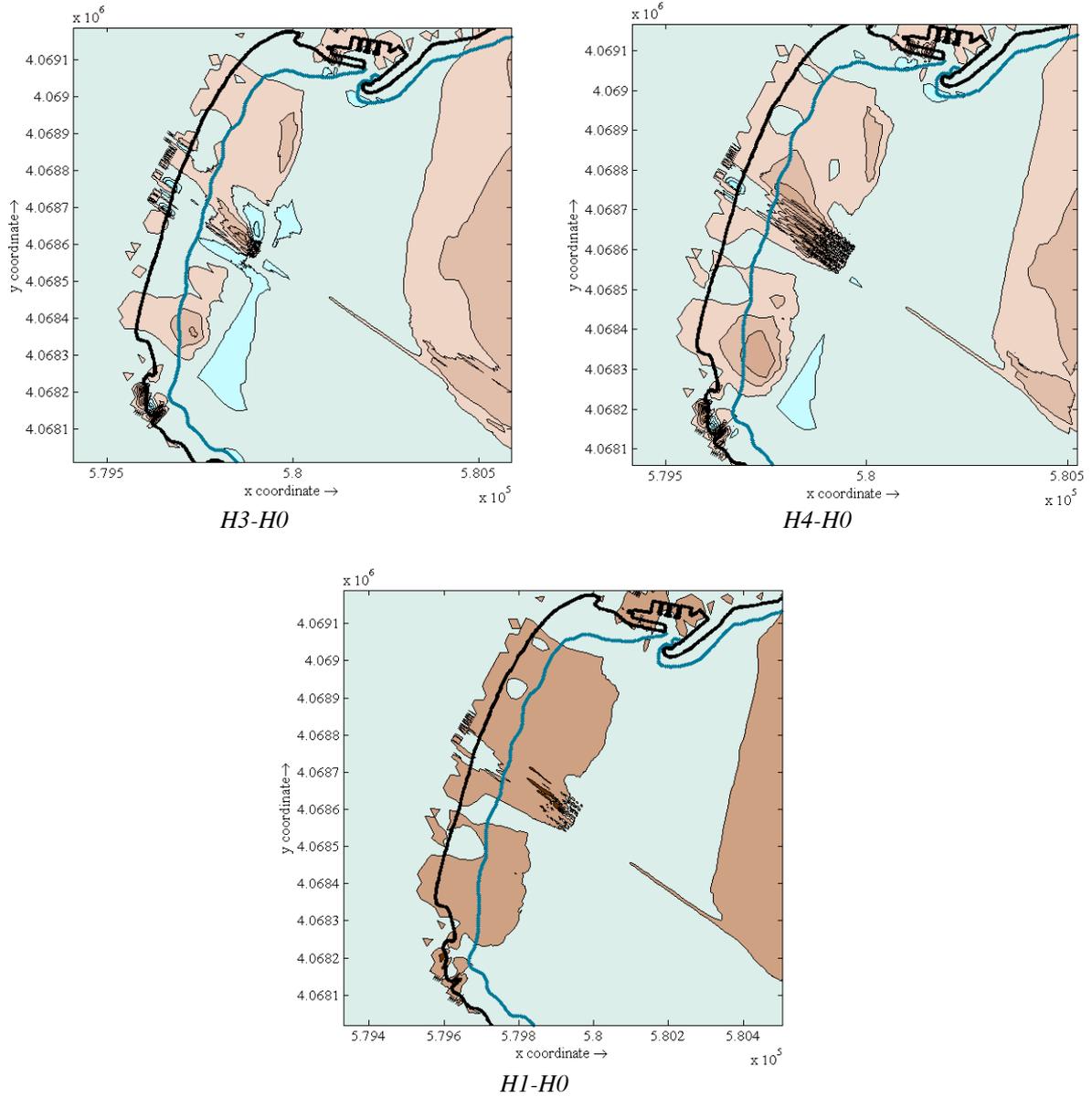


Figura 137: Diferencia de altura de ola en régimen extremal, sur

Se aprecian reducciones de unos 15cm en las dos primeras alternativas, 20 cm en la tercera y unos 25cm en las dos últimas.

La comparación de alturas de ola en la línea batimétrica de 3 metros de profundidad es la siguiente:

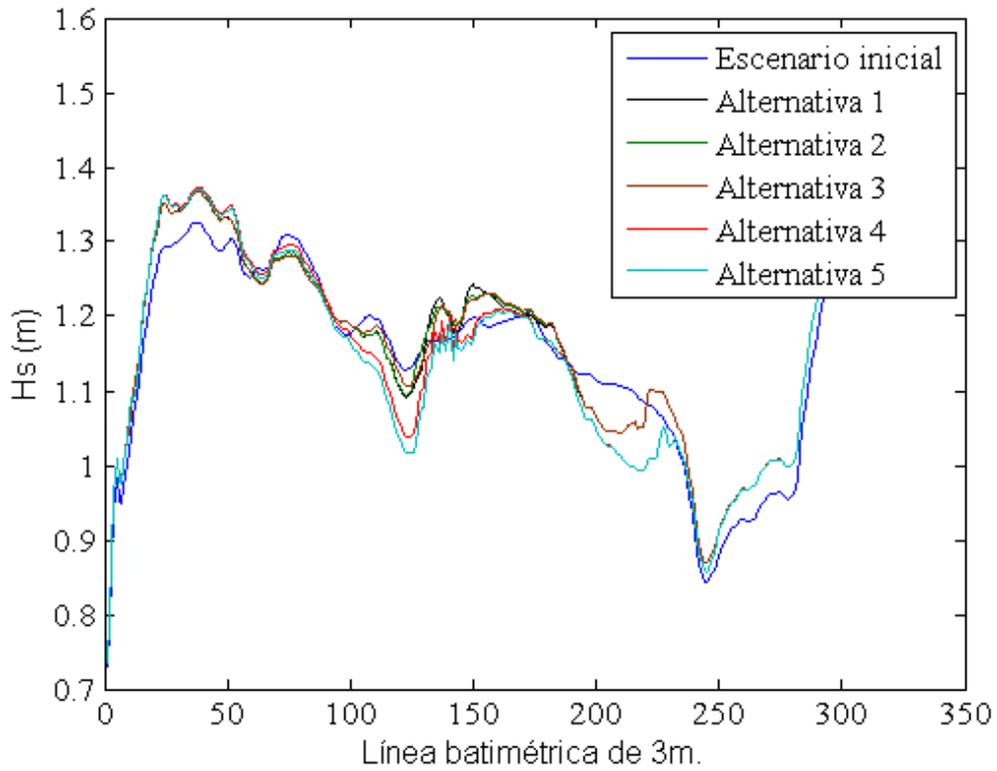
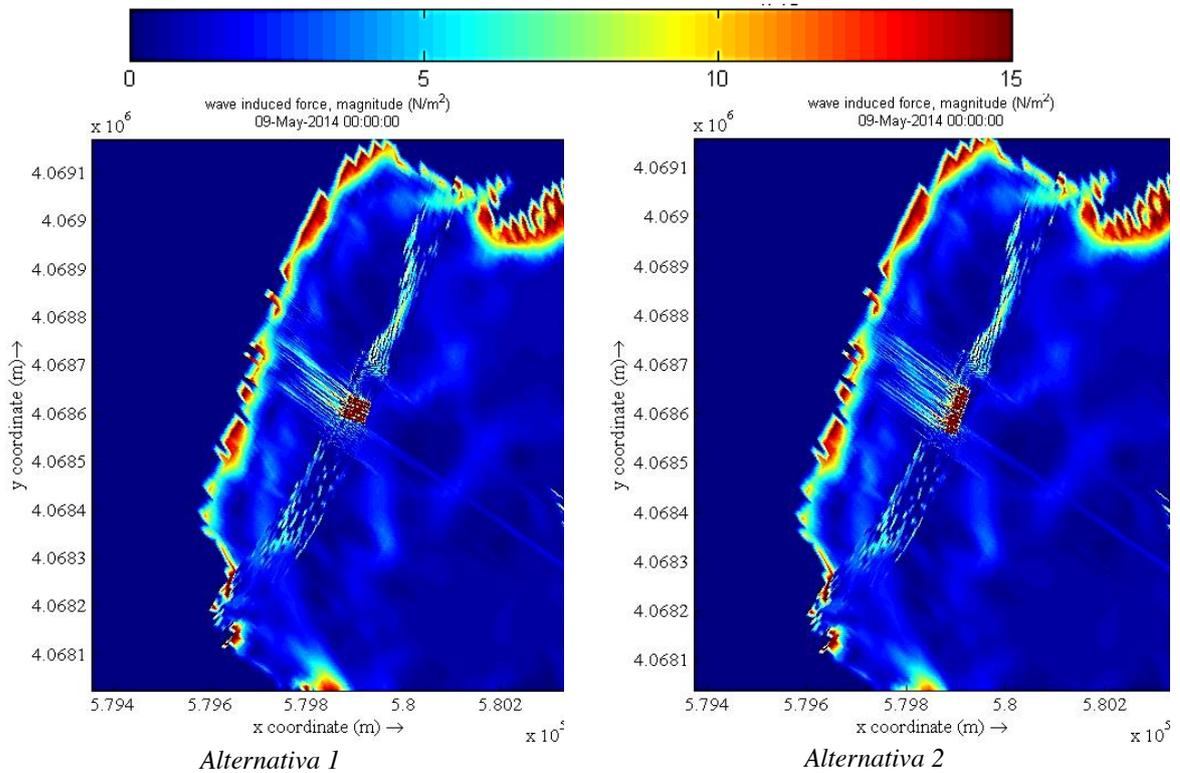


Figura 138: H_s en la línea batimétrica de 3m

Se ven reducciones de 15cm a esta altura de la playa.

28.2.2.3. FUERZA INDUCIDA POR EL OLEAJE



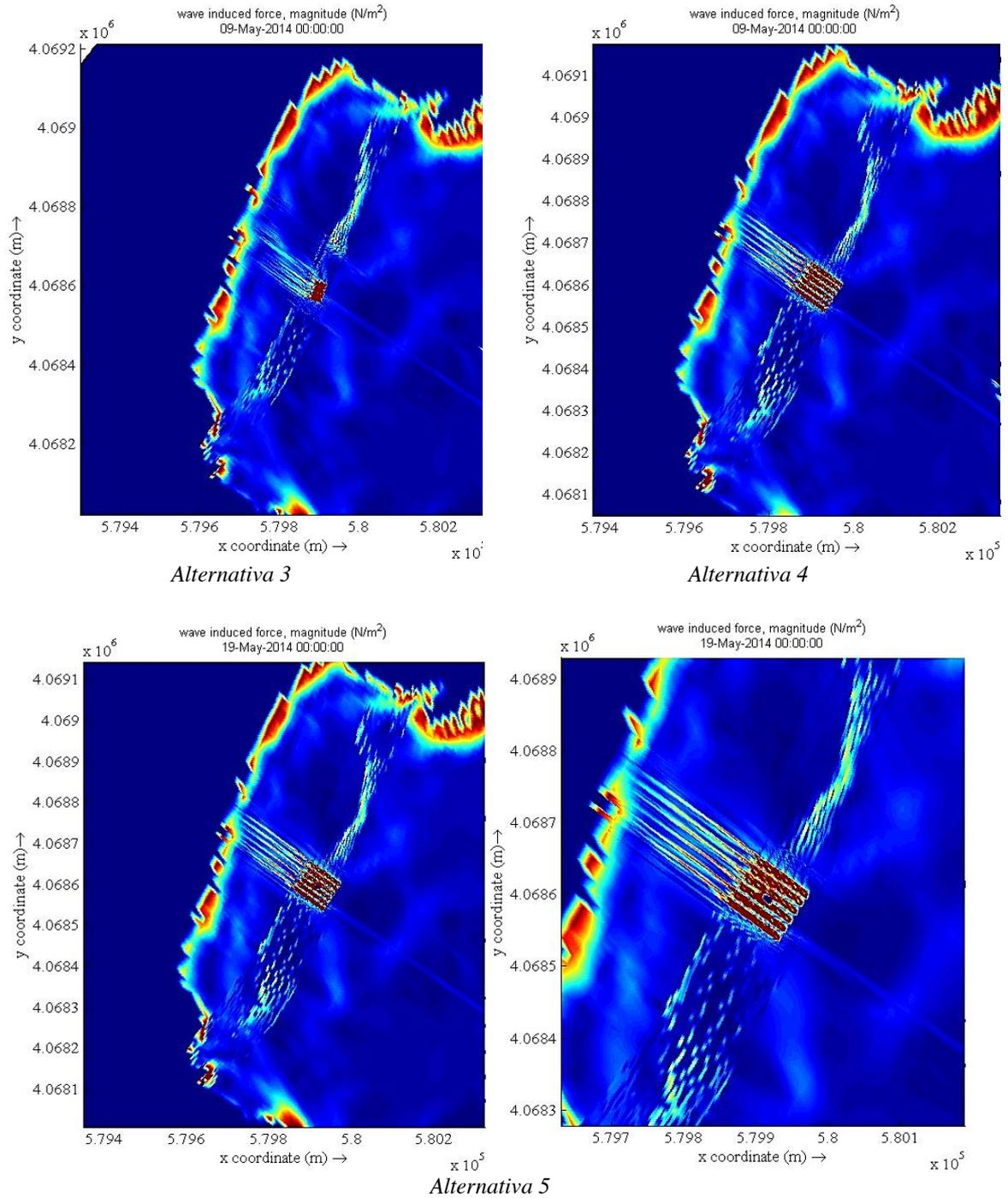
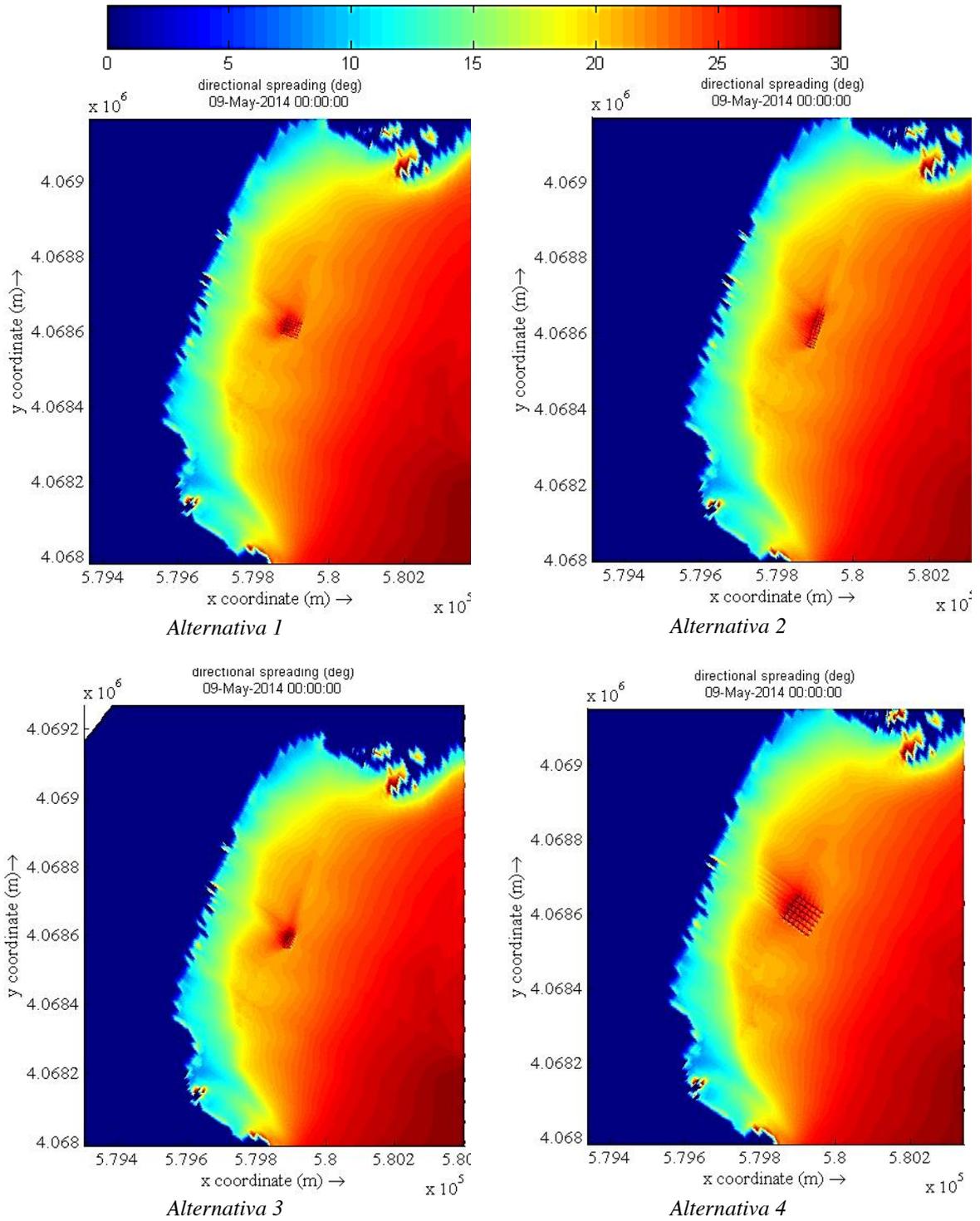


Figura 139: Fuerza inducida por el oleaje en régimen extremo, sur.

En las primeras alternativas la tensión es de $70N/m^2$, y de $60N/m^2$ en la cuarta y quinta.

28.2.2.4. DIRECCIÓN DE PROCEDENCIA DEL OLAJE



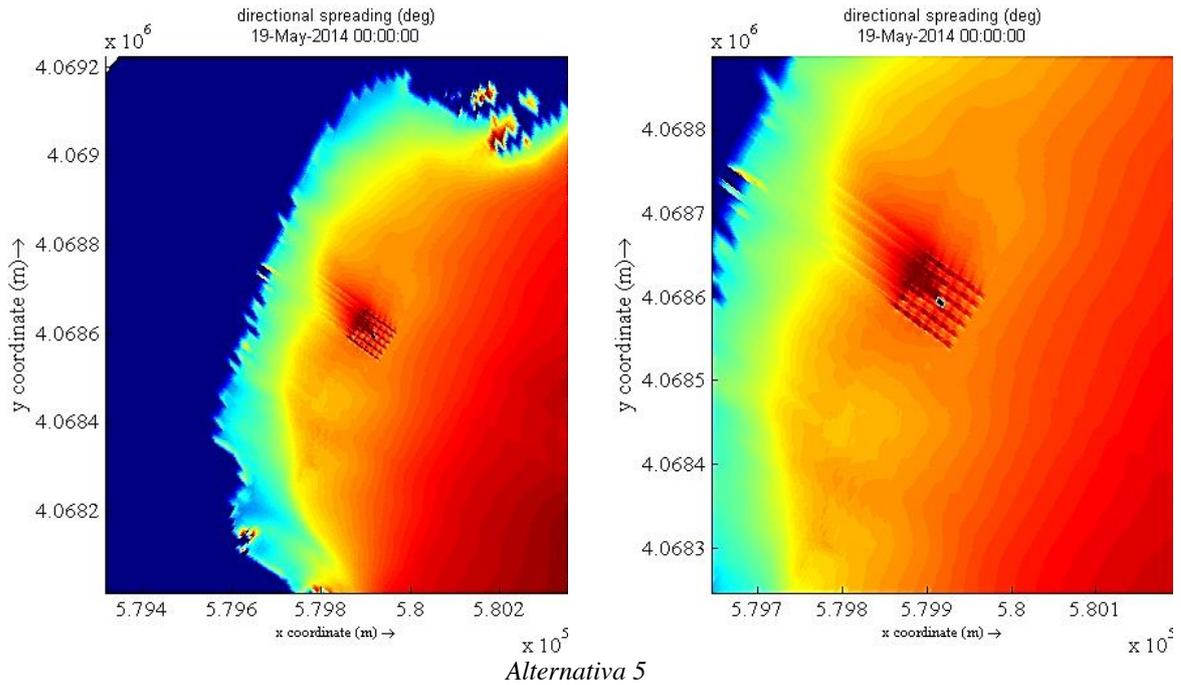


Figura 140: Dirección de procedencia del oleaje en régimen extremal, sur.

La dirección de procedencia del oleaje varía en unos 5° con la colocación del arrecife.

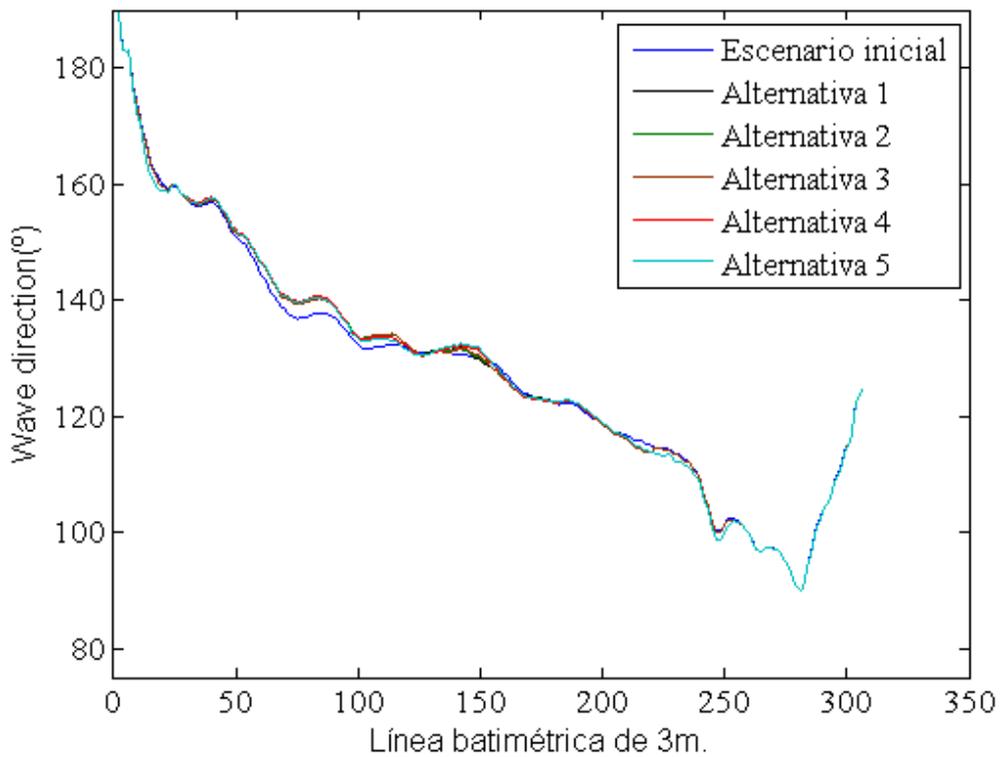


Figura 141: Dirección de procedencia del oleaje (°)

Como en los casos anteriores, la variación en la dirección es muy pequeña, de unos 2° aproximadamente.

28.2.2.5. TENSIONES TANGENCIALES EN EL FONDO

Se muestra, por último, las gráficas que representan las tensiones que sufren los módulos arrecifales de cada alternativa:

• **Alternativa 1**

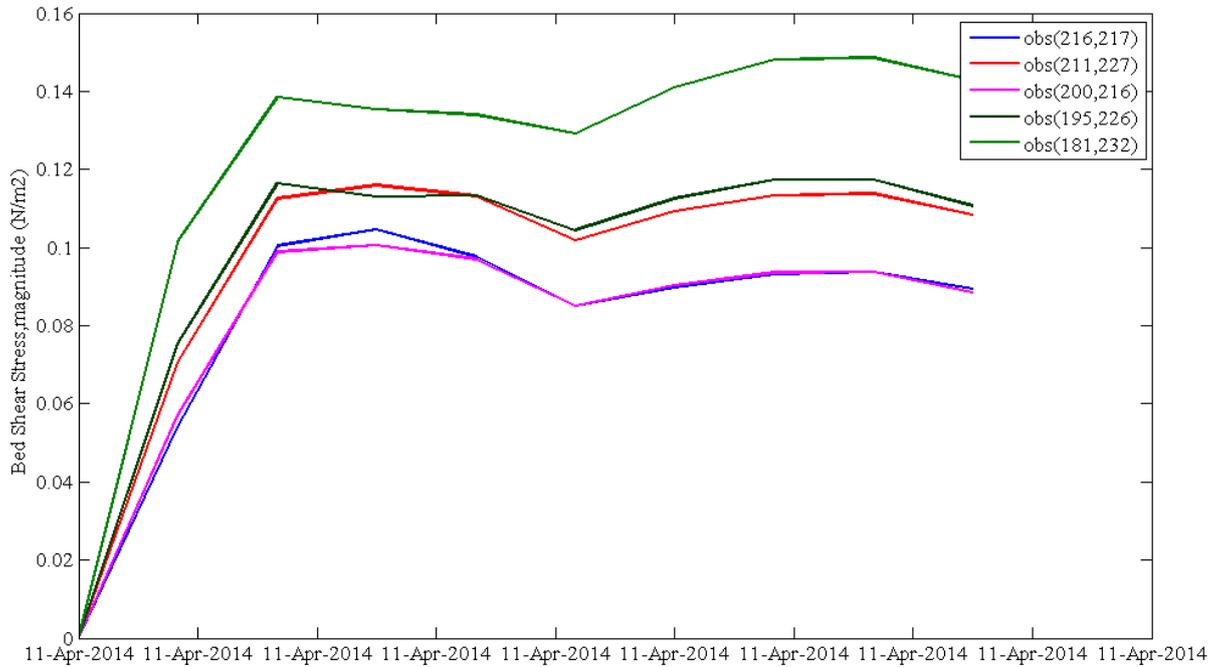


Figura 142: Tensión tangencial de la alternativa 1

• **Alternativa 2**

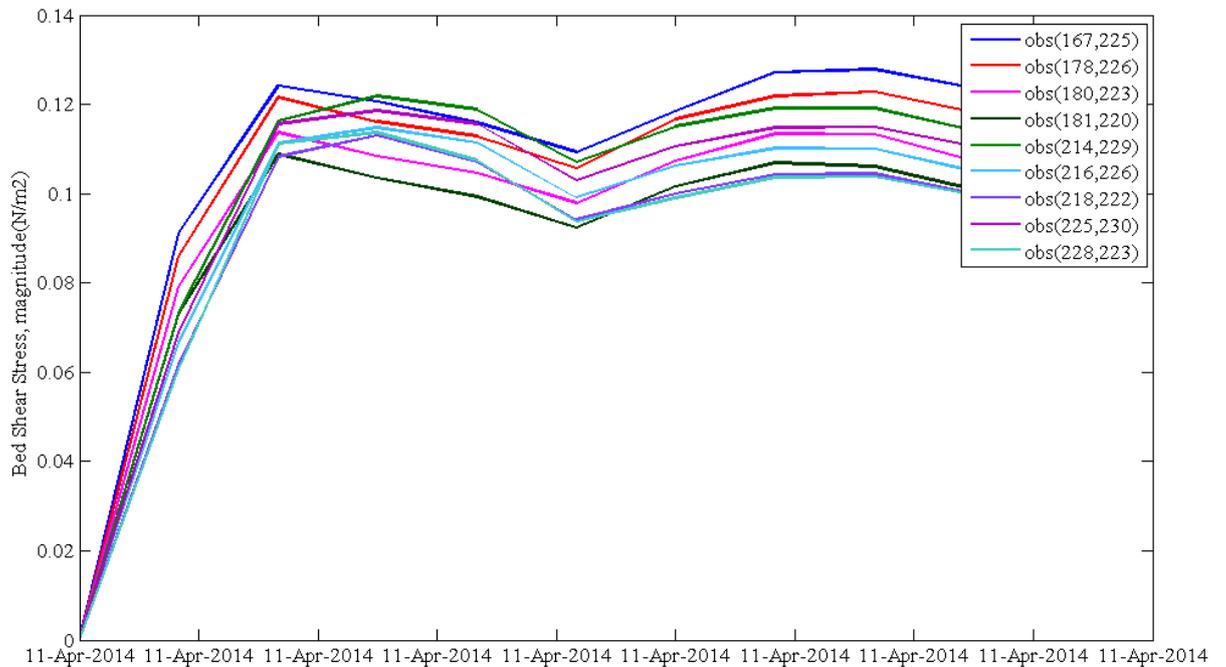


Figura 143: Tensión tangencial de la alternativa 2

• **Alternativa 3**

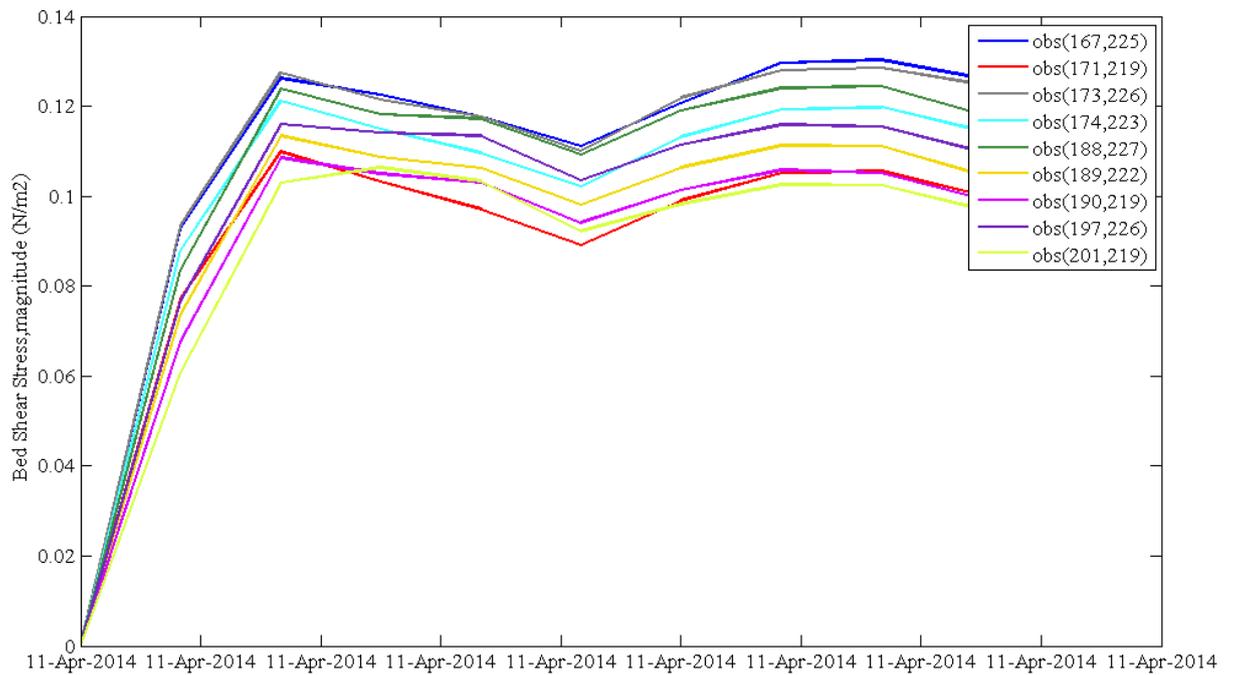


Figura 144: Tensión tangencial de la alternativa 3

• **Alternativa 4**

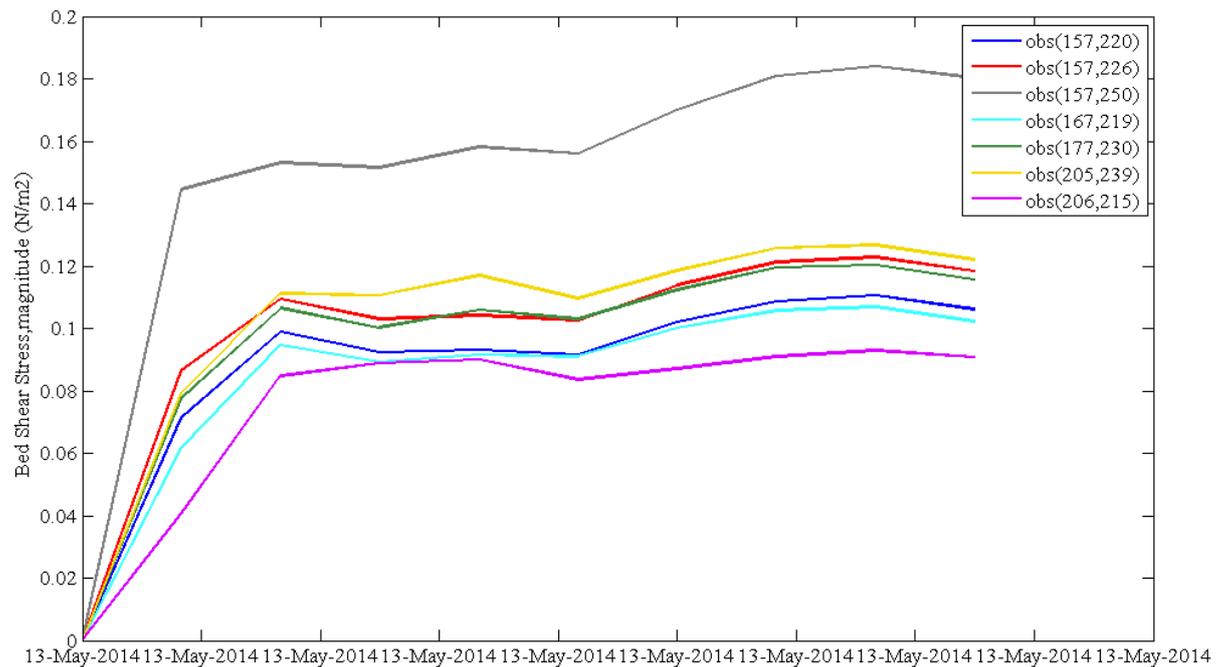


Figura 145: Tensión tangencial de la alternativa 4

Igualmente, son los módulos exteriores de la zona Oeste los que soportan un poco de más tensión que el resto. Vemos que en este régimen, se alcanzan máximos de $0.18N/m^2$ en la quinta alternativa.

29. CONCLUSIONES

El resumen de los resultados obtenidos con el programa Delft3D es el siguiente:

- **Altura de ola significativa:** se ve que en los regímenes medios de ambas direcciones principales de procedencia del oleaje se produce un leve descenso de la misma de unos 5 a 10 cm aproximadamente. En los regímenes extremales este descenso es mayor, unos 20cm.
- **Altura de ola de las alternativas con respecto a la del escenario inicial variando el período:** analizado para los regímenes medios de ambas direcciones principales, se ha observado que, una vez pasado el oleaje al arrecife, en la línea batimétrica de 3m de profundidad, la reducción de la altura de ola de las alternativas es del orden de un 10 al 20% de la inicial, y que esta se va haciendo mayor, a medida que se aumenta el período pico.
- **Fuerza inducida por el oleaje:** en los regímenes medios, el oleaje provoca una fuerza en los módulos de unos 2N/m^2 . Este valor se ve incrementado en el extremal, alcanzando los 80 a 100N/m^2 en la dirección este y los 60 a 70N/m^2 en la sur.
- **Dirección media de procedencia del oleaje:** en cuanto a esta variable, se aprecian pequeñas variaciones de unos 4 a 8° en régimen medio y de 10° en el extremal. Si se analiza en la línea batimétrica de 3 metros, esta variación es todavía menor, 2 a 3° , para ambos regímenes.
- **Tensiones en el fondo:** analizando las tensiones que puede provocar el oleaje en el cimiento de los módulos seleccionados, se han obtenido valores de unos $3 \cdot 10^{-3}\text{N/m}^2$ en régimen medio, y de 0.08N/m^2 en la dirección este en régimen extremal y de unos 0.14N/m^2 en la sur en el mismo régimen. Estos valores de tensión se van haciendo un poco mayores a medida que avanzamos hacia el Oeste, de manera que habrá que cuidar la cimentación de los módulos más ubicados hacia esta dirección.

Se puede concluir que, para las distintas variables estudiadas, no se ocasionan cambios muy significativos antes y después de la colocación del arrecife artificial. Al estar destinados al submarinismo y buceo recreativo, la cantidad de módulos a colocar no es tan grande como, por ejemplo, en los arrecifes de protección, ocupándose así un área de fondo marino mucho menor. Las condiciones climáticas de la zona favorecen a que haya esta poca incidencia, además de que la playa se encuentra en una zona más o menos resguardada y con poca pendiente, lo que aumenta la estabilidad de los módulos.

Por tanto, en cuanto a las posibles afecciones en la hidrodinámica de la playa, se puede decir que no serán una restricción a la hora de plantear la colocación de un arrecife artificial, al menos para la playa seleccionada en el proyecto y con las dimensiones de módulos empleados.

Por otro lado, es igualmente imprescindible seguir las recomendaciones detalladas en la presente guía, en cuanto a materiales a utilizar, una adecuada elección de la ubicación del arrecife, un correcto diseño de los módulos que se adecue a la finalidad que vayan a cumplir, seguir los pasos especificados en cuanto al proceso de ejecución, transporte y fondeo de los módulos en la zona exacta prevista en el proyecto, análisis de los posibles modos de fallo que se pueden presentar en las distintas fases del proyecto para evitar que se produzcan, etc.

De esta manera, nos aseguramos de que el proyecto suponga un mínimo impacto y cumpla correctamente las ventajas que aportan, tanto económicamente a la zona, como naturalmente al medio.

30. ANEJO I: CRITERIOS DEL PROYECTO Y CARÁCTER DE LA OBRA. METODOLOGÍA ROM.

30.1. BASES DE CÁLCULO

Es necesario realizar una serie de cálculos para verificar que en cada uno de los modos de fallo del arrecife se cumplen los criterios generales de proyecto, en cuanto a fiabilidad, funcionalidad y operatividad en cada una de las fases y estados del proyecto. Dichos cálculos deben encuadrarse, en la medida de lo posible, dentro del procedimiento general de cálculo denominado como método de los estados límite, para comprobar los distintos modos de fallo o parada, en los estados del proyecto que se espera que representen situaciones límite desde un punto de vista resistente (ELU), formal (ELS) y de uso y explotación (ELO).

30.1.1. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA OBRA Y SUS TRAMOS

En este sentido, se considerarán los siguientes comportamientos del arrecife artificial:

- Comportamiento hidráulico y frente a otros agentes del medio físico
- Comportamiento estructural
- Comportamiento geotécnico
- Comportamiento derivado de los procesos constructivos
- Comportamiento morfodinámico
- Comportamiento ambiental

30.1.1.1. COMPORTAMIENTO FRENTE A LOS AGENTES DEL MEDIO FÍSICO

Se estudiará el comportamiento de la obra frente a los agentes climáticos atmosféricos y marinos, concretamente las oscilaciones del mar, los agentes sísmicos, biogeoquímicos y térmicos.

- **Comportamiento frente a las oscilaciones del mar**

Se debe analizar la eficiencia de los arrecifes frente a las oscilaciones del mar, los regímenes de presiones o subpresiones y la operatividad del litoral protegido.

Todo esto, se puede realizar en el dominio del tiempo, en cuyo caso, se determinarán los regímenes de las oscilaciones del mar incluyendo los de corta, media y larga duración, en el emplazamiento, así como según el dominio de la frecuencia, en el que se determinarán los espectros frecuenciales asociados a los estados de mar y el nivel medio de mar.

Estas descripciones son representativas de las condiciones de trabajo extremas y operativas.

- **Comportamiento frente al sismo**

En el caso de que la probabilidad de ocurrencia de un sismo no se pueda despreciar, es recomendable analizar la respuesta suelo-arrecife. Se analizará el régimen extremal del agente sísmico y se definirán los espectros frecuenciales y las series temporales de aceleraciones representativas de las condiciones de trabajo excepcionales, extremas y operativas normales.

Además, es necesario prescribir la simultaneidad y compatibilidad del agente sísmico con los agentes climáticos atmosféricos y marinos.

30.1.1.2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Se evalúa la estabilidad, la capacidad portante y la deformabilidad de los materiales que componen los elementos que forman el arrecife, frente a los agentes del proyecto.

30.1.1.3. COMPORTAMIENTO FRENTE AL TERRENO

Igualmente, se debe evaluar la capacidad portante y deformabilidad del terreno y de la sección de la obra, considerando las oscilaciones del mar y otros agentes del medio físico.

Si resulta que el comportamiento del terreno se ve afectado suficientemente por las oscilaciones del mar, hay que analizar las tensiones, deformaciones, y presiones intersticiales en el terreno, la cimentación y los rellenos, según las diferentes escalas temporales y espaciales del terreno, así como su dependencia con las condiciones oscilatorias que estén presentes en la obra.

Es posible caracterizar, en estas situaciones, el estado meteorológico por descriptores espectrales o estadísticos, o por alturas y periodos de ola representativos de las condiciones de trabajo operativas normales y extremas. Es recomendable caracterizar el estado geotécnico del terreno, tensiones, y deformaciones, considerando series temporales de las oscilaciones del mar.

30.1.1.4. COMPORTAMIENTO DERIVADO DE LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS

Se trata de analizar la incidencia que pueda tener los procesos constructivos de la obra en el comportamiento geotécnico, estructural y frente a los agentes del medio físico.

30.1.1.5. COMPORTAMIENTO MORFODINÁMICO

Se estudian los procesos litorales, la estabilidad del fondo marino, el desarrollo del lecho de diferentes escalas espaciales, así como la evolución de la línea de costa., para poder evaluar los posibles impactos que la obra causa en el entorno. Concretamente, se recomienda tener en cuenta los siguientes procesos: morfodinámica del lecho marino y desarrollo de formas de lecho de pequeña, media y gran escala, procesos litorales y evolución de la costa en la vida útil. En este sentido, es importante proponer medidas correctoras para poder evitar variaciones bruscas locales así como alteraciones temporales significativas en el litoral durante las fases del proyecto.

30.1.1.6. COMPORTAMIENTO AMBIENTAL

Se evalúa la incidencia de la obra según varios parámetros de calidad ambiental. Concretamente: la circulación de las aguas, los procesos de difusión-advección de sustancias y la evolución espacial y temporal de la calidad de las aguas.

30.1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODOS DE FALLO Y PARADA

Se describe el concepto de modo de fallo o parada, así como la forma en que puede producirse el fallo o la parada operativa que se caracteriza, en general, en un estado límite.

A la hora de estudiar cuales son los posibles modos de fallo o parada a tener en cuenta, hay que considerar los siguientes aspectos:

- **Dominio espacial**

Se debe describir la zona en la que ocurre el fallo o parada, analizando toda la sección y cada una de sus partes así como el entorno, indicando si afecta a la morfodinámica litoral, la calidad de las aguas o el ecosistema litoral.

Consideramos que un modo se adjudica a la sección si afecta a dos o más de sus partes. Así mismo, se considera que un modo se adjudica a una parte o elemento si afecta a dos o más elementos o subelementos respectivamente.

- **Mecanismo**

Es preciso describir la forma en la que se produce el modo de fallo o parada correspondiente, considerando su importancia y sus consecuencias para la seguridad, el servicio y el uso y la explotación.

- **Agentes predominantes y otros agentes**

Se deben indicar los agentes predominantes que puedan formar parte del desencadenamiento del modo, clasificándolos según su origen y su interdependencia.

- **Dominio temporal**

De la misma manera, se describirá el intervalo de tiempo en que puede producirse el fallo. Suele ser el estado que por aplicación del método se considera un estado límite de proyecto.

- **Forma de verificación**

Para ver si ocurre o no un modo de fallo o parada durante un estado, verificamos la resolución de la correspondiente ecuación de verificación. En dicha ecuación, se establecen las relaciones funcionales entre los diferentes factores de proyecto que definen la condición de fallo o parada operativa.

- **Consideración como modo principal**

Se estudiará si el modo de fallo o parada operativa es principal o no, así como las actuaciones que se puedan llevar a cabo para reducir su contribución como modo principal a la probabilidad de presentación. Se trata de que este estudio, siempre que sea posible, se base en la optimización económica de la obra, teniendo en cuenta las consecuencias en los costes de construcción, conservación y reparación, tendiendo a favorecer la consideración del modo como no principal, con ligeros aumentos de la geometría y propiedad mecánica del elemento.

- **Observación y seguimiento del modo**

Se describen las distintas técnicas de observación y seguimiento del modo u ocurrencia, definiendo los umbrales de reparación y, para los modos de parada, los umbrales de parada.

- **Dependencia e independencia estadística**

Es importante estudiar si la ocurrencia de un modo implica la no ocurrencia de los restantes, en cuyo caso los modos son mutuamente excluyentes y la intersección de ambos sucesos es el conjunto vacío. En otro caso, el modo podrá ser estadísticamente independiente o dependiente de los otros modos, de tal forma que el conjunto de modos para ser completo deberá incluir los modos individuales, el suceso formado por la intersección de modos y el suceso no fallo.

En los siguientes apartados se explica los distintos modos de fallo que se presentan en los arrecifes artificiales, para cada fase de proyecto.

30.2. CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO. ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE PROYECTO

Se utilizan para definir y verificar un proyecto y sus alternativas. Se consideran, al menos, los siguientes criterios:

- Espacio y tiempo
- Temporalidad y vida
- Condiciones y bases de calculo
- Carácter general y operativo
- Procedimiento de cálculo
- Fiabilidad, funcionalidad y operatividad
- Valores recomendados.

Se debe de definir una organización espacial y temporal del conjunto del arrecife, así como su caracterización general y operativa en cada fase, y los requisitos del proyecto frente a la seguridad, el servicio, el uso y la explotación.

30.2.1. ORGANIZACIÓN ESPACIAL

La distinción entre los distintos tramos que pueda tener el arrecife dependerá su tipología formal y estructural, teniendo en cuenta, además, la variaciones significativas en cualquiera de los factores del proyecto, dígame: la geometría de la obra y del terreno, características del terreno, del medio físico y de los materiales y valores de los agentes y acciones, así como las posibles repercusiones en caso de fallo o parada operativa.

Concretamente, podemos hablar de un Grupo Arrecifal o Reef group en el caso de que el conjunto del arrecife esté formado por una reunión más o menos ordenada de módulos arrecifales y/o varios cúmulos arrecifales. Estos se denominan comúnmente Polígono Arrecifal. Así mismo, hablamos de un Complejo Arrecifal, en el caso de tener varios Grupos Arrecifales en una escala regional o local, formando así una Zona Arrecifal.

30.2.2. ORGANIZACIÓN TEMPORAL

A la hora de realizar una correcta verificación del arrecife, es necesario especificar las distintas fases del proyecto, su duración, organizar el estudio, evaluar la probabilidad de presentación de los agentes y definir los regímenes de su estado, del terreno y de uso y explotación.

30.2.2.1. FASES DEL PROYECTO

Se distinguen las siguientes fases:

- Construcción
- Servicio o vida útil
- Reparación, conservación y desmantelamiento

Además, podemos encontrarnos con diferentes subfases, siempre y cuando afecten al dimensionamiento de la obra o a cualquiera de los elementos que la forman.

30.2.2.2. DURACIÓN DE LA FASE DE PROYECTO

Se fijarán a criterio del promotor, teniendo en cuenta las consideraciones constructivas, de comportamiento de los materiales y del terreno, de mantenimiento, funcionales y de servicio, económicas y administrativas. Como referencia, se presentan las siguientes duraciones:

- **Duración de la fase de servicio**
 - Obras y tramos provisionales: $V < 5$ años
 - Obras y tramos definitivos: $V > 5$ años

Normalmente, la vida útil de este tipo de estructuras, que son definitivas, se suele estimar entre los 15 y 50 años.

- **Vida útil de las obras provisionales o construidas por etapas**

Se tendrá en cuenta la construcción por etapas, siempre y cuando el desfase entre la entrada en servicio de la primera etapa y la última, sea mayor a 5 años, en cuyo caso, se fijara la vida útil para cada etapa de la obra. Por otro lado, cuando la ejecución de una etapa posterior, pueda afectar a cualquiera de los factores de proyecto de la etapa anterior, se considerarán dos subfases, teniendo la primera su vida útil limitada por el inicio de la fase posterior.

- **Duración de la fase de construcción**

Se define como el tiempo que transcurre desde que se inician las obras, hasta que sean capaces de satisfacer los requisitos del proyecto. Influirán en la duración los medios técnicos y económicos que se necesiten, así como los procedimientos constructivos que se establezcan para la ejecución del arrecife.

En estas obras que impliquen la consolidación de los suelos, en cuanto a cimentaciones, rellenos, etc., y asientos permanentes del terreno que puedan tener como consecuencia alguno de los modos de fallo y parada operativa, la duración de esta fase de construcción, será, como mínimo, la necesaria para que se alcancen los niveles de consolidación especificados en el proyecto.

- **Vida útil mínima de los tramos definitivos**

En estos casos, la duración de la fase de proyecto será, como mínimo, el valor asignado en la tabla siguiente, en función del IRE, índice de repercusión económica de la obra marítima.

IRE	Vida útil en años
≤5	15
6-20	25
>20	50

Tabla 46: Vida útil mínima en la fase de proyecto servicio para obras definitivas

- **Duración de las fases de reparación y desmantelamiento**

Se define la duración de la reparación como el tiempo comprendido entre el inicio de dicha reparación y el momento en el que se satisfacen los requisitos del proyecto. Igualmente, será el promotor el encargado de especificar la duración de esta fase, teniendo en cuenta los medios técnicos y económicos de los que dispone, así como los procedimientos constructivos y requerimientos ambientales.

Es importante que la duración del proceso, sea lo más breve posible, para así evitar los intervalos de tiempo en los que la presentación de los valores extremos de los agentes sea más probable.

En cuanto al desmantelamiento, se mide desde que se inicia, hasta que se restaura el territorio con la situación definida en el proyecto de ejecución.

30.2.2.3. SECUENCIA TEMPORAL CLIMÁTICA DE LAS FASES DE PROYECTO

En el caso de que los agentes predominantes de la obra sean los climáticos, es recomendable organizar cada una de las fases del proyecto, en cuanto a la vida útil de la obra y cada uno de los tramos que la componen, en caso de que se divida en ellos, por medio de las curvas de estados. En cada curva de estado, se pueden definir los ciclos de sollicitación, de operatividad, los años meteorológicos y los hiperciclos.

En este sentido, es necesario determinar los umbrales de seguridad y servicio de los agentes cuya excedencia pueda afectar a la operatividad de la obra. Durante el ciclo de sollicitación frente a la seguridad y el servicio, definido como el intervalo de tiempo comprendido entre dos puntos de corte consecutivos de la curva de estado con la línea que representa el valor umbral del agente de seguridad o de servicio, se alcanzará un valor máximo de la curva de estado.

De la misma manera se puede identificar el umbral de los agentes de uso y explotación cuya excedencia pueda afectar a la operatividad de la obra. Este ciclo de operatividad frente al uso y la explotación, es el intervalo de tiempo que se comprende entre los dos puntos de corte consecutivos de la curva de estado con la línea que representa el umbral del agente estudiado. Igualmente, durante este ciclo se alcanzará el valor mínimo en la curva de estado. Es importante asegurar la independencia estadística de cada ciclo definido.

- **Año meteorológico**

En el caso de encontrarnos en latitudes medias, se agrupará la secuencia continua de ciclos de solicitud y operatividad en años meteorológicos, y la duración de las fases del proyecto se contabilizarán por años meteorológicos. De esta forma, la vida útil de la obra, se compondrá de una serie finita de años meteorológicos. En el caso de que algunas de las fases del proyecto, tengan una duración menor al año meteorológico o bien por cuestiones de operatividad, se podrán utilizar otras agrupaciones meteorológicas.

Se podrá suponer que las manifestaciones de los agentes que se suceden son estadísticamente independientes. En otro caso, se organizara la secuencia temporal climática por hiperciclos.

- **Variables aleatorias de estado, ciclo, año meteorológico y fase de proyecto**

Las manifestaciones de estos agentes en cada estado, ciclo de solicitud y operatividad, año meteorológico y fase de proyecto, se pueden considerar variables aleatorias descritas por un modelo de probabilidad.

30.2.2.4. REGÍMENES DE LAS VARIABLES ALEATORIAS

Una vez que se ha seleccionado el intervalo de tiempo en el que se van a describir los agentes y definidas las variables caracterizadoras del proceso, el régimen es la función de distribución conjunta, condicionada o marginal de sus variables representativas.

Dependiendo del intervalo de tiempo seleccionado, los modelos de probabilidad podrán ser representativos de la variabilidad del agente en el estado, ciclo, año meteorológico o fase de proyecto.

Igualmente, dependiendo de la clase de valor, las funciones de distribución podrán ser de los valores extremos superiores e inferiores, o bien, de la clase centrada de los valores que puede tomar la variable en el intervalo tiempo. De manera generalizada, los primeros se corresponden con el régimen extremal y los segundos con el régimen medio.

30.2.2.5. REGÍMENES DE OTROS AGENTES Y DE ACCIONES

A la hora de proceder al uso y la explotación del área portuaria y litoral, así como para la definición de los modos de fallo de parada operativa, resulta necesario definir los regímenes extremos y medios de otros agentes, tales como la precipitación, días de niebla, etc.

En el caso de no contar con sus respectivas bases de datos, es posible obtener los regímenes medios y extremos de estos agentes, a partir de los regímenes de los agentes climáticos

30.2.3. CONDICIONANTES DEL PROYECTO

Una alternativa de un tramo debe responder a los condicionantes y las bases de cálculo entre las que se incluyen:

- La ubicación espacial y temporal
- Los requisitos de explotación
- La geometría del tramo y del terreno
- Las propiedades del medio físico y los materiales

- Los agentes que puedan influir en la obra y su entorno y las acciones.

30.2.4. CARÁCTER DEL TRAMO

En el caso de la subdivisión del arrecife en tramos, en cada fase del proyecto dichos tramos tendrán un carácter general y otro operativo, que se caracterizarán por estudios externos o bien, en función de la repercusión social, económica y ambiental.

30.2.4.1. CARÁCTER GENERAL

Manifiesta la importancia del tramo en función de sus repercusiones económicas, sociales y ambientales que pueda generar en el caso de su destrucción o pérdidas de su funcionalidad.

Así pues, es importante valorar la magnitud de la consecuencia del fallo de la obra.

Este carácter, deberá ser fijado por el promotor de la obra, realizando los pertinentes estudios, no pudiendo ser de menor exigencia que los resultados obtenidos a partir de los índices de repercusión económica (IRE) y de repercusión social y ambiental (ISA). Esta recomendación incluye, también, su determinación para el modo de fallo principal, sujeto a estados límite últimos.

30.2.4.2. CARÁCTER OPERATIVO

Es un indicativo de las consecuencias económicas, sociales y ambientales que se podrían producir en el caso de no alcanzar las condiciones de operatividad en el área de afección del arrecife. Por tanto nos indica el grado de las repercusiones provocadas por las paradas operativas en la fase de servicio.

Igualmente, se especificará por parte del promotor si bien podrá tener en cuenta las recomendaciones a partir de los índices de repercusión económica operativo (IREO) y de repercusión social y ambiental operativo (ISAO), incluyendo los procesos para su determinación para el modo principal de parada operativa.

30.2.4.3. CARÁCTER EN OTRAS FASES DE PROYECTO

En cuanto a las fases de construcción, reparación y desmantelamiento, habrá que definir un carácter general y operativo, según las repercusiones económicas, sociales y ambientales que se puedan provocar con motivo de su destrucción o por paradas operativas de la obra durante estas fases.

Al igual que en los casos anteriores, este carácter, será definido por el promotor del proyecto, con sus respectivos estudios externos, cuidando de que no sean menores al obtenido mediante la aplicación de los índices IRE, ISA, IREO e ISAO.

30.3. REQUISITOS DE PROYECTO

La obra debe satisfacer una serie condiciones mínimas de seguridad, servicio y uso y explotación, delimitando la probabilidad de excedencia frente a la seguridad y el servicio durante cada fase de proyecto y la probabilidad de no excedencia de la operatividad en el año.

Durante cada una de las fases y subfases del proyecto, el conjunto de la obra y los elementos que la constituyen, debe cumplir los requisitos que exige la normativa y el promotor, en los temas de seguridad, servicio y explotación en todos los estados del proyecto que se puedan dar en la fase considerada, para así poder acotar las probabilidades de que se produzca el fallo una parada operativa en unos límites aceptables, según las consecuencias del fallo o dicha parada operativa. Así pues, estos requisitos de seguridad, servicio y explotación, se definen por medio de los siguientes parámetros:

- **Fiabilidad**

Es el valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo en la fase o subfase de proyecto considerada frente a los modos de fallo adscritos a los estados límite últimos.

- **Funcionalidad**

Igualmente, se define como el valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo en la fase de proyecto considerada frente a los modos de fallo adscritos, en este caso, a los estados límite de servicio.

- **Operatividad**

Valor complementario de la probabilidad de parada en la fase o subfase de proyecto considerada frente a los modos de parada adscritos a los estados límite de parada operativa.

30.3.1. REQUISITOS EN LA VIDA ÚTIL

La obra debe satisfacer los siguientes requisitos de proyecto frente a la seguridad, servicio y el uso y la explotación, según los siguientes apartados:

30.3.1.1. REQUISITOS FRENTE A LA SEGURIDAD

La seguridad mínima que se le debe exigir a este tipo de obras frente al conjunto de los estados límite último que se puedan dar durante la fase de servicio, dependerá de las consecuencias derivadas del fallo o destrucción de la misma. Se pueden evaluar dichas consecuencias, de manera global, según el carácter general de la obra, cuyo valor puede ser de menor exigencia que el obtenido a través de los índices de repercusión económica IRE y de repercusión ambiental y social ISA. Teniendo en cuenta todo esto, la seguridad de la obra deberá ser superior si las consecuencias sociales o ambientales de la posible rotura son más graves.

Una recomendación en cuanto a la probabilidad máxima de fallo admisible para una obra de estas características frente al conjunto de todos los modos de fallo adscritos a los estados límites últimos, es que sea inferior a los valores máximos que se detallan a continuación, en función del ISA.

ISA	Pf,ELU	βELU
<5	0.20	0.84
5-19	0.10	1.28
20-29	0.01	2.32
≥30	0.0001	3.71

Tabla 47: Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio o vida útil para los E.L.U.

30.3.1.2. REQUISITOS FRENTE AL SERVICIO

La mínima funcionalidad que se le requiere a una obra de estas características frente al conjunto de los estados límite de servicio que se puedan manifestar en la fase de servicio, dependerá de las consecuencias derivadas del fallo de servicio. Para esta fase de servicio o vida útil, las consecuencias se pueden evaluar globalmente según el carácter general de la obra, de igual manera que para la fiabilidad, puesto que alguno de los modos de fallo adscritos a estados límite de servicio puede implicar, al igual que en los estados límite último, la necesidad de reparar para recuperar los requisitos del proyecto. Al igual que con la fiabilidad, la funcionalidad, o aptitud para el servicio debe ser mayor si las consecuencias sociales y ambientales de los fallos son más graves.

Se recomienda que la máxima probabilidad de fallo admisible de un obra de estas características frente a todos los modos de fallo adscritos a estados límite de servicio, sea menor a los valores máximos que se incluyen en la siguiente tabla.

ISA	Pf,ELS	β ELS
<5	0.20	0.84
5-19	0.10	1.28
20-29	0.07	1.50
≥ 30	0.07	1.50

Tabla 48: Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio o vida útil para los E.L.S.

30.3.1.3. REQUISITOS FRENTE A LOS MODOS DE PARADA

La mínima operatividad que se le exige a una obra de esta tipología, frente al conjunto de estados límite de parada operativa que se puedan dar en la fase de servicio, así como el número medio de paradas y la duración máxima de la misma, dependerá de las consecuencias que se derivan de la parada operativa. Para la fase de servicio, dichas consecuencias se pueden valorar de manera global según el carácter operativo de la obra, cuyo valor no podrá ser menos exigente que el obtenido por los índices IREO e ISAO. En este sentido, la operatividad deberá ser mayor en función de que las consecuencias económicas de la parada operativa sean más importantes.

- **Operatividad mínima**

Según el intervalo de tiempo que se especifique, que generalmente será un año medio de la vida útil, es recomendable que la operatividad mínima admisible para la obra y, en su caso, los accesos, frente al conjunto de todos los posibles modos de parada operativa sea mayor a los valores mínimos definidos a continuación.

IREO	Operatividad	β ELO
≤ 5	0.85	1.04
6-20	0.95	1.65
>20	0.99	2.32

Tabla 49: Operatividad mínima en la fase de servicio

- **Número medio de paradas**

Según el intervalo de tiempo que se especifique, que suele ser un año medio de la vida útil, se aconseja que la suma del número medio de paradas operativas admisible tanto para la obra en sí, como para los accesos en su cao, frente a todos los posibles modos de fallo adscritos a los estados límite de parada operativa, sea menor a los valores máximos que se dan a continuación, en función del ISAO.

ISAO	Número
<5	10
5-19	5
20-29	2
≥20	0

Tabla 50: Número medio de paradas operativas en el intervalo de tiempo.

- **Duración máxima de una parada**

Según el intervalo de tiempo que se especifique, que en general será un año medio de la vida útil, la duración máxima de una parada operativa, no deberá exceder el valor en horas consignado en la siguiente tabla según los IREO e ISAO.

IREO \ ISAO	<5	5-19	20-29	≥30
≤5	24	12	6	0
6-20	12	6	3	0
≥20	6	3	1	0

Tabla 51: Valor más probable de la duración máxima de una parada operativa (horas)

30.3.1.4. REQUISITOS CUANDO SE PRODUCEN CAMBIOS DE USO Y EXPLOTACION

Si durante la vida útil de la obra se prevé cambios de uso y explotación, los requisitos de seguridad, funcionalidad y operatividad que se exigen para esta etapa deben ser revisados según las nuevas condiciones de explotación, indicando nuevamente el carácter general y operativo de la obra según dichas condiciones y fijando los nuevos requisitos del proyecto en base a lo dispuesto en los apartados anteriores.

30.3.1.5. REQUISITOS CUANDO SE PRODUCE UNA ENTRADA PARCIAL EN SERVICIO

Cuando en la fase de construcción, la obra entre transitoriamente en servicio, la probabilidad de fallo admisible durante esta fase será la especificada en el proyecto, considerando las consecuencias sociales y ambientales del fallo en esta situación e incluyendo las condiciones relacionadas con la construcción.

30.3.2. REQUISITOS DURANTE OTRAS FASES DE PROYECTO

Durante las fases de construcción, reparación y desmantelamiento, la obra tendrá que satisfacer los requisitos del proyecto frente a la seguridad, el servicio y, en ciertos casos, el uso y la explotación. De la misma manera que durante la vida útil, la seguridad, funcionalidad y operatividad mínima exigidas en estas fases del proyecto, dependerá de las consecuencias derivadas del fallo y, en su caso, de la parada operativa durante las mismas. Dichas

consecuencias se pueden valorar según unos criterios análogos a la vida útil, basados en la evaluación de los IRE, ISA, IREO, e ISAO parciales.

Es aconsejable discretizar la obra en intervalos de tiempo, con sus correspondientes subfases constructivas, de reparación y desmantelamiento del tramo, en el caso de que se divida en ellos, para evaluar el carácter de cada uno. Así mismo, se recomienda que las probabilidades máximas de fallo admisibles sean inferiores a los valores máximos incluidos en la ROM 0.0 en función del ISA parcial. Igualmente, la operatividad debe ser mayor que los valores mínimos incluidos en la ROM 0.0 según el IREO parcial.

Cuando ya se haya finalizado la construcción o reparación del tramo, cuando proceda, la probabilidad de fallo y parada deberá ser la del proyecto.

30.3.2.1. FIABILIDAD Y FUNCIONALIDAD EN OTRAS FASES DEL PROYECTO

Durante las fases de construcción, reparación y desmantelamiento, las repercusiones sociales y ambientales, no suelen ser significativas de tal forma que la fiabilidad y funcionalidad que se adopten se pueden determinar por criterios de optimización económica. De todas maneras, existen casos, sobre todo para obras cercanas a núcleos de población, en los que los factores sociales ya ambientales pueden no ser despreciables y se deberá tener en cuenta, según el procedimiento general recomendado.

30.3.2.2. OPERATIVIDAD EN OTRAS FASES DEL PROYECTO

Para la operatividad durante la fase de reparación, será el promotor el que fije si debe a aquella total o parcialmente, por lo que no es de aplicación los valores mínimos de operatividad exigidos en esta fase de servicio. Como orientaciones, se puede utilizar el procedimiento general recomendado. Durante las fases de construcción, exceptuando la entrada parcial en servicio, y durante la fase de desmantelamiento no suele haber habitualmente uso y explotación de las instalaciones.

30.4. PROCEDIMIENTO DE VERIFICACIÓN

Dispuesto los diagramas de los modos de fallo y parada, y una vez realizada la partición de probabilidad conjunta, será necesario verificar que la obra dimensionada satisface los requisitos de seguridad, servicio y uso y explotación para cada fase del proyecto. Por tanto, es necesario formular y resolver la ecuación de verificación de cada modo y calcular la probabilidad de ocurrencia del fallo o la parada en la fase del proyecto.

30.4.1. VERIFICACIÓN DE UN MODO Y PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

Para verificar cada modo de fallo o parada y cada tramo, en el caso que proceda, así como para calcular la probabilidad de ocurrencia durante la vida útil, se formulará y resolverá la ecuación de estado. Es recomendable definir previamente:

- Los parámetros y agentes del proyecto
- Las acciones del proyecto

30.4.1.1. FORMULACIÓN DE LA ECUACIÓN DE ESTADO

Se puede escribir en formato de coeficiente global de seguridad o de margen de seguridad y, teniendo en cuenta la variabilidad de los factores del proyecto, se recomienda una de las tres formulaciones siguientes: la determinista, determinista-probabilista y la probabilista.

- **Formulación determinista**

Tanto los valores de los agentes predominantes como no predominantes, así como los parámetros, serán valores nominales o deterministas. A partir de ellos, se calcularán los términos de la ecuación de estado.

Se recomienda la verificación de aquellos modos de fallo o parada en los que los agentes y parámetros del medio físico no sean significativos para la seguridad, el servicio o el uso y la explotación de la obra. Podrá admitirse pues, que la probabilidad de ocurrencia del modo es muy baja, que no es un modo principal y por tanto, que no participa en el cálculo de la probabilidad conjunta de fallo.

- **Formulación determinista-probabilista**

Se deben determinar los valores representativos de los parámetros y los agentes, en particular los medio físico climático y sísmico, y los de uso y explotación y, en su caso, los del terreno, a partir de sus modelos de probabilidad, para calcular los valores de los términos de la ecuación de estado. Estos valores representativos, suelen ser valores característicos.

- **Formulación probabilista**

Se determinan los valores de los términos de la ecuación a partir de sus modelos de probabilidad en la fase analizada, calculados a partir de modelos de probabilidad de los parámetros y agentes, y son el resultado del propio proceso de resolución de la ecuación. Todos los coeficientes de seguridad globales y los parciales de la ecuación de verificación para cada modo son iguales a uno.

30.4.1.2. MÉTODOS DE RESOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE ESTADO Y PROBABILIDAD

- **Métodos de nivel I**

Se pueden aplicar para ecuaciones que estén formuladas con criterios deterministas y determinista-probabilista. Se introduce la fiabilidad, funcionalidad u operatividad según el tipo de combinación, afectando a los valores nominales o representativos de los factores del proyecto que intervienen en la ecuación de verificación de coeficientes parciales o globales, de simultaneidad, ponderación, compatibilidad y reductores. En el caso de que la ecuación sea formulada con criterios deterministas, no se puede calcular la probabilidad de fallo ni la operatividad. Por este motivo, es recomendable no realizar una formulación determinista de los modos de fallo con agente predominante del medio físico climático atmosférico, climático marino o sísmico. Si se ha formulado con criterio determinista-probabilista, la probabilidad de excedencia del valor agente predominante que causa el fallo se puede adoptar como la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo.

- **Métodos de los niveles II y III**

Se podrán aplicar tanto a formulaciones deterministas-probabilistas como a las probabilistas. El resultado es la probabilidad de ocurrencia del modo en el estado considerado.

30.4.1.3. CRITERIOS PARA LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE VERIFICACIÓN

La resolución de la ecuación de estado que corresponda un modo de fallo o parada principal se deberá hacer por uno de los métodos que se indica a continuación. En el caso de la verificación de los modos de fallo no principales, es suficiente la aplicación de los métodos de Nivel I.

IRE	No significativo	Bajo	Alto	Muy alto
Bajo	[1]	[2]	[2] y [3] ó [4]	[2] y [3] ó [4]
Medio	[2]	[2]	[2] y [3] ó [4]	[2] y [3] ó [4]
Alto	[2] y [3] ó [4]	[2] y [3] ó [4]	[2] y [3] ó [4]	[2] y [3] ó [4]

Tabla 52: Métodos de verificación en función del IRE e ISA

Leyenda:

[1]: Método del coeficiente de seguridad global (Nivel I)

[2]: Método de los coeficientes parciales (Nivel I)

[3]: Métodos de nivel II

[4]: Métodos de nivel III

Para el caso de los proyectos en los que se deba hacer una verificación múltiple de los modos de fallo principales, el cálculo se puede dar por satisfecho si los dos procedimientos de verificación que se hayan utilizado indiquen que la fiabilidad u operatividad exigida se cumple.

Normalmente, en este tipo de obras, los valores de ISA e IRE son bajos, de manera que el método de verificación será el de **Coficiente de seguridad global [1]**.

Este método consiste en evaluar la ecuación de verificación escrita según un cociente y comparar el resultado con el coeficiente de seguridad global Z_c .

La forma es del tipo de coeficiente de seguridad, $Z=X1/X2$, de manera que el numerador engloba los términos favorables a evitar la ocurrencia del modo y el denominador, los desfavorables.

Así pues, se considera que el modo de fallo o parada operativa no sucede siempre y cuando se cumpla que $Z > Z_c$.

30.4.1.4. DEFINICIÓN DE LOS ESTADOS DE PROYECTO

Para este apartado, es necesario plantear la geometría de la obra, los materiales, el medio físico y el terreno, así como ciertos agentes y acciones. Todo esto supone una simplificación de

la realidad durante un cierto intervalo de tiempo en el que los factores de proyecto y la respuesta estructural, funcional u operativa pueden suponerse estacionarios estadísticamente.

A la hora de seleccionar los estados de proyecto a tener en cuenta en este proceso de verificación, se debe analizar todas las condiciones en las que se puede encontrar la obra durante las distintas fases de proyecto, considerando, además, cuando se pueden tomar valores estacionarios para los distintos factores de proyecto. Estos estados de proyecto, se agrupan en condiciones de trabajo en función de la simultaneidad y compatibilidad de los agentes definidos como predominantes.

30.4.1.4.1. MÉTODOS DE NIVEL I

Como ya se ha mencionado, es preciso seleccionar los estados límite de proyecto representativos de los ciclos de sollicitación y operatividad, para cada fase de proyecto.

- **Condiciones de trabajo extremas y excepcionales**

Para cada modo de fallo, se selecciona el estado límite climático, según los regímenes extremos conjuntos del oleaje y del nivel del mar y de otras perturbaciones del medio físico. En el caso de que no haya regímenes conjuntos, se puede admitir el usar regímenes extremos marginales del agente preponderante y agentes que dependan de él. Esta selección, se realiza según la probabilidad de excedencia, debiendo ser igual o menor a la probabilidad de ocurrencia admitida como requisito de proyecto para el modo de fallo considerado.

- **Condiciones de trabajo operativas normales**

Igualmente, para cada modo de fallo, se selecciona el estado límite climático, según los regímenes extremos conjuntos del oleaje y del nivel del mar y de otras perturbaciones del medio físico que puedan provocar la parada operativa. Y de la misma manera, en el caso de que no haya regímenes conjuntos, se puede admitir el usar regímenes extremos marginales del agente preponderante y agentes que dependan de él. Esta selección de estados límite de seguridad y servicio se lleva a cabo teniendo en cuenta la probabilidad de excedencia, que debe ser menor o igual a la probabilidad de ocurrencia que se fija como requisito de proyecto.

Así mismo, la selección de estados límite de parada operativa, se hace en función de la probabilidad de no ocurrencia, debiendo de ser mayor o igual al valor de la operatividad, del número de paradas o de la duración de la parada admitida como requisito de proyecto.

30.4.1.4.2. MÉTODOS DE NIVEL II Y III

Para seleccionar los estado límite de seguridad y servicio y de parada, se realiza, separadamente, la verificación de la ocurrencia del modo en condiciones de trabajo extremas y en condiciones de trabajo operativas normales, y se realiza el filtrado de los estados en los que la probabilidad de que se produzca el modo es despreciable, inferior a 10^{-5} .

30.4.2. VERIFICACIÓN DE LA PROBABILIDAD CONJUNTA FRENTE A LOS MODOS PRINCIPALES

Entre los objetivos del proyecto, cabe destacar la verificación de que la obra dimensionada cumple con los requisitos de seguridad, servicio y uso y explotación, para cada fase de proyecto.

Para realizar estos cálculos, hay que tener en cuenta que solo se pueden resolver de una manera rigurosa si la ecuación de verificación de los modos principales de fallo y parada operativa se ha realizado con los métodos de nivel I o II.

30.4.3. CONDICIONES DE TRABAJO

La obra debe de cumplir unos determinados requisitos tales como proporcionar las condiciones y medios necesarios para realizar las operaciones normales de uso y explotación y resistir las acciones extremas y extraordinarias que se originan por la mutua interferencia de la obra y el entorno.

Así pues, una condición de trabajo no es más que un conjunto de estados de proyecto caracterizados por la ocurrencia de algunos factores de proyecto según la simultaneidad y su compatibilidad.

Para cada fase de proyecto e intervalo de tiempo, se consideran las siguientes condiciones de trabajo CT_i :

- **CT_1 : Condiciones de trabajo Operativas.**

Incluyen los estados de proyecto que se dan habitualmente y en los cuales la obra presta el servicio para el cual se ha construido. Normalmente, los agentes que predominan son los de uso y explotación, pudiendo actuar, simultáneamente, el resto de los agentes.

Las condiciones de trabajo operativas post-extremas $CT_{1,2}$, incluyen aquellos casos en los que se admite deformaciones parciales de la obra o de algún elemento de la misma.

Las condiciones operativas post-excepcionales $CT_{1,3}$, son aquellas que se dan después de la presentación de unas condiciones de trabajo excepcionales.

- **CT_2 : Condiciones de trabajo Extremas**

Incluyen los estados de proyecto asociados a las acciones más rigurosas que se deben a los factores de proyecto. Los agentes predominantes suelen ser los ambientales climáticos, que pueden llegar a adoptar valores extremos y extraordinarios. En esta situación, la obra no suele estar en explotación. En estos supuestos, se puede considerar que los agentes de uso y explotación no son simultáneos con los agentes ambientales climáticos, o sus valores de compatibilidad son despreciables.

- **CT_3 : Condiciones de trabajo Excepcionales.**

Son el conjunto de estados de proyecto que se asocian a algunos valores de los factores de proyecto que tienen: (1) una probabilidad de presentación de ser superados muy pequeña y mucho menor que la probabilidad de presentación de los valores de los factores predominantes que definen las condiciones de trabajo extremas, (2) su presentación es inesperada y accidental o (3) ocurren por razones previstas de uso y explotación. Se pueden definir las siguientes condiciones excepcionales:

Excepcionales fortuitas $CT_{3,1}$, que incluyen las condiciones fortuitas del medio físico y las condiciones fortuitas accidentales.

Condiciones fortuitas del medio físico $CT_{3,1,1}$: son el conjunto de estados de proyecto que se asocian a manifestaciones de la dinámica marina, atmosférica u otras acciones del medio físico nivel extraordinario pero previsible. Se pueden admitir fallos parciales de la obra o de alguno de sus elementos.

Condiciones fortuitas accidentales $CT_{3,1,2}$: formadas por los estados de proyecto originados por un accidente o un mal uso de la instalación. En general, podrá no haber explotación y se podrá admitir fallos parciales de la obra o alguno de sus elementos.

Condiciones de trabajo excepcionales previstas $CT_{3,2}$: incluyen los estados de proyecto provocados por una necesidad de uso o de explotación, planificados y bajo control, que pueden exigir el refuerzo de la obra o de alguno de sus elementos.

31. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Guía Metodológica para la Instalación de Arrecifes Artificiales*. Ministerio de Medio Ambiente.
- [2] *Arrecifes Artificiales: estructuras llenas de vida*. Jose Luis Gayo Romero
- [3] *Directrices relativas a la colocación de arrecifes artificiales*. Miguel Palomares e Ibrahim Thiaw
- [4] *Estudio previo para la construcción e instalación de un arrecife artificial en el LIC "Arrecifes de roquetas de Mar"*.
- [5] *EHE-08: Instrucción de hormigón estructural*. Ministerio de Fomento (2008)
- [6] *ROM 0.3: Recomendaciones para oleaje y Atlas de clima marítimo en litoral español*. Puertos del Estado (1991).
- [7] *ROM 0.4: Acciones climáticas, II: viento*. Puertos del Estado (1995).
- [8] *ROM 3.1: Configuración marítima del puerto: canal de acceso y área de flotación*. Puertos del Estado (1999).
- [9] *ROM 0.0: Procedimiento general con bases de cálculo para el proyecto ROM en las obras portuarias o/y marítimas*. Puertos del Estado (2001).
- [10] *ROM 0.5: Recomendación geotécnica para las obras marítima y/o portuaria*. Puertos del Estado (2005).
- [11] *ROM 5.1: Calidad de las aguas litorales en áreas portuarias*. Puertos del Estado (2005).
- [12] *ROM 1.0: Recomendaciones del diseño y ejecución de las obras de abrigo*. Puertos del Estado (2009).
- [13] *Cimentaciones*. Grupo de Ingeniería gráfica y simulación. Escuela técnica superior de ingenieros industriales, Universidad Politécnica de Madrid.
- [14] *Patentes antiincrustantes de base vinílica y de clorocaucho aplicado sobre estructuras artificiales de la bahía de Santander*. Emilio Eguía López.
- [15] *Caracterización biológica del biofouling marino mediante métodos moleculares. Aislamiento y determinación de actividad quorum sensing de las especies implicadas en el proceso*. Lourdes Jiménez Taracido.
- [16] *Buenas prácticas europeas en acuicultura y biofouling*. CRAB: Investigación colectiva en biofouling de acuicultura.
- [17] *El litoral mediterráneo: importancia, diagnóstico y conservación*. Propuesta de WWF/Adena
- [18] *Seguimiento del arrecife artificial de Mazarrón. Caracterización de la pradera de Posidonia oceánica*. Servicio de pesca y acuicultura.
- [19] *Navegación de precisión para fondeo y localización de arrecifes artificiales e influencia de éstos en la pesca (Caladero de Cudillero-Asturias)*. Luis Antonio García Martínez.
- [20] *Flora y vegetación marina y litoral del Cabo de Gata y el Puerto de Roquetas de Mar (Almería). Primera aproximación*. Enric Ballesteros y Jordi Catalan.
- [21] *La gestión del medio natural y humano en un sistema marítimo-terrestre no insular: el caso del Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar*. Hermelindo Castro Nogueira y José Guirado Romero.
- [22] *Estudio del impacto socioeconómico de la pesca recreativa en el Mediterráneo español*. Tragsatec.

-
- [23] *Viabilidad de una estructura sumergida en el litoral catalán para la práctica del surf.* Xavier García Márquez.
- [24] *Arrecifes artificiales en el Mediterráneo occidental: Gestión y evaluación de su aportación a la sostenibilidad pesquera.* Carlos Norman Barea.
- [25] *Artes y aparejos. Tecnología pesquera.* Mariano S. de la Cueva Sanz.
- [26] *Los arrecifes artificiales en Andalucía.* Jose Luis Daza Cordero, Rosario Vela Quiroga y Juan José García Rodríguez.
- [27] *Proyectos de arrecifes artificiales.* Alfredo Martínez.
- [28] *A wave farm for an island: Detailed effects on the nearshore wave climate.* M. Veigas, V. Ramos, y G. Iglesias.