



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



DISEÑO DEL TRAMO DIFUSOR DE UN EMISARIO SUBMARINO

Trabajo realizado por:
Pablo Fernández Sancha

Dirigido:
Andrés García Gómez

Titulación:
Grado en Ingeniería Civil

Santander, Julio de 2014

TRABAJO FINAL DE GRADO



JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

El presente trabajo está destinado al diseño de una parte de un emisario submarino, el tramo difusor. Se trata del tramo final de un emisario, por lo que para llevar a cabo este trabajo, será necesario asumir una serie de datos de partida obtenidos a partir de estudios previos.

El emisario cuyo tramo difusor se pretende diseñar se ubica en Bilbao, junto al puerto. El Consorcio de Aguas de Bilbao Bizkaia, entidad responsable de la gestión en red primaria, tanto del abastecimiento de agua potable como del saneamiento de las aguas residuales de la zona, tiene entre sus objetivos, un proyecto de mejora del saneamiento de la Comarca del Gran Bilbao (Plan Integral de Saneamiento del Nervión), que incluye, entre otros, la mejora de las conducciones de saneamiento y la construcción de una nueva estación depuradora de aguas residuales (EDAR de Lamiako) que sirva de apoyo a la EDAR de Galindo, que, tras más de 20 años de funcionamiento, comienza a estar un tanto saturada debido al aumento de la población. La conclusión de este proyecto consiste en la construcción de un emisario submarino que evacue las aguas residuales tratadas de las depuradoras lejos de la costa, consiguiendo un saneamiento importante de la Ría del Nervión, que es quien en la actualidad recibe esas aguas residuales.

En su momento se plantearon dos posibles alternativas para la ubicación del emisario: una cuyo punto de salida al mar se situara en la margen izquierda del Abra de Bilbao, lo que se conoce como Punta Lucero y otra cuyo punto de salida al mar se situara en su margen derecha, lo que se conoce como Punta Galea.

El estudio de ambas alternativas se llevó a cabo, previa solicitud del Consorcio de aguas de Bilbao Bizkaia al Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria, por un equipo técnico de dicha universidad.

De esta manera, los datos de partida previos que se tomarán para la realización del diseño del tramo difusor del emisario submarino serán los correspondientes a los de este proyecto de la Universidad de Cantabria, en particular, los correspondientes a la alternativa de Punta Galea, que es la elegida para este trabajo.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

El principal dato de partida que se tomará será la traza de tubería del emisario que va desde el punto de salida al mar hasta inicio del tramo difusor. Para este diseño, se tendrán en cuenta aspectos ambientales, hidráulicos y constructivos.

Por un lado, se hará un estudio de la contaminación que produce el efluente vertido. Esto se realizará a través del cálculo de la dilución inicial. Este cálculo podrá realizarse a través de varios métodos, con la correspondiente posterior comparación de los resultados obtenidos, incluyendo la comparación con los resultados obtenidos en el estudio inicial de la Universidad de Cantabria previamente mencionado. Se tomará el método más actualizado, lo cual supone, supuestamente, mayor sofisticación y unos resultados más fieles a la realidad. Se trata del estudio llevado a cabo por Philip J. W. Roberts y colaboradores entre los años 2004 y 2006.

Este cálculo de la dilución inicial permitirá establecer una determinada longitud de tramo difusor que permita cumplir con las restricciones de contaminación y criterios medioambientales incluidos en la Normativa española.

Por otro lado se realizará un estudio del funcionamiento hidráulico de la instalación, en el que se determinará la necesidad o no de incorporar un sistema de bombeo para la evacuación de los efluentes. Se tendrá en cuenta el carácter estacional de la marea, con pleamares y bajamares, y se recurrirá al programa informático EPANET para determinar qué dimensiones de las distintas conducciones que componen el tramo difusor (tubería principal, elevadores y difusores) permiten un correcto funcionamiento.

Además, dicha configuración del tramo difusor, tendrá como objetivo reducir al mínimo posible las pérdidas de carga, tanto en la tubería, como elevadores, difusores y posibles válvulas antirretorno que se coloque el extremo de los difusores. Se deberá tener en cuenta la existencia de unas velocidades mínimas delimitadas por una serie de factores (autolimpieza, intrusión salina, aparición de burbujas).

Por último se determinará el material con el que se construirá el tramo en cuestión. Tanto este aspecto como el método constructivo empleado y la batimetría y materiales depositados que tenga la zona por la que pase la traza del emisario, están directamente relacionados, habiendo una gran dependencia entre ellos.



Memoria



Índice

1. INTRODUCCIÓN	6
2. DATOS DE PARTIDA	12
2.1. DENSIDAD DEL MEDIO RECEPTOR	12
2.2. CAUDALES DE DISEÑO	13
2.3. CARGAS CONTAMINANTES	15
2.4. TRAZA DE LA TUBERÍA	16
2.4.1. ESTUDIO PREVIO	17
3. CARTOGRAFÍA, TOPOGRAFÍA Y BATIMETRÍA	24
4. SITUACIÓN DEL SANEAMIENTO DE BILBAO	29
4.1. DEPURADORA DE GALINDO	30
5. LEGISLACION ESPAÑOLA APLICADA	33
5.1. INTRODUCCIÓN	33
5.2. ANTECEDENTES	34
5.3. INSTRUCCIÓN 1993	35
6. DISEÑO AMBIENTAL	36
6.1. INTRODUCCIÓN	36
6.2. MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA DILUCIÓN INICIAL	38
6.3. MODELO DE ROBERTS Y COLABORADORES	39
6.4. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO	42
6.5. METODOLOGIA SEGUIDA EN EL CÁLCULO	48
6.6. VALORES OBTENIDOS PARA EL CASO DEL EMISARIO DE BILBAO.	50
6.7. CONCLUSIONES	56
7. DISEÑO HIDRÁULICO	58
7.1. INTRODUCCIÓN	58
7.2. OBJETIVOS	59
7.3. MODELO EMPLEADO	64
7.4. FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL EMISARIO	66
7.4.1. VELOCIDAD CRÍTICA DE LIMPIEZA DE LA TUBERÍA	66
7.4.2. VELOCIDAD CRÍTICA EN EL TUBO ELEVADOR	68
7.4.3. LIMPIEZA DE BURBUJAS DE AIRE DEL EMISARIO	69
7.5. METODOLOGÍA	71
7.5.1. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE DISEÑO	71



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

7.5.2. Elección el material de construcción.....	76
7.5.3. PÉRDIDAS DE CARGA.....	77
7.5.4. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL CÁLCULO	83
7.6. RESULTADOS	86
7.6.1 Alternativa 1	87
7.6.2. Alternativa 2	92
7.6.3. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS Y CONCLUSIONES.....	97
8. Conclusiones.....	99



1. INTRODUCCIÓN

La evacuación del agua residual que, tras ser tratada, sale de una estación depuradora de agua residual (EDAR) se realiza siempre a través de vertidos a medios acuáticos. En zonas costeras las dos alternativas más comunes son el vertido directo en ríos (desembocaduras o estuarios que acaban en el mar) o el vertido en el mar, el cual puede llevarse a cabo de manera “simple” vertiendo el agua directamente junto a la costa, o disponiendo una conducción que permita el vertido mar adentro lejos de la misma. En el ámbito de la ingeniería hidráulica y más concretamente de la rama de la ingeniería sanitaria, a esta conducción específica se la denomina emisario submarino. Se trata de una tubería que transporta las aguas residuales tratadas de una población hacia el mar, a una distancia prudente de la costa y a una determinada profundidad, a la cual las aguas residuales no suponen un riesgo de contaminación.

Este es el método más sofisticado de vertido y el único que, con caudales importantes de aguas residuales, permite cumplir con la normativa a efectos de contaminación del medio acuático. En España, la normativa viene recogida en la “Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar” del año 1993, en donde se establecen cuáles son los niveles mínimos de dilución exigidos.

Un emisario submarino consta básicamente de dos partes, la tubería de conducción de gran longitud, que lleva las aguas residuales provenientes de las estaciones depuradoras mar adentro, y un tramo final no tan largo, compuesto por una serie de dispositivos especiales llamados difusores, por los que el efluente es expulsado al medio marino.

Este trabajo tomará como dato de partida, el diseño de la tubería inicial y se centrará en el correspondiente del tramo difusor, que pese a su considerablemente menor longitud frente a la de la tubería, es el elemento fundamental de un emisario. Dicho diseño se realizará desde diferentes ópticas, abarcando aspectos relacionados con la funcionalidad medioambiental, hidráulica y estructural.

La función de los difusores es repartir el caudal efluente por una serie de orificios de forma que se consiga incrementar el área en que se realiza la descarga y así favorecer la mezcla y homogeneización del vertido con el medio receptor (el agua de mar). Tanto la



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

colocación (separación, disposición, orientación, etc.) como el número de difusores serán motivo de estudio pues de ello depende en gran medida el nivel de dilución que se alcance. Este tramo está formado por una serie de salidas u orificios con una determinada separación entre ellos, por los que sale el efluente. Cada salida está compuesta de un tubo elevador que conduce el vertido en dirección ascendente hasta su parte superior, donde se encuentran los difusores propiamente dichos. En cada elevador podrá haber más de un difusor.

A la salida de los difusores, los chorros del efluente, denominados a partir de aquí “plumas”, continuarán con su dirección ascendente debido a la diferencia de densidad del agua residual con el agua de mar. El contacto del efluente con el medio marino, durante el tiempo que tarda la pluma en ascender a la superficie del mar, permite que se produzca un proceso de dilución, reduciendo considerablemente el valor de la concentración de contaminación de origen fecal. Este efecto es conocido como dilución inicial, y como se ha dicho previamente, se trata de un proceso de mezcla dominado en su mayor parte por las diferencias de densidad. Este es el principal requisito que recoge la normativa anteriormente mencionada, estableciendo el valor mínimo de dilución inicial en 100 (esto es, por ejemplo, 1 litro de aguas negras en 100 litros de agua limpia). Así, se consigue fundamentalmente, reducir la concentración de materia orgánica y nutrientes a niveles que evitan efectos ecológicos adversos.

Alcanzadas las capas superficiales del mar, la pluma de vertido sufre un proceso de esparcimiento que permite continuar con la reducción de la concentración de contaminantes. De esta manera, se crea una zona de mezcla cuya evolución y alcance está marcada por la acción de las corrientes marinas, especialmente por la marea y por las corrientes debidas a la interacción del viento. La dispersión del efluente hacia zonas alejadas, produce un fenómeno de desaparición bacteriana que contribuye a una reducción sustancial de la concentración de contaminación de origen fecal en el agua. Este segundo proceso de dilución se denomina dilución secundaria o de campo lejano. En este caso, los criterios de calidad del agua tienen el fin de proteger y preservar la calidad de las aguas en las zonas costeras, donde, dependiendo del lugar puede referirse a zonas de baño, zonas de pesca y cultivo de especies marinas, zonas de disfrute estético, etc.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

El diseño del tramo difusor no está dirigido únicamente a contemplar un valor adecuado de la dilución inicial. Se trata de una obra hidráulica y como cualquier infraestructura de este perfil, tiene que poder hacer frente a los caudales que por ella van a circular y en particular, este elemento ha de ser capaz de evacuar el efluente de manera adecuada.

De este modo, habrá una serie de aspectos a considerar a la hora de estudiar el comportamiento hidráulico del emisario submarino:

- Limitar las pérdidas de carga

El efluente evacuado procede de las estaciones depuradoras previas, por lo que el caudal que pase por el emisario dependerá de una serie de factores que harán que exista un régimen de caudales variable.

De esta manera, habrá un caudal máximo, que la infraestructura deberá ser capaz de evacuar con la menor pérdida posible ya que esta circunstancia será clave a la hora de determinar la necesidad o no de instalar un sistema de bombeo y que potencia requerirá el mismo.

- Asegurar el reparto uniforme de caudales en los difusores

Es imprescindible un adecuado diseño que permita este reparto uniforme, pues con ello se consigue la mejor situación en relación a la mezcla de efluente con el medio marino y a la dilución inicial. Además, esto permite conseguir el aprovechamiento más eficaz posible de todo el tramo difusor del emisario.

- Garantizar la autolimpieza de la infraestructura

En este emisario submarino en particular, la diferencia entre los caudales máximo y mínimo a evacuar es significativa por lo que en su diseño será igual de importante la consideración de ambos caudales. Así, en lo referente al caudal mínimo, se deberá conseguir una velocidad mínima de circulación que asegure la autolimpieza del interior de la instalación, evitando problemas de sedimentación.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Aunque, con carácter general, en la parte inicial del emisario se coloca una reja para evitar la entrada de sólidos de gran tamaño que atasquen la tubería, velocidades bajas pueden producir que ciertas partículas sedimenten y produzcan una reducción de la sección efectiva de la conducción.

En caso de que este requerimiento sea imposible de conseguir, se deberá almacenar un volumen de agua que al soltarlo se consiga esa velocidad mínima.

- Evitar la intrusión salina

Este es un fenómeno a evitar pues produce una reducción del área efectiva por la que puede circular el efluente.

Cuando la presión del medio exterior es mayor que la del fluido del interior de la conducción, el agua marina y las sustancias y organismos que en ella se encuentran entran en la interior del emisario través de los difusores, originando una reducción de la capacidad de desagüe del mismo. Para evitar esta circunstancia, también habrá que establecer una velocidad mínima en el diseño del emisario submarino.

Un régimen de caudales variable como el de este caso, puede implicar velocidades mínimas excesivamente bajas. Ante este contratiempo, existe la posibilidad de colocar válvulas antirretorno que solo permitan el flujo de efluente en una dirección (la de salida).

- Evitar la aparición de burbujas de aire

Este es un aspecto que también está relacionado con la determinación de una velocidad mínima. Es un problema que sobretodo ha de tenerse en cuenta en tuberías de plástico y su solución se basa en conseguir una velocidad mínima adecuada con la que se pueda alcanzar un régimen suficientemente turbulento que permita el arrastre de estas burbujas, en el caso de que aparezcan.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Como cualquier obra de ingeniería civil, es necesario realizar un diseño estructural que garantice la durabilidad, fiabilidad y resistencia de la estructura que se pretende proyectar. Este apartado incluye la elección de los materiales de la tubería y del método constructivo. Ambos dependerán en gran medida de la batimetría y geofísica de la zona así como del clima marítimo que se dé.

Es especialmente relevante la elección de un material adecuado para la construcción del emisario submarino, pues condicionará tanto aspectos constructivos posteriores como aspectos de explotación. En primer lugar, la elección del método constructivo quedará supeditada al material seleccionado, debido en gran parte, a la capacidad de cada material de soportar los esfuerzos que aparecen en el proceso de colocación del emisario y en particular, a la curvatura que permitan desarrollar. En segundo lugar, cada material tendrá unas características específicas que limitarán el funcionamiento hidráulico de la estructura. Toma especial importancia la rugosidad, la cual condicionará las pérdidas que se vayan a producir y por tanto, como expresé anteriormente, el gasto energético en caso de que se necesite colocar un sistema de bombeo.

El último paso en el diseño constructivo, es la configuración de la protección que se acoplará a la infraestructura del emisario submarino. Este proceso dependerá en gran medida de los materiales depositados en el fondo por el que pasa la traza del emisario. Generalmente se dispondrá una base de arena sobre el tramo difusor y una serie de capas de áridos grueso (usualmente escollera) dispuestos alrededor del emisario en forma de dique.

Otro aspecto importante en el diseño de este tipo de obra civil, es la ubicación del emisario y consiguientemente del tramo difusor. Este aspecto queda definido por medio de dos elementos de la geometría del emisario, por un lado su orientación y por otro la distancia que haya del tramo difusor a la costa. Generalmente la orientación del tramo queda coartada por la disposición de las curvas batimétricas, de manera que se intenta que la planta de la estructura sea perpendicular a estas. Ello supone la disposición más eficaz del emisario consiguiendo la mayor profundidad del tramo difusor (más espacio para que se desarrolle el proceso de dilución inicial) por unidad de metro de emisario. Esto implica un ahorro en la longitud de la de tubería y consiguientemente un ahorro económico. Se trata de conseguir la mínima distancia que permita satisfacer los criterios



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

de calidad de agua en la costa, que en este caso está representada por zonas de baño y zonas de producción de moluscos.

El emisario submarino objeto de este trabajo quedará situado en la zona costera de Bilbao, junto al puerto de la ciudad. El sistema de saneamiento de la Comarca del gran Bilbao necesita de nueva infraestructura para poder evacuar los efluentes depurados de las aguas residuales que salen de sus dos principales EDARes, Galindo y Lamiako. La construcción de este elemento, permitirá cambiar las prácticas de trabajo llevadas a cabo hasta ahora en las estaciones depuradoras de la zona en lo referente al vertido de los efluentes, unas prácticas basadas en la evacuación de los efluentes directamente a la ría del Nervión.

El punto de salida del emisario submarino de este trabajo se encuentra en Punta Galea, cabo situado al este del puerto de Bilbao. Se trata de una zona de acantilado fuera de la protección que ofrece el puerto y muy próximo a zonas de playa con mucha afluencia de la población de Bilbao en época de verano.

Este emisario, planteado desde un principio por el Consorcio de Aguas de Bilbao Bizkaia, tuvo otra posible ubicación a parte de la de Punta Galea. Se trataba de Punta Lucero, otro cabo situado en la margen opuesta del puerto de Bilbao, también situado en las inmediaciones del mismo, pero fuera de su protección.



2. DATOS DE PARTIDA

2.1. DENSIDAD DEL MEDIO RECEPTOR

A continuación se disponen los perfiles de densidad de todos los meses del año, necesarios ya que para el cálculo de la dilución inicial se emplearán expresiones matemáticas que tienen en cuenta un medio estratificado. Se muestran en la Figura 1, la densidad en unidades sigma-t por la profundidad:

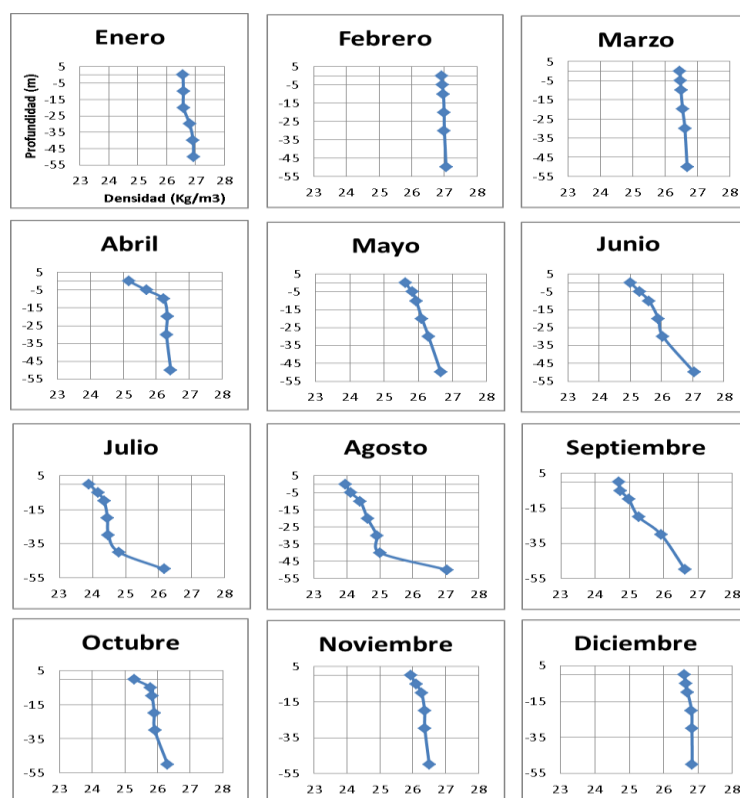


Figura 1. Perfiles de densidad en la columna de agua.

Para la realización de los cálculos de dilución inicial se ha adoptado un valor de densidad para las aguas residuales depuradas vertidas a través de la conducción submarina de 1000 kg/m^3 .



2.2. CAUDALES DE DISEÑO

Se muestran los datos de caudales aportados por el Consorcio de Aguas de Bilbao Bizkaia del año 1974, considerado como año húmedo, conseguidos a partir de registros cada veinte minutos todos los días del año. En la Figura 2 se representan los caudales en orden cronológico, acompañados del caudal medio, del caudal para una probabilidad de ocurrencia del 95% y del caudal para una probabilidad de ocurrencia del 99%:

Qmaximo	Qmedio	Q _{95%}	Q _{99%}
23 m ³ /s	6,3 m ³ /s	11,996 m ³ /s	18,091 m ³ /s

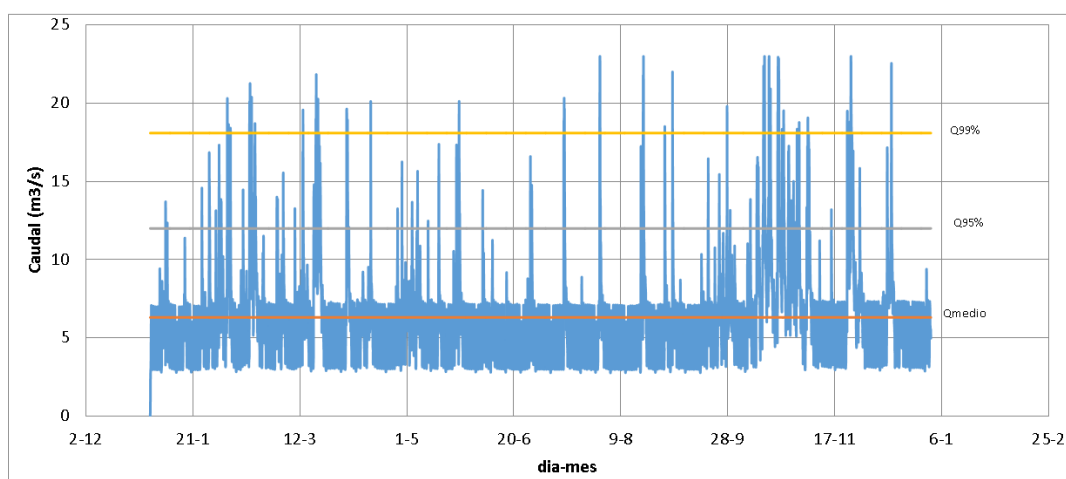


Figura 2. Caudales del año 1974.

En la Figura 3 se muestran los datos de caudales aportados por el Consorcio de Aguas de Bilbao Bizkaia del año 1996, considerado como año seco. En este caso, los datos proceden de registros llevados a cabo cada quince minutos:

Qmaximo	Qmedio	Q _{95%}	Q _{99%}
23 m ³ /s	5,856 m ³ /s	10,256 m ³ /s	14,049 m ³ /s



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

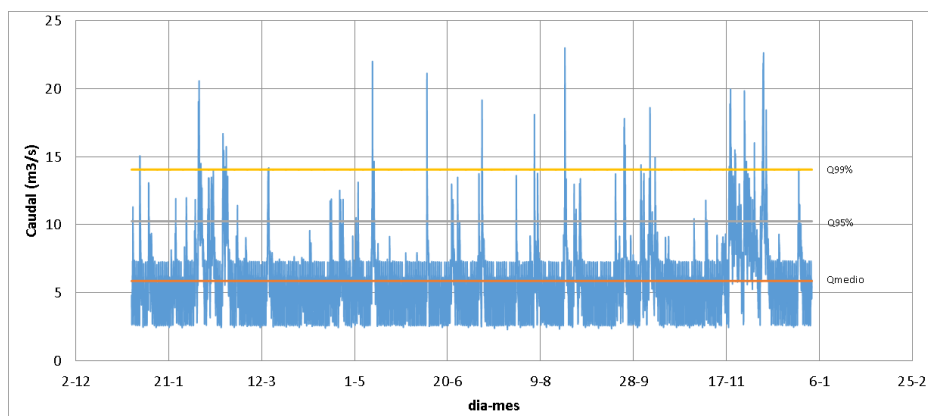


Figura 3. Caudales del año 1996.

A continuación, en las Figuras 4 y 5, se representan en tanto por uno la probabilidad de no ser superado de los caudales de cada uno de los años:

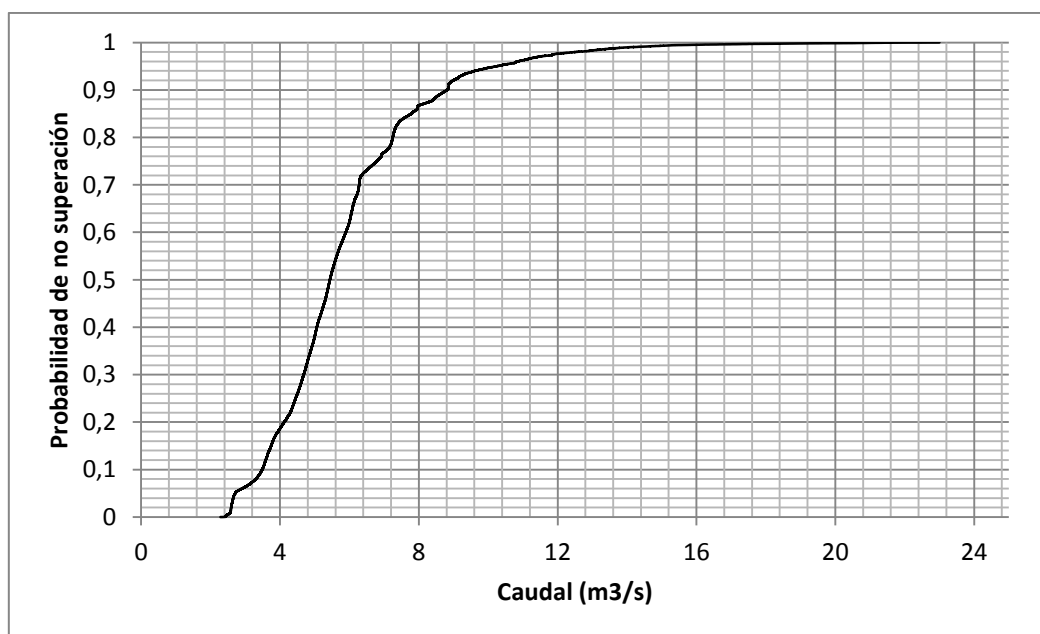


Figura 4. Curva de caudales clasificados (1974).

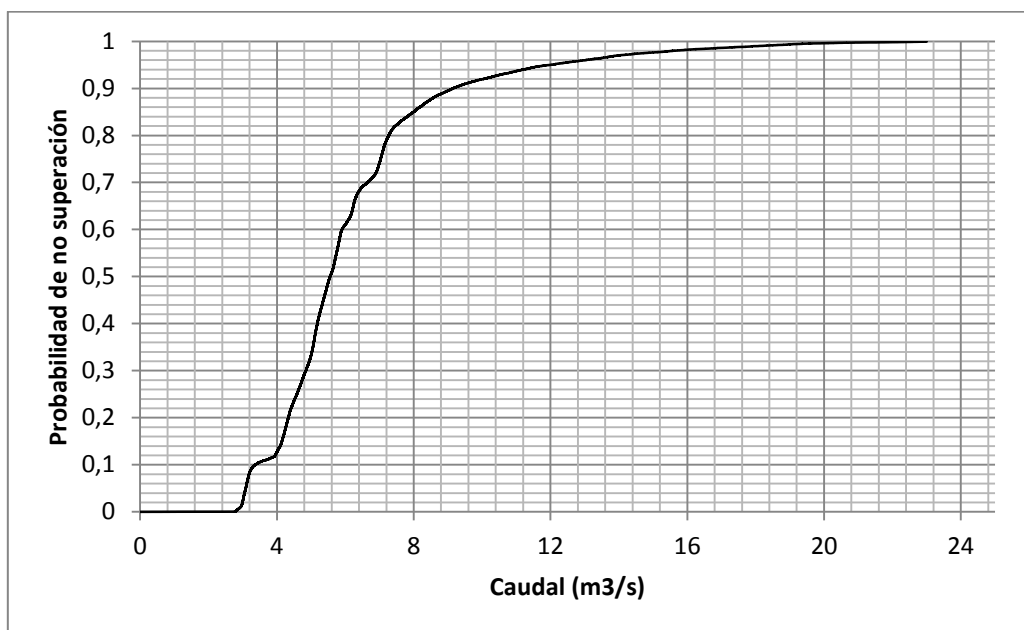


Figura 5. Curva de caudales clasificados (1996).

2.3. CARGAS CONTAMINANTES

Se dispone de las cargas de contaminación bacteriana calculadas por el Consorcio de Aguas de Bilbao Bizkaia para los años seco y húmedo. Están directamente relacionadas con el caudal que llega a la depuradora y que posteriormente se vierte. Tanto la EDAR de Galindo como la de Lamiako están diseñadas para que haya unos caudales punta en sus tratamientos más específicos, de manera que no siempre todo el agua puede pasar por el tratamiento biológico, que es donde más carga contaminante se elimina, ni por otros tratamientos como el primario con los que también se consigue una cierta reducción de la carga contaminante. Este hecho implica que, a la entrada del emisario, agua tratada se mezcle con agua con tratamientos inferiores produciendo una carga contaminante media superior a la que resultaría en caso de que toda el agua pasase por todos los tratamientos. En las Figuras 6 y 7 se muestran las cargas contaminantes medias, donde se puede apreciar un nivel de contaminantes mínimo que es el que tiene el agua cuando todo el caudal puede pasar por el tratamiento biológico, que es de $1,00 \times 10^{10}$ CF/m³, que también puede expresarse como $1,00 \times 10^6$ CF/100 ml.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

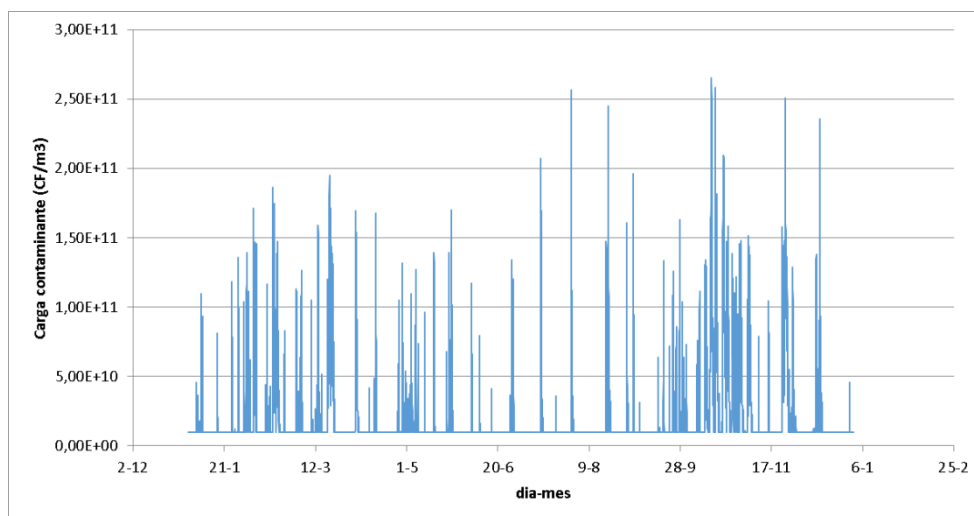


Figura 6. Cargas contaminantes (1974).

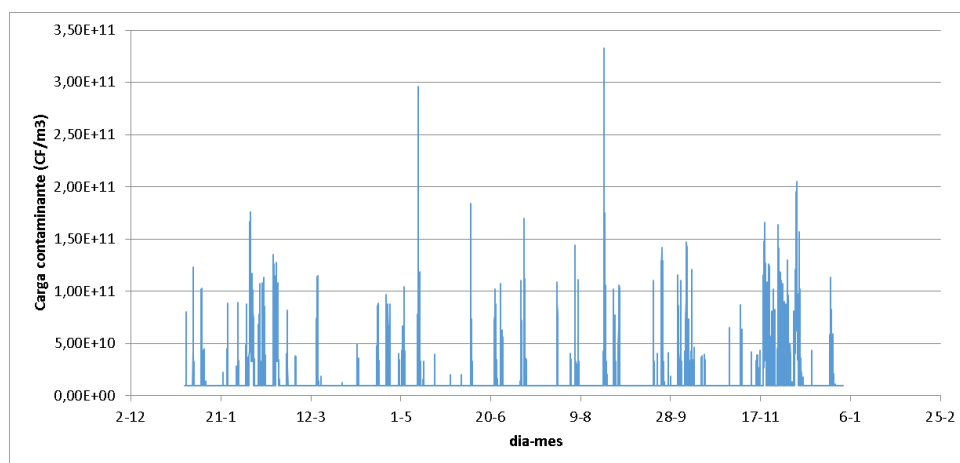


Figura 7. Cargas contaminantes (1996).

2.4. TRAZA DE LA TUBERÍA

Este trabajo tiene como objetivo el diseño del tramo difusor de un emisario submarino, para lo cual requiere de una tubería previa desde cuyo final pueda arrancar dicho tramo. De esta manera, se conseguirá una profundidad inicial del tramo difusor, que coincidirá con la del punto final de esta tubería previa y que tendrá especial relevancia a la hora de llevar a cabo los cálculos de dilución inicial. Tomando la menor de las profundidades de todo el tramo difusor para este cálculo, nos estaremos poniendo del lado de la seguridad, de manera que lo que se cumpla para el primero de los difusores, se cumplirá para el resto.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

En este caso, la traza de tubería que se ha tenido en cuenta ha sido la resultante del estudio ambiental del Emisario Submarino para la Evacuación de los Efluentes en las E.D.A.R. de Galindo y Lamiako, que encargó el Consorcio de aguas de Bilbao Bizkaia al Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.

Existen dos tipos de diluciones (con las que se reduce la carga de contaminantes), la de campo cercano (o dilución inicial) y la de campo lejano (o dilución secundaria). La primera está regulada en su mayor parte por la diferencia de densidad entre el efluente y el medio receptor, por lo que está directamente relacionada con la profundidad y distribución del tramo difusor del emisario submarino. La segunda depende de la acción e interacción de numerosos agentes ambientales (marea, viento, diferencias de presión,...) y su cálculo se realiza a través de un análisis del transporte, dispersión y reacción de los diferentes contaminantes, por lo que está directamente relacionada con la longitud del emisario submarino, es decir, con la distancia de que disponga el vertido para que se produzcan los fenómenos mencionados.

Tanto la dilución inicial, a través del valor resultante de la profundidad, como la dilución secundaria, de una manera directa, vendrán dadas por la longitud de traza de la tubería inicial.

2.4.1. ESTUDIO PREVIO

Como resultado de los estudios de transporte, dispersión e inactivación bacteriana del vertido, se ha obtenido que las zonas más directamente afectadas por la pluma del emisario corresponden al borde litoral más cercano al arranque del mismo, las Playas ubicadas entre dicho saliente y la bocana de la Ría de Plentzia (Gorrondatxe, Barinatxe, Atxabiribil, Meñacoz y Barrika).

Con base en el análisis de la información generada mediante el modelado matemático se ha elaborado la tabla 1 en las que se presenta, para cada alternativa de arranque del emisario submarino considerada, el número de horas durante la temporada de baño en que se superan una concentración de referencia de 100 UFC/100 ml en los puntos de control más afectados. En ninguna de las situaciones de vertido analizadas se ha



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

detectado la superación del valor umbral imperativo (2000 UFC/100 ml) en las playas afectadas por la pluma del efluente.

Playa	Longitud de emisario hasta el tramo difusor (m)				
	1380	1710	2050	2250	2390
Gorrondatxe	79,7	29,6	9,6	2,9	0,0
Barinatxe	55,4	23,4	8,7	2,1	0,0
Meñacoz	23,3	8,1	0,0	0,0	0,0
Barrika	19,0	6,6	2,7	0,0	0,0

Tabla 1. Número de horas de superación de una concentración de 100 UFC/100 ml a lo largo de la temporada de baño (mayo a septiembre). Alternativas de emisario con arranque en Punta Galea.

Entre estas alternativas, tan sólo en aquella en la que se considera la menor longitud de tubería submarina hasta el tramo difusor desde Punta Galea (1380 m), se detectó la presencia de concentraciones muy bajas de microorganismos (inferiores a 10 UFC/100 ml) en las playas del interior del Abra de Bilbao.

Similar comentario cabe realizar con respecto a las concentraciones de coliformes fecales procedentes del vertido de dicho emisario, obtenidas del modelado a lo largo de todo el año en la bocana de la Ría de Plentzia, que apenas si llegan a valores máximos de 10 UFC/100 ml.

En la figura 8 se muestran la curva de concentración de coliformes fecales calculada en la playa Gorrondatxe. Esta figura corresponde con la alternativa de emisario con salida en Punta Galea y una longitud de la tubería submarina hasta el inicio del tramo de vertido de 2390 m.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

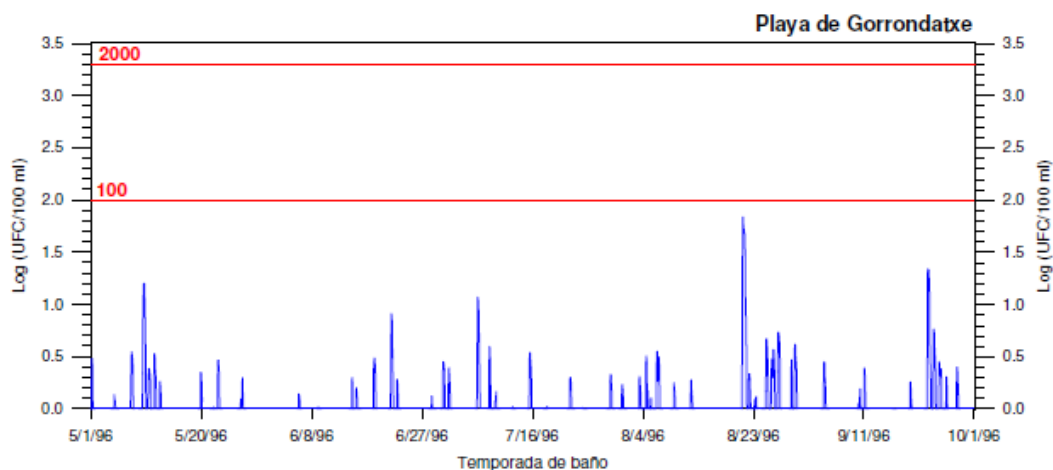


Figura 8. Evolución calculada en la playa de Gorrondatxe de los indicadores de contaminación de origen fecal procedente del vertido a través del emisario submarino (Alternativa de emisario con arranque en la zona de Punta Galea y una longitud de la conducción submarina de 2390 m. hasta el inicio del tramo difusor).

De acuerdo con lo mostrado en la tabla 4 y respaldado con la Figura 1, la alternativa que garantiza el cumplimiento con la normativa ambiental en todas las zonas es la de 2390 metros hasta el inicio del tramo difusor.

A modo de ejemplo de los resultados obtenidos a partir del modelado numérico realizado, en la figura 9 se muestra la evolución espacial del vertido del emisario submarino en seis instantes de tiempo a lo largo de la temporada de baño. Se representa el vertido procedente del emisario con arranque en la zona de Punta Galea, y una longitud hasta el inicio del tramo de vertido de 2390 m.

La figura muestra como en ningún momento se detectó la presencia de concentraciones de microorganismos superiores a 10 UFC/100 ml.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

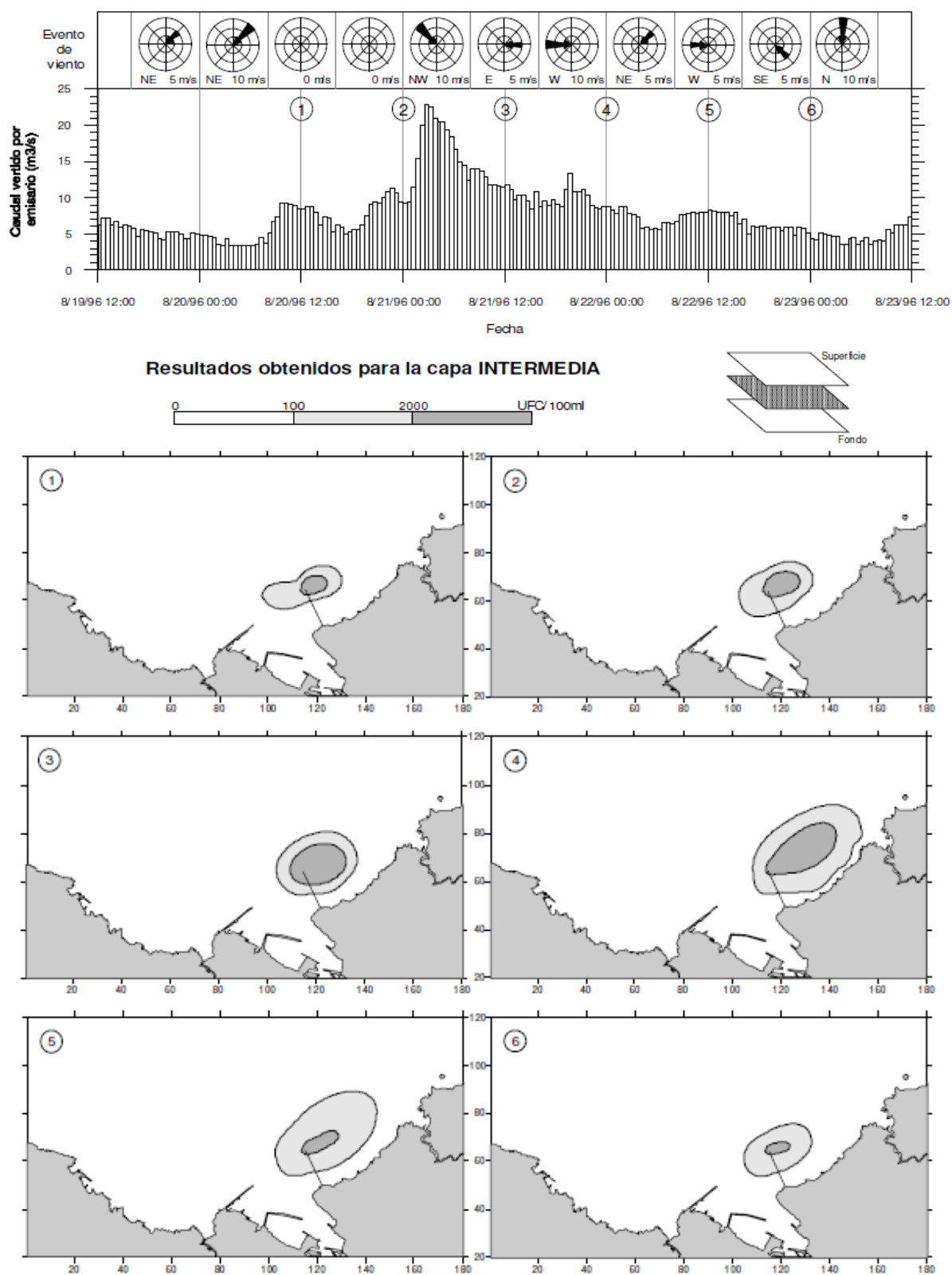


Figura 9. Evolución del efluente vertido a través del emisario submarino. Alternativa con arranque en Punta Galea (rumbo N25°W y 2390 m de longitud hasta el tramo de difusor).



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Al objeto de comprobar el funcionamiento de la solución adoptada, se han analizado una serie de escenarios de vertido desfavorables resultantes de considerar la conjunción de condiciones meteorológicas de vientos fuertes, soplando permanentemente hacia la costa, con descargas del efluente importantes.

Los estudios de transporte y dispersión realizados en tales situaciones han mostrado que las más críticas corresponden a la de vientos de componente W para el emisario con arranque en Punta Galea. En la figura 10 se presenta los niveles de concentración de coliformes fecales que se alcanza en la playa más afectada la solución anterior. Estos gráficos muestran que, incluso en las situaciones consideradas como más desfavorables, no se registran puntas superiores a 100 UFC/100 ml en ninguna de las playas del área de estudio por efecto del vertido por emisario.

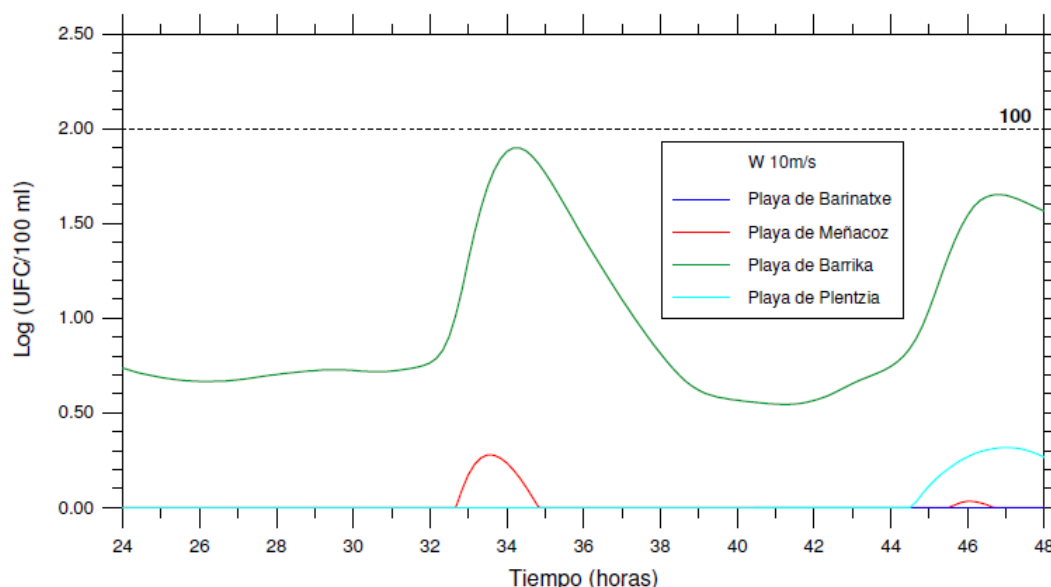


Figura 10. Concentraciones de indicadores de posible contaminación bacteriológica calculadas en diversas playas para condiciones de viento del Oeste de 10 m/s. Vertido a través del emisario de Punta Galea.

Además, a modo de ejemplo del modelado realizado, en la figura 11 se muestra seis instantes de tiempo correspondientes a la evolución del vertido por el emisario submarino para la alternativa con salida en Punta Galea (viento del W de 10 m/s).



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

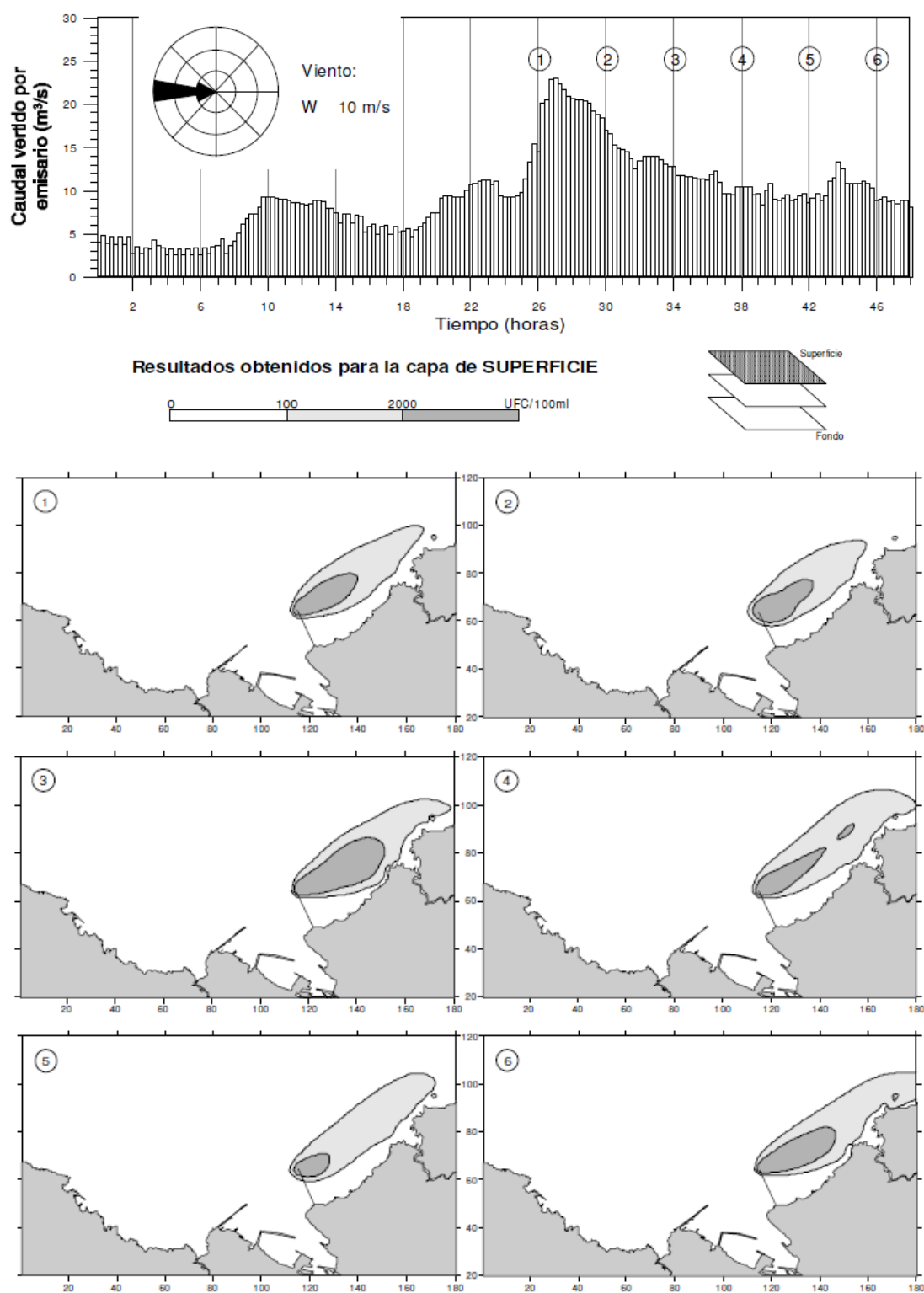


Figura 11. Evolución del efluente vertido a través del emisario submarino de Punta Galea en condiciones de viento del W de 10 m/s de intensidad.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Por último, del análisis de la evolución del efluente vertido al medio marino a través del emisario con longitud de tubería hasta tramo de vertido de 2390 metros para el año húmedo (1974) se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 2.

Playa	Concentración máxima de coliformes fecales a lo largo de la temporada de baño
La Arena	2
Gorrondatxe	98
Barinatxe	63
Meñacoz	15
Barrika	32

Tabla 2. Concentración máxima de indicadores de posible contaminación de origen fecal en las playas del litoral que sufren una mayor afección del vertido por emisario submarino.

Por tanto, los resultados obtenidos del modelado realizado muestran que el vertido a través del emisario submarino, incluso en el año húmedo (1974), no genera en las playas de la zona, y durante la temporada de baño, superación de la concentración de 100 UFC/100ml.

Conocidas la longitud de la conducción submarina hasta el tramo difusor y la profundidad de vertido se está en disposición de definir la configuración de éste para la consecución de los objetivos de dilución inicial del efluente.



3. CARTOGRAFÍA, TOPOGRAFÍA Y BATIMETRÍA

El emisario submarino objeto de este estudio se ubica en el área costera cercana a la ciudad de Bilbao, junto al puerto. En concreto, el punto de salida al mar del emisario se encuentra en el cabo de Punta Galea, en la zona oriental del puerto.

En la Figura 12 se muestra la ubicación geográfica del punto de partida del emisario. Además, se puede apreciar las playas que hay en la margen izquierda de Punta Galea, así como en el interior del puerto. Estas, serán zonas de gran importancia a la hora de realizar el diseño ambiental de emisario. La fotografía ha sido obtenida mediante el visor SigPac, del ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente del Gobierno de España, que aporta información geográfica actualizada de todo el territorio nacional a excepción de la Comunidad Canaria.

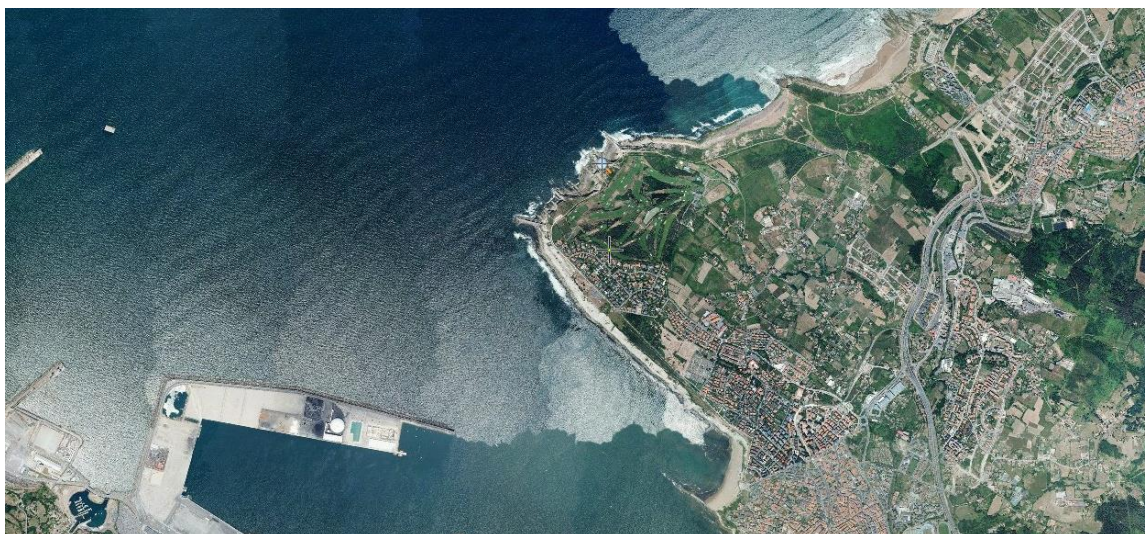


Figura 12. Punta Galea y alrededores.

En cuanto a la cartografía disponible, se tiene una cartografía informatizada y bastante detallada, que pese a no estar completamente actualizada (fácilmente apreciable debido a que no están incluidas las obras de ampliación del puerto iniciadas en 1991-1992), comprende una amplia zona de la costa de Vizcaya, abarcando desde La Punta del fraile hasta la bahía de Plentzia. En ella se incluye ambas márgenes de la desembocadura de la Ría de Bilbao. En la figura 13 puede apreciarse una muestra de esta cartografía con una



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

escala grande que da idea de la topografía de la zona, la cual, debido a la presencia de acantilados, se eleva rápidamente, pero a partir de ahí se mantiene bastante llana. Las alturas están referidas al nivel medio del mar en Alicante.

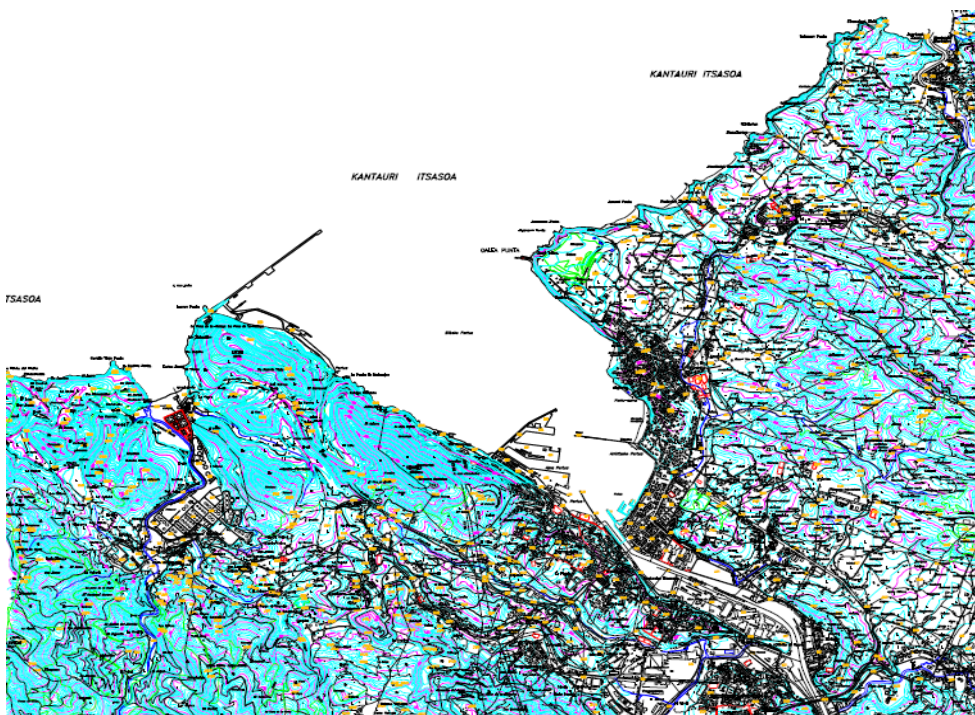


Figura 13. Muestra del plano 1:100.000 de la cartografía informatizada.

La batimetría utilizada para en este trabajo procede de estudios realizados por Geomytsa, empresa dedicada a realizar estudios marinos nacionales e internacionales. Los datos batimétricos cuentan con curvas batimétricas cada diez metros de profundidad, la línea de playa y la línea de costa.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

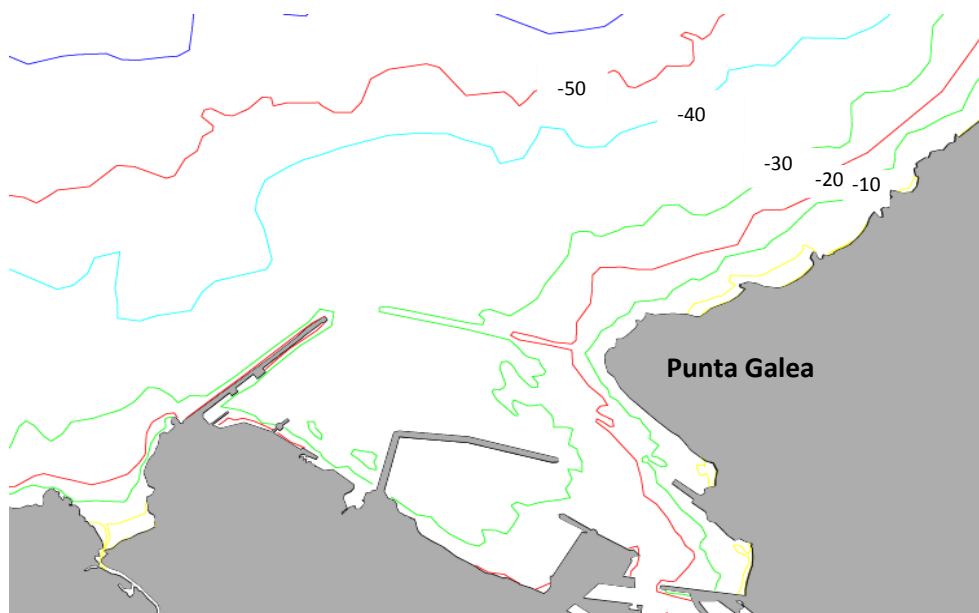


Figura 14. Muestra del plano de curvas batimétricas.

En las Figuras 15 y 16 puede apreciarse unas muestras de esta cartografía sobre la que se ha superpuesto la plantilla de curvas batimétricas.

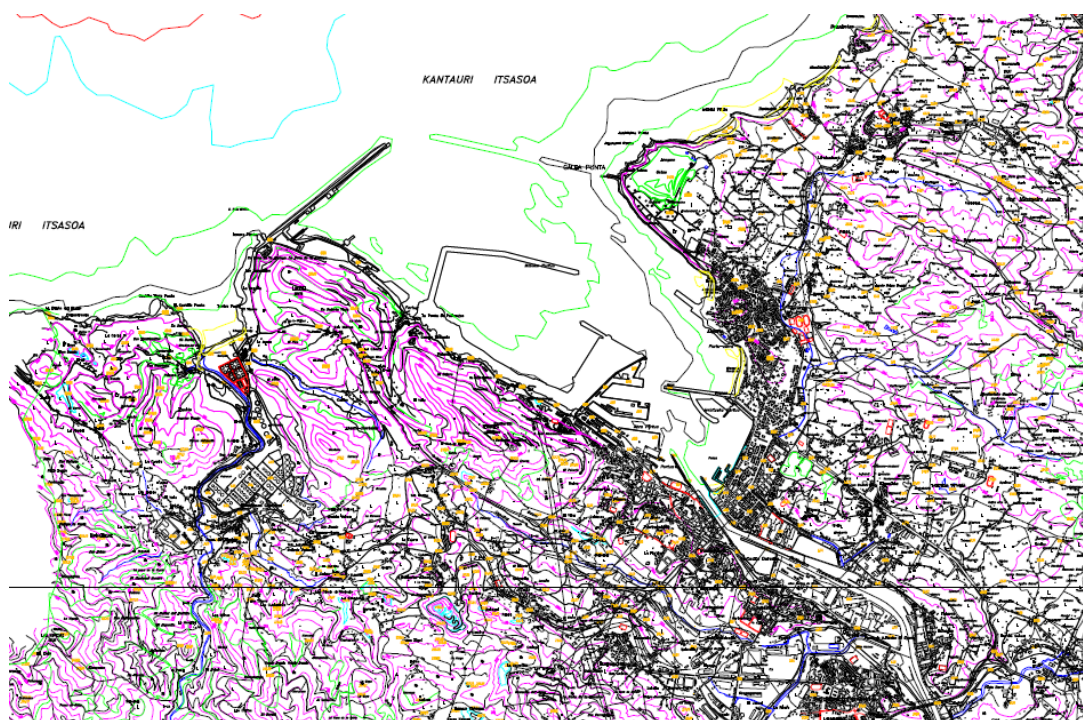


Figura 15. Vista general de la cartografía superpuesta.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

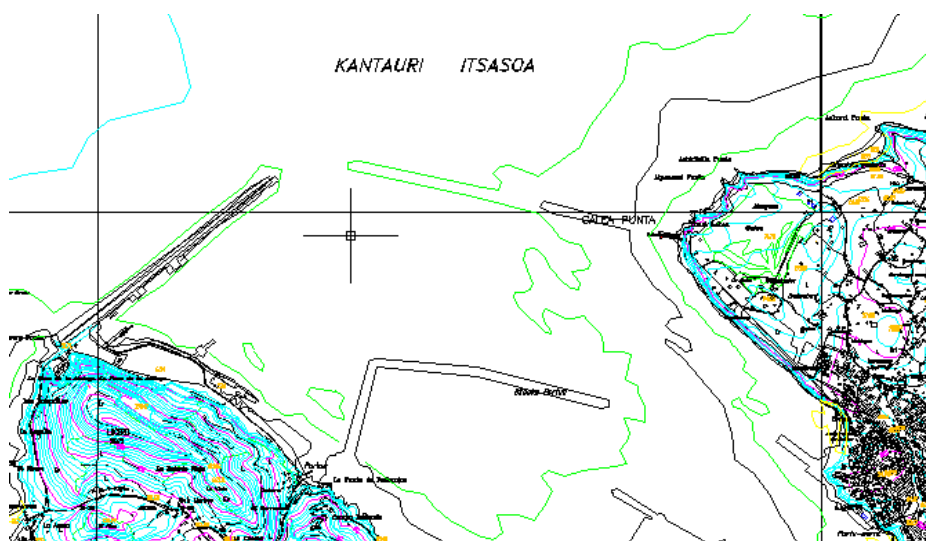


Figura 16. Muestra del plano 1:50.000 de la cartografía superpuesta.

La traza del emisario tiene dirección $N25^{\circ}W$, buscando que sea lo más perpendicular posible a las curvas batimétricas. Esto permite optimizar la longitud de emisario submarino, consiguiendo alcanzar profundidades que permita cumplir con las restricciones ambientales con la mínima longitud. En la Figura 17 se muestra la traza del emisario. La imagen se orienta al norte.

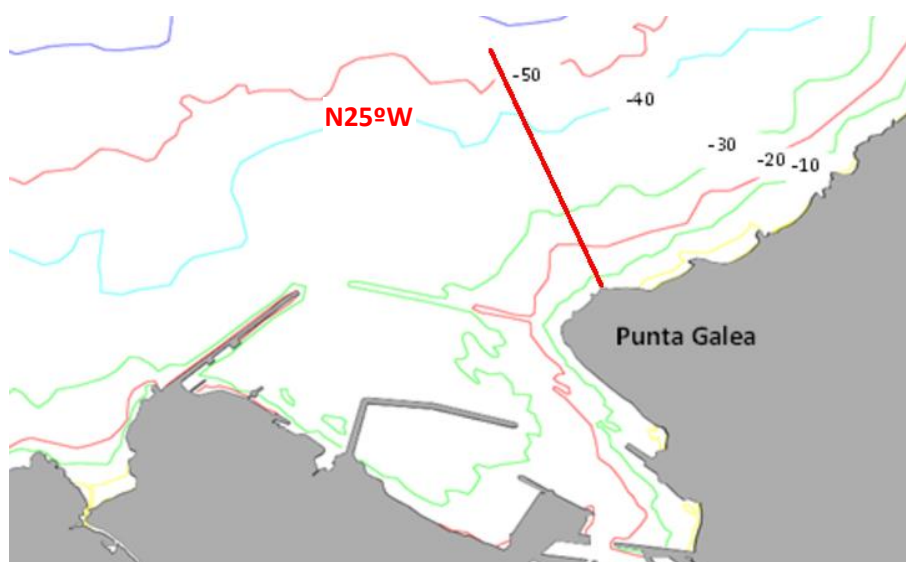


Figura 17. Vista de la traza del emisario.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

De acuerdo con la figura 18, en la que se representa un mapa geofísico de la zona objeto de estudio en este trabajo, el área atravesada por la traza del emisario está compuesta por afloramientos rocosos (trama cuadriculada de la imagen) sobre los que se asientan en ciertas partes espesores de menos de un metro de arenas, gravas y bolos (parte final de la traza).

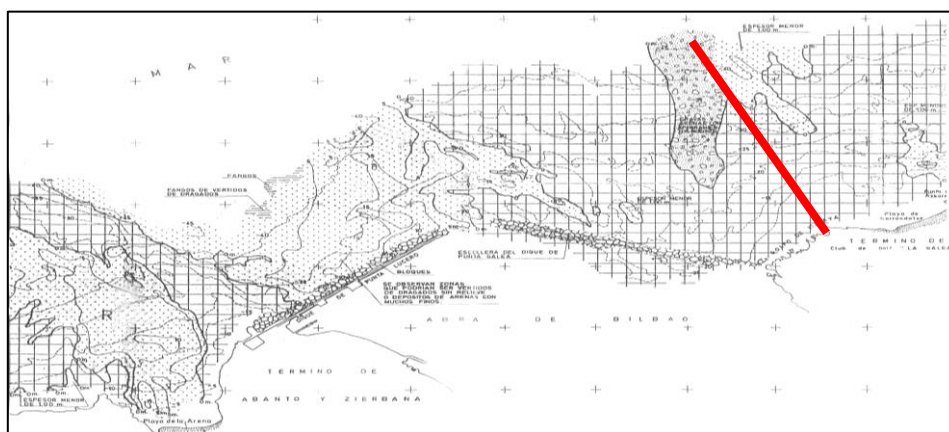


Figura 18. Geofísica del fondo marino en la zona de estudio.

En la figura 19 se representa de manera detallada el perfil longitudinal del fondo sumario por el que pasa la traza del emisario. En la imagen se especifica las zonas donde los espesores de materiales tipo arenas son importantes. La profundidades que se representan en la figura están referidas al Cero del Puerto de Bilbao.

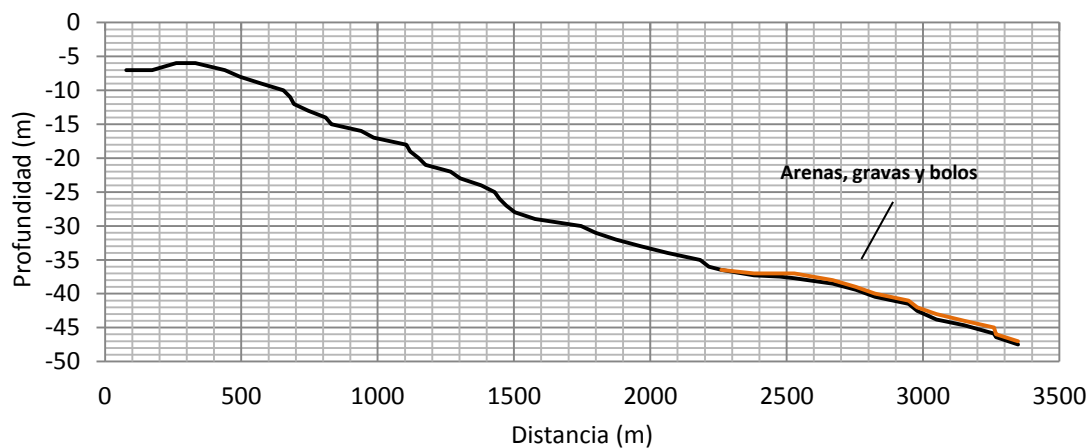


Figura 19. Perfil longitudinal del fondo marino en la traza del emisario (N 25° W).



4. SITUACIÓN DEL SANEAMIENTO DE BILBAO

El sistema de saneamiento que en estos momentos presenta Bilbao consta de una estación depuradora, EDAR de Galindo y otra que se encuentra en proceso de construcción, ideada para culminar el Plan Integral de Saneamiento del Nervión y aliviar a la saturada planta de Galindo.

La EDAR de Galindo, situada en la zona de Sestao, se construyó entre 1983 y 1995, eliminando los vertidos de Bilbao y de la Margen Izquierda. Entre 1.996 y 1.999 se empezó la depuración biológica en Galindo y se canalizaron las aguas residuales de la Margen Derecha.

Según datos del año 2010 esta depuradora hace frente a casi un millón de personas, teniendo que tratar alrededor de 350.000 m^3 de aguas residuales al día que, a su vez, vienen acompañados de restos orgánicos, lodos, etc., que se traducen en 85.000 toneladas de fangos, que tienen que ser tratados.

Los caudales a los que hace frente esta depuradora son los siguientes:

Caudal máximo admisible	Caudal medio diario	Caudal máximo biológico	Caudal medio biológico
$12,15 \text{ m}^3/\text{s}$	$4 \text{ m}^3/\text{s}$	$6 \text{ m}^3/\text{s}$	$4 \text{ m}^3/\text{s}$

Las cargas contaminantes derivadas del vertido de esta depuradora son las siguientes:

DQO influente	DQO en biológico	SS influente
184.000 Kg/día	138.000 Kg/día	88.000 Kg/día

Si la depuradora de Galindo es el centro neurálgico del sistema de saneamiento, la futura depuradora de Lamiako, es fundamental para colaborar en la limpieza de las aguas, ya que estará interconectada con la depuradora anterior a través de un túnel que



atraviese la Ría. A diferencia de la depuradora de Galindo, estará cerrada en su totalidad.

Prevía construcción del emisario submarino, el consorcio de aguas de Bilbao Bizkaia considera prioritario que la estación de Lamiako esté totalmente finalizada, por lo que para el estudio del tramo difusor objeto de este trabajo, se supondrá que las aguas residuales que llegan al emisario submarino proceden tanto de la depuradora de Galindo como de la de Lamiako, ambas en pleno funcionamiento.

De esta manera, la previsión que se tomará para la EDAR de Lamiako es que de soporte a 175.000 personas de la margen derecha de la Ría del Bilbao. La nueva planta estará conectada a la de Galindo y será complementaria a ella, con una capacidad cuatro veces menor. También estará preparada para asumir su responsabilidad en caso de avería en la de Galindo.

Los caudales que se tomarán de la depuradora de Lamiako serán los siguientes:

Caudal máximo admisible	Caudal medio diario	Caudal máximo biológico	Caudal medio biológico	Caudal máximo traspasado de Lamiako a Galindo
6 m ³ /s	4,485 m ³ /s	2 m ³ /s	1,175 m ³ /s	8 m ³ /s

4.1 DEPURADORA DE GALINDO

Es interesante analizar los procesos llevados a cabo en la estación depuradora de Galindo, ya que son el paso previo al envío del efluente al emisario y por lo tanto, condicionarán el tipo de aguas residuales que circulen por el mismo.

Procesos llevados a cabo en la instalación:

- Pretratamiento.
- Decantación primaria.
- Tratamiento biológico.
- Decantación secundaria.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

- Tratamiento y valoración de fangos.
- Tratamiento terciario.

El tratamiento realizado en la planta comienza con la llegada, a través de dos colectores, del agua residual, que pasa por 5 rejillas que evitan el paso de grandes sólidos como piedras o plásticos. Tras la llegada, el agua se bombea para que siga con el tratamiento dentro de la planta, con un caudal máximo de $18,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Así, se pasa al pretratamiento, en el cual se lleva a cabo un desbaste de finos mediante 5 tamices de 3 mm y capacidad de $12,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Seguidamente se procede al desarenado. La arena resultante se bombea a 8 equipos lavadores y se deposita en contenedores.

Terminado este proceso se procede con la decantación primaria, en la que se realiza la eliminación de los sólidos en suspensión del agua procedente del desarenado, que llega a través de un canal con una serie de agitadores que evitan que se produzcan depósitos. Los restos flotantes se retiran y el resto del agua se envía al reactor de carga, donde se realiza el tratamiento biológico, que permite eliminar la materia orgánica.

Este tratamiento utiliza bacterias que acaban con la materia orgánica, que la convierten en minerales (fangos) que posteriormente se retiran. La oxigenación facilita el desarrollo de las bacterias, que, al pasar al tratamiento secundario son retenidos.

De esta manera, en la decantación secundaria lo que se hace es separa el agua depurada de los fangos del biológico. Existen 18 decantadores de tipo succión, que pueden trabajar con un caudal máximo de $0,333 \text{ m}^3/\text{s}$. Los lodos separados se envían al reactor biológico, y el resto de agua tratada se va la obra de salida.

Por su parte, los fangos son sometidos a un tratamiento en el que inicialmente se les lleva a una cámara de mezcla en donde son mezclados y espesados, y posteriormente se les somete a una deshidratación e incineración, que se realiza a unos 850°C y que genera unos vapores que permiten llevar a cabo un proceso de cogeneración en el que se produce energía para abastecer la planta.

Por el otro lado, mediante el emisario submarino objeto de este trabajo, el agua que va a la toma de salida será conducida mar adentro, donde las repercusiones medioambientales del vertido serán menores.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Existe la posibilidad de realizar un tratamiento terciario a parte del agua que debería ir a la toma de salida, mediante el cual se eliminan sales, nutrientes y restos de sólidos en suspensión. Este tratamiento confiere al agua la capacidad de ser utilizada para el riego de jardines.

El proceso más importante que se lleva a cabo en esta planta es el tratamiento biológico, que es el que permite deshacerse de una mayor cantidad de contaminación. La medida de la contaminación del agua se hace a través de un indicador, los coliformes (en este caso coliformes fecales, ya que el agua procede del saneamiento de zonas residenciales), de manera que mediante este tratamiento, se consigue reducir la concentración de este indicador de 5×10^7 CF/100ml (que tiene el agua a la llegada a la planta) a 10^6 CF/100ml. El problema reside en que la planta tiene un caudal punta en el biológico ($6 \text{ m}^3/\text{s}$), de manera que un caudal excedente no pasaría por ese tratamiento, realizando solo el pretratamiento. Así, la disminución de la concentración de ese agua excedente es menor, ya que el rendimiento del tratamiento biológico baja mucho y no es capaz de reducir mucho la contaminación fecal, pudiendo incluso ser mayor de 5×10^7 CF/100ml.

Previo a la llegada al emisario submarino, tanto el agua del biológico como la del caudal excedente hay que mezclarla, con lo que la concentración de 10^6 CF/100ml incrementa. Además, existe un caudal punta general para la planta ($12,15 \text{ m}^3/\text{s}$), a partir del cual, el agua que llega ni recibe ningún tratamiento y pasa directamente a la obra de toma, incrementando aún más la concentración de coliformes.

Las características del agua depurada son las siguientes:

DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno)	<15 mg/l
SST (sólidos suspendidos totales)	<20 mg/l
NKT (nitrógeno kjeldahl total)	<5 mg/l
N-NH3	<2 mg/l
N-NO3	<10 mg/l

5. LEGISLACION ESPAÑOLA APLICADA

5.1. INTRODUCCIÓN

Para la consideración de la importancia del medio marino, es importante darse cuenta de la inmensidad que representa, tanto geográficamente como a nivel biológico y ecológico. Aunque con respecto a la utilización por el ser humano, la porción de mar afectada se reduce bastante (se reduce a una franja litoral de algunos kilómetros de anchura), alberga una gran cantidad de elementos a nivel de ecosistema, muchos de ellos necesario para el soporte de la actividad humana.

En la parte marina de la franja costera encontramos usos tan extendidos como los baños, la pesca de bajura, la navegación recreativa o los cada vez más numerosos cultivos marinos. Hasta la navegación, que es una de las actividades humanas que se extiende por todo el océano, tiene sus puntos de concentración (puertos y fondeaderos) instalados en la zona litoral.

Así, para la perdurabilidad y sostenibilidad de estas actividades, será necesaria una normativa cuyos objetivos se centren en proteger tanto la vida del medio marino como al ser humano en su papel como usuario de este medio.

En relación a los emisarios submarinos, para la consecución de estos objetivos la normativa se centra, por una parte, en el establecimiento de criterios para el diseño de los sistemas de vertido y por otra, en un control adecuado de los agentes contaminantes, estableciendo límites y procesos de vigilancia

A continuación se presentaran los principales aspectos de la legislación española en materia de vertidos, que han actuado como factores restrictivos para el diseño ambiental del tramo difusor objeto de estudio en este trabajo.



5.2. ANTECEDENTES

Mediante una Orden del Ministerio de Obras Públicas de 29 de abril de 1977, se aprobó la “Instrucción para el vertido al mar desde tierra, de aguas residuales a través de emisarios submarinos”, en la que se regulaban materias relativas a:

- La contaminación y calidad de la aguas de mar.
- Las características de los efluentes y sus tratamientos.
- El proyecto e ingeniería de los emisarios submarinos.
- El régimen administrativo al que quedaba sujeta su construcción.

Posteriores acontecimientos como la adhesión de España a la Comunidad Europea, con la consiguiente incorporación a nuestro derecho de la normativa comunitaria, o los nuevos avances científicos y tecnológicos llevados a cabo en los últimos años, sumado a los nuevos compromisos internacionales asumidos por España sobre contaminación marina, supusieron la necesidad de implementar la normativa de este ámbito, lo cual exigió el dictado de una nueva instrucción.

Así, a través de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas, en su artículo 110, i), se le atribuyó a la Administración General del Estado la elaboración y aprobación de las nuevas disposiciones sobre vertidos. En este sentido, en virtud del apartado 3 del artículo 203 del Reglamento General para desarrollo y ejecución de la citada ley, aprobado por el Real Decreto 1471/1989, de 1 de diciembre, se otorgó dicha competencia al Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

De esta manera, conforme a lo expresado en este tercer apartado, por un lado, se aprobó la “Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar”, cuya entrada en vigor se hizo efectiva a los 30 días de su publicación en el BOE (en el BOE del 27 Julio 1993), y por otro, se derogó la Orden del Ministerio de Obras Públicas de 29 de abril de 1977 por la que se aprobaba la instrucción previa: “Instrucción para el vertido al mar, desde tierra, de aguas residuales a través de emisarios submarinos”.



5.3. INSTRUCCIÓN 1993

Esta Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar, es aplicable a todos los vertidos que se realicen desde tierra al mar mediante conducciones de vertido, y sus objetivos principales son:

- Establecer las condiciones técnicas mínimas para el proyecto y cálculo de las conducciones y dispositivos de vertido de aguas residuales desde tierra al mar.
- Definir los requisitos que deben cumplir los proyectos de los aliviaderos.
- Determinar los procedimientos de vigilancia y control que aseguren, por una parte, el buen funcionamiento estructural de las instalaciones y, por otra, el mantenimiento de los objetivos de calidad establecidos en la normativa vigente.

En ella, aparte de los conceptos a los que se refieren los artículos 2º y 3º del Real Decreto 258/1989, de 10 de marzo, por el que se establece la normativa general sobre vertidos de sustancias peligrosas desde tierra al mar, se definen una serie de términos en entre los que es apropiado destacar el concepto de emisario submarino, que se define como una conducción cerrada que transporta las aguas residuales desde la estación de tratamiento hasta una zona de inyección en el mar, de forma que se cumplan las dos condiciones siguientes:

- Que la distancia entre la línea de costa en bajamar máxima viva equinoccial y la boquilla de descarga más próxima a ésta, sea mayor de 500 m.
- Se asegurará una dilución inicial mínima que, para vertidos de aguas residuales urbanas, deberá ser mayor de 80:1, durante más del 95% del tiempo, y mayor que 100:1 cuando, por no haber estratificación, la mezcla alcance la superficie.

Estas dos características, y en especial la segunda (concerniente a la dilución inicial) son las principales limitaciones tomadas en este trabajo para el dimensionamiento del tramo difusor.



6. DISEÑO AMBIENTAL

6.1. INTRODUCCIÓN

El emisario submarino es el elemento con el que se finaliza el proceso de depuración y saneamiento llevado a cabo en una estación depuradora. Sin importar el origen de las aguas residuales a depurar (urbano, industrial,...), el objetivo del emisario es verterlas al medio marino, por lo que es necesario un cálculo y estudio exhaustivo de la contaminación introducida y de los efectos inducidos por el vertido en el medio ambiente, este es un diseño ambiental del emisario.

El principal factor que se tiene en cuenta al abordar este diseño es la dilución, fenómeno resultado de la mezcla entre el efluente vertido a través del mismo y el medio acuático que lo circunda. Dicha dilución depende, entre otros, de aspectos tales como la diferencia de densidad entre ambos fluidos, la cantidad de movimiento del efluente en su salida a través de los difusores, o el transporte y dispersión originados por las corrientes acuáticas.

La dilución se puede dividir en dos fases: por un lado, la dilución inicial o de campo cercano, producida cuando la mezcla entre el efluente y las aguas receptoras está dominada por la cantidad de movimiento del agua vertida o por la diferencia de densidad señalada; y por otro lado, la dilución secundaria o de campo lejano, resultado del transporte, dispersión e inactivación bacteriana debidos a la acción de las corrientes acuáticas.

El objeto de este trabajo es el diseño del tramo difusor de un emisario submarino, por lo que este estudio estará focalizado en la dilución inicial, cuyo análisis trata de definir los elementos difusores que permitan alcanzar la máxima dilución posible.

Desde el punto de vista de las fuerzas impulsoras del movimiento, el efluente vertido en el medio receptor puede presentar forma de "chorro" o "pluma". En el primero de los casos, las fuerzas dominantes en el proceso de dilución inicial son debidas a la propia cantidad de movimiento del fluido; en el segundo, el transporte se origina, principalmente, por la diferencia de densidad entre el efluente y el agua circundante. Mientras que la dilución inicial en chorros depende principalmente de la cantidad de



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

movimiento del efluente, la dilución inicial en plumas está altamente influenciada por las características ambientales del medio acuático.

En el caso de emisarios submarinos el chorro suele desaparecer a poca distancia del punto de descarga y el efluente pasa a comportarse principalmente como pluma. Esta es la razón por la que una gran parte de las investigaciones sobre el tema se centran en el estudio de este tipo de dilución.

La dilución inicial en plumas depende de los parámetros ambientales (corrientes, densidad, etc.) y de la forma en que el efluente se introduce en el medio. Esto último se puede hacer simplemente descargando el efluente directamente por la tubería que le transporta hasta el punto de vertido, o a través de unos dispositivos de descarga, más o menos complicados, los difusores. El fin último es conseguir diluciones iniciales óptimas de acuerdo con los objetivos de calidad propuestos.

En la sociedad actual, cuya preocupación por el medio ambiente va en aumento, el legislador también ha querido plasmar ese interés, estableciendo una serie de limitaciones que aseguren la sostenibilidad de los procesos llevados a cabo y la protección del entorno natural. Es especialmente importante en el caso particular de Bilbao, debido a la existencia de multitud de zonas de baño a lo largo de toda la costa, las cuales tienen una gran afluencia en época estival.

Así, la normativa vigente, en el vertido de aguas residuales al mar, se dirige a evitar la contaminación, con dos focos de atención claramente diferenciados: la protección de la vida del medio marino y la protección del hombre como usuario del medio. El método para conseguirlo se centra: por una parte, en el establecimiento de criterios para el diseño de los sistemas de vertido; y por otra, en un control adecuado de los agentes contaminantes, estableciendo límites y procesos de vigilancia.

En este sentido, para emisarios de aguas residuales urbanas, la normativa española plasmada en la Orden de 13 de julio de 1993 por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar (BOE 27 de julio 1993), exige una dilución inicial mínima de diseño de 100 para el caudal que no se supera el 95% del tiempo.



6.2. MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA DILUCIÓN INICIAL

En las últimas tres décadas se han elaborado una gran cantidad de métodos para calcular la dilución inicial para distintas condiciones y valor de los parámetros que intervienen en el fenómeno. En la tabla 3 se presentan algunos de estos métodos, así como una serie de modelos matemáticos de la E.P.A. (Environmental Protection Agency – USA). Aunque existe gran variedad de modelos matemáticos (muchos de ellos comercializados), los modelos de la E.P.A. se consideraron como los más representativos, ya que esta organización estatal se dedica plenamente al estudio de los problemas medio ambientales. En esta tabla se han incluido aquellos parámetros que tienen especial importancia para el diseño adecuado de un emisario submarino.

Método	Boquilla	Ángulo de descarga	Perfil de densidad	Velocidad corriente	Ángulo difusor-corriente	Espesor de la pluma
Cederwall (1964)	Única	90°	No estratificado	NO	-	NO
Fan Brooks (1969)	Única	90°	No estratificado	NO	-	SÍ
Roberts (1977)	Única	90°	No estratificado	NO	-	SÍ
Brooks (1969)	Única	90°	Estratificación lineal	NO	-	SÍ
Wang (1985)	Única	0°	Estratificación lineal	NO	-	NO
Chu (1979)	Única	90°	No estratificado	cte $\neq$ 0	90°	NO
Lee (1979)	Única	90°	No estratificado	cte $\neq$ 0	90°	NO
Wright (1984)	Única	0°	Estratificación lineal	cte $\neq$ 0	90°	SÍ
Liseth (1970)	Múltiple	90°	No estratificado	NO	-	NO
Roberts (1977)	Múltiple	90°	No estratificado	NO	-	SÍ
Harleman (1982)	Múltiple	90°	No estratificado	cte $\neq$ 0	-	NO
Wright (1982)	Múltiple	90°	Estratificación lineal	NO	-	NO
Roberts (1979)	Múltiple	90°	No estratificado	cte $\neq$ 0	Arbitrario	NO
Fisher et al. (1979)	Múltiple	90°	Estratificación lineal	cte $\neq$ 0	90° ó 0°	SÍ
Roberts (1989)	Múltiple	90°	Estratificación lineal	cte $\neq$ 0	Arbitrario	SÍ
Visjet (2002)	Múltiple	90°	Estratificación lineal	Arbitrario	Arbitrario	SÍ
Modelos E.P.A.						
UPLUME (1985)	Única	0° a 95°	Arbitrario	NO	-	SÍ
OUTPLM (1985)	Única	0° a 95°	Arbitrario	cte $\neq$ 0	-	SÍ



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

UMERGE (1985)	Múltiple	0° a 95°	Arbitrario	Arbitrario	90°	SÍ
UDKHDEN (1985)	Múltiple	0° a 135°	Arbitrario	Arbitrario	90°	SÍ
ULINE (1985)	Múltiple	90°	Arbitrario	Arbitrario	45° a 135°	SÍ
RSB (1994)	Múltiple	90°	Arbitrario	Arbitrario	Arbitrario	SÍ
UM (1994)	Única/Múltiple	90°	Arbitrario	Arbitrario	Arbitrario	SÍ
CORMIX (1995)	Múltiple	0° a 95°	Pref. Determinados	Arbitrario	Arbitrario	SÍ
PLUMES (2002)	Única/Múltiple	0° a 95°	Arbitrario	Arbitrario	Arbitrario	SÍ

Tabla 3. Características generales de diversos modelos de dilución inicial.

6.3. MODELO DE ROBERTS Y COLABORADORES

Para este trabajo, con el fin de realizar una estimación lo más aproximada posible de la longitud del tramo difusor del emisario submarino, se ha recurrido al modelo determinado por Philip J. W. Roberts y sus colaboradores en el año 2006, “Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers.”

Se trata de un modelo que actualiza el que Roberts presentó en el año 1989, de manera que a través de instrumentación y métodos nuevos y más avanzados, se consigue cálculos de la dilución inicial más fieles a la realidad.

A este respecto, Roberts publicó cuatro artículos, en los que exponía diferentes modelos de cálculo de la dilución inicial y en los que, según las características del medio impuestas, se presentaban diversas maneras de llevar a cabo el cálculo de este factor.

En este caso se ha tomado como modelo el último de los cuatro, en el que el cálculo de la dilución se realiza suponiendo el vertido en un medio marino estratificado y con corriente ambiental, de título: “Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers. IV: Stratified Flowing Water.”

El artículo presentado por Roberts alude a experimentos en medios, con estratificación de densidad y corrientes que fluyen perpendicularmente a los difusores. El propósito de estos experimentos es el estudio de las características del campo cercano (near-field), término utilizado para referirse a la región que abarca todos los posibles procesos de mezcla que están íntimamente ligados a los parámetros de descarga sujetos al diseño realizado. Estos procesos incluyen la elevación de la pluma por flotabilidad, la



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

transición a flujo horizontal y la mezcla en la capa horizontal de esparcimiento. Independientemente de los procesos que se produzcan, la turbulencia y la mezcla generadas por los mismos, decae a un cierto punto, y la velocidad de mezcla comienza ser a bastante menor. Este punto marca el final del campo cercano, y se define como el lugar donde la dilución está dentro del 10% de su valor final.

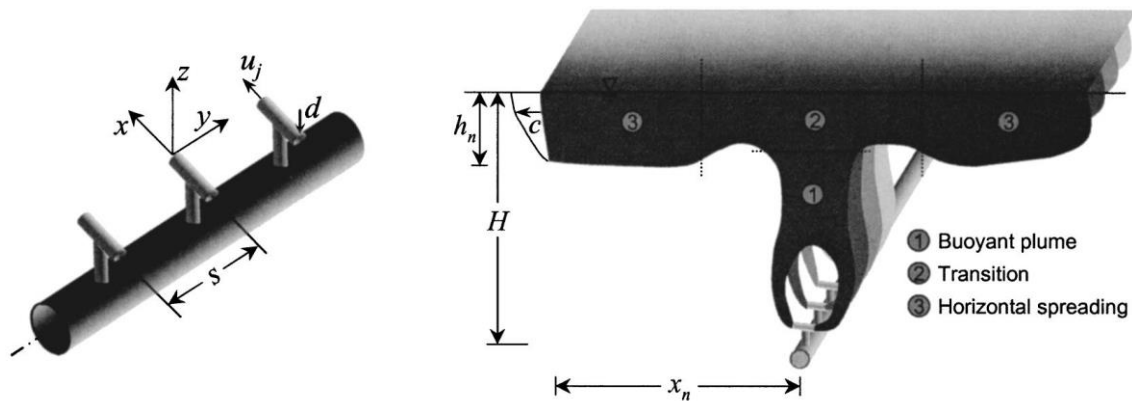


Figura1. Descripción del tramo difusor el campo cercano.

Las investigaciones se centraron en el caso de flujos del vertido debidos principalmente a la flotabilidad, es decir, cuando los efectos del flujo del momento fuente (source momentum flux) pueden ser despreciados (esta asunción corresponde con el caso típico de casi todos los trabajos actuales más relevantes sobre emisarios submarinos). De acuerdo con el artículo de Brooks (1980), el flujo del momento se puede despreciar:

$$\frac{l_M}{H} < 0.2 \quad (\text{Cuando el efluente se presenta en forma de chorro}). \quad (1)$$

$$\frac{l_m}{H} < 0.25 \quad (\text{Cuando el efluente se presenta en forma de pluma}). \quad (2)$$

Siendo H la altura desde el eje de los elementos difusores hasta la superficie; y l_M , l_m las longitudes de escala relacionadas con el comportamiento del flujo, correspondiente a pluma (m) y chorro (M), respectivamente, calculada como:

$$l_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (3)$$

$$l_m = \frac{m^{3/4}}{b^{1/2}} \quad (4)$$



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Con M = flujo de momento (momentum flux); y B = flujo de flotabilidad (Bouyancy flux), dadas por:

Variable	Chorro	Pluma
Caudal	$Q_j = (\pi/4)d^2u_j$	$q = Q_T/L$
Flujo de momento	$M = u_jQ_j$	$m = u_jq_j$
flotabilidad	$B = g'_0Q_j$	$b = g'_0q_j$

u_j = velocidad de salida en los difusores..

d = diámetro de los difusores.

g'_0 = variable dependiente de la constante gravitatoria y de la densidad del medio.

Las características del campo de vertido se midieron a través de un sistema de fluorescencia inducida por láser en tres dimensiones (3DLIF) y por una sonda de micro conductividad precisa. Este tipo de instrumentación tan sofisticada y, en especial, el sistema tridimensional, es lo que permite obtener resultados más fiables que los modelos de años anteriores.

En la Figura 2, se muestra un esquema del procedimiento seguido durante la utilización de la instrumentación mencionada:

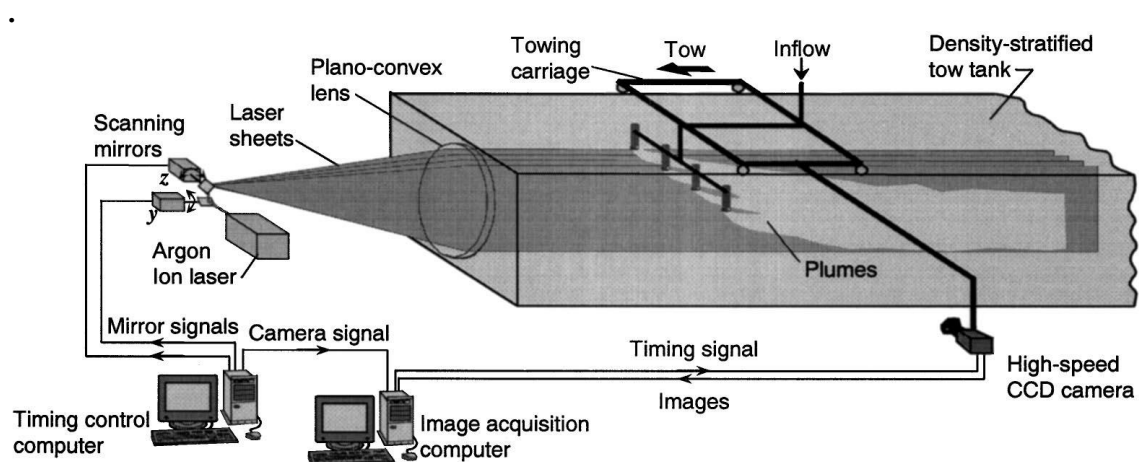


Figura 2. Descripción esquematizada del 3DLIF.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

El método utilizado para crear corrientes que derivasen en un régimen transitorio fue, como se puede apreciar en la figura 2, la utilización de un carro montado sobre raíles (abarcando la longitud completa del tanque), que, mediante cadenas conectadas a un motor, se le dotaba de velocidades controladas.

Dependiendo de la distancia entre difusores, las plumas de cada uno de los que están situados en la zona inicial del tramo difusor pueden mezclarse, primero entre ellas y después con las plumas de los difusores de la zona final de este tramo. Por otro lado, pueden mezclarse primero las plumas de los difusores situados horizontalmente opuestos, seguidos por un mezclado lateral.

En cualquier caso, el campo de vertido acaba finalmente siendo lateralmente homogéneo. Sin embargo, esto puede ocurrir en la zona de campo cercano o fuera de ella.

6.4. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

La descarga se produce en forma de pluma cuando $s/l_b < 1$, y en forma de chorro cuando $s/l_b > 6$. Siendo s la distancia que separa dos difusores contiguos, y l_b la longitud de escala relacionada con el comportamiento del flujo (cuando es en forma de pluma).

Los resultados se plasmaron: primero, teniendo en cuenta tanto los parámetros de pluma como los de chorro para ver cuales caracterizaban mejor los resultados; y luego, sobre qué rangos de valores de separación entre difusores quedaban definidas cada una de las formas del efluente.

En la Figura 3, se muestra la dilución en campo cercano (dilución inicial), medida en todos los experimentos llevados a cabo a lo largo del estudio. Como se dijo previamente, la forma de chorro suele desaparecer a poca distancia del punto de descarga y el efluente pasa a comportarse principalmente como pluma. Por eso, los resultados mostrados se corresponden a efluente en forma de pluma:



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

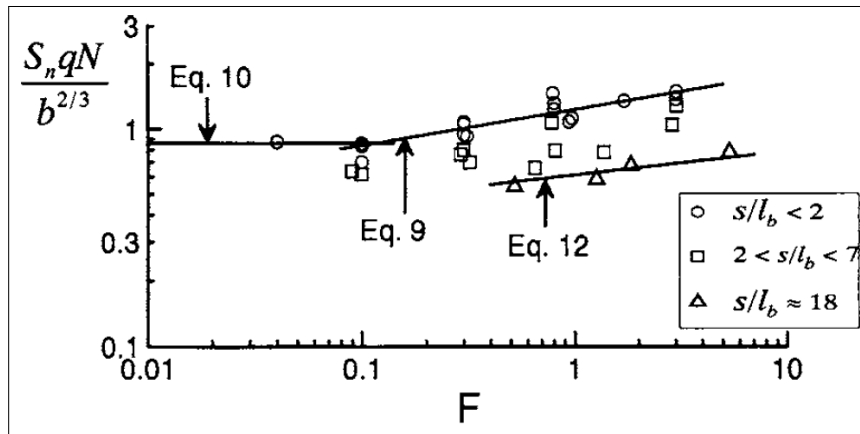


Figura 3. Dilución inicial (S_n) en función del número de Froude de la corriente.

F es el número de Froude de la corriente, y se calcula de la siguiente manera:

$$F = \frac{u_a^3}{b} \quad (5)$$

Con u = velocidad de corriente (m/s), y b = flotabilidad (m^3/s^3)

De acuerdo con la Figura 3, los resultados pasan a ser independientes de la distancia entre difusores cuando $s/l_b < 2$.

Además, se aprecia un punto de inflexión en la curva representada por las ecuaciones (9) y (10), que se corresponde con $F=0.1$, de manera que la dilución inicial se mantiene constante para valores bajos del número de Froude (que depende principalmente de la velocidad de la corriente) y a partir del valor de F citado, la dilución aumenta linealmente.

$$\frac{S_n q N}{b^{2/3}} = 1.23 F^{1/6} \quad (\text{En la figura, Eq.9}) \quad (6)$$

$$\frac{S_n q N}{b^{2/3}} = 0.86 \quad (\text{Eq.10}) \quad (7)$$

Una opción para el cálculo de la dilución inicial puede ser buscar valores de la corriente bajos que den números de Froude menores de 0.1 y que, por consiguiente, obliguen a



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

utilizar la ecuación número 10. De esta manera se estarán adoptando parámetros que estén del lado de la seguridad. El inconveniente es que la longitud de tramo difusor resultante incrementa considerablemente. Esta afirmación será extrapolable a los siguientes parámetros de dimensionamiento de la pluma del campo de vertido cercano.

A parte del valor de la dilución inicial, se han obtenido las ecuaciones que permiten determinar los parámetros que posibilitan la definición de la forma y dimensiones del campo cercano de vertido. Se representan en las siguientes figuras.

En la Figura 4, se muestra la longitud de campo cercano, medida en todos los experimentos llevados a cabo a lo largo del estudio, tanto a través de la sonda de micro conductividad, como por el sistema de fluorescencia inducida por láser en tres dimensiones. Los valores mostrados en esta figura se corresponden con aquellos que cumplen la condición $s/l_b < 2$, es decir, difusores estrechamente separados. Esto se debe a que los resultados obtenidos se corresponden con un vertido en forma de pluma.

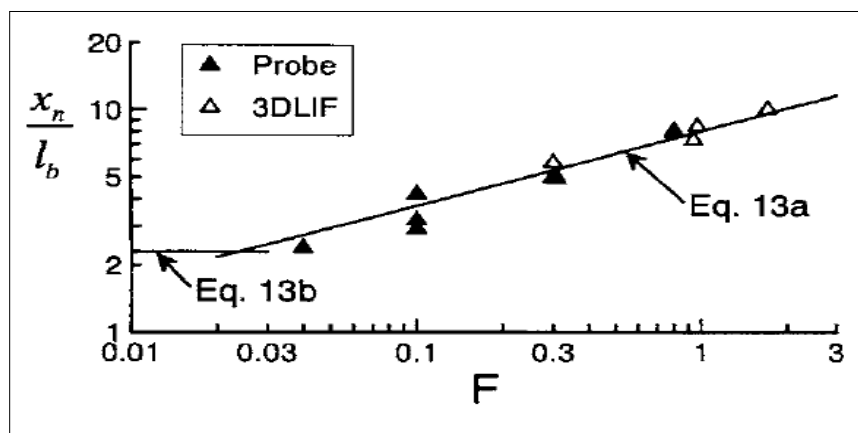


Figura 4. Longitud del campo cercano (x_n) en función del número de Froude de la corriente.

Al igual que con el parámetro anterior, con la curva de longitud del campo cercano existe un punto de inflexión correspondiente con $F=0.03$, que separa la zona inicial, marcada por la ecuación (13b), en la que la longitud del campo cercano es constante; y una zona posterior, marcada por la ecuación (13a), en la que la longitud crece linealmente con el número de Froude.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

$$\frac{x_n}{l_b} = 8.0F^{1/3} \quad (\text{Eq.13a}) \quad (8)$$

$$\frac{x_n}{l_b} = 2.3 \quad (\text{Eq.13b}) \quad (9)$$

Tras todo el trabajo llevado a cabo a lo largo del estudio, se ha concluido que la longitud de campo cercano, tanto para situación de efluente en forma de chorro como en forma de pluma, depende únicamente de la velocidad de la corriente ambiental y de la estratificación de la densidad del medio marino, siendo totalmente independiente de las características de la fuente.

En las Figuras 5 y 6, se representan la altura al centro de la pluma (z_n) y la altura máxima de la pluma (z_m), respectivamente, del campo cercano, medidas en todos los experimentos llevados a cabo a lo largo del estudio.

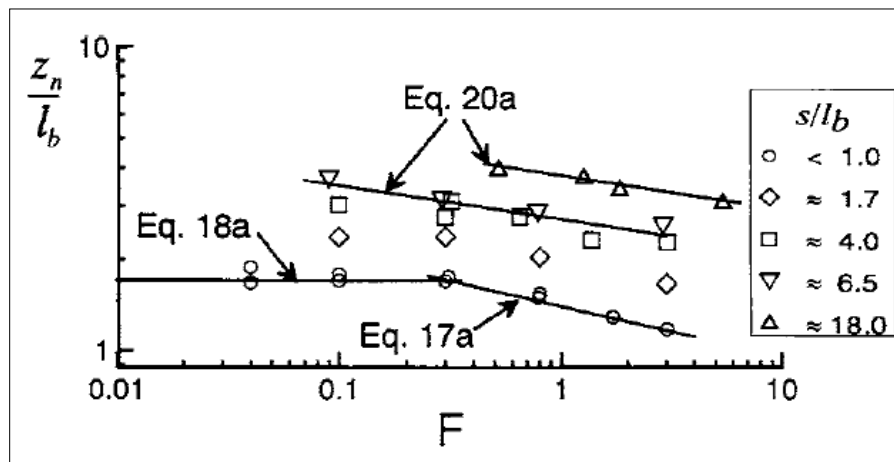


Figura 5. Altura al centro de la pluma (z_n) en función del número de Froude de la corriente.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

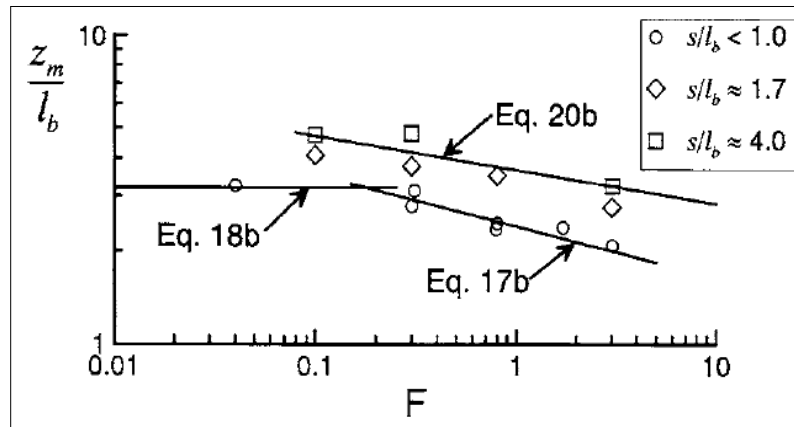


Figura 6. Altura máxima de la pluma (z_m) en función del número de Froude de la corriente.

Ambas gráficas presentan, al igual que en el caso de los parámetros anteriores, un punto de inflexión, que separa, una zona inicial en la que las alturas son constantes, y otra zona en que varían en función del valor del número de Froude. En este caso, la variación se corresponde con una tendencia decreciente.

Para el caso de la altura desde el eje de los difusores al punto medio de la pluma, el punto de inflexión se corresponde con $F=0.3$, y las ecuaciones que dan lugar a ese quiebro, correspondientes a valores que representan un efluente en forma de pluma, son:

$$\frac{z_n}{l_b} = 1.4F^{-1/6} \quad (\text{Eq.17a}) \quad (10)$$

$$\frac{z_n}{l_b} = 1.7 \quad (\text{Eq.18a}) \quad (11)$$

Para el caso de la altura máxima de la pluma, el punto de inflexión también se corresponde con $F=0.3$, y las ecuaciones que dan lugar a su curva, correspondientes a valores que cumplen la condición $s/l_b < 4$, es decir, difusores estrechamente separados, son:



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

$$\frac{z_m}{l_b} = 2.4F^{-1/6} \quad (\text{Eq.17b}) \quad (12)$$

$$\frac{z_m}{l_b} = 3.2 \quad (\text{Eq.18b}) \quad (13)$$

En la Figura 7 se muestra el espesor del campo cercano de vertido, la última de las variables que permiten definir las dimensiones del campo cercano de vertido. Los datos mostrados en la figura cumplen que $s/l_b < 4$, lo cual implica una total independencia del valor de la separación entre difusores.

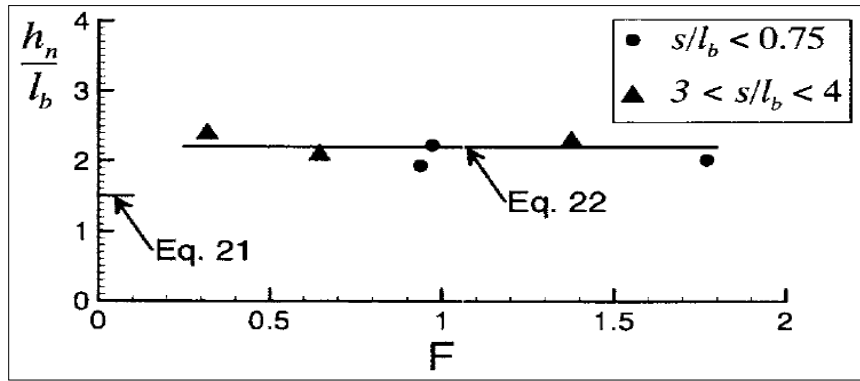


Figura 7. Espesor de la pluma (h_n) en función del número de Froude de la corriente.

En este caso no existe punto de inflexión, se trata de dos curvas horizontales separadas que, dependiendo del valor del número de Froude, se tiene en cuenta una u otra. Esto significa que en función de la existencia o no de una corriente que sea considerable (lo cual queda reflejado con el valor que tenga el número de Froude), el espesor del campo de vertido variará, siendo más fino, cuando la corriente sea débil o inapreciable. Aproximadamente, el punto en que la primera ecuación deja de tener validez en defecto de la otra se corresponde con $F=0.3$.

$$\frac{h_n}{l_b} = 1.5 \quad (\text{Eq.21}) \quad (14)$$

$$\frac{h_n}{l_b} = 2.2 \quad (\text{Eq.22}) \quad (15)$$



6.5. METODOLOGIA SEGUIDA EN EL CÁLCULO

A continuación, se resaltan las ecuaciones resultantes del modelo previamente analizado que, tomadas de manera secuencial, permiten la obtención de la dilución inicial y de los parametros necesarios para el dimensionamiento de la pluma del campo cercano de vertido.

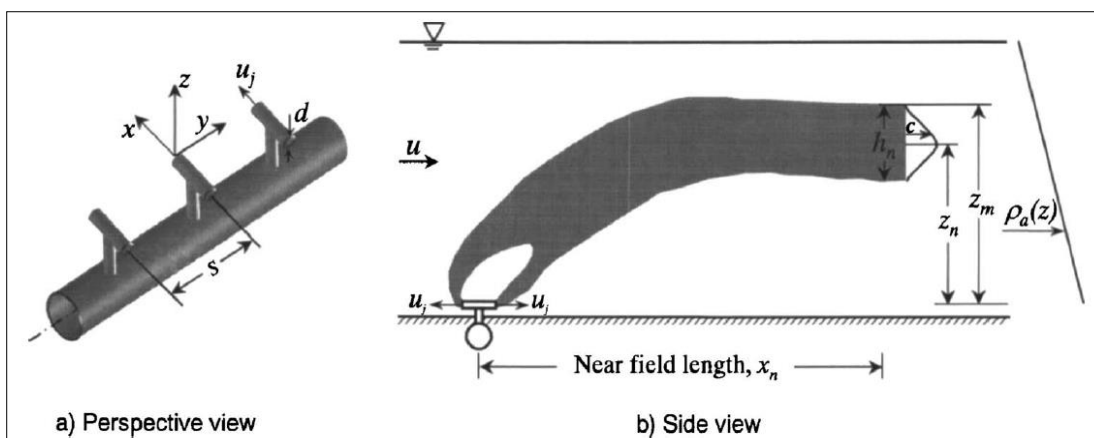


Figura 8. Esquema de las variables que intervienen en un medio estratificado por la densidad.

$$q = \frac{Q_T}{L} \quad (16)$$

q ($m^3/s.m$) = caudal unitario.

Q_T (m^3/s) = Caudal total vertido por el emisario.

L (m) = Longitud del tramo difusor.

$$g'_0 = g \left(\frac{\rho_{a \text{ superficie}} - \rho_0}{\rho_{a \text{ superficie}}} \right) \quad (17)$$

g'_0 (m/s^2) = aceleración modificada debido a la gravedad.

g (m/s^2) = constante de gravitación.

$\rho_{a \text{ superficie}}$ (Kg/m^3) = densidad del medio en superficie.

ρ_0 (kg/m^3) = densidad del efluente.

$$b = g'_0 q \quad (18)$$

b (m^3/s^3) = flotabilidad.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

$$N = \sqrt{\left(\frac{-g}{\rho_a \text{ superficie}}\right) \left(\frac{d\rho_a \text{ superficie}}{dz}\right)} \quad (19)$$

$$\frac{d\rho_a \text{ superficie}}{dz} = \frac{\rho_a \text{ superficie} - \rho_a \text{ vertido}}{H}$$

N = frecuencia de flotabilidad.

$\rho_a \text{ vertido}$ (Kg/m^3) = densidad del medio en el punto de vertido.

H (m) = profundidad del medio de vertido.

$$l_b = \frac{b^{1/3}}{N} \quad (20)$$

l_b = longitud de escala para efluente en forma de pluma.

$$F = \frac{u^3}{b} \quad (21)$$

F = número de Froude de la corriente.

u (m/s) = velocidad de corriente.

$$\text{Si } F < 0.1 \quad \frac{S_n q N}{b^{2/3}} = 0.86 \quad (22)$$

$$\text{Si } F \geq 0.1 \quad \frac{S_n q N}{b^{2/3}} = 1.23 F^{1/6} \quad (23)$$

S_n = dilución inicial

$$\text{Si } F < 0.03 \quad \frac{x_n}{l_b} = 2.3 \quad (24)$$

$$\text{Si } F \geq 0.03 \quad \frac{x_n}{l_b} = 8.0 F^{1/3} \quad (25)$$

x_n (m) = longitud del campo cercano de vertido.



$$\text{Si } F < 0.3 \quad \frac{z_n}{l_b} = 1.7 \quad (26)$$

$$\text{Si } F \geq 0.3 \quad \frac{z_n}{l_b} = 1.4F^{-1/6} \quad (27)$$

z_n (m) = altura desde el eje de un difusor al punto medio de la pluma.

$$\text{Si } F < 0.3 \quad \frac{z_m}{l_b} = 3.2 \quad (28)$$

$$\text{Si } F \geq 0.3 \quad \frac{z_m}{l_b} = 2.4F^{-1/6} \quad (29)$$

z_m (m) = altura máxima de la pluma.

$$\text{Si } F < 0.3 \quad \frac{h_m}{l_b} = 1.5 \quad (30)$$

$$\text{Si } F \geq 0.3 \quad \frac{h_m}{l_b} = 2.2 \quad (31)$$

h_m (m) = espesor de la pluma del campo de vertido.

6.6. VALORES OBTENIDOS PARA EL CASO DEL EMISARIO DE BILBAO.

El paso inicial consiste en recopilar todos los datos de inicio necesarios para el cálculo de la dilución inicial.

Cada una de las variables fluctúa en un rango de valores, más o menos amplio, dependiendo del caso particular de cada variable; de manera que, para cada una de las variables, habrá un caso límite, correspondiente con la situación más desfavorable posible, que, al tomarlo nos deje del lado de la seguridad. Esto implicará, un aumento de la longitud del tramo difusor necesaria para cumplir con la normativa en lo referente a la dilución; y, consecuentemente, un aumento en la dificultad y coste que suponga llevar a cabo la construcción de esa parte del emisario submarino. Por lo tanto, habrá que buscar



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

un equilibrio en el cual estemos en cierta medida del lado de la seguridad, pero que no implique una longitud de tramo difusor excesiva.

- Caudal total vertido por el emisario.

En la Orden de 13 de julio de 1993, se exige una dilución inicial mínima de diseño de 100 durante el 95% del tiempo, por lo que el caudal tomado será aquel que no se supere el 95% del tiempo.

Existen dos posibilidades a la hora de buscar ese caudal. Considerar el año húmedo (1974) como año de diseño, o considerar el año medio (1996) como tal. Con el propósito de encontrar el equilibrio previamente mencionado, se tomará como año de diseño el año medio.

- Densidad del efluente de aguas residuales.

La densidad del efluente de aguas residuales que se tomará, en cualquier cálculo en que sea necesario este dato a lo largo de todo el trabajo, será de 1000 Kg/m^3 .

- Velocidad de la corriente de medio marino.

El efecto que tiene la corriente sobre la dilución es positivo, de modo que a mayor valor de la corriente, el valor de la dilución inicial resultante aumenta. Así, una manera de situarse del lado de la seguridad, deberán tomarse corrientes cuyo valor sea muy pequeño o casi inapreciable. Pero como se dijo antes, esto incrementa mucho la longitud del tramo difusor-

El valor de la corriente está directamente relacionado con el número de Froude, de manera que a partir de un cierto valor de este parámetro ($F=0.1$), se conseguirán esas corrientes bajas.

Por otro lado, la corriente se debe principalmente a la marea y a la viento. Dejando de lado la influencia del viento y tomando solo el valor medio de las corrientes debidas a la marea, estaremos buscando de nuevo ese equilibrio entre seguridad y costes.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

- Profundidad de vertido.

La profundidad de vertido corresponde con la altura entre el eje de un difusor desde el que se vierta efluente, hasta la superficie del medio marino.

Por un lado, hay que definir cuál debe ser la disposición del tramo difusor en lo referente a su apoyo en el fondo y la colocación de las protecciones a su alrededor. Este asunto está íntimamente ligado a la geofísica del fondo marino (Se puede ver en el capítulo de cartografía). En el caso de haber materiales sueltos que haya que escavar se puede proceder a “enterrar” el emisario en el hueco dejado por la excavación y disponer, con ayuda del propio hueco la protección de escollera a su alrededor (esto incrementa la profundidad de vertido). Otra opción, dentro del mismo caso, podría ser rellenar el hueco escavado con materiales más resistentes y colocar la conducción sobre estos, disponiendo las protecciones en forma de dique (menor profundidad que la situación anterior). Existiendo así, una cantidad importante de alternativas.

Para este trabajo, la geofísica con la que hay que trabajar ofrece espesores de materiales sueltos muy pequeños, insuficientes para enterrar la conducción, por lo que lo que se hará será, disponiendo una cama de arena de pequeño espesor en la base, colocar la tubería en propio fondo. En este caso, la disposición de las protecciones más adecuada es en forma de dique, siendo lo apropiado un primer espesor de escollera de 200-300 kg y otro de escollera de doble de 3 Ton, dando un talud a cada lado de la tubería de 2H:1V (solución habitual adoptada en estos casos).

Esta altura cambia en función de la marea, siendo mínima cuando nos encontremos en bajamar máxima viva equinoccial (BMVE), o máxima cuando nos encontremos en pleamar máxima viva equinoccial (PMVE).

Además, la profundidad cambiará según el difusor que consideremos. En este caso se tomará la profundidad relativa al primer difusor de todo el tramo, es decir, a ese respecto, la profundidad mínima, situándonos del lado de la seguridad. También consideraremos la situación más desfavorable en lo que la altura de la marea,



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

tomando como nivel de referencia de la superficie la bajamar máxima viva equinoccial.

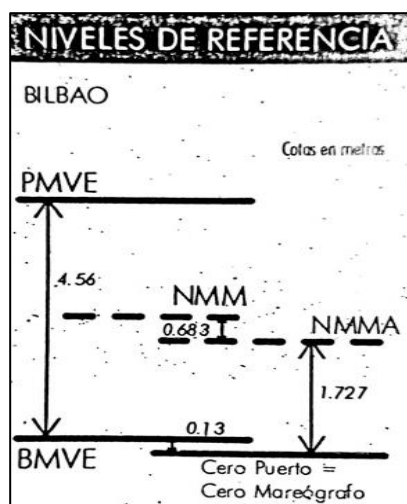


Figura 9. Niveles de referencia de la marea en el puerto de Bilbao.

- Perfiles de densidad del medio marino

Existen diferentes perfiles de densidad dependiendo del mes a considerar (ver capítulo de datos de partida). Para este caso, se estará completamente del lado de la seguridad, de manera que se considerará el perfil de densidad más desfavorable.

Una de las limitaciones de este método, llevado a cabo por Roberts y colaboradores, es que hay que asumir un perfil estratificado de densidad lineal, lo cual se aleja bastante de la realidad.

Datos del efluente:				
Caudal (Q)	10256	(l/s)	10,256	(m ³ /s)
Densidad (ρ ₀)	1000	(kg/m ³)		

Datos del medio receptor:				
Corriente (u)	9,7	(cm/s)	0,02	(m/s)
Profundidad (H)	-30,642	(m)		



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Datos del difusor:		
Long. Difusor (L)	1173	(m)
Elevadores	103	
Distancia (s)	11,5	(m)
s/H	0,38	

En el caso de la longitud del tramo difusor, se irá buscando aquella que, una vez tenidos en cuenta todos los datos iniciales con sus respectivos cálculos posteriores, consiga la dilución inicial requerida.

Una vez determinada la longitud del tramo difusor, se buscará un número de elevadores con el que se logre una relación distancia-profundidad de vertido (s/H) adecuada. Interesa que esta relación se encuentre entre 0.3 y 0.5, como se demostró en estudios previos. Este rango de valores de s/H fue introducido por Roberts en su artículo de 2004: “Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers. I: Unstratified Stationary Water”, en el que definía una zona de transición entre el comportamiento del flujo como pluma lineal (pluma) y como pluma individual (chorro), en la que el rendimiento de la estructura era el mejor. En la Figura 10, se puede apreciar esa zona de transición.

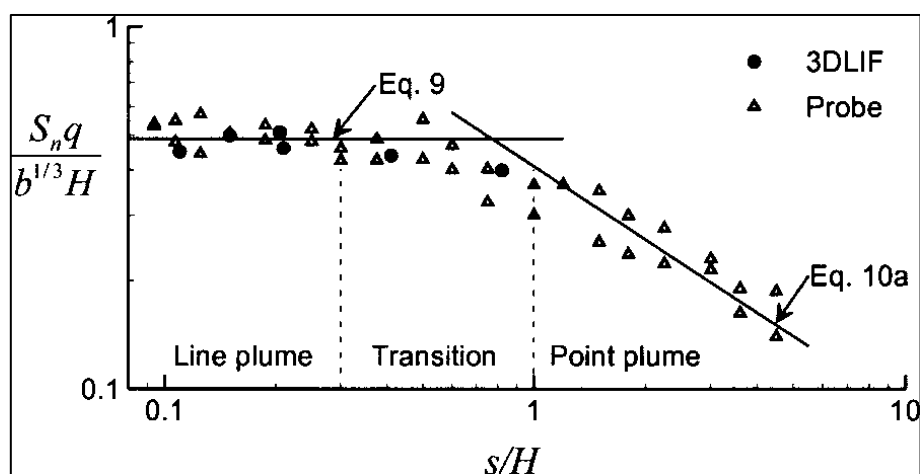


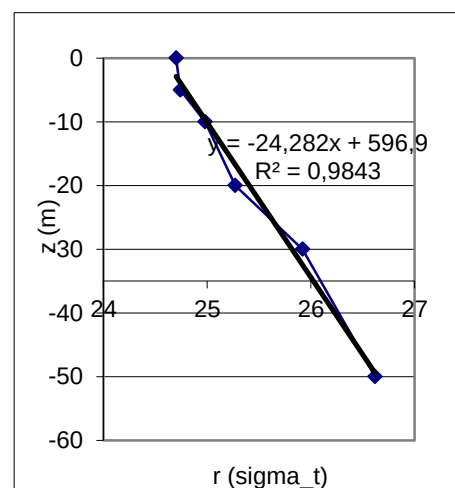
Figura 10. Dilución inicial (S_n) en función de la relación s/H .



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Aunque el artículo citado se corresponde con un medio no estratificado y estacionario, se supone que esta relación no está influida por estas condiciones ambientales, por lo que se puede extrapolar al caso de medio estratificado con corriente ambiental.

Perfil de densidad del medio				
z	r (sigma-t)	r (kg/m3)	r_sup	r_z_vert
0	24,7	1024,70		
-5	24,74	1024,74		
-10	24,98	1024,98		
-20	25,27	1025,27		
-30	25,92	1025,92		
-50	26,62	1026,62		
-30,642			1024,58	1025,84
Coef. regresión	-24,282	596,9		



El paso siguiente consiste en realizar los cálculos pertinentes, con las ecuaciones propuestas en el apartado de metodología. De modo que, tomando dichas ecuaciones de manera secuencial, se consigue obtener el valor de la dilución inicial y los parámetros que permiten dimensionar la pluma del campo cercano de vertido.

q	0,008743393	(m ² /s)
g	9,81	(m/s ²)
g'	0,235	(m/s ²)
b	0,00206	(m ³ /s ³)
N	0,01986	(s ⁻¹)
lb	6,41	
F	0,44350	
s/lb	1,80	

Dilución inicial (S_n)	100,1
----------------------------	-------



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Distancia final campo cercano (x_n)	39,08	(m)
Altura centro pluma (z_n)	10,27	(m)
Altura ascenso pluma (z_m) – teórica-	17,60	(m)
Altura ascenso pluma (z_m) – real-	17,60	(m)
Espesor campo cercano (h_n)	14,09	(m)

La altura de ascenso teóricas se refiere a que el programa no tiene limita esta altura a la profundidad de vertido, de modo que pueden darse situaciones en las que el programa da como resultado una altura de ascenso de la pluma mayor que la profundidad respecto de la superficie del mar. De esta manera, la altura de ascenso de la pluma real, en esas situaciones, se limita al valor de la profundidad de vertido. No se trata de un error en el modelo, sino que, aunque la pluma podría ascender a mayor altura que la correspondiente a la profundidad de vertido, al llegar a la superficie no tiene más medio por el que ascender, con lo que se detiene en ese punto.

6.7. CONCLUSIONES

A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos con los datos iniciales escogidos, de manera que se cumple la Normativa:

Datos iniciales		
Caudal	10,252	(m ³ /s)
Densidad del efluente de aguas residuales.	1000	(kg/m ³)
Velocidad de la corriente de medio marino	9,7	(cm/s)
Profundidad de vertido	-30,642	(m)
Perfil de densidad	Septiembre	(mes)

Resultados		
Longitud del tramo difusor	1173	(m)
Número de elevadores	103	(m)
Separación entre difusores	11,5	(m)



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Además, los estudios específicos realizados considerando el régimen de caudales de vertido correspondiente al año medio (año 1996), han permitido obtener las siguientes conclusiones:

- El parámetro cuya variación influye a priori de forma más significativa en la dilución inicial, es la velocidad de la corriente en el medio receptor. En este estudio se ha adoptado un valor de velocidad igual a 9,7 cm/s.
- Los perfiles de densidad utilizados para el cálculo de la dilución inicial no ofrecen un patrón de comportamiento demasiado claro. Aunque si se aprecia que en los meses de menor temperatura (de noviembre a marzo) se incrementa la dilución, en el resto el comportamiento es un tanto aleatorio, siendo septiembre el mes más desfavorable. En este último grupo de meses, pluma queda atrapada en la columna de agua. Todo esto se aprecia en la siguiente tabla, en la que se representa, con los datos iniciales de nuestro caso (previamente expuestos), la dilución inicial y el ascenso de la pluma por cada uno de los perfiles de densidad correspondientes a cada mes:

	DILUCIÓN INICIAL	ALTURA MÁXIMA DE PLUMA
Enero	200,69	30,64
Febrero	407,40	30,64
Marzo	308,50	30,64
Abril	111,00	19,52
Mayo	146,50	25,77
Junio	104,00	18,30
Julio	137,57	24,19
Agosto	120,50	21,19
Septiembre	100,10	17,60
Octubre	145,50	25,60
Noviembre	189,00	30,64
Diciembre	271,80	30,64

7. DISEÑO HIDRÁULICO

7.1. INTRODUCCIÓN

Una pieza clave del diseño del tramo difusor de un emisario submarino es la realización de un análisis de la estructura desde el punto de vista hidráulico, ya que como cualquier obra civil del campo de la hidráulica, ha de ser capaz de conducir y evacuar el caudal que por él va a circular de forma satisfactoria.

En el caso de los emisarios, este aspecto es especialmente delicado, ya que debido a su propia naturaleza, la puesta en obra de estos elementos se lleva a cabo en lugares en los que el posterior acceso para posibles actuaciones de mantenimiento o reparación es bastante complicado y excesivamente costoso (suele haber tramos subterráneos y tramos submarinos a profundidades considerables). Además, este contratiempo queda acentuado por el hecho de que el agua que evacúa esta conducción no es agua totalmente limpia, sino agua residual procedente de una depuradora, que, en mayor o menor medida, contiene partículas en suspensión que podrían producir una serie de contratiempos que incluso podrían derivar en la inutilización de la estructura.

El sistema cuyo funcionamiento hidráulico se va a analizar consta de diferentes tramos en los que el diámetro de las tuberías puede ser variable. A partir de una tubería subterránea (no muy profunda), el efluente depurado salido de la EDAR llega a una cámara de carga. En ese punto sale una tubería subterránea (de mayor profundidad), por la que el agua (con una cierta presión conseguida en la cámara de carga) es conducida mar adentro. Esto es lo que se denomina tramo de hinca. El tramo termina cuando la tubería aflora en el fondo marino, dónde se une a la tubería del emisario submarino, el cual incluye un tramo de simple tubería y el tramo difusor.

El estudio del funcionamiento hidráulico se llevará a cabo en el tramo comprendido entre la cámara de carga y el final del emisario submarino, que corresponde con el tramo difusor.

A partir del diseño ambiental llevado a cabo mediante el modelo de cálculo de dilución inicial expuesto con anterioridad, se ha determinado la longitud y el número de elevadores necesarios para que el tramo difusor cumpla con la legislación vigente (la



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar, BOE 27 de julio 1993). Con estos datos, ahora, mediante el diseño hidráulico, se trata de determinar los diámetros de cada una de las tuberías que componen el tramo difusor (el de la tubería principal, el de los elevadores y el de las bocas de salida del efluente). A este efecto se ha establecido que, debido a la considerablemente elevada magnitud del tramo difusor y de los caudales que por él van a circular, cada elevador constará de tres bocas de salida (difusores), iguales entre sí, formando un ángulo en planta de 120° , y perpendiculares al tubo elevador.

Aunque existen varios objetivos que se pretenden alcanzar al llevar a cabo el diseño hidráulico de esta estructura, el principal motivo de este estudio es conseguir que la distribución de caudales que se evacúen a lo largo de todos los elevadores del tramo difusor sea lo más uniforme posible, de manera que no existan partes de este tramo (las partes finales) a las que no llegue caudal y que por lo tanto pierdan utilidad, ni partes del tramo (las partes iniciales) por las que se evacúe casi todo el caudal. La manera de conseguir, en la medida de lo posible, este objetivo, es ir variando los diámetros de los tubos elevadores de manera que al principio sean más reducidos y que vayan aumentando conforme se va llegando al final del tramo difusor.

7.2. OBJETIVOS

La consecución de un funcionamiento hidráulico adecuado, meta general en la realización del diseño hidráulico, se hace efectiva a través del logro de una serie de objetivos más específicos enfocados a optimizar la actividad de todas las partes que conforman la estructura. Los objetivos a cumplir son los siguientes:

- Asegurar una distribución uniforme del caudal

Como se dijo previamente, conseguir la distribución uniforme de los caudales en cada uno de los tubos elevadores para todo el abanico de caudales que esté previsto que circulen por el emisario, es el principal objetivo de este diseño, pues es la manera de garantizar que la longitud de tramo difusor en su totalidad



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

reparta el trabajo, y todos los elevadores aporten al trabajo de evacuación de los efluentes.

Además, el incumplimiento de este objetivo supondría que a través de los primeros elevadores salga la mayoría del caudal a evacuar, con lo que se podría dar una situación en la que no se estaría satisfaciendo la legislación vigente en materia de vertidos. El modelo de cálculo de dilución inicial, asume un reparto uniforme del caudal por toda la longitud del emisario, de manera que si no se cumple esa uniformidad, es posible que en ciertos momentos no se alcance la dilución inicial mínima establecida por ley (100:1).

El caso particular del tramo difusor que se pretende diseñar en este trabajo, presenta algunos inconvenientes, derivados principalmente de que el emisario submarino en cuestión forma parte del sistema de saneamiento de un territorio ampliamente poblado como es la Comarca del Gran Bilbao:

- Por un lado, el abanico de caudales de aguas residuales que tiene que evacuar el emisario es bastante grande, es decir, hay una gran diferencia entre el caudal mínimo y el caudal punta, es más, la diferencia sigue siendo notablemente amplia entre el caudal medio y el caudal punta, siendo el caudal punta considerablemente elevado.

Esto implica un importante inconveniente ya que es difícil que las dimensiones del tramo difusor que permitan la distribución uniforme de caudales en la situación de trabajo con el caudal punta, permitan continuar con la uniformidad en la situación de trabajo con caudal medio o mínimo.

La solución tomada para corregir en la medida de lo posible este problema ha sido colocar un aliviadero en costa que, en la situación de caudales demasiado elevados, vierta el exceso de caudal cerca de la costa de manera que se reduzca el caudal máximo que vaya a ser vertido a través del emisario submarino. Más adelante se detallarán los aspectos de esta solución.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

- Derivado del aspecto comentado previamente de que los caudales a evacuar son bastante elevados, la longitud del tramo difusor necesaria para cumplir con la legislación vigente es bastante grande.

Este hecho dificulta en buena parte la consecución del objetivo de distribución uniforme de los caudales, ya que las elevadas pérdidas de carga que se producen en los primeros elevadores, hacen que cuando el agua llega a la parte final, la presión sea bastante baja, circunstancia que, sumada al hecho del elevado número de elevadores, hace que al tramo final el agua llegue con poca velocidad.

Este elevado número de elevadores hace prácticamente inviable ir variando uno a uno los diámetros de los mismos para distribuir uniformemente el caudal, por lo que la solución tomada ha sido dividir el tramo difusor en diferentes intervalos en los que los elevadores de cada uno de los intervalos tengan el mismo diámetro (se ha optado por dividir el tramo difusor en tres porciones).

- Asegurar velocidades de no sedimentación

Al tratarse de aguas residuales procedentes de una planta depuradora, esta no será agua limpia, sino que en mayor o menor medida, tendrá partículas en suspensión. De esta manera, habrá que garantizar una velocidad del agua a lo largo de la tubería que evite la sedimentación de esas partículas en suspensión, y que puedan ser evacuadas con el efluente.

El dimensionamiento del tramo difusor enfocado a este asunto, debe realizarse de modo que se consigan las velocidades mencionadas con los caudales más frecuentes, o bien velocidades apropiadas para la limpieza en caso de no ser evitable la sedimentación en la situación de normal explotación.

En la consecución de este objetivo también incide el problema planteado previamente de la gran longitud del tramo difusor y la gran cantidad de elevadores, que induce a que en los tramos finales, las velocidades que se producen (sobre todo en la tubería principal), sean demasiado bajas. Es inevitable que haya alguna parte del final del tramo difusor que no alcance la



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

velocidad mínima que evite la sedimentación de las partículas, sobre todo cuando los caudales son bajos.

Por otro lado, como se ha dicho, este problema se produce sobre todo con caudales bajos, y el hecho de que el emisario submarino trabaje con caudales bajos implica que la planta depuradora también ha tenido que trabajar con volúmenes de agua no demasiado elevados. En lo concerniente a la depuración, se trata de una situación favorable, ya que la planta es capaz de hacer pasar toda el agua por cada uno de los procesos de depuración, elevando al máximo el rendimiento de la planta. De esta manera, la cantidad de partículas en suspensión que tengan la posibilidad de sedimentar en el emisario se reducirá considerablemente.

- Adecuar las pérdidas de carga en el emisario

El dimensionamiento de los diámetros de las tuberías que componen el tramo difusor del emisario submarino no está enfocado únicamente a conseguir una distribución uniforme de caudales, también es necesario tener en cuenta las pérdidas de carga que se producen al colocar un determinado diámetro de elevador o de tubería principal, ya que de ello depende la altura que haya que proporcionar al agua en cabecera para que el emisario pueda evacuar el caudal requerido.

Este problema es de mayor relevancia en la parte inicial del tramo difusor, donde hay que colocar tuberías de menor diámetro para que no salga todo el caudal por esa zona y pueda distribuirse correctamente. De este modo, a menor diámetro (menor sección de tubo), mayor será la velocidad del efluente y por tanto mayores serán las pérdidas.

Por lo tanto, se tratará de buscar un relativo equilibrio en el que se consiga la distribución uniforme de caudales con un valor de las pérdidas de carga que sea asumible.

Dependiendo de este valor de las pérdidas de carga habrá que dar una cierta altura de cota de agua en cabecera, lo cual puede suponer tener que colocar una



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

bomba, por no ser capaz la instalación de evacuar adecuadamente los caudales por gravedad.

- Prevenir la intrusión salina

Cuando la presión del medio exterior es mayor que la del fluido del interior de la conducción, el agua marina y las sustancias y organismos que en ella se encuentran entran en la interior del emisario través de los difusores originando una reducción de la capacidad de desagüe del mismo y una reducción del área efectiva por la que puede circular el efluente.

Evitar esta situación, también tiene relación con la consecución de un valor de pérdidas de carga aceptable, de manera que al final del tramo difusor, que es donde afecta este problema, se pueda conseguir presión de agua suficiente capaz de contrarrestar la ejercida por el medio marino.

El problema es doble, pues aparte de que las pérdidas de carga hacen que a la parte final del tramo difusor llegue agua con presión baja, esa parte del tramo difusor está situada a mayor profundidad que el resto de emisario submarino por lo que la presión ejercida por el medio exterior es mayor.

Además el caso de este emisario submarino, en el que el abanico de caudales es tan grande, hace que haya momentos en los que los caudales a evacuar sean bajos y que por tanto no haya velocidad ni presión suficiente que permitan una evacuación adecuada del efluente

La solución adoptada en este trabajo ha sido la colocación de válvulas anti-retorno en cada una de las bocas de salida del efluente, las cuales permiten el paso del agua en una única dirección, la de salida del emisario.

El inconveniente que tiene colocar estas válvulas es que suponen una pérdida de carga localizada. Este hecho implica que haya que dar mayor altura de cota al agua en cabecera del emisario.



7.3. MODELO EMPLEADO

Dada una longitud y un número de elevadores del tramo difusor, obtenidos a partir del diseño ambiental del emisario, el enfoque que se da al diseño hidráulico es el de establecer los diámetros de cada una de las tuberías que conforman el tramo difusor, de manera que permitan satisfacer todos los objetivos planteados con anterioridad.

El tramo difusor en cuestión tiene una longitud considerablemente grande, lo cual hace que para llevar a cabo todos los cálculos hidráulicos necesarios para el estudio, sea primordial el empleo de algún programa informático que ofrezca una cierta rapidez en la elaboración de los cálculos y que en todo momento garantice la validez de los mismos.

Los cálculos hidráulicos que hay que llevar a cabo para el diseño de un emisario submarino, pese a ser muy largos, no son excesivamente complejos; básicamente se trata de calcular caudales, velocidades y pérdidas de carga. Sin embargo, el número de programas informáticos que tengan una utilidad clara a la hora de abordar el diseño hidráulico de un emisario submarino es bastante reducido. Para la elaboración de los cálculos hidráulicos de este trabajo, se ha recurrido al programa EPANET, un programa cuya licencia es libre y cuya utilización en el diseño de este tipo de estructuras está muy extendido. En particular, la versión del programa utilizado ha sido EPANET 2.0 vE.

La versión original del programa fue desarrollada en inglés por la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) y posteriormente ha sido traducida al español por varias instituciones. En España una de las versiones de mayor difusión es la desarrollada por la Universidad Politécnica de Valencia.

EPANET es un programa de ordenador que realiza simulaciones en periodo extendido del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de distribución a presión (característica, esta última, no necesaria para llevar a cabo este trabajo). A través del establecimiento de lo que el programa denomina nodos (puntos singulares de las condiciones), de líneas que unen esos nodos (tramos de tubería entre cada nodo), y de otros elementos singulares como pueden ser los embalses o tanques, EPANET determina el caudal que circula por cada una de las conducciones, la presión en cada uno de los nodos o el nivel de agua en cada tanque o embalse, entre otros.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

El programa EPANET es un recurso utilizado para el análisis hidráulico. A continuación se presentan las características más relevantes que introduce el programa, en relación a la necesidad que presenta el diseño hidráulico de un emisario submarino:

- No existe límite en el tamaño de la red que se desee analizar.
- Ofrece la posibilidad de calcular las pérdidas de carga debidas a la rugosidad, para lo cual ofrece la posibilidad de emplear las expresiones de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, o Chezy-Manning. Todas ellas viene recogidas en la Tabla 4. En la Tabla 5 se recogen los coeficientes de rugosidad para cada material y expresión empleados.

Formula	Coeficiente de Resistencia (A)	Exponente de Caudal (B)
Hazen-Williams	$4.727 C^{-1.852} d^{4.871} L$	1.852
Darcy-Weisbach	$0.0252 f(\epsilon, d, q) d^{-5} L$	2
Chezy-Manning	$4.66 n^2 d^{-5.33} L$	2
Notas: C = coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams ϵ = coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach (ft) f = factor de fricción (depende de ϵ , d, y q) n = coeficiente de rugosidad de Manning d = diámetro de la tubería (ft) L = longitud de la tubería (ft) q = caudal (cfs)		

Tabla 4. Expresiones para el cálculo de las pérdidas de carga continuas.

Material	Hazen-Williams C (adimensional)	Manning's n (adimensional)	Material	Darcy-Weisbach ϵ (mm)
Hierro Colado	130 – 140	0,012 - 0,015	PVC y PE	0,0025
Hormigón o Revestido de Hormigón	120 – 140	0,012 - 0,017	Fibrocemento	0,025
Hierro galvanizado	120	0,015 - 0,017	Fundición revestida	0,03
Plástico	140 – 150	0,011 - 0,015	Fundición no revestida	0,15
Acero	140 – 150	0,015 - 0,017	Hormigón armado	0,1
Arcilla Vitrificada	110	0,013 - 0,015	Hormigón liso	0,025

Tabla 5. Valores de los coeficientes de rugosidad.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Para este trabajo se ha empleado la expresión de Chezy-Manning, con su correspondiente coeficiente de rugosidad de Manning, n .

- El programa también ofrece la posibilidad de calcular las pérdidas localizadas, como pueden ser codos, derivaciones, etc.

El cálculo de este tipo de pérdidas de carga se lleva a cabo mediante la introducción en el programa de los parámetros K representativos de cada pérdida de carga localizada.

- Permite modelar diferentes tipos de válvulas, incluyendo válvulas de regulación, de retención, de aislamiento, etc.

Para este trabajo el único tipo de válvula con la que se va a trabajar será la válvula anti-retorno, la cual es posible modelar introduciendo el elemento válvula en el programa y dándole las características específicas de este tipo de válvula, o introduciendo el coeficiente K correspondiente a las pérdidas de carga localizadas debidas a esta válvula, resultante de la expresión:

$$h_{válvula} = K \cdot \frac{V_{salida}^2}{2 \cdot g}$$

- Puede determinar el funcionamiento del sistema simplemente con el nivel de agua en el embalse y controles de tiempo o utilizar un complicado sistema de regulación temporal.

7.4. FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL EMISARIO

7.4.1. VELOCIDAD CRÍTICA DE LIMPIEZA DE LA TUBERÍA

Para evitar los efectos indeseables de la sedimentación es necesario realizar una limpieza periódica del emisario aumentando la velocidad de circulación de las aguas en el mismo, denominándose a esta velocidad crítica de auto limpieza de la tubería, asegurando la puesta en suspensión de los sedimentos.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

La velocidad crítica corresponde a una tensión tangencial (τ) expresada como:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot I$$

Dónde:

ρ : Densidad del agua

g : Aceleración de la gravedad ($= 9.8 \text{ m}^2/\text{s}$)

R : Radio hidráulico.

I : Pendiente de la línea piezométrica.

Siendo la fórmula de Manning:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

V : Velocidad media.

n : Coeficiente de fricción de Manning

Combinando las dos últimas fórmulas se establece la expresión de la velocidad crítica de auto limpieza:

$$V_{crit.} = \frac{R^{1/6}}{n} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\rho \cdot g}}$$



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Para un valor recomendado de $\tau = 4 \text{ N/m}^2$ como tensión crítica de auto limpieza para colectores en alcantarillados unitarios, el cual permite asegurar el arrastre de partículas de hasta 4 mm de diámetro, la velocidad crítica es de:

$$V_{crit.} = \frac{2,8^{1/6}}{0,014} \cdot \sqrt{\frac{4}{(1000 \cdot 9,8) \cdot 9,8}} \approx 0,55 \text{ m/s}$$

La velocidad crítica que requiere este tramo difusor, cuya tubería principal tiene un diámetro de 2,8 metros y está hecha de hormigón armado con camisa de chapa es de 0,55 m/s.

7.4.2. VELOCIDAD CRÍTICA EN EL TUBO ELEVADOR

En el tubo elevador es necesario asegurar una velocidad suficiente para elevar las partículas más gruesas que puedan entrar en la tubería del emisario en condiciones normales de funcionamiento. Se considera que la velocidad de elevación tiene que ser mayor a la sedimentación de la partícula, que se calcula a partir de la fórmula de Stokes:

$$V_s = d^2 \cdot g \cdot \frac{\rho_s - \rho_a}{18 \cdot \mu}$$

Dónde:

V_s : velocidad de sedimentación.

D : Diámetro de las partículas.

ρ_s : Peso específico de la partícula.

ρ_a : Peso específico del fluido.

μ : Viscosidad dinámica del fluido



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Según la curva granulométrica correspondiente a un agua residual urbana de un sistema unitario tras ser sometida a un desbaste, las partículas de mayor tamaño presentan un diámetro de 3mm. Supuesta una partícula con este diámetro y con densidad 2.65 t/m^3 , la V_s obtenida es:

$$V_s = 0,003^2 \cdot 9,8 \cdot \frac{2,65 - 1}{18 \cdot 2 \cdot 10^{-5}} \approx 0,40 \text{ m/s}$$

Se considera que la velocidad en el tubo elevador en el periodo de limpieza del emisario ha de ser mayor de 2 veces la velocidad de sedimentación calculada. Por lo tanto, la velocidad de auto limpieza del tubo elevador será 0.8 m/s.

Para asegurar la evacuación de los sedimentos que llegan a las boquillas es necesario conseguir una velocidad en ellas al menos igual a la del tubo elevador.

7.4.3. LIMPIEZA DE BURBUJAS DE AIRE DEL EMISARIO

Las posibles acumulaciones de aire en el interior de las tuberías subacuáticas en general y de los emisarios submarinos en particular son perjudiciales para el correcto funcionamiento de los mismos, ya que implican una disminución de la capacidad hidráulica y pueden llegar a producir, en situaciones extremas, su flotación o desplazamiento vertical.

El material escogido para la fabricación del tramo difusor ha sido el hormigón (tubos de hormigón armado con camisa de chapa), y pese a que el problema de la aparición de burbujas de aire es de mayor relevancia en tuberías de plástico (como el polietileno), supone una práctica correcta la realización de este estudio.

Una de las soluciones para hacer frente al problema es la de conseguir que haya una velocidad suficiente en el conducto para transportar el aire a través del mismo. En este sentido, siguiendo las recomendaciones del fabricante Pipelife Norge AS se determina que la velocidad crítica para eliminar las burbujas de aire presentes en la tubería, viene dada por la siguiente expresión:



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

$$V_c = f(D_i \cdot \sin(\alpha))$$

Siendo:

D_i : Diámetro interno de la tubería (m)

α : Ángulo de inclinación de la tubería

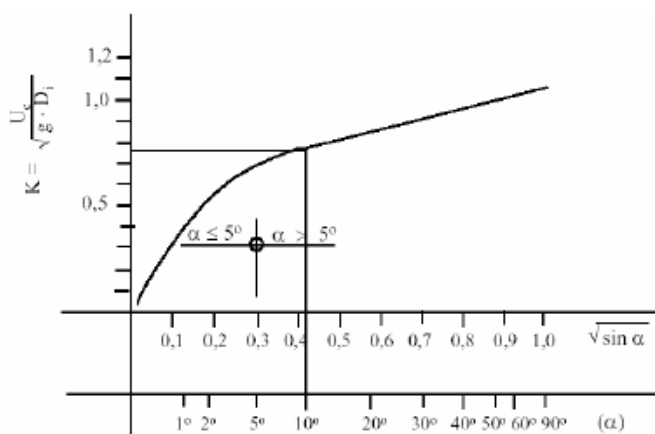
En una expresión simplificada se puede relacionar V_c en función de $\sqrt{g \cdot D_i}$, siendo:

g : la aceleración de la gravedad

$$V_c = K \cdot \sqrt{g \cdot D_i}$$

Siendo K función de $\sqrt{\sin(\alpha)}$ según la gráfica siguiente, aplicable para α entre 0 y 90°:

α (°)	K
1	0,39
2	0,52
5	0,68
10	0,77
20	0,86
30	0,91
40	0,95
50	0,99
60	1,02
90	1,05





Dada la traza del emisario, presentada en el capítulo de cartografía, y las longitudes de la tubería inicial y del tramo difusor (2390 metros y 1173 metros respectivamente), se obtiene que el desnivel entre el principio y el fin del tramo difusor es de 11,688 metros, lo cual se traduce en que la pendiente media del tramo es de 0,999% ($\alpha=0.57^\circ$). Dada esta consideración, se obtiene un valor de $K = 0,2$ con lo que para un diámetro igual a 2800 metros, resulta:

$$V_c = 0,2 \cdot \sqrt{9,8 \cdot 2,8} = 1,05 \text{ m/s}$$

7.5. METODOLOGÍA

7.5.1. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE DISEÑO

Uno de los principales problemas que presenta este emisario submarino en particular a la hora de abordar el diseño hidráulico para su dimensionamiento, es el gran abanico de caudales que es necesario evacuar a través del mismo, lo cual implica la existencia de una gran diferencia entre los caudales punta y mínimo.

Este problema se traduce en que, las dimensiones que para un determinado régimen de caudales permiten una evacuación óptima del efluente, para otro régimen diferente, no permiten cumplir los objetivos que se pretende alcanzar en la realización del diseño hidráulico.

El diseño hidráulico de un emisario submarino se ha de realizar para el caudal máximo, lo cual implica que hay que dimensionar las tuberías con unos diámetros suficientemente amplios para que no se produzcan velocidades excesivamente grandes que den lugar a valores excesivos de pérdidas de carga. Si hay mucha diferencia entre el caudal máximo (el de diseño) y el mínimo, como ocurre en este caso, en las situaciones en las que haya que evacuar caudales medios o bajos, el hecho de que haya habido que colocar diámetros amplios, dará lugar a que las velocidades en el interior del emisario sean considerablemente bajas, lo cual puede implicar problemas de una incorrecta distribución de los caudales a lo largo del emisario, y especialmente de sedimentación de partículas o de formación de burbujas de aire.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Con el objetivo de reducir la diferencia entre los caudales máximo y mínimo, se plantea la solución de colocar un alivio en costa que permita reducir el caudal circulante por el emisario submarino en los periodos de mayores caudales, es decir, reduciendo el caudal de diseño empleado para el diseño hidráulico del emisario.

En definitiva, el propósito de esta configuración es que durante la mayor parte del tiempo los caudales desagüen por el emisario principal. El Alivio, por su parte, únicamente debería entrar en funcionamiento cuando el emisario principal quede fuera de servicio por avería o por necesidades de mantenimiento, o en épocas de fuertes precipitaciones.

Al igual que en el caso de la traza de la tubería previa al tramo difusor del emisario submarino, el caudal que debe circular por el emisario en la situación en la que se coloca un alivio en costa se ha obtenido a partir de un estudio previo, el estudio ambiental del Emisario Submarino para la Evacuación de los Efluentes en las E.D.A.R. de Galindo y Lamiako, que encargó el Consorcio de aguas de Bilbao Bizkaia al Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.

ESTUDIO PREVIO

Para el diseño del emisario con alivio en costa se han planteado varias alternativas en función del valor máximo de caudal de incorporación al emisario submarino considerado. El valor más bajo para dicho caudal se ha fijado en $15,5 \text{ m}^3/\text{s}$ que, para el año húmedo (1974), presenta una probabilidad de no superación del 98%. El caudal máximo más elevado que se ha considerado corresponde a $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$, y presenta una probabilidad de no superación para dicho año del 99,5%.

Con base en estos caudales máximos de incorporación al emisario submarino se ha calculado el régimen de alivios esperable a lo largo de la temporada de baño en cada una de las situaciones consideradas relativos al año medio (1996). Dicha información se resume en la Tabla 6.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Caudal máximo por emisario (m^3/s)	Número de alivios	Volumen total vertido (m^3)	Tiempo de vertido (h)
15,5	6	152,928	25
18	5	59,476	7,8
19,5	3	25,299	4,8

Tabla 6. Características de los alivios (año 1996) en función del caudal máximo de incorporación al emisario submarino.

Para la descarga de dicho vertido en costa se ha previsto la realización de una conducción de vertido con una longitud de unos 550 metros con arranque en el mismo lugar que el emisario submarino principal, Punta Galea. Con esta longitud se consigue un alejamiento mínimo de la cercana playa de Gorrondatxe, alcanzándose una profundidad de vertido del orden de 9 metros que permite aumentar la mezcla inicial de la descarga.

El análisis de la evolución conjunta del vertido por emisario y del alivio en costa ha permitido elaborar la Tabla 7 en la que puede observarse que la alternativa de vertido para la que no se detecta a lo largo de la temporada de baño superación de 100 UFC/100 ml en las zonas de baño son las que corresponden a una descarga de un caudal máximo de $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Emisario submarino	Caudal máximo (m ³ /s)	Puntos de control en playas	
		La Arena	Gorrondatxe
Punta Galea	15,5	0	27,16
	18	0	8,10
	19,5	0	0

Tabla 7. Horas de superación de una concentración de 100 UFC/100 ml a lo largo de la temporada de baño en función del caudal máximo de incorporación al emisario submarino.

A modo de ejemplo de los resultados obtenidos a partir del modelado numérico realizado, en la Figura 20 se muestra la evolución conjunta del vertido por emisario submarino y del alivio en costa en seis instantes de tiempo a lo largo de la temporada de baño.

Pese a la reducción del caudal máximo que va a circular por el emisario, hecho que favorece el diseño hidráulico del mismo (más en concreto del tramo difusor), no se concibe una reducción de la longitud del tramo difusor ni un descenso en el número de tubos elevadores de este tramo, pues el caudal resultante de 19,5 m³/s, sigue siendo relativamente elevado.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

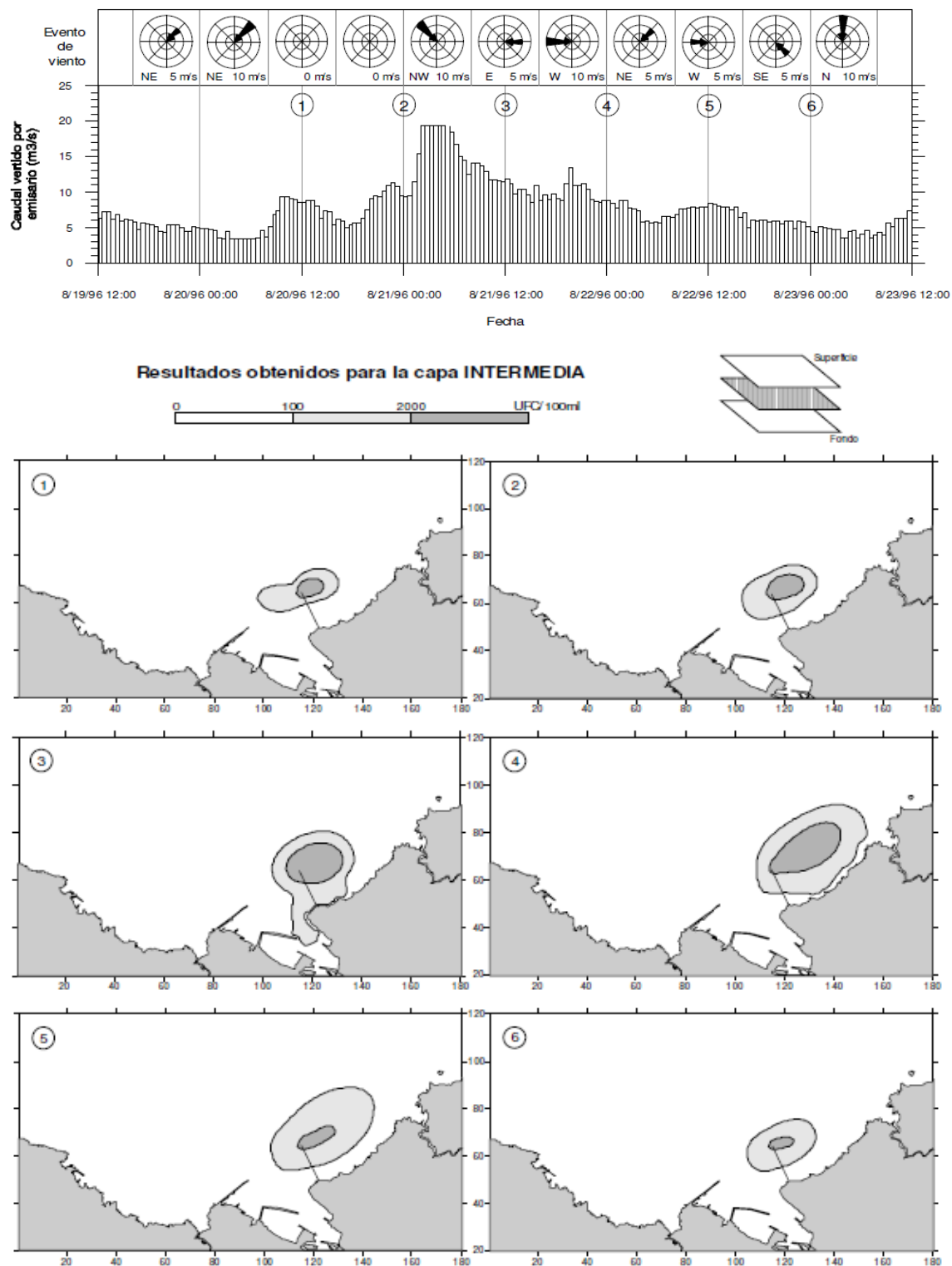


Figura 20. Evolución del efluente vertido a través del emisario submarino de Punta Galea (rumbo N 25° W y 2390 m de longitud hasta el tramo difusor) y de la conducción de alivio. Caudal máximo de evacuación por el emisario de 19,5 m³/s.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

La conclusión que se obtiene de este estudio es que el caudal máximo que circulará por el emisario submarino será de $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal con el que se llevará a cabo el dimensionamiento correspondiente al diseño hidráulico del tramo difusor de este trabajo. En los momentos en los que el caudal procedente de la planta depuradora sea superior a este caudal, el exceso será conducido por la tubería de alivio a unos 550 metros de la costa. En la Figura 21, se muestra en qué momentos se produce el exceso de caudal y cuál es el valor de ese exceso, referido al año medio (1996). En dicha Gráfica se puede apreciar como en temporada de baño, únicamente se producen tres instantes en los que hay que recurrir al alivio en costa, como se decía en la Tabla 1, previamente presentada.

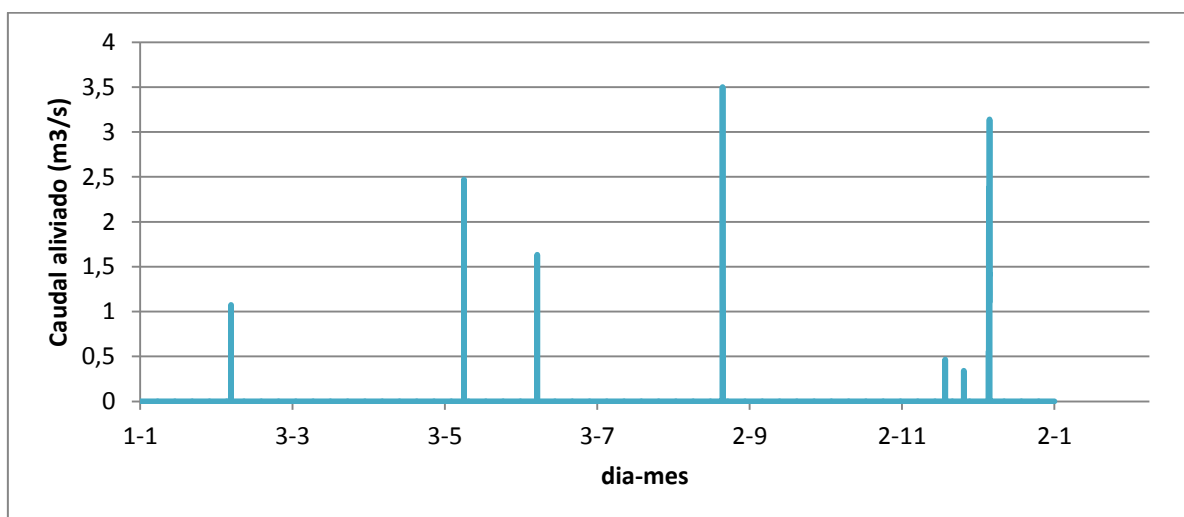


Figura 21. Caudales aliviados en costa a lo largo de un año (año medio).

7.5.2. Elección el material de construcción

Como se planteó en puntos anteriores, es especialmente relevante la elección de un material adecuado para la construcción del emisario submarino, pues condicionará tanto aspectos constructivos como aspectos de explotación. De esta manera, a la hora de realizar el diseño hidráulico de la estructura, este dato será determinante.

En primer lugar, la elección del método constructivo quedará supeditada al material seleccionado, debido en gran parte, a la capacidad de cada material de soportar los



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

esfuerzos que aparecen en el proceso de colocación del emisario y en particular, a la curvatura que permitan desarrollar. El caudal máximo que vaya a circular por el emisario también ha de considerarse, pues ese será el caudal de diseño. La importancia de este factor radica en que si el caudal es grande (como ocurre en este caso), serán necesarios diámetros más grandes para reducir las pérdidas de carga, unos tamaños que debido a los esfuerzos que implican, pueden no ser asumidos por ciertos materiales.

En segundo lugar, cada material tendrá unas características específicas que limitarán el funcionamiento hidráulico de la estructura. Toma especial importancia la rugosidad, la cual condicionará las pérdidas que se vayan a producir.

El emisario submarino cuyo tramo difusor es objeto de este trabajo se localiza en las aguas del Mar Cantábrico (más concretamente en la costa de Vizcaya), un lugar donde la acción marina puede llegar a ser bastante intensa, sobre todo en el periodo invernal. Además, como se dijo previamente los caudales a evacuar pueden llegar a ser considerablemente grandes, con todo lo que ello implica.

Estos factores, sumados a la batimetría del fondo por el que pasa la traza del emisario, son clave para decidir con qué tipo de material construir el emisario y el método constructivo que se pretende llevar a cabo.

Tomando en consideración los aspectos previamente mencionados, se ha decidido que material adoptado sea el hormigón armado, lo cual da lugar a tubos de hormigón reforzado con camisa de chapa.

Dado el aspecto mencionado con anterioridad referido a que en la zona en la que se ubica el emisario submarino puede darse condiciones marítimas desfavorables, el método constructivo más adecuado para este emisario y en particular para el tramo difusor es el arrastre por fondo.

7.5.3. PÉRDIDAS DE CARGA

El cálculo de las pérdidas de carga que se producirían a lo largo del emisario submarino se realiza en base a los diámetros calculados. Para obtener estos valores se ha considerado lo siguiente:



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

- Pérdidas de carga continuas

El cálculo de las pérdidas de carga continuas debidas al rozamiento se ha llevado a cabo a través de la fórmula de Manning.

En el caso que nos ocupa, el de cálculo de las pérdidas de carga continuas, la elección del material es el principal condicionante pues cada uno tiene una determinada rugosidad y un correspondiente factor de Manning.

De acuerdo a lo establecido en el apartado referente a este asunto, se ha decidido que material adoptado sea el hormigón armado, lo cual da lugar a tubos de hormigón reforzado con camisa de chapa.

De esta manera, se ha tomado un coeficiente de Manning para la tubería del emisario de $n = 0,014$.

- Pérdidas de carga localizadas:

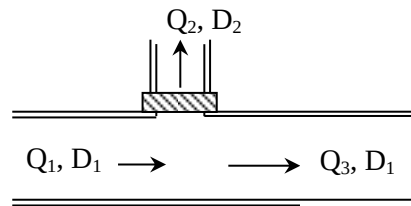
Dada la disposición general de un emisario submarino, y especialmente de su tramo difusor, existe un buen número de elementos que dan lugar a pérdidas de carga localizadas. Debido a factores como el cambio de diámetro de tubería entre la tubería principal y los elevadores, el gran número de cambios de dirección del agua, o los considerablemente grandes caudales con los que se trabaja, las pérdidas localizadas suponen un problema mayor que las pérdidas de carga continuas. Las pérdidas consideradas son las siguientes:

- Pérdidas de carga en derivaciones

Esta pérdida de carga se produce debido al paso del efluente que circula por la tubería principal a los elevadores, acción mediante la cual el flujo pasa de tener una trayectoria más o menos horizontal a una más o menos vertical, como se puede ver en la siguiente figura.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino



Las fórmulas empleadas para este cálculo han sido:

$$h_{deriv\ 2} = K_{Q1-Q2} \cdot \left(\frac{V_2^2}{2 \cdot g} \right)$$

Siendo:

$$K_{Q1-Q2} = 1,2 + \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) - 2 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 \quad \text{Para uniones sin redondeo.}$$

$$K_{Q1-Q2} = 0,4 + \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) - 2 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 \quad \text{Para uniones con redondeo.}$$

Para este caso, se han tomado uniones sin redondeo.

$$h_{deriv\ 3} = K_{Q1-Q3} \cdot \left(\frac{V_3^2}{2 \cdot g} \right)$$

Siendo:

$$K_{Q1-Q3} = \frac{1 + \left(\frac{Q_3}{Q_1} \right)^{20}}{1 + \left(\frac{Q_3}{Q_1} \right)^{3,5}}$$



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

- Pérdidas de carga a la entrada de las bocas

Esta pérdida de carga se debe a que las bocas de salida forman un ángulo de 90° con los elevadores, con lo que de nuevo, el efluente tiene que variar su dirección 90°.

A diferencia del caso anterior en el que solo parte del efluente cambia su dirección y el resto sigue por la tubería inicial, en esta ocasión toda el agua que fluye cambia de dirección, por lo que esta situación se podría asemejar a la de un codo.

La fórmula empleada calcular este tipo de pérdidas de carga es la misma que se emplearía para el cálculo de las pérdidas en un codo:

$$h_{deriv3} = 1,8 \cdot \left(\frac{V_{en\ boca}^2}{2 \cdot g} \right)$$

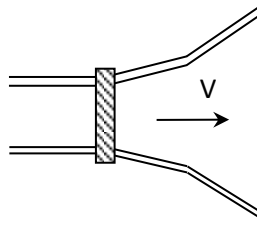
- Pérdidas de carga por las válvulas anti-retorno

Para el diseño del tramo difusor se ha optado por la disposición de válvulas de tipo anti-retorno en cada una de las bocas de salida del efluente. El objetivo de estas válvulas es que el flujo de agua vaya en una única dirección, lo cual, en este trabajo, se traduce en que por las bocas del emisario únicamente salga el agua residual y no entre agua del medio marino.

Estas válvulas son especialmente importantes en la parte final del tramo difusor, o en momentos en los que el caudal circulante sea bajo, ya que puede que la presión con la que llegue el agua a las bocas sea inferior a la del medio marino, produciendo la entrada del agua de mar en el emisario. Partiendo de la base de que este tipo de pérdidas de carga son orientativas, para su determinación es habitual recurrir a las indicaciones proporcionadas por los fabricantes de las mismas:



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino



Para el cálculo de este tipo de pérdidas de carga se han empleado las siguientes expresiones:

$$h_{anti-retorno} = 0,402 \cdot V + 0,383 \quad \text{Para 45 metros de contrapresión.}$$

$$h_{anti-retorno} = 0,182 \cdot V + 0,183 \quad \text{Para 20 metros de contrapresión.}$$

Siendo:

V (m/s) = velocidad del flujo en el interior de la boca, antes de llegar a la válvula.

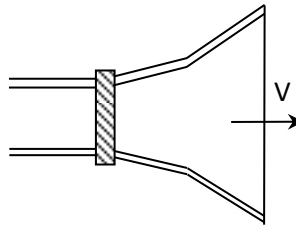
En el caso del tramo difusor de este emisario submarino, se utilizará la primera de las expresiones puesto que en todo momento, la contrapresión está en el entorno de los 45 metros.

- Pérdidas de carga por variación de velocidad a la salida

Estas pérdidas se deben a que el efluente, cuando sale por las bocas (por las válvulas), lleva una determinada velocidad y dirección, y al salir se encuentra con un gran volumen de agua que está parado o que no lleva la misma velocidad ni dirección.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino



La fórmula empleada para este cálculo ha sido

$$h_{salida} = \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Siendo:

V (m/s) = velocidad del flujo en la sección de salida.

- Pérdidas de carga por la salida al medio marino

Estas pérdidas se producen debido a que el efluente que sale a través del emisario tiene una determinada densidad, y al salir se encuentra con un volumen de agua con una densidad bastante diferente (densidad del agua de mar mayor que la del efluente).

Para todo el diseño del tramo difusor se estado tomando un perfil de densidad del medio receptor estratificado, con lo que dependiendo de la altura, la densidad del medio varía. Por lo tanto, en función de la altura a la que se sitúe cada boca de salida del emisario, las pérdidas de carga en cuestión serán diferentes.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

La expresión empleada para el cálculo de estas pérdidas ha sido:

$$\Delta h_p = \frac{\Delta \rho}{\rho_{efluente}} \cdot H = \frac{\rho_{medio} - \rho_{efluente}}{\rho_{efluente}} \cdot H$$

Al igual que en el caso del dimensionamiento ambiental del emisario, el perfil de densidad tomado ha sido el correspondiente al mes de septiembre.

El diseño del emisario se ha realizado tomando como cota del mar la de la pleamar máxima viva equinoccial, la situación más desfavorable, por lo que la altura, H , corresponde con el desnivel entre la cota de la correspondiente boca de salida del emisario y la cota de la pleamar máxima viva equinoccial.

7.5.4. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL CÁLCULO

Una vez conocidos todos los datos de partida necesarios para realizar el diseño hidráulico, los cuales se muestran en el Tabla 8, se estará en disposición de acudir al programa informático EPANET para obtener las dimensiones óptimas que mejor me permitan satisfacer los objetivos de este diseño.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Longitud del tramo de tubería previo	2390 m
Longitud del tramo difusor	1173 m
Número de difusores	103
Distancia entre difusores	11,5 m
Longitud de elevadores	3,7 m
Caudal de diseño (situación más desfavorable)	19,5 m ³ /s
Cota del punto inicial del tramo difusor*	-35,74 m
Cota del punto final del tramo difusor*	-47,43 m

Tabla 8. Datos de partida para el cálculo hidráulico.

*Las cotas (profundidades) están referidas a la pleamar máxima viva equinoccial, que es la situación de marea más desfavorable que se puede presentar, ya que será la situación que condicione la máxima altura piezométrica que la instalación deberá ser capaz de dar al agua.

De esta manera, la principal meta de los cálculos hidráulicos será determinar el diámetro óptimo de cada tubo que conforma el tramo difusor.

El trabajo llevado a cabo con el programa EPANET ha consistido en un proceso iterativo en el que una vez introducidas las características iniciales del emisario (cotas, longitudes y coeficientes de rugosidad), se ha establecido un diámetro de la tubería principal para el cual el valor de las pérdidas de carga era aceptable, y se ha ido probando con diferentes diámetros en busca de un equilibrio entre la consecución de una correcta distribución de caudales por todo el tramo difusor y la obtención de valores de pérdidas de carga aceptables.

El proceso iterativo comienza con la suposición de que por todos los difusores, el caudal se reparte por igual. Para esos valores de caudales y unos diámetros más o menos razonables se establecen los coeficiente K, que representan las pérdidas de carga localizadas (detalladas previamente). De esta manera, se introduce en EPANET esos coeficientes y se ejecuta el programa, resultando una distribución de caudales desigual



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

(la mayor parte del caudal se evacua en la parte inicial del tramo difusor) que habrá que corregir en la medida de lo posible.

Siempre teniendo en cuenta que el caudal que debe evacuar el emisario es de $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (lo cual se consigue dando mayor o menor cota al nivel de agua en la cámara de carga inicial, la cual se representa en el programa mediante un embalse), la corrección de la distribución de caudales se llevara a cabo variando los diámetros tanto de los elevadores como de las bocas de salida.

Al tratarse de un tramo difusor tan largo, no es viable la variación de los diámetros de cada elevador (y bocas) uno a uno, por lo que el método adoptado ha sido dividir el tramo difusor en tramos más pequeños en los que se agrupe un determinado número de elementos, a los cuales se les dará un diámetro determinado.

Así, a los elementos de la parte inicial del tramo difusor se les dará un diámetro menor que a los de partes posteriores, de manera que el caudal que por ellos pase se reduzca y el que pase por partes posteriores del tramo aumente.

Estos cambios de diámetro y consiguientemente de caudal, suponen un cambio en el valor de las K (coeficientes de pérdidas localizadas), por lo que habrá que calcular los nuevos coeficientes y volver a introducirlos en el programa EPANET, con lo que se estará realizando una segunda iteración.

Con estos segundos valores de las K, al ejecutar el programa no se producirá tanta variación de caudales, por lo que solo son necesarias dos o tres iteraciones. Estas iteraciones podrían ser concebidas como procesos de afino del valor de los coeficientes de pérdidas, cuyo valor se va acotando a medida que se van realizando dichas iteraciones.



7.6. RESULTADOS

A través de los cálculos llevados a cabo con el programa EPANET, se han obtenido dos posibles alternativas en relación al dimensionamiento de los tubos de tramo difusor. La diferencia entre ambas alternativas reside en la manera de dividir las partes del tramo difusor (ambas en tres tramos), de manera que en la primera alternativa se ha dividido el tramo en partes iguales y en la segunda la división ha consistido en que la parte inicial sea la de menor número de elevadores y la parte final sea la que albergue un mayor número de ellos, dejando una parte intermedia entre estas dos. En la Tabla 9 se muestra los diámetros obtenidos para cada una de las alternativas.

Tramo difusor	Alternativa 1				Alternativa 2			
	Tubería principal (Ø)	Elevadores		Bocas* (Ø)	Tubería principal	Elevadores		Bocas* (Ø)
		Nº	Ø			Nº	Ø	
Tramo 1	2800	35	400	135	2800	20	400	125
Tramo 2	2800	34	500	215	2800	25	500	165
Tramo 3	2800	34	800	325	2800	58	700	250

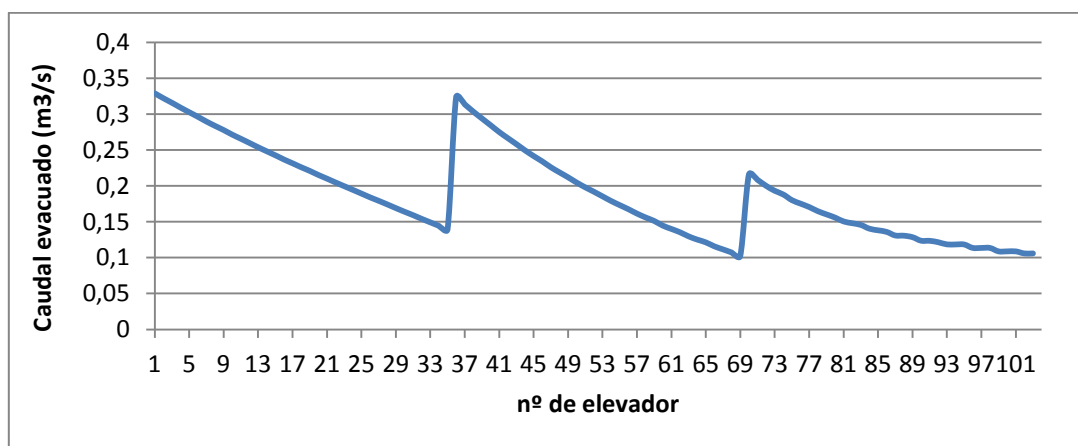
Tabla 9. Diámetros (mm) y número de elevadores elegido en cada alternativa para el tramo difusor.

*En ambas alternativas se han dispuesto tres bocas de salida por cada elevador.

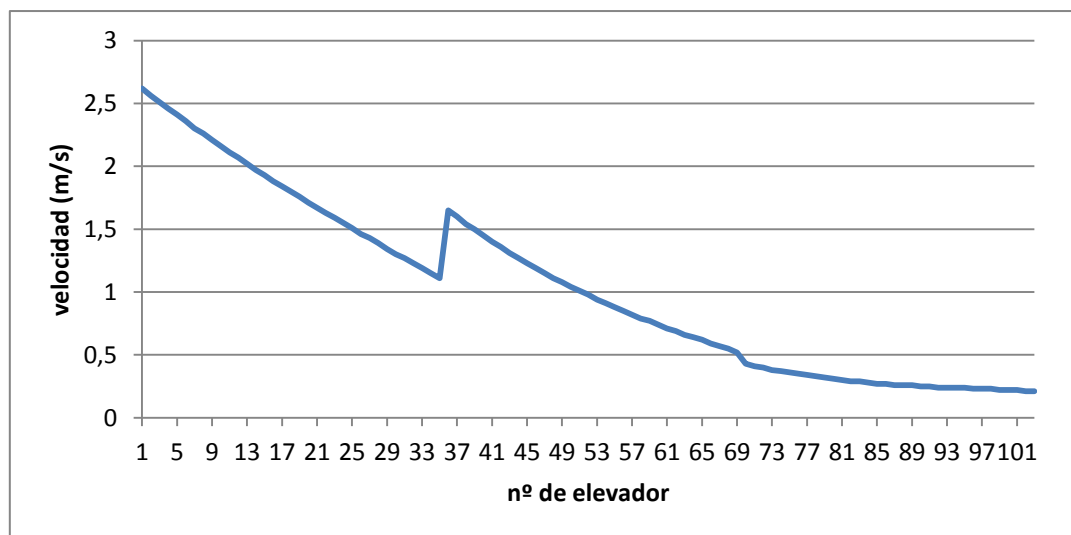


7.6.1 Alternativa 1

En las Gráficas 1 y 2 se puede observar la distribución del caudal y de la velocidad respectivamente por cada uno de los elevadores que componen el tramo difusor:



Gráfica 1. Distribución del caudal a lo largo de los elevadores del tramo difusor.



Gráfica 2. Distribución de la velocidad a lo largo de los elevadores del tramo difusor.

A continuación se presentan los valores de pérdidas de carga que se producen con el dimensionamiento adoptado en la alternativa 1.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Tubería principal							Tubería secundaria					
Distancia origen (m)	Material	longitud (m)	Ø (mm)	Altura piezométrica (m)	Pérdidas (m)		nº	Ø elevador (mm)	Ø Bocas (mm)	perdidas salinidad (m)	Perdida elevador y boca (m)	Pérdidas totales (m)
0	Hormigón		2800	23,00								
2378,5	Hormigón	2390	2800	15,44	7,56	7,56						
2390	Hormigón	11,5	2800	14,95	0,49	13,47	1	400	135	1,06	13,85	22,96
2401,5	Hormigón	11,5	2800	14,47	0,48		2	400	135	1,06	13,38	22,97
2413	Hormigón	11,5	2800	14,01	0,46		3	400	135	1,06	12,91	22,97
2424,5	Hormigón	11,5	2800	13,56	0,45		4	400	135	1,07	12,46	22,96
2436	Hormigón	11,5	2800	13,13	0,43		5	400	135	1,07	12,03	22,96
2447,5	Hormigón	11,5	2800	12,71	0,42		6	400	135	1,07	11,61	22,97
2459	Hormigón	11,5	2800	12,31	0,40		7	400	135	1,08	11,19	22,96
2470,5	Hormigón	11,5	2800	11,92	0,39		8	400	135	1,08	10,80	22,96
2482	Hormigón	11,5	2800	11,54	0,38		9	400	135	1,08	10,42	22,97
2493,5	Hormigón	11,5	2800	11,17	0,37		10	400	135	1,09	10,05	22,96
2505	Hormigón	11,5	2800	10,82	0,35		11	400	135	1,09	9,69	22,96
2516,5	Hormigón	11,5	2800	10,47	0,34		12	400	135	1,09	9,35	22,97
2528	Hormigón	11,5	2800	10,14	0,33		13	400	135	1,10	9,01	22,96
2539,5	Hormigón	11,5	2800	9,82	0,32		14	400	135	1,10	8,68	22,96
2551	Hormigón	11,5	2800	9,51	0,31		15	400	135	1,10	8,37	22,97
2562,5	Hormigón	11,5	2800	9,20	0,30		16	400	135	1,11	8,06	22,96
2574	Hormigón	11,5	2800	8,91	0,29		17	400	135	1,11	7,77	22,96
2585,5	Hormigón	11,5	2800	8,63	0,28		18	400	135	1,11	7,48	22,97
2597	Hormigón	11,5	2800	8,35	0,28		19	400	135	1,11	7,21	22,97
2608,5	Hormigón	11,5	2800	8,08	0,27		20	400	135	1,12	6,93	22,96
2620	Hormigón	11,5	2800	7,82	0,26		21	400	135	1,12	6,67	22,97
2631,5	Hormigón	11,5	2800	7,57	0,25		22	400	135	1,12	6,41	22,97
2643	Hormigón	11,5	2800	7,32	0,25		23	400	135	1,13	6,16	22,96
2654,5	Hormigón	11,5	2800	7,08	0,24		24	400	135	1,13	5,92	22,97
2666	Hormigón	11,5	2800	6,85	0,23		25	400	135	1,13	5,68	22,97
2677,5	Hormigón	11,5	2800	6,62	0,23		26	400	135	1,14	5,45	22,96
2689	Hormigón	11,5	2800	6,40	0,22		27	400	135	1,14	5,23	22,97



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Tubería principal						Tubería secundaria					
Distancia origen (m)	Material	longitud (m)	Ø (mm)	Altura piezométrica (m)	Pérdidas (m)	nº	Ø elevador (mm)	Ø Bocas (mm)	perdidas salinidad (m)	Perdida elevador y boca (m)	Pérdidas totales (m)
2700,5	Hormigón	11,5	2800	6,19	0,21	28	400	135	1,14	5,01	22,97
2712	Hormigón	11,5	2800	5,98	0,21	29	400	135	1,15	4,79	22,96
2723,5	Hormigón	11,5	2800	5,77	0,20	30	400	135	1,15	4,59	22,97
2735	Hormigón	11,5	2800	5,57	0,20	31	400	135	1,15	4,39	22,97
2746,5	Hormigón	11,5	2800	5,38	0,19	32	400	135	1,16	4,19	22,96
2758	Hormigón	11,5	2800	5,19	0,19	33	400	135	1,16	4,00	22,97
2769,5	Hormigón	11,5	2800	5,01	0,18	34	400	135	1,16	3,81	22,97
2781	Hormigón	11,5	2800	4,82	0,18	35	400	135	1,17	3,62	22,96
2792,5	Hormigón	11,5	2800	4,66	0,16	36	500	215	1,17	3,46	22,96
2804	Hormigón	11,5	2800	4,51	0,15	37	500	215	1,17	3,31	22,97
2815,5	Hormigón	11,5	2800	4,37	0,14	38	500	215	1,18	3,15	22,96
2827	Hormigón	11,5	2800	4,23	0,14	39	500	215	1,18	3,01	22,96
2838,5	Hormigón	11,5	2800	4,10	0,13	40	500	215	1,18	2,89	22,97
2850	Hormigón	11,5	2800	3,98	0,12	41	500	215	1,19	2,75	22,96
2861,5	Hormigón	11,5	2800	3,86	0,12	42	500	215	1,19	2,64	22,96
2873	Hormigón	11,5	2800	3,75	0,11	43	500	215	1,19	2,53	22,97
2884,5	Hormigón	11,5	2800	3,65	0,10	44	500	215	1,20	2,42	22,96
2896	Hormigón	11,5	2800	3,55	0,10	45	500	215	1,20	2,32	22,96
2907,5	Hormigón	11,5	2800	3,46	0,09	46	500	215	1,20	2,22	22,97
2919	Hormigón	11,5	2800	3,37	0,09	47	500	215	1,21	2,13	22,96
2930,5	Hormigón	11,5	2800	3,29	0,08	48	500	215	1,21	2,04	22,96
2942	Hormigón	11,5	2800	3,21	0,08	49	500	215	1,21	1,96	22,97
2953,5	Hormigón	11,5	2800	3,13	0,08	50	500	215	1,22	1,88	22,96
2965	Hormigón	11,5	2800	3,06	0,07	51	500	215	1,22	1,81	22,96
2976,5	Hormigón	11,5	2800	2,99	0,07	52	500	215	1,22	1,74	22,97
2988	Hormigón	11,5	2800	2,93	0,06	53	500	215	1,22	1,67	22,97
2999,5	Hormigón	11,5	2800	2,87	0,06	54	500	215	1,23	1,60	22,96
3011	Hormigón	11,5	2800	2,81	0,06	55	500	215	1,23	1,54	22,97
3022,5	Hormigón	11,5	2800	2,75	0,06	56	500	215	1,23	1,49	22,97



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Tubería principal						Tubería secundaria					
Distancia origen (m)	Material	longitud (m)	Ø (mm)	Altura piezométrica (m)	Pérdidas (m)	nº	Ø elevador (mm)	Ø Bocas (mm)	perdidas salinidad (m)	Perdida elevador y boca (m)	Pérdidas totales (m)
3034	Hormigón	11,5	2800	2,70	0,05	57	500	215	1,24	1,43	22,96
3045,5	Hormigón	11,5	2800	2,65	0,05	58	500	215	1,24	1,38	22,97
3057	Hormigón	11,5	2800	2,60	0,05	59	500	215	1,24	1,33	22,97
3068,5	Hormigón	11,5	2800	2,56	0,05	60	500	215	1,25	1,27	22,96
3080	Hormigón	11,5	2800	2,51	0,04	61	500	215	1,25	1,23	22,97
3091,5	Hormigón	11,5	2800	2,47	0,04	62	500	215	1,25	1,19	22,97
3103	Hormigón	11,5	2800	2,43	0,04	63	500	215	1,26	1,14	22,96
3114,5	Hormigón	11,5	2800	2,39	0,04	64	500	215	1,26	1,10	22,97
3126	Hormigón	11,5	2800	2,36	0,04	65	500	215	1,26	1,06	22,97
3137,5	Hormigón	11,5	2800	2,32	0,03	66	500	215	1,27	1,02	22,96
3149	Hormigón	11,5	2800	2,29	0,03	67	500	215	1,27	0,99	22,97
3160,5	Hormigón	11,5	2800	2,26	0,03	68	800	325	1,27	0,95	22,97
3172	Hormigón	11,5	2800	2,23	0,03	69	800	325	1,28	0,91	22,96
3183,5	Hormigón	11,5	2800	2,20	0,03	70	800	325	1,28	0,89	22,97
3195	Hormigón	11,5	2800	2,18	0,02	71	800	325	1,28	0,86	22,97
3206,5	Hormigón	11,5	2800	2,16	0,02	72	800	325	1,29	0,83	22,96
3218	Hormigón	11,5	2800	2,14	0,02	73	800	325	1,29	0,81	22,97
3229,5	Hormigón	11,5	2800	2,12	0,02	74	800	325	1,29	0,79	22,97
3241	Hormigón	11,5	2800	2,10	0,02	75	800	325	1,30	0,77	22,96
3252,5	Hormigón	11,5	2800	2,09	0,01	76	800	325	1,30	0,75	22,97
3264	Hormigón	11,5	2800	2,07	0,01	77	800	325	1,30	0,74	22,97
3275,5	Hormigón	11,5	2800	2,06	0,01	78	800	325	1,31	0,72	22,96
3287	Hormigón	11,5	2800	2,05	0,01	79	800	325	1,31	0,70	22,97
3298,5	Hormigón	11,5	2800	2,04	0,01	80	800	325	1,31	0,69	22,97
3310	Hormigón	11,5	2800	2,03	0,01	81	800	325	1,32	0,68	22,96
3321,5	Hormigón	11,5	2800	2,02	0,01	82	800	325	1,32	0,67	22,96
3333	Hormigón	11,5	2800	2,02	0,01	83	800	325	1,32	0,66	22,97
3344,5	Hormigón	11,5	2800	2,01	0,01	84	800	325	1,33	0,65	22,96
3356	Hormigón	11,5	2800	2,00	0,01	85	800	325	1,33	0,64	22,96



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

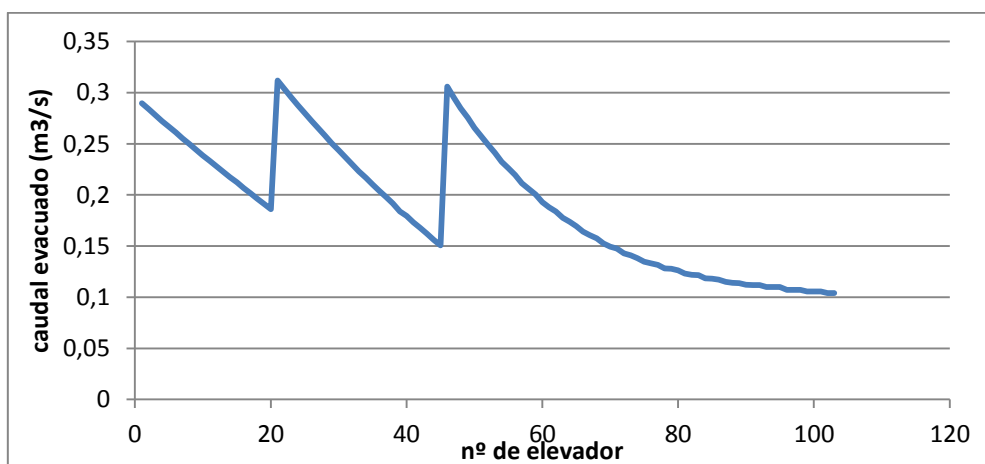
Tubería principal						Tubería secundaria					
Distancia origen (m)	Material	longitud (m)	Ø (mm)	Altura piezométrica (m)	Pérdidas (m)	nº	Ø elevador (mm)	Ø Bocas (mm)	perdidas salinidad (m)	Perdida elevador y boca (m)	Pérdidas totales (m)
3367,5	Hormigón	11,5	2800	2,00	0,00	86	800	325	1,33	0,64	22,97
3379	Hormigón	11,5	2800	2,00	0,00	87	800	325	1,34	0,62	22,96
3390,5	Hormigón	11,5	2800	1,99	0,00	88	800	325	1,34	0,62	22,96
3402	Hormigón	11,5	2800	1,99	0,00	89	800	325	1,34	0,61	22,97
3413,5	Hormigón	11,5	2800	1,99	0,00	90	800	325	1,35	0,60	22,96
3425	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	91	800	325	1,35	0,60	22,96
3436,5	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	92	800	325	1,35	0,60	22,97
3448	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	93	800	325	1,36	0,59	22,96
3459,5	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	94	800	325	1,36	0,59	22,96
3471	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	95	800	325	1,36	0,58	22,97
3482,5	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	96	800	325	1,37	0,57	22,96
3494	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	97	800	325	1,37	0,57	22,96
3505,5	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	98	800	325	1,37	0,57	22,97
3517	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	99	800	325	1,38	0,56	22,96
3528,5	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	100	800	325	1,38	0,56	22,96
3540	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	101	800	325	1,38	0,56	22,97
3551,5	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	102	800	325	1,39	0,55	22,96
3563	Hormigón	11,5	2800	1,98	0,00	103	800	325	1,39	0,55	22,96



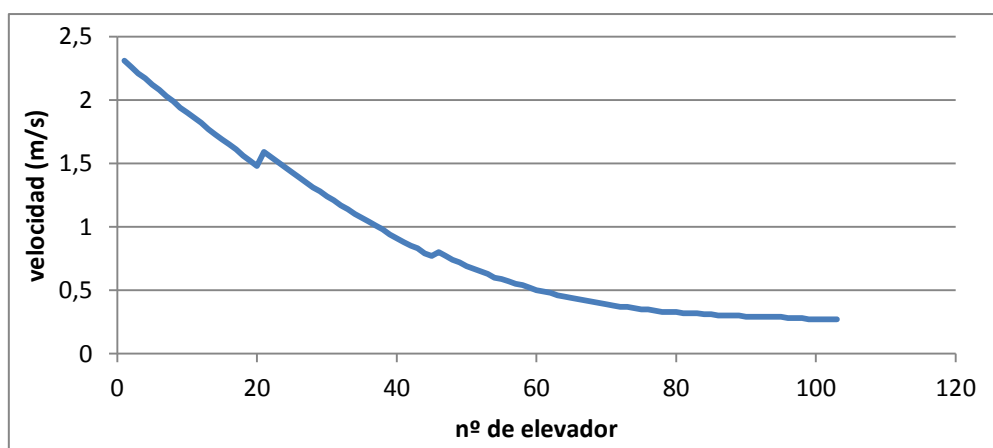
Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

7.6.2. Alternativa 2

En las Gráficas 3 y 4 se puede observar la distribución del caudal y de la velocidad respectivamente por cada uno de los elevadores que componen el tramo difusor:



Gráfica 3. Distribución del caudal a lo largo de los elevadores del tramo difusor.



Gráfica 4. Distribución de la velocidad a lo largo de los elevadores del tramo difusor.

A continuación se presentan los valores de pérdidas de carga que se producen con el dimensionamiento adoptado en la alternativa 2



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Tubería principal							Elevadores					
Distancia origen (m)	Material	longitud (m)	Ø (mm)	Altura piezométrica (m)	Perdidas (m)		nº	Ø elevador (mm)	Ø Bocas (mm)	perdidas salinidad (m)	Perdida elevador y boca (m)	Pérdidas totales (m)
0	Hormigón		2800	23,50								
2378,5	Hormigón	2390	2800	15,89	7,611	7,61						
2390	Hormigón	11,5	2800	15,40	0,489	13,27	1	400	125	1,06	14,28	23,44
2401,5	Hormigón	11,5	2800	14,92	0,475		2	400	125	1,06	13,79	23,43
2413	Hormigón	11,5	2800	14,46	0,461		3	400	125	1,06	13,32	23,42
2424,5	Hormigón	11,5	2800	14,02	0,448		4	400	125	1,07	12,85	23,40
2436	Hormigón	11,5	2800	13,58	0,435		5	400	125	1,07	12,40	23,39
2447,5	Hormigón	11,5	2800	13,16	0,423		6	400	125	1,07	11,97	23,38
2459	Hormigón	11,5	2800	12,75	0,411		7	400	125	1,08	11,53	23,36
2470,5	Hormigón	11,5	2800	12,35	0,399		8	400	125	1,08	11,12	23,35
2482	Hormigón	11,5	2800	11,96	0,388		9	400	125	1,08	10,72	23,35
2493,5	Hormigón	11,5	2800	11,58	0,378		10	400	125	1,09	10,32	23,33
2505	Hormigón	11,5	2800	11,21	0,367		11	400	125	1,09	9,95	23,32
2516,5	Hormigón	11,5	2800	10,86	0,358		12	400	125	1,09	9,58	23,31
2528	Hormigón	11,5	2800	10,51	0,348		13	400	125	1,10	9,21	23,30
2539,5	Hormigón	11,5	2800	10,17	0,339		14	400	125	1,10	8,86	23,29
2551	Hormigón	11,5	2800	9,84	0,330		15	400	125	1,10	8,52	23,29
2562,5	Hormigón	11,5	2800	9,51	0,325		16	400	125	1,11	8,18	23,27
2574	Hormigón	11,5	2800	9,20	0,316		17	400	125	1,11	7,86	23,27
2585,5	Hormigón	11,5	2800	8,89	0,308		18	400	125	1,11	7,54	23,27
2597	Hormigón	11,5	2800	8,59	0,301		19	400	125	1,11	7,24	23,26
2608,5	Hormigón	11,5	2800	8,31	0,278		20	400	125	1,12	6,92	23,23
2620	Hormigón	11,5	2800	8,04	0,267		21	500	165	1,12	6,65	23,22
2631,5	Hormigón	11,5	2800	7,79	0,256		22	500	165	1,12	6,38	23,22
2643	Hormigón	11,5	2800	7,54	0,245		23	500	165	1,13	6,11	23,20
2654,5	Hormigón	11,5	2800	7,31	0,236		24	500	165	1,13	5,87	23,19
2666	Hormigón	11,5	2800	7,08	0,226		25	500	165	1,13	5,63	23,19
2677,5	Hormigón	11,5	2800	6,86	0,219		26	500	165	1,14	5,40	23,17
2689	Hormigón	11,5	2800	6,65	0,210		27	500	165	1,14	5,18	23,17
2700,5	Hormigón	11,5	2800	6,45	0,202		28	500	165	1,14	4,97	23,16



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Tubería principal						Elevadores					
Distancia origen (m)	Material	longitud (m)	Ø (mm)	Altura piezométrica (m)	Perdidas (m)	nº	Ø elevador (mm)	Ø Bocas (mm)	perdidas salinidad (m)	Perdida elevador y boca (m)	Pérdidas totales (m)
2712	Hormigón	11,5	2800	6,26	0,194	29	500	165	1,15	4,75	23,15
2723,5	Hormigón	11,5	2800	6,07	0,187	30	500	165	1,15	4,56	23,14
2735	Hormigón	11,5	2800	5,89	0,180	31	500	165	1,15	4,37	23,14
2746,5	Hormigón	11,5	2800	5,72	0,173	32	500	165	1,16	4,18	23,12
2758	Hormigón	11,5	2800	5,55	0,166	33	500	165	1,16	4,01	23,12
2769,5	Hormigón	11,5	2800	5,39	0,160	34	500	165	1,16	3,85	23,12
2781	Hormigón	11,5	2800	5,24	0,154	35	500	165	1,17	3,68	23,11
2792,5	Hormigón	11,5	2800	5,09	0,148	36	500	165	1,17	3,52	23,10
2804	Hormigón	11,5	2800	4,95	0,143	37	500	165	1,17	3,37	23,10
2815,5	Hormigón	11,5	2800	4,81	0,139	38	500	165	1,18	3,22	23,09
2827	Hormigón	11,5	2800	4,67	0,134	39	500	165	1,18	3,08	23,09
2838,5	Hormigón	11,5	2800	4,54	0,130	40	500	165	1,18	2,95	23,09
2850	Hormigón	11,5	2800	4,42	0,125	41	500	165	1,19	2,81	23,08
2861,5	Hormigón	11,5	2800	4,30	0,121	42	500	165	1,19	2,68	23,08
2873	Hormigón	11,5	2800	4,18	0,117	43	500	165	1,19	2,56	23,07
2884,5	Hormigón	11,5	2800	4,06	0,113	44	500	165	1,20	2,43	23,06
2896	Hormigón	11,5	2800	3,96	0,102	45	500	165	1,20	2,32	23,06
2907,5	Hormigón	11,5	2800	3,87	0,095	46	700	250	1,20	2,22	23,05
2919	Hormigón	11,5	2800	3,78	0,089	47	700	250	1,21	2,11	23,04
2930,5	Hormigón	11,5	2800	3,70	0,083	48	700	250	1,21	2,02	23,04
2942	Hormigón	11,5	2800	3,62	0,078	49	700	250	1,21	1,94	23,03
2953,5	Hormigón	11,5	2800	3,55	0,073	50	700	250	1,22	1,85	23,02
2965	Hormigón	11,5	2800	3,48	0,068	51	700	250	1,22	1,78	23,02
2976,5	Hormigón	11,5	2800	3,41	0,064	52	700	250	1,22	1,71	23,02
2988	Hormigón	11,5	2800	3,35	0,060	53	700	250	1,22	1,65	23,02
2999,5	Hormigón	11,5	2800	3,30	0,056	54	700	250	1,23	1,58	23,01
3011	Hormigón	11,5	2800	3,25	0,052	55	700	250	1,23	1,52	23,01
3022,5	Hormigón	11,5	2800	3,20	0,049	56	700	250	1,23	1,47	23,01
3034	Hormigón	11,5	2800	3,15	0,046	57	700	250	1,24	1,41	23,00
3045,5	Hormigón	11,5	2800	3,11	0,042	58	700	250	1,24	1,37	23,00



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Tubería principal						Elevadores					
Distancia origen (m)	Material	longitud (m)	Ø (mm)	Altura piezométrica (m)	Perdidas (m)	nº	Ø elevador (mm)	Ø Bocas (mm)	perdidas salinidad (m)	Perdida elevador y boca (m)	Pérdidas totales (m)
3057	Hormigón	11,5	2800	3,07	0,039	59	700	250	1,24	1,32	23,00
3068,5	Hormigón	11,5	2800	3,03	0,037	60	700	250	1,25	1,28	22,99
3080	Hormigón	11,5	2800	3,00	0,034	61	700	250	1,25	1,24	22,99
3091,5	Hormigón	11,5	2800	2,97	0,032	62	700	250	1,25	1,20	22,99
3103	Hormigón	11,5	2800	2,94	0,030	63	700	250	1,26	1,16	22,98
3114,5	Hormigón	11,5	2800	2,91	0,028	64	700	250	1,26	1,13	22,98
3126	Hormigón	11,5	2800	2,88	0,026	65	700	250	1,26	1,10	22,99
3137,5	Hormigón	11,5	2800	2,86	0,024	66	700	250	1,27	1,07	22,98
3149	Hormigón	11,5	2800	2,84	0,022	67	700	250	1,27	1,04	22,98
3160,5	Hormigón	11,5	2800	2,82	0,021	68	700	250	1,27	1,02	22,98
3172	Hormigón	11,5	2800	2,80	0,019	69	700	250	1,28	0,99	22,97
3183,5	Hormigón	11,5	2800	2,78	0,018	70	700	250	1,28	0,97	22,97
3195	Hormigón	11,5	2800	2,76	0,016	71	700	250	1,28	0,95	22,97
3206,5	Hormigón	11,5	2800	2,75	0,015	72	700	250	1,29	0,93	22,97
3218	Hormigón	11,5	2800	2,73	0,014	73	700	250	1,29	0,91	22,97
3229,5	Hormigón	11,5	2800	2,72	0,013	74	700	250	1,29	0,90	22,97
3241	Hormigón	11,5	2800	2,71	0,012	75	700	250	1,30	0,88	22,96
3252,5	Hormigón	11,5	2800	2,70	0,011	76	700	250	1,30	0,86	22,97
3264	Hormigón	11,5	2800	2,69	0,010	77	700	250	1,30	0,85	22,97
3275,5	Hormigón	11,5	2800	2,68	0,009	78	700	250	1,31	0,83	22,96
3287	Hormigón	11,5	2800	2,67	0,008	79	700	250	1,31	0,83	22,96
3298,5	Hormigón	11,5	2800	2,66	0,007	80	700	250	1,31	0,82	22,97
3310	Hormigón	11,5	2800	2,66	0,007	81	700	250	1,32	0,80	22,96
3321,5	Hormigón	11,5	2800	2,65	0,006	82	700	250	1,32	0,79	22,96
3333	Hormigón	11,5	2800	2,65	0,005	83	700	250	1,32	0,79	22,96
3344,5	Hormigón	11,5	2800	2,64	0,005	84	700	250	1,33	0,77	22,96
3356	Hormigón	11,5	2800	2,64	0,004	85	700	250	1,33	0,77	22,96
3367,5	Hormigón	11,5	2800	2,63	0,004	86	700	250	1,33	0,76	22,96
3379	Hormigón	11,5	2800	2,63	0,003	87	700	250	1,34	0,75	22,95
3390,5	Hormigón	11,5	2800	2,63	0,003	88	700	250	1,34	0,75	22,96



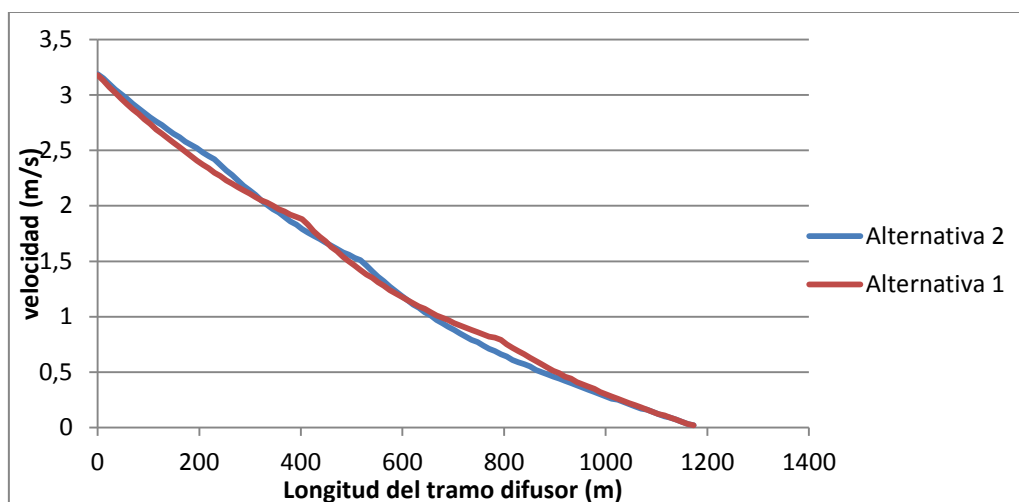
Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

Tubería principal						Elevadores					
Distancia origen (m)	Material	longitud (m)	Ø (mm)	Altura piezométrica (m)	Perdidas (m)	nº	Ø elevador (mm)	Ø Bocas (mm)	perdidas salinidad (m)	Perdida elevador y boca (m)	Pérdidas totales (m)
3402	Hormigón	11,5	2800	2,63	0,002	89	700	250	1,34	0,74	22,96
3413,5	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,002	90	700	250	1,35	0,73	22,95
3425	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,002	91	700	250	1,35	0,73	22,96
3436,5	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,001	92	700	250	1,35	0,73	22,96
3448	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,001	93	700	250	1,36	0,72	22,95
3459,5	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,001	94	700	250	1,36	0,72	22,95
3471	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,001	95	700	250	1,36	0,71	22,96
3482,5	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,001	96	700	250	1,37	0,70	22,95
3494	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,000	97	700	250	1,37	0,70	22,95
3505,5	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,000	98	700	250	1,37	0,70	22,96
3517	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,000	99	700	250	1,38	0,69	22,95
3528,5	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,000	100	700	250	1,38	0,69	22,95
3540	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,000	101	700	250	1,38	0,69	22,96
3551,5	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,000	102	700	250	1,39	0,68	22,95
3563	Hormigón	11,5	2800	2,62	0,000	103	700	250	1,39	0,68	22,95



7.6.3. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS Y CONCLUSIONES

Ambas alternativas son muy parecidas en cuanto al funcionamiento hidráulico, como se puede ver en la Gráfica 5, en la que se compara las velocidades que se producen en la tubería principal del tramo difusor.



Gráfica 5. Velocidad del agua en la tubería principal para cada alternativa.

Como se puede ver, en ambos casos la velocidad en la parte final del tramo difusor cae hasta valores casi nulos que no cumplen con los requerimientos de velocidad crítica de sedimentación, ni de eliminación de burbujas. Esto se debe a que el tramo difusor objeto de este trabajo constituye un caso bastante particular, ya que corresponde al sistema de abastecimiento de una gran ciudad como es Bilbao y sus alrededores, que hace que haya que evacuar caudales muy importantes y con un rango de variación amplio, y por tanto, que la longitud del tramo difusor sea muy grande.

Al tratarse de una longitud de tramo difusor tan grande, la búsqueda de la distribución uniforme de caudales hace que en los tramos iniciales se produzcan elevadas pérdidas que hacen que cuando el agua llega a la parte final, la velocidad sea excesivamente baja.

Lo que se ha pretendido es que esa zona en la que la velocidad es excesivamente baja sea lo más corta posible.



Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

De acuerdo con la distribución de caudales (presentados en las Gráficas 1 y 3), la alternativa 2 presenta ligeramente mayor uniformidad, hecho que también puede apreciarse en las Gráficas de variación de la velocidad en los distintos elevadores (Gráficas 2 y 4), en donde, además, también se puede ver que la mínima velocidad es algo más elevada que la correspondiente a la alternativa 1.

Por el contrario, como se puede apreciar en las tablas que muestran las pérdidas de carga, la alternativa 2 requiere mayor cota piezométrica que la alternativa 1, aunque la diferencia no es muy grande (0,5 metros de altura piezométrica de diferencia).

Pese a que ambas alternativas podrían ser válidas, la alternativa elegida en este trabajo ha sido la número 2, es decir, aquella en la que cada parte en las que se ha dividido el tramo difusor consta de un número de difusores diferente, siendo ese número menor en la parte inicial y mayor en la final.

Esta alternativa requiere de una altura piezométrica de 23,5 metros sobre el nivel de la pleamar máxima viva equinoccial. El punto de arranque del emisario submarino (lugar donde se colocaría la cámara de carga se sitúa en una zona de acantilados donde la cota del terreno sube rápidamente en poca distancia, alcanzando una cota media de uso 70 metros (referido al nivel medio del mar en alicante), por lo tanto, para la cota de 23,5 metros, probablemente no sea necesario la inclusión de un sistema de bombeo.



8. Conclusiones

El empleo de un emisario submarino como elemento final de un sistema de tratamiento de aguas residuales, es una de las mejores opciones para la mejora de la calidad de las aguas vertidas, y la consecución de un litoral más limpio.

El principal elemento de un emisario es el tramo difusor, región por donde se evacúa el efluente al medio marino, por lo que el correcto diseño de este tramo es indispensable para la viabilidad de la estructura.

Los estudios llevados a cabo en este trabajo de fin de grado, justifican el diseño del tramo difusor perteneciente a un posible emisario submarino para la ciudad de Bilbao.

Dada la gran cantidad de población, y la correspondiente agua residual a cual tiene que hacer frente, el tramo difusor de este emisario representa un caso particular y de difícil diseño.

La gran longitud de tramo difusor necesaria para cumplir con los requerimientos legislativos correspondientes, una pequeña fracción de este elemento no es capaz de satisfacer los valores de velocidad mínima de limpieza, sin embargo, dado el tratamiento recibido por el agua en situaciones de bajo caudal (momentos en los que más se hace notar el problema), se considera que la solución adoptada es la correcta para un emisario de esta características.

Santander, Julio de 2014.

Fdo. El autor del trabajo:

Pablo Fernández Sancha



Bibliografía

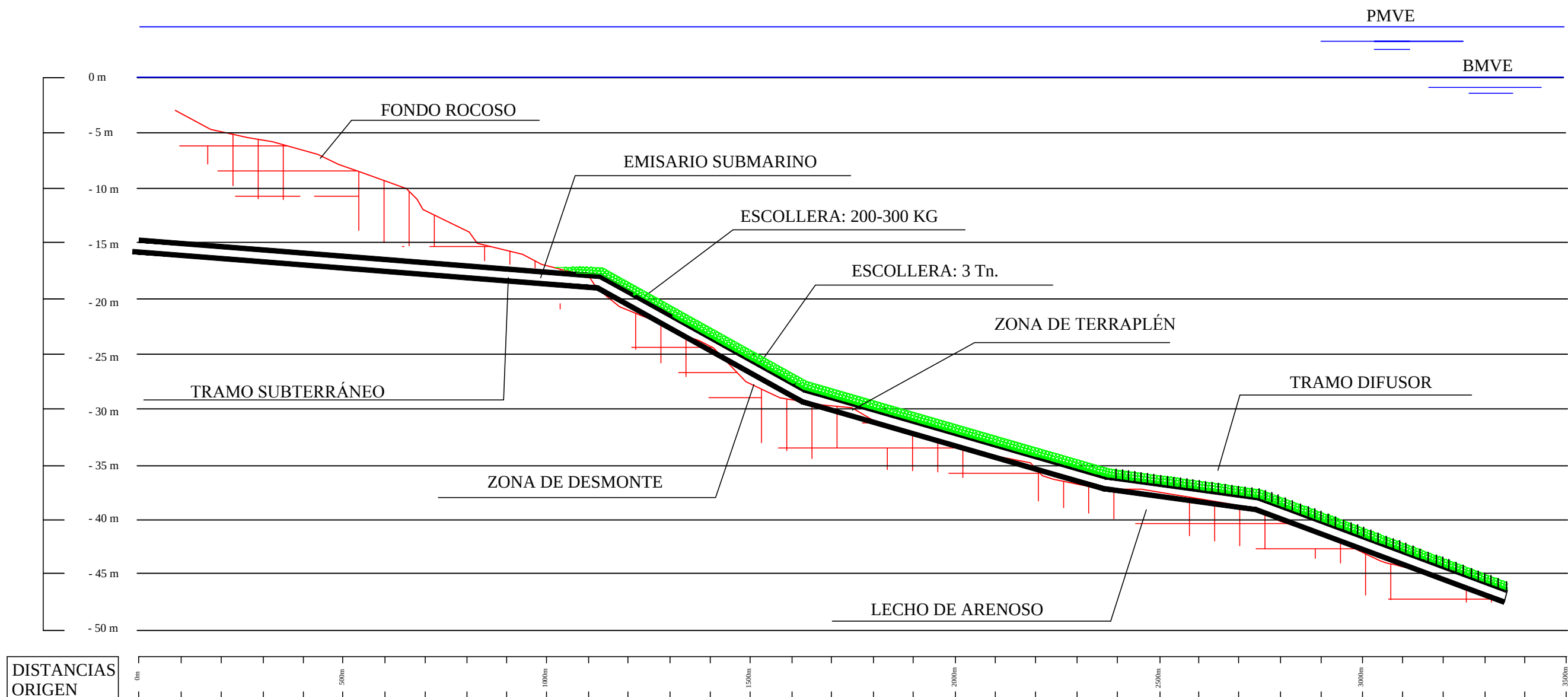


Diseño del tramo difusor de un emisario submarino

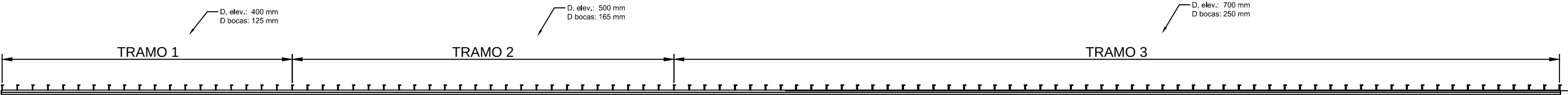
- Estudio ambiental de Emisario submarino de Bilbao, desarrollado por el Departamento de Ciencias y Técnicas del agua y el medio ambiente de la Universidad de Cantabria. Noviembre de 2002.
- Proyecto Fin de Carrera. Proyecto constructivo del emisario de Bilbao con arranque en Punta Lucero. Arrate Losada López, abril de 2004.
- Artículo: “Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers. I: Unstratified Stationary Water”, de Xiaodong Tian, A.M.ASCE1; Philip J. W. Roberts, F.ASCE2; and Gregory J. Daviero. 2004.
- Artículo: “Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers. II: Unstratified Flowing Water”, de Xiaodong Tian, A.M.ASCE1; Philip J. W. Roberts, F.ASCE2; and Gregory J. Daviero. 2004.
- Artículo: “Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers. III: Stratified Stationary Water”, de Xiaodong Tian, A.M.ASCE1; Philip J. W. Roberts, F.ASCE2; and Gregory J. Daviero. 2006.
- Artículo: “Marine Wastewater Discharges from Multiport Diffusers. IV: Stratified Flowing Water ”, de Xiaodong Tian, A.M.ASCE1; Philip J. W. Roberts, F.ASCE2; and Gregory J. Daviero. 2006.



Planos



	ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS UNIVERSIDAD DE CANTABRIA PROYECTO FIN DE CARRERA	TIPO ESTUDIO	TITULO DISEÑO DEL TRAMO DIFUSOR DE UN EMISARIO SUBMARINO	TERMINO MUNICIPAL B I L B A O	TITULO DEL PLANO PERFIL-LONGITUDINAL	AUTOR PABLO-FERNÁNDEZ-SANCHA	ESCALA 1/ 11000	FECHA JULIO-2014	NORTE 	PLANO N 1
				PROVINCIA V I Z C A Y A						



ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
PROYECTO FIN DE CARRERA

TIPO
ESTUDIO

TITULO
DISEÑO DEL TRAMO DIFUSOR DE UN EMISARIO SUBMARINO

TERMINO MUNICIPAL
BILBAO
PROVINCIA
VIZCAYA

TITULO DEL PLANO
DISPOSICIÓN GENERAL
DEL TRAMO DIFUSOR

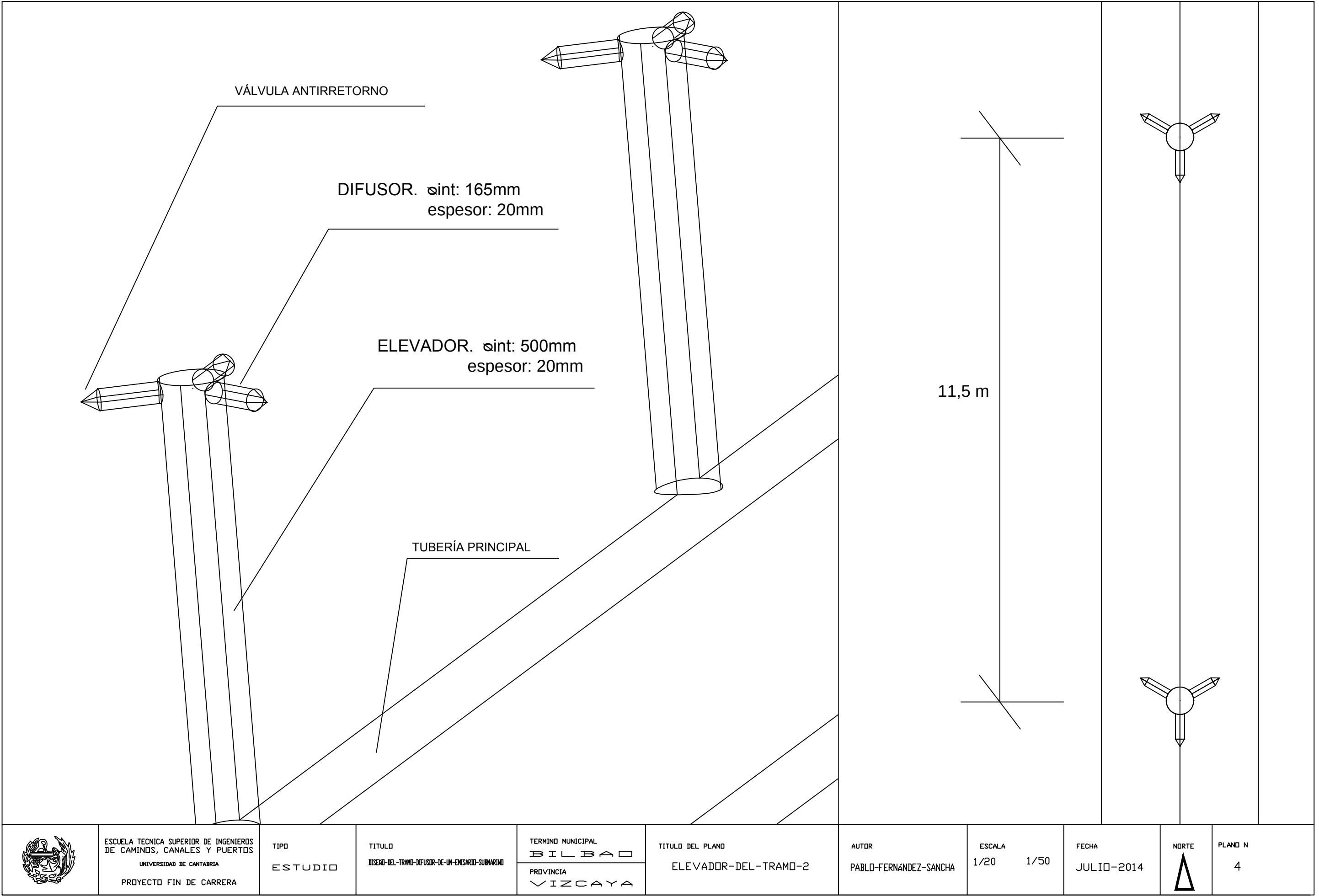
AUTOR
PABLO_FERNÁNDEZ_SANCHA

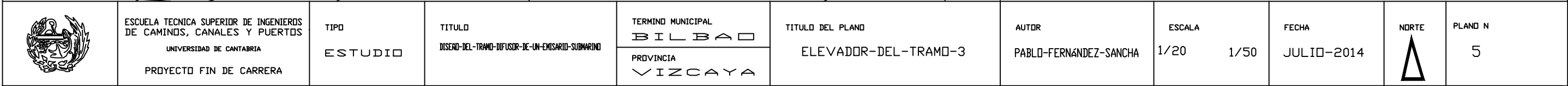
ESCALA
1/ 3000

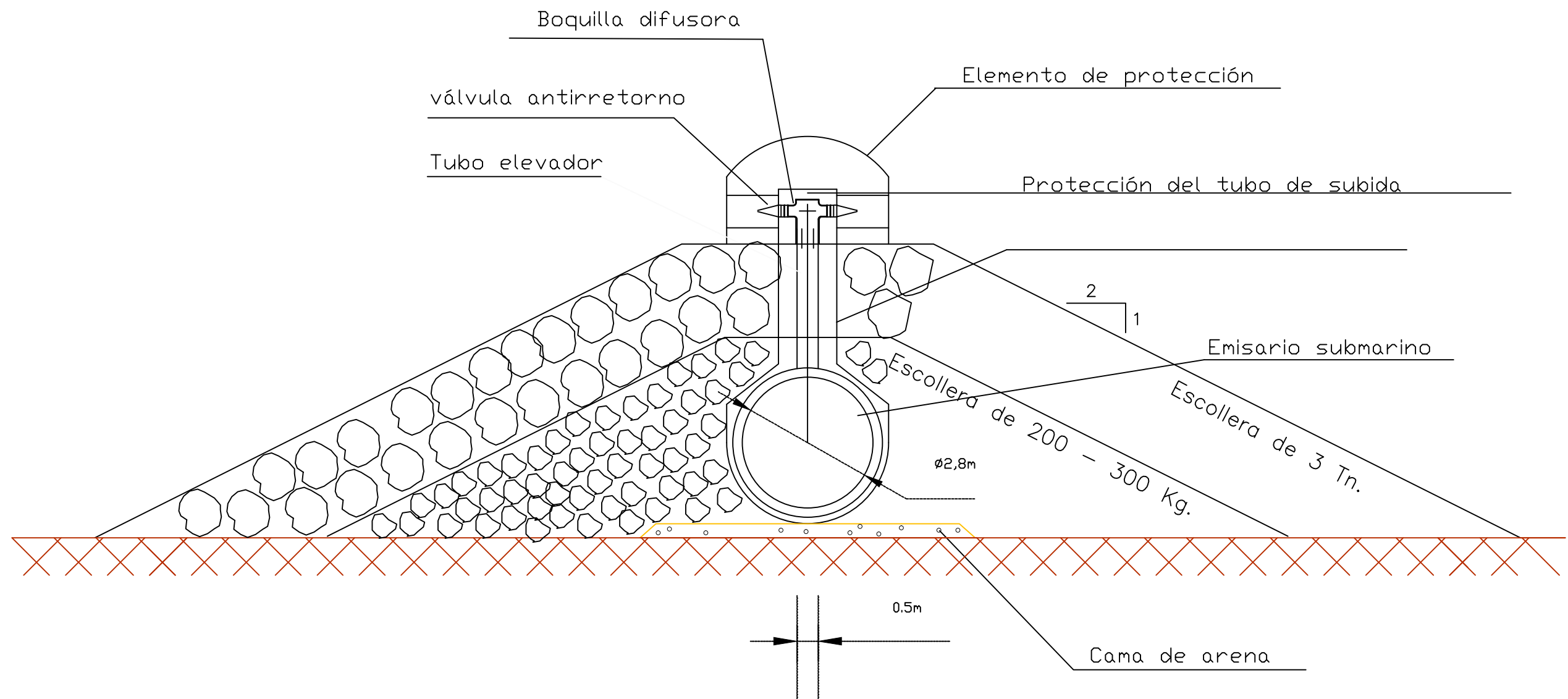
FECHA
JULIO-2014



PLANO N
2







ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
PROYECTO FIN DE CARRERA

TIPO
ESTUDIO

TÍTULO
DISEÑO DEL TRAMO DIFUSOR DE UN EMISARIO SUBMARINO

TERMINO MUNICIPAL
BILBAO
PROVINCIA
VIZCAYA

TÍTULO DEL PLANO
PROTECCIONES DEL ELEMENTO DIFUSOR

AUTOR
PABLO FERNÁNDEZ-SANCHA

ESCALA
1/100

FECHA
JULIO-2014



PLANO N
6