



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio de soluciones para la adaptación al cambio
climático de la coronación del dique de abrigo del Puerto
de Bermeo (Vizcaya)

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Obras Públicas

AUTOR/A: Marin Yuste, Aurora

Tutor/a: Molines Llodrá, Jorge

Cotutor/a externo: DIAZ CARRASCO, PILAR

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



-TRABAJO FINAL DE GRADO-

ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA CORONACIÓN DEL DIQUE DE ABRIGO DEL PUERTO DE BERMEO (VIZCAYA)

MARÍN YUSTE, AURORA

GRADO EN INGENIERÍA DE OBRAS PÚBLICAS

TUTOR: JORGE MOLINES LLODRÁ

COTUTORA: PILAR DÍAZ CARRASCO

CURSO: 2022-2023



AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por toda la ayuda y apoyo que han supuesto todos estos años, así como por los valores que me han transmitido y que hoy me hacen sentirme orgulloso de la persona en la que me he convertido. A mi estrella, porque sé que tú eres mi suerte.

A mis amigas y amigos, por los momentos de desconexión tan necesarios y por enseñarme que hay familia más allá de los vínculos de sangre. A Marta, por estar siempre ahí sin importar las circunstancias.

A todo el profesorado de la UPV, porque haciendo este trabajo me he dado cuenta más que nunca de todo lo que he aprendido durante estos años gracias a ellos. A mis tutores Pilar y Jorge, por ofrecerme su ayuda siempre que han podido. Y también al profesorado que he tenido desde pequeña, aun guardo muy buenos consejos y recuerdos de algunos de ellos.



ÍNDICE GENERAL

Documento nº 1	5
MEMORIA	7
ANEJOS	31
Documento nº 2	67
PLANOS	68
Objetivos de desarrollo sostenible	75



DOCUMENTO Nº 1



ÍNDICE DE MEMORIA Y ANEJOS

1. INTRODUCCIÓN	1	ESTABILIDAD DEL ESPALDÓN.....	18
2. OBJETO	1	14. ESTUDIO DE SOLUCIONES	22
3. EMPLAZAMIENTO	1	VARIABLES A CONSIDERAR.....	22
4. DESCRIPCIÓN DEL PUERTO	2	MATERIALES EMPLEADOS.....	22
ÁREA NÁUTICO/DEPORTIVA.....	3	COSTES DE MATERIALES A EMPLEAR	23
ÁREA COMERCIAL.....	3	CONDICIONANTE DE ACCESIBILIDAD AL DIQUE	23
ÁREA PESQUERA	4	ALTERNATIVA 1: ACTUAR SÓLO EN EL ESPALDÓN.....	23
VIDA ÚTIL	5	ALTERNATIVA 2: ACTUAR EN ESPALDÓN Y AÑADIR UNA NUEVA CAPA EN EL MANTO	24
5. ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL	5	ALTERNATIVA 3: ACTUAR EN ESPALDÓN Y EN ÁNGULO DEL TALUD DEL MANTO	24
AVERÍAS EN EL DIQUE	6	ACTUACIONES A LLEVAR A CABO EN FINAL DEL TRAMO 1.....	25
SITUACIÓN ACTUAL DEL ROMPEOLAS	7	COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS	25
6. JUSTIFICACIÓN.....	8	15. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA.....	26
7. BATIMETRÍA	8	16. VALORACIÓN ECONÓMICA Y PLAZO DE EJECUCIÓN	26
8. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA	9	17. CONCLUSIÓN.....	27
9. EVALUACIÓN DE IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	10	BIBLIOGRAFÍA.....	28
10. CAMBIO CLIMÁTICO.....	11	ANEJO I: CAMBIO CLIMÁTICO.....	32
CALENTAMIENTO GLOBAL.....	11	ANEJO II: CLIMA MARÍTIMO.....	37
AFECCIONES AL CLIMA MARÍTIMO.....	11	ANEJO III: PROPAGACIÓN DEL OLAJE	43
VARIACIÓN DE OTROS FACTORES	12	ANEJO IV: CÁLCULOS DE ESTABILIDAD	49
11. CLIMA MARÍTIMO.....	12	ANEJO V: ESTUDIO DE SOLUCIONES.....	57
MAREAS.....	13		
RÉGIMEN EXTREMAL.....	13		
12. PROPAGACIÓN DEL OLAJE	15		
COEFICIENTE DE ASOMERAMIENTO (shoaling)	15		
COEFICIENTE DE REFRACCIÓN	16		
PROFUNDIDAD A PIE DE DIQUE	16		
DIRECCIÓN PREDOMINANTE DEL OLAJE	17		
ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA A PIE DE DIQUE	17		
COMPROBACIÓN DE RESULTADOS CON ÁBACO SPM Y CON CRESS.....	17		
13. REBASE Y ESTABILIDAD DEL ESPALDÓN	18		
CÁLCULO DEL CAUDAL DE REBASE	18		



MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

Bermeo ha sido históricamente un municipio dedicado al sector pesquero, el cual ha ido creciendo a medida que lo hacía su puerto, llegando este a ser uno de los puertos pesqueros más relevantes de Vizcaya durante el siglo pasado. Actualmente, además de seguir teniendo una importante actividad pesquera, cuenta con un tráfico comercial notable. El presente trabajo versa sobre este puerto y, en concreto, su dique de abrigo (Figura 1).



Figura 1. Vista frontal del dique de abrigo Frantxua en el puerto de Bermeo. Fuente: Puertos Deportivos de Euskadi

A medida que se ha hecho más relevante el tráfico en el puerto, ha ido aumentando la necesidad de abrigo en el mismo. Sin embargo, varias averías importantes en el dique de abrigo han puesto de manifiesto el infradimensionamiento del mismo. Además, las previsiones que arrojan los estudios sobre el cambio climático y sobre como este va a afectar a las condiciones climáticas a las que se ven sometidas las obras de abrigo, vislumbran escenarios peores en los próximos años.

2. OBJETO

Este TFG está enfocado a buscar soluciones para adaptar el espaldón del dique existente del puerto de Bermeo a las variaciones en el clima marítimo que se espera en un futuro debido al cambio climático.

Para ello, en primer lugar se determinan qué factores del clima marítimo pueden verse afectados debido al cambio climático. Una vez se conozcan y estimen estas variaciones, las cuales serán diferentes en base a los escenarios climáticos de emisiones futuras que establece el IPCC, se podrá determinar cómo puede verse afectado el espaldón del dique de abrigo debido a estas variaciones. Además, en el presente trabajo también se estudia cómo se prevé que variará la magnitud de estas afecciones, tanto en cada uno de sus cuatro tramos como en el morro (Figura 2), y en cada uno de los escenarios de emisiones.

Con esta información y otros datos que se ven a lo largo del documento, se puede calcular el caudal de rebase que se estima en cada caso. Este valor de caudal es el empleado para calcular los esfuerzos que provoca el oleaje sobre el espaldón del dique, con los cuales se pueden realizar comprobaciones como la estabilidad del espaldón al vuelco o deslizamiento.

Hay que tener en cuenta que, en base a la tasa de este caudal de rebase, también se puede ver comprometida integridad del talud interior del dique o pavimento al trasdós del espaldón, según el caso. Por tanto, otra comprobación que se debe hacer es determinar si la tasa de rebase obtenida produciría daños en esta zona.

Por último, se estudian diferentes soluciones para los diferentes tramos que, bajo las condiciones que hay en la actualidad y las que se prevén en los diferentes escenarios, no cumplan las condiciones de estabilidad, determinando y definiendo además la opción más eficiente teniendo en cuenta criterios económicos, técnicos, medioambientales y sociales.

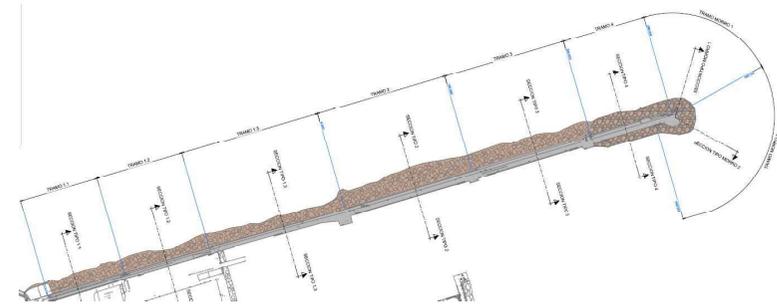


Figura 2. . Tramos del dique de abrigo Frantxua. Fuente: Modificación del Proyecto de Refuerzo del Manto Principal del Dique de Abrigo del Puerto de Bermeo (TYPSA, 2019)

El presente trabajo se centra únicamente en el espaldón del dique de abrigo. No se estudia la afección del cambio climático a otros elementos del dique como puede ser la estabilidad de las piezas del manto, ni a otras obras del puerto como las obras de atraque o el contradique.

3. EMPLAZAMIENTO

El puerto en cuestión se encuentra en la provincia de Vizcaya, en la zona norte de España (Figura 3). Por tanto, su costa está bañada por las aguas del Mar Cantábrico que se encuentra en el Océano Atlántico.



Figura 3. Localización del puerto respecto a la península. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth

Concretamente, se ubica entre la Ría de Guernica y el Cabo de Matxitxako (Figura 4) los cuales delimitan la bahía en la que se encuentra el puerto. Precisamente este cabo sirve de abrigo natural del oleaje del oeste y resta fuerza al oleaje del noroeste, siendo estos unos de los oleajes más importantes en el Mar Cantábrico, como se verá en el ANEJO I: CAMBIO CLIMÁTICO.

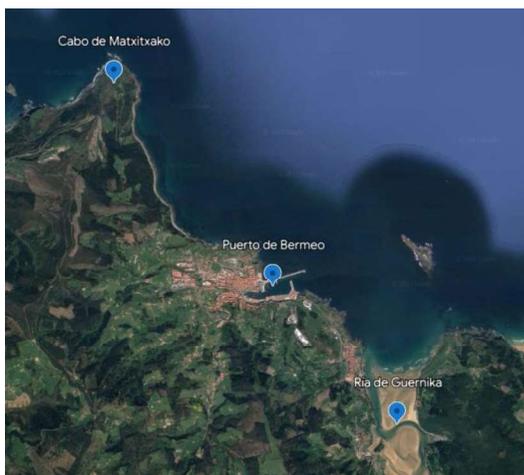


Figura 4. Límites geográficos cercanos al puerto de Bermeo. Fuente: elaboración propia a través de Google Earth

A nivel municipal, el puerto se encuentra principalmente en Bermeo, aunque parte del mismo se encuentra en el término municipal de Mundaka, en concreto el contradique y parte del muelle comercial de Erroxape (Figura 5). En el siguiente apartado se especificará la superficie que ocupa el puerto en cada uno de los municipios.



Figura 5. zona del puerto en término municipal de Mundaka (en verde). Fuente: Web del Ayuntamiento de Mundaka

4. DESCRIPCIÓN DEL PUERTO

Actualmente, el puerto de Bermeo es de carácter principalmente comercial, pero mantiene una importante actividad pesquera como la que ha tenido a lo largo de su historia. En concreto, de sus 351.501 m² totales de

superficie (Figura 6), aproximadamente un 40% está destinado a un uso comercial, otro 35% al sector pesquero y únicamente un 16% al náutico/deportivo. El 9% restante corresponde a los accesos (Figura 7).

• **SUPERFICIE DEL PUERTO.**

Superficie terrestre Bermeo.....	104.101 m ² .
Superficie terrestre Mundaka.....	34.585 m ² .
Superficie terrestre Total	138.686 m ² .

Superficie de agua	212.815 m ² .

Figura 6. Superficie total terrestre y de agua abrigada en el puerto. Fuente: web del Gobierno Vasco

ÁREA	Color	Mar	Tierra	TOTAL
AREA 1- NAUTICO/DEPORTIVA	Cyan	32.899 m ²	24.021 m ²	56.920 m ²
AREA 2- PESQUERA	Orange	76.163 m ²	46.004 m ²	122.167 m ²
AREA 3- COMERCIAL	Green	83.008 m ²	56.829 m ²	139.835 m ²
AREA 4 ACCESOS	Yellow			23.370 m ²

Figura 7. Áreas del puerto por usos. Fuente: web del Gobierno Vasco

Como se ha visto (Figura 6), gran parte de la superficie terrestre corresponde al término municipal de Bermeo, mientras que únicamente el 25% pertenece a Mundaka. Por otra parte, algunas zonas de esta superficie terrestre están destinadas a viales y espacios públicos, aparcamientos, así como áreas peatonales, además de la zona destinada únicamente a servicios propios del puerto. En concreto, el porcentaje del área terrestre que ocupan estos sistemas locales abarca un 32% del total (Figura 8).

• **Sistemas locales.-**

	Bermeo m ²	Mundaka m ²	Total m ²
Viales públicos	10.798	5.594	16.392
Aparcamientos	332	—	332
Espacios públicos y áreas peatonales.	25.187	2.406	27.593
SUMA	36.317	8.000	44.317

Figura 8. Distribución y áreas de ocupación de los sistemas locales. Fuente: web del Gobierno Vasco

En cuanto a las infraestructuras, equipamientos y ubicación en el puerto de cada área, se detallan a continuación. A modo de resumen, en la zona Noroeste se encuentra el área náutico/deportiva; en la zona Este, más cercana a la bocana del puerto, se encuentra el área comercial; el área pesquera se concentra principalmente en el suroeste de la superficie abrigada (Figura 9).

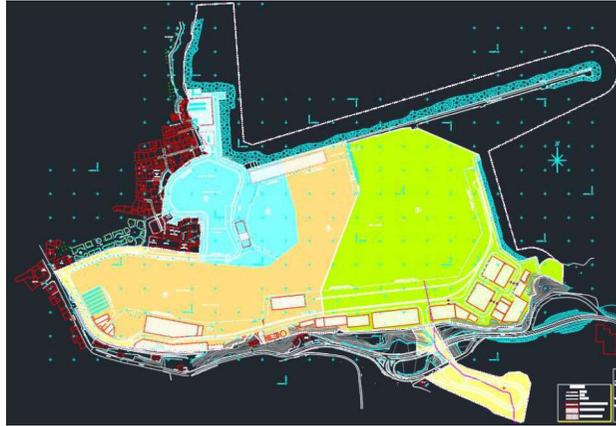


Figura 9. Ocupación por usos del puerto: náutica/deportiva (azul), comercial (verde) y pesquera (naranja). Fuente: web del Gobierno Vasco

ÁREA NÁUTICO/DEPORTIVA

Esta área se concentra principalmente en la dársena de Portu Zaharra equipada con pantalanes, y además cuenta con una zona anexa para el fondeo de embarcaciones. En concreto, cuenta con un número total de 356 amarres en la dársena (Figura 10) para barcos deportivos con una eslora máxima de 8m, así como 30 boyas en la zona de fondeo para embarcaciones de hasta 14 metros de eslora. Toda el área está destinada para barcos cuyo calado máximo sea de 3m.

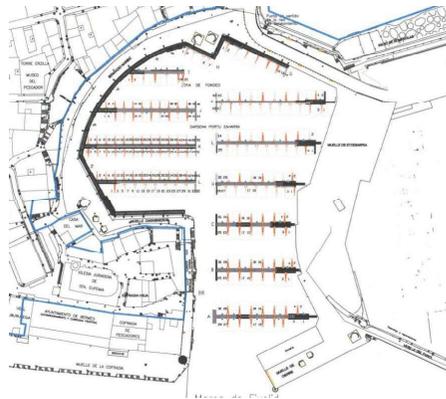


Figura 10. Distribución de amarres en dársena Portu Zaharra. Fuente: Puertos Deportivos de Euskadi

Además, esta área también alberga otros equipamientos como las lonjas de Bermeo Frantxua, servicio de rampa de varada para pequeñas embarcaciones, párquines para automóviles, y tomas de agua y electricidad.

En cuanto a las obras de amarre y protección que sirven a esta zona, en el interior de la dársena se encuentra el Muelle de Portu Zaharra, y en su canal de acceso de encuentra el Muelle de la Escollera. Además, en la zona anexa de fondeo se alberga parte del Muelle de Norte.



Figura 11. Disposición de la dársena y la zona de fondeo respecto al rompeolas. Fuente: elaboración propia sobre imagen extraída de la web de Puertos Deportivos de Euskadi

Por su parte, la zona de fondeo se encuentra abrigada por el Tramo 1 del dique de abrigo (Figura 2), mientras que no se puede considerar que la dársena esté protegida por el rompeolas (Figura 11). Esta se encuentra más bien al abrigo de una protección similar a la escollera de protección efectuada en defensas costeras, con la particularidad de que además cuenta con un espaldón y que la zona donde rompen las olas, además de contener bloques de escollera, cuenta con bloques de hormigón en masa similares a los dispuestos en el manto de abrigo del dique.

ÁREA COMERCIAL

Esta área, la más cercana a la bocana de acceso al puerto, se concentra en una dársena relativamente nueva que dispone de muelle con explanada para el aprovisionamiento y la carga y descarga de mercancías. Aproximadamente, esta explanada cuenta con una superficie de unos 18.500 m².

El muelle en el que se alberga la explanada es el Muelle de Erroxape, estando parte del mismo al trasdós del contradique del puerto (Figura 12). Además, parte del área comercial se encuentra tras el Tramo 1.3 del dique de abrigo (Figura 2), aunque esta no disponga en la actualidad de muelle.

También cuenta con los siguientes equipamientos: un astillero, una grúa de 12 Tn, tomas de agua, electricidad, y suministro de combustible, básculas de pesaje, gran parte de los equipamientos destinados a la gestión de residuos, así como una zona con comercios y servicios vinculados al puerto.

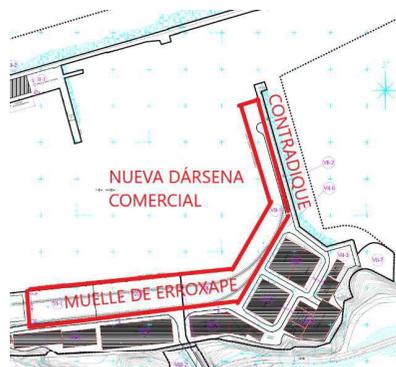


Figura 12. Dársena comercial del puerto de Bermeo. Fuente: elaboración propia sobre imagen de la web del Gobierno Vasco

La actividad comercial se concentra en la importación de productos siderúrgicos y en la exportación de madera. En menor medida también se importan mercancías como la pasta de papel o el aluminio, y se exportan productos químicos como sulfato sódico, potasa y sosa.

ÁREA PESQUERA

El área pesquera se encuentra en la dársena El Artaza (Figura 13), la cual dispone también de un muelle con explanada con una superficie de unos 11.000 m² para el aprovisionamiento y la carga de los útiles de pesca y descarga del pescado. Esta dispone también de una zona de fondeo con 11 grandes boyas, otra zona para guardar barcos varados y de un parque para automóviles.

El muelle principal en el que se alberga esta explanada es el Muelle de Matxicorta, aunque parte de la misma ocupa una zona del Muelle de Erroxape. Además, hay una parte del área pesquera se encuentra al trasdós del Tramo 1.2. del dique de abrigo (Figura 2), en la cual se encuentra el Muelle del Norte, compartido con el área náutico/deportiva.

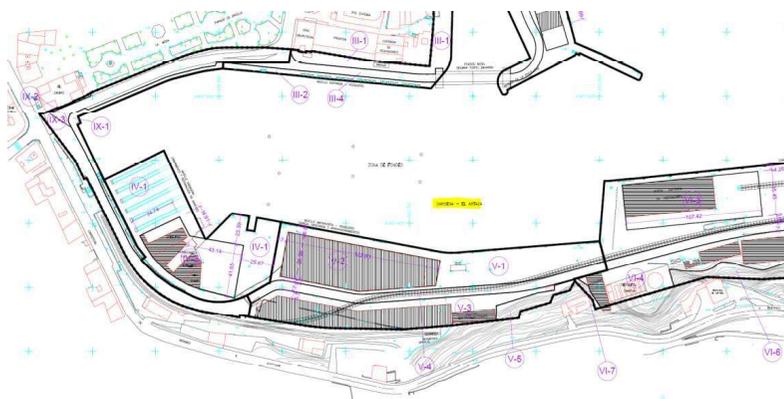


Figura 13. Dársena pesquera El Artaza. Fuente: web del Gobierno Vasco

En cuanto a los equipamientos, esta área concentra un gran número de ellos. En la zona pesquera se dispone de: una lonja, la fábrica de hielo, las oficinas del puerto, la cofradía de pescadores, el varadero con 6 carros y una rampa de varada, dos de los tres astilleros, un taller de reparación y carpintería, empresas vinculadas a las conservas, un travel-lift, una de las grúas de 12 Tn, una zona con básculas, tomas de agua y electricidad, puntos de recarga de combustible y una zona de gestión de residuos.

Respecto a la actividad pesquera, más de un 40% corresponde a las capturas de bonito y verdel, los cuales se suelen vender a la industria conservera. También llegan a través de este grandes cantidades de las variedades sardina, atún y chicharro.

Cabe destacar que más del 26% del bonito y un 19% del verdel en total que se extrae en los puertos pertenecientes al Gobierno del País Vasco, llega a través del puerto de Bermeo (Figura 14).

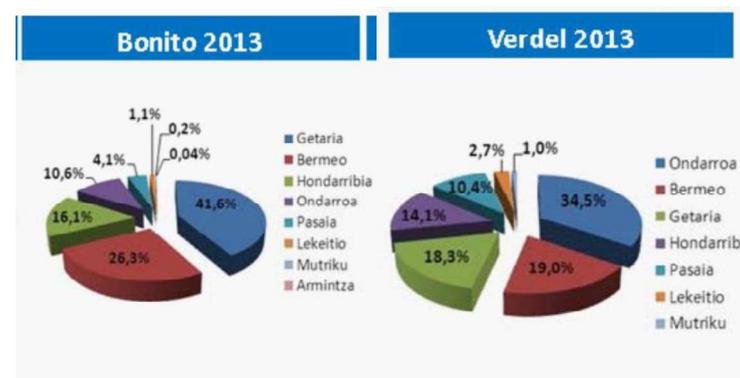


Figura 14. Porcentajes de Bonito y Verdell extraídos en cada puerto del País Vasco. Fuente: Gobierno Vasco

La estadística realizada por el Gobierno Vasco en el año 2013 (Figura 15) muestra que, entre los puertos con lonja de esta comunidad autónoma, los más relevantes en cuanto a volumen de venta en las mismas se encuentran en la provincia de Guipúzcoa, entre ellos: Pasaia, Getaria u Hondarribia. En cuanto a la provincia de Vizcaya, el segundo más relevante es el de Bermeo por detrás del puerto de Ondarroa.

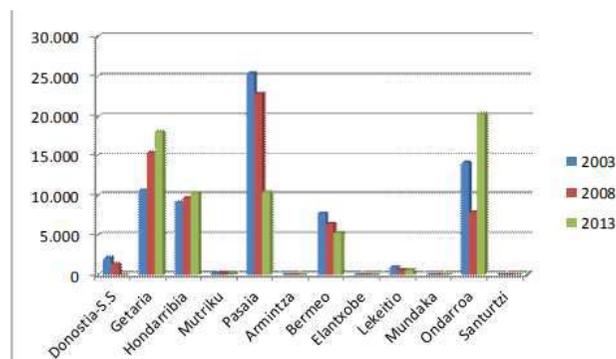


Figura 15. Comparativa entre diferentes años del valor de venta en lonja de los puertos del País Vasco. Fuente: Gobierno Vasco.

VIDA ÚTIL

El cálculo de la vida útil o período de retorno de cualquier obra portuaria o costera se realiza a partir del Índice de Repercusión Económica (IRE). Este índice valora de forma cuantitativa la repercusión económica que implicaría la reconstrucción de la obra en cuestión, o la afección e incluso cese de las actividades asociadas al puerto que implicaría la destrucción del dique de abrigo, en este caso.

Para el cálculo de este coeficiente, la ROM 0.0-01 da una fórmula (1) la cual depende de las repercusiones económicas que supondría la reconstrucción de la obra que se valora (C_{RD}), así como la repercusión que tendría el cese o afección de las actividades económicas relacionadas con la obra en cuestión (C_{RI}). El otro factor que incluye la fórmula es un parámetro económico de adimensionalización (C_0).

$$IRE = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_0} \quad (1)$$

El dato C_{RD} se podría obtener realizando el presupuesto que tendría reconstruir la obra, en este caso el dique de abrigo estudiado. Sin embargo, no se tienen datos de estudios previos para obtener el coeficiente C_{RI} . Llegados a este punto, se puede recurrir a la tabla 2.2.33. de la ROM 1.0-09 (Figura 16), que indica la vida útil mínima en función de la tipología del puerto.

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA		ÍNDICE IRE ¹	VIDA ÚTIL MÍNIMA (V _m) ¹ (años)
ÁREAS PORTUARIAS	PUERTO COMERCIAL	Puertos abiertos a todo tipo de tráficos	r ₃ Alto 50
		Puertos para tráficos especializados	r ₂ (r ₃) ¹ Medio (alto) ¹ 25 (50) ¹
	PUERTO PESQUERO	r ₂ Medio 25	
	PUERTO NÁUTICO-DEPORTIVO	r ₂ Medio 25	
	INDUSTRIAL	r ₂ (r ₃) ¹ Medio (alto) ¹ 25 (50) ¹	

¹ El índice IRE se elevará a r₃ cuando el tráfico esté asociado con el suministro energético o con materias primas minerales estratégicas y no se disponga de instalaciones alternativas adecuadas para su manipulación y/o almacenamiento.

Figura 16. Tabla 2.2.33. de la ROM 1.0-09, de recomendación sobre la vida útil mínima a tener en cuenta. Fuente: Puertos del Estado

Como se ha visto, el puerto de Bermeo en la actualidad es mayormente comercial y además de tráficos concretos o especializados. Para este tipo de puertos, la tabla determina una vida útil mínima de 25 años, que eleva a 50 años en caso de que el tráfico se asocie con el suministro energético o con materias primas minerales estratégicas, para las cuales no se tengan instalaciones alternativas para su manipulación y/o almacenamiento.

En este caso concreto del puerto de Bermeo, se ha visto que se importa y exporta materias primas minerales como productos siderúrgicos o aluminio, pero no se tiene información sobre si se dispone de instalaciones alternativas para su manipulación y/o almacenamiento. Por tanto, quedando del lado de la seguridad se supondrá que no se dispone de alternativas, resultando una vida útil mínima de 50 años.

5. ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL

En sus orígenes (siglo XIV), este estaba compuesto por el “Puerto-Chico” y el “Puerto-Grande” (Figura 17), carecía de muelles y se encontraba al abrigo natural de las peñas de Santa Eufemia.

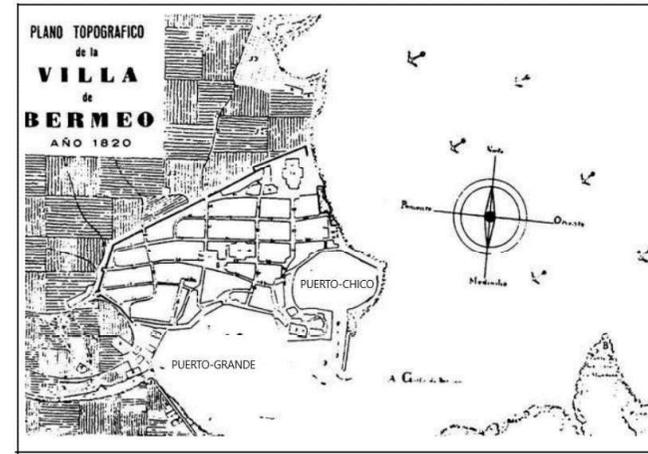


Figura 17. Plano topográfico de Bermeo realizado en 1820 por J.B. Belaunzarán. Fuente: Vasconia. Cuadernos de Sección de Historia-Geografía, nº 22 (1994)

No fue hasta el año 1850, fecha en que el puerto se declaró de interés general para el Estado, cuando se comenzaron a acometer grandes obras de remodelación, ampliación y acondicionamiento hasta llegar al puerto que se conoce ahora (Figura 18).



Figura 18. Estado actual del puerto de Bermeo. Fuente: google earth

Una de esas grandes obras de ampliación se produjo en los años 90. Como se ha visto en apartados anteriores, tradicionalmente el puerto de Bermeo ha estado destinado al sector pesquero. Pero a partir del 1990, cuando se aprobó el Plan Especial de Ordenación del Puerto de Bermeo, se empezaron a construir nuevos muelles y zonas de explanada, pudiendo así albergar nuevos usos comerciales.

Las necesidades de abrigo del puerto han ido aumentando a medida que este crecía. Concretamente, el dique de abrigo se ha construido por fases durante el pasado siglo a medida que aumentaba la necesidad de realizar nuevos muelles y zonas de atraque. De hecho, los últimos 100 metros del rompeolas (Tramo 4) se construyeron a principios de los años 90, coincidiendo con la aprobación del Plan y la construcción de nuevas zonas comerciales. Actualmente cuenta con una longitud de unos 770 metros distribuidos en 4 tramos y el morro.

AVERÍAS EN EL DIQUE

El dique de Frantxua ha sufrido numerosos daños desde su implantación en el 1914 que han dejado en evidencia el infradimensionamiento del mismo, tanto en las secciones primitivas como en zonas que posteriormente habían sido ampliadas y reforzadas. De hecho, la última avería importante en este dique se produjo durante un fuerte temporal en febrero del 2016 (Figura 19), como se verá en este apartado.



Figura 19. Avería del año 2016. Fuente: El Correo

La sección primitiva del tramo 1 se construyó como un dique vertical de mampostería en el año 1914. Desde entonces sufrió varias averías importantes concentradas entre los años 1934 y el 1944, provocadas en su mayoría por importantes oleajes del Noroeste. Es por ello que, a partir de este último año y hasta el 1956, se realizaron cuatro proyectos en total para verter bloques frente a la sección existente, convirtiendo el mismo en un dique mixto, como se puede ver en la Figura 20.

Tras la finalización de este refuerzo y la prolongación del Tramo 1 hasta sus 376 metros actuales en el 1953, el cuerpo del dique volvió a sufrir averías importantes entre el año 1972 y los 10 años siguientes, dejando cavernas en el mismo que permitían el paso del oleaje a través de este.

La reparación consistió en reconstruir el perfil del dique taponando las cavernas con sacos de cemento y rellenando las mismas con hormigón sumergido a través de una chimenea realizada desde la parte superior de la sección (Figura 20).

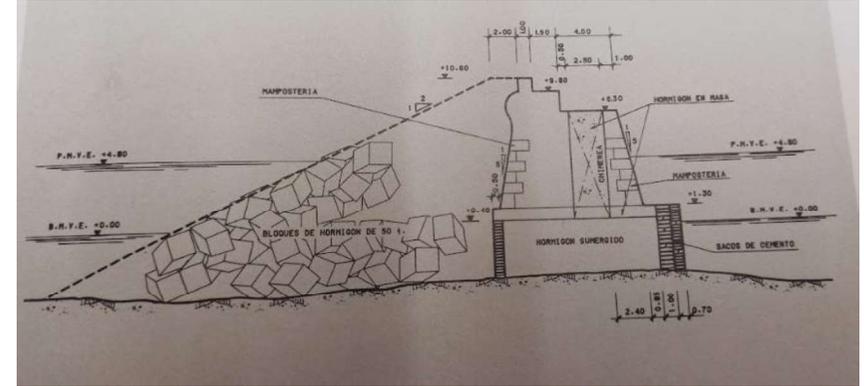


Figura 20. Sección Tramo 1 tras reparaciones. Fuente: Diques de Abrigo en España: Tomo 1: Fachadas Norte y Galicia (1988)

Posteriormente, tras la construcción de los tramos restantes también se han producido daños importantes en estos últimos años, concretamente durante los temporales de los años 2007, 2008, 2014 y 2016.

En diciembre del 2007, un fuerte oleaje se llevó por delante los últimos 70 metros del espaldón (Figura 21). Sin haberse podido llevar a cabo su reparación, en marzo del 2008 otro temporal embiste la costa bilbaína desplazando otros 25 metros, quedando así desplazado por completo el espaldón del Tramo 4. Hay que tener en cuenta que este tramo del dique se construyó a principios de los años 90, hacía apenas unos 15 años.



Figura 21. Rotura del espaldón en temporal del 2007. Fuente: Comité Técnico de Ingeniería Portuaria de la Asociación Técnica de Puertos y Costas

La reparación de esta zona del rompeolas se llevó a cabo durante ese mismo año. Para ello, se vertieron alrededor de 700 bloques de piedra caliza de entre 48 y 60 toneladas sobre el manto exterior, y posteriormente reconstruyó íntegramente la zona afectada del espaldón.

Años más tarde se volvió a poner a prueba la resistencia del dique con los temporales del 2014. El 2 de febrero de este año, con las obras de protección ya debilitadas tras dos temporales ocurridos hacía apenas un mes, un fuerte oleaje coincide con una excepcional marea. En este caso la peor parte se la llevó la zona que protegía las Lonjas de Frantxua, quedando esta derruida prácticamente en su totalidad (Figura 22). La reparación de esta consistió en reconstruirla íntegramente.



Figura 22. Rotura de la zona de protección y afección a las lonjas. Fuente: Asociación Técnica de Puertos y Costas

Durante este temporal también se produjo la rotura del espaldón en 3 zonas derruyendo 100 metros del mismo en total (Figura 23), se perdieron parte de las piezas del manto principal, se desplazó un módulo del espaldón del contradique, y se hundieron varios pantalanes del puerto deportivo. La reparación en el dique de abrigo consistió en la reconstrucción de las zonas de espaldón afectadas y en la colocación de cerca de 4.000 Tn de bloques de protección en el manto principal.



Figura 23. Rotura del espaldón en Tramo 1 y desplazamiento en Tramo 4. Fuente: Asociación Técnica de Puertos y Costas

Sin embargo, la Dirección de Puertos y Asuntos Marítimos vio necesaria una actuación integral sobre el dique de abrigo, pues los antecedentes ponían en evidencia el infradimensionamiento del mismo. Por ello, en septiembre del 2015 se encargó la redacción del *Proyecto de Refuerzo del Manto Principal del Dique de Abrigo del Puerto de Bermeo*, pero antes de finalizar su redacción otro temporal en febrero del 2016 volvió a provocar el colapso total del espaldón en 30 metros y roturas en otros 20 metros contiguos (Figura 19).

De esta forma fue necesario redactar un proyecto de emergencia, cuyas obras consistían en el refuerzo del espaldón a lo largo de todo el rompeolas y el vertido de bloques de hormigón de alta densidad en el manto exterior. Estas finalizaron en junio del 2017.

Por último, se siguió con el plan marcado en el 2015 para el refuerzo integral del dique de abrigo. Para ello, en 2019 se redactó el proyecto cuyas obras culminaron con la recepción de la misma en octubre del año pasado, dando como resultado la sección del dique que se tiene actualmente y que se verá a continuación.

SITUACIÓN ACTUAL DEL ROMPEOLAS

La actuación de emergencia y el último proyecto de refuerzo han permitido que el rompeolas del puerto resista los temporales ocurridos a partir del 2016, por lo que en un principio parece estar preparado para las condiciones actuales de clima marítimo.

Estas últimas actuaciones sobre el rompeolas han consistido en recrecer el espaldón a lo largo de toda su longitud, realizar un pilotaje para reforzar el mismo y verter bloques de alta densidad sobre el manto principal y sobre el manto interior.

El tramo 1, el cual quedó reconstruido con la actuación de emergencia, conserva la sección primitiva del espaldón, hecha con mampostería y reforzada en la parte inferior con hormigón sumergido y sacos de cemento. En cuanto a la composición del manto principal, está formado por bloques de hormigón en masa de 55 Tn, y bloques de hormigón de alta densidad de 40 Tn vertidos en la última actuación. La sección de este tramo queda reflejada en la Figura 24.

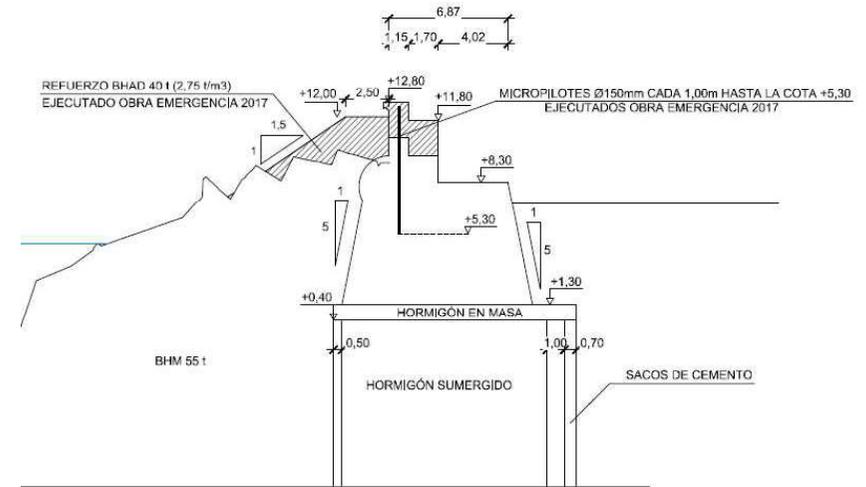


Figura 24. Sección transversal del tramo 1. Fuente: Modificación del Proyecto de Refuerzo del Manto Principal del Dique de Abrigo del Puerto de Bermeo (TYPSA, 2019)

Como se puede ver en la imagen, la reconstrucción ha consistido en el recrecido del espaldón (zona sombreada de Figura 24), refuerzo del mismo mediante pilotaje con micropilotes de 150mm de diámetro, y refuerzo del manto principal con la colocación de bloques de hormigón de alta densidad de 40 Tn. Las actuaciones en el resto de tramos del dique son semejantes, con la principal diferencia de que en estos se ha actuado también reforzando el talud del manto interior también con bloques de hormigón de alta densidad de 40 Tn.

Por ejemplo, en la sección del tramo 3 (Figura 25), el recrecio del espaldón se ha hecho a la cota +13.8m, el refuerzo del manto principal y del manto interior se ha realizado mediante bloques de 40 Tn y el pilotaje se ha realizado también mediante micropilotes de 150 mm de diámetro.

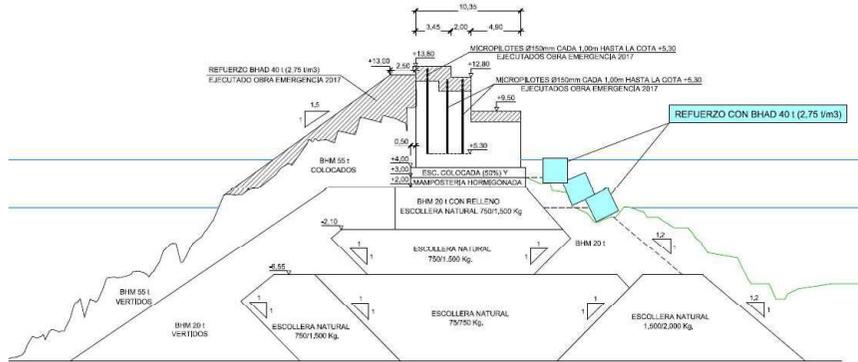


Figura 25. Sección transversal del tramo 3. Fuente: Modificación del Proyecto de Refuerzo del Manto Principal del Dique de Abrigo del Puerto de Bermeo (TYPSA, 2019)

El Tramo 2 se diferencia del 3 en la variación de algo más de un metro en el ancho de la base del espaldón y en el núcleo, que en el Tramo 3 tiene una composición más homogénea con bloques de HM de 20 Tn en todo el conjunto.

En cuanto al Tramo 4 (Figura 26) y el morro, se tienen variaciones más significativas. Por ejemplo, la cota de coronación aumenta en más de 2 metros y el refuerzo del manto principal se ha realizado con bloques de alta densidad de 60 Tn en el Tramo 4 y de 80 Tn en el morro. Respecto al resto de características son semejantes al resto de tramos.

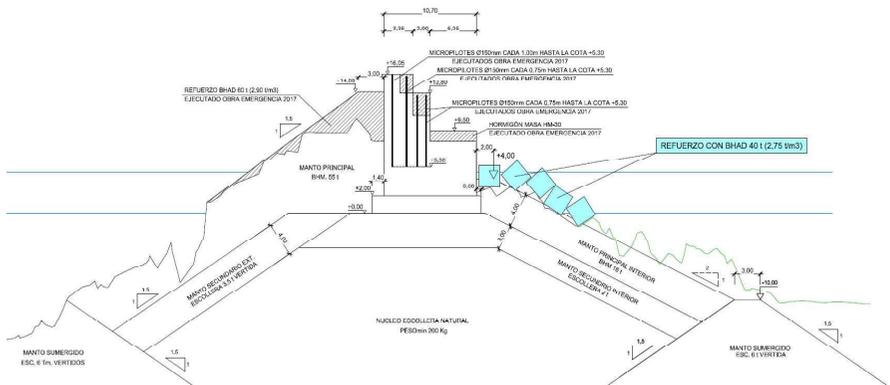


Figura 26. Sección transversal del tramo 4. Fuente: Modificación del Proyecto de Refuerzo del Manto Principal del Dique de Abrigo del Puerto de Bermeo (TYPSA, 2019)

6. JUSTIFICACIÓN

Como se ha visto, este puerto relevante para la provincia de Vizcaya ha sufrido importantes averías en su dique de abrigo que han puesto de manifiesto un diseño y construcción que no ha tenido en cuenta las características reales del clima marítimo a las que se ve expuesto.

Las últimas actuaciones parecen estar bien encaminadas a que el dique resista con las condiciones climáticas que se tienen actualmente. No obstante, también se comprueba si actualmente el espaldón tiene la suficiente estabilidad.

Además, se debe comprobar si en los diferentes escenarios futuros provocados por el cambio climático se siguen cumpliendo estas comprobaciones, ya que los expertos apuntan que aspectos del clima marítimo como el aumento en el nivel medio del mar (NMM) tendrá variaciones significativas de cara al futuro.

De hecho, los estudios llevados a cabo por Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) revelan que el aumento en el nivel del mar va a seguir con la tendencia actual aunque se empiecen a tomar medidas drásticas e inminentes para frenar el calentamiento global, como se verá en el ANEJO I: CAMBIO CLIMÁTICO. Esto es porque el aumento en el nivel del mar es un proceso que se desarrolla lentamente y no es inmediato, por lo que las consecuencias del calentamiento que se está experimentando en la actualidad se seguirán notando en un futuro lejano, cuyo límite no se ha podido determinar aún.

Es por ello que es de vital importancia **incluir este factor en el dimensionamiento en las obras marítimas**, teniéndolo en cuenta también en las reconstrucciones y ampliaciones que se realicen en este tipo de infraestructuras.

“Es posible que los impactos sobre las infraestructuras costeras sean los más importantes debido a dos factores concretos. En primer lugar, las zonas costeras están sujetas a los efectos de la subida del nivel del mar y a las tormentas tropicales y extratropicales más intensas. Y, en segundo lugar, es en las costas donde se produce la conexión de tres modos de transporte fundamentales: barcos, trenes y camiones, que se encargan de transportar mercancías con origen y destino en los puertos.” Boletín de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2009).

7. BATIMETRÍA

La batimetría en el entorno del puerto varía según la escala a la que se mire. Esto se debe a la posición del puerto dentro de la bahía, y a su vez al posicionamiento que tiene esta respecto al Mar Cantábrico. Si se atiende a las líneas batimétricas que hay en general en la costa norte, estas tienden a posicionarse aproximadamente horizontales (Figura 27).



Figura 27. Batimetría en aguas profundas frente a Santander y Bilbao. Fuente: Navionics

Sin embargo, si nos acercamos a la costa de Bermeo, estas giran levemente posicionándose aproximadamente en paralelo a la línea imaginaria que une el Cabo de Matxitxako y la desembocadura de la Ría de Guernica (Figura 28).

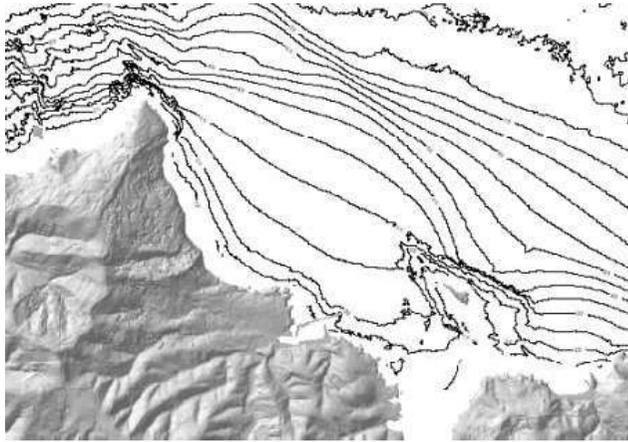


Figura 28. Batimetría en el entorno del puerto de Bermeo. Fuente: Elaboración de mapas de hábitats y caracterización de fondos marinos de la plataforma continental vasca (Gobierno Vasco, 2009)

Esta es la batimetría que se utiliza de referencia a la hora de realizar los cálculos a lo largo del presente documento. Como vemos, esta forma aproximadamente 120° con el Norte, o lo que es lo mismo: forma 30° con las líneas de frente del oleaje que proviene del Norte.

En el apartado de *PROPAGACIÓN DEL OLEAJE* se ve cómo afecta esta batimetría al oleaje según la dirección de la que proviene.

8. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

En general, las costas bañadas por el Mar Cantábrico se caracterizan por sus acantilados y por el lecho rocoso y con arenas que se encuentra en las zonas más cercanas a la superficie. Particularizando en el entorno del puerto, la situación es la misma: en su mayoría está compuesto por arenas de tamaño medio-grueso (Figura 29), y en algunas zonas sobre las que apoyan las infraestructuras del puerto se encuentra además un sustrato rocoso (Figura 30).

Este tipo de terreno es idóneo para ubicar los diques de abrigo, tal y como indica la ROM 1.0-09. En este texto de recomendaciones se establece que los fondos rocosos, aun teniendo un alto grado de deterioro, son adecuados para apoyar sobre ellos cualquier tipo de dique de abrigo. Lo mismo ocurre con los suelos de material suelto no cohesivo (arenas gruesas y gravas), pues al poseer una gran permeabilidad permite drenar el fluido intersticial cuando se somete a grandes cargas.

Por tanto, se deduce que la geotecnia del terreno existente no es un factor que vaya a influir a la hora de diseñar las diferentes soluciones en el dique de abrigo. Sobre todo, teniendo en cuenta que la obra de abrigo en cuestión ya está construida, y que la sobrecarga que se aplicará con cualquiera de las soluciones no implicará un

aumento significativo de la misma en relación a la carga que actualmente soporta el terreno en la zona del rompeolas.

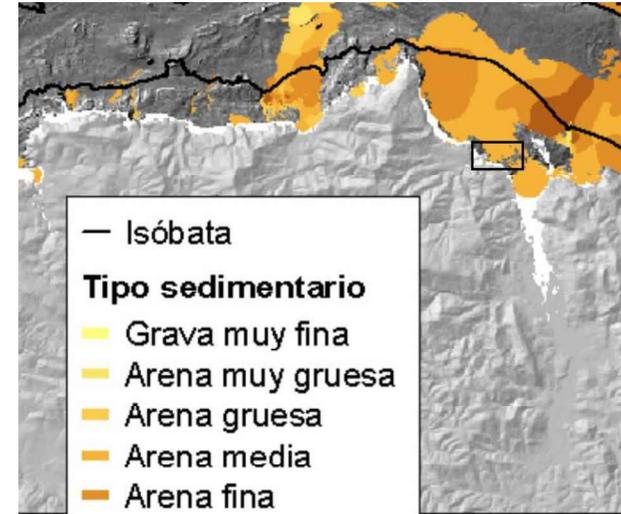


Figura 29. Distribución de suelos sedimentarios en el entorno del puerto. Fuente: Elaboración de mapas de hábitats y caracterización de fondos marinos de la plataforma continental vasca (Gobierno Vasco, 2009)

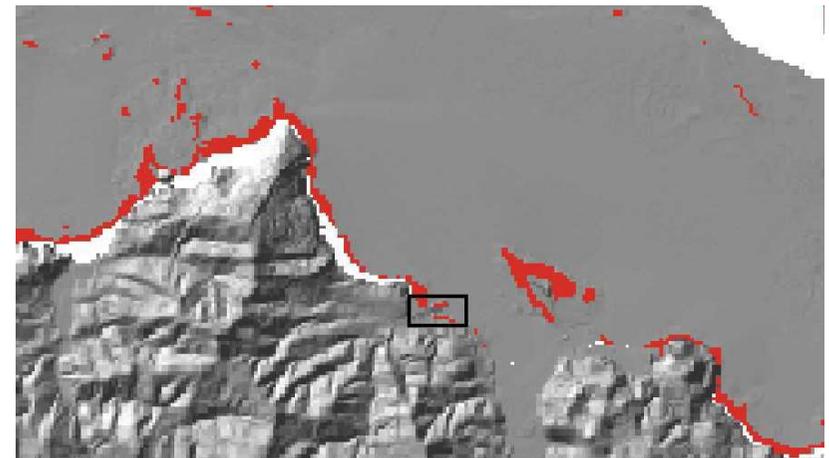


Figura 30 Localización de los fondos rocosos en el entorno del puerto. Fuente: Elaboración de mapas de hábitats y caracterización de fondos marinos de la plataforma continental vasca (Gobierno Vasco, 2009)

9. EVALUACIÓN DE IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

Bermeo se encuentra dentro de la zona de Reserva de la Biosfera de Urdaibai. Esta área declarada por la UNESCO tiene varias zonas protegidas, como son el área de la ría, el área del litoral y las marismas y el área de encinares cantábricos.

Particularizando en el entorno del puerto, hay dos espacios protegidos Red Natura 2000 que se ven afectados por este. Esta Red comprende una serie de áreas de conservación de la biodiversidad a nivel europeo que consta de Zonas Especiales de Conservación (ZEC) y Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA).

Uno de estos espacios es la ZEC ES2130007: Zonas Litorales y Marismas de Urdaibai, la cual colinda con el puerto. Concretamente abarca la zona noroeste del mismo, donde se encuentra la obra que protege las Lonjas de Fratxua, así como la zona sureste más cercana al contradique y al Muelle de Erroxape (Figura 31). Esta área que ocupa algo más de mil hectáreas en total alberga 20 hábitats de interés comunitario y 5 de interés regional que incluyen arrecifes, dunas y acantilados, entre otros. También cuenta con varias especies de flora y fauna que quedan protegidas dentro de esta área.

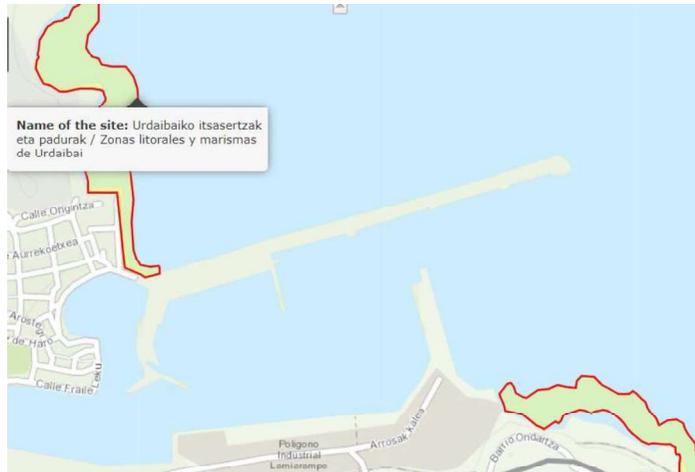


Figura 31. Localización de la ZEC: Zonas Litorales y Marismas de Urdaibai. Fuente: Red Natura 2000

Por otra parte, se encuentra la ZEPA ES0000144: Ría de Urdaibai, que engloba esta ZEC y otras, ocupando un total de 3242 hectáreas, gran parte de estas en zona marina (un 44%). Parte del puerto queda cubierto por esta ZEPA, en concreto la zona del contradique, parte del Muelle de Erroxape, así como los Tramos 3 y 4 del dique de abrigo (Figura 32).

Esta ZEPA y la ZEC vista antes, quedan amparadas por el DECRETO 358/2013, de 4 de junio, por el que se designan Zonas Especiales de Conservación 4 lugares de importancia comunitaria del ámbito de Urdaibai y San Juan de Gaztelugatxe y se aprueban las medidas de conservación de dichas ZEC y de la ZEPA Ría de Urdaibai. Este Decreto, además de delimitar estas zonas y asegurar el cumplimiento de las Directivas Europeas relativas a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres, incluye una serie de medidas para la conservación de estas zonas protegidas.



Figura 32. Localización de la ZEPA: Ría de Urdaibai. Fuente: Red Natura 2000

En concreto, algunas de las medidas establecidas por este Decreto y que influyen en el área de actuación del presente proyecto son las siguientes:

- M.1.1.1.1.: Restaurar las superficies de este hábitat, favoreciendo la naturalización del estuario.
- M.47-49.1.1.: Establecer un plan de control y vigilancia en las colonias durante el período crítico. Se debe prestar especial atención a cualquier indicio que permita sospechar las posibilidades de riesgo de mortalidad de adultos y a reducir las molestias en las áreas de nidificación. Teniendo en cuenta su fenología reproductiva, el período crítico para el Cormorán moñudo se establece entre el 1 de enero y el 15 de agosto y para el Paíño europeo entre el 15 de mayo y el 30 de octubre (se abarca el periodo de la garceta común).
- M.60-61.1.1.: Establecer un plan de control y vigilancia en los territorios durante el período crítico. Se prestará especial atención a cualquier indicio que permita sospechar las posibilidades de expolio, el riesgo de mortalidad de adultos y a reducir las molestias en las áreas de nidificación. Teniendo en cuenta la fenología reproductiva de la especie, el período crítico para el Halcón peregrino se establece entre el 20 de febrero y el 2 de junio. Para el Alimoche común se establece como periodo de especial sensibilidad el comprendido entre el 15 de marzo y el 10 de septiembre (de mayo a julio son los meses con mayor probabilidad de fracaso reproductor)

Como se puede ver, prácticamente todos los meses del año son críticos para la reproducción de alguna de las especies protegidas, exceptuando noviembre y diciembre. Por tanto, durante la ejecución de las obras se deberá prestar especial atención durante estos meses para tratar de no alterar a estas especies.

Por otra parte, se deberá tramitar el permiso al Departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente del País Vasco para que se indiquen las medidas que se deberán tomar y las restricciones en esta materia a la que se deberán ceñir las obras.

10. CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo en los patrones climáticos de la Tierra, siendo el calentamiento global una de las principales consecuencias del mismo. Este aumento en la temperatura media terrestre es debido, en gran parte, a las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Figura 33).

Para determinar y tratar de cuantificar los cambios en el clima que se están experimentando y que se experimentarán en un futuro, varios organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas (ONU) o el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), llevan años estudiando estos factores.

Por su parte, los países están trabajando juntos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de acuerdos internacionales. Sin embargo, aunque se tomen medidas para frenar el calentamiento global, es inevitable que a corto-medio plazo aumente la temperatura media dada la tendencia actual, como se verá a continuación. Este aumento en las temperaturas, aparte de afectar gravemente a los ecosistemas, es previsible que **produzca daños en las infraestructuras civiles existentes.**

CALENTAMIENTO GLOBAL

Como se ha adelantado, el CO₂ es el gas de efecto invernadero es el que más contribuye al calentamiento global (Figura 33). Esto se debe a que, aunque es necesario que parte del calor transmitido por el Sol sea mantenido por la atmósfera, un exceso en las emisiones de CO₂ provoca una retención excesiva de calor cerca de la superficie de la Tierra.

En relación a esto, el IPCC ha establecido varios escenarios futuros de emisiones denominándose SSPx-y”, los cuales se explican más en detalle en el **ANEJO I: CAMBIO CLIMÁTICO**. Estos se resumen en 5: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5.8.5, ordenados de menor a mayor volumen de emisiones de gases de efecto invernadero que se prevé en un futuro, en base a las medidas que se tomen para frenar estas emisiones (Figura 33).

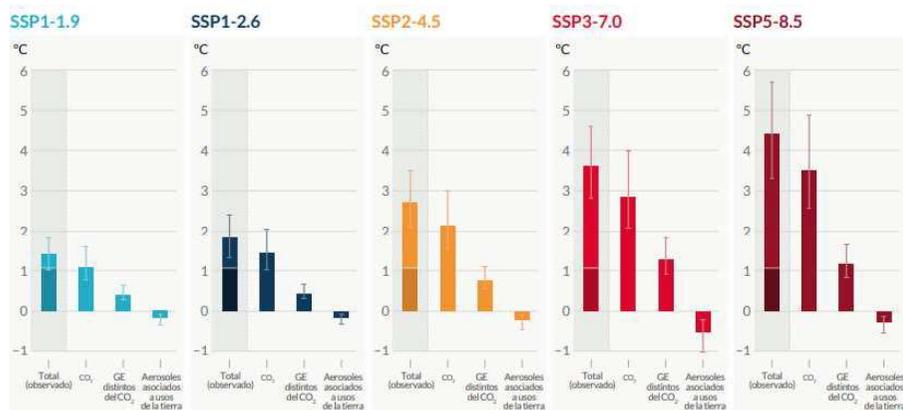


Figura 33. Contribución de cada gas de efecto invernadero al aumento de la temperatura global en los diferentes escenarios. Fuente: IPCC (2021)

Según los datos recogidos y a las proyecciones realizadas, el IPCC alerta que, sea cual sea la trayectoria que se tome, en el año 2055 el aumento en la temperatura media global pasará de ser de 1.1°C a 1.5°C con un nivel de confianza alto. Como se ha visto, dependerá de las medidas que se tomen que este valor se pueda reducir a partir de este año o que por el contrario siga aumentando y no se limite a este valor.

AFECCIONES AL CLIMA MARÍTIMO

Entre las consecuencias que se prevén debidas al calentamiento global, el IPCC apunta que se producirá un aumento en el nivel medio del mar (NMM) con un nivel de confianza alto. Como se puede deducir, esta elevación en el NMM provocará que un mismo oleaje se presente con una mayor altura frente a las obras de protección portuarias. Este es un factor que ya se está teniendo en cuenta en las nuevas construcciones y actuaciones sobre obras existentes en los puertos, pero muchas de estas construcciones de defensa siguen sin estar diseñadas para ello.

La magnitud en el aumento del nivel del mar dependerá de la trayectoria de emisiones que se siga de ahora en adelante. Sin embargo, **aunque se tomen medidas en la actualidad y se llegue al mejor escenario para el 2050, este seguirá aumentando** (Figura 34). Es por ello que es de vital importancia incluir este factor en el dimensionamiento en las obras marítimas, teniéndolo en cuenta también en las reconstrucciones y ampliaciones que se realicen en este tipo de infraestructuras.



Figura 34. Cambio medio en el nivel del mar en base a los diferentes escenarios. Fuente: IPCC (2021)

AUMENTO EN EL NIVEL DEL MAR EN LA ZONA DE ESTUDIO

Como se ha visto en la Figura 34, se prevé un aumento en el NMM a nivel global. Para conocer los datos referidos a la zona de estudio, se ha acudido al Atlas Interactivo proporcionado por el IPCC (Figura 35), el cual da información regional relativa a este factor.

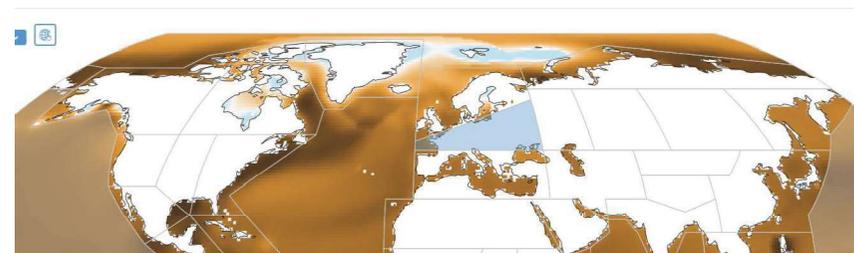


Figura 35. Aumento relativo nivel del mar por zonas a largo plazo (2081-2100) en el escenario SSP5-8.5. Fuente: Atlas del IPCC

La zona sombreada es la que se ha elegido para obtener la información relativa a este factor para la zona de estudio. Además de discernir por regiones, el Atlas permite ver la información para cada escenario climático, eligiendo además si se quiere ver la información a corto (2021-2040), medio (2041-2026) o largo plazo (2081-2100) (Figura 36). Una vez elegida la zona de la que se quiere obtener información y el escenario climático, se puede ver la información en gráficas de series temporales o tablas, entre otras. Además, si se mira la información en la tabla, se dan los valores por percentiles.

Period	Scenario	Median (meters)	P25 P75	P10 P90	P5 P95
Near Term (2021-2040)	SSP5-8.5	0.1	0.1 0.2	0.1 0.2	0.1 0.2
Medium Term (2041-2060)	SSP5-8.5	0.3	0.2 0.3	0.1 0.4	0.1 0.4
Long Term (2081-2100)	SSP5-8.5	0.7	0.5 0.8	0.4 1.0	0.4 1.0

Figura 36. Aumento del nivel del mar por periodos y percentiles en la zona de estudio, para el escenario SSP5-8.5. Fuente: Atlas del IPCC

Para realizar los cálculos y comparaciones posteriores, se han recogido los datos para cada escenario climático entre los que se discierne el aumento del nivel del mar. En la información relativa a cada uno de ellos se ha elegido el período a largo plazo (2081-2100), ya que es en este período cuando los cambios en el nivel del mar resultan relevantes para los cálculos.

Se ha elegido así porque si se atiende a la variación a medio plazo (2041-2080), el aumento se sitúa en apenas 0.4m como máximo en el escenario SSP5-8.5 y percentil 90, muy diferente al aumento en 1m que se predice a largo plazo en este mismo escenario y percentil (Figura 36).

Aunque lo cierto es que, para este caso concreto en el que se está diseñando para soportar las condiciones de clima marítimo que se espera hasta el año 2073 (vida útil mínima de 50 años), sería más concordante emplear el valor de aumento en el nivel del mar a medio plazo.

No obstante, dado que uno de los objetivos principales del presente trabajo es determinar cómo variarían las condiciones de clima marítimo debido al cambio climático, se empleará el valor de variación en el nivel del mar a largo plazo para ver la máxima variación de la que se tienen previsiones.

Respecto a los percentiles se ha elegido el percentil 90, que es el mismo que se ha utilizado para extraer la información de la altura de ola significativa en la boya. Dado que el Atlas no proporciona una tabla con la información de todos los escenarios climáticos, se ha realizado una tabla resumen (Figura 37). Con estos datos se podrá realizar el cálculo por escenarios climáticos, realizando las comprobaciones necesarias y proponiendo soluciones para cada uno de ellos como se verá a lo largo del documento.

Aumento nivel de mar entre los años 2081-2100 (largo plazo), en el percentil P90 (m)	
SSP1-2.6	0.70
SSP2-4.5	0.80
SSP3-7.0	0.80
SSP5-8.5	1.00

Figura 37. Aumento nivel del mar para cada escenario climático, entre años 2081 y 2100, en el percentil 90. Elaboración propia, con datos del Atlas del IPCC

VARIACIÓN DE OTROS FACTORES

Los datos relativos al resto de factores del clima marítimo que se pueden ver alterados debido al cambio climático se han obtenido del Visor C3E, dado que el Atlas del IPCC sólo recoge las variaciones en el nivel del mar. Este visor creado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria), integra los resultados del proyecto *Cambio Climático en la Costa Española* (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2011).

El visor, aun obteniendo los datos para el escenario más desfavorable (SSP5-8.5) y el período de tiempo estudiado que puede producir una mayor variación (largo plazo: 2081-2100), da unos datos respecto a la variación en la altura de ola (Hs), el período pico asociado a la misma (Tp) y a la dirección del oleaje insignificantes, como se demuestra en el ANEJO I: CAMBIO CLIMÁTICO.

Por tanto, se puede determinar que el único factor que será relevante a la hora de determinar el cambio que se prevé en el clima marítimo debido al cambio climático es el aumento en el nivel del mar, descartando el resto de los factores por ser irrelevantes para esta determinación.

11. CLIMA MARÍTIMO

En este apartado se caracteriza el clima marítimo existente en la zona de estudio que es necesario para los cálculos posteriores. Para ello, se obtendrán datos de cambios en el nivel del mar asociados a las mareas y los datos relativos al régimen extremal.

En el ANEJO II: CLIMA MARÍTIMO se ha realizado un análisis más detallado de las mareas y del régimen extremal, y también se ha caracterizado por completo el clima marítimo existente, añadiendo la información relativa al régimen medio, así como del régimen de vientos existente en la zona.

La información relativa a las mareas se ha extraído de la información recogida por el Mareógrafo de Bilbao 3, y los datos relativos al régimen extremal se han obtenido de la boya Bilbao-Vizcaya, siendo estos medidores los más cercanos al puerto de Bermeo (Figura 38).



Figura 38. Ubicación de la boya y el mareógrafo donde se consultarán los datos respecto a la posición del puerto de Bermeo. Fuente: Puertos del Estado

MAREAS

Como se ha visto, se ha consultado el mareógrafo del Puerto de Bilbao para obtener la información relativa a las mareas. De este se puede obtener, entre otros datos: variaciones en el nivel del mar debidas a la marea, diferenciando entre la astronómica y meteorológica, así como el esquema datum. Este último recoge la variación media y máxima de la marea que se ha observado en el entorno del puerto, tanto a nivel global como la provocada por la marea astronómica, así como las pleamares vivas y muertas (Figura 39).

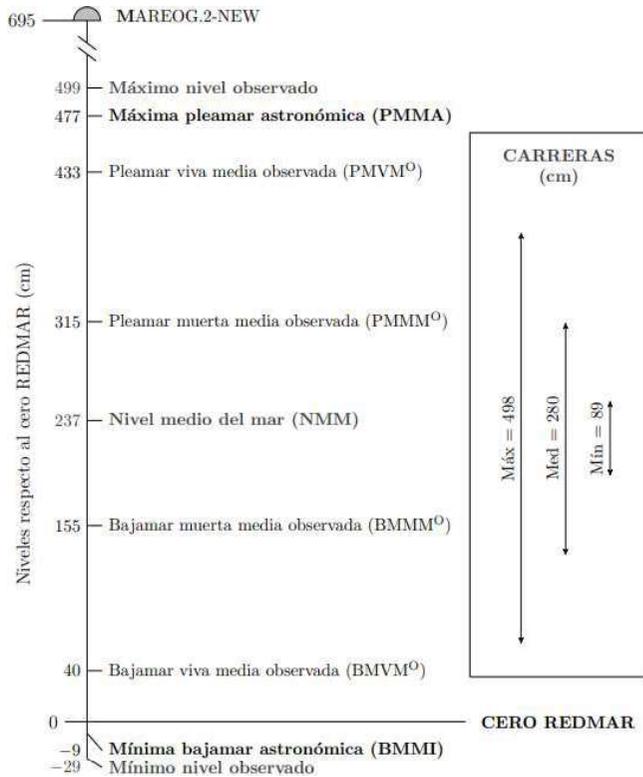


Figura 39. Esquema datum del mareógrafo 3 de Bilbao. Fuente: Puertos del Estado

En este esquema se puede observar que el máximo nivel observado es de 4.99m respecto al cero REDMAR, y un mínimo de -0.29m respecto al mismo cero. Por tanto, la máxima variación de nivel que se ha recogido en este mareógrafo es de 5.28m.

Por tanto, se puede determinar que gran parte de la variación del nivel del mar se debe a la marea astronómica, pues la carrera de marea se sitúa en 4.86m debido a este factor, siendo la variación máxima global del nivel de 5.28m.

RÉGIMEN EXTREMAL

El régimen medio, el cual se analiza en el ANEJO II: CLIMA MARÍTIMO, da una idea del oleaje habitual que recoge la boya y con ello se puede determinar las características del oleaje medio que se espera en la zona de estudio, tras realizar los cálculos de propagación pertinentes.

Por su parte, el informe del régimen extremal recoge los datos observados durante los temporales, donde las características del oleaje como la altura de ola y el período adquieren valores excepcionales. Aunque estas situaciones son poco frecuentes, es muy importante atender a estos datos, pues con ellos se deben diseñar las infraestructuras portuarias asegurando la seguridad y la operatividad de los puertos en todo momento. Es por ello que a continuación se analiza este régimen, obteniendo así los datos necesarios para realizar los cálculos en los siguientes apartados.

Como se ha visto en el apartado DESCRIPCIÓN DEL PUERTO, el dimensionamiento en el presente trabajo se hace para una vida útil de 50 años. Por tanto, los datos que se obtienen en el presente apartado deben ser los relativos a un periodo de retorno de estos 50 años. Por otra parte, ese ha decidido que estos datos sean del percentil 90, para tener una mayor seguridad de que durante los años de vida útil no se de un oleaje con alturas de ola y períodos superiores a los que se han tenido en cuenta durante el dimensionamiento.

Atendiendo a los datos que proporciona la boya Bilbao-Vizcaya, se ha extraído de su informe del régimen extremal la rosa del oleaje de la serie escalar completa, la cual se ve en la Figura 40. Con esta se pueden ver las direcciones predominantes del oleaje recogidas por la boya.

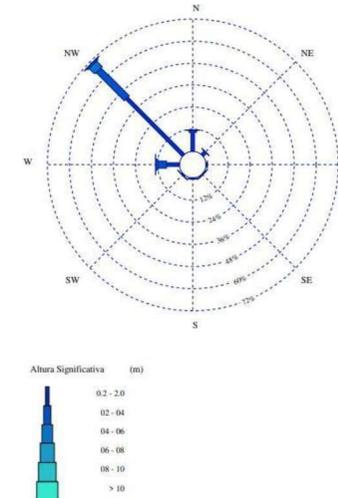


Figura 40. Rosa del oleaje del régimen extremal, en la serie escalar. Datos recogidos entre 1990 y 2023). Fuente: Puertos del Estado

Por otra parte, para tener en cuenta el factor de direccionalidad, se puede aplicar a los valores de la serie escalar completa el coeficiente de direccionalidad. No obstante, dado que el propio informe recoge los resultados ajustados para cada una de las direcciones predominantes, y que además las series analizadas comprenden el mismo periodo (y que por tanto, no hay mayor cantidad de mediciones entre ambas series de datos), se emplearán estos resultados direccionales directamente.

Es por ello que también se ha extraído de este informe la altura de ola ajustada para cada dirección relevante de la serie histórica, junto a su período pico. A continuación, se pasa a analizar los datos del oleaje en régimen extremal direccional para cada una de las direcciones predominantes: Norte, Oeste y Noroeste.

Sector direccional Norte

Atendiendo al oleaje que proviene de la dirección Norte, el informe proporciona la siguiente gráfica (Figura 41), donde se aproxima de forma lineal con los datos extremales observados las alturas máximas de oleaje que se pueden dar en esta dirección. La Hs se representa en base a la probabilidad de excedencia anual, la cual es inversamente proporcional al número de años necesarios que se prevé que pasarán para que se de esta altura (período de retorno).

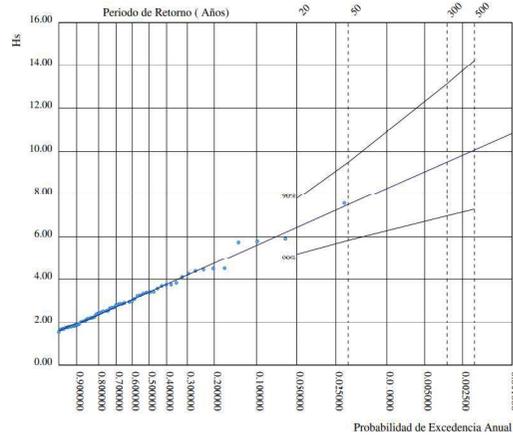


Figura 41. Gráfica del régimen extremal direccional Norte, de serie analizada entre el 1990 y el 2023. Fuente: Puertos del Estado

Como se puede observar, para un período de retorno de 50 años (con Probabilidad de Excedencia Anual 0.02), la banda superior asociada al percentil 90 da una altura de ola significativa de 9.50m.

Para cada altura de ola significativa, el período pico asociado se puede obtener aplicando la fórmula proporcionada por este mismo informe, que relaciona la altura de ola significativa con el período pico (2). Aplicándola para la altura de ola de 9.5m, se obtiene un período pico de 11.91 segundos.

$$T_p = 5.18 H_s^{0.37} \quad (2)$$

Sector Direccional Oeste

Otra dirección importante de procedencia del oleaje recogido por la boya es la dirección Oeste, de la cual se tiene una gráfica diferente (Figura 42). A través de esta se puede determinar que, con un período de retorno de 50 años, la altura de ola significativa asociada al percentil 90 se estima en 14.50m.

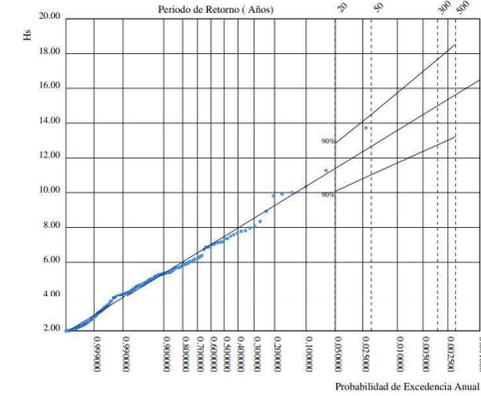


Figura 42. Gráfica del régimen extremal direccional Oeste, de serie analizada entre el 1990 y el 2023. Fuente: Puertos del Estado

De nuevo, el informe proporciona la fórmula ajustada para este sector direccional, la cual relaciona el período pico con la altura de ola significativa asociada (3). Aplicando esta, se obtiene un período pico de 16.06s asociado a Hs=14.50m.

$$T_p = 6.30 H_s^{0.35} \quad (3)$$

Sector Direccional Noroeste

Por último, el informe del régimen extremal también proporciona la gráfica de otra dirección predominante del oleaje, en este caso del Noroeste (Figura 43). En este caso, la altura de ola significativa asociada al percentil 90 para un período de retorno de 50 años es de 13.82m.

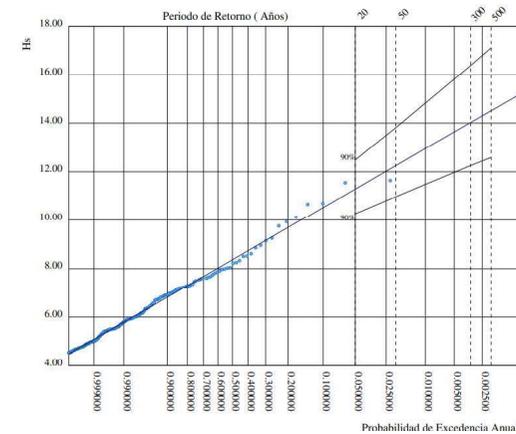


Figura 43. Gráfica del régimen extremal direccional Noroeste, serie analizada entre el 1990 y el 2023. Fuente: Puertos del Estado

Para este sector direccional también se da la fórmula que relaciona el período pico con la altura de ola significativa (4). En este caso, para $H_s = 13.82$ m, el período pico asociado es de 15.48 segundos.

$$T_p = 8.46 H_s^{0.23} \quad (4)$$

Esta información del régimen extremal direccional será la que se empleará para calcular la altura de ola significativa que puede llegar a afectar al dique de abrigo del puerto de Bermeo. Los datos vistos en este apartado se corresponden al oleaje registrado en aguas profundas, pero para determinar el oleaje que realmente puede llegar a pie de dique se deben aplicar los coeficientes de refracción y asomeramiento, ya que el oleaje se transforma a medida que avanza hacia la costa debido a estos factores.

De hecho, se han obtenido los datos relativos a las tres direcciones predominantes y no únicamente de la dirección que presenta una mayor H_s en aguas profundas, ya que debido al fenómeno de refracción el oleaje pierde mucha energía tratando de girar su frente. Es por ello que, aunque aparentemente la dirección que presenta una menor H_s sea la dirección Norte, se verá que también pierde muy poca energía, mientras que las otras direcciones pierden mucha más por esta razón. Esta transformación del oleaje se verá en el siguiente apartado *PROPAGACIÓN DEL OLEAJE*.

12. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

Una vez obtenidos los datos históricos referentes a los cambios en el nivel del mar del mareógrafo y la información del régimen extremal recogido por la boya, se puede calcular la altura de ola que puede llegar a pie de dique tras aplicar los coeficientes de asomeramiento y refracción.

Se deben aplicar estos coeficientes porque, como se ha adelantado, cuando el oleaje se aproxima a la costa se ve afectado por estos factores debido a la disminución de la profundidad y el giro que experimenta el frente del oleaje debido al ángulo que forma este con las líneas batimétricas. Además, se debe comprobar que esta altura de ola realmente puede llegar a impactar contra el dique, o bien si antes se produce su rotura por fondo.

Antes de continuar, se debe comprobar que la boya se encuentra en aguas profundas, ya que para realizar los cálculos posteriores es necesario que los datos de partida sean correspondientes a oleaje en aguas profundas.

Para esta comprobación se recurre a la ROM 2.0-08, en la cual se indica la condición que debe cumplir, así como las fórmulas para estimar los diferentes parámetros según la profundidad (Figura 44). De la tabla se extrae que si el oleaje está en aguas profundas **se debe cumplir que $h/L > 1/2$** . Para aplicar la fórmula se han cogido los datos del oleaje de dirección Oeste, pues es el más desfavorable al tener mayor período del oleaje.

	Profundidades Reducidas $h/L < 1/20$	Profundidades intermedias $1/20 \leq h/L \leq 1/2$	Aguas profundas $h/L > 1/2$
ONDA PROGRESIVA			
Superficie libre (η)	$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta - \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right]$		
Celeridad de la onda ($c = \frac{L}{T}$)	\sqrt{gh}	$\frac{gT}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi h}{L} \right)$	$\frac{gT}{2\pi}$
Longitud de onda (L)	$\sqrt{g} T$	$\frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi h}{L} \right)$	$\frac{gT^2}{2\pi}$

Figura 44. Tabla para la obtención de la longitud de onda en función de la profundidad. Fuente: ROM 2.0-08

Con un período pico del oleaje de 16.06s y una profundidad de la boya de 600m, la cual se indica también en el informe del régimen extremal, se realiza la comprobación de la Figura 45 donde se puede ver que cumple la condición de estar en aguas profundas. Por tanto, se puede continuar con los cálculos.

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = 403m \rightarrow \frac{h}{L} = \frac{600}{403} = 1.48 > 0.5 \rightarrow \text{CUMPLE}$$

Figura 45. Comprobación de boya en aguas profundas. Fuente: elaboración propia

COEFICIENTE DE ASOMERAMIENTO (SHOALING)

El oleaje siempre mantiene la misma energía por unidad de tiempo, pero las características del mismo como son la altura de ola, la longitud de onda y la celeridad varían conforme varía la profundidad debido al asomeramiento del oleaje.

En aguas profundas ($h/L > 1/2$), el oleaje tiene una altura, longitud de onda y celeridad constante al no verse afectado por el fondo. Sin embargo, cuando pasa a profundidades intermedias ($1/20 \leq h/L \leq 1/2$), la masa de agua que se encuentra en la zona inferior de las olas se ralentiza al verse afectada por el fondo, provocando que la ola se incline hacia el sentido de avance (Figura 46/Figura 93), lo cual aumenta la celeridad en la cresta. Para compensar el aumento de energía que supone este aumento en la celeridad, se reduce levemente la longitud de onda y se reduce la altura de la ola.

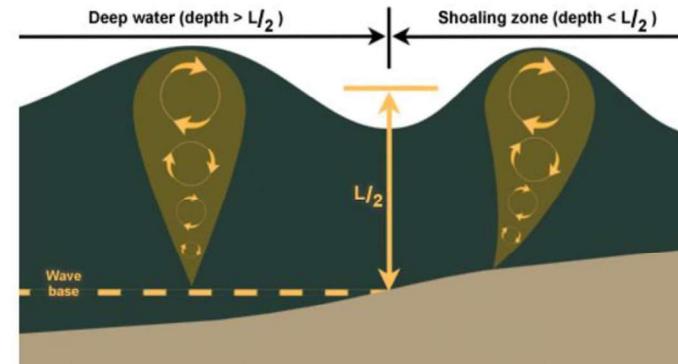


Figura 46. Reducción de la altura de ola al pasar de aguas profundas a aguas intermedias. Fuente: apuntes de Obras Marítimas

El oleaje sigue disminuyendo su altura hasta que se alcanza cierto punto de inflexión en el que el fondo, en vez de disminuir la altura de ola, provoca un resalte repentino en el oleaje. Este resalte provoca un aumento leve de su altura de ola, disminuyendo así la velocidad y la longitud de onda del mismo por compensación de energías. A partir de ese punto de inflexión, a menor profundidad mayor resultará la altura de ola propagada.

Estos cambios en la altura de ola conforme se varía la profundidad, se conoce como asomeramiento del oleaje y el porcentaje que varía en función de la profundidad a la que se encuentra, se puede cuantificar con el coeficiente de asomeramiento.

Para el cálculo de este coeficiente se aplican las ecuaciones recogidas en el *ANEJO III: PROPAGACIÓN DEL OLEAJE*.

COEFICIENTE DE REFRACCIÓN

La refracción es un fenómeno que también se produce cuando el oleaje se aproxima a la costa al verse afectado por el fondo, y que depende del ángulo que tiene el frente de oleaje respecto a la orientación de las líneas batimétricas.

En aguas profundas la longitud de onda es constante y, por tanto, los frentes se encuentran paralelos y equidistantes entre sí. Sin embargo, como se ha visto, al acercarse a aguas someras la velocidad y la longitud de onda disminuye en base a la profundidad.

Por tanto, las zonas del frente que se encuentran a mayor profundidad viajan a mayor velocidad, provocando este giro del mismo, ya que por esta razón tiende a posicionarse paralelo a las líneas batimétricas (Figura 47). Por tanto, a mayor ángulo forme el frente con las líneas batimétricas, mayor energía invertirá en girar, perdiendo así altura de ola.

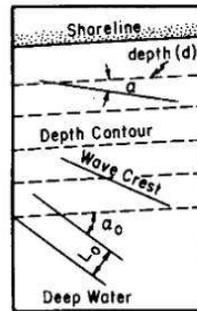


Figura 47. Giro del frente del oleaje provocado por el fenómeno de la refracción. Fuente: SPM (1984)

Para conocer cómo se ve afectado el oleaje por este coeficiente se debe aplicar la Ley de Snell. La metodología para aplicar esta fórmula, así como las ecuaciones necesarias para ello se detallan en el ANEJO III: PROPAGACIÓN DEL OLAJE.

PROFUNDIDAD A PIE DE DIQUE

Para realizar los cálculos que se realizan en los siguientes apartados, se deberá conocer la profundidad a pie de dique, pero esta no siempre es la misma debido a las mareas y a la propia disposición del fondo. A priori se podría pensar que una menor profundidad a pie de dique será siempre más desfavorable, puesto que para un mismo período pico y una misma altura de ola significativa en aguas profundas, se ha obtenido una altura de ola significativa que llega a pie de dique mayor cuanto menor es profundidad (Figura 50).

Sin embargo, ya se ha visto que esto no siempre es así en el apartado COEFICIENTE DE ASOMERAMIENTO (shoaling). Además, las variaciones de la profundidad a pie de dique por tramos del mismo y por el efecto de la marea son muy pequeñas para que el cambio en la altura de ola sea relevante.

En cambio, sí resulta bastante significativo el cambio en el caudal de rebase a medida que aumenta la profundidad debido a la marea, y por muy leve que sea esta variación en la profundidad, influye muy negativamente en la estabilidad del espaldón, como se verá en el apartado REBASE Y ESTABILIDAD DEL ESPALDÓN.

Por tanto, se concluye que la situación más desfavorable es cuando hay una mayor profundidad porque coincide con la situación de mayor nivel del mar.

Con todo, en el presente apartado se obtiene la máxima profundidad que se puede encontrar en base al estado de la marea y se toma esta para realizar los cálculos posteriores, al ser esta la más desfavorable.

Para conocer esta profundidad, se ha buscado en el libro *Diques de Abrigo de España: Tomo I* (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1988) la información sobre los diferentes tramos del dique, entre la cual aparece la máxima profundidad de cada tramo en BMVE (Figura 48). Se ha encontrado un levantamiento batimétrico más reciente en el cual el tramo 3 presenta 1m menos de profundidad, debido seguramente a la acumulación de sedimentos a pie de dique. Sin embargo, como no se ha encontrado información reciente del resto de tramos y, como esta variación no influye significativamente, se toman los datos de profundidad recogidos en la Figura 48.

DIQUE	CODIGO DE IDENTIFICACION EN PLANTA	DISPOSICION EN PLANTA	LONGITUD (m)	PROFUNDIDAD MAXIMA EN BMVE (m)	COTA DE CORONACION ACTUAL
Dique de Abrigo		Paralelo a la costa	666,30	16,00	
Tramo 1	11	Paralelo a la costa	378,30	12,00	+10,80
Tramo 2	12	Paralelo a la costa	150,00	13,00	+12,50
Tramo 3	13	Paralelo a la costa	140,00	16,00	+13,40

Figura 48. Profundidades a pie de dique de los diferentes tramos. Fuente: Diques de Abrigo de España (1988)

Estos datos se tomaron respecto a la bajamar viva equinoccial (BMVE). Sin embargo, entre los datos que ofrece el esquema datum del mareógrafo consultado (Figura 39) y que se han visto en el ANEJO II: CLIMA MARÍTIMO, no se encuentra este valor. Por ello se ha supuesto que este es equivalente a la mínima bajamar astronómica (BMMI), la cual es de -9cm respecto al cero REDMAR.

Por otra parte, de este mismo esquema datum se obtiene el máximo nivel observado, de 499cm. Sumando ambos valores, se puede aproximar que el **máximo aumento del nivel observado respecto a la BMVE es de 5.1m.**

Este valor se ha añadido a la profundidad recogida por la Figura 48 obteniendo las profundidades por tramos que se ven en la Figura 49. Puesto que no se tienen datos de la profundidad en el tramo 4 y del morro, no construidos aun cuando se elaboró la tabla, se ha supuesto la misma profundidad que en el tramo 3.

Tramo del dique	hd,max (m)
TRAMO 1	17.10
TRAMO 2	18.10
TRAMO 3	21.10
TRAMO 4	21.10
MORRO	21.10

Figura 49. Profundidad máxima a pie de dique en los diferentes tramos. Fuente: elaboración propia

DIRECCIÓN PREDOMINANTE DEL OLEAJE

En el apartado *CLIMA MARÍTIMO* se ha visto que la boya de Bilbao-Vizcaya da los datos de oleaje en las tres direcciones predominantes: Norte, Oeste y Noroeste. En un principio se podría pensar que la dirección predominante es el Oeste dado que tiene una mayor Hs en aguas profundas. Sin embargo, hay que tener en cuenta el posicionamiento del puerto y la transformación del oleaje que experimenta hasta llegar a pie de dique.

De hecho, aunque el Oeste sea la dirección predominante en aguas profundas, la posición del puerto junto al cabo de Matxitxako hace que este impida que llegue el oleaje de esta dirección (ver Figura 4). Por tanto, se descarta que el oleaje en esta dirección pueda llegar a pie de dique. Ahora hay que ver cuál de las direcciones restantes, Norte o Noroeste, llega con una mayor altura de ola a pie de dique.

Para ello se deben aplicar los coeficientes de asomeramiento y refracción a los datos recogidos por la boya en aguas profundas. Ya se han expuesto las fórmulas para calcular el coeficiente de asomeramiento, el cual es de obtención inmediata aplicando estas con los datos que se tienen en aguas profundas.

Para la obtención del ángulo de incidencia para calcular el coeficiente de refracción, la dirección de las líneas batimétricas se ha tomado de la Figura 28. Esta batimetría forma un ángulo de unos 120º con el Norte y unos 165º con el Noroeste, o lo que es lo mismo, los frentes del oleaje que provienen de estas direcciones forman 30º y 75º con las líneas batimétricas, siendo estos últimos los ángulos que se deben emplear para calcular el coeficiente de refracción.

Los resultados de los coeficientes de asomeramiento (K_s) y refracción (K_r) obtenidos por separado y los datos empleados para ello, se pueden ver en la Figura 104 del ANEJO III: *PROPAGACIÓN DEL OLEAJE*. Con estos, se puede calcular la altura de ola significativa que llega a pie de dique, multiplicando estos dos por la altura de ola en aguas profundas. Realizando estas operaciones se obtienen los resultados que se pueden ver en la Figura 50.

Tramo del dique	Dirección	Hs0(m)	Tp (s)	hd,max (m)	Ks*Kr	Hscalp (m)	Hrot (m)	Hs (m)
TRAMO 1	NW	13.82	15.48	17.10	0.57	7.83	13.34	7.83
	N	9.50	11.91	17.10	0.92	8.71	13.34	8.71
TRAMO 2	NW	13.82	15.48	18.10	0.56	7.79	14.12	7.79
	N	9.50	11.91	18.10	0.91	8.66	14.12	8.66
TRAMO 3	NW	13.82	15.48	21.10	0.56	7.69	16.46	7.69
	N	9.50	11.91	21.10	0.90	8.55	16.46	8.55
TRAMO 4	NW	13.82	15.48	21.10	0.56	7.69	16.46	7.69
	N	9.50	11.91	21.10	0.90	8.55	16.46	8.55
MORRO	NW	13.82	15.48	21.10	0.56	7.69	16.46	7.69
	N	9.50	11.91	21.10	0.90	8.55	16.46	8.55

Figura 50. Resultados de la altura de ola significativa a pie de dique en las dos direcciones. Fuente: elaboración propia

Una vez realizados los cálculos, se puede determinar que **la dirección predominante del oleaje a pie de dique es el Norte**, aunque pudiera parecer lo contrario por la altura que tenían los oleajes de ambos sectores en aguas profundas.

Esto se debe al ángulo con el que incide el oleaje en cada dirección, que se ve reflejado en el coeficiente de refracción como se ha visto en el apartado anterior. Dado que el frente que proviene del Noreste forma un gran ángulo de 75º con las líneas batimétricas, el oleaje que viene de esta dirección debe perder mucha energía tratando de girar el frente, disminuyendo notablemente la altura del oleaje.

ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA A PIE DE DIQUE

Por tanto, quedan vistos los cálculos necesarios para la obtención de la altura de ola propagada. Este cálculo se ha realizado por tramos, aunque como se ha visto, la variación es muy pequeña en función de la profundidad. No obstante, ya que el cálculo está hecho así, se aprovechan los resultados obtenidos para asignar a cada tramo la Hs que le corresponde. La altura de ola que se emplea en los siguientes apartados por tramos se ve reflejada en la Figura 51.

Sin embargo, aunque en los diferentes escenarios climáticos también se prevé una variación en la profundidad a pie de dique, no se ha considerado relevante calcular la altura de ola significativa teniendo en cuenta esta variación. De hecho, a mayor profundidad (como se espera en los escenarios climáticos futuros), menor Hs resulta. Además, la variación que se prevé en el peor de los escenarios es de 1m (Figura 37), mientras que con una variación de profundidad de 4m entre el tramo 1 y el morro, la Hs únicamente varía en 0.11m.

Tramo del dique	Dirección	Hs0(m)	Tp (s)	hd,max (m)	θ0 (º)	Hs (m)
TRAMO 1	N	9.50	11.91	17.10	30	8.71
TRAMO 2	N	9.50	11.91	18.10	30	8.66
TRAMO 3	N	9.50	11.91	21.10	30	8.55
TRAMO 4	N	9.50	11.91	21.10	30	8.55
MORRO	N	9.50	11.91	21.10	30	8.55

Figura 51. Altura de ola significativa por tramos. Fuente: elaboración propia

COMPROBACIÓN DE RESULTADOS CON ÁBACO SPM Y CON CRESS

Se ha realizado esta comparación para determinar si varían o no los resultados calculados con los proporcionados con estas dos herramientas. Por ejemplo, comprobando con el ábaco del *Shore Protection Manual* (US Army Corps of Engineers, 1984) se han obtenido valores semejantes, aunque levemente menores, por lo que cogiendo directamente el resultado del ábaco se quedaría ligeramente del lado de la inseguridad.

Esto es porque, aplicando este ábaco en el Tramo 3, se han obtenido los resultados de la Figura 52. Como se puede ver, los resultados son muy parecidos a los obtenidos mediante la formulación anterior, siendo el valor en dirección Norte idéntico. El único inconveniente que se ha visto aplicando este ábaco ha sido que el resultado de la altura de ola significativa del Noroeste es algo menor, quedando del lado de la inseguridad. Sin embargo, la variación en este caso es ínfima.

Comprobación con ábaco SPM del Tramo 3							
Dirección	Hs0(m)	Tp (s)	hd max (m)	θ0 (º)	d/g/T^2	Kp	Hs Ábaco SPM (m)
NW	13.82	15.48	21.10	75	0.00898	0.55	7.60
N	9.50	11.91	21.10	30	0.01515	0.90	8.55

Figura 52. Resultados de Hs obtenidos con el ábaco del SPM. Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, respecto a los resultados proporcionados por la web de *Cress.nl* (Netherlands Ministry of Infrastructure and Environment et al.), pasa algo semejante. De hecho, en esta propia web se indica que, pese a ser una herramienta de apoyo muy útil, no se asegura la total fiabilidad de los datos obtenidos. A través de esta página se han obtenido los resultados que se ven en la Figura 53 para el Tramo 3. En este caso, el resultado en ambas direcciones es levemente inferior quedando también del lado de la inseguridad, aunque tampoco hay una gran diferencia.

Comprobación con Cress del Tramo 3							
Dirección	Hs0(m)	Tm (s)	hd max (m)	θ0 (°)	Ks	Kr	Hs Cress (m)
NW	13.82	12.38	21.10	75	0.94	0.58	7.63
N	9.50	9.53	21.10	30	0.91	0.97	8.45

Figura 53. Resultados con Cress.nl para el Tramo 3. Fuente: elaboración propia

También cambian los resultados de los coeficientes de asomeramiento y refracción por separado, ya que con la formulación empleada el Ks se acerca más a la unidad, mientras que Kr ha dado menor con los cálculos. No se ha podido detectar la razón de esta diferencia dado que no se conoce el método que utiliza Cress, pero sí se puede determinar que el resultado global es semejante con ambos métodos.

En vista de estos resultados se concluye que utilizar cualquiera de estas dos herramientas es bastante fiable, ya que al menos en este caso los resultados se asemejan bastante a los obtenidos mediante la formulación. No obstante, no está de más realizar los cálculos mediante la formulación para comprobar.

13. REBASE Y ESTABILIDAD DEL ESPALDÓN

A lo largo del este apartado se comprueba la estabilidad del espaldón, verificando que no se produce el vuelco y/o el deslizamiento del mismo, y también se verifica si la tasa de rebase puede producir daños en la zona del trasdós del espaldón. Esto último también influye en la estabilidad del mismo, pues si se daña el pavimento del trasdós o el talud interior (según el caso), puede causar socavación en las capas de filtro e incluso en el núcleo, afectando de forma directa a la estabilidad del espaldón.

CÁLCULO DEL CAUDAL DE REBASE

Para el cálculo del rebase se ha empleado la formulación del documento *Fórmula explícita de rebase del oleaje para diques en talud con espaldón utilizando datos derivados de la red neuronal CLASH* (Jorge Molines y Josep R. Medina, 2015). Esta consiste en un nuevo estimador de rebase denominado Q6, el cual se basa en 16 parámetros y está destinado al cálculo para diques en talud con espaldón en su coronación, como es este caso, cuyas fórmulas y procedimiento de cálculo se recogen en el ANEJO IV: CÁLCULOS DE ESTABILIDAD.

Tras el cálculo de este estimador, el cálculo del caudal de rebase es inmediato, despejando este de la ecuación (16). Tras obtener los diferentes parámetros que componen esta fórmula, se han obtenido los resultados de la Figura 54.

$$Q = \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} \right) = Q6 = \exp \left(\lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot \lambda_5 \cdot \lambda_6 \left[a_1 + b_1 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta} \right] \right) \quad (16)$$

Como se puede ver en la Figura 54, el caudal es mucho mayor en los escenarios climáticos que se prevén entre el año 2081 y 2100. De hecho, la diferencia entre el mejor y el peor escenario futuro es menor que la diferencia entre el caudal que se estima en la actualidad y el que se espera en el mejor escenario. De esta forma se comprueba que la profundidad máxima, o lo que es lo mismo, el mayor nivel del mar es definitivamente la más desfavorable.

Tramo del dique	Escenario	Q6	qreb (l/s/m)
TRAMO 1	actual	1.20E-03	96.88
	SSP1-2.6	1.87E-03	150.13
	SSP2-4.5	1.99E-03	159.88
	SSP5-8.5	2.25E-03	181.38
TRAMO 2	actual	6.31E-04	50.41
	SSP1-2.6	9.75E-04	77.81
	SSP2-4.5	1.04E-03	82.82
	SSP5-8.5	1.18E-03	93.84
TRAMO 3	actual	5.95E-04	46.62
	SSP1-2.6	9.22E-04	72.25
	SSP2-4.5	9.82E-04	76.95
	SSP5-8.5	1.11E-03	87.29
TRAMO 4	actual	1.74E-04	13.62
	SSP1-2.6	2.67E-04	20.91
	SSP2-4.5	2.84E-04	22.24
	SSP5-8.5	3.21E-04	25.16
MORRO	actual	1.74E-04	13.62
	SSP1-2.6	2.67E-04	20.91
	SSP2-4.5	2.84E-04	22.24
	SSP5-8.5	3.21E-04	25.16

Figura 54. Valores del caudal de rebase obtenidos en cada tramo y escenario. Fuente: elaboración propia

ESTABILIDAD DEL ESPALDÓN

Con los resultados del caudal de rebase, se pueden realizar los cálculos de estabilidad. Para ello, se calculan los esfuerzos que produce el oleaje sobre el espaldón, siendo estos: fuerza horizontal, y fuerza vertical y momento causados por esta fuerza horizontal. Aplicando las fórmulas del estudio *Estimación de las fuerzas del oleaje sobre muros de coronación a partir de tasas de rebase del oleaje* (Jorge Molines et al., 2018), los cuales se exponen en el ANEJO IV: CÁLCULOS DE ESTABILIDAD, se obtienen los resultados de la Figura 55.

Tramo del dique	Escenario	Ch (m)	Q6	qreb (l/s/m)	Fh (kN/m)	Mh (mkN/m)	Pb (kN/m)
TRAMO 1	actual	11.50	1.20E-03	96.88	1228.50	5791.68	160.78
	SSP1-2.6	11.50	1.87E-03	150.13	1304.37	6111.58	166.50
	SSP2-4.5	11.50	1.99E-03	159.88	1315.27	6157.54	167.32
	SSP5-8.5	11.50	2.25E-03	181.38	1337.11	6249.65	168.97
TRAMO 2	actual	9.80	6.31E-04	50.41	811.02	3292.68	129.84
	SSP1-2.6	9.80	9.75E-04	77.81	865.61	3488.85	134.67
	SSP2-4.5	9.80	1.04E-03	82.82	873.45	3517.02	135.36
	SSP5-8.5	9.80	1.18E-03	93.84	889.16	3573.48	136.75
TRAMO 3	actual	9.80	5.95E-04	46.62	803.51	3265.72	129.18
	SSP1-2.6	9.80	9.22E-04	72.25	858.63	3463.78	134.05
	SSP2-4.5	9.80	9.82E-04	76.95	866.55	3492.23	134.75
	SSP5-8.5	9.80	1.11E-03	87.29	882.41	3549.23	136.16
TRAMO 4	actual	14.05	1.74E-04	13.62	1333.46	7984.67	165.58
	SSP1-2.6	14.05	2.67E-04	20.91	1444.30	8555.69	172.42
	SSP2-4.5	14.05	2.84E-04	22.24	1460.21	8637.68	173.40
	SSP5-8.5	14.05	3.21E-04	25.16	1492.11	8801.99	175.36
MORRO	actual	21.55	1.74E-04	13.62	3137.04	28811.76	253.96
	SSP1-2.6	21.55	2.67E-04	20.91	3397.80	30872.21	264.45
	SSP2-4.5	21.55	2.84E-04	22.24	3435.25	31168.07	265.96
	SSP5-8.5	21.55	3.21E-04	25.16	3510.28	31760.96	268.98

Figura 55. Fuerza horizontal, vertical y momento provocados por la acción del oleaje, en los diferentes tramos y escenarios. Fuente: elaboración propia

Una vez obtenidos estos esfuerzos, se puede realizar la comprobación de si el espaldón desliza o vuelca dadas las características del mismo y bajo las condiciones de clima marítimo a las que se ve y se verá expuesto en los diferentes escenarios climáticos.

Para ello se recurre a las fórmulas propuestas por la ROM 0.0-01 que quedan expuestas en el ANEJO IV: CÁLCULOS DE ESTABILIDAD, las cuales se basan en el principio de estabilidad que relaciona fuerzas estabilizadoras frente a las desestabilizadoras, viendo de esta forma si las primeras son mayores a las segundas. Por tanto, si esta relación es igual a 1, se puede determinar que no puede haber desequilibrio en el espaldón con las fuerzas consideradas.

Además, se puede proponer un coeficiente de seguridad mayor a 1, para tener una mayor confianza en que las fuerzas desestabilizadoras no superan a las estabilizadoras. En este caso se ha establecido un **coeficiente de seguridad frente al vuelco y el deslizamiento de 1.2**, ya que es el más alto que recomienda esta ROM para las verificaciones de estabilidad del espaldón.

Por otra parte, también se debe realizar la comprobación de si se producen daños en el trasdós del espaldón debido al caudal de rebase calculado en el apartado anterior. Para conocer el límite de caudal de rebase a partir del cual se pueden producir estos daños, se ha recurrido al *Eurotop Manual* (Agencia Medioambiental de Reino Unido y Concejo Alemán de Investigación en Ingeniería Costera, 2007), el cual da unos límites de rebase tolerables para defensas portuarias y costeras en función de la protección que tenga el espaldón, la zona en su trasdós o el talud interior del dique.

Para determinar este límite, en primer lugar se debe conocer el estado de protección del trasdós del espaldón. En este caso, los primeros 200m del tramo 1 se encuentra el Muelle del Norte, por lo que en esta zona no se dispone de talud interior como en el resto de la longitud del dique. Para conocer si se pueden producir daños en esta situación, esta misma tabla da un límite de rebase para el caso de que la zona en el trasdós del espaldón se encuentre pavimentada, como es el caso (Figura 56).

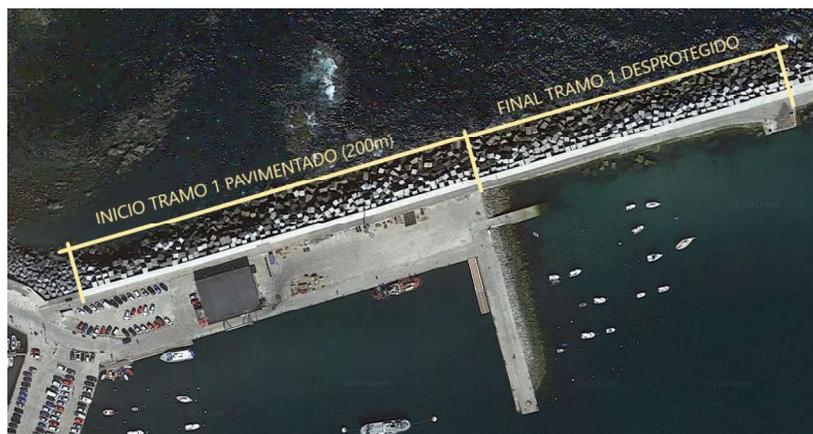


Figura 56. Estado actual del trasdós del tramo 1. Fuente: elaboración propia

En cuanto al resto de tramos se encuentran convenientemente protegidos, ya que se realizó un refuerzo del talud interior recientemente, como se ha visto en el apartado ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL.

Cabe destacar que este mismo manual también propone unos límites en el caso de que puedan circular peatones o vehículos al trasdós del espaldón, o en el caso de que se encuentren coches aparcados en esta zona, y también si el dique protege algún tipo de edificación, como es el caso en el principio del tramo 1 donde se encuentra el Muelle del Norte. Sin embargo, no se han considerado estos límites por las razones que se exponen a continuación.

Respecto al aparcamiento, se puede suponer que está destinado principalmente a pescadores o propietarios de las embarcaciones de recreo, por lo que en caso de haber un temporal que sea lo suficientemente importante como para producir rebases, se descarta que este parquin vayan a utilizarlo para aparcarse sus vehículos y coger una embarcación. Por esta misma razón se ha descartado comprobar el límite para el paso de peatones. En cuanto a la fábrica de hielo, ya se ha construido una zona anexa a la actual lonja en Muelle de Matxorcorta para albergar esta nueva instalación de este tipo, por lo que esta quedará lejos del trasdós del dique en cuanto se realice su traslado.

Con estas tablas y con los esfuerzos calculados, en los siguientes subapartados se comprobarán que tramos del dique cumplen o no las diferentes comprobaciones para determinar cuáles se deberían reforzar para asegurar la integridad del espaldón.

VERIFICACIÓN FRENTE AL DESLIZAMIENTO

Empleando la metodología expuesta en el apartado anterior, y con los esfuerzos calculados en el ANEJO IV: CÁLCULOS DE ESTABILIDAD, se han obtenido los resultados frente al deslizamiento del espaldón, diferenciando entre sus tramos y frente a los diferentes escenarios climáticos, los cuales quedan recogidos en la Figura 57.

Cabe destacar que se ha empleado un coeficiente de rugosidad aproximado de $\mu=0.84$ por los motivos que se exponen en el ANEJO IV: CÁLCULOS DE ESTABILIDAD. Aunque no se conoce el coeficiente exacto, este se estima que será mayor al valor adoptado, por lo que de esta forma se está del lado de la seguridad.

											Deslizamiento
Tramo del dique	Escenario	Ch (m)	Re (m)	área sección (m2)	peso sección por ml (kN)	Xcdg, aprox (m)	Fh (kN/m)	Mh (mkN/m)	Ph (kN/m)	Zd,r	
TRAMO 1	actual	11.50	9.70	69.02	1624.33	4.37	1228.50	5791.68	160.78	1.001	
	SSP1-2.6	11.50	9.70	69.02	1624.33	4.37	1304.37	6111.58	166.50	0.939	
	SSP2-4.5	11.50	9.70	69.02	1624.33	4.37	1315.27	6157.54	167.32	0.931	
	SSP5-8.5	11.50	9.70	69.02	1624.33	4.37	1337.11	6249.65	168.97	0.914	
	actual	9.80	9.10	66.54	1566.08	4.10	811.02	3292.68	129.84	1.488	
TRAMO 2	SSP1-2.6	9.80	9.10	66.54	1566.08	4.10	865.61	3488.85	134.67	1.389	
	SSP2-4.5	9.80	9.10	66.54	1566.08	4.10	873.45	3517.02	135.36	1.376	
	SSP5-8.5	9.80	9.10	66.54	1566.08	4.10	889.16	3573.48	136.75	1.350	
	actual	9.80	10.35	78.36	1844.28	4.66	803.51	3265.72	129.18	1.793	
TRAMO 3	SSP1-2.6	9.80	10.35	78.36	1844.28	4.66	858.63	3463.78	134.05	1.673	
	SSP2-4.5	9.80	10.35	78.36	1844.28	4.66	866.55	3492.23	134.75	1.657	
	SSP5-8.5	9.80	10.35	78.36	1844.28	4.66	882.41	3549.23	136.16	1.626	
	actual	14.05	10.70	110.79	2607.61	4.82	1333.46	7984.67	165.58	1.538	
TRAMO 4	SSP1-2.6	14.05	10.70	110.79	2607.61	4.82	1444.30	8555.69	172.42	1.416	
	SSP2-4.5	14.05	10.70	110.79	2607.61	4.82	1460.21	8637.68	173.40	1.400	
	SSP5-8.5	14.05	10.70	110.79	2607.61	4.82	1492.11	8801.99	175.36	1.369	
	actual	21.55	17.68	290.50	6837.20	7.96	3137.04	28811.76	253.96	1.763	
MORRO	SSP1-2.6	21.55	17.68	290.50	6837.20	7.96	3397.80	30872.21	264.45	1.625	
	SSP2-4.5	21.55	17.68	290.50	6837.20	7.96	3435.25	31168.07	265.96	1.607	
	SSP5-8.5	21.55	17.68	290.50	6837.20	7.96	3510.28	31760.96	268.98	1.572	

Figura 57. Verificación frente a deslizamiento del espaldón en los diferentes tramos y bajo los diferentes escenarios climáticos con las características del dique actuales. Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, todos los tramos del dique cumplen con la verificación frente al deslizamiento, **excepto el tramo 1**. A continuación, se verán los resultados en las otras comprobaciones para determinar si algún otro tramo no cumple con estas, pero lo que es seguro es que se deberán proponer soluciones para mejorar la estabilidad frente al deslizamiento del tramo 1.

VERIFICACIÓN FRENTE AL VUELCO

Esta verificación es muy semejante a la verificación frente al deslizamiento, pues se calcula en base a los mismos esfuerzos. En este caso, en vez de las fuerzas repartidas empleadas para comprobar el deslizamiento, se utilizan los momentos que provocan estas mismas fuerzas. Por tanto, se tiene como momento estabilizador el provocado por el peso propio del espaldón, y como momentos desestabilizadores los provocados por el momento de la fuerza horizontal y vertical, respectivamente.

Tramo del dique	Escenario	Ch (m)	Be (m)	área sección (m2)	peso sección por ml (kN)	Xcdg, aprox (m)	Fh (kN/m)	Mh (mKN/m)	Pb (kN/m)	Vuelco		
										M(Fv(Fh)) (mKN/m)	M(We) (mKN/m)	Zc,v
TRAMO 1	actual	11.50	9.70	69.02	1624.33	4.37	1228.50	5791.68	160.78	1039.74	8665.82	1.269
	SSP1-2.6	11.50	9.70	69.02	1624.33	4.37	1304.37	6111.58	166.50	1076.71	8665.82	1.206
	SSP2-4.5	11.50	9.70	69.02	1624.33	4.37	1315.27	6157.54	167.32	1082.02	8665.82	1.197
	SSP5-8.5	11.50	9.70	69.02	1624.33	4.37	1337.11	6249.65	168.97	1092.67	8665.82	1.180
	actual	9.80	9.10	66.54	1566.08	4.10	811.02	3292.68	129.84	787.71	7838.24	1.921
IRAMO 2	SSP1-2.6	9.80	9.10	66.54	1566.08	4.10	865.61	3488.85	134.67	817.00	7838.24	1.820
	SSP2-4.5	9.80	9.10	66.54	1566.08	4.10	873.45	3517.02	135.36	821.20	7838.24	1.807
	SSP5-8.5	9.80	9.10	66.54	1566.08	4.10	889.16	3573.48	136.75	829.63	7838.24	1.780
	actual	9.80	10.35	78.36	1844.28	4.66	803.51	3265.72	129.18	891.33	10498.55	2.525
	SSP1-2.6	9.80	10.35	78.36	1844.28	4.66	858.63	3463.78	134.05	924.97	10498.55	2.392
TRAMO 3	SSP2-4.5	9.80	10.35	78.36	1844.28	4.66	866.55	3492.23	134.75	929.80	10498.55	2.374
	SSP5-8.5	9.80	10.35	78.36	1844.28	4.66	882.41	3549.23	136.16	939.48	10498.55	2.339
	actual	14.05	10.70	110.79	2607.61	4.82	1333.46	7984.67	165.58	1181.12	15345.77	1.674
	SSP1-2.6	14.05	10.70	110.79	2607.61	4.82	1444.30	8555.69	172.42	1229.90	15345.77	1.568
	SSP2-4.5	14.05	10.70	110.79	2607.61	4.82	1460.21	8637.68	173.40	1236.90	15345.77	1.554
TRAMO 4	SSP5-8.5	14.05	10.70	110.79	2607.61	4.82	1492.11	8801.99	175.36	1250.93	15345.77	1.526
	actual	21.55	17.68	290.50	6837.20	7.96	3137.04	28811.76	253.96	2993.40	66484.90	2.090
	SSP1-2.6	21.55	17.68	290.50	6837.20	7.96	3397.80	30872.21	264.45	3117.00	66484.90	1.956
	SSP2-4.5	21.55	17.68	290.50	6837.20	7.96	3435.25	31168.07	265.96	3134.75	66484.90	1.938
	SSP5-8.5	21.55	17.68	290.50	6837.20	7.96	3510.28	31760.96	268.98	3170.32	66484.90	1.903

Figura 58. Verificación frente al vuelco del espaldón en los diferentes tramos y en los diferentes escenarios climáticos con las características del dique actuales. Fuente: elaboración propia

Es lógico que como punto para tomar los momentos se ha tomado el extremo interior de la base del espaldón, pues en caso de producirse el vuelco este punto sería el punto alrededor del cual volcaría el espaldón.

Con todo, como se puede observar en la Figura 58, de nuevo **cumplen todos los tramos esta verificación, excepto el tramo 1**. Cabe destacar que el tramo 1 si cumple actualmente, sin embargo, en los tres peores escenarios futuros no cumpliría, demostrando de nuevo la gran influencia que tiene el aumento en el nivel del mar en el caudal de rebase y, con ello, en la estabilidad del espaldón.

INTEGRIDAD DEL TRASDÓS DEL ESPALDÓN

Por otra parte, hay que asegurarse de que el rebase no produce daños en el trasdós del espaldón, y esto depende del volumen de agua que supera el espaldón por segundo y por metro del mismo, así como de la protección que se disponga en esta zona. Como se ha visto, en el *Eurotop Manual* se da un límite de rebase para que no se produzcan daños ni en la coronación del espaldón ni en la zona de apoyo del mismo en su trasdós, aun estando está bien protegida mediante, por ejemplo, un manto interior. Este límite (*No damage if crest and rear*

slope are well protected) se puede ver en la Figura 119 del ANEJO IV: CÁLCULOS DE ESTABILIDAD, de la cual se extrae un límite entre 50 y 200 l/s/m para asegurar que no se producen daños en el talud interior.

En cambio, en esta misma tabla se puede observar que si el espaldón o el talud interior no están convenientemente protegidos, siendo este el caso del final del tramo 1 (Figura 56), el límite en este caso (*No damage to crest and rear face of embankment if not protected*) baja muchísimo, siendo este de un valor máximo de 0.1 l/s/m.

Con esta diferencia entre ambos límites se puede ver la importancia de proteger convenientemente el talud interior del dique frente a los rebases para evitar que estos provoquen socavación en las capas de filtro o incluso en el núcleo sobre el que apoya el espaldón, provocando así la inestabilidad del mismo.

Por su parte, también se ha visto que en esta tabla se da un valor límite de caudal de rebase para evitar daños en caso de que la zona al trasdós del dique se encuentre revestida, como es el caso de los primeros 200m del tramo 1 al estar pavimentado (*Damage to paved or armoured promenade behind seawall*). En este caso, esta da un límite de 200 l/s/m, como se ve en la Figura 119 del ANEJO IV: CÁLCULOS DE ESTABILIDAD.

Por tanto, se comprueba si estas tasas se superan en alguno de los tramos, resultando la Figura 59 con los resultados. En esta se puede ver que el tramo 4 y el morro cumplen tanto con las características actuales del clima marítimo como con las que se esperan en los diferentes escenarios climáticos y lo mismo ocurre con el tramo 3 en la situación actual.

Tramo del dique	Escenario	Hm (m)	Incremento NMM (m)	Aumento NM*,max (m)	hd,max (m)	qreb (l/s/m)
TRAMO 1	actual	8.71	-	5.08	17.08	96.88
	SSP1-2.6	8.71	0.70	5.78	17.78	150.13
	SSP2-4.5	8.71	0.80	5.88	17.88	159.88
	SSP5-8.5	8.71	1.00	6.08	18.08	181.38
	actual	8.66	-	5.08	18.08	50.41
TRAMO 2	SSP1-2.6	8.66	0.70	5.78	18.78	77.81
	SSP2-4.5	8.66	0.80	5.88	18.88	82.82
	SSP5-8.5	8.66	1.00	6.08	19.08	93.84
	actual	8.55	-	5.08	21.08	46.62
	SSP1-2.6	8.55	0.70	5.78	21.78	72.25
TRAMO 3	SSP2-4.5	8.55	0.80	5.88	21.88	76.95
	SSP5-8.5	8.55	1.00	6.08	22.08	87.29
	actual	8.55	-	5.08	21.08	13.62
	SSP1-2.6	8.55	0.70	5.78	21.78	20.91
	SSP2-4.5	8.55	0.80	5.88	21.88	22.24
TRAMO 4	SSP5-8.5	8.55	1.00	6.08	22.08	25.16
	actual	8.55	-	5.08	21.08	13.62
	SSP1-2.6	8.55	0.70	5.78	21.78	20.91
	SSP2-4.5	8.55	0.80	5.88	21.88	22.24
	SSP5-8.5	8.55	1.00	6.08	22.08	25.16

Figura 59. Comprobación de cumplimiento del límite de caudal en cada tramo y para cada escenario climático. Fuente: elaboración propia

Por su parte, tanto el tramo 3 en los escenarios futuros, como el tramo 2 en la actualidad y bajo las condiciones futuras que se esperan debidas al cambio climático, se encuentran dentro del rango (50-200 l/s/m) en el que según el grado de protección del talud interior pueden producirse o no daños. Teniendo en cuenta que el

último refuerzo del talud interior en estos tramos se realizó apenas hace un año, y que en ningún caso en estos dos tramos se supera un caudal de 100 l/s/m, encontrándose este bastante más cercano al límite inferior que al superior, **no se realizará ninguna actuación sobre estos tramos** al cumplir también con la estabilidad frente al vuelco y deslizamiento del espaldón. **Sin embargo, cabe añadir que se deberá prestar especial atención en estas zonas y comprobar periódicamente** (especialmente tras los temporales) si se han producido movimientos entre las piezas del manto interior debido a los posibles rebases, para poder evitar a tiempo daños mayores en las capas de filtro o en el núcleo.

En cuanto al **tramo 1**, mientras que en **sus primeros 200m sí se cumple** con la limitación de 200 l/s/m al estar pavimentado, **la parte final (140 últimos metros) de este no cumple de lejos** con la limitación de 0.1 l/s/m al estar su talud interior desprotegido, como se puede ver en la imagen del satélite (Figura 56). Hay que tener en cuenta que la sección **Por tanto, para mejorar esta situación sí se deberá actuar en el talud interior del final de este tramo.**

Con todo, **se concluye que se deberán proponer alternativas únicamente para reforzar el tramo 1: en sus primeros 200 metros sólo se deberán realizar actuaciones para mejorar la estabilidad frente al vuelco y el deslizamiento del espaldón, y al final de este mismo tramo se deberá reforzar además el manto interior.**

VERIFICACIÓN FRENTE AL HUNDIMIENTO DEL ESPALDÓN EN TRAMOS 3 Y 4

Esta situación de hundimiento del espaldón sobre el núcleo se puede dar en los tramos 3, 4 y en el morro, ya que este núcleo está compuesto de material suelto en estos tramos. La metodología empleada para comprobar esta verificación se recoge en el ANEJO IV: CÁLCULOS DE ESTABILIDAD y aplicando esta, se obtiene la carga de hundimiento expuesta en la Figura 60.

Hundimiento	
Variable	Valor
Porosidad_esc	0.35
γ_{esc} (tn/m ³)	2.50
Anúcleo(m ²) = Vnúcleo/m	800.00
Peso_esc (tn/m)	12748.65
Peso_w (tn/m)	2814.51
$\gamma'_{sat,esc}$	19.45
γ'_{esc}	18.43
N γ	267.80
q_espaldón,máx (tn/m)	6837.20
qh (tn/m)	25540.03

Figura 60. Comprobación de hundimiento del espaldón sobre el núcleo. Fuente: elaboración propia

Cabe destacar que los volúmenes empleados se refieren al volumen de un metro lineal de sección. Con todo, se obtienen los valores de la Figura 60. En esta se puede ver que, **aun comprobando la sección del morro que tiene un mayor peso por metro lineal, se cumple de lejos la comprobación frente al hundimiento.**

En cuanto a los tramos 1 y 2, se tratan de casos particulares, ya que el espaldón apoya sobre hormigón sumergido en el caso del tramo 1 como se puede ver en la Figura 24, y en el tramo 2 apoya sobre bloques de hormigón en masa (Figura 61). Por tanto, en este tipo de sección no calculará el hundimiento, aunque sí se debe comprobar si se produce la rotura de este hormigón como se realiza en el subapartado siguiente.

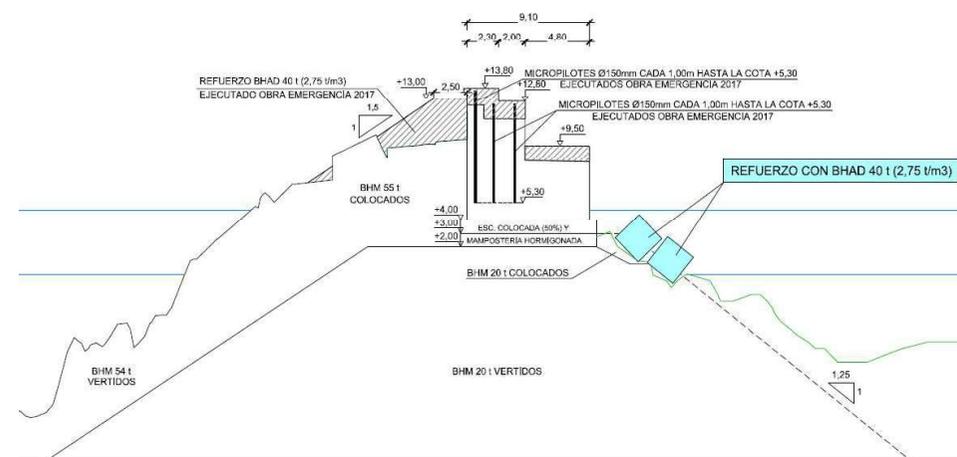


Figura 61. Sección transversal del tramo 2. Fuente: Modificación del Proyecto de Refuerzo del Manto Principal del Dique de Abrigo del Puerto de Bermeo (TYPSA, 2019)

Por tanto, se puede concluir que en este caso no se va a producir el hundimiento del espaldón en los tramos 3 y 4 ni en el morro. A continuación, se pasa a calcular que no se produce la rotura del núcleo en los tramos 1 y 2.

VERIFICACIÓN DE INTEGRIDAD DEL NÚCLEO EN TRAMOS 1 Y 2

Para esta verificación se debe comprobar que la resistencia del hormigón del núcleo es suficiente para que la carga transmitida por el espaldón no supere su resistencia a compresión. Se comprobará la resistencia a rotura en el tramo 1 al ser más desfavorable, ya que su espaldón tiene una mayor sección transmitiendo una mayor carga, y a su vez el núcleo tiene una menor sección y, por tanto, una menor resistencia.

Por una parte, se tiene que el máximo peso que puede transmitir el espaldón es el peso propio en la sección 1, siendo este de unos 1624 kN por metro lineal, que al ser una carga permanente se mayor con un coeficiente de 1.35 para el cálculo, resultando en 2192kN. Por otra parte, se supone para esta comprobación que el hormigón del núcleo tiene una resistencia característica baja de 25MPa, o lo que es lo mismo 16.67 kN/m² de resistencia para el cálculo.

De esta forma se tiene que el núcleo del tramo 1 con un área de su sección de unos 180m², con lo que la resistencia de esta sección multiplicando por la resistencia de cálculo es de unos 3000kN, siendo este valor mayor a la carga transmitida por el espaldón. Como se ha adelantado, si en la sección del tramo 1 se cumple esta comprobación, también se cumplirá en la sección del tramo 2 al ser esta más favorable. Por tanto, se da por hecho que **no se producirá la rotura del núcleo los tramos 1 y 2 debido a la sobrecarga que transmite el espaldón.**

OTRAS VERIFICACIONES

La ROM 0.5-05 establece que para la verificación del espaldón se debe comprobar, a parte de la estabilidad frente al vuelco y al deslizamiento, los modos de fallo "vuelco plástico" y "estabilidad global". Sin embargo, el talud

a lo largo de todo el dique está formado por escolleras de un mínimo de 75 kg y no por todo-uno como suele ser habitual en los diques de abrigo en talud.

Por tanto, se puede considerar que el material que conforma el núcleo no tiene cohesión ni plasticidad, y al no haberla no se puede producirse el vuelco plástico, por lo que no tendría sentido realizar esta comprobación.

En cuanto a la verificación de estabilidad global, pasa algo semejante. Los métodos propuestos por la ROM (método del círculo de rozamiento, ábaco de Taylor, etc) consideran esta comprobación en terrenos puramente cohesivos o granulares con algún tipo de cohesión. Sin embargo, no se ha encontrado ningún método que contemple la pérdida de estabilidad global en terrenos puramente granulares. De esto se deduce que esta comprobación no se realiza sobre taludes formados únicamente por escolleras.

Con todo, se descarta la comprobación de otros modos de fallo que no sean los comprobados en los apartados anteriores.

14. ESTUDIO DE SOLUCIONES

En el presente apartado se establecen diferentes alternativas para tratar de solucionar los problemas de estabilidad en el espaldón detectados en el apartado anterior *REBASE Y ESTABILIDAD DEL ESPALDÓN*. Como se ha visto en este, el único que no ha cumplido en estas comprobaciones con las características que tiene el dique actualmente es el tramo 1. Tampoco se cumple el límite del rebase al final del tramo 1, por lo que se propone una solución para evitar daños en el trasdós de esta zona. Además, tampoco cumple en los tramos 2 y 3, pero dado que no excede mucho del límite y se ha llevado a cabo un refuerzo reciente del manto interior, no se realiza ninguna actuación en estos tramos, asumiendo un coste de mantenimiento en este manto interior

VARIABLES A CONSIDERAR

En el siguiente apartado se analizan las variables que influyen en el cálculo del caudal y en las verificaciones de estabilidad. Para ello, se ha tanteado en el *ANEJO V: ESTUDIO DE SOLUCIONES* cuáles de ellas tienen una mayor influencia para conocer en qué línea se deben enfocar las diferentes alternativas.

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CAUDAL DE REBASE

Tras analizar los diferentes factores que pueden afectar a este caudal de rebase en el *ANEJO V: ESTUDIO DE SOLUCIONES*, se han obtenido las siguientes conclusiones:

la variación en la altura del espaldón es el factor que mayor influencia tiene como era de esperar y a priori, parece la opción más simple de llevar a cabo. Sin embargo, aunque disminuya notablemente el caudal de rebase, penaliza mucho frente al deslizamiento y el vuelco como se verá en el siguiente apartado.

En cuanto a las opciones para variar el ancho de la berma del manto, se podría retranquear el espaldón o cambiar el manto, por ejemplo, añadiendo una nueva capa. Por una parte, no tendría mucho sentido realizar esta última solución de forma independiente y además en este caso se debería aumentar el ancho a unos 10m para que realmente tuviera influencia en el caudal de rebase, lo cual es totalmente inviable de realizar únicamente añadiendo mantos. Por otra parte, en cuanto a retranquear el espaldón, en este caso no hay espacio para ello como se puede comprobar en las diferentes secciones de los tramos (Figura 24, Figura 25, Figura 26 y Figura 125).

En cuanto a variar el alto de la berma de manto, aunque si tiene una mayor influencia en el resultado de caudal de rebase y se podría realizar añadiendo una capa en el manto, en este caso no hay espacio para ello ya que

si no las piezas del manto superarían la cota del espaldón al haber una diferencia de cota entre este y la berma del manto de 0.8m (Figura 24).

En cuanto al ángulo del talud y la rugosidad del manto, se podrían variar añadiendo más bloques al talud o cambiando el tipo de piezas en el tramo. Sin embargo, estas opciones tienen un coste elevado, por lo que se debe estudiar bien si realmente está justificado llevar a cabo esta solución.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD FRENTE AL VUELCO Y DESLIZAMIENTO

En cuanto a las verificaciones frente al vuelco y el deslizamiento del espaldón, a parte del caudal de rebase que influye directamente en las fuerzas que actúan sobre el mismo, también tiene mucho peso en los cálculos la geometría del espaldón: su alto, ancho de base y peso total.

Con las reflexiones expuestas en el *ANEJO V: ESTUDIO DE SOLUCIONES*, se ha llegado a la conclusión de que, para mejorar la estabilidad, únicamente se tiene la opción de variar las dimensiones de las partes que conforman el mismo, pero tratando de no aumentar la cota de coronación para no comprometer la estabilidad frente al vuelco y el deslizamiento. Además, hay que tener en cuenta que una mayor cota de coronación provoca un impacto visual mayor.

En este caso se ha decidido no aumentar la cota de coronación para que las actuaciones a realizar para asegurar la estabilidad sean mínimas. Sin embargo, con esta condición se debe asumir un coste de mantenimiento del talud interior, ya que las tasas de rebase durante los temporales que haya en un futuro serán importantes y el manto interior puede verse afectado. Por tanto, se deberá inspeccionar el estado de este talud interior periódicamente y, en especial, tras los temporales, asegurando la estabilidad del espaldón.

Una vez analizados los factores, se concluye que las variables que más influirán positivamente en la estabilidad y que, por tanto, se analizarán en las diferentes alternativas son: el manto (ángulo del talud, rugosidad, ancho y alto de su berma) y las dimensiones del espaldón sin aumentar la cota de coronación.

Cabe destacar que aumentar el peso del espaldón puede provocar el hundimiento o el vuelco plástico del mismo en caso de que el núcleo se conformara de todo-uno como es habitual. Sin embargo, como se ha visto en la comprobación de hundimiento del espaldón sobre el núcleo en los tramos 3, 4 y el morro, y de integridad del núcleo en los tramos 1 y 2, estas verificaciones se cumplen con creces. Por tanto, ni aun aumentando las dimensiones del mismo al doble de las actuales se estaría cerca del hundimiento del espaldón o de la rotura del núcleo, según el caso.

MATERIALES EMPLEADOS

Como se puede deducir, el material que se empleará en las diferentes soluciones será principalmente el hormigón. Es necesario definir el tipo de hormigón, tanto el que se pondrá de refuerzo en el espaldón como el que compondrá las piezas añadidas en el manto, para poder establecer y valorar las diferentes alternativas. Por esta misma razón, también será necesario definir el tipo de piezas que se colocarán en el manto.

En este caso, se ha decidido emplear un hormigón HM-30/B/20/XS3 para el espaldón, un hormigón tipo HM-30/L/20/XS3+XM2 para las piezas del manto, y como tipología de las piezas se ha elegido el cubípodo. Las razones de elegir estos materiales y piezas del manto principal se desarrollan en el *ANEJO V: ESTUDIO DE SOLUCIONES*.

COSTES DE MATERIALES A EMPLEAR

Tras consultar el precio ha supuesto el hormigón tipo HM-30/B/20/XS3 y del tipo HM-30/L/20/XS3+XM2 en proyectos recientes, se ha multiplicado este por un porcentaje aproximado que se añadiría a su coste en concepto de la mano de obra y la maquinaria empleada en cada caso.

Por un lado, el tipo de hormigón empleado en el refuerzo del espaldón HM-30/B/20/XS3 supondría un valor de unos 140 €/m³, incluyendo a parte del material en sí otros materiales auxiliares como el encofrado o medios auxiliares para su colocación y acabados. A este precio se le debe añadir un 12% en concepto de mano de obra así como un 10.5% por la maquinaria que se emplearía para su transporte y colocación.

En cuanto al acero para los anclajes, los cuales serán necesarios para unir el espaldón existente con la sección recrecida, se emplearán redondos de Ø20 como se verá más adelante, por lo que el peso de estos será de unos 2.55Kg/m. Con un coste por kilogramo aproximado de 1.8€/Kg, se obtiene que el metro de redondos de Ø20 tendrá un coste de unos 4.6€/m.

Por otro lado, el coste de las piezas del manto se ha determinado por unidad, siendo el precio de una pieza tipo cupipodo de unas 45Tn con un diámetro nominal de 2.7m, incluyendo otros elementos como la cimbra y elementos auxiliares, de unos 200€/ud. A esto hay que añadir un porcentaje del 10% relativo a la mano de obra y un 23% relativo a la maquinaria.

La justificación de estos porcentajes en concepto de mano de obra y maquinaria se reflejan en el **ANEJO V: ESTUDIO DE SOLUCIONES**.

CONDICIONANTE DE ACCESIBILIDAD AL DIQUE

Realizando el estudio de las diferentes alternativas, se ha detectado una problemática relacionada con la accesibilidad. Esto es porque actualmente, sobre la zona inferior del espaldón (Figura 62) existe una zona de paso donde normalmente transitan viandantes, y donde también pueden acceder vehículos en caso de ser necesario.

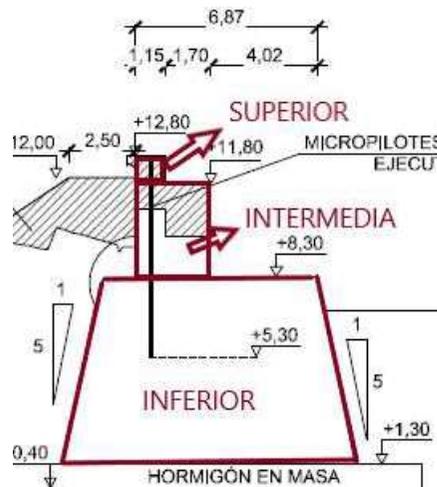


Figura 62. Partes en las que se divide el espaldón. Fuente: elaboración propia

Como se ha visto, la mejor solución para aumentar la estabilidad del dique es aumentar las dimensiones del mismo sin aumentar la cota de coronación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, si se aumenta excesivamente la cota de la zona inferior del espaldón o el ancho de la zona intermedia, se perderá la accesibilidad de maquinaria y vehículos no solo en este tramo, sino a lo largo de todo el dique al ser este el inicio del mismo y al no extenderse el Muelle del Norte más allá del tramo 1. Por tanto, se deberá tener en cuenta que mantener la accesibilidad al dique es un criterio importante a tener en cuenta en las diferentes alternativas que se analizarán.

Por los motivos expuestos en el **ANEJO V: ESTUDIO DE SOLUCIONES**, se ha determinado que para que siga existiendo una buena accesibilidad se debe **limitar la pendiente para acceder al espaldón al 20%**. Esto implica que **se podrá aumentar la cota de la zona inferior en un máximo de 3.1m** si se quiere mantener una correcta accesibilidad.

ALTERNATIVA 1: ACTUAR SÓLO EN EL ESPALDÓN

En esta alternativa se estudiará una solución que no implique modificaciones en el manto. Para ello, las únicas variables que se pueden variar son las dimensiones de la sección del espaldón, pero sin aumentar la cota por las razones expuestas en el subapartado *variables A CONSIDERAR*.

Teniendo en cuenta los condicionantes expuestos en el **ANEJO V: ESTUDIO DE SOLUCIONES**, se ha diseñado la sección que aparece en la Figura 63, la cual es la única que se ha pensado que se puede llevar a cabo para cumplir frente a la estabilidad actuando únicamente en el espaldón.

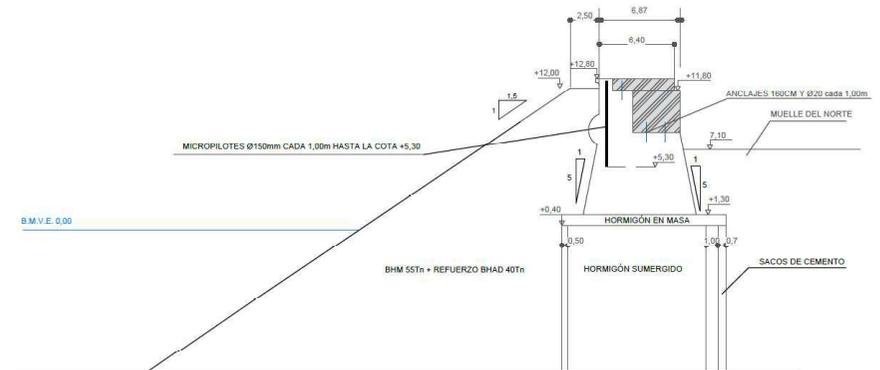


Figura 63. Sección tipo del tramo 1 de la alternativa 1. Fuente: elaboración propia

Cabe destacar que la unión del espaldón actual con las zonas recrecidas se realiza mediante anclajes y no se refuerza mediante micropilotes como se realizó en el último refuerzo. Esto es porque en esta zona recrecida no se recibe directamente el empuje del oleaje como sí sucede en la zona superior de la sección, y por ello esta sí ha sido reforzada mediante micropilotes. Por tanto, se consideran suficientes unos anclajes de unos 160cm de longitud de Ø20 cada 1m para unir solidariamente el espaldón existente con el recrecido a realizar.

Si embargo, como se ha visto en el **ANEJO V: ESTUDIO DE SOLUCIONES**, la accesibilidad es un criterio importante a tener en cuenta. De esta forma, al tener que salvar el desnivel de 5.7m hasta la coronación del dique con un recorrido de unos 21.3m hasta el inicio del mismo, la pendiente pasaría a ser de **26.8%** teniendo en cuenta que la rampa no se puede desarrollar más allá ni cambiar su recorrido por los motivos expuestos en el apartado

anterior. Esto por no hablar de la inseguridad que supondría circular por la coronación del dique con el gran desnivel que hay a ambos lados, y con la dificultad de conectar el final del tramo 1 con el tramo 2.

Cabe destacar que en esta alternativa el caudal de rebase no varía, pues no se ha modificado la cota del espaldón ni se ha variado el manto principal. Por tanto, se tendrá el caudal indicado en la Figura 59.

Por otra parte, se cumple la comprobación frente a la rotura del núcleo, ya que de esta forma el área por sección del espaldón a considerar es de unos 90m², lo que supone una carga de 2118kN por metro lineal, que al mayorar por el coeficiente de 1.35, resulta en una carga para el cálculo de unos 2860kN, siendo esta inferior a la resistencia de cálculo del núcleo de 300kN por metro lineal.

ESTIMACIÓN DEL COSTE DE LA ALTERNATIVA 1

Teniendo en cuenta los precios estimados en el apartado *COSTES DE MATERIALES A EMPLEAR*, para un área estimada de espaldón recrecido de 19.3m² se ha calculado un coste de la alternativa 1 de **1.178.126,32€**.

ALTERNATIVA 2: ACTUAR EN ESPALDÓN Y AÑADIR UNA NUEVA CAPA EN EL MANTO

En esta alternativa, se ha cambiado la forma del espaldón respecto a la alternativa 1 para tratar de respetar los criterios de accesibilidad vistos. Es por ello que se ha probado una solución dejando un ancho de paso sobre la zona inferior de 3.52m y un aumento en la cota de esta zona inferior en 3.1m, dejando de esta forma una pendiente del 20% para cumplir con la accesibilidad.

En cuanto a los cambios sobre el manto principal, se ha planteado añadir una capa de cubípodos sobre el manto actual, cambiando así la rugosidad para el cálculo del rebase. Estas consisten en colocar las piezas definidas antes, que consisten en cubípodos de densidad 2.3 Tn/m³ y el diámetro nominal necesario de 2.7m.

Sin embargo, respetando estos criterios de accesibilidad, no se cumple la estabilidad como se ve en el *ANEJO V: ESTUDIO DE SOLUCIONES*. Por tanto, se ha decidido aumentar la cota de la zona inferior a 3.5m, penalizando levemente esta accesibilidad, ya que la pendiente de acceso al dique pasaría a ser del 22%. Con todo, la opción planteada se refleja en la Figura 64.

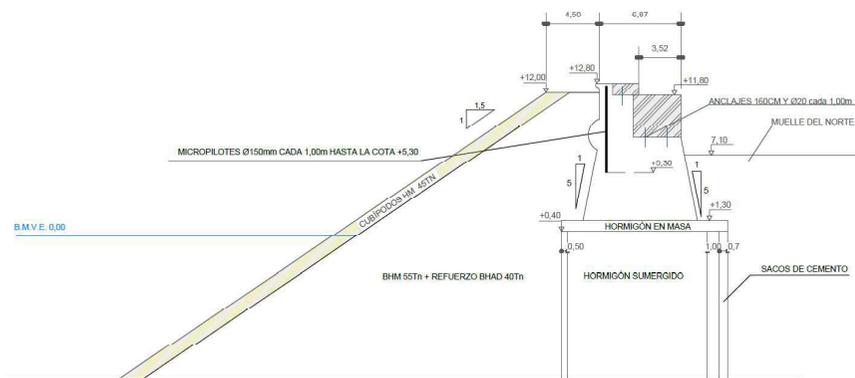


Figura 64. Sección tipo del tramo 1 en la alternativa 2. Fuente: elaboración propia.

En esta alternativa se cumple la comprobación frente a la rotura del núcleo, puesto que la sección resultante del espaldón es menor a la de la alternativa 1, por lo que supone una menor carga respecto a la sección en la alternativa 1. Por tanto, si ha cumplido en esta primera alternativa, también cumple en esta segunda alternativa.

ESTIMACIÓN DEL COSTE DE LA ALTERNATIVA 2

Teniendo en cuenta los precios estimados en el apartado *Costes de materiales a emplear*, para un área estimada de espaldón recrecido de unos 16.27m² y con una capa de cubípodos que ocupa unos 48.36m², se ha calculado un coste de la alternativa 2 de **1.681.703,85€**.

CAUDAL DE REBASE EN ALTERNATIVA 2

En este caso, el caudal de rebase que se pasaría a tener tanto en la actualidad como en los diferentes escenarios climáticos queda expuesto en la Figura 65.

Tramo del dique	Escenario	Hm (m)	Gc (m) yf	qreb (l/s/m)	
TRAMO 1	actual	8.71	4.50	0.48	70.31
	SSP1-2.6	8.71	4.50	0.48	112.02
	SSP2-4.5	8.71	4.50	0.48	119.78
	SSP5-8.5	8.71	4.50	0.48	136.97

Figura 65. Caudal de rebase con la alternativa 2. Fuente: elaboración propia

ALTERNATIVA 3: ACTUAR EN ESPALDÓN Y EN ÁNGULO DEL TALUD DEL MANTO

En esta alternativa se aumentarán las dimensiones del espaldón al máximo, pero manteniendo la accesibilidad al dique, y se variará el ángulo del manto principal añadiendo cubípodos. En cuanto al tipo de cubípodos a colocar, se emplean los mismos que en la alternativa 2. Con todo, la solución que se plantea en esta alternativa se ve en la Figura 66.

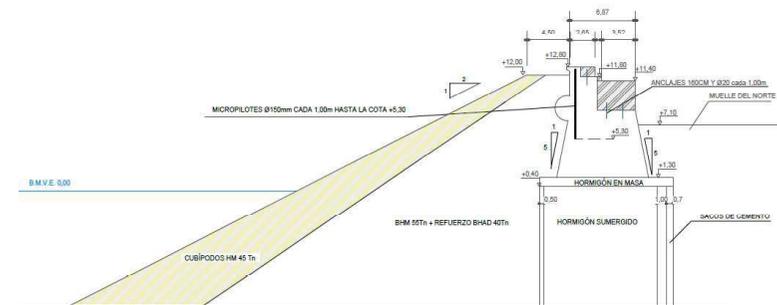


Figura 66. Sección transversal de la alternativa 3. Fuente: elaboración propia

En este caso también se cumple la comprobación frente a la rotura del núcleo, puesto que la sección resultante del espaldón sigue siendo menor a la de la alternativa 1. Por tanto, si ha cumplido en esta primera alternativa, también cumple en esta alternativa 3.

SUPERFICIE EN PLANTA QUE OCUPA LA ALTERNATIVA 3

En este caso, la alternativa supone disminuir el ángulo del talud a 1/2. Esto supone que la superficie en planta que pasará a ocupar aproximadamente un 40% más de la superficie que ocupa actualmente, como se puede ver en la Figura 67. Esta área ocupada supone un incremento de unos 4.900m² respecto a la superficie que ocupaba antes.

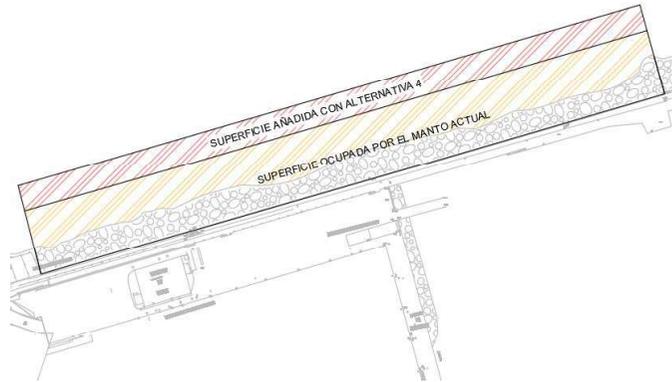


Figura 67. Comparación entre superficie ocupada por el manto actual y la que ocuparía el manto en la alternativa 3

ESTIMACIÓN DEL COSTE DE LA ALTERNATIVA 3

Con los mismos costes por m³ del hormigón del espaldón, el mismo coste en anclajes, así como el mismo coste por unidad de piezas del manto y multiplicando por los mismos porcentajes de incremento en concepto de mano de obra y maquinaria que en la alternativa anterior, se obtiene un coste de **3.600.090,81€**.

CAUDAL DE REBASE EN ALTERNATIVA 3

En este caso, si se adoptara la alternativa 3 como solución, el caudal de rebase que se pasaría a tener tanto en la actualidad como en los diferentes escenarios climáticos queda expuesto en la Figura 68.

Tramo del dique	Escenario	Hm0	Gc	yf	q _{reb}
TRAMO 1	actual	8.71	4.5	0.48	56.18
	SSP1-2.6	8.71	4.5	0.48	91.84
	SSP2-4.5	8.71	4.5	0.48	98.55
	SSP5-8.5	8.71	4.5	0.48	113.50

Figura 68. Caudal de rebase resultante en la alternativa 3. Fuente: elaboración propia

ACTUACIONES A LLEVAR A CABO EN FINAL DEL TRAMO 1

Como se ha visto en el apartado **REBASE Y ESTABILIDAD DEL ESPALDÓN**, hay una zona de este tramo en la cual su talud interior queda desprotegido (Figura 56). Por los motivos expuestos en el **ANEJO V: ESTUDIO DE SOLUCIONES**, se decide formar un talud interior para proteger la sección sobre la que apoya el espaldón frente a los posibles rebases que se producirán.

Para formar este talud, se coloca por debajo de esta capa de cubípodos piezas de escollera de peso W/10, siendo W el peso de los cubípodos. Por tanto, el peso de esta escollera es de 4.5Tn., siendo la sección de este talud se ve en el apartado **DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA**, junto a la sección de la alternativa que se haya escogido tras la valoración que se hace a continuación.

Este es un coste que se debe tener en cuenta en el presupuesto final, por lo que se ha calculado suponiendo que la profundidad en el interior del puerto es la misma que frente al dique, y con el mismo ángulo de 3/2 que hay en el exterior. Con ello, se ha obtenido un volumen de la sección a rellenar de unos 350m², siendo unos 250m² de la misma rellenos mediante escollera de 4.5Tn, y los 100m² restantes corresponden a la capa de cubípodos. Para la escollera se ha supuesto una porosidad de 0.48 y una densidad de 2.5Tn/m³.

Con un coste de la escollera de 23 €/m³ y el coste unitario de 1000€ de los cubípodos, se ha obtenido un coste total de **1.134.625,80€**.

COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

En el siguiente apartado se valoran las tres alternativas que han resultado del estudio de soluciones anterior. Para ello, se han escogido unos criterios de valoración cualitativos, a los cuales se les dará mayor o menor influencia a la hora de determinar la opción elegida en función de la importancia que se le ha dado a cada uno de estos criterios.

A continuación, se definen los criterios y subcriterios que marcarán la diferencia entre las diferentes alternativas, asignando a cada uno de ellos un peso que se considere adecuado. De esta forma, será más fácil su evaluación y, por tanto, la elección de la solución a adoptar.

- CRITERIO 1: ECONÓMICO
 - SUBCRITERIO 1.1: COSTES DE EJECUCIÓN
 - SUBCRITERIO 1.2: COSTES DE MANTENIMIENTO

- CRITERIO 2: TÉCNICO
 - SUBCRITERIO 1.2: ACCESIBILIDAD

- CRITERIO 3: MEDIOAMBIENTAL
 - SUBCRITERIO 3.1: IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DURANTE LA EJECUCIÓN
 - SUBCRITERIO 3.2: SUPERFICIE DEL LECHO MARINO OCUPADA POR LA OBRA

- CRITERIO 4: SOCIAL
 - SUBCRITERIO 4.1: IMPACTO VISUAL

Para comparar las diferentes alternativas en base a estos criterios, se ha elaborado la tabla que se ve a continuación:

SUBCRITERIOS	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
COSTES DE EJECUCIÓN	Medio: 1.178.126,32€.	Medio-alto: 1.681.703,85€	Muy alto: 3.600.090,81€
COSTES DE MANTENIMIENTO	Altos. Al no reducirse el caudal de rebase, se tendrán mayores probabilidades de que se afecte al talud que se dispone en el trasdós, teniendo que rellenar este periódicamente con nuevos bloques	Medios-alto. Se reduce un poco más el rebase respecto a la alternativa 1, pero aún se encuentra dentro del límite marcado por el Eurotop en el cual se prevén daños	Medio. El caudal de rebase es el mínimo entre el resto de las alternativas. Aun así, también se deberá realizar mantenimiento de las piezas dispuestas al encontrarse en el rango marcado por el Eurotop en el que se esperan daños.
ACCESIBILIDAD	Baja. Pendiente del 30.5%	Media. Pendiente del 22%	Alta. Pendiente límite del 20%
IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DURANTE LA CONSTRUCCIÓN	Alto. Se supone que los trabajos in situ realizados sobre el espaldón afectan más que la colocación de bloques por vía marítima	Media. Se realizan menos operaciones in situ sobre el espaldón	Media. Se realizan prácticamente las mismas operaciones in situ sobre el espaldón que en la alternativa 2
SUPERFICIE DEL LECHO MARINO OCUPADA POR LA AMPLIACIÓN	Nula. Al no actuar sobre el manto, no se afecta en base a este criterio	Baja. Únicamente se ocupa una superficie aproximada de 2.7m más (Dn de los cubípodos añadidos) por delante del manto actual, con un total de unos 1000m ² ocupados por la ampliación	Alta. Se pasa a ocupar una superficie de casi 5000m ²
IMPACTO VISUAL	Alto. Se aumentan mucho las dimensiones del espaldón	Medio. Se aumentan las dimensiones del espaldón, pero menos que en la alternativa 1	Medio. Se aumentan las dimensiones del espaldón, pero menos que en la alternativa 1

Teniendo en cuenta estos criterios, **se decide escoger la alternativa 2**. Esto es porque tiene un coste aceptable, que no es muy elevado en comparación a la alternativa más económica. Además, con esta segunda alternativa se reducen los costes de mantenimiento al reducir el caudal de rebase, y se sigue manteniendo una accesibilidad bastante aceptable al dique.

Por otra parte, en cuanto a los criterios medioambientales y sociales, se encuentra en un punto medio entre las dos otras alternativas, no afectando negativamente de forma excesiva a ninguno de ellos. En cambio, si se escogiera la alternativa 1 el impacto durante la construcción y el impacto visual sería más elevado, mientras que si se escogiera la alternativa 3 el impacto en el lecho marino sería también muy elevado.

En el apartado de **DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA**, se define bien esta alternativa y se añade el manto interior al final del tramo uno, como se ha visto que es necesario en el apartado de **ACTUACIONES A LLEVAR A CABO EN FINAL DEL TRAMO 1**.

15. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

Como se ha visto en el apartado anterior, se ha decidido escoger la alternativa 2 como solución a llevar a cabo para asegurar la estabilidad del espaldón. Esta alternativa, cuya sección queda expuesta en la Figura 69, se basa en añadir una capa de cubípodos sobre el manto actual de cubos, y en recrecer el espaldón.

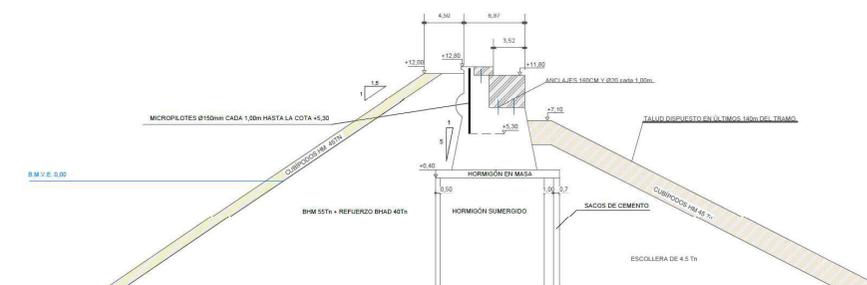


Figura 69. Sección de la solución definitiva para el tramo 1. Fuente: elaboración propia

Por un lado, los cubípodos añadidos tienen las siguientes características: densidad 2.3 Tn/m³, diámetro nominal de 2.7m, y peso W=45Tn por pieza, con un hormigón empleado para su fabricación tipo HM-30/L/20/XS3+XM2.

Por otro lado, el recrecido del espaldón se realiza con hormigón tipo HM-30/B/20/XS3, y la unión de esta nueva sección recrecida con el espaldón existente se realiza mediante 3 anclajes por sección de una longitud de 1.6m cada uno, separados 1m a lo largo de la longitud del tramo. Empleando estos materiales se obtiene un coste de 1.681.703,85€ para llevar a cabo esta solución.

Por otra parte, como se puede ver en la Figura 69, se ha realizado un talud interior para proteger la base sobre la que apoya el espaldón. Este se ubica en los últimos 140m del tramo que, como se ha visto, es la única zona del tramo sobre la que no continúa el Muelle del Norte. Este talud se forma mediante escollera de 4.5Tn, con una porosidad de 0.48 y una densidad de 2.5Tn/m³. Por su parte, los cubípodos colocados en esta zona interior son los mismos que en el manto principal: cubípodos con una densidad 2.3 Tn/m³, diámetro nominal de 2.7m, y peso W=45Tn por pieza, con un hormigón empleado para su fabricación tipo HM-30/L/20/XS3+XM2.

16. VALORACIÓN ECONÓMICA Y PLAZO DE EJECUCIÓN

La solución adoptada se ha visto que es la alternativa 2. Los costes asociados a la misma en materiales empleados tanto en el recrecido del espaldón, como en la fabricación de piezas para el manto principal, así como los costes relativos a la mano de obra y a la maquinaria empleada, teniendo también en cuenta los costes de llevar a cabo el manto secundario, ascienden a un total de unos 2.816.329,65€.

A este coste se va a añadir un porcentaje en concepto de gastos relacionados con la seguridad y salud durante la ejecución (2.5%), con el control de calidad (1.5%) y con la gestión de residuos (1%). También se añadirá un porcentaje en base a la estimación de los costes indirectos ocasionados del 6%.

Con todo, al aplicar al coste inicial estos porcentajes, resulta en un importe de 3.136.899,71€, que al añadir el 21% de IVA queda en un total de **3.795.648,65€** de presupuesto.



En cuanto al plazo de ejecución, el mayor condicionante es la fabricación de las piezas del manto. El tiempo necesario para la fabricación del total de piezas se estima en unos 24 meses. Durante estos hay tiempo suficiente para realizar las actuaciones sobre el espaldón.

Tras la fabricación será necesario colocar las piezas sobre el manto, operación que se estima con una duración de otros 2 meses.

Con todo, la estimación del **plazo de ejecución es de 26 meses**.

17. CONCLUSIÓN

Como conclusión del presente trabajo quiero destacar cómo ha resultado buscar información para realizar el mismo, así como las limitaciones por falta de información exacta que han ido surgiendo. También quiero resumir las diferencias entre lo que esperaba que se obtuviera en los resultados y lo que ha resultado realmente.

Por un lado, a la hora de realizar los diferentes cálculos, se ha detectado que no hay una formulación exacta y universal para los cálculos en las obras marítimas. Por ejemplo, así como para los cálculos estructurales existe una amplia y detallada normativa tanto a nivel estatal como europeo (Código Estructural, Eurocódigos, etc), para el diseño de las obras marítimas únicamente se dispone de las recomendaciones indicadas en las ROM a nivel estatal, no encontrándose normativa reglada ni a nivel estatal ni a nivel europeo.

Es por ello que las obras de este tipo se calculan en gran parte basándose en formulaciones empíricas que han dado buenos resultados a lo largo de los años. Además, antes de realizar la obra en el emplazamiento definitivo, se suelen realizar ensayos a escala reducida para comprobar que aquello que se va a llevar a cabo es fiable. Por tanto, se puede detectar la gran incertidumbre que hay a la hora de diseñar las obras marítimas.

En cuanto a las suposiciones que se han realizado a falta de información exacta, cabe destacar que frente al tramo 1 existe un fondo rocoso que en algunas zonas emerge de la superficie, por lo que si se tuviera en cuenta esto seguramente este tramo también cumpliría las condiciones de estabilidad, dado que la altura de ola significativa se reduciría al producirse la rotura por fondo. Es más, teniendo en cuenta que el último refuerzo se hizo a penas unos años y el resto de tramos si que han cumplido, es prácticamente seguro que este tramo también esté convenientemente diseñado.

Sin embargo, en este trabajo se ha diseñado en base a la información que se tenía y el objetivo no era realizar un proyecto constructivo que se fuese a llevar a cabo. Si fuese así, antes se debería realizar un buen estudio batimétrico para estudiar y diseñar convenientemente el tramo.

Respecto a los resultados que se esperaban, en un principio pensaba que el aumento en la cota del espaldón iba a influir de forma positiva a las comprobaciones de estabilidad, puesto una mayor cota de coronación reduce notablemente el caudal de rebase. Sin embargo, este aumento también provoca que la superficie sobre la que impacta el oleaje sea mayor. Por tanto, aunque se reduzca el caudal de rebase, las fuerzas resultantes sobre el espaldón acaban siendo mayores, penalizando la estabilidad del mismo frente al vuelco y deslizamiento.

También se suponía que las variaciones en el manto principal iban a influir mucho más en los cálculos de estabilidad. Sin embargo, aunque sí es cierto que estas influyen, las dimensiones del espaldón son el criterio que más varía de lejos estos resultados. Por tanto, si no se hubieran tenido en cuenta las limitaciones de accesibilidad al dique, la alternativa 1 hubiese sido la mejor opción en base a los criterios que se han tenido en cuenta.

Por tanto, se concluye que para adaptar el espaldón de los diques de abrigo al cambio climático, las principales actuaciones se deben encaminar a variar las dimensiones del espaldón existente, pero tratando de no

aumentar la cota del mismo, siempre que el caudal que rebasa sea moderado. Aunque siempre hay que realizar un estudio para ver si esto es posible y si esta opción es realmente la óptima en base a los criterios y a los condicionantes que se tengan en cada caso.



BIBLIOGRAFÍA

Análisis de la potencialidad de las ayudas del IFOP y FEP (2009). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino

https://www.mapa.gob.es/es/pesca/temas/fondos-europeos/Bermeo_tcm30-73744.pdf

ASOCIACIÓN TÉCNICA DE PUERTOS Y COSTAS (2014). *Retos del S.XXI para los puertos y costas*. Puertos del Estado

http://atpvc.com/wp-content/uploads/2020/04/2014_Libro-V-Congreso-Bilbao.pdf

Atlas de inundación del litoral peninsular español (2017). Dirección General de Costas. Ministerio de Medio Ambiente

https://smc.ihcantabria.es/SMC25/wp-content/uploads/2017/03/Documento-complementario-de-cota-de-inundacion_Con_ANEJOS.pdf

Código estructural (2021). Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

<https://www.mitma.gob.es/organos-colegiados/comision-permanente-de-estructuras-de-acero/cpa/codigo-estructural>

LAURA CRESPO GARCÍA Y FERNANDO JIMÉNEZ ARROYO (2020). *Metodología de análisis de adaptación al cambio climático de infraestructuras de transporte*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)

<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2435/2007>

Puerto de Bermeo (Vizcaya). Departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

<https://www.euskadi.eus/informacion/puerto-de-bermeo-vizcaya/web01-a2portua/es/>

Diques de Abrigo en España. Tomo 1: Fachadas Norte y Galicia (1988). Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

Espacios protegidos del país vasco. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/red-natura-2000/lic_paisvasco.html

GABRIEL CASTAÑARES HERNÁNDEZ (2018). *La adaptación al cambio climático en el transporte ferroviario en España*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)

<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2353/1841>

IBON GALPASORO, J.GERMÁN RODRIGUEZ ET AL (2009). *Elaboración de mapas de hábitats y caracterización de fondos marinos de la plataforma continental vasca*. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca. Gobierno Vasco.

https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/habitats_marinos/es_def/adjuntos/InformeHabitats2009.pdf

IÑIGO J. LOSADA, FERNANDO J. MÉNDEZ et al. (2014). *Impactos en la costa española por efecto del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente

https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/fase3_costas_tcm30-178538.pdf

JORGE MOLINES Y JOSEP R. MEDINA (2015). *Fórmula de rebase del oleaje para diques en talud con espaldón utilizando datos derivados de la red neuronal CLASH*. American Society of Civil Engineers.

JORGE MOLINES, MARÍA P. HERRERA ET AL. (2018). *Estimaciones de las fuerzas del oleaje sobre el espaldón basadas en las tasas de rebase*. Coastal Engineering

JOSE ANTONIO AZPIAZU, CARMEN MARTÍNEZ MENAYA ET AL. (1994). *Cuadernos de sección: historia y geografía nº22*. Sociedad de Estudios Vascos.

<https://www.eusko-ikaskuntza.eus/es/publicaciones/cuadernos-de-seccion-historia-geografia022/ar-1387/>

JOSEP R. MEDINA, Y M. ESTHER GÓMEZ-MARTÍN (2016). *Manual del Cubipodo*. Universitat Politècnica de València

https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/dc140909-8ee2-400c-b840-277bfcf2cbe2/6350_e.pdf?guest=true

LAURA CRESPO GARCÍA Y FERNANDO JIMÉNEZ ARROYO (2020). *Metodología de análisis de adaptación al cambio climático de infraestructuras de transporte*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)

<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2435/2007>



MARIO SÁENZ DE BURUAGA, FELIPE CANALES ET AL. (2012). *Medidas de conservación de la Red Natura 2000 en Urdaibai y San Juan de Gaztelugatxe*. Dirección de Biodiversidad y Participación Ambiental del Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco

https://www.ingurumena.ejgv.euskadi.eus/contenidos/informacion_publica/inf_201205301217/es_def/adjuntos/zec_urdaibai_informacion_doc1_diagnostico.pdf

MARJORIE MCGUIRK, SCOTT SHUFORD ET AL. (2009). *Implicaciones de las condiciones meteorológicas y el cambio climático en el transporte por superficie en los Estados Unidos*. Boletín de la OMM.

https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/3548/1/BolOMM%2058_2-1.pdf

Plan estratégico de pesca y acuicultura Euskadi (2020). Administración de la Comunidad Autónoma del País Vasco Departamento de Desarrollo Económico y Competitividad

https://www.euskadi.eus/contenidos/proyecto/plan_pesca_acuicultura2020/es_def/adjuntos/Plan_Estrategico_Pesca_%202020.pdf

ROLAND GARNIER, JOSÉ GERMÁN RODRÍGUEZ PATIÑO ET AL. (2022). *Estudio básico de dinámica litoral y evaluación de los posibles efectos del cambio climático en las actuaciones definidas en el "Proyecto ampliación del dique rompeolas del puerto de Bermeo (100 m)"*. Gobierno Vasco

https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/costas/participacionpublica/estudiobasicodinamicallitoralbermeo_220718_tcm30-549902.pdf

Recomendaciones de Obras Marítimas (2001-2018). Puertos del Estado

ROM 0.0-01: Procedimiento General y Bases de Cálculo para Proyectos en Obras Marítimas (2001)

ROM 1.0-09: Bases y Factores del Proyecto para estructuras marítimas frente a oscilaciones del mar (2009)

ROM 1.1-18: Recomendaciones para el proyecto de Construcción de Diques de Abrigo (2018)

ROM 0.5-05: Geotecnia para las Obras Marítimas y Portuarias (2005)

T.PULLEN, N.W.H. ALLSOP ET AL. (2007) *Manual Eurotop*. Agencia Medioambiental de Reino Unido, Concejo Alemán de Investigación en Ingeniería Costera y otros.

http://www.overtopping-manual.com/assets/downloads/EAK-K073_EurOtop_2007.pdf

VALÉRIE MASSON-DELMOTTE, ANNA PRIANI ET AL. (2021). *Cambio Climático. Bases Físicas*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf

VALÉRIE MASSON-DELMOTTE, ANNA PRIANI ET AL. (2014). *Informe de síntesis para responsables de políticas: cambio climático*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM_es.pdf

VALÉRIE MASSON-DELMOTTE, HANS-OTTO PORTNER ET AL. (2019) *Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C [...]*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf

Visor C3E. Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria)

<https://c3e.ihcantabria.com/>