

Informe de solicitud de
concesión de espacios
ubicados en Dominio
Público Marítimo
Terrestre

Apéndice 4.

ESTUDIO HIDRÁULICO

Septiembre 2024



■ ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. DATOS DE PARTIDA	2
3. HIDROLOGÍA.....	3
3.1. DESCRIPCION DE LAS CUENCAS.....	3
3.2. CAUDALES DE DISEÑO	6
4. INFLUENCIA DE LA MAREA.....	12
4.1. LA MAREA ASTRONÓMICA EN EL ABRA EXTERIOR	12
4.2. LA MAREA ASTRONÓMICA EN LA RÍA.....	13
4.3. CORRIENTES DE MAREA EN LA RÍA DE BILBAO	18
5. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA	26
5.1. METODOLOGÍA.....	26
5.2. INFORMACIÓN DE PARTIDA	27
5.3. GEOMETRÍA.....	27
5.4. CONDICIONES DE CONTORNO.....	29
5.5. CAUDALES Y SIMULACIONES	30
6. INUNDABILIDAD	33
6.1. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO FRENTE A LA AVENIDA DE 500 AÑOS.....	33
7. VELOCIDADES DE CORRIENTE	37
7.1. ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES.....	37
7.2. VELOCIDADES PARA DIFERENTES CAUDALES	38
7.3. VELOCIDADES PARA UN AÑO MEDIO	40
8. ANÁLISIS DE LA EROSIÓN / ACUMULACIÓN	48
8.1. HIDROLOGÍA.....	48
8.2. HIDRÁULICA.....	51
8.3. MORFODINÁMICA	58
8.4. RESULTADOS	59
9. DRAGADOS.....	68
9.1. EVOLUCIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE SEDIMENTOS	68
9.2. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA SEDIMENTACIÓN EN LA CAPACIDAD DE DESAGÜE DEL CAUCE	69
9.3. ESTIMACIÓN DE LOS DRAGADOS NECESARIOS	71
9.4. CONCLUSIONES.....	71
10. BATIMETRÍAS	73

■ ÍNDICE

10.1. BATIMETRÍAS HISTÓRICAS	73
10.2. COMPARACIÓN DE LAS ÚLTIMAS BATIMETRÍAS.....	75
10.3. PERFILES TRANSVERSALES.....	77
10.4. RECOMENDACIONES	79

1 INTRODUCCIÓN

El curso del agua que forma la Ría de Bilbao presenta diferente comportamiento según el tramo en el que nos encontremos debido al efecto mareal en parte de su cauce.

Para aquellas actividades que utilizan el cauce, el funcionamiento hidráulico del mismo debido a aspectos tales como el efecto de las mareas, el efecto de las influencias simultáneas de las mareas y diferentes tipos de aguaceros o avenidas, pueden introducir condicionantes específicos relativos a aspectos tales como la seguridad de las actividades, el tipo de instalaciones de borde requeridas, las potencialidades ecológicas, etc.

De esta manera, la hidráulica de la Ría se convierte en un factor determinante, cuyo conocimiento es necesario dominar en el establecimiento de los diferentes usos y actividades, vinculados a su lámina de agua y apoyados en sus márgenes.

Por tanto, en el presente capítulo se analiza el comportamiento hidráulico del sistema Ibaizabal, Ría de Bilbao y Cadagua a su paso por el término municipal de Bilbao.

El interés de este análisis radica en determinar los parámetros hidráulicos existentes en el cauce para proponer actividades ligadas a su lámina de agua y apoyados en sus márgenes con los criterios adecuados de viabilidad y seguridad.

2. DATOS DE PARTIDA

A este respecto, cabe citar los siguientes proyectos y estudios que se han tomado como referencia para el presente Estudio:

- Proyecto de defensa contra inundaciones y encauzamiento de ríos y arroyos de los núcleos urbanos de las cuencas intracomunitarias de los ríos Cadagua, Karrantza y Kalera en la CAPV (fase I). TYPESA, 2003.
- Anteproyecto de las actuaciones de protección contra inundaciones de la ría de Bilbao. SAITEC, 2005.
- Informe sobre los dragados a realizar en la ría de Bilbao para el mantenimiento de su capacidad hidráulica. SAITEC, 2008.
- Estudio sobre las características y frecuencia de los dragados a realizar en la ría de Bilbao para el mantenimiento de su capacidad hidráulica. SAITEC, 2009.
- Estudio de alternativas para la protección contra inundaciones de la ría de Bilbao. SAITEC, 2010.
- Estudio de erosión frente a avenidas extremas en la ría de Bilbao entre La Peña y Elorrieta. SENER, 2010.
- Estudio de erosionabilidad de los muros y estructuras en el ámbito de las márgenes derechas de los ríos Ibaizabal y Cadagua en el T.M. de Bilbao. SENER/MOYUA/BYCAM, 2012.
- Proyecto constructivo de la apertura del Canal de Deusto. TYPESA, 2013.
- Plan especial de emergencias ante el riesgo de inundaciones de la comunidad autónoma de Euskadi. GOBIERNO VASCO, 2015.

3. HIDROLOGÍA

3.1. DESCRIPCION DE LAS CUENCAS

La Ría del Nervión, esto es, el tramo final del río donde se hace sentir el efecto de las mareas comienza a la altura del barrio de La Peña, donde se incorporan las escorrentías de un área drenante de 1.013 km² correspondiente a las cuencas de los ríos Nervión e Ibaizabal.



Cuencas de captación de la ría de Bilbao y del río Cadagua.

La zona de captación propia de la Ría de Bilbao, de aproximadamente 30 km², es muy reducida si se compara con la cuenca ya mencionada de los ríos Nervión e Ibaizabal, aunque se tienen que considerar también las correspondientes a los ríos Cadagua, con 604 km² de cuenca, Asua con 76 km², Galindo con 56 km² y Gobelas-Udondo con 41 km². En total, la superficie de cuenca que drena la Ría del Nervión asciende a 1.797 km².

Para este Estudio se han tenido en cuenta las cuencas que forman parte del ámbito del Término Municipal de Bilbao:

3.1.1. Cuenca del Cadagua

Esta cuenca constituye una de las más extensas de la vertiente cantábrica, con una extensión aproximada de 600 km².

El río principal nace en la Sierra de la Magdalena (Peña Mayor, 1.265 m) que es la divisoria entre las cuencas de las vertientes Cantábrica y Mediterránea. Este río discurre en dirección SO-NE con un recorrido de unos 70 km hasta su desembocadura en el estuario del Nervión, a la altura de Lutxana.

Los principales afluentes son el río Ordunte por la margen izquierda, que se origina de numerosas torronteras de los montes de Ordunte (Zalama 1.335 m) y desagua en el Cadagua a la altura de Gijano, y

el río Herrerías (margen derecha), que nace en la Sierra Salvada (1.098 m) y confluye con el Cadagua en Sodupe. El río Ordunte está regulado por el embalse del mismo nombre que abastece a Bilbao junto con los embalses del Zadorra.

El río Cadagua entra en la provincia de Bizkaia por El Berrón y atraviesa los Municipios de Balmaseda y Zalla y se abre una extensa planicie hasta aguas abajo de Güeñes, donde vuelve a encajonarse en un cauce más estrecho hasta su desembocadura.

En lo referente a los materiales que atraviesa, en el tramo alto discurre sobre terrenos calizos que generan un lecho de losas o grandes bloques de roca. A la altura de Villasana de Mena el suelo es diapírico y aporta gran cantidad de sales minerales aumentando considerablemente la conductividad del agua.

Geomorfología

En esta cuenca pueden diferenciarse 4 sistemas principales: Aluvial, de Ladera, Antropogénico, y de forma más puntual se encuentran retazos de sistemas Kársticos.

- **Sistemas Aluviales**

A lo largo de todo el cauce existen depósitos aluviales y de terrazas y puntualmente en la parte Sur, depósitos de terraza alta que también aparecen en pequeños retazos en la parte SO.

- **Sistemas de Ladera**

Donde más abundan es en la zona SO de la cuenca, donde los depósitos más abundantes son coluviales de bloques, acúmulos de ladera de grano fino y zonas de erosión activa (regueras).

A lo largo del cauce existen retazos de coluvial de bloques y cicatrices de despegue con masas desprendidas.

De forma puntual en la zona SE, próximo al límite con el cauce del Nervión existen zonas de deslizamiento.

- **Sistemas Antropogénicos**

Se localizan en la zona más próxima a la desembocadura, donde existe una mayor densidad de población e industria. Se trata de escombreras, rellenos, excavaciones y alguna cantera aislada.

- **Sistemas Kársticos**

Se distribuyen en dos bandas NO-SE, se localizan en el tercio NE de la cuenca. Se trata de lapiaces cubiertos, desnudos y semidesnudos.

3.1.2. Cuenca del Nervión

El río Nervión tiene un recorrido de más de 50 km y su cuenca recoge las aguas de aproximadamente 530 km² extendiéndose de N a S, desde la Sierra de Guillarte (850 m) que actúa de divisoria entre las vertientes cantábrica y mediterránea.

Su nacimiento se precipita por el cantil de la Peña de Orduña hasta Delika y sigue en un cauce muy intervenido por dragados y encauzamientos al contrario que anteriormente que es divagante, y discurre sobre suelos diapíricos que originan unas conductividades muy elevadas. El resto del valle es más o menos encajado.

Tras su paso por Llodio se incorpora por su margen derecha el afluente más importante, el río Altube, de aproximadamente 30 km de recorrido y que procede del Macizo del Gorbeia (1.484 m) por dos ramas, por un lado, el río Altube propiamente dicho y por otro el río Arnauri.

En Ugao – Miraballes recibe también por la margen derecha al río Zeberio (del monte Murga) y, por la izquierda, el arroyo Larrumbe del Ganekogorta (998 m).

En su parte media y baja, el Nervión atraviesa amplias zonas industrializadas. Se trata de una cuenca muy modificada por usos terciarios como trenes, autovías, carreteras y por núcleos poblacionales importantes.

Las características generales del río dependen de las condiciones de cabecera, pero están muy modificadas e influidas por la gran actividad humana que se desarrolla en la cuenca. A partir de Orduña recibe continuos impactos a los que responde con una capacidad de recuperación notable dependiente del caudal (muy fluctuante), pero aun así insuficiente.

El Nervión presenta las riberas desprotegidas en todo su curso, salvo en la zona alta. Los ríos Altube, Arnauri y Ceberio se encuentran mejor conservados.

Geomorfología

En esta cuenca se encuentran 5 sistemas principales: Aluviales, Antropogénicos, Kársticos y de Ladera y, muy puntualmente, Glaciares.

- **Sistemas Antropogénicos**

Donde más abundan es en la parte Norte de la cuenca, donde existe una mayor densidad de población, encontrándose rellenos, escombreras y excavaciones. También se encuentran retazos en la parte meridional.

- **Sistemas Aluviales**

Lo más abundante son los depósitos aluviales presentes prácticamente a lo largo de todo el cauce y también las terrazas, de forma puntual existen terrazas altas.

- **Sistemas Glaciares**

De forma puntual, en la zona NE se aprecian morrenas glaciares rodeadas de depósitos de ladera como coluviones en bloques.

- **Sistemas de Ladera**

Se pueden considerar los más abundantes exceptuando el cuarto Norte de la cuenca. Abundan los depósitos de vertiente, los coluviones (principalmente en la franja Este), los acúmulos de ladera de grano fino y los barrancos y cauces de fondo plano. Puntualmente también se encuentran conos aluviales.

- **Sistemas Kársticos**

En el cuarto Norte de la cuenca aparecen en franjas de dirección NO-SE y se trata principalmente de lapiaces cubiertos y semidesnudos y campos de dolinas.

En la mitad Sur son los depósitos más abundantes apareciendo en grandes extensiones, principalmente se trata de lapiaces cubiertos y campos de dolinas en lapiaz cubierto.



Mapa geológico del entorno de la ría del Nervión. Fuente: NorArte Studio.

3.2. CAUDALES DE DISEÑO

Un tramo fluvial se puede caracterizar por numerosas variables como su longitud, pendiente, anchura, profundidad, tipo de lecho, sinuosidad, vegetación, ictiofauna, etc. Pero, sobre todo y estrechamente relacionado con todas ellas, se encuentra su régimen de caudales circulantes.

La magnitud y variabilidad temporal del caudal de agua que transporta un río conforman su morfología, junto con otros factores como la naturaleza del terreno que atraviesa o el tamaño y ubicación geográfica de su cuenca de aportación.

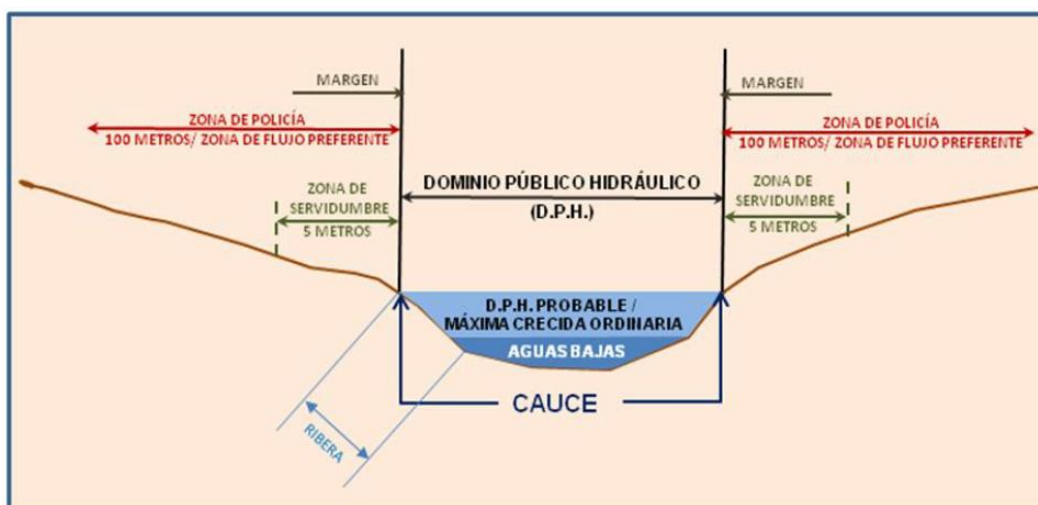
Los caudales que circulan por un cauce a lo largo de un año son oscilantes en torno a un valor medio y pueden presentar importantes variaciones entre las épocas de estiaje y las lluviosas, en las que las crecidas en algunos casos superan en más de cien veces los caudales bajos habituales.

A lo largo de miles de años los ríos han ido conformando su cauce, definiendo su forma mediante el caudal que circulaba por ellos. Pero sólo en aquellas ocasiones en las que circula la máxima crecida ordinaria, a la que se asocia un caudal máximo específico para cada río.

Según la Ley de Aguas, el cauce o lecho de un río es la superficie ocupada por las aguas en las máximas crecidas ordinarias, adicionalmente se tienen que contemplar en su determinación aspectos históricos, geomorfológicos o ecológicos. Aquellas crecidas que desbordan el cauce y superan el caudal de la máxima crecida ordinaria se denominan extraordinarias.

La máxima crecida ordinaria se define legalmente en el reglamento del Dominio Público Hidráulico. El caudal que la determina se establece en régimen natural mediante el estudio de las series de caudales máximos instantáneos anuales (es decir, el “pico” de caudal registrado cada año) entre los que se eligen diez años consecutivos con comportamiento representativo para hacer la media y obtener así el valor del caudal de la máxima crecida ordinaria. Este cálculo hidrológico no es sencillo ni arbitrario y en España se dispone desde hace unos años del Mapa de Caudales Máximos elaborado por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del Ministerio de Fomento) que permite asignar los caudales de máxima crecida ordinaria a cada tramo fluvial a partir de datos de estaciones de aforo (foronómicos) y, también, mediante otros métodos hidrometeorológicos.

Los niveles alcanzados por la máxima crecida ordinaria son los que determinan el terreno cubierto por las aguas y en una aproximación los límites del Dominio Público Hidráulico y la zona de servidumbre y policía asociadas.



Delimitaciones de cauces y sus zonas asociadas según el Reglamento del Dominio Público Hidráulico

En resumen, la máxima crecida ordinaria se establece estadísticamente y se asocia a la frecuencia de aparición de este caudal máximo (que suele presentarse entre 2 y 7 años en regímenes no alterados) que determina el umbral a partir del cual los cauces se desbordan y el agua ocupa las márgenes de la llanura de inundación.

Para este estudio, se analizan las situaciones ordinarias y extraordinarias de caudales en los cauces:

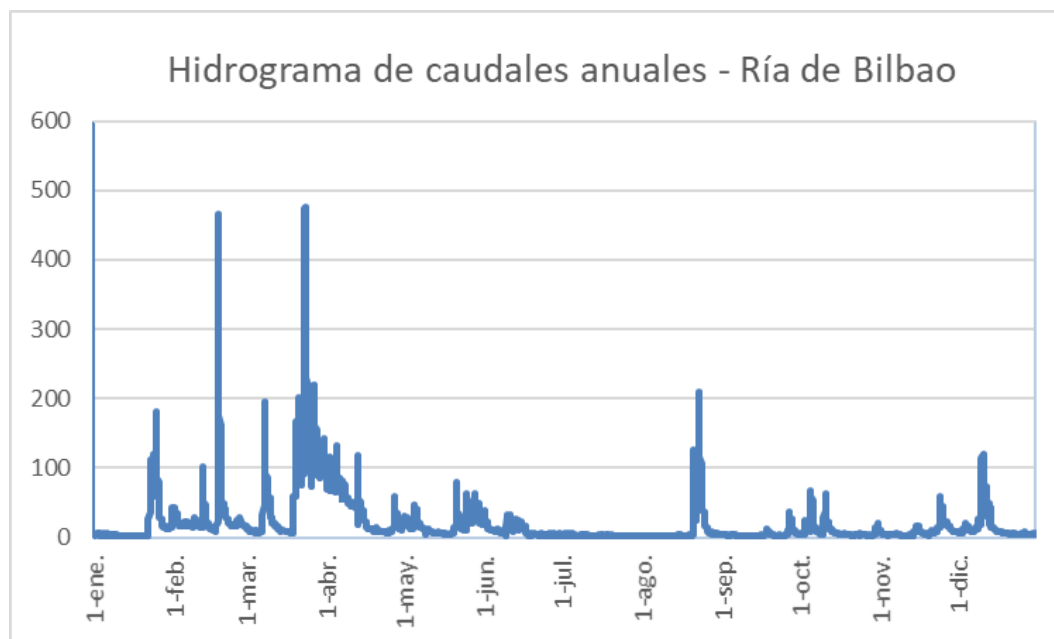
3.2.1. Caudales ordinarios

Diferentes administraciones de la CAPV han realizado un esfuerzo importante en los últimos años para implantar una red de control hidrometeorológico que permita mejorar el conocimiento hidrológico del territorio.

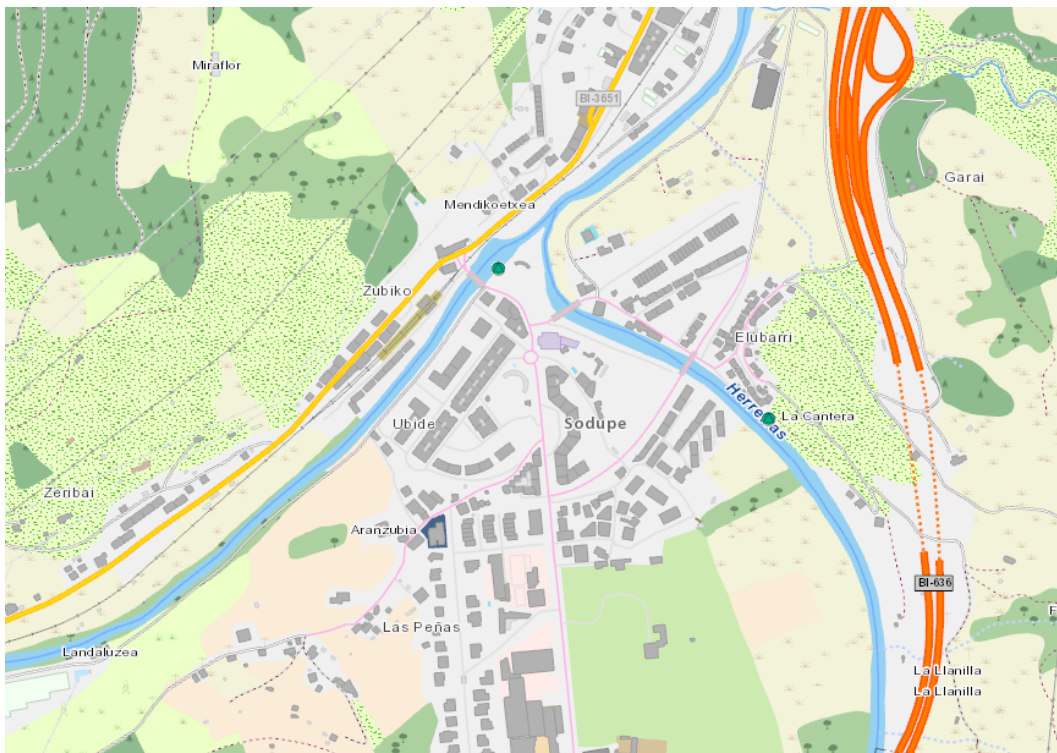
El río Ibaizabal cuenta con la estación de aforo de Abusu, en el término municipal de Arrigorriaga. La estación registra los parámetros hidrometeorológicos, dispone de equipamiento para el control de las características fisicoquímicas de las aguas (temperatura del agua, ph, conductividad, oxígeno disuelto, turbidez, materia orgánica y amonio), con objeto de conocer la calidad de las mismas y el estado de los ríos.

Se dispone de datos aforados en la estación de Abusu, una serie de 16 años proporcionada por URA, con los datos de caudal estimados cada hora.

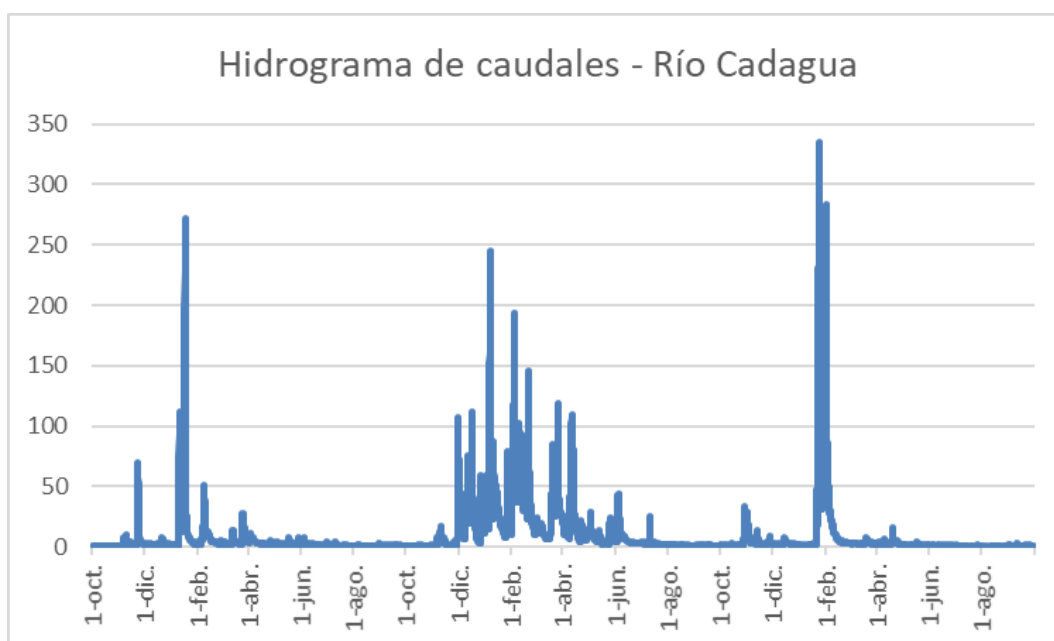
Estación de Aforo de Abusu.



Hidrograma anual de caudales para la Ría de Bilbao.



Estaciones de aforo para en el río Cadagua.



Datos de aforo disponibles para el Cadagua

Tras el análisis de los hidrogramas anuales de caudales registrados en estaciones hidrometeorológicas automáticas (en el caso de la cuenca del Ibaizabal), se han realizado una serie de simulaciones que parten del caudal medio anual hasta la máxima crecida ordinaria. En el caso del Ibaizabal (Ría de Bilbao) se han estudiado los caudales comprendidos entre el medio anual $25 \text{ m}^3/\text{s}$ y la máxima crecida ordinaria $537 \text{ m}^3/\text{s}$

inclusive y son los siguientes: 50, 100, 200, 300 y 400 m³/s. Para el estudio del río Cadagua los caudales serían 8,5 m³/s (medio anual), 10, 20, 50, 100, 150 y 237 m³/s correspondiente a la máxima crecida ordinaria.

3.2.2. Caudales Ordinarios durante un año medio

Con la serie de caudales registrados durante los últimos 5 años se ha realizado una media para cada una de las 52 semanas que tiene un año, con la cual se han hecho las simulaciones hidráulicas:

Semana	Ría de Bilbao (m ³ /s)	Canal de Deusto (m ³ /s)	Río Cadagua (m ³ /s)
1	33.01	14.33	27.32
2	47.56	20.64	38.13
3	38.80	16.84	34.12
4	88.24	38.30	15.45
5	108.14	46.93	28.25
6	84.39	36.62	39.41
7	62.06	26.93	25.26
8	73.78	32.02	25.61
9	87.30	37.89	9.01
10	71.11	30.86	8.41
11	25.53	11.08	7.90
12	28.65	12.44	23.70
13	61.46	26.67	22.86
14	22.01	9.55	9.15
15	33.16	14.39	21.90
16	12.08	5.24	6.43
17	7.48	3.25	5.43
18	9.93	4.31	8.40
19	5.43	2.36	4.02
20	7.90	3.43	4.02
21	7.06	3.06	4.89
22	9.21	4.00	5.29
23	8.57	3.72	8.51
24	5.31	2.31	3.67
25	4.20	1.82	2.50
26	3.94	1.71	2.61
27	5.37	2.33	2.18
28	4.04	1.75	2.45
29	3.10	1.34	1.94
30	3.18	1.38	1.58
31	2.92	1.27	1.44
32	2.60	1.13	1.26
33	2.44	1.06	1.21
34	2.35	1.02	1.13

Semana	Ría de Bilbao (m³/s)	Canal de Deusto (m³/s)	Río Cadagua (m³/s)
35	2.41	1.05	1.25
36	2.83	1.23	1.30
37	4.61	2.00	1.38
38	3.42	1.49	1.31
39	2.70	1.17	1.01
40	3.13	1.36	0.98
41	4.24	1.84	1.07
42	3.07	1.33	1.10
43	3.49	1.52	1.15
44	12.00	5.21	6.95
45	18.79	8.16	5.59
46	5.92	2.57	3.89
47	14.78	6.41	1.80
48	32.93	14.29	13.56
49	19.91	8.64	11.77
50	33.47	14.53	26.37
51	25.27	10.97	9.55
52	25.94	11.26	11.34

Caudales medios en cada una de las 52 semanas del año (media de los últimos 5 años). Fuente URA.

3.2.3. Caudales extraordinarios

Los caudales utilizados para el estudio en situaciones extremas o de avenidas son los propuestos por la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental en el Estudio de Caudales Extremos de Avenida de la CAPV.

En la tabla siguiente se resumen los valores correspondientes a los caudales de los cauces de estudio:

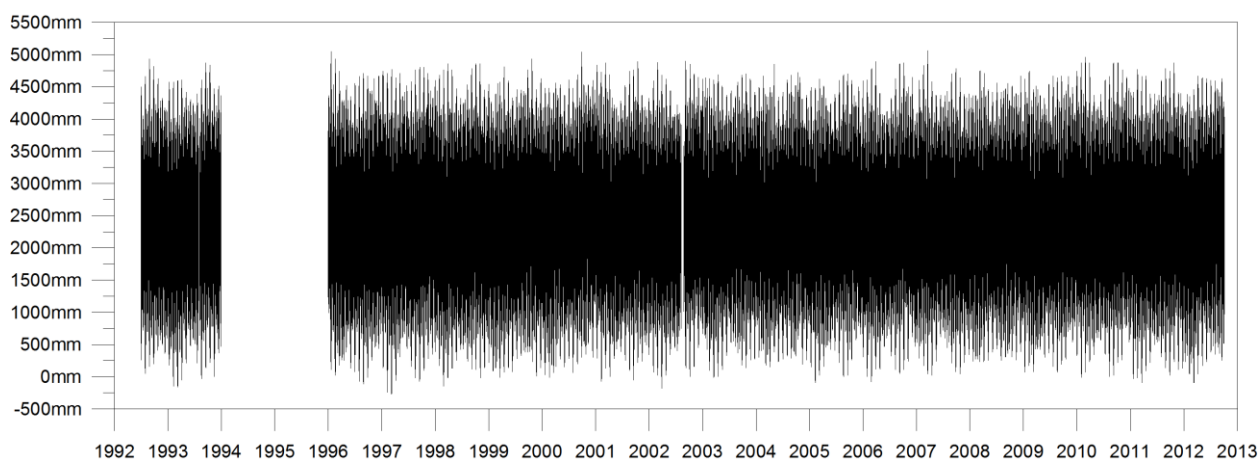
Cauce	Máxima Crecida Ordinaria (m³/s)	T 10 (m³/s)	T 100 (m³/s)	T 500 (m³/s)
Ibaizabal	537	832	1861	2510
Cadagua	237	438	806	1155

4. INFLUENCIA DE LA MAREA

4.1. LA MAREA ASTRONÓMICA EN EL ABRA EXTERIOR

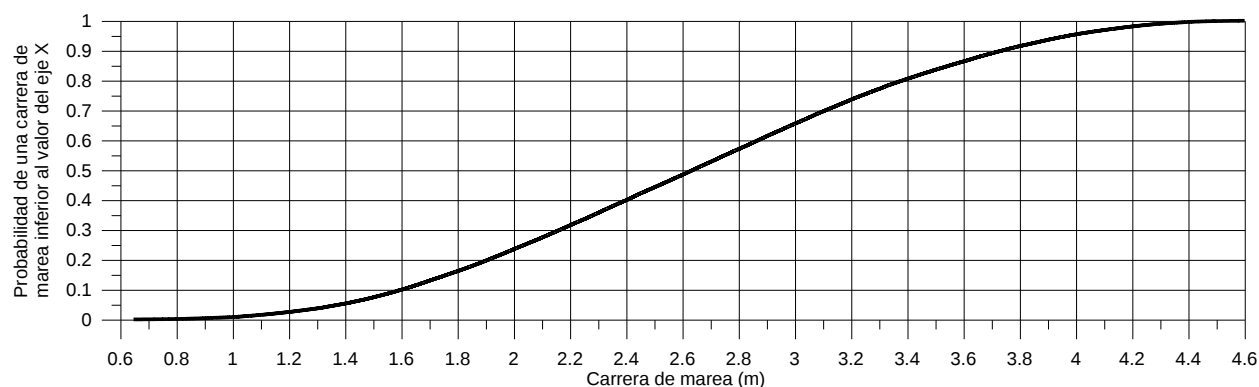
La marea en el golfo de Bizkaia es semidiurna, normalmente cada día se producen dos pleamaras y dos bajamares. El máximo rango anual en la costa vasca supera los 4,5 m.

Como información de base descriptiva del régimen general de la marea astronómica se dispone de los datos cincominutarios de nivel de marea del mareógrafo 3110 de Puertos del Estado, situado en el Abra Exterior del Puerto de Bilbao.



Registro de nivel de marea del mareógrafo 3110 de Puertos del Estado.

En la siguiente figura se ve la función de distribución de las carreras de marea (diferencia de altura entre una pleamar y la siguiente bajamar) en el Abra Exterior del Puerto de Bilbao. La mediana de la función de distribución de las carreras de marea se sitúa en 2,6 m; el percentil del 10% corresponde a una carrera de marea de 1,6 m y el percentil del 90% a una carrera de marea de 3,75 m de amplitud.



Función de distribución acumulada de las carreras de marea obtenidas a partir de los datos del mareógrafo 3110 de Puertos del Estado.

En la tabla se encuentran las amplitudes y fases de las componentes de la marea astronómica más importantes en el puerto de Bilbao. Las componentes semidiurnas (las que llevan en su nombre un 2) son las que tienen mayor amplitud, de hecho, la componente semidiurna lunar principal (M2 de 12,42 h de período) y la semidiurna solar principal (S2 de 12 h de período) representan 2/3 de la amplitud total de la marea.

Componente	Frecuencia (°/h)	Periodo (h)	Amplitud (m)	Fase (°)
M2	28,984	12,421	1,320	181,600
S2	30,000	12,000	0,464	126,860
N2	28,440	12,658	0,280	309,100
K2	30,082	11,967	0,134	286,430
O1	13,943	25,819	0,072	237,540
K1	15,041	23,934	0,064	241,080
NU2	28,513	12,626	0,053	104,560
MU2	27,968	12,872	0,048	227,510

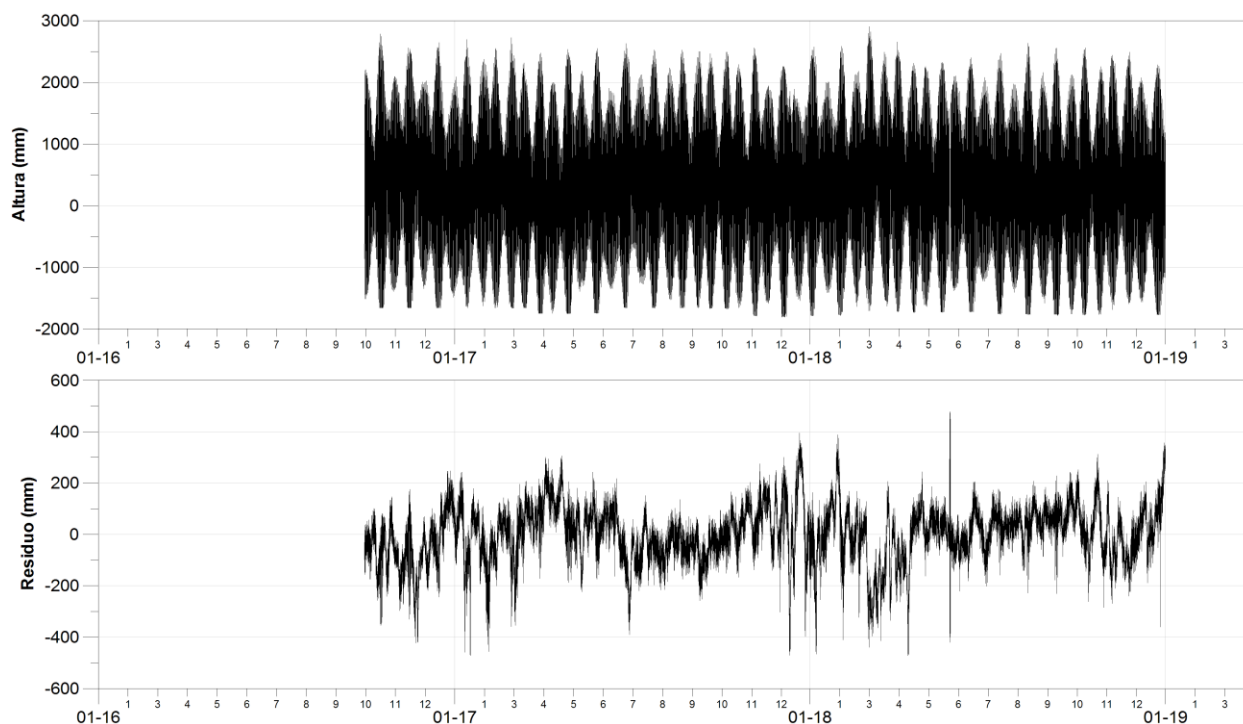
Amplitudes y fases de las principales componentes armónicas de la altura de la superficie libre registrada por el mareógrafo 3110 del puerto de Bilbao (1992-2012).

4.2. LA MAREA ASTRONÓMICA EN LA RÍA

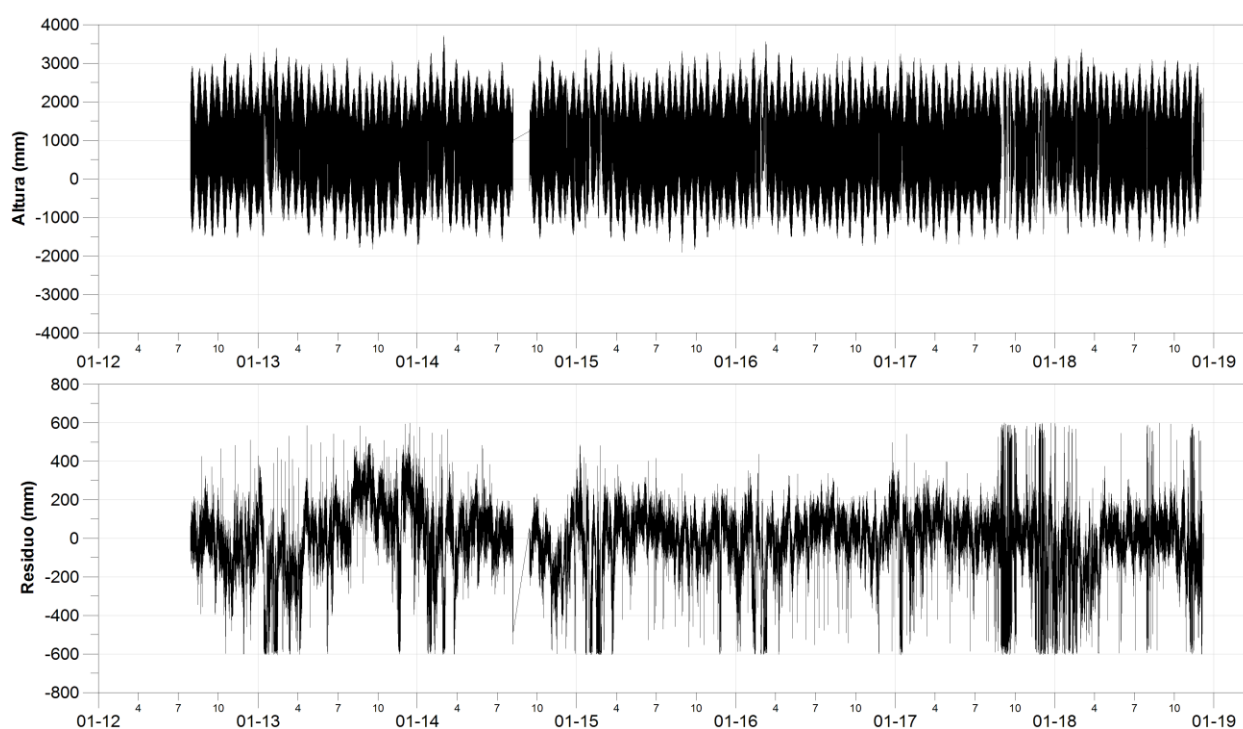
En enero de 2019 se realizó una colaboración científica y personal con TRI-Meteo y la Dirección de Atención de Emergencias (DAEM) del Gobierno Vasco para analizar la información de registros de nivel en diferentes puntos de la Ría de Bilbao (Estuario del Nervión): Deusto, La Merced y Abusu por mor de diferentes episodios de inundación en el entorno de la Ría a causa de la combinación de mareas extraordinariamente vivas y situaciones de fuertes precipitaciones en las cuencas fluviales que produjeron aumentos de caudal notables.

Además, se aprovechó para analizar el nivel de riesgo que podía acontecer en las pleamares de febrero de 2019 para mejorar la precisión de las alertas por inundación que emite la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología (DAEM).

La Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología (DAEM) nace como consecuencia del proceso de fusión de las Direcciones de Atención de Emergencias y Protección Civil, por un lado, y Meteorología y Climatología, por otro, culminado en el año 2010 tras la incorporación de esta última al Departamento de Interior del Gobierno Vasco.



Medida de nivel en la estación de Deusto (octubre 2017-diciembre 2019), imagen superior y residuo de origen no mareal, imagen inferior.



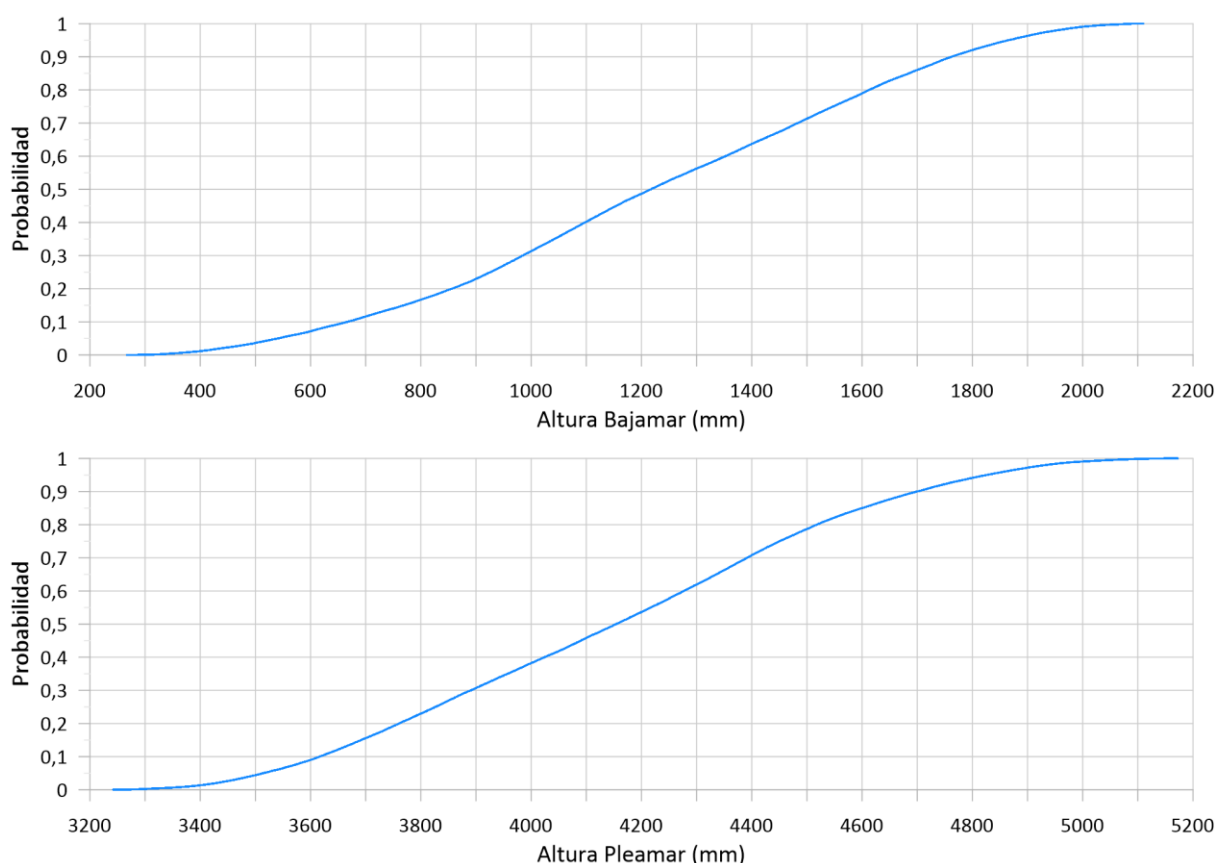
Medida de nivel en la estación de La Merced (2013-2019), imagen superior y residuo de origen no mareal, imagen inferior.

Se realizó el análisis armónico de la señal de marea y se constató que:

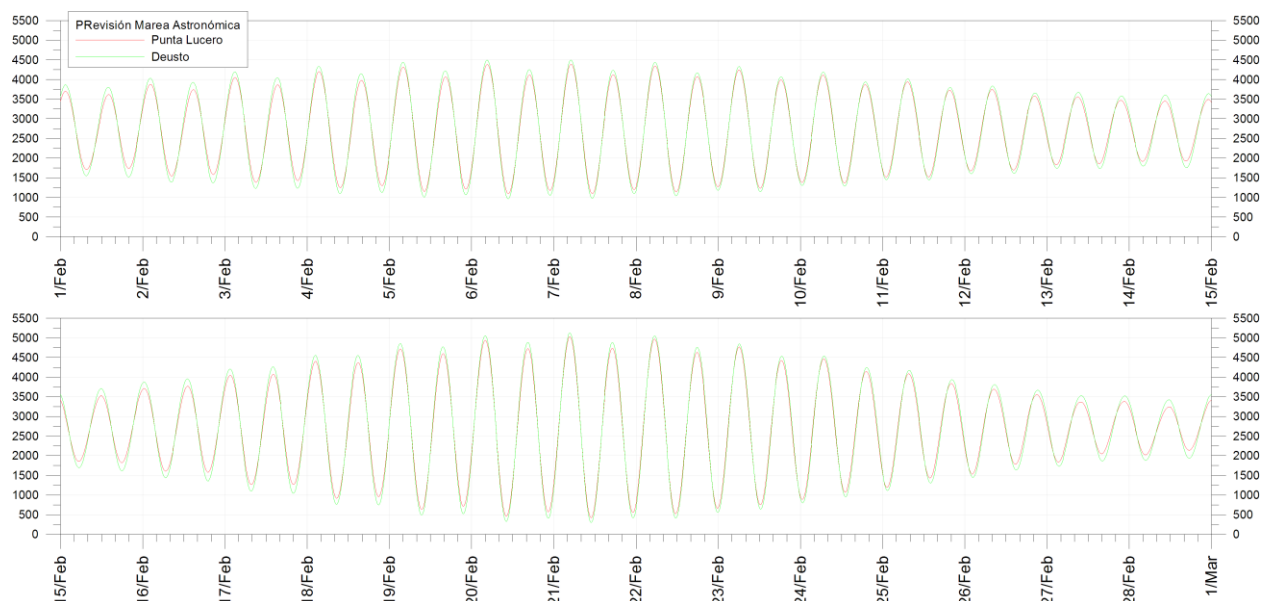
- La componente Z0 es el valor medio (está claro que cada punto está referido a un cero diferente).
- Las componentes M2 y S2 son la lunar principal y la solar principal, siendo las más importantes.
- 1,2-1,4 m de amplitud la M2.
- 0,45-0,47 m la S2.
- Los registros tienen una buena calidad, incluso ondas como la M3 de poca amplitud tienen ángulos muy similares (es decir que en todas partes se mide algo parecido, no hay grandes desfases en la onda de marea a lo largo de la Ría).

Se llevó a cabo un trabajo de referenciación conjunta de los registros de Punta Lucero (que la DAEM utiliza como referencia para las alertas por inundación costera del País Vasco) y los registros de nivel de Deusto y La Merced para poder emplear esa información en el estudio de la propagación de la marea en el interior del estuario (se muestra como ejemplo la Tabla de previsión de las alturas de pleamares y bajamares en los tres emplazamientos durante las mareas vivas de 2019).

Con esta información obtenida, la única de la que se tiene noticia de registros de altura de la lámina de agua en el interior de la Ría de Bilbao se ha podido calcular la altura de pleamares y bajamares y la distribución estadística de las alturas de las pleamares y bajamares que se muestra:



Distribución de probabilidad de las alturas de las bajamares en Deusto (imagen superior) y de las pleamares (imagen inferior).



Previsión de la marea astronómica para Punta Lucero y Deusto durante el mes de febrero de 2019.

En la figura de arriba se ha representado la altura de marea durante febrero de 2019 en Punta Lucero y Deusto. Se observa que las alturas de las pleamares se ligeramente superior en Deusto que la de Punta Lucero y que las bajamares son algo más bajas, esto se debe a que la forma de la onda de marea se deforma ligeramente al entrar desde mar abierto a una zona más somera como el interior del estuario.

Este efecto, del orden de una decena de centímetros, es más perceptible y peligroso en las situaciones de mareas vivas desde el punto de vista de aumento de la probabilidad de inundación de determinadas áreas bajas del territorio, sobre todo si estas mareas vivas se producen durante eventos de avenida o situaciones con bajas presiones atmosféricas.

			Punta Lucero		DEUSTO		LA MERCED		ABUSU	
frecuencia (°/h)	Período (h)	nombre	Amplitud (mm)	angulo (°)	Amplitud (mm)	angulo (°)	Amplitud (mm)	angulo (°)	Amplitud (mm)	angulo (°)
0		Z0	2709,5	0,0	331,6	0,0	789,1	0,0	43,8	360,0
28,98410425	12,420601	M2	1264,4	42,6	1400,9	43,5	1393,9	42,8	0,1	122,3
30	12,000000	S2	451,3	128,8	472,8	129,5	470,2	130,5	0,1	86,1
28,43972957	12,658348	N2	267,9	299,6	292,2	301,1	294,1	300,1	0,1	173,1
30,08213726	11,967235	K2	160,6	296,8	110,9	303,0	104,6	291,3	0,0	206,2
13,94303558	25,819342	O1	80,3	273,2	62,4	267,2	59,9	277,4	0,2	213,5
28,51258313	12,626004	NU2	50,8	53,6	54,6	56,2	56,4	53,8	0,1	204,7
27,96820848	12,871758	MU2	44,0	303,6	45,6	312,9	46,5	312,5	0,0	59,6
27,89535492	12,905374	2N2	38,1	197,9	40,8	196,9	40,4	197,1	0,0	232,7
15,04106863	23,934470	K1	69,9	65,4	60,9	71,1	61,3	64,2	0,4	89,7
29,5284789	12,191620	L2	29,4	324,1	46,5	317,0	36,7	315,6	0,1	215,1
57,96820847	6,210301	M4	25,2	224,1	27,7	237,7	32,3	244,6	0,0	159,2
13,39866094	26,868357	Q1	27,6	138,7	17,6	145,2	19,0	150,7	0,1	137,0
29,95893331	12,016449	T2	26,5	119,1	26,4	123,9	24,9	130,4	0,1	31,8
14,95893136	24,065890	P1	21,3	67,0	22,3	67,9	21,8	62,8	0,3	342,4
57,42383382	6,269174	MN4	12,5	95,1	12,7	101,1	13,6	114,8	0,0	79,5
43,47615636	8,280401	M3	12,6	72,7	15,0	78,5	14,6	74,2	0,0	102,6

Amplitudes y fases de las principales componentes armónicas de la altura de la superficie libre registrados en el mareógrafo de Punta Lucero y estaciones de aforo de Deusto, La Merced y Abusu. Fuente: DAEM del GV.

A continuación, se muestra la tabla de previsión de las alturas de pleamares y bajamares en los tres emplazamientos durante las mareas vivas de febrero de 2019.

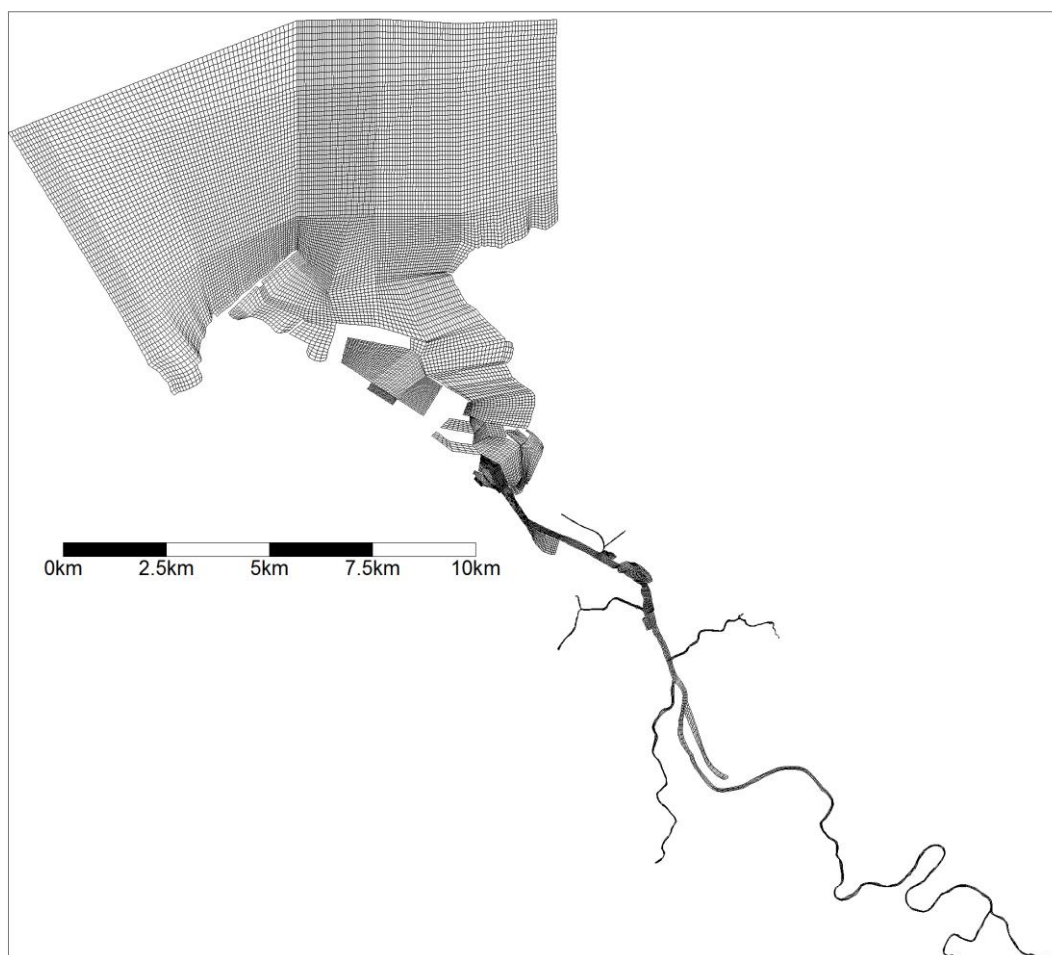
Punta Lucero		Deusto		La Merced		Diferencia P. Lucero - Deusto		Diferencia Deusto - La Merced	
Fecha	Altura (mm)	Fecha	Altura (mm)	Fecha	Altura (mm)	Dif. Hora (min)	Dif. Altura (mm)	Dif. Hora (min)	Dif. Altura (mm)
18/02/2019 14:57	4368	18/02/2019 14:53	4551	18/02/2019 14:52	4626	0:04	-183	0:01	-75
18/02/2019 20:52	959	18/02/2019 20:51	748	18/02/2019 20:50	807	0:01	211	0:00	-60
19/02/2019 3:14	4719	19/02/2019 3:13	4854	19/02/2019 3:11	4946	0:01	-135	0:01	-91
19/02/2019 9:25	635	19/02/2019 9:22	491	19/02/2019 9:22	551	0:03	144	0:00	-59
19/02/2019 15:42	4596	19/02/2019 15:39	4771	19/02/2019 15:38	4853	0:03	-175	0:01	-82
19/02/2019 21:38	715	19/02/2019 21:37	524	19/02/2019 21:37	577	0:01	191	0:00	-54
20/02/2019 3:59	4937	20/02/2019 3:58	5054	20/02/2019 3:57	5144	0:01	-117	0:01	-90
20/02/2019 10:10	462	20/02/2019 10:08	329	20/02/2019 10:07	389	0:02	133	0:00	-60
20/02/2019 16:25	4725	20/02/2019 16:24	4887	20/02/2019 16:22	4974	0:01	-162	0:02	-87
20/02/2019 22:22	573	20/02/2019 22:22	407	20/02/2019 22:22	458	0:00	166	0:00	-51
21/02/2019 4:42	5025	21/02/2019 4:43	5124	21/02/2019 4:40	5209	0:01	-99	0:02	-85
21/02/2019 10:53	423	21/02/2019 10:53	300	21/02/2019 10:52	364	0:00	123	0:01	-64
21/02/2019 17:07	4736	21/02/2019 17:07	4882	21/02/2019 17:05	4973	0:00	-146	0:02	-91
21/02/2019 23:05	555	21/02/2019 23:07	418	21/02/2019 23:07	471	0:02	137	0:00	-52
22/02/2019 5:24	4968	22/02/2019 5:26	5051	22/02/2019 5:24	5130	0:02	-83	0:02	-79
22/02/2019 11:36	525	22/02/2019 11:37	410	22/02/2019 11:36	478	0:01	115	0:01	-69
22/02/2019 17:48	4629	22/02/2019 17:51	4758	22/02/2019 17:48	4851	0:03	-129	0:03	-94
22/02/2019 23:48	665	22/02/2019 23:52	556	22/02/2019 23:51	612	0:04	109	0:01	-57
23/02/2019 6:06	4771	23/02/2019 6:10	4846	23/02/2019 6:07	4917	0:04	-75	0:02	-71
23/02/2019 12:18	752	23/02/2019 12:22	639	23/02/2019 12:21	714	0:04	113	0:01	-75
23/02/2019 18:29	4422	23/02/2019 18:36	4534	23/02/2019 18:31	4628	0:07	-112	0:04	-95

Previsión de mareas para Punta Lucero, Deusto y La Merced realizada para las mareas vivas de febrero de 2019.

4.3. CORRIENTES DE MAREA EN LA RÍA DE BILBAO

La información más actualizada disponible procede del “Estudio del riesgo de afección por vertidos de hidrocarburos y otras sustancias nocivas y potencialmente peligrosas en las diferentes zonas del Puerto de Bilbao” realizado por AZTI para la Autoridad Portuaria de Bilbao en el año 2014.

La zona de estudio simulada se presenta en la siguiente figura y como puede comprobarse ocupa la zona de interés de este Estudio.



Malla de discretización del dominio de estudio utilizada en las simulaciones hidrodinámicas y de dispersión de vertidos al mar. Fuente: AZTI.

Las corrientes marinas costera resultan de la superposición de la corriente general oceánica (de mayor escala espacio-temporal), de corrientes de marea, de corrientes producidas por el efecto del viento y, dentro de la línea de rompientes, de corrientes originadas por la rotura del oleaje.

La marea astronómica es uno de los agentes inductores de corrientes, sin embargo, en el área costera, a pesar de su relevancia en cuanto a oscilaciones del nivel del mar, su aportación a las corrientes es modesta en comparación con las corrientes inducidas por el viento. Por tanto, el factor determinante en la generación de corrientes marinas es el esfuerzo tangencial que el viento produce sobre la superficie del mar. Por ello, en general, podemos decir que la orientación de la línea de costa, junto con la distribución estacional de vientos dominantes explica buena parte de la deriva de las masas de agua costeras y de plataforma. En otoño e invierno los vientos soplan mayoritariamente del SO dando lugar a corrientes

superficiales que, en promedio, causan una deriva hacia el N y el E. Durante la primavera el régimen de vientos cambia hacia el NO, lo que origina que las corrientes en mar abierto tengan dirección S en la costa francesa y hacia el O-SO en la costa vasca. La situación de verano es similar a la de primavera, aunque la debilidad y la mayor variabilidad de los vientos origina que la dirección de la deriva general de las corrientes sea más indeterminada.

En los sistemas estuarinos, como es el Nervión, los agentes dinámicos más importantes en la generación de corrientes son la marea astronómica, las corrientes de densidad y las corrientes inducidas por el viento. Las plumas fluviales originan gradientes horizontales de densidad que, a su vez, inducen corrientes de densidad. El estuario del río Nervión constituye uno de los sistemas estuarinos más grandes de la costa vasca. Así pues, el río Nervión es el más caudaloso de la región con caudal medio de, aproximadamente, 36 m³/s. Sin embargo, cabe destacar que la dinámica de las corrientes de densidad está fuertemente afectada por el efecto del viento.

En general, las corrientes más superficiales, principalmente inducidas por el viento, muestran una variabilidad estacional asociada al régimen de vientos. Por el contrario, las corrientes más profundas se alinean paralelas al dique de Punta Lucero y muestran una mayor contribución de la corriente inducida por la marea astronómica en la dinámica estuarina. En este sentido, para determinar la corriente barotrópica inducida por la marea astronómica, se han considerado las corrientes verticalmente integradas excluyendo el nivel superficial más influenciado por el viento. La amplitud y la fase de las principales constituyentes armónicas de la corriente de marea se han calculado por ajuste clásico de mínimos cuadrados.

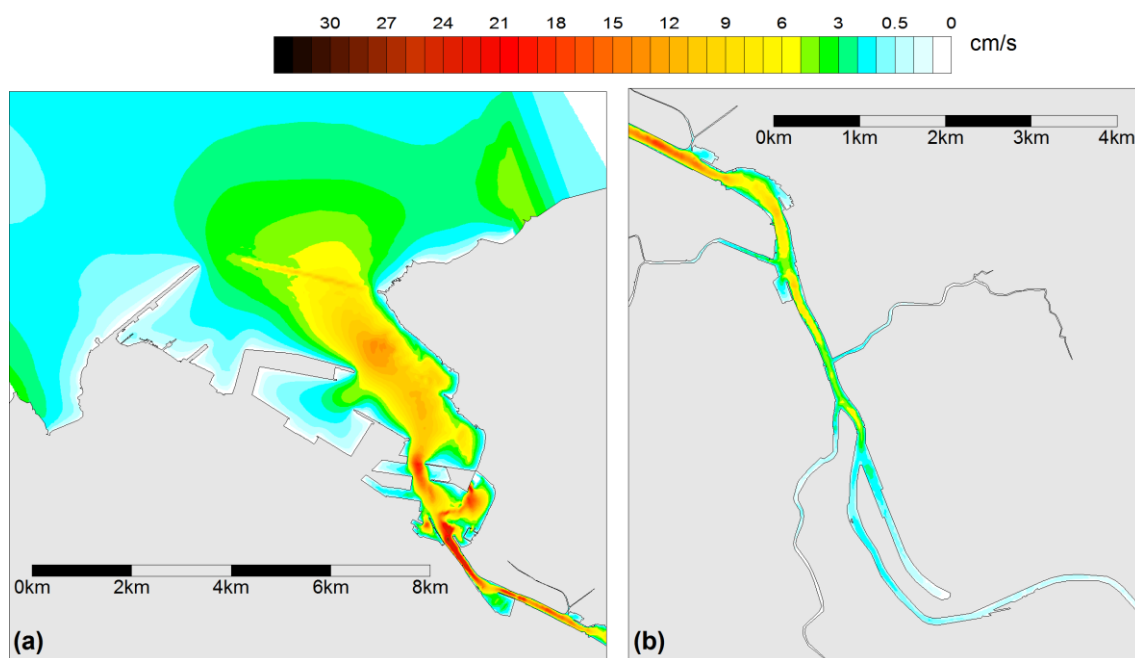
Los resultados obtenidos muestran que la marea astronómica tiene una contribución importante en la hidrodinámica del Abra Exterior. Así pues, la contribución de la corriente inducida por la marea oscila entre aproximadamente el 13% y el 40% de la corriente total, entre superficie y fondo, respectivamente. Como es habitual, las componentes más energéticas de la corriente inducida por la marea astronómica son los armónicos M2 y S2. También se observa la presencia de la componente superarmónica M4, cuyo origen se debe a efectos no lineales propios de profundidades reducidas. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por otros autores en el sudeste del golfo de Bizkaia (Álvarez et al., 1998; Le Cann, 1990; Fontán et al., 2013).

Constituyentes	Periodo (h)	U	Fase (°)	V	Fase (°)
M2	12,421	1,128	94,455	2,474	93,028
S2	12,000	0,651	198,236	1,566	183,257
N2	12,658	0,146	40,729	0,453	12,561
K2	11,967	0,070	342,358	0,495	14,098
O1	25,819	0,044	41,780	0,099	33,763
K1	23,934	0,072	3,575	0,205	10,074
NU2	12,626	0,089	46,170	0,101	101,062
MU2	12,872	0,081	326,722	0,114	75,866
2N2	12,905	0,128	98,570	0,104	205,470
L2	12,192	0,102	22,126	0,365	321,927
M4	6,210	0,345	246,874	0,297	223,364

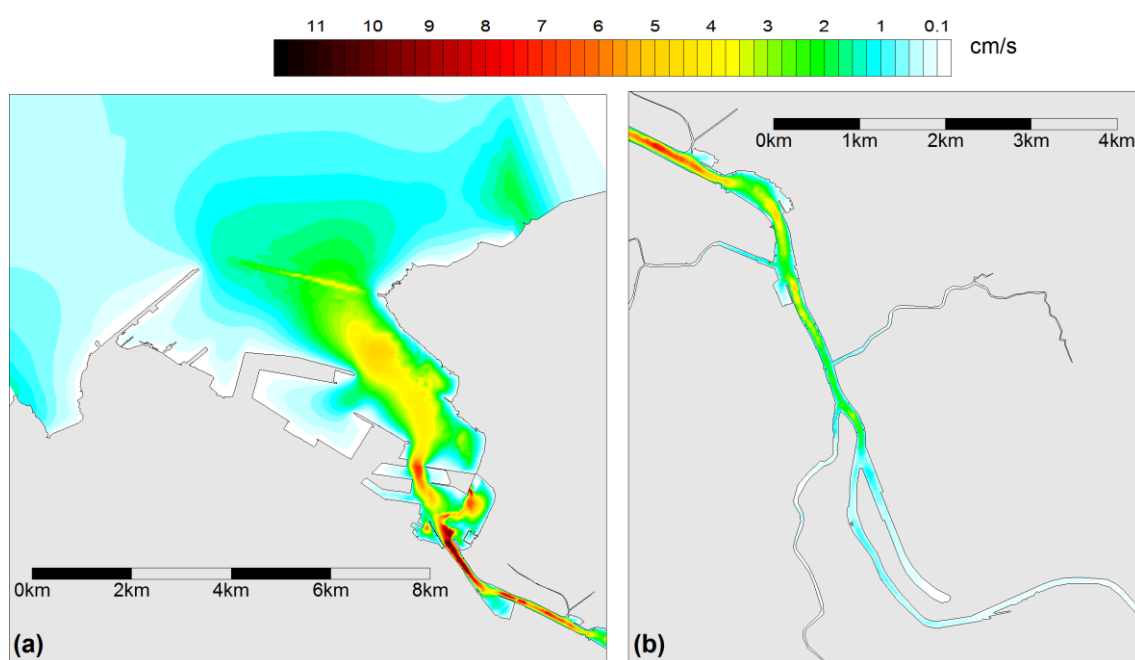
Amplitudes y fases de las principales constituyentes armónicas de la corriente promediada en profundidades en la estación costera de Bilbao. Nota: U, V son las amplitudes de las corrientes zonales, este-oeste y meridionales, norte-sur, (en cm.s-1), respectivamente (Fontán et al., 2013).

Se simuló mediante el modelo MAREAS la propagación de las 8 principales componentes de la marea astronómica en la zona de estudio: M2, S2, N2, K2, O1, K1, NU2 y MU2. Se ha de tener en cuenta que en estas simulaciones la zona de Zorrotzaurre era geométricamente hablando una península y no la isla que resulta actualmente tras la apertura del canal de Deusto.

En las siguientes imágenes puede verse el valor del semieje mayor de la elipse de marea de la componente M2 (semidiurno lunar principal) y de la componente S2 (semidiurna solar principal), respectivamente.

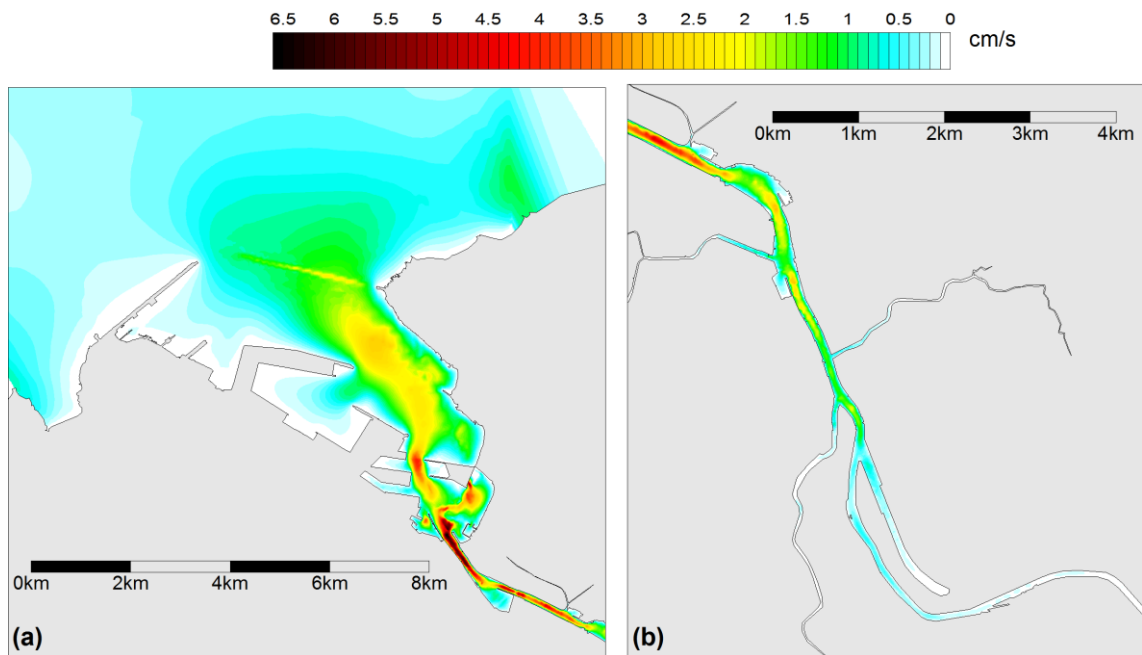


Semieje mayor de la elipse de marea de la componente M2 de la marea astronómica.

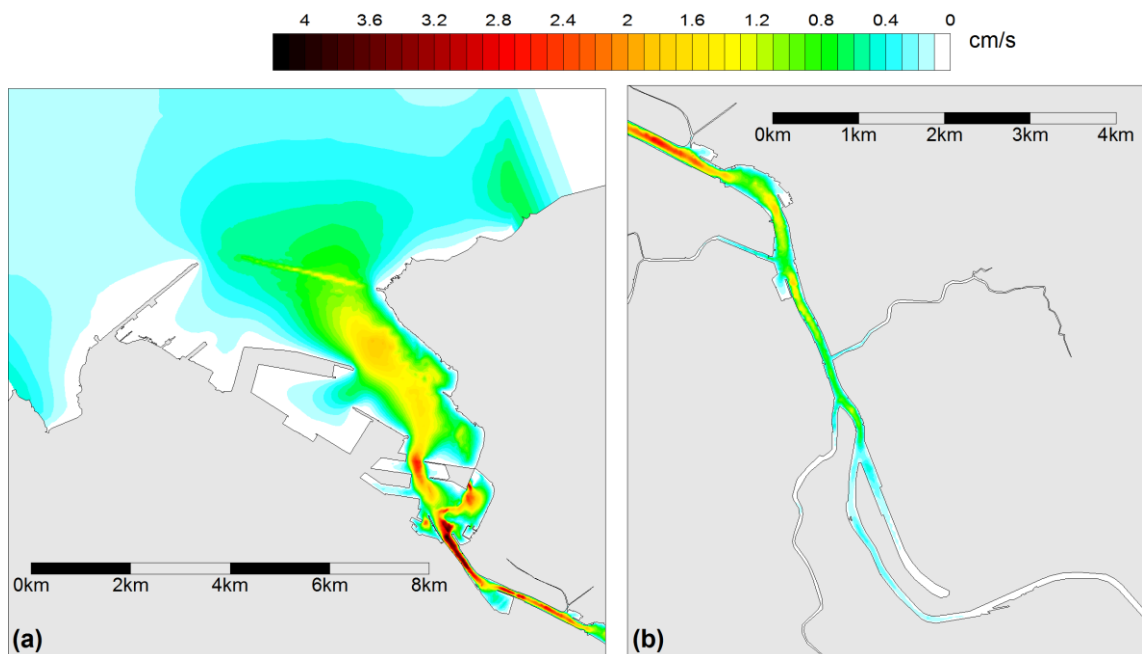


Semieje mayor de la elipse de marea de la componente S2 de la marea astronómica

Los resultados de los semiejes mayores de las componentes semidiurnas N2 y K2 se presentan a continuación:

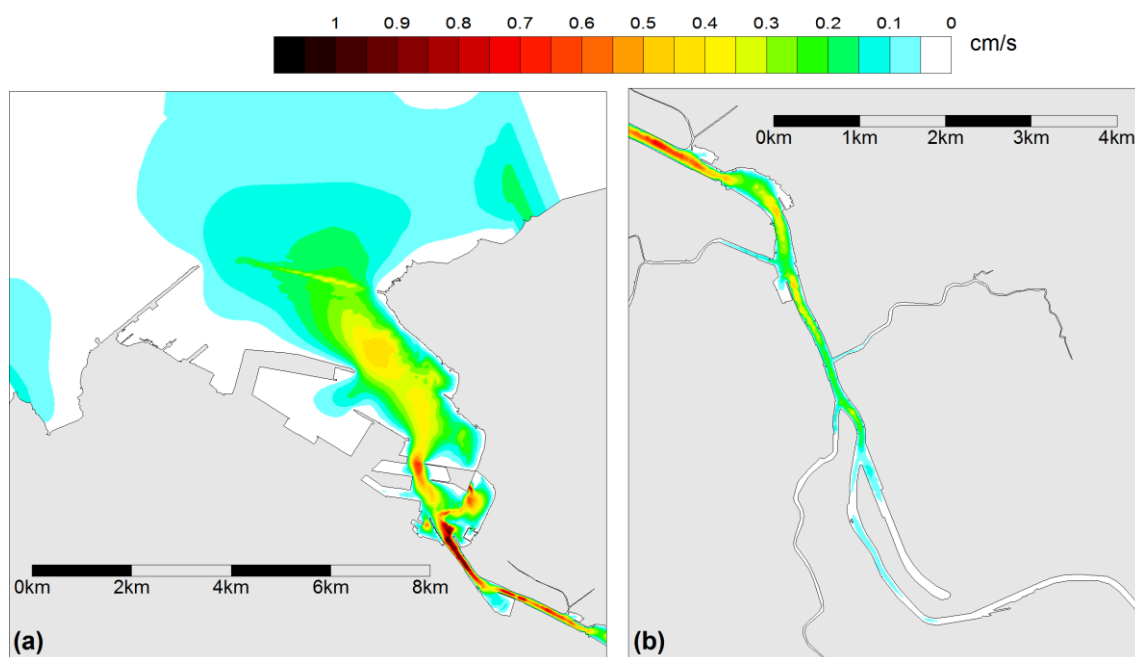


Semieje mayor de la elipse de marea de la componente N2 de la marea astronómica.

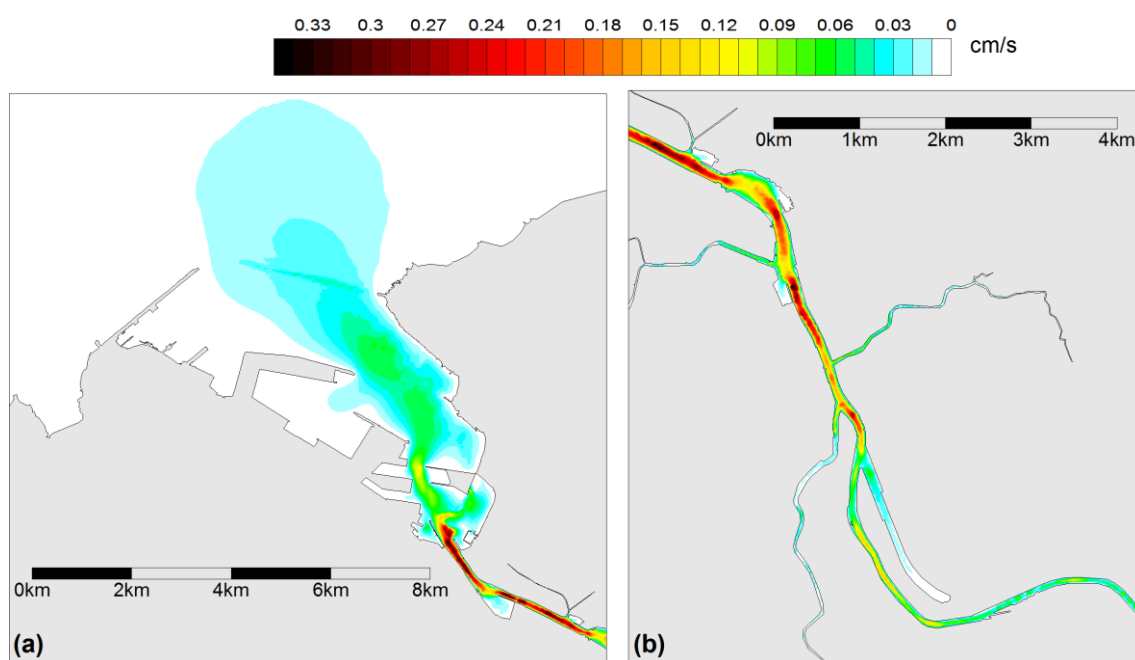


Semieje mayor de la elipse de marea de la componente K2 de la marea astronómica

Los resultados del semieje mayor de las componentes MU2 y NU2:

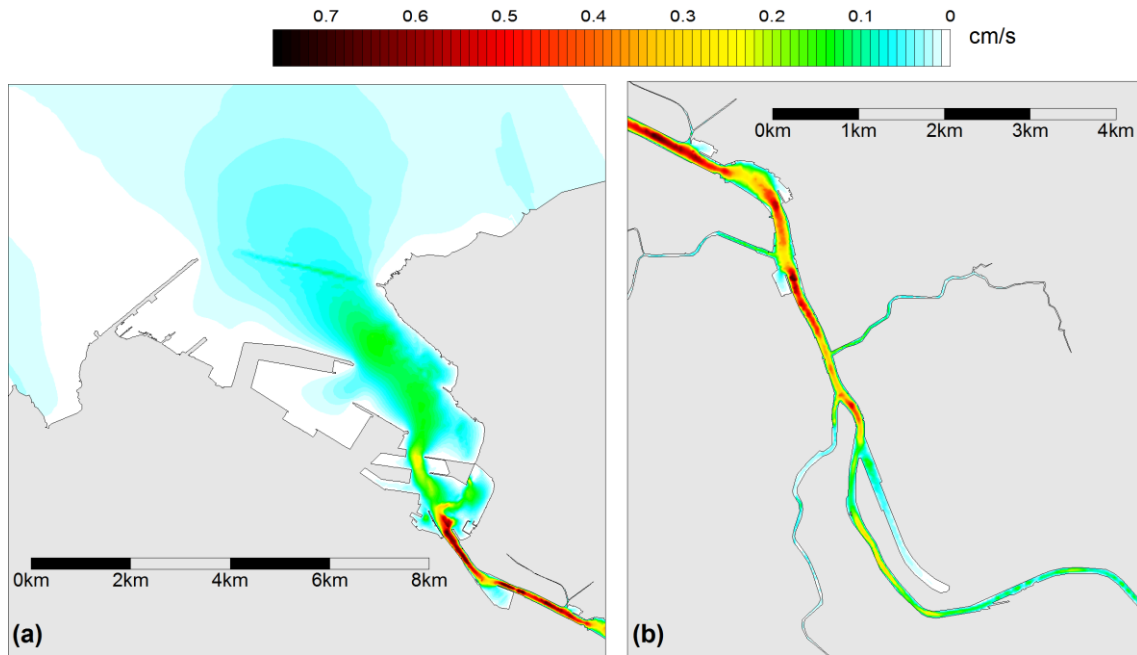


Semieje mayor de la elipse de marea de la componente MU2 de la marea astronómica

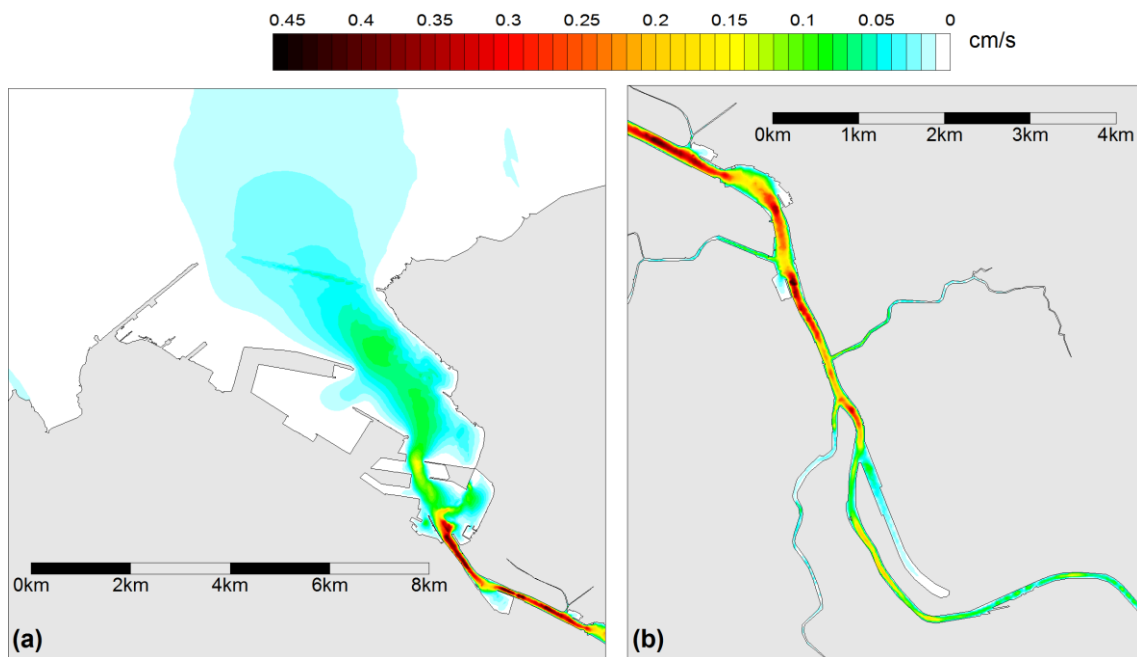


Semieje mayor de la elipse de marea de la componente NU2 de la marea astronómica.

Por último, en las siguientes figuras se presentan los valores del semieje mayor de la elipse de marea de las componentes diurnas O1 y K1:

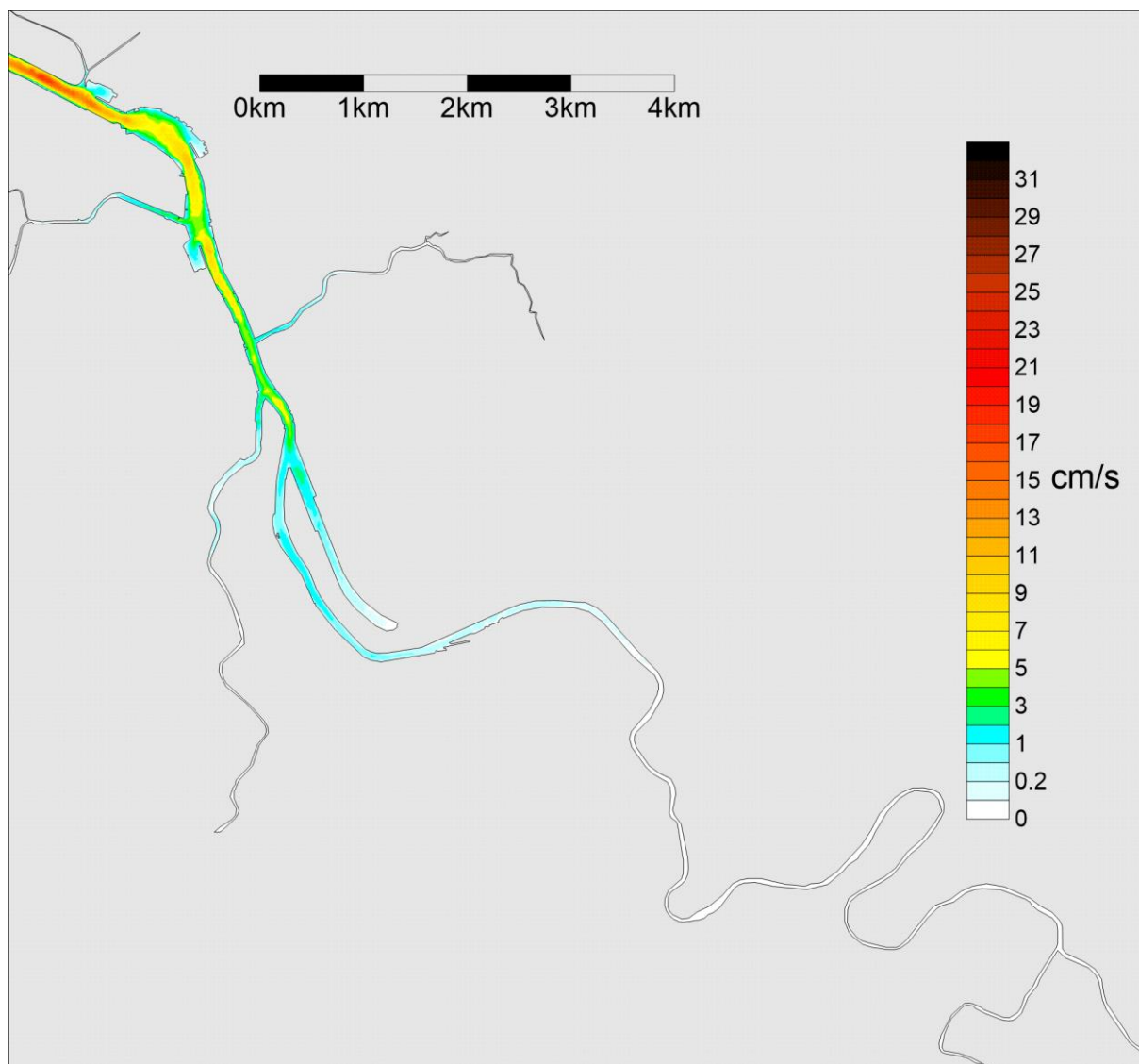


Semieje mayor de la elipse de marea de la componente O1 de la marea astronómica

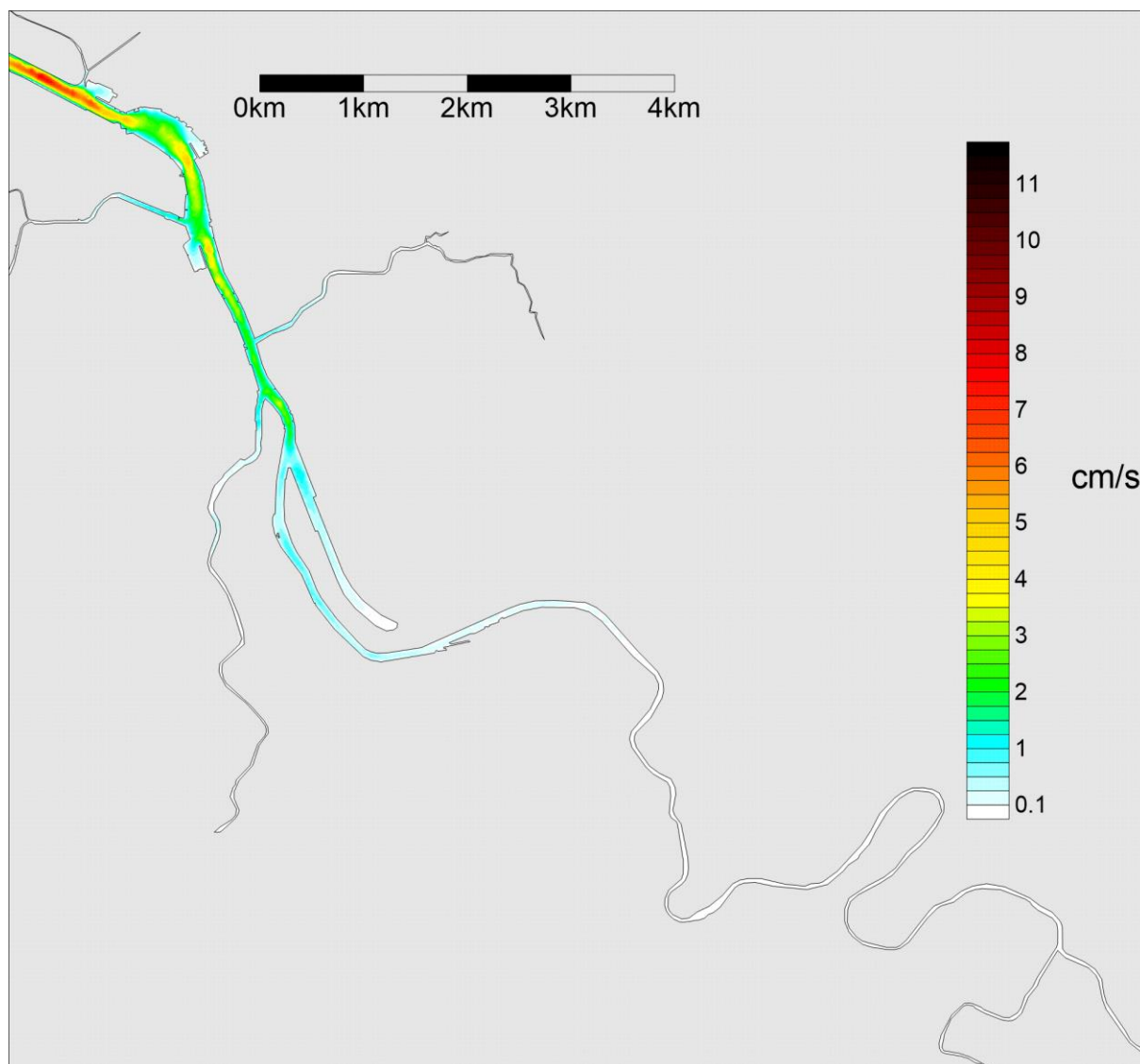


Semieje mayor de la elipse de marea de la componente K1 de la marea astronómica

En general se observa un patrón muy similar en todas las componentes de la marea, una disminución de la velocidad de la corriente hacia el interior de la Ría. Las velocidades más importantes se producen en la desembocadura de la Ría al Abra Exterior y alcanzan valores de 30 cm/s en el caso de la componente semidiurna lunar principal (M2) y de unos 10 cm/s en el caso de la componente semidiurna solar principal (S2), estas dos componentes representan el 80% de la corriente de marea de la zona.



Componente semidiurna lunar principal M2



Componente semidiurna solar principal S2

Se puede observar que en la zona de Zorrotzaurre las corrientes de marea son débiles, inferiores a 3 cm/s. La apertura del canal de Deusto aumenta la sección de circulación del caudal necesario para hacer subir (o bajar) la marea, por lo que en la configuración actual de Zorrotzaurre como isla, las velocidades de la corriente de marea serán ligeramente menores.

5. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

Como paso imprescindible para la realización del presente Estudio, es necesario construir un modelo matemático de la Ría de Bilbao que permita calcular la cota de lámina de agua y la velocidad en cada punto para distintas hipótesis de caudal, condiciones de contorno y actuaciones en el cauce.

5.1. METODOLOGÍA

Para el estudio hidráulico de la Ría de Bilbao se han realizado simulaciones de su comportamiento utilizando el programa HEC-RAS, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.

Por medio de este programa, se analiza cómo se comportan los cauces de estudio ante los escenarios solicitados.

El programa HEC-RAS fue diseñado para calcular líneas de agua en ríos y canales en caso de movimiento gradualmente variado. De esta forma se analizan:

- Los riesgos de inundación en las márgenes.
- Los efectos en el nivel del agua debidos a actuaciones en el cauce o en las llanuras de inundación.
- Los efectos en el nivel del agua debidos a la presencia de puentes y otras estructuras en el cauce.

5.1.1. Modelo 1D

El modelo hidrodinámico unidimensional está basado en la resolución de las ecuaciones de Saint Venant, en concreto en las leyes de conservación de la masa y el momento. Mediante estas ecuaciones se calcula la superficie libre de agua para un flujo de agua estacionario. Estas ecuaciones diferenciales parciales se resuelven mediante la discretización numérica, usando frecuentemente el método de las diferencias finitas, y en algunos casos mediante elementos o volúmenes finitos, en un esquema implícito. Una de las grandes ventajas de la modelización unidimensional es su bajo tiempo de resolución del problema, lo que simplifica considerablemente la realización del modelo. Además, un modelo 1D bien realizado puede conseguir un nivel de estabilidad mucho mayor y de una manera mucho más sencilla que con los otros tipos de modelizaciones.

Con este modelo se estudia las situaciones de peligrosidad producidas por los caudales extremos o de avenidas para los Periodos de Retorno considerados de 10, 100 y 500 años.

5.1.2. Modelo 2D

Se ha desarrollado un modelo hidrodinámico bidimensional. Este tipo de modelo utilizan las ecuaciones de conservación de la masa y momento expresadas en dos dimensiones. Los resultados son calculados en cada punto de una malla que se genera en la zona de estudio. Los modelos 2D pueden resolverse mediante elementos finitos o bien mediante diferencias o volúmenes finitos.

Los modelos 2D son modelos de régimen no permanente o no estacionarios. Se obtienen resultados para cada instante de tiempo.

Este modelo se ha realizado para estudiar la Ría de Bilbao con sus caudales ordinarios, de esta manera se obtienen los parámetros hidráulicos habituales del cauce.

5.2. INFORMACIÓN DE PARTIDA

Para poder realizar la modelización, se necesitan una serie de datos previos que son necesarios introducir en los modelos para que funcionen correctamente. La información que se necesita para desarrollar los modelos es la siguiente:

- Modelos Hidráulicos base: HEC-RAS 1D de la Ría de Bilbao y del río Cadagua a su paso por el Término Municipal de Bilbao. URA, marzo 2020.
- Información topográfica: Modelo Digital del Terreno (MDT) del Término Municipal de Bilbao con la batimetría del cauce del Cadagua y de la Ría de Nervión 2019, realizada para el presente Estudio.
- Información hidrológica: Datos de aforos de la Ría de Bilbao y del río Cadagua proporcionados por URA, la Agencia Vasca del Agua.



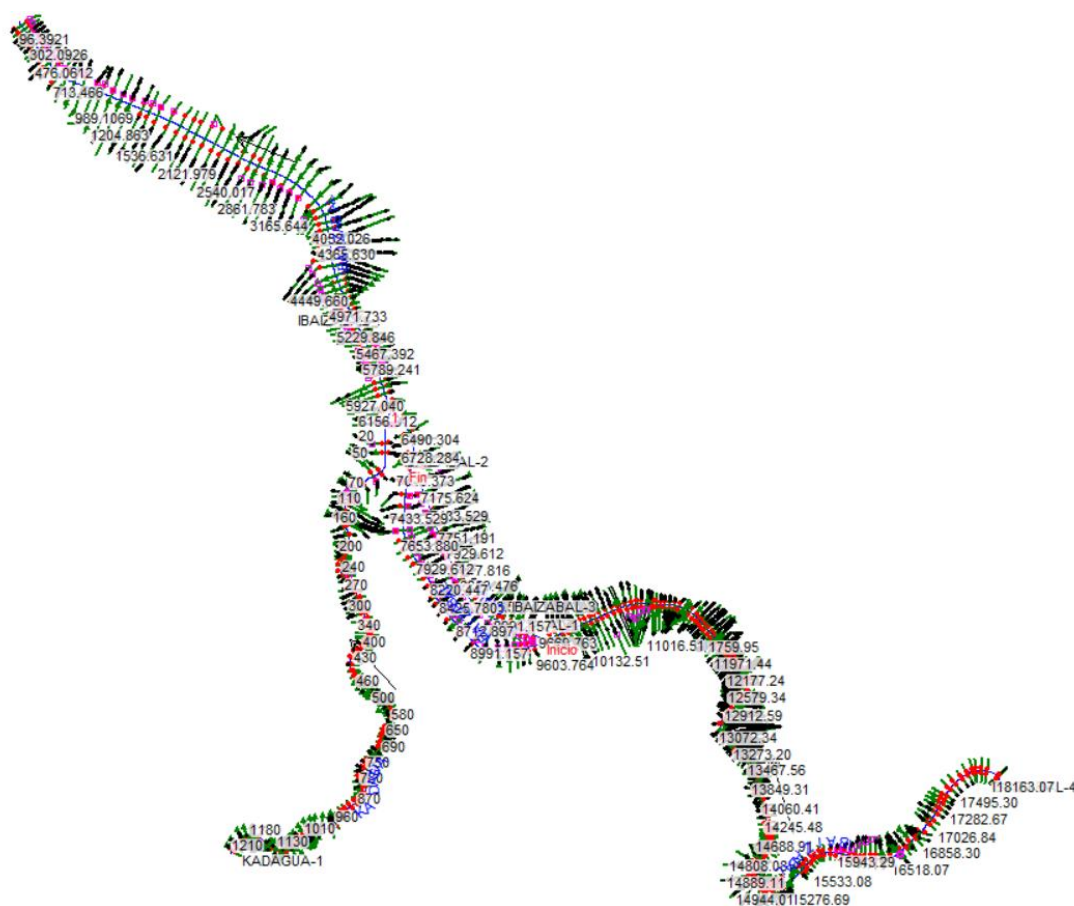
Modelo Digital del Terreno del ámbito de Estudio, Término Municipal de Bilbao.

5.3. GEOMETRÍA

5.3.1. Modelo 1D

Se ha modelizado una longitud total de 15.500 metros de la Ría del Nervión, que comprenden desde la zona de Bolueta en Bilbao hasta el muelle de Churruca en Las Arenas y con el canal de Deusto abierto.

Se ha utilizado como base los modelos hidráulicos aportados por URA. El modelo 1D tiene 404 secciones transversales, con anchuras suficientes para incluir no sólo el cauce principal sino también la llanura de inundación.



Geometría en planta del modelo hidráulico HEC-RAS.

5.3.2. Modelo 2D

Se ha utilizado un modelo 2D para comprender el comportamiento hidráulico de la Ría de Bilbao en situaciones habituales de caudal.

Un modelo 2D, es un modelo hidráulico no estacionario en el cual se puede apreciar la relación calado-velocidad en cada instante de tiempo. Esta modelización se ha realizado para controlar estos parámetros y poder analizar su repercusión sobre posibles actividades a desarrollar en la lámina de agua, controlando de esta forma la seguridad en la realización de estas.



Modelo 2D de la Ría de Bilbao y del río Cadagua a su paso por el Término Municipal de Bilbao.

5.4. CONDICIONES DE CONTORNO

Con respecto a las condiciones de contorno, el modelo requiere unas condiciones de contorno tanto aguas arriba como aguas abajo de la zona de estudio.

5.4.1. Modelo 1D

Se considera un flujo de cálculo subcrítico, por lo tanto, se define la condición de contorno aguas abajo.

Se estima altura media de marea: cota de marea de 0,5 m (nivel medio).

5.4.2. Modelo 2D

Los modelos 2D son modelos en régimen no permanente, para ello se deben tener en cuenta los datos registrados en las estaciones de aforo.

Para la modelización 2D se han aplicado los hidrogramas anuales de caudal como condiciones de contorno aguas arriba, tanto para la Ría de Bilbao como para el río Cadagua.

Como condición de entrada aguas abajo, se ha utilizado un hidrograma de altura de marea proporcionado por Puertos del Estado.

La siguiente tabla, resume las condiciones de contorno que se han utilizado en las modelizaciones hidráulicas:

CONDICIONES	MODELO 1D	MODELO 2D
Aguas arriba	Caudales de avenidas	Hidrograma de caudales
Aguas abajo	Altura media de marea	Hidrograma de altura de mareas

Condiciones de contorno aplicadas en la modelización.

5.5. CAUDALES Y SIMULACIONES

5.5.1. Caudales extremos o de avenidas

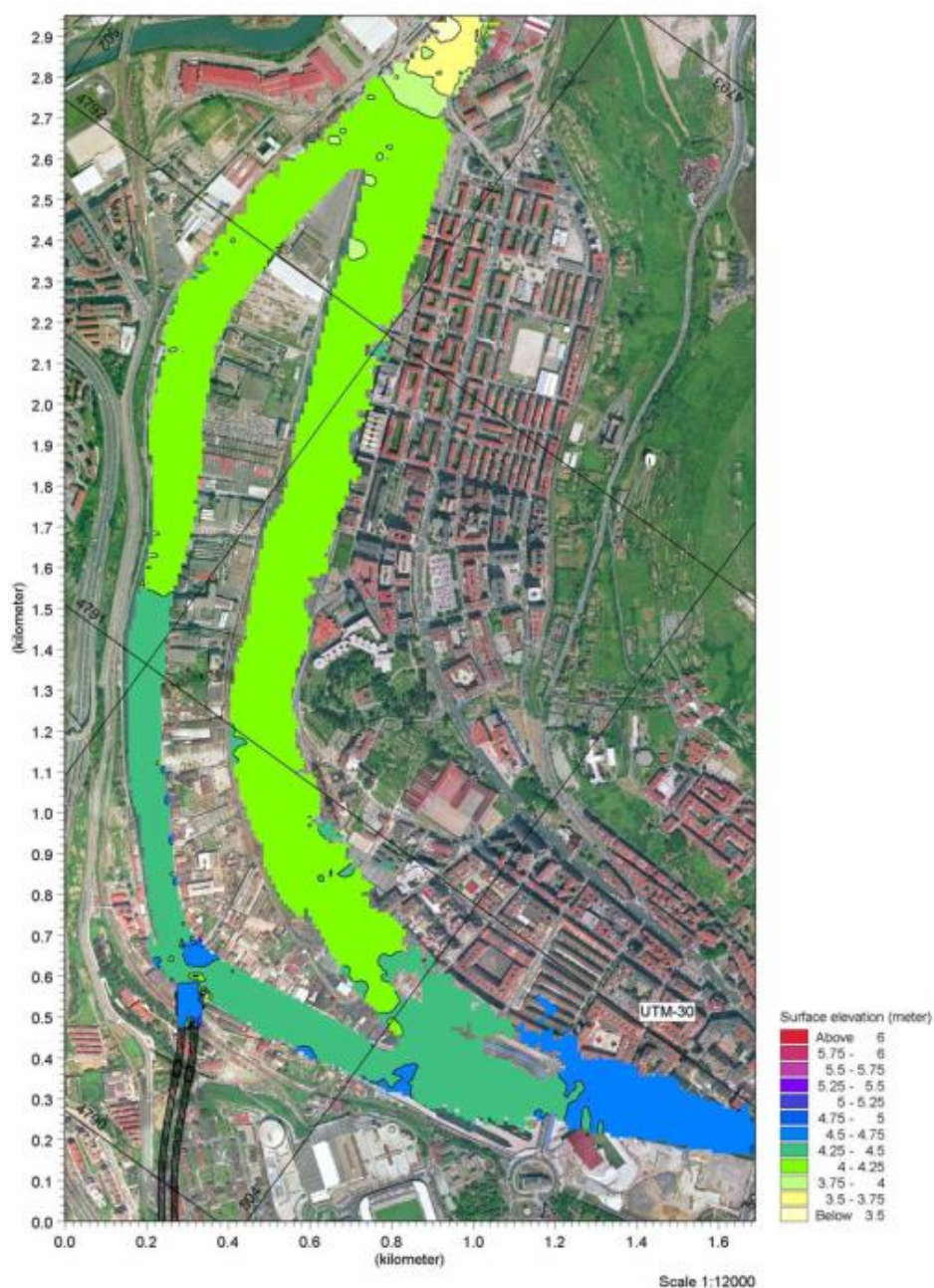
Los datos de caudales pertenecientes a la Máxima Crecida Ordinaria (MCO) y a los distintos periodos de retorno de 10, 100 y 500 años son los oficiales publicados por URA:

SIMULACIONES	IBAZABAL (m³/s)	CANAL DE DEUSTO (m³/s)	CADAGUA (m³/s)
Máxima Crecida Ordinaria	537	233	237
T10	832	362	438
T100	1.861	808	806
T500	2.510	1.090	1.155

Con estos datos de caudales se han realizado las combinaciones necesarias para cada uno de los tramos de Estudio. De esta manera, se obtienen las características hidráulicas de los cauces objeto de estudio para los condicionantes de peligrosidad y riesgo frente a situaciones extraordinarias de avenidas.

El reparto de caudales entre brazos de la bifurcación se estima según la distribución obtenida en el Estudio hidráulico de la Apertura del Canal de Deusto:

- El caudal por el canal de Deusto es del 43,4% y en el cauce actual de la Ría es del 56,6%.



Repartición de caudales en la bifurcación Canal de Deusto – Ría de Bilbao.

5.5.2. Caudales ordinarios

Se han considerado distintos caudales para la realizar la simulación en función de los datos registrados en las estaciones de aforo:

SIMULACIONES	IBAIZABAL (m ³ /s)	CANAL DE DEUSTO (m ³ /s)	CADAGUA (m ³ /s)
--------------	----------------------------------	--	--------------------------------

Combinación 1	25	11	8,5
Combinación 2	50	21,7	10
Combinación 3	100	43,4	20
Combinación 4	200	86,2	50
Combinación 5	300	130,2	100
Combinación 6	400	173,6	150
Combinación 7	537	233	237

De estas simulaciones, se obtienen los parámetros hidráulicos en situaciones ordinarias. Estos datos determinarán las actividades acuáticas que podrán realizarse en cada uno de los tramos en función de un rango de valores adecuados para su uso.

6. INUNDABILIDAD

6.1. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO FRENTE A LA AVENIDA DE 500 AÑOS

Las inundaciones de 1983 pusieron de manifiesto la notoria insuficiencia del cauce de la Ría del Nervión para contener el caudal generado frente a situaciones extremas de avenidas, prácticamente desde La Peña hasta algo antes de la confluencia con el Cadagua, si bien la gravedad de tal insuficiencia se iba acentuando hacia aguas arriba, y sobre todo a partir del puente del Ayuntamiento.

A continuación, se resume brevemente las conclusiones del “Estudio de alternativas para la protección contra inundaciones de la Ría de Bilbao”, redactado por SAITEC en el año 2010:

- **Desde la desembocadura hasta la punta de Zorrotzaurre** no existen problemas de inundabilidad debidos a la Ría.

En esta zona las alturas de lámina dependen fundamentalmente de la cota de marea. Por otra parte, en toda esta zona el cauce es muy amplio, con anchuras de entre 110 y 150 metros, y secciones del orden de 1.000 a 1.500 m². La capacidad de desagüe del cauce es suficiente, y no se producen desbordamientos de la Ría, aunque sí pueden producirse inundaciones de las márgenes debidas a escorrentías locales o a desbordamientos de los afluentes.

- **En la zona del canal de Deusto** la mancha de inundación es muy amplia, aunque muy somera. Para la avenida de 500 años quedarían inundadas grandes zonas de la margen derecha, así como toda la península de Zorrotzaurre. También se producirían desbordamientos en algunos puntos de la margen izquierda en Olabeaga.

Sin embargo, los daños en esta zona vendrían limitados por dos factores: la escasa altura de la inundación, siempre por debajo de 1,50 metros, y la baja velocidad de circulación del agua en las márgenes.

De los estudios realizados se desprende que los problemas de desbordamiento en esta zona se deberían sobre todo a dos razones:

- La falta de continuidad en el canal de Deusto. Aunque las secciones de la ría y del canal en este tramo, sumadas, serían suficientes para conducir la avenida, la sección de desagüe del canal se aprovecha sólo en parte, ya que sólo existe flujo efectivo en las capas superiores.
- La baja cota de las márgenes en los muelles de la margen derecha y, sobre todo, en la península de Zorrotzaurre.
- **Desde el arranque del canal de Deusto hasta el puente de La Salve** se producirían graves desbordamientos en ambas márgenes.

En la margen derecha se distinguirían dos zonas. En la primera, la más llana, se producirían los desbordamientos más graves, ya que se inundarían las instalaciones del Puerto, la rotonda y los jardines de Euskalduna, así como toda la ribera de Botica Vieja. Para la avenida de 500 años la mancha se extendería a las calles contiguas (Jon Arróspide, Santander, Logroño), y se alcanzarían profundidades de hasta 2,5 metros en algunos puntos. En la segunda zona, entre el puente de Deusto y el de La Salve, la mancha de inundación quedaría más confinada, aunque se inundaría toda la avenida de las Universidades.

En cuanto a la margen izquierda, parte de Abandoibarra se encuentra bajo cota de inundación, desde los antiguos diques secos de los astilleros hasta el puente de La Salve. La avenida de 500 años afectaría al Palacio de Congresos y a la zona en torno al Guggenheim, aunque no al propio museo.



Vista de la ría de Bilbao en torno al Museo Guggenheim.

- **Desde el puente de La Salve hasta el del Ayuntamiento** se producen importantes desbordamientos en ambas márgenes.

En la margen derecha la avenida de 500 años afectaría a casi todo el Campo de Volantín, salvo una parte de los jardines que está más elevada. También resultarían inundadas las calles Huertas de la Villa y Castaños, así como la plaza del Ayuntamiento. Los calados máximos, en ningún caso superiores a los 1,50 metros, corresponderían al tramo del Campo de Volantín comprendido entre la plaza de La Salve y la calle Fontecha Salazar.

En la margen izquierda, la inundación alcanzaría hasta la calle Uribitarte. También se verían afectados algunos tramos de las calles Acebal Idígoras, Barroeta Aldamar y travesía de Uribitarte. En la mayor parte de esta zona los calados estarían comprendidos entre 1,00 y 1,50 metros, pero en la zona más próxima al puente del Ayuntamiento podrían alcanzarse cotas de inundación superiores a los 2,50 metros.

Hay que señalar que en este tramo se produce un estrechamiento gradual pero importante del cauce, que pasa de unos ochenta metros en el puente de La Salve a sólo cincuenta en el puente del Ayuntamiento.



Vista panorámica del tramo comprendido entre el puente de la Salve y el Ayuntamiento de Bilbao.

- **Desde el Ayuntamiento hasta el puente de San Antón** se encuentra la zona que sufriría mayores daños en caso de avenida.

En la margen derecha resultaría afectado todo el Casco Viejo de Bilbao. El límite de la mancha de inundación discurre por las calles Sendeja, Esperanza, Ascao, María Muñoz y la calle de la Ronda, con una lengua de agua que ocuparía la plaza de Unamuno y llegaría al arranque de las calles Prim e Iturrubide.

Entre el Ayuntamiento y el Arenal los calados de inundación varían entre los 2,50-3,00 metros del muelle del Arenal y los 1,50-2,00 metros en las calles de la Esperanza y Ascao. Existe una zona de inundación más somera, que corresponde a una parte de los jardines del Arenal que se encuentra más elevada que el resto.

A partir del Arenal los calados suben por encima de los 2,50 metros. Las cotas más altas corresponderían aproximadamente a la zona encerrada entre las calles de Santa María, del Perro, Lotería y Banco de España, por un lado, y la calle Tendería por el otro. En esa parte del Casco Viejo los calados rondarían los cinco metros, salvo en el arranque del puente de La Merced, que está un poco más alto que los terrenos circundantes.

En la margen izquierda, mucho más escarpada, la zona inundada corresponde sobre todo a los muelles, aunque aparecen algunos ensanchamientos aguas arriba del puente del Ayuntamiento y en la zona de Bilbao La Vieja. En el muelle de Ripa los calados máximos estarían entre 3,00 y 3,50, mientras que en el muelle de Marzana oscilarían entre 4,00 y 5,00 metros.

El desbordamiento de la Ría en esta zona respondería a las siguientes causas:

- La insuficiente capacidad de desagüe del puente del Ayuntamiento, que por sí solo produce una sobreelevación del orden de un metro.
- La insuficiencia del cauce en todo el tramo, con anchuras oscilando entre los cuarenta y cincuenta metros.
- El estrechamiento puntual del cauce en la zona del mercado de la Ribera, donde se registra la menor anchura de toda la zona (treinta y ocho metros).

- La baja cota a la que está construido el Casco Viejo, edificado directamente sobre la llanura de inundación del río.
- De entre estas causas, la fundamental es la insuficiencia del cauce. Una idea de la gravedad de este problema la daría el siguiente dato: a la altura del mercado de la Ribera, la sección del cauce es de aproximadamente 350 m², mientras que la sección de paso de la avenida de 500 años sería de 880 m².



Vista panorámica de la Ría de Bilbao a su paso por el Casco Viejo en su margen derecha.

- En la **zona del muelle de Urazurrutia**, la extensión de la inundación es menor, ya que la Ría discurre muy encajonada.

Las zonas anegadas corresponden sobre todo a las vías en la margen derecha y al muelle de Urazurrutia en la margen izquierda, con calados superiores a los cinco metros en ambos casos. Existe también un ensanchamiento importante de la mancha en la zona de Atxuri, inmediatamente aguas arriba del puente de San Antón.

Las causas de los desbordamientos en esta zona serían las siguientes:

- Las sobreelevaciones en la zona del Casco Viejo, que se transmiten hacia aguas arriba, ya que el flujo discurre en régimen lento.
 - La insuficiente capacidad de desagüe del puente de San Antón. En la avenida de 500 años, de los 2.510 m³/s totales sólo pasarían 1.853 m³/s por los ojos del puente. La sobreelevación producida por la presencia del puente sería de unos 80 centímetros.
 - Las reducidas dimensiones del cauce en esta zona, donde se mantienen anchuras de cuarenta a cincuenta metros, con secciones de cauce de 250 a 350 m².
- En la **zona de La Peña**, el valle se vuelve a ensanchar y la mancha de inundación se abre.

Por la margen derecha, donde el Nervión bordea el alto de Miraflores, el terreno asciende rápidamente, y sólo se afectaría a la berma del encauzamiento.

En cuanto a la margen izquierda, que es mucho más baja, se producirían desbordamientos importantes, aunque con calados menores que en el Casco Viejo. El límite de la inundación correspondería aproximadamente a la calle Zamakola, aunque quedarían fuera de la mancha dos zonas más elevadas: un tramo de la calle Ibaialde y el montículo en el centro del parque de Ibaieder.

Los desbordamientos en esta zona vendrían causados por:

- Las sobreelevaciones aguas abajo de La Peña, y que se transmiten hacia aguas arriba gracias al régimen lento. Estas sobreelevaciones se deben a la insuficiencia del cauce y de los puentes.
- La escasa elevación de la margen izquierda.

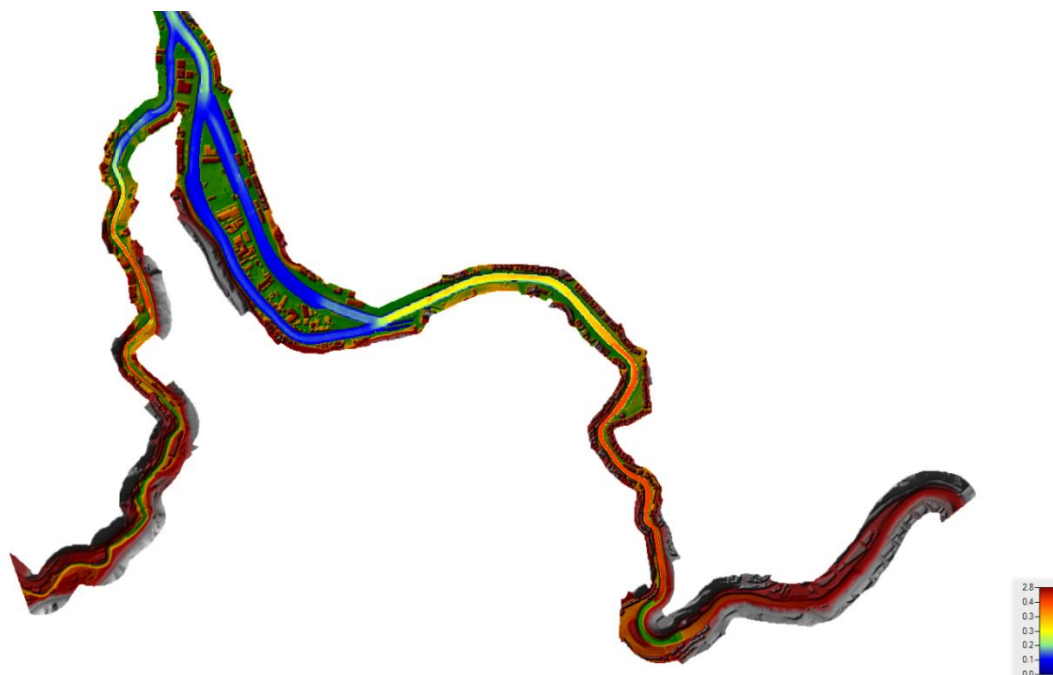


Vista panorámica de La Peña - Parque de Ibaieder en la margen izquierda.

7. VELOCIDADES DE CORRIENTE

7.1. ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES

- Entre **La Peña y el Puente del Ayuntamiento** se dan las mayores velocidades debido a las reducidas dimensiones del cauce en esa zona, se aprecian áreas de inestabilidad debido a los obstáculos que se localizan en la zona: azudes, pilas de los puentes (Puente de San Antón; Puente del Arenal).



Velocidades para un caudal medio anual en el ámbito de estudio.

- Desde el **Puente del Ayuntamiento hasta el inicio del Canal de Deusto** se produce un ensanchamiento gradual del cauce pasando de unos 50 m en el Puente del Ayuntamiento hasta 80 metros al inicio del Canal de Deusto. Por lo tanto, al ampliarse la sección de flujo las velocidades van disminuyendo.
- En la zona del **Canal de Deusto** las velocidades son muy pequeñas, se estima que la mayor parte del flujo circula por el cauce natural de la Ría, en la bifurcación que se produce debido a la presencia de la isla de Zorrotzaurre.
- Desde **Zorrotzaurre hasta Zorroza** las velocidades continúan disminuyendo, la sección hidráulica del cauce existente aumenta oscilando entre 85-100 m de anchura.

7.2. VELOCIDADES PARA DIFERENTES CAUDALES

Como se ha comentado se han realizado distintas simulaciones para hacer el análisis de las velocidades de corriente en situaciones de caudal habituales a lo largo de la serie aforada de datos de caudal. El rango de estudio se ha fijado para caudales pico habituales.

En el caso del Ibaizabal (Ría de Bilbao), se han estudiado los caudales comprendidos entre el medio anual (25 m³/s) y la máxima crecida ordinaria (537 m³/s), inclusive, y son los siguientes: 50, 100, 200, 300 y 400 m³/s. Para el estudio del río Cadagua los caudales serían 8,5 (medio anual), 10, 20, 50, 100, 150 y 237 m³/s correspondiente a la Máxima Crecida Ordinaria.

A continuación, se presenta una tabla resumen con la velocidad media (m/s) entre los tramos obtenidos de las distintas simulaciones realizadas en el modelo hidráulico:

Caudales Tramos							
	Q25	Q50	Q100	Q200	Q300	Q400	Q537

Puente de Etxebarri - Puente metro	0,88	1,19	1,55	2,02	2,37	2,65	2,97
Puente metro- Puente Nuevo	0,96	1,25	1,59	2,02	2,37	2,65	2,97
Puente Nuevo – Puente camino el Pontón	0,92	1,23	1,62	2,14	2,52	2,82	3,15
Puente Pasarela de la Peña – Puente de San Antón	0,69	1,04	1,54	2,20	2,61	2,88	3,17
Puente de San Antón- Pasarela de la Ribera	0,20	0,39	0,74	1,33	1,80	2,17	2,57
Pasarela de la Ribera-Puente de la Merced	0,19	0,36	0,69	1,27	1,75	2,15	2,58
Puente de la Merced-Puente del Arenal	0,18	0,33	0,64	1,20	1,67	2,07	2,50
Puente del Arenal- Puente del Ayuntamiento	0,15	0,29	0,55	1,04	1,47	1,83	2,23
Puente del Ayuntamiento- Puente de Zubizuri	0,12	0,22	0,42	0,80	1,15	1,46	1,82
Puente de Zubizuri- Puente de la Salve	0,09	0,09	0,31	0,59	0,86	1,10	1,38
Puente de la Salve- Pasarela de Pedro Arrupe	0,09	0,17	0,32	0,61	0,88	1,14	1,44
Pasarela de Pedro Arrupe-Puente de Deusto	0,11	0,20	0,38	0,73	1,07	1,38	1,74
Puente de Deusto- Puente Euskalduna	0,09	0,17	0,32	0,61	0,90	1,18	1,53
Puente Euskalduna- Zorrotzaurre Punta Norte	0,07	0,10	0,18	0,33	0,47	0,62	0,80

Zorrotzaurre Punta Norte – Inicio del T.M. de Bilbao	0,07	0,10	0,17	0,31	0,44	0,57	0,82
Canal de Deusto	0,05	0,06	0,09	0,16	0,22	0,28	0,37

Velocidades medias (m/s) de la Ría de Bilbao a su paso por el T.M. de Bilbao.

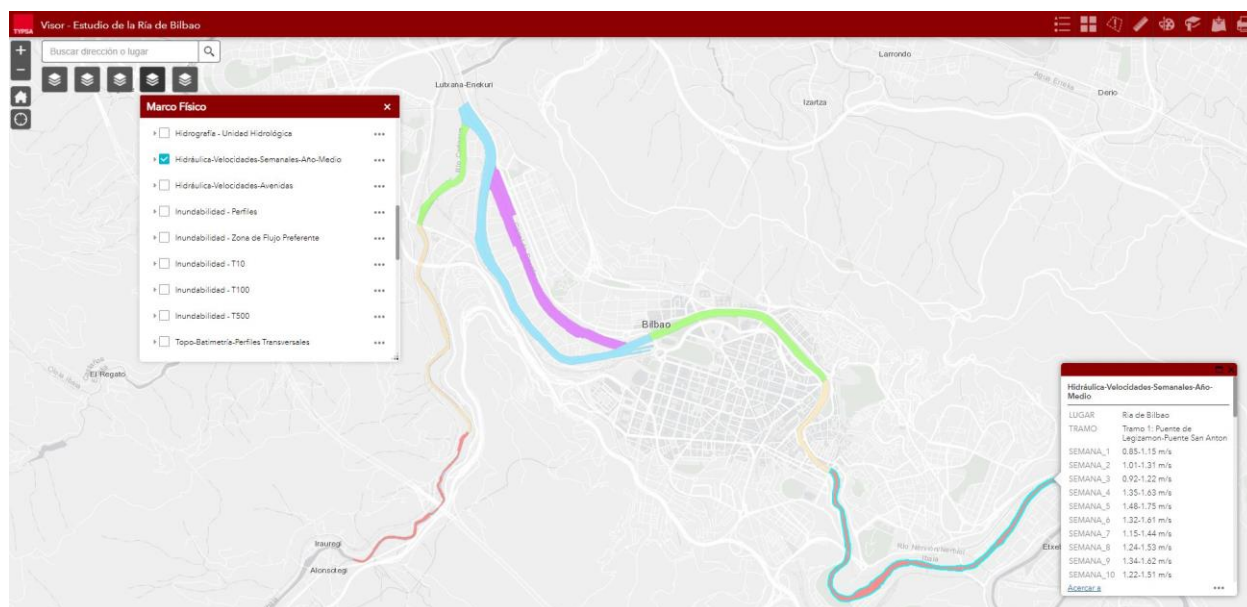
Caudales Tramos	Q8,5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q150	Q237
Límite del T.M de Bilbao – Puente calle las Delicias	0,49	0,53	0,75	1,16	1,58	1,87	2,27
Puente calle las Delicias - Puente del Ferrocarril	0,65	0,69	0,88	1,15	1,37	1,52	1,71
Puente del Ferrocarril - Puente Ezkerribain-Zubilleta	0,64	0,69	0,95	1,42	1,88	2,18	2,47
Puente de Zubilleta – Puente Estrada-Zubilleta	0,41	0,45	0,66	1,11	1,61	1,96	2,41
Puente Estrada-Zubilleta - Puente de Zorroza N-634	0,30	0,34	0,53	0,94	1,41	1,77	2,23
Puente de Zorrotza N-624 – Puente de Hierro de Pedro Alzola	0,07	0,08	0,14	0,31	0,59	0,85	1,27
Puente de Hierro de Pedro Alzola - Confluencia con la ría de Bilbao	0,07	0,08	0,12	0,26	0,50	0,72	0,26

Velocidades medias (m/s) del río Cadagua a su paso por el T.M. de Bilbao.

La velocidad se considera peligrosa a partir del rango 0,7-1,0 m/s, lo que condicionará la realización de ciertas actividades en condiciones de seguridad.

7.3. VELOCIDADES PARA UN AÑO MEDIO

Además, del análisis realizado con los caudales ordinarios pico que discurren por el cauce. Se ha realizado un estudio semanal con los datos de caudales durante un año medio.



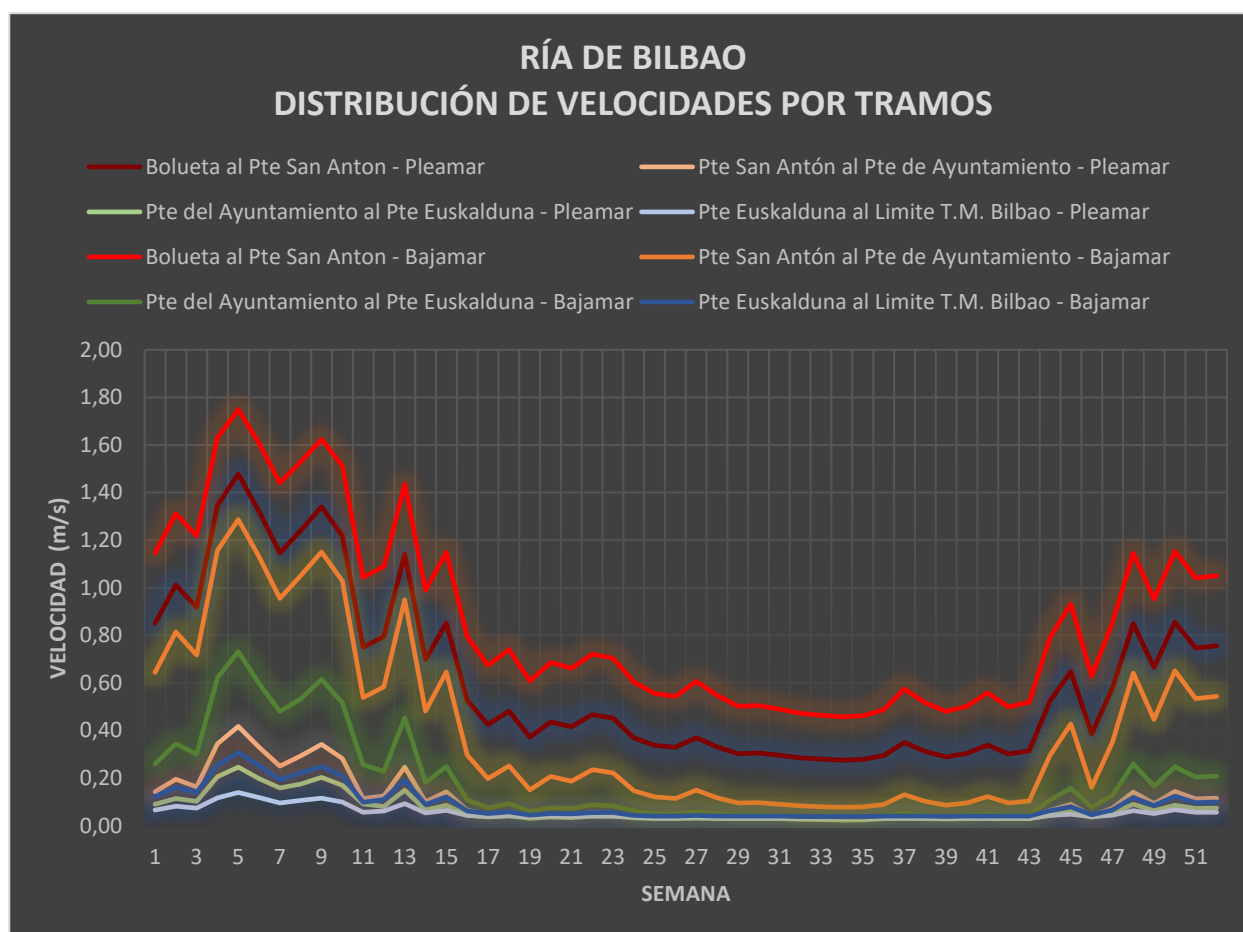
Capa de Velocidades semanales durante un año medio. Visor TYPESA.

Para todas las semanas, se ha analizado la situación pésima de velocidades, con bajar, ya que se presenta un mayor gradiente lo que da como resultado la velocidad máxima que se produce en la Ría. Sin embargo, tomando como condición inicial la cota de la marea en pleamar se obtienen las velocidades más bajas.

De esta forma, se obtiene el rango de velocidades máximo y mínimo, existentes en la Ría de Bilbao, el Canal de Deusto y el río Cadagua a su paso por el Termino Municipal de Bilbao.

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones ejecutados.

7.3.1. Ría de Bilbao



Como se aprecia en la gráfica, las mayores velocidades en la Ría se producen en invierno durante las primeras semanas del año.

Las velocidades máximas se dan en la zona de Bolueta al Puente de San Antón, y van disminuyendo conforme se acercan a la desembocadura del mar.

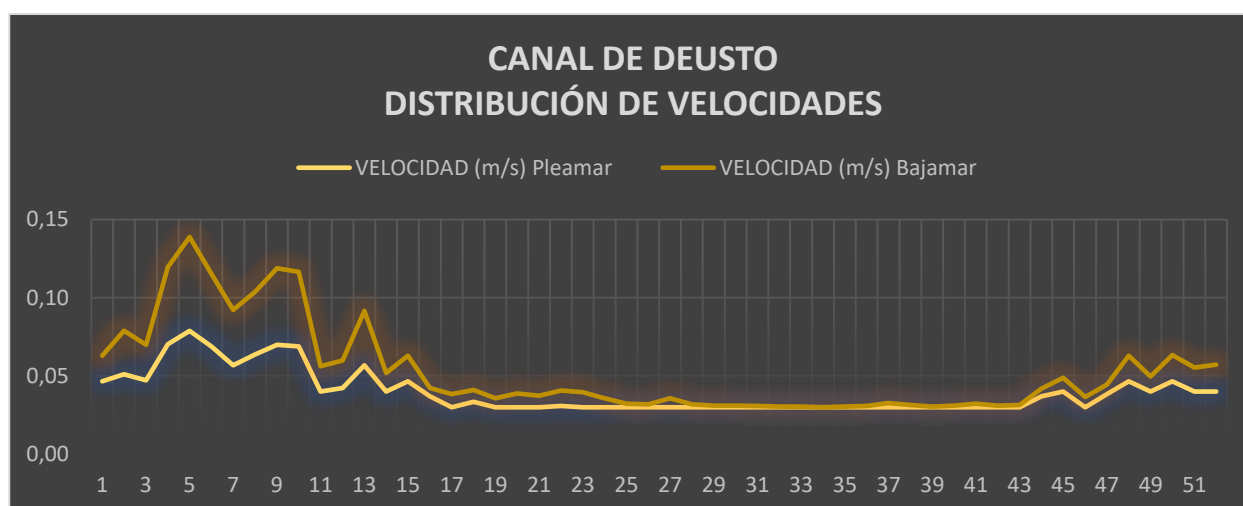
A continuación, se presenta una tabla con los valores máximos y mínimos, en función de los tramos especificados entre puentes del cauce.

S	VELOCIDADES (m/s)							
	Bolueta - Pte. San Antón		Pte. San Antón - Pte. Ayuntamiento		Pte. Ayuntamiento - Pte. Euskalduna		Pte. Euskalduna - Limite T.M. Bilbao	
	Pleamar	Bajamar	Pleamar	Bajamar	Pleamar	Bajamar	Pleamar	Bajamar
1	0.85	1.15	0.14	0.64	0.09	0.26	0.07	0.12
2	1.01	1.31	0.20	0.81	0.11	0.34	0.08	0.16
3	0.92	1.22	0.16	0.72	0.10	0.30	0.07	0.14
4	1.35	1.63	0.34	1.16	0.21	0.62	0.12	0.25
5	1.48	1.75	0.42	1.29	0.25	0.73	0.14	0.31
6	1.32	1.61	0.33	1.13	0.20	0.60	0.12	0.25

7	1.15	1.44	0.25	0.96	0.16	0.48	0.09	0.19
8	1.24	1.53	0.29	1.05	0.17	0.53	0.11	0.22
9	1.34	1.62	0.34	1.15	0.20	0.62	0.12	0.25
10	1.22	1.51	0.28	1.03	0.17	0.52	0.10	0.21
11	0.75	1.04	0.11	0.54	0.09	0.26	0.06	0.10
12	0.79	1.09	0.13	0.58	0.08	0.23	0.06	0.11
13	1.14	1.44	0.25	0.95	0.15	0.45	0.09	0.19
14	0.70	0.99	0.10	0.48	0.07	0.18	0.05	0.09
15	0.85	1.15	0.14	0.65	0.09	0.25	0.07	0.12
16	0.53	0.79	0.06	0.30	0.04	0.11	0.04	0.06
17	0.43	0.67	0.05	0.20	0.04	0.07	0.04	0.05
18	0.48	0.74	0.06	0.25	0.04	0.09	0.04	0.06
19	0.37	0.61	0.04	0.15	0.03	0.06	0.04	0.04
20	0.44	0.69	0.05	0.21	0.04	0.07	0.04	0.05
21	0.41	0.66	0.05	0.19	0.03	0.07	0.04	0.05
22	0.47	0.72	0.05	0.24	0.04	0.09	0.04	0.05
23	0.45	0.70	0.05	0.22	0.04	0.08	0.04	0.05
24	0.37	0.60	0.04	0.15	0.03	0.06	0.04	0.04
25	0.34	0.56	0.04	0.12	0.03	0.05	0.03	0.04
26	0.33	0.54	0.04	0.11	0.03	0.05	0.03	0.04
27	0.37	0.61	0.04	0.15	0.03	0.06	0.04	0.04
28	0.33	0.55	0.04	0.12	0.03	0.05	0.03	0.04
29	0.30	0.50	0.03	0.10	0.03	0.04	0.03	0.04
30	0.31	0.50	0.03	0.10	0.03	0.04	0.03	0.04
31	0.30	0.49	0.03	0.09	0.03	0.04	0.03	0.04
32	0.29	0.47	0.03	0.08	0.03	0.04	0.03	0.04
33	0.28	0.46	0.03	0.08	0.02	0.04	0.03	0.04
34	0.28	0.46	0.03	0.08	0.02	0.04	0.03	0.04
35	0.28	0.46	0.03	0.08	0.02	0.04	0.03	0.04
36	0.29	0.49	0.03	0.09	0.03	0.04	0.03	0.04
37	0.35	0.57	0.04	0.13	0.03	0.05	0.03	0.04
38	0.31	0.52	0.03	0.10	0.03	0.04	0.03	0.04
39	0.29	0.48	0.03	0.09	0.03	0.04	0.03	0.04
40	0.30	0.50	0.03	0.10	0.03	0.04	0.03	0.04
41	0.34	0.56	0.04	0.12	0.03	0.05	0.03	0.04
42	0.30	0.50	0.03	0.10	0.03	0.04	0.03	0.04
43	0.31	0.52	0.03	0.10	0.03	0.05	0.03	0.04
44	0.52	0.79	0.06	0.30	0.04	0.11	0.04	0.06
45	0.65	0.93	0.09	0.43	0.06	0.16	0.05	0.08
46	0.39	0.63	0.04	0.16	0.04	0.08	0.04	0.05
47	0.58	0.85	0.07	0.35	0.05	0.13	0.04	0.07
48	0.85	1.15	0.14	0.64	0.09	0.26	0.06	0.12
49	0.66	0.95	0.09	0.45	0.06	0.17	0.05	0.08

50	0.86	1.15	0.14	0.65	0.09	0.25	0.07	0.12
51	0.75	1.04	0.11	0.53	0.07	0.20	0.06	0.10
52	0.76	1.05	0.12	0.54	0.07	0.21	0.06	0.10

7.3.2. Canal de Deusto

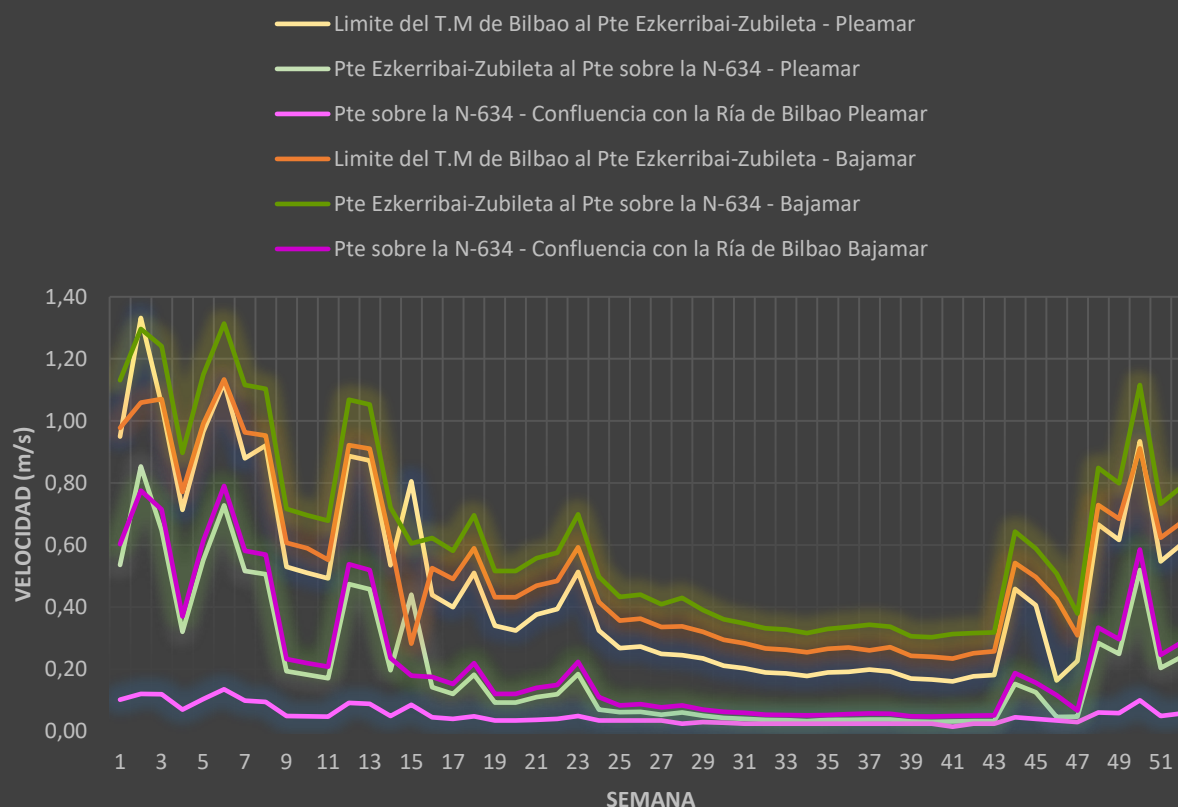


MES	SEMANA	VELOCIDADES (m/s)	
		Pleamar	Bajamar
ENERO	1	0.05	0.06
	2	0.05	0.08
	3	0.05	0.07
	4	0.07	0.12
	5	0.08	0.14
FEBRERO	6	0.07	0.12
	7	0.06	0.09
	8	0.06	0.10
	9	0.07	0.12
MARZO	10	0.07	0.12
	11	0.04	0.06
	12	0.04	0.06
	13	0.06	0.09
ABRIL	14	0.04	0.05
	15	0.05	0.06
	16	0.04	0.04
	17	0.03	0.04
	18	0.03	0.04

MAYO	19	0.03	0.04
	20	0.03	0.04
	21	0.03	0.04
	22	0.03	0.04
JUNIO	23	0.03	0.04
	24	0.03	0.04
	25	0.03	0.03
	26	0.03	0.03
JULIO	27	0.03	0.04
	28	0.03	0.03
	29	0.03	0.03
	30	0.03	0.03
	31	0.03	0.03
AGOSTO	32	0.03	0.03
	33	0.03	0.03
	34	0.03	0.03
	35	0.03	0.03
SEPTIEMBRE	36	0.03	0.03
	37	0.03	0.03
	38	0.03	0.03
	39	0.03	0.03
OCTUBRE	40	0.03	0.03
	41	0.03	0.03
	42	0.03	0.03
	43	0.03	0.03
	44	0.04	0.04
NOVIEMBRE	45	0.04	0.05
	46	0.03	0.04
	47	0.04	0.04
	48	0.05	0.06
DICIEMBRE	49	0.04	0.05
	50	0.05	0.06
	51	0.04	0.06
	52	0.04	0.06

7.3.3. Río Cadagua

RÍO CADAGUA DISTRIBUCION DE VELOCIDADES POR TRAMOS



S	Límite del T.M de Bilbao - Pte Ezkerribai-Zubileta		Pte Ezkerribai-Zubileta - Pte sobre la N-634		Pte sobre la N-634 - Confluencia con la Ría de Bilbao	
	Pleamar	Bajamar	Pleamar	Bajamar	Pleamar	Bajamar
1	0.95	0.98	0.54	1.13	0.10	0.60
2	1.33	1.06	0.85	1.30	0.12	0.78
3	1.05	1.07	0.65	1.24	0.12	0.71
4	0.71	0.77	0.32	0.90	0.07	0.37
5	0.97	0.99	0.55	1.15	0.10	0.61
6	1.12	1.13	0.73	1.31	0.14	0.79
7	0.88	0.96	0.52	1.12	0.10	0.58
8	0.92	0.95	0.51	1.10	0.10	0.57
9	0.53	0.61	0.19	0.72	0.05	0.23
10	0.51	0.59	0.18	0.70	0.05	0.22
11	0.49	0.55	0.17	0.68	0.05	0.21
12	0.89	0.92	0.47	1.07	0.09	0.54
13	0.87	0.91	0.46	1.05	0.09	0.52

14	0.54	0.61	0.20	0.72	0.05	0.24
15	0.81	0.28	0.44	0.61	0.09	0.18
16	0.44	0.53	0.14	0.62	0.05	0.18
17	0.40	0.49	0.12	0.58	0.04	0.15
18	0.51	0.59	0.18	0.70	0.05	0.22
19	0.34	0.43	0.09	0.52	0.04	0.12
20	0.32	0.43	0.09	0.52	0.04	0.12
21	0.38	0.47	0.11	0.56	0.04	0.14
22	0.39	0.48	0.12	0.58	0.04	0.15
23	0.51	0.59	0.18	0.70	0.05	0.22
24	0.32	0.42	0.07	0.50	0.04	0.11
25	0.27	0.36	0.06	0.43	0.04	0.08
26	0.27	0.36	0.06	0.44	0.04	0.09
27	0.25	0.34	0.05	0.41	0.04	0.08
28	0.25	0.34	0.06	0.43	0.03	0.08
29	0.23	0.32	0.05	0.39	0.03	0.07
30	0.21	0.29	0.04	0.36	0.03	0.06
31	0.20	0.28	0.04	0.35	0.03	0.06
32	0.19	0.27	0.04	0.33	0.03	0.05
33	0.19	0.26	0.04	0.33	0.03	0.05
34	0.18	0.25	0.03	0.32	0.03	0.05
35	0.19	0.27	0.04	0.33	0.03	0.05
36	0.19	0.27	0.04	0.34	0.03	0.06
37	0.20	0.26	0.04	0.34	0.03	0.06
38	0.19	0.27	0.04	0.34	0.03	0.06
39	0.17	0.24	0.03	0.31	0.03	0.05
40	0.17	0.24	0.03	0.30	0.03	0.05
41	0.16	0.23	0.03	0.31	0.02	0.05
42	0.18	0.25	0.03	0.32	0.03	0.05
43	0.18	0.26	0.03	0.32	0.03	0.05
44	0.46	0.54	0.15	0.64	0.05	0.19
45	0.41	0.50	0.13	0.59	0.04	0.16
46	0.16	0.43	0.05	0.51	0.04	0.12
47	0.23	0.31	0.05	0.38	0.03	0.07
48	0.67	0.73	0.28	0.85	0.06	0.33
49	0.62	0.69	0.25	0.80	0.06	0.30
50	0.93	0.91	0.52	1.12	0.10	0.59
51	0.55	0.62	0.20	0.73	0.05	0.25
52	0.60	0.67	0.24	0.79	0.06	0.29

8. ANÁLISIS DE LA EROSIÓN / ACUMULACIÓN

En este apartado se analizan el Estudio de Erosionabilidad que forma parte del “Proyecto de reparación y/o reconstrucción de los muros y estructuras de la ría de Bilbao” y el “Estudio de erosión frente a avenidas extremas en la ría de Bilbao entre La Peña y Elorrieta”, encargados a SENER por el Ayuntamiento de Bilbao.

Su objetivo es considerar los procesos de erosión frente a avenidas extremas en la margen derecha perteneciente al término municipal de Bilbao del río Cadagua, entre Alonsotegui y su desembocadura en la Ría de Bilbao, y en la Ría de Bilbao entre La Peña y Elorrieta. El interés de este estudio está en determinar posibles afecciones producidas por la erosión del fondo del cauce o de sus márgenes en la estabilidad de las estructuras de ribera.

El estudio se compone de un análisis hidrológico, un estudio hidráulico, un análisis morfodinámico y unas conclusiones sobre el riesgo de fallo en las estructuras de ribera frente a grandes crecidas. A continuación, se describe brevemente el contenido de cada uno de los puntos mencionados.

8.1. HIDROLOGÍA

En el estudio hidrológico de la cuenca del río Cadagua y de la cuenca del río Nervión e Ibaizabal, se define el hidrograma de diseño correspondiente a un periodo de retorno de 500 años.

Los hidrogramas de diseño se calculan a partir de las lluvias acaecidas sobre las cuencas de aportación, según lo establecido en el “Plan Integral de Prevención de Inundaciones de la Comunidad Autónoma del País Vasco” y de acuerdo a la revisión de los caudales realizada en mayo de 2002 dentro del “Proyecto de defensa contra inundaciones y encauzamiento de ríos y arroyos de los núcleos urbanos de las cuencas intracomunitarias de los ríos Cadagua, Karrantza y Kalera en la CAPV (Fase I)”.

Como periodo de retorno de diseño se adopta un valor de 500 años, considerando que es adecuado para el estudio de los muros y estructuras de ribera.

Para ello, se identifican y caracterizan las cuencas y subcuencas de aportación, se analizan los datos pluviométricos y se definen los hidrogramas de diseño obtenidos del modelo hidrometeorológico HEC-1, en el caso del río Nervión-Ibaizabal, y del modelo HEC-HMS, en el caso del río Cadagua.

8.1.1. Identificación de tramos y de las cuencas de aportación

El tramo del río Nervión-Ibaizabal a analizar dentro del término municipal de Bilbao comprende unos 9 km de cauce principal.

El tramo del río Cadagua de interés dentro del término municipal de Bilbao comprende unos 6 km. de cauce principal, desde la desembocadura hasta el término municipal de Alonsotegui.

Las cuencas que aportan caudales al río Nervión-Ibaizabal entre La Peña y Etxebarri son las cuencas del Nervión, la del Ibaizabal y la del Nervión-Ibaizabal, como puede apreciarse en la siguiente figura:



Mapa de Cuencas de Bizkaia.

8.1.2. Caracterización física de las subcuencas

El propio Plan Integral de la CAPV recoge las características a considerar de las subcuencas de estudio necesarias para la conversión de las lluvias acaecidas en hidrogramas de escorrentía superficial.

En dichas tablas aparecen valores de las áreas, longitud y cotas de vaguada, periodos de retorno y la pendiente del cauce necesarias para generar los hidrogramas de escorrentía.

Además de los datos físicos se requiere información sobre el tipo de suelo y la humectación del mismo que permita estimar las pérdidas por infiltración y el histograma de lluvia neta correspondiente. En este caso, se ha empleado el método empírico de la Soil Conservation Service del departamento de interior de EE.UU.

Entre las tres condiciones de humectación posibles, según las recomendaciones del “Plan Integral de Inundaciones de la CAPV”, se emplea la condición III o húmeda. De esta forma los cálculos realizados quedan del lado de la seguridad, pues la infiltración bajo esta hipótesis es menor.

Para determinar el valor del número de curva, parámetro que se introduce en el HEC-1, existen estudios experimentales que correlacionan los factores que pueden influir en una cuenca: tipo de suelo, cobertura vegetal, influencia del cultivo y pendiente topográfica.

8.1.3. Embalses

Dentro de la cuenca del río Cadagua se encuentran cuatro embalses que fueron tratados acorde a los datos que arroja el PIPI en cuanto a caracterización se refiere de capacidad de almacenamiento y de desagüe. Los datos proceden del citado Proyecto de defensa contra inundaciones realizado en 2.002 para el Gobierno vasco

La simulación hidrológica en la cuenca del Cadagua tiene en cuenta las características y el sistema de explotación para calcular los caudales de salida en función de los caudales de entrada y el nivel de la lámina de agua. La influencia de los embalses de Artxiniega, Nocedal y Artiba en los caudales registrados en el río Cadagua previa confluencia con la Ría de Bilbao no es significativa. El embalse de Ordunte, con un volumen de 22 Hm³ y una cuenca de aportación de unos 48 Km², puede llegar a tener un efecto laminador y será sensible al porcentaje de llenado que se encuentre en al comienzo del aguacero de cálculo.

Los hidrogramas obtenidos mediante el software HEC-1, caudales obtenidos para la cuenca del Nervión-Ibaizabal en el Plan Integral, no tienen en cuenta la laminación de las presas de Undurraga, Zollo, Lekubaso y Maroño. Se trata de embalses con poca capacidad de laminación por lo que es asumible despreciarlos en el cálculo.

8.1.4. Datos pluviométricos

Los datos pluviométricos registrados en las cuencas de estudio quedan recogidos en el Plan Integral, a través de mapas de isomáximas y curvas Intensidad-Duración-Frecuencia. Estos se representan para diferentes periodos de retorno. Las lluvias tienen una distribución temporal concreta, obtenida mediante procedimientos estadísticos, que se define en forma hietogramas medios para cada subcuenca. Además, se tiene en cuenta la distribución espacial de la lluvia a través de un coeficiente reductor por área.

En función de las características de la cuenca hay una duración del aguacero pésima que genera el máximo caudal en el punto definido. En este caso, se establece en una duración de 27 horas para el ámbito de interés en la cuenca del río Nervión Ibaizabal y de 24 horas para el tramo de interés en la cuenca del Cadagua. El periodo de retorno de estudio corresponde al de 500 años.

8.1.5. Modelo hidrometeorológico y propuesta de caudales

1) Río Nervión-Ibaizabal

El Plan Integral de Inundaciones transforma las lluvias de cálculo en caudales a través del programa HEC-1. Éste incorpora una serie de algoritmos que son capaces de simular los procesos físicos más significativos que tienen lugar en una cuenca de drenaje como son la infiltración, la determinación de lluvia neta, el cálculo de escorrentía superficial y el tránsito de hidrogramas. Introduciendo los datos pluviométricos mencionados, las características de cada subcuenca (Área, Longitud, Pendiente, Tiempo de concentración) y los números medios de curva SCS en condiciones de humectación tipo III, el HEC presenta una serie de hidrogramas en los puntos de integración en función de la probabilidad de ocurrencia.

Los hidrogramas por emplear en la simulación hidráulica en el río Nervión Ibaizabal se introduce como condición de contorno aguas arriba en el río Nervión-Ibaizabal, justo al comienzo del ámbito de estudio, en el barrio de La Peña de Bilbao. El caudal pico en el punto de integración es de 2.604 m³/s.

El caudal máximo en el punto la Ría de Bilbao justo antes de su confluencia con el río Cadagua es 2.406 m³/s. El siguiente punto de integración, integra ambos caudales aguas abajo del área de estudio. El valor máximo de este hidrograma es de 4.045 m³/s.

2) Río Cadagua

El “Proyecto de defensa contra inundaciones y encauzamiento de ríos y arroyos de los núcleos urbanos de las cuencas intracomunitarias de los ríos Cadagua, Karrantza y Kalera en la CAPV (fase I)” utiliza para la obtención de los hidrogramas de cálculo el software HEC-HMS.

El modelo HEC-HMS constituye una potente herramienta de simulación de los procesos de lluvia-escorrentía en sistemas de drenaje dendríticos, estando especialmente indicado para la hidrología de avenidas.

Como condición de contorno aguas arriba en el modelo hidráulico se introduce el hidrograma resultante en el punto de integración.

8.1.6. Resultados de caudales para T=500

A continuación, se muestra una tabla comparativa con los resultados obtenidos mediante las distintas metodologías. Por lo general el PIPI y el Mapa de Caudales Máximos presentan valores elevados. El valor revisado de los caudales en el río Cadagua se aproxima más a la media de las metodologías empleadas, estando el caudal obtenido en el PIPI por encima de éste.

Cuenca	Situación	Pto.	Comparativa con otros métodos				Propuesta T=500
			PIPI	NORTE III	Zapata	CAUMAX	
Nervión-Ibaizabal	Etxebarri	P22	2.604,00	1.985,99	2.039,50	-	2.604,00
Cadagua	Alonsotegi	P20	1.715,99	1.334,13	1.403,08	1.550,00	1.444,90

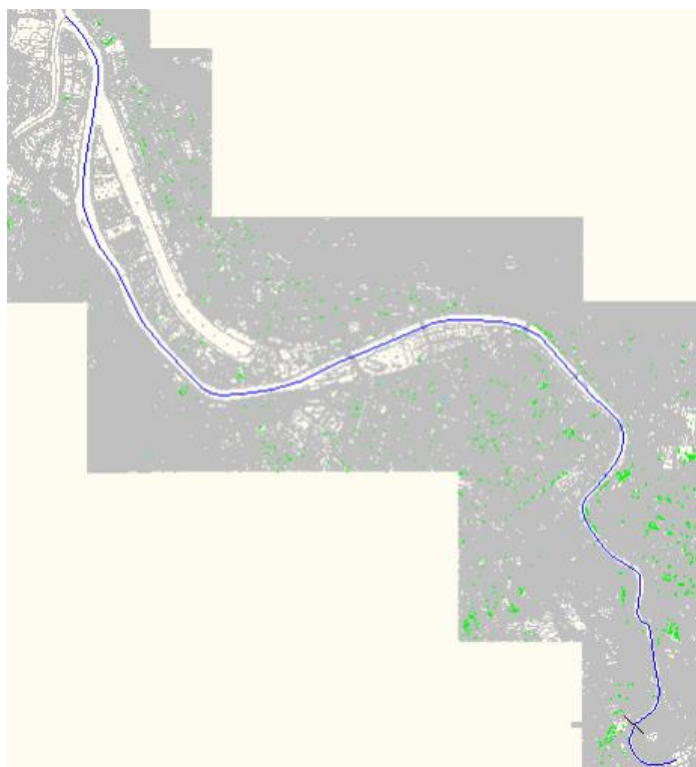
8.2. HIDRÁULICA

El estudio hidráulico define las condiciones de marea aguas abajo que maximizan las tensiones sobre el fondo y las márgenes, y en consecuencia el potencial erosivo. El modelo de hidráulico construido es la base para el modelo de erosión-sedimentación.

8.2.1. Tramos analizados

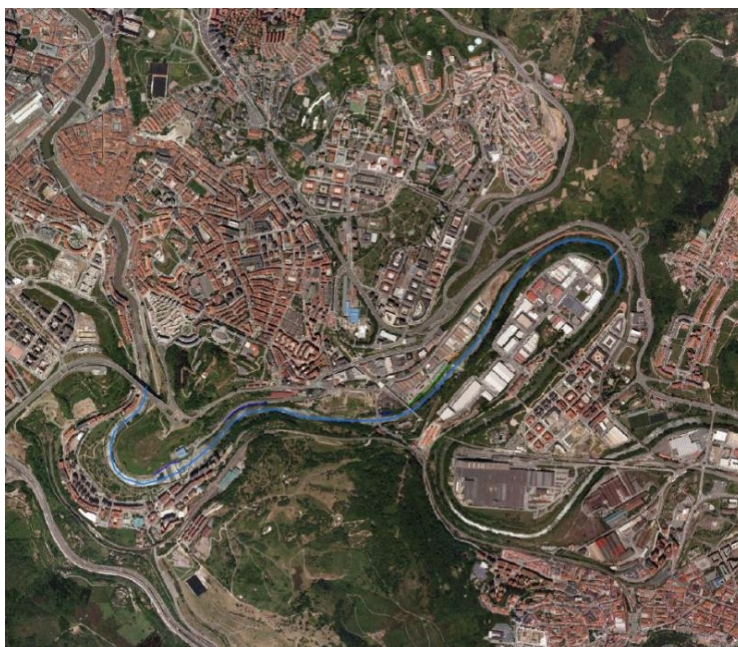
El tramo de la red fluvial entre La Peña y Elorrieta (aunque la simulación se realiza hasta la desembocadura) discurre de forma más o menos rectilínea salvo pequeñas curvaturas y tramos concretos como el de La Peña, a lo largo de unos 9 kilómetros de cauce principal, sin considerar el canal de Deusto.

Con la avenida de proyecto, la de 500 años de periodo de retorno, la explanada de Zorrotzaurre o Botica Vieja se inundaría y el canal de Deusto pasa a formar parte del propio cauce como área inefectiva. Las estructuras de ribera del canal de Deusto no sufrirán por tanto socavaciones.



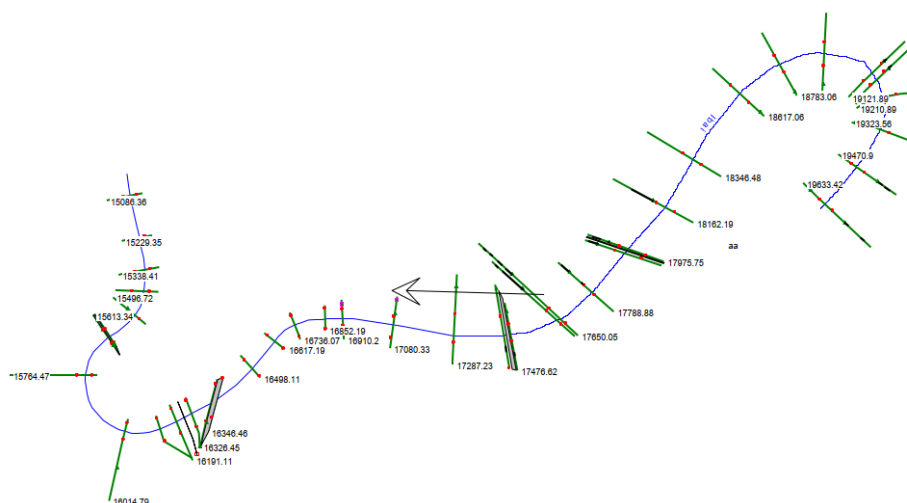
Red fluvial erosión sedimentación de la Ría de Bilbao entre La Peña y Elorrieta.

Además, se incluye el tramo de interés entre Etxebarri y La Peña tiene una longitud de cauce principal de 3,9 kilómetros aproximadamente. El río se encuentra canalizado por las estructuras de Ribera, y describe dos meandros. En el interior del primero de ellos se ubica el polígono de Leguizamón, mientras en el segundo se sitúa el Parque Larreaburu. Las márgenes se encuentran sensiblemente urbanizadas.



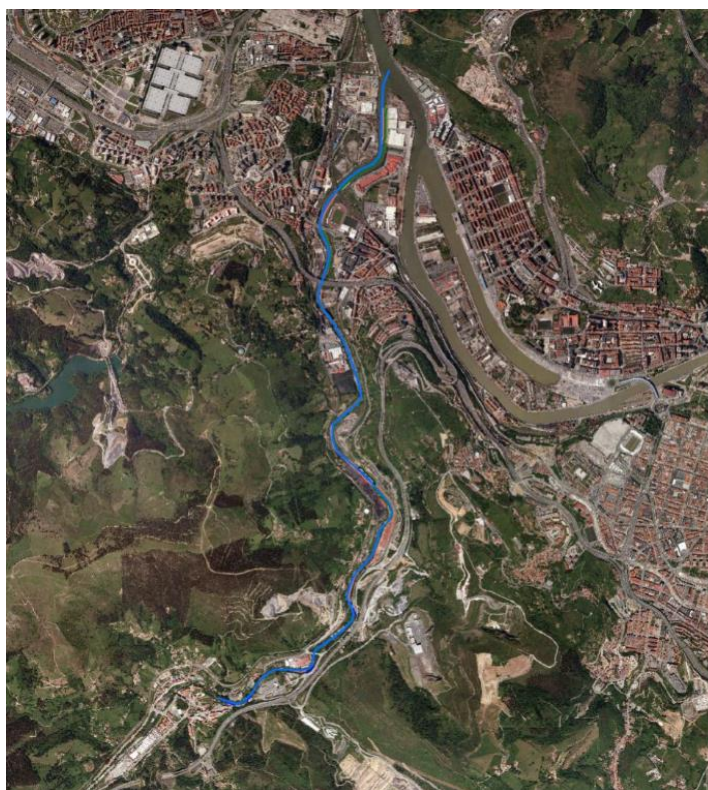
Ortofofo del área de estudio en el río Nervión-Ibaizabal entre Etxebarri y La Peña.

El número de secciones transversales en esta área de estudio del río Nervión-Ibaizabal es de 39. En el modelo hidráulico se simulan 3 puentes y 2 azudes. A continuación, se incluye una planta con la geometría del modelo:



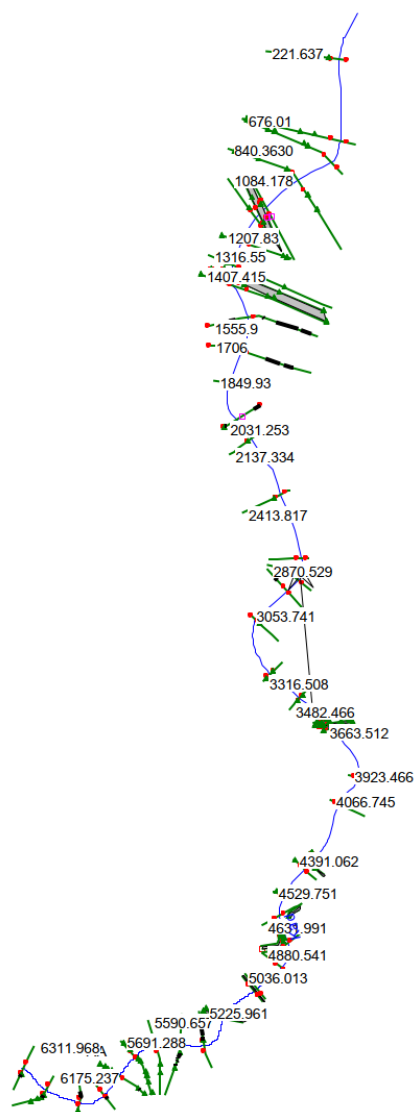
Planta del modelo hidráulico del río Nervión-Ibaizabal en el tramo de interés.

También se analizan los últimos 6 kilómetros del río Cadagua previa confluencia con la Ría de Bilbao. El tramo de interés se sitúa en la parte cóncava del perfil longitudinal del río Cadagua, pendiente suave, y márgenes por lo general fuertemente restringidas por los usos industriales e infraestructuras. El cauce se encaja en un valle angosto y rectilíneo en dirección Sur-Norte. El tramo de análisis se ve influenciado por los ciclos mareales.



Ortofoto del área de estudio en el río Cadagua.

El modelo del río Cadagua consta de 54 secciones, 6 puentes y un azud. La planta del modelo hidráulico confeccionado se incluye a continuación.



Planta del modelo hidráulico del río Cadagua en el tramo de interés.

8.2.2. Metodología

Para la ejecución de la simulación hidráulica del cauce de la Ría de Bilbao se ha utilizado la versión 4.0 del Software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) desarrollado por el Hydrologic Engineering Center para el U.S. Army Corp of Engineers.

La simulación de la Ría de Bilbao se ha realizado en régimen permanente gradualmente variado, introduciendo los caudales obtenidos de los estudios hidrológicos para los puntos y periodos de retorno considerados alternando diferentes condiciones de marea aguas abajo para determinar el escenario pésimo de crecida.

8.2.3. Condiciones de contorno

Tramo de la Ría de Bilbao entre La Peña y Elorrieta

Se introducen condiciones de contorno para el cálculo hidráulico aguas abajo de la zona simulada y aguas arriba. La red fluvial simulada llega hasta la desembocadura de la Ría de Bilbao de manera que los resultados obtenidos en el ámbito de estudio, el término municipal de Bilbao, tengan en cuenta la influencia mareal.

- Aguas Arriba, en la zona de La Peña:

En el estudio morfodinámico se simula la avenida de forma discretizada en régimen permanente. Para esta metodología se adopta una condición de contorno de régimen permanente, es decir, bastará introducir el caudal de diseño ($2.604 \text{ m}^3/\text{s}$) y la pendiente de la línea de energía asimilable a falta de mejores datos a la pendiente longitudinal del fondo de valor 0.045.

- Aguas abajo, en la desembocadura de la Ría de Bilbao:

Se estudian varios escenarios con diferentes niveles de la lámina de agua en la desembocadura. De esta manera, determinaremos en qué condiciones aguas abajo se producen los mayores esfuerzos sobre el fondo.

Dado que el nivel de agua en la desembocadura de la Ría de Bilbao depende fundamentalmente del ciclo de mareas y que éstas poseen un amplio espectro de presentación temporal, parece lógico emplear un valor máximo y mínimo probable de entre el rango de variación posible. A priori el valor máximo de la cota de marea será el que implique mayores niveles de inundación, mientras que el valor mínimo conducirá a mayores tensiones en el fondo del cauce. Referidos al cero de Alicante, se simulan diferentes escenarios modificando la condición de contorno aguas abajo entre 3.40 y -1.78 metros para determinar en qué situación se obtienen los esfuerzos pésimos en la zona de estudio.

Tramos del Cadagua y el comprendido entre Etxebarri y La Peña del río Nervión

Se introducen las siguientes condiciones de contorno para el cálculo hidráulico:

- Nivel aguas abajo.
- Pendiente del cauce aguas arriba.

Referidos al cero de Alicante, se simulan diferentes escenarios modificando la condición de contorno aguas abajo entre 3.1 y -1.84 metros para determinar el rango entre el que se mueve el nivel de lámina durante un episodio de lluvias intensas con un periodo de retorno de 500 años. Las pendientes aguas arriba se han obtenido en función de los perfiles longitudinales dentro del tramo de estudio. Las condiciones de contorno aguas arriba introducidas se presentan en la tabla siguiente:

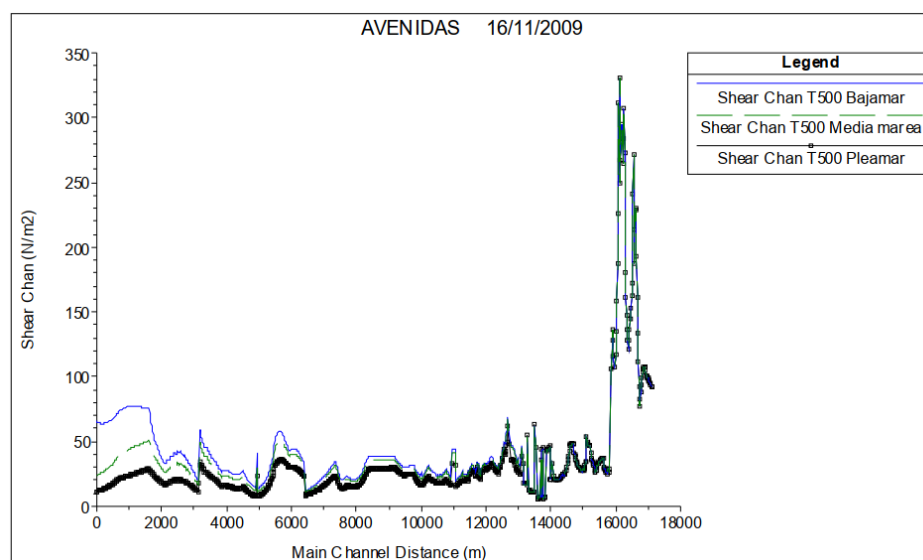
RÍO	PENDIENTE AGUAS ARRIBA
NERVIÓN-IBAIZABAL	0,00517
CADAGUA	0,0031

8.2.4. Resultados

Tramo de la Ría de Bilbao entre La Peña y Elorrieta

Como se ha comentado, cabe determinar las condiciones en la desembocadura que generan mayores tensiones en el fondo del canal principal. A continuación, quedan comparadas las tensiones medias del fondo para distintos niveles de marea en la desembocadura de la Ría.

- Pleamar viva equinoccial y sobreelevación por tormenta: 3.4 metros
- Media marea: 0.52 metros
- Bajamar viva equinoccial: -1.78 metros



Tensiones en el fondo del cauce principal bajo diferentes condiciones de marea, T=500 años.

Las tensiones en los tramos más elevados de la Ría se solapan, aguas arriba del P.K. 13+000 en adelante. Es decir, desde el puente del Arenal junto al Ayuntamiento de Bilbao hacia aguas arriba el proceso de erosión-sedimentación se puede considerar independiente del régimen de mareas.

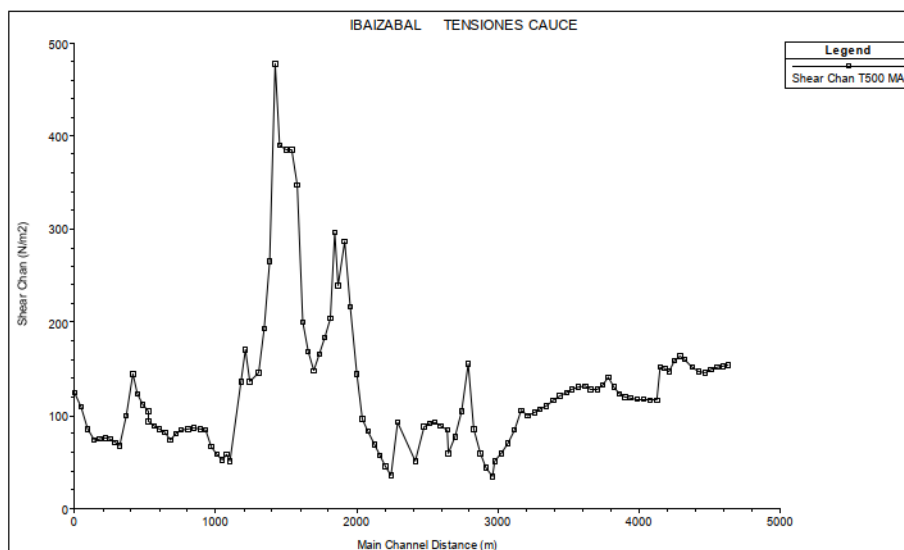
Aguas abajo del punto en cuestión, la influencia de las mareas crece al aproximarse a la desembocadura de la Ría de Bilbao. Nuestro ámbito de estudio abarca los P.K. comprendidos entre el 7+556 y el 15+600. Analicemos el comportamiento de las tensiones en el fondo, directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad media en cada sección.

En situación de marea alta, la pendiente hidráulica de la ría es menor, lo que deriva en menores velocidades y tensiones de fondo. La corriente de marea es mínima durante la pleamar.

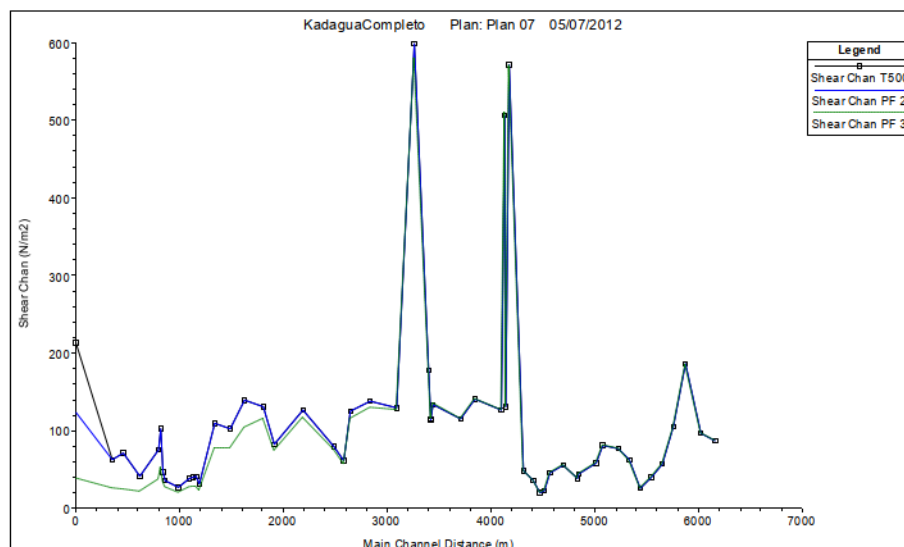
En situación de bajamar, la pendiente hidráulica es mucho mayor, de manera que las velocidades medias y tensiones en el fondo serán mayores. La corriente de marea en este caso sería también prácticamente nula.

Tramos del Cadagua y el comprendido entre Etxebarri y La Peña del río Nervión

En la gráfica siguiente se presentan las tensiones sobre el fondo del cauce en el tramo de interés del río Nervión-Ibaizabal en régimen permanente y para el pico del hidrograma de cálculo, 2.406 m³/s.



Como se ha comentado, cabe determinar las condiciones de contorno aguas abajo, en el caso del río Cadagua que generan mayores tensiones en el fondo del canal principal. A continuación, se comparan las tensiones medias del fondo para los niveles mínimo (-0,7 metros), medio (2,25 metros y máximo (5,21 metros) del rango de valores estimados, en régimen permanente y para el pico del hidrograma de cálculo, 1.445 m³/s.



Tensiones en el fondo del cauce principal bajo en el río Cadagua T500 años.

Las tensiones en los tramos más elevados del río se solapan, aguas arriba del P.K. 3+316 en adelante. Es decir, desde la fábrica Productos de Función S.L. hacia aguas arriba el proceso de erosión-sedimentación se puede considerar independiente del régimen de mareas.

Aguas abajo del punto en cuestión, la influencia de las mareas crece al aproximarse a la desembocadura de la Ría de Bilbao. Analicemos el comportamiento de las tensiones en el fondo, que son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad media en cada sección.

En situación de marea alta y mayores aportaciones del río Nervión-Ibaizabal, la pendiente hidráulica del río Cadagua es menor, lo que deriva en menores velocidades y tensiones de fondo. La corriente de marea es mínima durante la pleamar.

En situación de bajamar y pequeñas aportaciones del río Nervión-Ibaizabal, la pendiente hidráulica es mucho mayor, de manera que las velocidades medias y tensiones en el fondo serán mayores. El incremento de tensiones sobre el fondo debido al nivel de la lámina de agua aguas abajo es sensible en los últimos 500 metros previos a la confluencia.

8.3. MORFODINÁMICA

En el estudio morfodinámico se analizan las características morfológicas actuales y se cuantifican los procesos de erosión durante avenidas en el corto plazo mediante una metodología simplificada.

La simulación de los procesos de erosión sedimentación en la Ría de Bilbao para la ocurrencia de una avenida extrema, de manera que se conozca la potencialidad de socavación del cauce principal asociado.

8.3.1. Descripción de la problemática

Primeramente, se va a describir la problemática del proceso de erosión-sedimentación al paso de una avenida extrema.

Para poder entender los procesos de sedimentación erosión que se dan en el tramo de estudio de la Ría de Bilbao hay que comprender que el caso estudiado es el pésimo, es decir, aquél que produce mayores tensiones sobre el fondo para el periodo de retorno de 500 años. Es un caso extremo en el que únicamente existe erosión dada la gran diferencia entre tensiones sobre el fondo y tensiones críticas de inicio de movimiento de los sedimentos.

Conocido el mecanismo de erosión-sedimentación de la Ría de Bilbao, se está en disposición de estudiar la socavación producida en el fondo del cauce principal de la Ría durante una crecida. Se trata de un proceso de erosión general transitorio, esto es, una erosión a corto plazo provocada por el paso de fuertes crecidas con caudales variables en el tiempo, en régimen no permanente.

El transporte de sedimentos provocado al paso de un régimen no permanente es más complejo. Es un proceso iterativo y continuo, ya que la erosión progresiva del fondo modifica las variables hidráulicas de la Ría.

La cantidad transportada entre dos secciones dependerá de la capacidad de transporte del flujo y de la disponibilidad de material para ser transportado. La cantidad de material sólido de entrada tanto por arrastre como por suspensión y disolución, más las variaciones de volumen del lecho nos dará la cantidad de material sólido aguas abajo, de manera que se cumple la continuidad en el transporte de sedimentos a lo largo del cauce.

El proceso físico de erosión tiene una limitación temporal. No es un proceso instantáneo, sino que necesita la permanencia del caudal durante una duración mínima para producirse toda la socavación admitida. Caso de ser inferior a la limitación temporal de erosión únicamente será aprovechado parte del potencial de socavación. Se recurre a tasas de transporte de materiales. Ocurre lo mismo con el proceso de sedimentación. Una partícula necesita para sedimentar entre dos secciones un tiempo suficiente para recorrer la distancia desde su situación dentro del perfil o columna de agua hasta el fondo a la velocidad de caída dentro del fluido.

Las formulaciones de transporte de sólidos en suspensión realizan una hipótesis de concentración logarítmica de sedimentos en suspensión y mezcla instantánea entre dos secciones. No es del todo cierta y seguramente caben concentraciones mayores cerca del fondo.

8.3.2. Metodología

La metodología planteada en el estudio morfodinámico consiste en erosionar el fondo de la Ría de acuerdo con una tasa de transporte de materiales. Esta tasa de erosividad se ha calculado tratando de elegir las formulaciones empíricas que mejor representen las condiciones in situ de la Ría y los sedimentos del fondo frente a la avenida extrema.

La metodología aplicada es la siguiente: se discretiza el hidrograma de cálculo en nueve estados, se computa el cálculo hidráulico en régimen permanente para el primero de ellos, se obtiene la tasa de erosividad de acuerdo con formulaciones empíricas para material grueso y material cohesivo que multiplicada por la duración del intervalo discretizado nos dará la profundidad de erosión, se rebaja el fondo y se computa el siguiente estado del hidrograma.

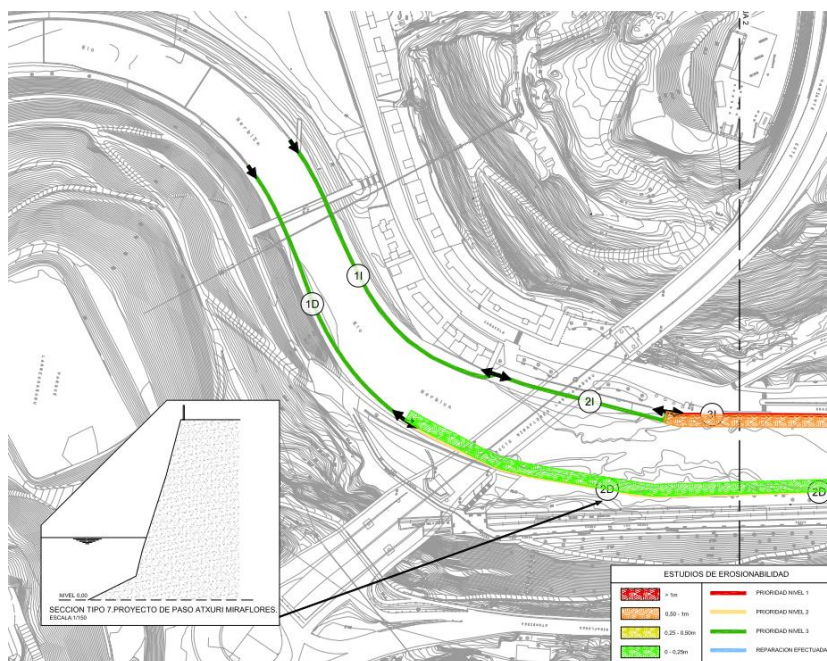
8.4. RESULTADOS

Se resumen los aspectos relevantes de cara a garantizar la estabilidad de las estructuras de ribera debido a procesos de socavación y a proteger los márgenes y laderas que representen derivado de una erosión durante grandes avenidas.

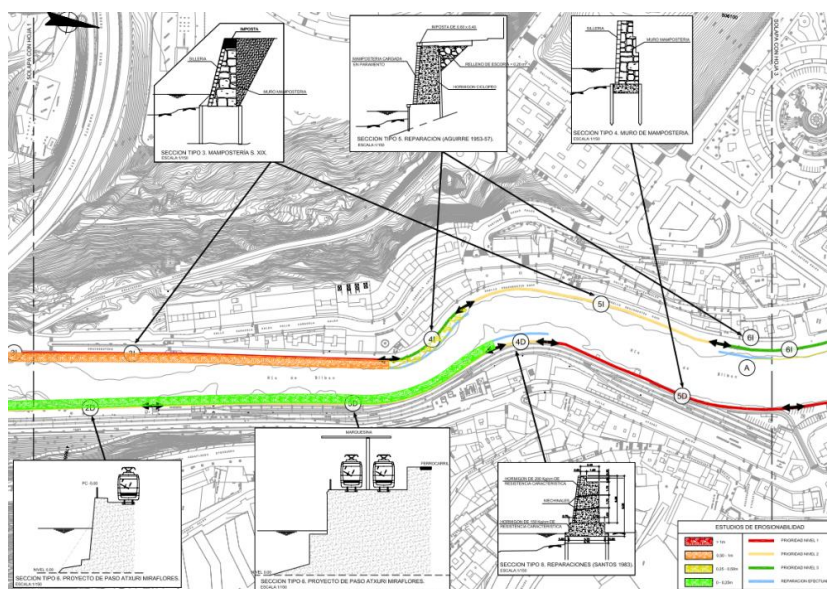
8.4.1. Tramo de la Ría de Bilbao entre La Peña y Elorrieta

Se analizan en detalle los tramos donde se producen las mayores socavaciones.

Aguas arriba de la estación de Atxuri se producen las mayores tensiones, sin embargo, la roca sana está a poca profundidad del fondo del cauce y las estructuras de Ribera van a estar cimentadas sobre roca bien directamente, bien con bloques de tablaestacas. Es en los tramos 2D, 3D y 4D, 3I y 4I correspondientes a muros de mampostería donde la socavación podría generar problemas.

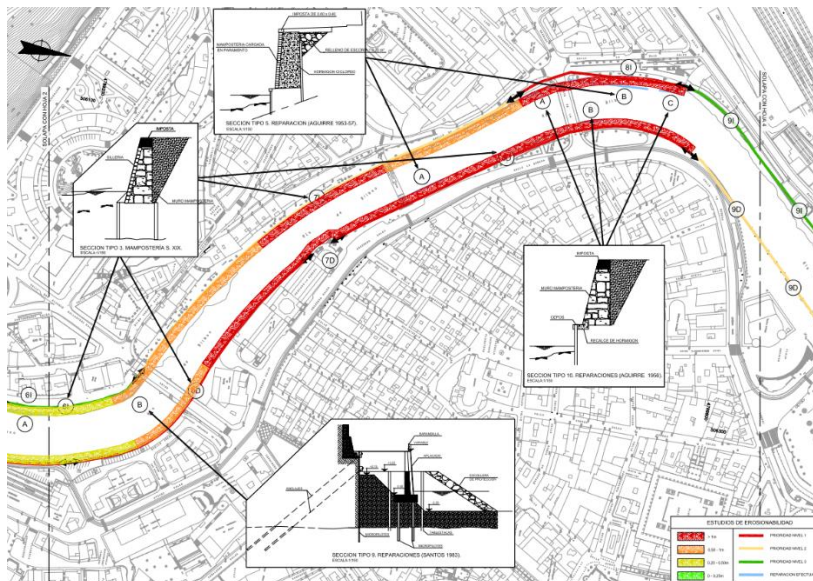


Erosión en los tramos 2D-3I. Fuente: SENER.



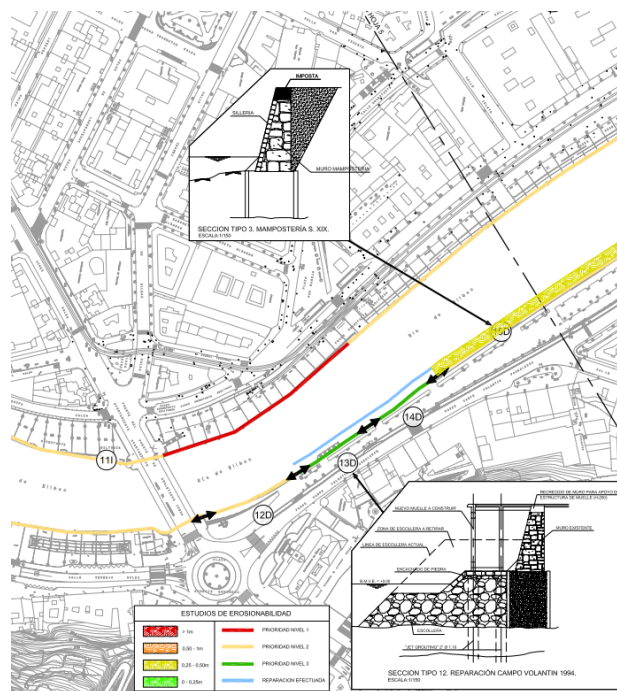
Erosión en los tramos 3D-4D-3I-4I. Fuente: SENER.

Justo aguas abajo del puente de San Antón se produce una socavación del orden de un metro de profundidad. La potencia erosiva en esta zona se extiende hasta las proximidades del teatro Arriaga, a excepción del tramo frente al Mercado de La Ribera donde existe un afloramiento de roca, que impide la erosión del fondo. Por tanto, entre el puente San Antón y el Mercado de La Ribera, y entre el Mercado de La Ribera y el Teatro Arriaga (tramos 6D, 8D, 8I, 9I) existe riesgo de socavación del fondo del cauce de la Ría.



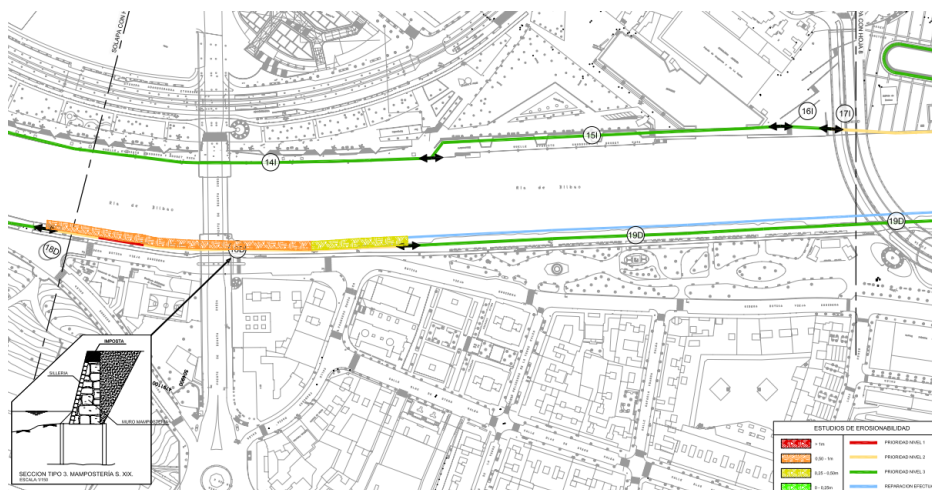
Erosión en los tramos 6D-8D-8I-9I. Fuente: SENER.

Frente al Ayuntamiento de Bilbao (tramo 12D-13D), se tiene otro pico de socavación que rápidamente disminuye al acercarse hacia el puente Zubizuri. Al tratarse de un tramo en curva, las líneas de mayor velocidad se concentrarán en la margen derecha. Se considera un punto de alta socavación, no de riesgo puesto que las estructuras de ribera están pilotadas.



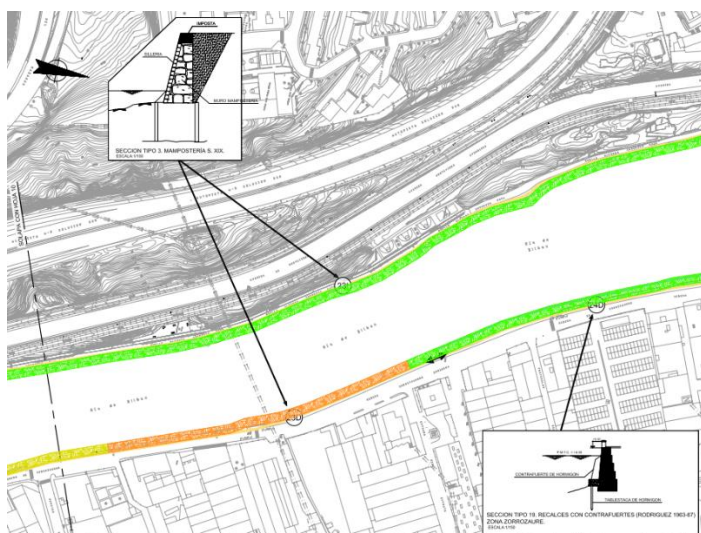
Erosión en los tramos 12D-13D. Fuente: SENER.

El siguiente tramo con alto potencial de excavación es el situado bajo el puente de Deusto. Las estructuras de Ribera están pilotadas por lo que los 60 centímetros de socavación obtenidos en el presente estudio no son una posible causa de fallo.



Erosión bajo el puente de Deusto. Fuente: SENER.

Finalmente, se produce socavación, aunque algo más atenuada, del orden de medio metro, en un pequeño tramo situado frente a la carretera que une Basurto con Zorroza (23-D) en la margen derecha.



Erosión en el Tramo 23-D. Fuente: SENER.

Se representa en una tabla el potencial erosivo real en tres grupos, indicando también las zonas en las que se limita la erosión por roca en el fondo del cauce.

ZONA	DESCRIPCIÓN
Zona amarilla	Bajo potencial erosivo
Zona naranja	Medio potencial erosivo
Zona roja	Alto potencial erosivo
Limitación por roca	Sin riesgo

ESCENARIO PÉSIMO			
P.K.	Socavación Final	P.K.	Socavación Final
(m)	(m)	(m)	(m)
15496,72	0,659	12690,52	0,621
15410,35	0,000	12586,31	0,552
15338,41	0,000	12407,69	0,378
15229,35	0,025	12344,66	0,546
15086,36	1,028	12313,32	0,611
14975,76	0,159	12277,66	0,443
14816,9	0,000	12208,3	0,507
14740,52	1,138	12148,03	0,573
14602,93	0,458	12060,47	0,439
14484,26	0,427	11862,24	0,462
14466,16	0,598	11623,95	1,023
14450,63	1,065	11590,47	0,983
14391,23	1,356	11411,61	0,702
14280,63	0,000	11290,3	0,471
14175,06	1,592	11167,55	0,424
14167,13	1,491	11019,43	0,554
14140,35	1,263	10866,11	0,698
14005,09	1,210	10657,61	0,493
13988,77	1,822	10418,6	0,623
13777,22	1,549	10094,47	0,564
13645,71	1,015	9814,378	0,774
13625,25	1,318	9040,271	0,985
13518,58	1,338	8764,634	0,602
13279,71	0,970	8387,722	0,465
13258,49	1,249	7999,244	1,027
13160,24	0,911	7559,314	0,523
12995,21	0,564	7056,161	0,204
12844,86	0,566		

Erosión frente avenidas extremas en la Ría de Bilbao entre La Peña y Elorrieta. Fuente: SENER.

8.4.2. Tramos del Cadagua y el comprendido entre Etxebarri y La Peña del río Nervión

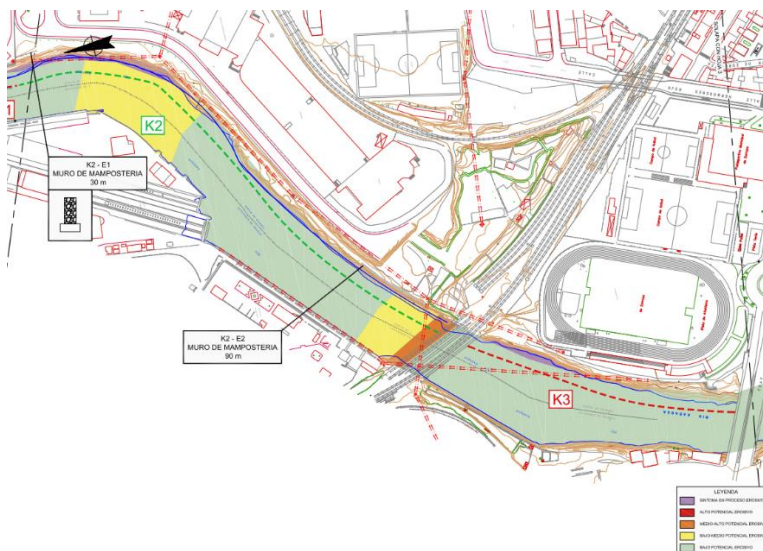
Los procesos erosivos en el río Cadagua no son significativos. Se ha observado en las proximidades de la represa dentro del tramo de análisis una tendencia a la sedimentación de materiales en el fondo y a la disminución de la pendiente, si bien en el tramo final previa confluencia se aprecia una tendencia a la socavación del fondo del cauce.

Por lo general, los indicios de procesos erosivos detectados en campo responden a erosiones locales debidas a estrechamientos o concentración de las líneas de corriente en puentes o en curvas cerradas. Las erosiones morfodinámicas o evolutivas son mínimas. En algún caso el río intenta trenzarse balanceando el cauce de margen a margen formando pequeñas pozas y remansos (aguas abajo de las vías del ferrocarril en el PK 4+631 tramo K11 y tras la curva cerrada contra el ferrocarril PK 2+700 tramo K7), pero la planta del río no ha cambiado en los últimos 20 años.

Del estudio morfodinámico realizado se podrían destacar los siguientes puntos:

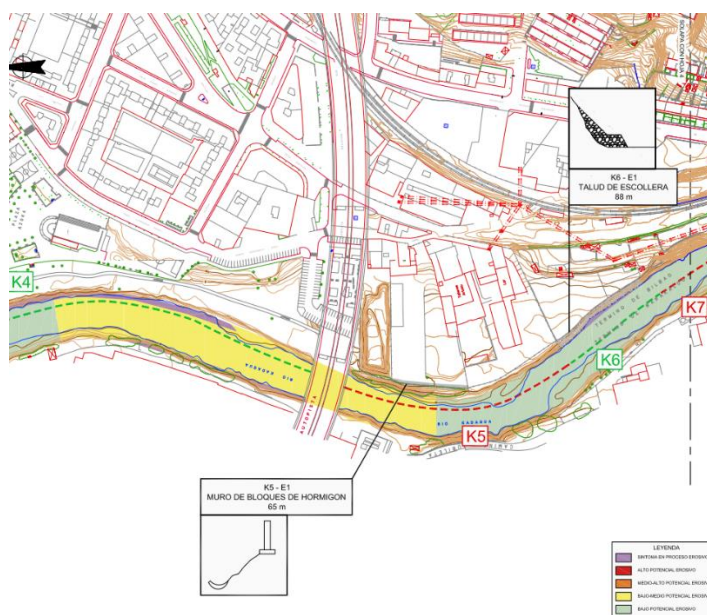
- **Tramo K2.** Retroceso de la línea de margen en el tiempo coincidente con un tramo unidimensional de tensiones elevadas, situado en la parte exterior de una curva.

No afecta a los usos existentes en el corto plazo. En el largo plazo se recomienda una escollera de protección de unos 170 metros de longitud.



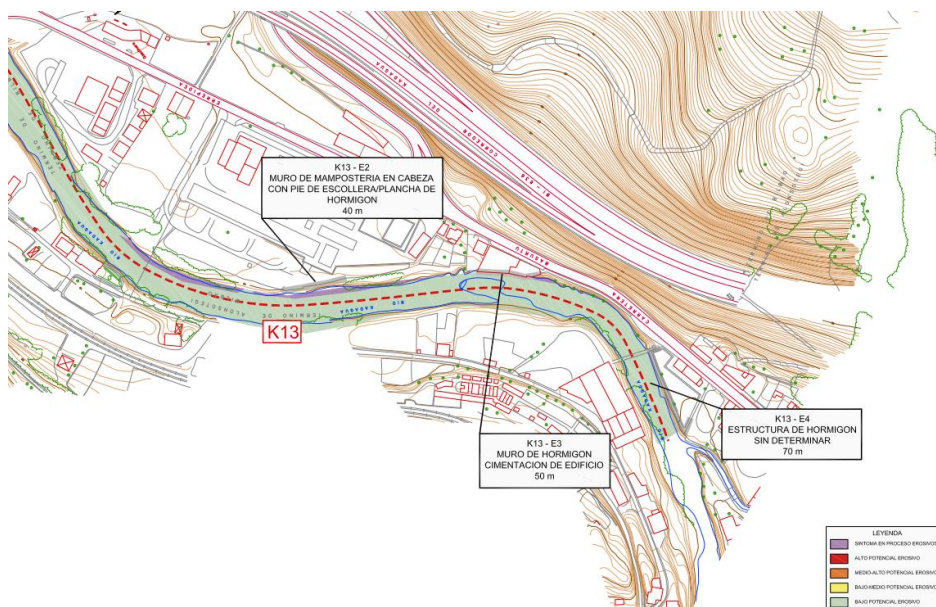
Erosión en el tramo K2-Cadagua. Fuente: SENER.

- **Tramo K6.** La escollera de protección de las márgenes tiene defectos puntuales. Se han desplazado algunos de sus bloques. Su integridad se debe controlar mediante la gestión de estructuras.



Tramo K6 del río Cadagua. Fuente: SENER.

- **Tramo K13.** El cauce se ensancha y reduce su calado. Se trata de un material erosionable en contacto con la corriente con avenidas relativamente frecuentes.



Erosión en el tramo K13 del Cadagua. Fuente: SENER.

Se aprecia una berma excavada en los materiales aluviales. Existe un murete de protección y una escollera propiedad de Iberdrola. Podrían ser recomendables reparaciones puntuales.

La erosión del cauce debido a las corrientes de agua en el río Cadagua no representa un riesgo significativo en la estabilidad de las estructuras. Cabe mencionar la interacción estructura-río en los tramos K1 y K8:

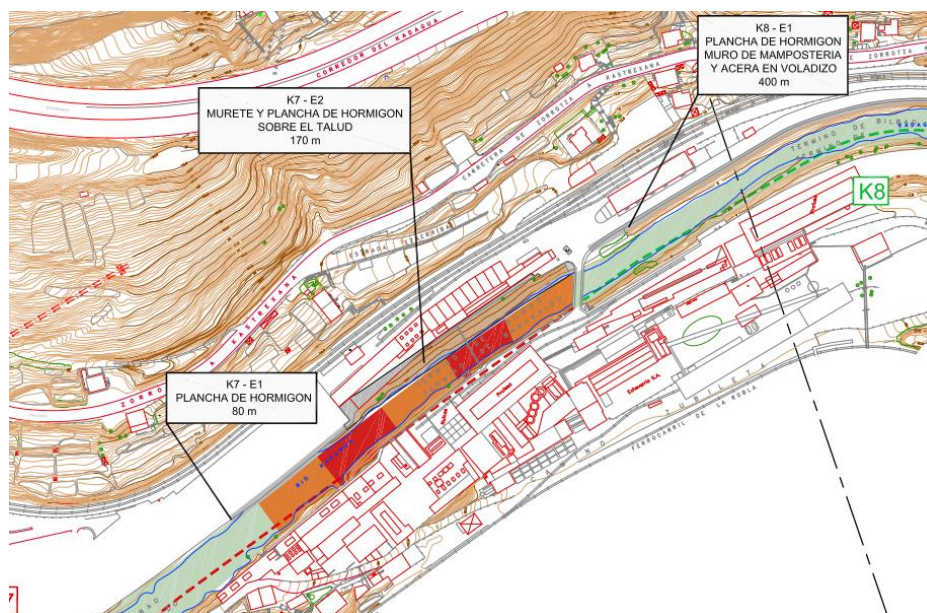
- En el **tramo K1** la cota del fondo se ha reducido entre 1990 y 2008, y coincide con un tramo de riesgo de erosión y velocidades altas. En las orillas se observa roca y piedras en una matriz de materiales finos fangosos. Los muros se apoyan en sustrato rocoso.



Erosión en el tramo K1 del Cadagua. Fuente: SENER.

- En el **tramo K8** las estructuras de ribera están cimentadas en la cabeza de talud y el cauce se encuentra canalizado a través de planchas de hormigón en sus márgenes. Si bien en la margen izquierda se aprecia pequeños desplazamientos de las planchas que pueden deberse a la socavación del fondo, en la margen derecha el estado de las planchas es aceptable y no se observan movimientos

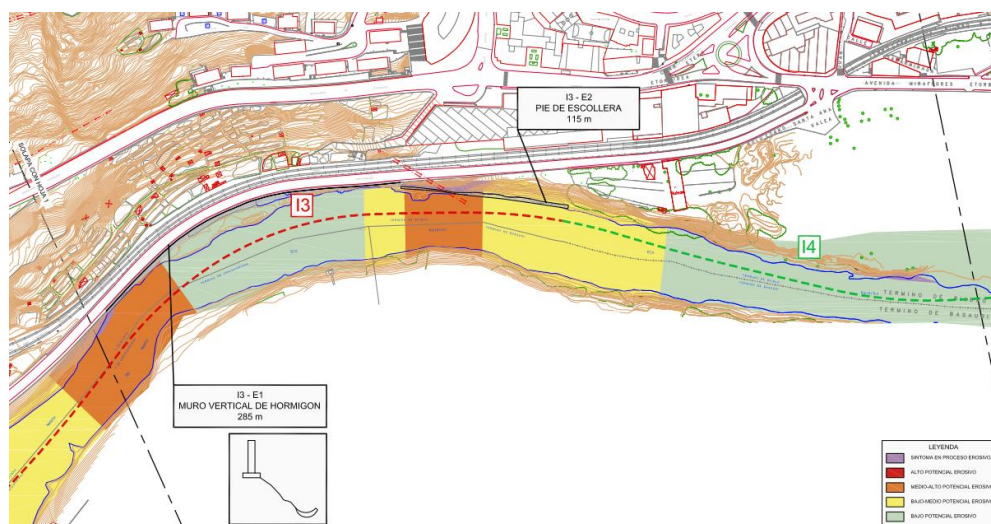
relativos entre las placas. Se trata de un tramo con un fuerte potencial erosivo que parece haber sido solventado mediante la rigidización de sus márgenes.



Tramo K8 del estudio de erosionabilidad del Cadagua. Fuente: SENER.

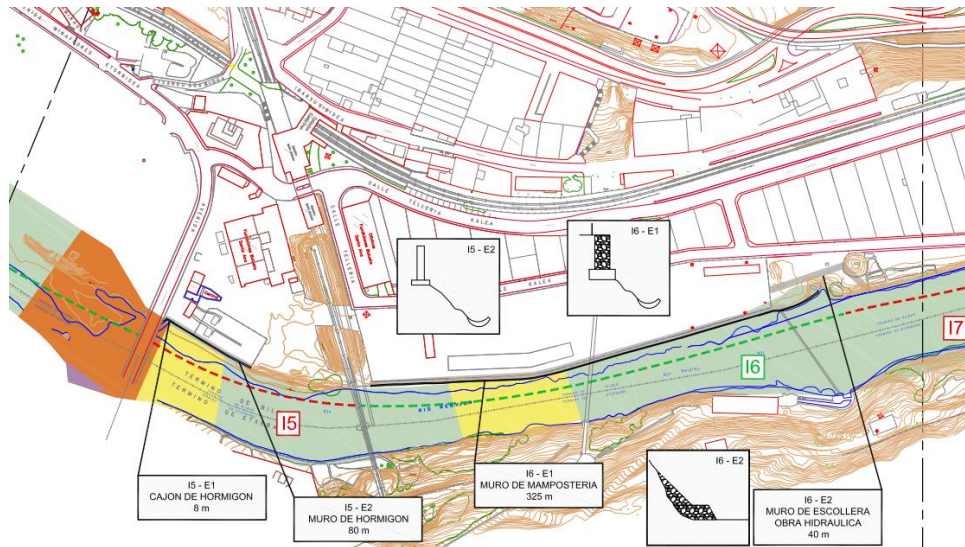
La erosión del fondo en el río Ibaizabal viene dominada por la cota del sustrato rocoso, de manera que, aunque en ciertas zonas el potencial erosivo sea elevado, la socavación es mínima. Esto ocurre en la parte inferior del tramo analizado entre La Peña y la estación de Abusu. Por otro lado, se encuentran indicios aguas arriba de procesos erosivos, que pueden afectar a estructuras.

- **Tramo I3.** La zapata del muro vertical de hormigón y el material sobre el que se apoya queda expuesta a la corriente. El muro está en buen estado y la geofísica indica que cimienta sobre roca sana. Se debe realizar un seguimiento de la cimentación en la gestión de estructuras.



Erosión en el tramo I3 entre La Peña y Etxebarri. Fuente: SENER.

- **Tramo I6.** Se ha movilizado el material consolidado de las orillas de manera que el muro de mampostería propiedad de Telefónica queda expuesto a la acción directa de la corriente. El muro parece estar en buen estado no apreciándose descalces ni averías.



Erosión en tramo I6 entre La Peña y Etxebarri. Fuente: SENER.

Por lo general existe suelo entre los muros que canalizan el río Nervión-Ibaizabal y el cauce ordinario de aguas bajas. Se tiene un margen de seguridad frente a la socavación del pie de estructuras de ribera.

9. DRAGADOS

El objeto de este apartado es analizar la necesidad de dragados periódicos para mantener la capacidad de desagüe de la Ría de Bilbao, de modo que los depósitos de sedimentos no den lugar a un aumento de los riesgos de inundación en el casco urbano.

Cabe resalta que el presente apartado se basa completamente y cita textualmente varios apartados del *“Estudio sobre las características y frecuencia de los dragados a realizar en la Ría de Bilbao para el mantenimiento de su capacidad hidráulica”*, redactado por SAITEC en el año 2009.

9.1. EVOLUCIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE SEDIMENTOS

La Ría de Bilbao, como tramo final del Nervión-Ibaizabal sujeto a la influencia de las mareas, constituye una zona de sedimentación, lo que ha obligado históricamente a la Autoridad Portuaria a realizar dragados de mantenimiento para mantener practicable el canal de navegación y el calado en los muelles de atraque.

Los materiales depositados, si no se retiran periódicamente, van disminuyendo la sección del cauce y, por tanto, su capacidad hidráulica. El mantenimiento de esta capacidad hidráulica en torno a un valor objetivo requiere la realización de dragados periódicos en ciertas zonas. La extensión y frecuencia de dichos dragados deberán definirse en el ámbito de un programa de vigilancia y de comprobación periódica de la batimetría que permita estudiar la evolución de la capacidad de desagüe y determinar qué actuaciones de mantenimiento se precisan en cada momento.

Para analizar la evolución de los depósitos a lo largo de los años, y particularmente desde que se interrumpieron los dragados en los tramos en los que cesó la actividad portuaria, se han estudiado los siguientes datos batimétricos:

- Para el tramo comprendido entre el Abra y el Arenal:
 - Batimetría desde el Abra hasta el Arenal, incluyendo el canal de Deusto, realizada por la Autoridad Portuaria de Bilbao en el año 1998. Esta información batimétrica se utilizó en los estudios realizados para la Diputación Foral de Bizkaia: *“Estudio hidráulico de la ría del Nervión”* y *“Anteproyecto de las actuaciones de protección contra inundaciones de la ría de Bilbao”*.
 - Batimetría desde Zorroza hasta Deusto. Autoridad Portuaria de Bilbao, 2000.
 - Batimetría desde Rontegi hasta Zorroza. Autoridad Portuaria de Bilbao, 2003.
 - Batimetría desde Rontegi hasta Zorroza. Autoridad Portuaria de Bilbao, 2004.
 - Batimetría desde Zorroza hasta el Arenal. Autoridad Portuaria de Bilbao, 2005.
 - Batimetría desde Zorroza hasta el Arenal. Autoridad Portuaria de Bilbao, 2008.
- Para el tramo comprendido entre el Arenal y La Peña:
 - Batimetría desde el Arenal hasta La Peña, realizada por Azti-Tecnalia para el Ayuntamiento de Bilbao en el año 2008.
 - Perfiles procedentes del *“Proyecto constructivo de regeneración del tramo superior de la Ría de Bilbao”*, redactado para la Autoridad Portuaria de Bilbao en 1999. Esta información batimétrica se utilizó en los estudios anteriores: *“Estudio hidráulico de la ría del Nervión”* y *“Anteproyecto de las actuaciones de protección contra inundaciones de la ría de Bilbao”*.

A la vista de estas mediciones y de la información proporcionada por la Autoridad Portuaria de Bilbao, puede observarse que:

- En el tramo Zorroza-Deusto la comparación de las batimetrías no es significativa, y la aparente disminución del material sedimentado no es real, ya que entre unos sondeos y otros se han realizado dragados cuyo volumen se desconoce. Sin embargo, la necesidad de realizar dragados frecuentes para mantener abierta el canal de navegación indica claramente que existe una acumulación constante de sedimentos.
- En el tramo Deusto-Arenal no se han realizado dragados como mínimo desde el 2005, por lo que la comparación de las dos últimas batimetrías sí puede ser representativa de la dinámica de la sedimentación en el cauce.

En este caso, comparando los perfiles de los años 2005 y 2008 se observa que:

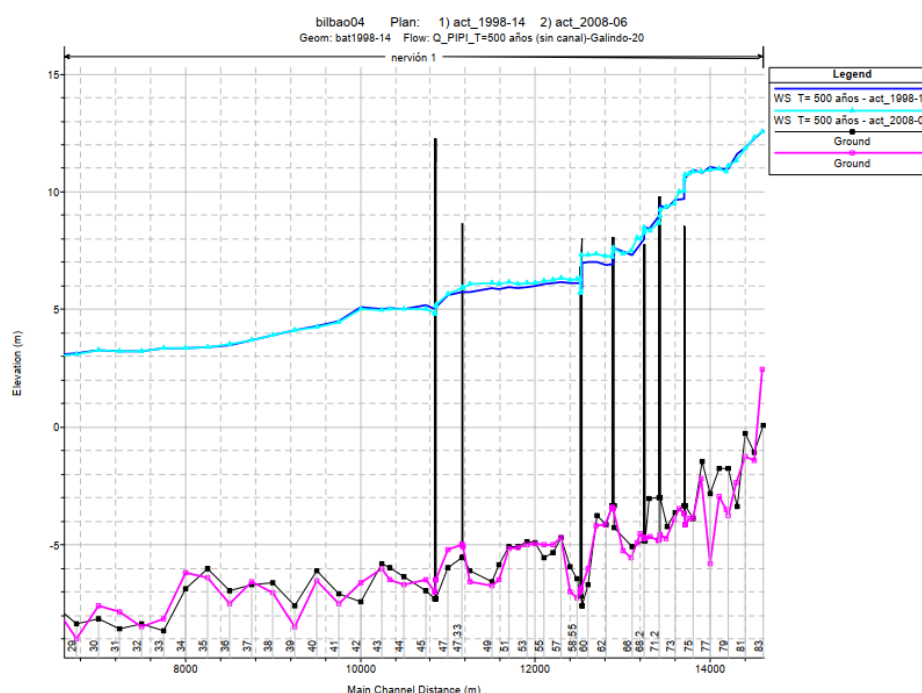
- En el tramo desde Euskalduna hasta Zubizuri, se producen acumulaciones de material en la mayoría de las secciones. Sólo se registran disminuciones del material sedimentado en las secciones próximas a los puentes, pero estos valores podrían no ser significativos, ya que en esas zonas la calidad de la batimetría disminuye sensiblemente.
- En el tramo desde Zubizuri hasta el Arenal, se producen sedimentaciones mínimas o incluso erosiones.
- En el tramo Arenal-Miraflores sólo se ha realizado un dragado reciente, en el año 2000, por lo que la comparación de los perfiles de los años 1998 y 2008, aunque no tiene en cuenta el volumen de ese dragado intermedio, sí puede proporcionar una orientación sobre la tendencia general en el cauce, donde parece predominar la erosión.

9.2. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA SEDIMENTACIÓN EN LA CAPACIDAD DE DESAGÜE DEL CAUCE

Para analizar el efecto de los depósitos de sedimentos en la capacidad de desagüe del cauce, se ha simulado mediante el programa HEC-RAS los efectos de la avenida de 500 años para la geometría actual del cauce y la que existía en 1998.

Es importante señalar que la comparación entre la lámina de agua de 1998 y la de 2008 proporcionará un valor mínimo de los efectos de la sedimentación, ya que durante esos diez años la acumulación de sedimentos se ha visto interrumpida por varios dragados. Si se suprimieran por completo los dragados durante diez años, las sedimentaciones totales serían mucho mayores que las registradas en el periodo 1998-2008, y también lo serían, en consecuencia, los efectos sobre la lámina de agua.

A continuación, aparecen el perfil longitudinal y las alturas de lámina obtenidas en cada sección para el Q500, tanto con la batimetría actual como con la de 1998 (en negro el terreno de 1998). Es preciso indicar que los perfiles de terreno se han obtenido uniendo los puntos más bajos de cada sección, por lo que pueden no ser representativos de la erosión o sedimentación totales registradas en cada tramo.



Comparación de perfiles longitudinales de las distintas batimetrías.

A la vista de los resultados, se observa que:

- En el tramo Zorroza - Deusto, donde la capacidad hidráulica del cauce es elevada, la pérdida de sección debida a la sedimentación no da lugar a sobreelevaciones significativas.
- En el tramo Deusto - Zubizuri, donde el cauce es algo más estrecho, la pérdida de sección da lugar a sobreelevaciones del orden de 15 a 20 centímetros, que agravan el problema de inundabilidad de las márgenes.
- En el tramo aguas arriba de Zubizuri no hay sedimentación que produzca pérdidas de sección hidráulica, pero las sobreelevaciones en el tramo Deusto - Zubizuri se transmiten hacia aguas arriba, empeorando la situación en el Casco Viejo, donde la insuficiencia del cauce ya es muy acusada.

A la hora de analizar estos resultados, hay que tener en cuenta dos aspectos:

- Por un lado, dadas las limitaciones de la información disponible, es posible que una parte de estas diferencias en la altura de lámina se deban a la falta de precisión de las batimetrías y de los perfiles empleados.
- Por otro lado, las sedimentaciones totales durante el periodo 1998-2008 han sido menores que las que se habrían registrado en un periodo de diez años sin dragados. Por esta razón, si se suprimieran completamente los dragados durante diez años, las sobreelevaciones de la lámina serían mayores que las que resultan de la comparación anterior.

Por tanto, puede afirmarse que la sedimentación origina una pérdida de capacidad de desagüe lo bastante significativa como para hacer preciso un programa de vigilancia, comprobación y mantenimiento de la batimetría del cauce.

9.3. ESTIMACIÓN DE LOS DRAGADOS NECESARIOS

Para la estimación de los volúmenes de dragado necesarios, se han adoptado las siguientes hipótesis, que deberán reconsiderarse en función de los resultados de las sucesivas campañas de seguimiento:

- La longitud mínima a dragar sería la correspondiente al tramo Deusto - Zubizuri, donde los depósitos tienen mayor repercusión sobre la lámina, pero se recomienda extender las campañas de dragado hasta Zorroza, que corresponden a los 5.450 metros del tramo Zorroza - Zubizuri en el que predomina la sedimentación.
- Las tasas de sedimentación se han estimado a partir de la comparación de las batimetrías de los años 2005 y 2008, mediante el siguiente proceso:
 - Se ha calculado, para cada sección, el volumen anual acumulado, en m^2 de sedimentos / año.
 - Ese volumen anual se ha dividido por la sección hidráulica, para obtener una tasa anual de sedimentación, expresada en m^2 de sedimentos / m^2 sección / año.
 - Se han analizado las tasas anuales obtenidas en cada sección, sin considerar las secciones de los puentes, debido a la falta de precisión en esas zonas.
 - Como resultado de ese análisis, se ha adoptado una tasa anual de sedimentación de $0,010 \text{ m}^2$ de sedimentos / m^2 sección / año, constante para todas las secciones. Esta tasa equivale a una pérdida anual del 1% de la sección hidráulica inicial.
- Con esa tasa de sedimentación, y teniendo en cuenta las distancias entre secciones, se ha calculado un volumen de dragado de 135.000 m^3 cada diez años.
- A efectos de presupuesto, se ha estimado un precio de 12 €/m^3 en ejecución material, incluyendo no sólo los costes del dragado, sino también la carga y transporte a vertedero o gestor de residuos, así como el canon de vertido o los costes de la gestión de residuos necesaria.

A partir de ese precio, el coste preliminar estimado para cada campaña de dragados sería de $2,2 \text{ M€}$, siempre teniendo en cuenta las imprecisiones que afectan a la precisión de la información manejada.

9.4. CONCLUSIONES

- El mantenimiento de la capacidad de desagüe en la Ría es una necesidad especialmente crítica a corto y medio plazo, dado que las obras de los túneles de desvío para resolver el problema de inundabilidad, sólo se han definido a nivel de anteproyecto, sin que se haya planificado todavía su ejecución, ni se haya abordado la redacción del correspondiente proyecto constructivo.
- En el inicio de la ría del Nervión a la altura del barrio de La Peña, el caudal de diseño asociado a un periodo de retorno de 500 años es de $2.510 \text{ m}^3/\text{s}$.
- De acuerdo con el "Anteproyecto de las actuaciones de protección contra inundaciones en la ría de Bilbao", para evitar la inundación del casco urbano de Bilbao durante la avenida de periodo de retorno de 500 años, una vez construidos los túneles de desvío para un caudal de $1.320 \text{ m}^3/\text{s}$, el cauce actual de la Ría entre La Peña y Olabeaga debería ser capaz de conducir sin desbordamientos un caudal de $1.190 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta capacidad se ha definido como objetivo básico a mantener en los estudios realizados.
- Aunque la información disponible es muy limitada, los datos parecen indicar que en el tramo comprendido entre Zorroza y Zubizuri se producen sedimentaciones importantes, mientras que aguas arriba de Zubizuri predominaría la erosión.

- En cuanto a la pérdida de capacidad hidráulica debida a la sedimentación de los últimos diez años, se observa que, en el periodo 1998-2008:
 - En el tramo Zorroza - Deusto, donde la capacidad hidráulica del cauce es elevada, la pérdida de sección debida a la sedimentación no habría dado lugar a sobreelevaciones significativas al paso de la avenida de 500 años.
 - En el tramo Deusto - Zubizuri, donde el cauce es algo más estrecho, la pérdida de sección habría dado lugar a sobreelevaciones del orden de 15 a 20 centímetros, que habrían agravado el problema de inundabilidad de las márgenes.
 - En el tramo aguas arriba de Zubizuri no ha habido sedimentación que produzca pérdidas de sección hidráulica, pero las sobreelevaciones en el tramo Deusto - Zubizuri se habrían transmitido hacia aguas arriba, empeorando la situación en el Casco Viejo, donde la insuficiencia del cauce ya es muy acusada.
- La comparación entre la lámina de agua de 1998 y la de 2008 proporciona un valor mínimo de los efectos de la sedimentación, ya que durante esos diez años la acumulación de sedimentos se ha visto interrumpida por varios dragados. Si se suprimieran por completo los dragados durante diez años, las sedimentaciones totales serían mucho mayores que las registradas en el periodo 1998-2008, y también lo serían, en consecuencia, los efectos sobre la lámina de agua.
- Aunque parte de las diferencias en la altura de lámina podrían achacarse a la falta de precisión de las batimetrías y de los perfiles empleados en la comparación, sí puede afirmarse que hay una pérdida de capacidad de desagüe lo bastante significativa como para requerir el **establecimiento de un programa de vigilancia, comprobación y mantenimiento de la batimetría del cauce**. Este programa constaría de las siguientes actuaciones:
 - Una campaña de seguimiento cada tres años, en la que se realizase una nueva batimetría del tramo Zorroza – Arenal y se estimara la tasa de sedimentación correspondiente a ese periodo, corregida, en su caso, para tener en cuenta los efectos de eventuales avenidas.
 - Una campaña de dragados en el tramo Zorroza - Zubizuri, que, con los datos provisionales obtenidos, debería realizarse con una periodicidad de diez años, aunque esta frecuencia podría reconsiderarse en función de los resultados de las campañas de seguimiento. Basándose en un volumen de dragado estimado de unos 135.000 m³, esta campaña supondría un coste del orden de 2,2 M€.

10. BATIMETRÍAS

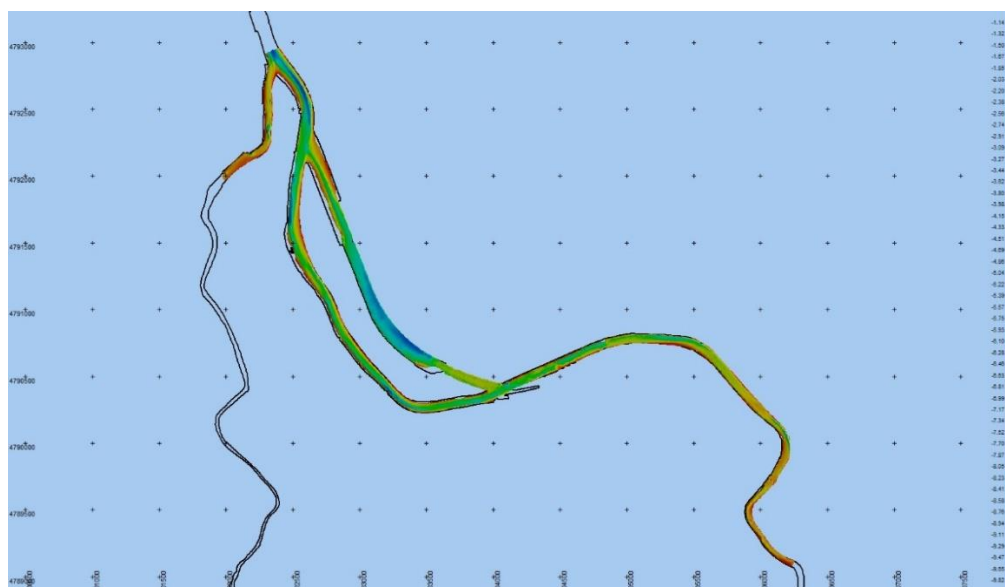
10.1. BATIMETRÍAS HISTÓRICAS

En el cuadro siguiente se resumen las fechas y alcance de los reconocimientos batimétricos registrados, así como el origen de la información:

AÑO	FUENTE	TRAMO
Anterior a 1992	Gobierno Vasco	La Peña - Abra
1998	Autoridad Portuaria de Bilbao	La Peña - Ayuntamiento
1998	Autoridad Portuaria de Bilbao	Arenal – Abra + canal de Deusto
2000	Autoridad Portuaria de Bilbao	Euskalduna – Asúa
2003	Autoridad Portuaria de Bilbao	Zorrotza - Asúa
2004	Autoridad Portuaria de Bilbao	Zorrotza - Asúa
2005	Autoridad Portuaria de Bilbao	Arenal - Asúa
2008	Autoridad Portuaria de Bilbao	Zorrotza - Arenal
2012	Autoridad Portuaria de Bilbao	Euskalduna - Ayuntamiento
2016	Autoridad Portuaria de Bilbao	Elorrieta - Euskalduna
2019	Ayuntamiento de Bilbao	Elorrieta - Bolueta
2019	Ayuntamiento de Bilbao	Cadagua – Zorrotza + Bolueta – La Peña

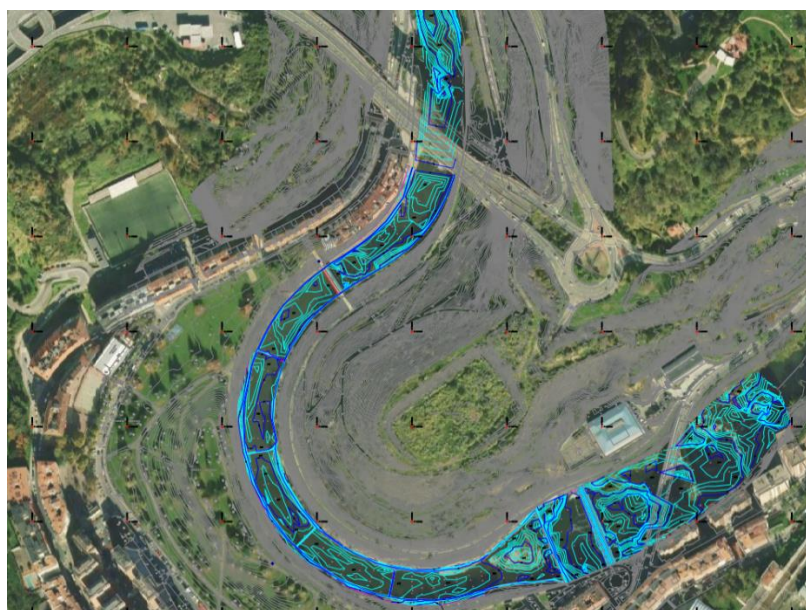
Resumen de la última información batimétrica disponible.

Para el presente Estudio se ha realizado un levantamiento batimétrico mediante sonda multihaz de la Ría de Bilbao entre el Puente de San Antón y Elorrieta, realizado por AZTI en septiembre y noviembre de 2019.



Batimetría de la Ría de Bilbao (2019).

Además, también se dispone de una campaña batimétrica realizada por Demoliciones Submarinas entre los tramos del Cadagua – Zorrotza y Bolueta – La Peña, teniendo de esta forma la batimetría completa del cauce de la Ría de Bilbao y del Cadagua a su paso por el Termino Municipal de Bilbao.



Batimetría de la Ría de Bilbao en la zona de la Peña (2019).

10.2. COMPARACIÓN DE LAS ÚLTIMAS BATIMETRÍAS

Se han comparado las últimas batimetrías recogidas por la Autoridad Portuaria de Bilbao y la última batimetría de la Ría de Bilbao (2019) realizada para el presente Estudio.

Las batimetrías proporcionadas por Autoridad Portuaria de Bilbao, una vez finalizados los dragados de mantenimiento, son las siguientes:

- Batimetría mono-haz (año 2012) aguas arriba del puente Euskaduna hasta el puente del Ayuntamiento.
- Batimetría multi-haz (año 2016) aguas abajo del puente del Euskalduna hasta Elorrieta realizadas después de los últimos dragados en 2015.

Hay que indicar que las batimetrías estaban referidas originalmente al Cero del Puerto de Bilbao, que se corresponde aproximadamente con la bajamar máxima viva equinoccial; sin embargo, para homogeneizar la información del cauce y la de las márgenes y facilitar las comparaciones, todas las batimetrías se han referido al NMMA (Nivel Medio del Mar en Alicante).

Una vez obtenidos los modelos de superficie de ambas batimetrías se procede a calcular una superficie de sedimentación como diferencia entre ellas. De este modo, se obtiene un modelo aproximado de la altura de sedimento acumulado, que se utiliza para analizar a nivel cualitativo en qué zonas predomina la sedimentación (valores positivos) y, en cuáles, la erosión (valores negativos).

En las siguientes imágenes se representan las alturas del sedimento acumulado y erosionado.

10.2.1. Tramo Ayuntamiento - Euskalduna



Comparación batimetrías APB (2012) y AZTI (2019). Tramo Ayuntamiento-Euskalduna.

En la zona del puente de Deusto se producen erosiones significativas, tal y como se recoge en el Estudio de Erosión de SENER, es una zona con alto potencial de socavación. Sin embargo, no es peligrosa ya que las estructuras de ribera están pilotadas.

Aguas arriba de Zubizuri se producen sedimentaciones importantes del orden de 1,0 a 1,2 m de espesor.

Aguas abajo del Puente del Ayuntamiento se producen pequeñas acumulaciones de sedimentos y también erosiones mínimas.

10.2.2. Tramo Euskalduna - Elorrieta



Comparación batimetrías APB (2016) y AZTI (2019). Tramo Euskalduna-Elorrieta.

La comparación de la batimetría de la Autoridad Portuaria de Bilbao (2016) y la de AZTI (2019) realizada para el presente Estudio, muestra que existe una acumulación constante de sedimentos a lo largo del canal principal de navegación de la Ría.

Además, se aprecian las zonas del Canal de Deusto en las que se han realizado cambios entre el 2016 y el 2019: la apertura del Canal de Deusto, la construcción del Puente de Frank Gehry, el estribo del Puente de San Ignacio sobre el Canal de Deusto, y la ejecución de Rellenos en las márgenes de Zorrotzaurre.

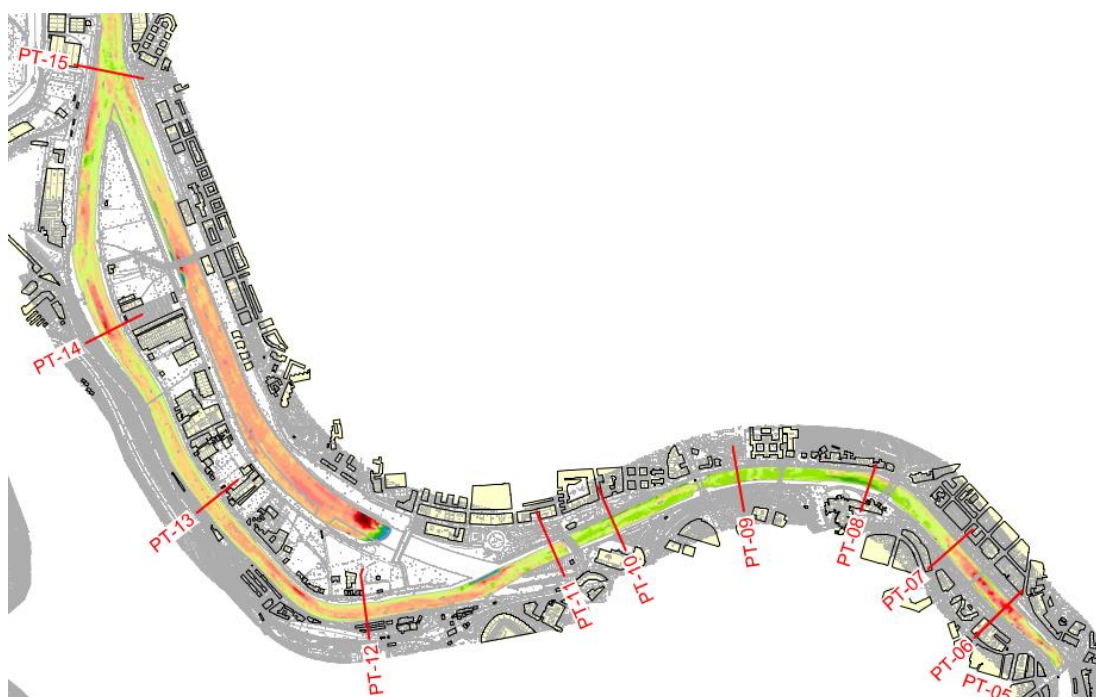
En la tabla siguiente, se recoge el volumen y el área de las zonas de sedimentación/erosión de la comparación de superficies realizada:

TRAMO	ZONA	ESPESOR MÁXIMO (m)	ÁREA (m ²)	VOLUMEN (m ³)
Ayuntamiento-Euskalduna (2012-2019)	Erosión	1,33	66.739,30	20.487,91
	Sedimentación	1,20	30.958,36	9.500,48
Euskalduna-Elorrieta (2016-2019)	Erosión	0,29	141.693,92	43.282,08
	Sedimentación	1,13	296.193,48	76.443,38

Tabla de resultados comparación de batimetrías.

10.3. PERFILES TRANSVERSALES

En este apartado se analizan las batimetrías históricas según la información disponible en el “*Estudio sobre las características y frecuencia de los dragados a realizar en la ría de Bilbao para el mantenimiento de su capacidad hidráulica*” realizado por SAITEC EN 2009. Además de las últimas batimetrías llevadas a cabo por la Autoridad Portuaria de Bilbao y el reconocimiento batimétrico realizado en el año 2019 para el presente Estudio.



Planta general. Perfiles comparación entre batimetrías.

Como se puede observar en el siguiente perfil en la zona comprendida entre los puentes del Ayuntamiento y Zubizuri se ha producido una acumulación importante de sedimentos entre 0,80 y 1,0 metro en ciertas zonas respecto a la última batimetría realizada.

P.C.:10,00	
COTAS AÑO 2019	3,02
COTAS AÑO 2016	3,02
COTAS AÑO 2008	3,57
COTAS AÑO 2005	4,03
COTAS AÑO 2000	2,47
COTAS AÑO 1998	2,49

PT-14

Perfil transversal PT-14 en la zona central del cauce de la isla de Zorrotzaurre

10.4. RECOMENDACIONES

Con el objetivo de mantener los calados óptimos para la navegación en cada uno de los tramos en que se ha dividido la Ria, en función de los calados actuales (batimetría realizada para el Estudio en 2019), se recomienda establecer un “Programa de vigilancia y comprobación de la batimetría del cauce”.

Se recomienda realizar una campaña de seguimiento cada **dos años**, en la que se realice una nueva batimetría del tramo comprendido entre Zorroza y el puente de San Antón, pudiéndose estimar de este modo la tasa de sedimentación/erosión correspondiente a ese periodo.