



## ANEJO 13. CÁLCULO DE LA DILUCIÓN

### ÍNDICE

1. CAUDALES DE PROYECTO .....	2
2. DISPOSITIVO DIFUSOR .....	2
3. CÁLCULO DE LA DILUCIÓN INICIAL.....	3
3.1 INTRODUCCIÓN.....	3
3.2 CAUDAL DE CÁLCULO .....	3
3.3 PERFIL DE DENSIDADES.....	3
3.4 CORRIENTE .....	5
3.5 CÁLCULO DE LA DILUCIÓN EN EL CAMPO CERCANO.....	5
3.5.1 Cálculo en el caso de columna homogénea (no estratificada) .....	8
3.5.2 Cálculo en el caso de columna estratificada.....	9
4. COMPROBACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD .....	11
4.1 OBJETIVOS DE CALIDAD ECOLÓGICOS .....	11
4.2 OBJETIVOS DE CALIDAD SANITARIOS .....	14
4.2.1 Usos de la zona afectables por el emisario .....	14
4.2.2 Hipótesis de cálculo.....	15

## ANEJO 13. CÁLCULO DE LA DILUCIÓN

### 1. CAUDALES DE PROYECTO

El caudal de diseño se calcula, según lo expuesto en el *Anejo 5. Estudio de población y dotación*, para una población futura de 2.515 habitantes y teniendo en cuenta las puntas de consumo y el factor de pérdidas, obteniéndose un caudal de 70,55 m<sup>3</sup>/h.

Atendiendo al dimensionamiento de la EDAR existente, se dimensiona el emisario para un caudal de 120 m<sup>3</sup>/h para los cálculos hidráulicos y de 100 m<sup>3</sup>/h para los cálculos de dilución, según se muestra a continuación.

EDAR EXISTENTE	
POBLACIÓN EQUIVALENTE (hab-e)	5.833
CAUDAL DIARIO (m3/día)	1.000
CAUDAL PUNTA TRATAMIENTO (m3/h)	100

PROYECTO EMISARIO	
POBLACIÓN (hab)	2.515
DOTACIÓN (l/día)	240
CAUDAL DIARIO	
CAUDAL (l/día)	603.648,00
CAUDAL (m3/día)	603,65
CAUDAL (m3/h)	25,15
Kp	3,51
CAUDAL PUNTA	
CAUDAL (l/día)	1.693.253,59
CAUDAL (m3/día)	1.693,25
CAUDAL (m3/h)	70,55
CAUDAL DE CÁLCULO	
CÁLCULOS HIDRÁULICOS (m3/h)	120
CÁLCULOS DE DILUCIÓN (m3/h)	100

### 2. DISPOSITIVO DIFUSOR

- Configuración: 1 tubería
- Material: Polietileno PE-100
- Diámetro nominal: 200 mm
- Presión nominal: 10 bar
- Longitud: 16 m
- Bocas difusoras: 2 de diámetro 70 mm separadas entre sí 15 m
- Profundidad media de vertido (ejes bocas): 29,5 m
- Distancia al límite de la zona de baño: Se considera el límite de la zona de baño la paralela a 50 m de la línea de costa más cercana, correspondiente a la Isla Pantaleu, a 485 m de

distancia del punto de surgencia del penacho.

### 3. CÁLCULO DE LA DILUCIÓN INICIAL

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

La «Instrucción para el proyecto de conducciones de vertido desde tierra al mar» (aprobada por Orden del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de 13 de julio de 1993) exige que la dilución inicial sea superior a 80, durante más del 95 % del tiempo, en el caso de columna de agua estratificada, y a 100, en el caso de columna no estratificada.

#### 3.2 CAUDAL DE CÁLCULO

Se toma como caudal de cálculo  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h} = 27,78 \text{ l/s}$ , según lo expuesto en el *Anejo 5. Estudio de población y dotación*. Este caudal corresponde al máximo caudal que verterá por el emisario en el escenario futuro y por tanto el caudal circulante por el emisario será inferior a éste durante el 100 % del tiempo.

#### 3.3 PERFIL DE DENSIDADES

El estudio de las características hidrográficas de la zona (temperatura, salinidad, estratificación) se ha focalizado en el análisis de las condiciones típicas de invierno y verano en aguas de plataforma y sus posibles variaciones.

Las figuras representadas a continuación son indicativas del ciclo anual de temperaturas en aguas costeras de Baleares. Las temperaturas varían entre unos  $14^\circ\text{C}$  en febrero a más de  $26^\circ\text{C}$  en agosto, si bien, en las zonas litorales protegidas del viento, las temperaturas diurnas en superficie pueden superar los  $28^\circ\text{C}$  durante el verano. En invierno, la temperatura en los 50 metros superiores de la columna de agua es prácticamente homogénea, comenzando a estratificarse a finales de marzo. Entre junio y agosto, la temperatura en superficie aumenta de forma rápida. El ciclo se completa al enfriarse la capa superficial a finales de septiembre, y de forma más acusada en octubre.

Con el fin de caracterizar las situaciones extremas del ciclo anual se han promediado los perfiles de temperatura y salinidad de la base de datos oceanográficos MEDATLAS correspondientes a los meses de febrero y agosto para el Archipiélago Balear. Los datos proceden de registros obtenidos con perfiladores tipo CTD y se representan los datos a intervalos de 5 metros. El perfil de febrero muestra una columna homeoterma, con valores de entre  $13$  y  $14^\circ\text{C}$ . En esta época del año las variaciones en densidad están reguladas por la salinidad que, según los registros del MEDATLAS, varía entre 37.9 en superficie y 38.2 a 100 metros de profundidad. Los valores de superficie muestran obviamente una mayor desviación pero superan generalmente el valor de 37.7. Por tanto, en invierno la densidad del agua de mar apenas varía en los 50 metros superiores de la columna de agua siendo aproximadamente  $1.026 \text{ kg/m}^3$ .

En verano, la salinidad no varía mucho con la profundidad, si bien, se observa un aumento en los primeros metros de la columna de agua (hasta unos 25 m). La variación más significativa entre el perfil de invierno y de verano está producida por el calentamiento que afecta principalmente a los 80 metros más superficiales de la columna de agua.

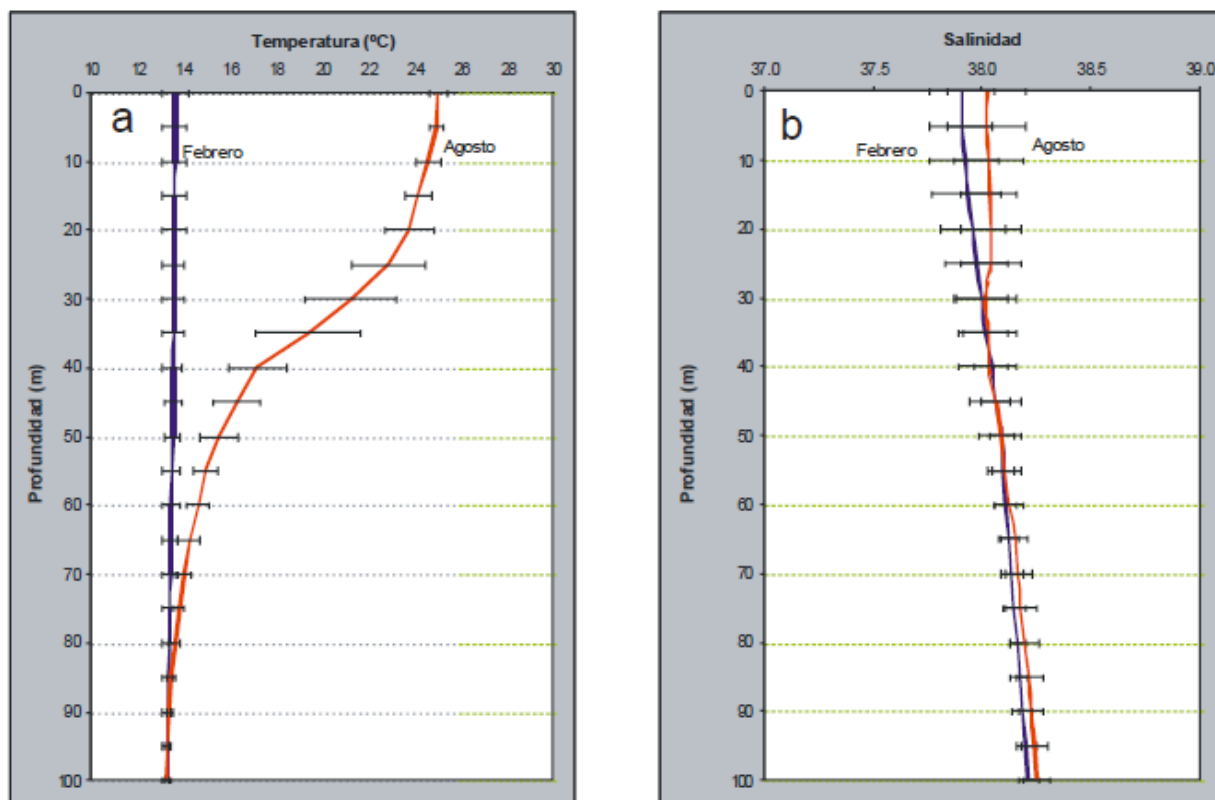


Ilustración 1. Perfiles promediados de temperatura y salinidad del Archipiélago Balear. Fuente: MEDATLAS (IFREMER 1997)

En el gráfico siguiente se visualiza la variación promedio de densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ ) con la profundidad (m), en el mes de agosto, derivada de los valores de temperatura y salinidad mostrados en los gráficos anteriores.

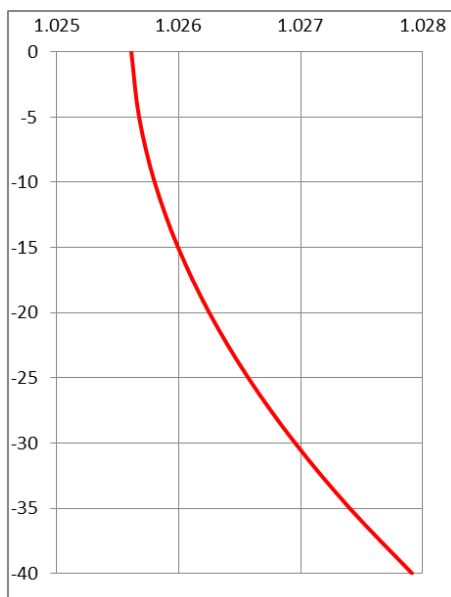


Ilustración 2. Perfil promedio de densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ ) en función de la profundidad (m), en el mes de agosto

Teniendo en cuenta que el vertido se produce a unos 24 m de profundidad, en la tabla siguiente se hace una descomposición de la figura anterior en dos rectas, a efectos de facilitar los cálculos subsiguientes.

Tabla 1. Discretización del perfil medio profundidad-densidad en agosto.

DISCRETIZACIÓN DEL PERFIL MEDIO PROFUNDIDAD - DENSIDAD EN AGOSTO		
Profundidad m	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Gradiente kg/m <sup>4</sup>
0,0	1025,61	-
10,0	1025,80	0,019
<b>12,5</b>	1025,90	0,038
29,5	1026,92	0,060

Es decir, ente 12,5 y 29,5 m de profundidad hay un gradiente de densidad de 0,06 kg/m<sup>3</sup> por cada metro de profundidad.

### 3.4 CORRIENTE

La dilución inicial es mayor cuanto mayor es la velocidad de la corriente. La situación más desfavorable para la dilución inicial es que la corriente sea nula. Se adopta esta hipótesis de corriente nula para el cálculo.

### 3.5 CÁLCULO DE LA DILUCIÓN EN EL CAMPO CERCANO

La dilución en los bordes del «campo cercano» y el espacio ocupado por éste se calculan por las fórmulas de Tian, Roberts y Daviero, publicadas en el *Journal of Hydraulic Engineering*:

- Tian, X., Roberts, P.J.W. y Daviero, G.J. (2004). *Marine Wastewaters discharges from multiport diffusers (I: Unstratified stationary water; II: Unstratified flowing water)*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (12), 1137-1155.
- Daviero, G.J. y Roberts, P.J.W. (2004). *Marine Wastewaters discharges from multiport diffusers (III: Stratified stationary water)*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132 (4), 404-410.
- Tian, X., Roberts, P.J.W. y Daviero, G.J. (2004). *Marine Wastewaters discharges from multiport diffusers (IV: Stratified flowing water)*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132 (4), 411-419.

Estas fórmulas están recogidas en el texto de la International Water Association (IWA) sobre emisarios submarinos, que es:

- Roberts, P.J.W., et al (2010). *Marine Wastewater Outfalls and Treatment Systems*. IWA Publishing, Londres.

Los datos necesarios para los cálculos son:

- Caudal, Q
- Longitud difusor, L
- Número bocas, n
- Profundidad bocas, H
- Gravedad, g
- Densidad efluente,  $\rho_0$
- Densidad mar,  $\rho_a$
- Gradiente densidad mar,  $d\rho_a/dz$

A partir de los datos anteriores se calculan las siguientes variables intermedias:

- Caudal lineal:  $q = \frac{Q}{L}$
- Caudal por boca:  $Q_j = \frac{Q}{n}$
- Separación bocas:  $s = \frac{L}{n-1}$
- Gravedad reducida:  $g' = \frac{(\rho_a - \rho_0)}{\rho_a} \cdot g$
- Frecuencia de flotabilidad:  $N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho_a}{dz}}$
- Flotabilidad de descarga puntual:  $B = g' \cdot Q_j$
- Escala de longitud (descarga puntual):  $l_B = \frac{B^{1/4}}{N^{3/4}}$
- Flotabilidad de descarga lineal:  $b = g' \cdot q$
- Escala de longitud (descarga lineal):  $l_b = \frac{b^{1/3}}{N}$
- Tipo de descarga: puntual, lineal o intermedia, dependiendo del valor de s/H para medio receptor no estratificado, o de s/l<sub>B</sub> para medio estratificado.

Las fórmulas para calcular la dilución inicial (Sn), el radio o semianchura del campo cercano (xn), el espesor de la capa de mezcla (hn), y las alturas sobre las bocas del difusor de las superficies superior e inferior de la pluma (zmáx y z mín), son las siguientes, en función de si el medio receptor está o no estratificado y de si la descarga es puntual o lineal (para descargas de tipo intermedio, se interpola).

Tabla 2. Fórmulas para cálculo de variables

Medio no estratificado	Descarga puntual ( $s/H > 1$ )	Descarga lineal ( $s/H < 0,3$ )
Dilución campo cercano	$\frac{S_n Q_j}{B^{1/3} H^{5/3}} = 0,26$	$\frac{S_n q}{b^{1/3} H} = 0,49$
Radio del campo cercano	$\frac{x_n}{H} = 2,8$	$\frac{x_n}{H} = 0,9$
Espesor de la capa de mezcla	$\frac{h_n}{H} = 0,11$	$\frac{h_n}{H} = 0,36$
Altura máxima del penacho sobre las bocas del difusor	$z_{\max} = H$	$z_{\max} = H$
Altura mínima del penacho sobre las bocas del difusor	$z_{\min} = z_{\max} - h_n$	$z_{\min} = z_{\max} - h_n$

Medio estratificado	Descarga puntual ( $s/l_B > 3$ )	Descarga lineal ( $s/l_B < 0,5$ )
Dilución campo cercano	$\frac{S_n Q_j N^{5/4}}{B^{3/4}} = 0,9$	$\frac{S_n q N}{b^{2/3}} = 0,86$
Radio del campo cercano	$\frac{x_n}{l_B} = 4,1$	$\frac{x_n}{l_b} = 2,3$
Espesor inicial de la capa de mezcla	$\frac{h_n}{l_B} = 1,6$	$\frac{h_n}{l_b} = 1,5$
Altura máxima del penacho sobre las bocas del difusor	$\frac{z_{\max}}{l_B} = 3,5$	$\frac{z_{\max}}{l_b} = 2,5$

Altura mínima del penacho sobre las bocas del difusor	$z_{\min} = z_{\max} - h_n$	$z_{\min} = z_{\max} - h_n$
---	-----------------------------	-----------------------------

Las fórmulas anteriores se han programado en una hoja de cálculo. A continuación, se indicarán los datos introducidos, los resultados intermedios y los finales.

### 3.5.1 Cálculo en el caso de columna homogénea (no estratificada)

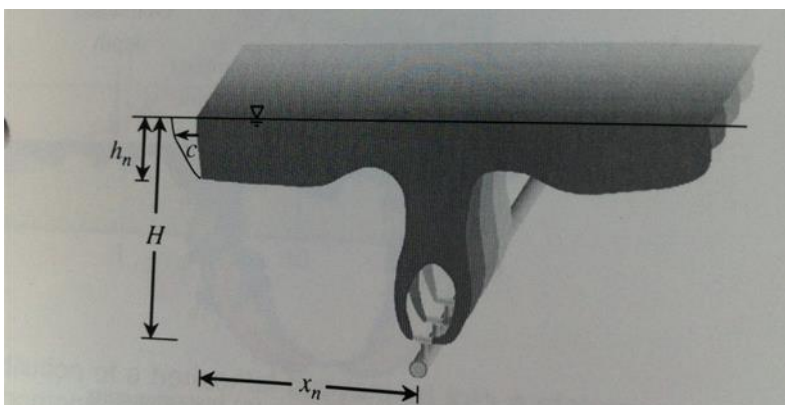


Imagen 1. Penacho en condiciones estacionarias sin estratificación

DATOS			
Variable	Símbolo	Unidad	Valor
Caudal	Q	m <sup>3</sup> /s	0,0278
Longitud difusor	L	m	15
Número bocas	n	-	2
Profundidad bocas	H	m	29,50
Gravedad	g	m/s <sup>2</sup>	9,8
Densidad efluente	$\rho_0$	kg/m <sup>3</sup>	997
Densidad mar	$\rho_a$	kg/m <sup>3</sup>	1026

RESULTADOS INTERMEDIOS			
Variable	Símbolo	Unidad	Valor
Caudal lineal	q	m <sup>2</sup> /s	0,001852
Caudal por boca	Q <sub>b</sub>	m <sup>3</sup> /s	0,013889
Separación bocas	s	m	15,00
Gravedad reducida	g'	m/s <sup>2</sup>	0,277
Flotabilidad de descarga puntual	B	m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup>	0,003847
Flotabilidad de descarga lineal	b	m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup>	0,000513
Grado de linealidad de la descarga			0,702
Tipo de descarga			Intermedia

CARACTERÍSTICAS PENACHO (DESCARGA INTERMEDIA)			
Variable	Símbolo	Unidad	Valor
Dilución en el borde del campo cercano	S	-	684,8
Semiancho del campo cercano	x <sub>n</sub>	m	44,12
Altura máxima penacho sobre bocas	y <sub>máx</sub>	m	29,50
Espesor de la capa de mezcla	e	m	8,42



La dilución en el borde del campo cercano es  $684,8 > 100$ .

Obsérvese que la zona inicial de mezcla se extiende a unos 44,12 m a cada lado de la tubería difusora. El espesor de esta capa es de 8,42 m. Todo esto en condiciones de máximo caudal de efluente y ausencia de corriente.

Cuando hay corriente, el penacho se deforma en la dirección de la corriente, obteniéndose valores superiores de dilución inicial.

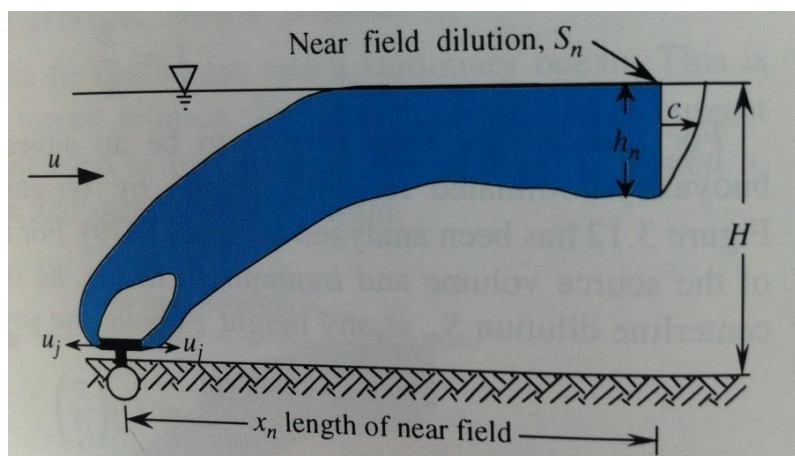


Imagen 2. Penacho en el campo cercano con corriente, sin estratificación

### 3.5.2 Cálculo en el caso de columna estratificada

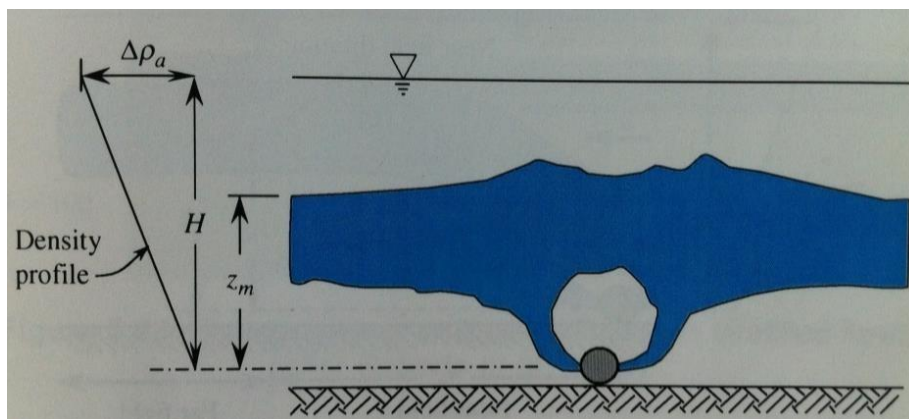


Imagen 3. Penacho inicial en condiciones estacionarias con estratificación

En el apartado 4.3 se mostró el perfil de densidades adoptado para el cálculo, que supone un gradiente de  $0,06 \text{ kg/m}^3/\text{m}$  entre 12,5 y 29,5 m de profundidad.

Por tanto, la profundidad de las bocas se referirá al plano situado a 10 m de profundidad.

DATOS			
Variable	Símbolo	Unidad	Valor
Caudal	Q	m <sup>3</sup> /s	0,0278
Longitud difusor	L	m	15
Número bocas	n	-	2
Profundidad bocas (relativa)	H	m	17
Gravedad	g	m/s <sup>2</sup>	9,8
Densidad efluente	$\rho_0$	kg/m <sup>3</sup>	997
Densidad mar	$\rho_a$	kg/m <sup>3</sup>	1026
Gradiente medio densidad mar	$d\rho/dy$	kg/m <sup>4</sup>	0,05985882

RESULTADOS INTERMEDIOS			
Variable	Símbolo	Unidad	Valor
Caudal lineal	q	m <sup>2</sup> /s	0,001852
Caudal por boca	Q <sub>b</sub>	m <sup>3</sup> /s	0,013889
Separación bocas	s	m	15,00
Gravedad reducida	g'	m/s <sup>2</sup>	0,277
Flotabilidad de descarga puntual	B	m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup>	0,003847
Flotabilidad de descarga lineal	b	m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup>	0,000513
Frecuencia de flotabilidad	N	s <sup>-1</sup>	0,023911
Prof. reducida (descarga puntual)	l <sub>B</sub>	m	4,10
Prof. reducida (descarga lineal)	l <sub>b</sub>	m	3,35
Grado de linealidad de la descarga			0,000
Tipo de descarga			Puntual

CARACTERÍSTICAS PENACHO (DESCARGA PUNTUAL)			
Variable	Símbolo	Unidad	Valor
Dilución en el borde del campo cercano	S	-	106,46
Radio del campo cercano	x <sub>n</sub>	m	16,79
Altura máxima penacho sobre bocas	y <sub>máx</sub>	m	14,34
Espesor de la capa de mezcla	e	m	6,55

La dilución en el borde del campo cercano es 106,46 > 80.

Obsérvese que la zona inicial de mezcla se extiende a unos 16,79 m a cada lado de la tubería difusora. El espesor de esta capa es de unos 6,55 m. Todo esto en condiciones de máximo caudal de efluente y ausencia de corriente.

Cuando hay corriente, el penacho se deforma en la dirección de la corriente, obteniéndose valores superiores de dilución inicial.

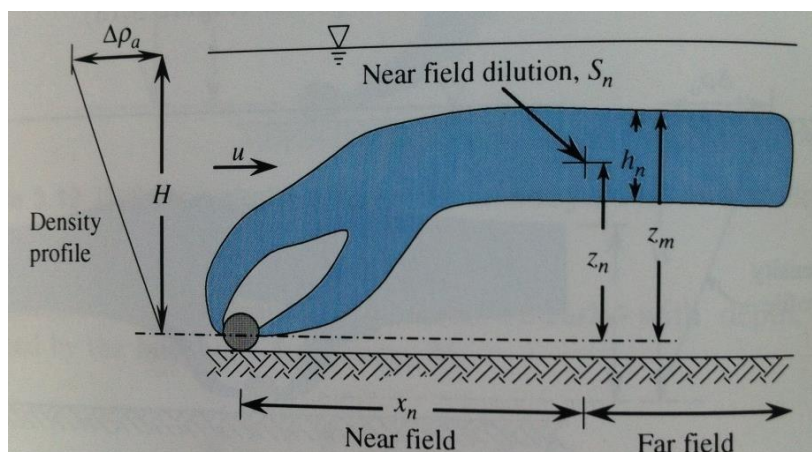


Imagen 4. Penacho en el campo cercano con corriente, con estratificación

#### 4. COMPROBACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD

Hay que distinguir los objetivos de calidad ecológicos de los sanitarios.

##### 4.1 OBJETIVOS DE CALIDAD ECOLÓGICOS

El objetivo debe ser mantener un estado ecológico del agua muy bueno, en el sentido que se le da a esta calificación en la Directiva Marco del Agua. Los indicadores de calidad biológicos, hidromorfológicos, y físico-químicos, son los establecidos en la tabla incluida en el anexo V de la Directiva, con la denominación “Definición del estado ecológico muy bueno, bueno y aceptable de las aguas costeras”.

Actualmente esto se ha desarrollado en el “Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental”. En el artículo 26 de este Real Decreto se establece la posibilidad de designar zonas de mezcla en torno a los puntos de vertido. En estas zonas, de extensión limitada, se permitirá que las concentraciones de determinadas sustancias excedan los límites marcados en el Real Decreto, siempre que el resto de la masa de agua siga cumpliendo las normas de calidad ambiental (NCA).

En el caso de los emisarios submarinos lo lógico es que la zona de mezcla abarque al menos el llamado “campo cercano” ya que es el espacio concreto y objetivable en el que tiene lugar el fenómeno físico de la dilución inicial turbulenta, y que, en general, tiene unas dimensiones reducidas.

Teniendo en cuenta los altos niveles de dilución inicial exigidos a los vertidos por emisarios submarinos, y los límites impuestos a las concentraciones de algunos contaminantes en las aguas depuradas, las concentraciones de estos contaminantes en los bordes del campo cercano son muy bajas.

Según Gómez Orea y otros<sup>1</sup>, se pueden establecer los siguientes indicadores ambientales del agua dependiendo de su concentración de DBO<sub>5</sub>, sólidos en suspensión, nitrógeno Kjeldahl y fosfatos (el valor 1 de cada indicador señala la calidad máxima o ausencia de contaminación):

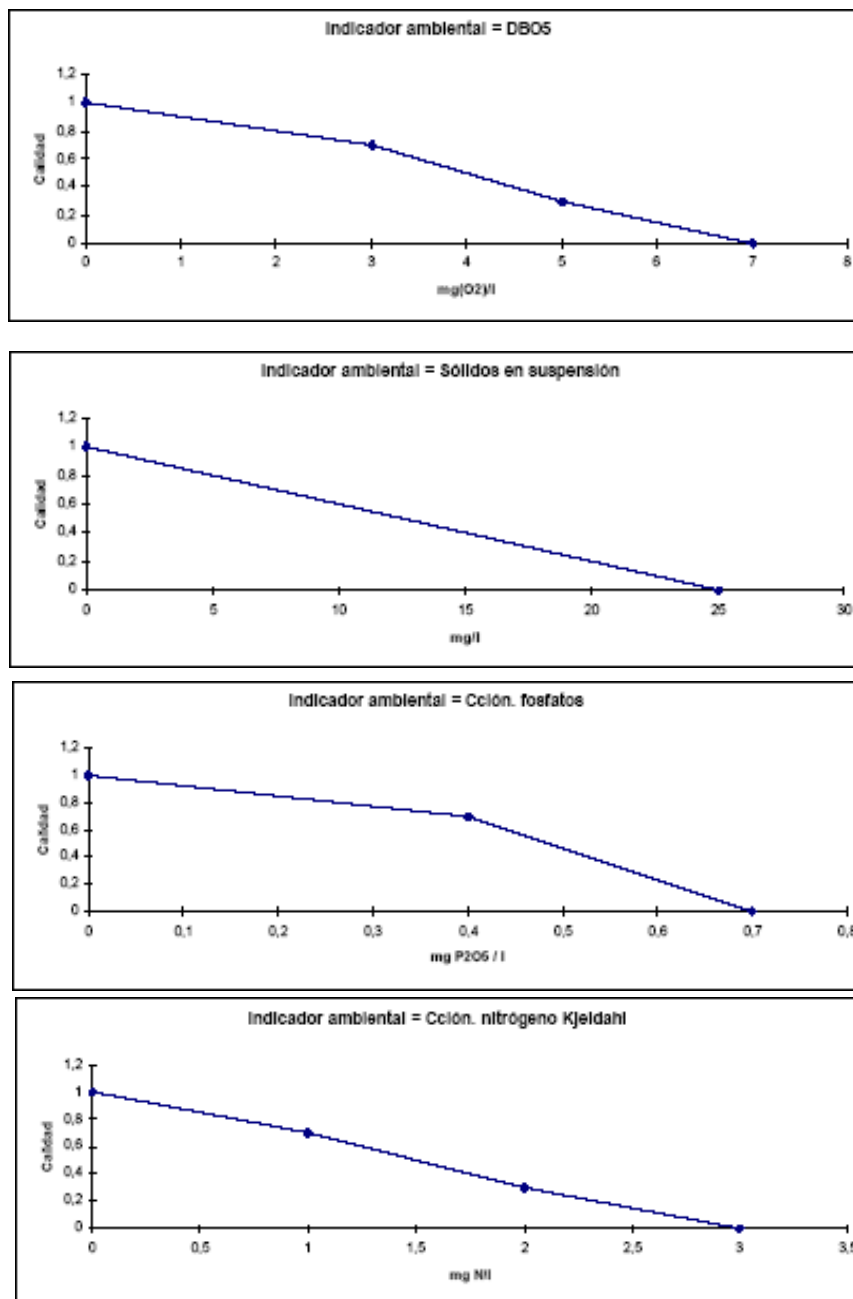


Imagen 5. Indicadores ambientales del agua dependiendo de su concentración de DBO<sub>5</sub>, sólidos en suspensión, nitrógeno Kjeldahl y fosfatos. Fuente: Gómez Orea y otros

<sup>1</sup> Gómez Orea, D y otros (1999). "Modelo para la evaluación de Impacto Ambiental. Una propuesta de objetivación en las Islas Baleares". Institut d'Estudis Ecològics (Conselleria de Medi Ambient, Ordenació del Territori i Litoral. Govern de les Illes Balears). Palma.

Las tablas siguientes indican, para los casos de columna de agua homogénea y estratificada y no estratificada:

- Las concentraciones máximas de los parámetros de contaminación del efluente.
- Las concentraciones máximas de esos parámetros en el borde del campo cercano obtenidos en las analíticas realizadas en la EDAR durante el año 2019, después de la dilución inicial (resultado de dividir los valores de la primera columna por 126,46, en el caso de mar estratificado, y por 516 en el caso de mar no estratificado).
- Los indicadores ambientales del agua, calculados según los gráficos o fórmulas de la publicación mencionada.

MAR NO ESTRATIFICADO				
Dilución en el borde del campo cercano				684,80
PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN MÁXIMA (mg/L)			INDICADOR AMBIENTAL AGUA
	En el efluente RD590/1996	En el efluente analíticas EDAR (promedio 2020)	En el borde del campo cercano	
DBO <sub>5</sub>	25	9	0,01	1,00
DQO	125	25	0,04	ND
Sólidos en suspensión	35	10	0,01	1,00
Nitrógeno Kjeldhal	-	18,6	0,03	0,99
Fósforo total	-	4,8	0,01	0,99
MAR ESTRATIFICADO				
Dilución en el borde del campo cercano				106,46
PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN MÁXIMA (mg/L)			INDICADOR AMBIENTAL AGUA
	En el efluente RD590/1996	En el efluente analíticas EDAR (promedio 2020)	En el borde del campo cercano	
DBO <sub>5</sub>	25	9	0,08	0,99
DQO	125	25	0,23	ND
Sólidos en suspensión	35	10	0,09	1,00
Nitrógeno Kjeldhal	-	18,6	0,17	0,95
Fósforo total	-	4,8	0,05	0,97

Se considera zona sensible para aguas de baño, pero no por eutrofización, por lo que no se exige un mínimo de nitrógeno Kjeldhal ni de fósforo total, según lo indicado en el *Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo*, de desarrollo del *Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas*.

Se observa que, para el resto de los parámetros considerados, la concentración de contaminantes en los bordes del campo cercano es muy baja y el indicador ambiental está próximo a 1, lo que significa una calidad alta del agua y señala los buenos resultados que pueden lograrse con una depuradora y un emisario submarino, siempre que el tratamiento del agua en la depuradora sea el adecuado para que se cumplan los límites normativos.

Hay que tener en cuenta que estos índices se han calculado bajo condiciones estacionarias (sin corriente) y caudal máximo. La mayor parte del tiempo hay corriente y el caudal de efluente es inferior al máximo, por lo que los índices de calidad serán aún mejores.

Por otra parte, estos índices corresponden al límite de la zona de dilución inicial, muy próxima al difusor. Cuando hay corriente, el penacho se va dispersando, de forma que a más distancia del difusor la dilución es progresivamente mayor, por lo que las concentraciones de los contaminantes contemplados (indicativos de materia orgánica y nutrientes) se van reduciendo hasta llegar a valores prácticamente indetectables.

Por otra parte, es importante observar lo siguiente:

- Debido a la flotabilidad del penacho, la zona de agua contaminada en el campo cercano es la capa superior (en caso de ausencia de estratificación de la columna de agua) o una capa intermedia (en caso de estratificación), no quedando contaminada la capa inferior en contacto con el fondo del mar (de forma similar al efecto de una chimenea arrojando un gas contaminante, más ligero que el aire, a la atmósfera).
- Si el agua residual es tratada correctamente, aunque el efluente puede contener cierta cantidad de sólidos en suspensión (hasta 35 mg/L en un efluente secundario), estos sólidos son partículas difícilmente sedimentables, ya que el efluente ha pasado previamente por varios procesos de filtración y decantación. Para que sedimentaran se necesitaría un medio receptor en condiciones de quietud casi absoluta y prolongada, lo que prácticamente no se da en el mar (aunque se haya hecho esta hipótesis para el cálculo de un valor conservador de la dilución inicial).

## 4.2 OBJETIVOS DE CALIDAD SANITARIOS

### 4.2.1 Usos de la zona afectables por el emisario

En el área de influencia del emisario se encuentra la Platja des Geperut, sensible por aguas de baño como se ha dicho anteriormente.. Es por ello que se adopta, como zona de baño, cualquier punto a 200 m de la costa, en lugar de los 50 m habituales, donde la calidad del agua debe ser excelente.

Por otro lado, se comprueba además que la calidad del agua sea buena a 50 m de la línea de costa más cercana, correspondiente a la Isla Pantaleu, que dista 485 m del punto de surgencia del penacho.

Los objetivos de calidad que se deben conseguir en las zonas de baño son:

Indicador	Calidad excelente	Calidad buena
Escherichia coli	< 250 UFC / 100 mL	< 500 UFC / 100 mL
Enterococos intestinales	< 100 UFC / 100 mL	< 200 UFC / 100 mL

Estos valores se han de cumplir en al menos el 95 % de las muestras.



## 4.2.2 Hipótesis de cálculo

### 4.2.2.1 Concentraciones de contaminantes en el efluente

Se va a comprobar si existe la posibilidad de que se cumplan las normas de calidad de las aguas de baño, incluso sin necesidad de desinfección con objeto de obtener un resultado considerado conservador.

En el efluente de las depuradoras, aunque no se haga desinfección, hay ya una cierta disminución de la concentración de coliformes respecto a la del influente, principalmente como consecuencia de la sedimentación y la radiación solar. Esta reducción es del orden de 10 a 100 veces.

Según un amplio estudio de 2470 análisis de muestras recogidas en 55 depuradoras de la cuenca mediterránea, a lo largo de 5 años (Garay, 2005), las concentraciones de coliformes totales, coliformes fecales y estreptococos fecales en los efluentes no desinfectados de las depuradoras, tenían las siguientes distribuciones:

Unidades: UFC/100 mL	Coliformes totales	Coliformes fecales	Estreptococos fecales
Valor máximo	220 $10^6$	23 $10^6$	1,5 $10^5$
Percentil 95	25 $10^6$	5,9 $10^6$	5,3 $10^5$
Percentil 90	14,5 $10^6$	4,0 $10^6$	3,4 $10^5$
Percentil 80	7,5 $10^6$	1,6 $10^6$	1,6 $10^5$
Percentil 50	1,0 $10^6$	0,15 $10^6$	0,2 $10^5$
Valor medio	5,4 $10^6$	1,1 $10^6$	1,1 $10^5$

Imagen 6. Distribución de concentraciones de coliformes y estreptococos. Fuente: Garay, 2005

Desde hace algún tiempo se considera que los indicadores de contaminación fecal más adecuados son *Escherichia coli* (EC) y enterococos intestinales (EI). Estos indicadores son los que se utilizan en la legislación actual para aguas de baño.

*Escherichia coli* es una de las especies dominantes en las heces humanas y de otros animales de sangre caliente. Aunque es relativamente inocua, se utiliza como indicador de contaminación fecal debido a la facilidad de su detección y por su alta densidad en las muestras. Representa la fracción mayoritaria de los coliformes fecales, entre el 20 y el 80 % en la mayoría de las muestras.

Los enterococos intestinales, a su vez, representan la fracción mayoritaria de los estreptococos fecales.

Para este estudio se ha considerado que EC y EI son, por término medio, el 60 % de, respectivamente, CF y EF, y se han tomado como valores de cálculo los correspondientes a los percentiles 80 de las respectivas distribuciones. Por tanto, sus concentraciones en el efluente son:

- *Escherichia coli*, EC =  $0,6 \cdot 1,6 \cdot 10^6 \approx 10^6$
- Enterococos intestinales, EI =  $0,6 \cdot 1,6 \cdot 10^5 \approx 10^5$

Por otro lado, se dispone de analíticas realizadas en la EDAR de Sant Elm, que muestran los siguientes datos:

*Tabla 3. Valores de microbiología adoptados*

Fuente	Año	Enterococos UFC/100ml	E. Coli UFC/100ml
Recursos hídricos	2012	10000	20000
	2013	5300	10000
	2014	9400	17000
	2015	4300	14000
	2016	2600	7000
	2017	70000	570000
	2018	13000	15000
	2019	570	450
		<b>53559,46</b>	<b>406414,53</b>

Los valores resaltados corresponden al 90 % de la distribución normal de la serie de datos de la que se dispone

El criterio de dilución más restrictivo es el referido a *Escherichia coli*, pues los objetivos de calidad permiten 2,5 veces más EC que EI. En este caso, para un máximo de 406414,53 UFC/100ml de E.Coli corresponderían 162.565,812 UFC/100ml de enterococos, por lo que estamos dentro del límite con los 53559,46 UFC/100ml considerados.

Para lograr una calidad sanitaria “excelente” del agua en el límite de la zona de baño, es preciso reducir la concentración de *Escherichia coli* en un factor de  $1.000.000 / 250 = 4.000$  y de enterococos en un factor de  $100.000 / 100 = 1.000$ .

Si no se desinfecta el efluente, esta reducción se ha de conseguir por medio de la dilución inicial o en el campo cercano, que es un fenómeno de mezcla turbulenta del efluente con agua de mar, y por medio de la “dilución” en el campo lejano, la que sufre el penacho mientras es arrastrado por la corriente hacia la zona de baño, fenómeno parcialmente de dispersión y mezcla pero sobre todo de reducción de la contaminación bacteriológica por la mortalidad o desactivación de los microorganismos por insolación, pH y otras características bactericidas del medio marino.

#### *4.2.2.2 Estratificación de la columna de agua*

Durante buena parte de la temporada de baño, debido a condiciones de estratificación de la columna de agua de mar, la pluma queda atrapada a cierta profundidad y no puede llegar a las playas. En consecuencia, la situación más desfavorable a contemplar respecto a los objetivos de calidad sanitarios es la de ausencia de estratificación, o columna de agua homogénea.

#### *4.2.2.3 Caudal y dilución inicial del efluente*

Los cálculos se hacen con el caudal de cálculo,  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h} = 27,78 \text{ l/s}$ . Para este caudal la dilución en el borde del campo cercano es 684,8 (apartado 3.5.1.).



#### 4.2.2.4 Dirección y velocidad de la corriente

Como corriente pésima se ha considerado la dirigida hacia la zona de baño. Esta corriente se considera fundamentalmente inducida por el viento, rolando hacia la derecha respecto a la dirección del viento. Básicamente los vientos entre las direcciones SO serían los que provocarían corrientes dirigidas desde la zona de vertido hacia el interior de la cala.

De acuerdo con la Instrucción, se considera, en principio, una corriente de velocidad 0,2 m/s. Este valor está acorde con los valores obtenidos en la campaña de caracterización del efluente que se han presentado en el *Anejo 9. Caracterización del efluente aguas receptoras sedimentos y organismos*.

Se harán cálculos también para una corriente de 0,1 m/s, que es una situación más realista en épocas estivales.

#### 4.2.2.5 T<sub>90</sub>

La mortalidad o inactivación de los microorganismos por su exposición al medio marino y a la radiación solar, se expresa como T<sub>90</sub>, o tiempo en el que quedan desactivadas el 90 % de las unidades presentes en el efluente.

Las mediciones reales del T<sub>90</sub> en latitudes y condiciones similares a las de las Islas Baleares (Grecia, sur de Francia), en horas de insolación, arrojan valores del orden de 1 – 1,5 horas. La Instrucción indica, como valor de cálculo, 2 horas, que es más conservador, y es el valor que se adopta en este estudio.

#### 4.2.2.6 Características de la sección inicial del penacho

El frente inicial del penacho, transversal a la dirección de avance hacia la cala, tiene un ancho de:

$$A = 50 \cdot \sqrt{2} = 70,71 \text{ m}$$

El espesor del penacho es 8,42 m (apartado 3.5.1).

En el borde de la capa de mezcla se ha producido una dilución del efluente  $S_n = 684,8$ , por lo que la concentración de *Escherichia coli* (EC) es  $C_n = C_0/S_n$ , donde  $C_0$  es la concentración de EC en el efluente, en este caso 406414,53 UFC/100 mL, por lo que  $C_n = 406414,53/684,8 = 593,47$  UFC/100 mL.

A partir del punto inicial, la sección se va a ir dispersando en su avance hacia la costa y, al mismo tiempo, se producirá una mortalidad bacteriana debida a la insolación y las características del medio marino. Las fórmulas que se utilizan a continuación son las que se indican en la Instrucción.

#### 4.2.2.7 Cálculo de la dispersión e inactivación bacteriana en el campo lejano

Cuando hay corriente, aunque sea básicamente superficial, el penacho es arrastrado y se deforma en dirección transversal y vertical, es decir, haciéndose cada vez más ancho y profundo. En cambio, apenas hay deformación en sentido longitudinal, al menos hasta que el penacho interacciona con el fondo del mar.

Según la Instrucción, la concentración de cualquier contaminante en cualquier punto de la pluma, determinado por sus coordenadas (X, Y, Z) viene dada por la expresión:

$$C(X, Y, Z) = \frac{C_0}{S_n} \cdot F_0(t) \cdot F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot F_3(t)$$

donde:

- X se mide a partir de la posición inicial del penacho, en la dirección de la corriente
- Z es la profundidad
- Y se mide perpendicularmente a los ejes X, Z, es decir, en dirección transversal a la corriente
- t es el tiempo transcurrido desde que la partícula situada en X, Y, Z, salió desde la sección inicial:

$$t = \frac{X}{U_a}$$

- $U_a$  es la velocidad de la corriente
- La función  $F_0(t)$  se aplica solo para contaminantes no conservativos, como son, por ejemplo, las bacterias coliformes. En este caso,  $F_0(t)$  describe la reducción de concentración de coliformes debido a su mortalidad o desactivación por insolación, pH y demás características bactericidas del medio marino.

Su expresión es:

$$F_{0(t)} = 10^{-t/T_{90}}$$

- $F_1(t)$  describe la reducción de concentración de contaminantes debido a la dispersión del penacho en sentido longitudinal. Esta dispersión es muy baja –hasta que el penacho interacciona con el fondo marino-, por lo que se desprecia, considerándose

$$F_1(t) = 1$$

- $F_2(t)$  describe la reducción de concentración de contaminantes debido a la dispersión del penacho en sentido transversal. Su expresión es:

$$F_2(Y, t) = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{A/2 + Y}{\sigma_y \sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{A/2 - Y}{\sigma_y \sqrt{2}} \right) \right]$$

- $F_3(t)$  describe la reducción de concentración de contaminantes debido a la dispersión del penacho en sentido vertical (en profundidad). Su expresión es:

$$F_3(Z, t) = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{e + Z}{\sigma_z \sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{e - Z}{\sigma_z \sqrt{2}} \right) \right]$$

Esta fórmula es válida hasta llegar a una profundidad  $H_h$ , en la que la dispersión del penacho en profundidad llega hasta el fondo marino, es decir, el penacho ocupa toda la columna de agua. Para profundidades inferiores a  $H_h$ , ya no se produce una mayor dispersión, y resulta

$$F_3 = \frac{h_n}{H_h}$$

Los significados de las variables que intervienen en las fórmulas anteriores se indican a continuación:

- A: Ancho inicial del penacho (m).
- E (denotado como  $h_n$  en la sección anterior): Espesor de la capa de mezcla (m).
- erf(X): Función de error definida como

$$\text{erf}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

- $\sigma_y$  es la desviación típica de la distribución de concentraciones en dirección transversal al penacho. Se calcula por la expresión

$$\sigma_y = (2 \cdot K_y \cdot t)^{1/2}$$

donde  $K_y$  es un coeficiente de dispersión transversal que, medido en  $\text{m}^2/\text{s}$ , se calcula como:

$$K_y = 3 \cdot 10^{-5} \cdot A^{4/3}$$

- $\sigma_z$  es la desviación típica de la distribución de concentraciones en dirección vertical. Se calcula por la expresión:

$$\sigma_z = (2 \cdot K_z \cdot t)^{1/2}$$

Donde  $K_z$  es un coeficiente de dispersión vertical que, en ausencia de estratificación, y medido en  $\text{m}^2/\text{s}$ , se calcula como:

$$K_z = 4 \cdot 10^{-3} \cdot U_a \cdot e$$

Las fórmulas anteriores se han programado en una hoja de cálculo cuyos resultados para diversos escenarios se mostrarán a continuación.

Se calculan las concentraciones de E. coli a lo largo del eje X, en superficie, es decir, para  $Y = Z = 0$ , ya que, para cada sección vertical, la concentración de contaminantes es máxima en este punto, disminuyendo hacia los lados y en profundidad, en forma de campanas de Gauss.

4.2.2.8 Cálculo para velocidad de corriente  $U_a = 0,2 \text{ m/s}$

DATOS	
Ancho inicial de la pluma, A (m)	21,21
Espesor de la capa de mezcla, e (m)	10,62
Dilución campo cercano, $S_n$	684,80
Velocidad de la corriente, $U_a$ (m/s)	0,20
Concentración E. coli en efluente, $C_0$ (UFC/100mL)	406.415,00
Concentración Enterococos en efluente (UFC/100mL)	53.559,00
Tiempo autodepuración, $T_{90}$ (horas)	2,00
Coordenadas Y, Z de los puntos de cálculo:	
Coordenada Y (m)	
Coordenada Z (m)	
CÁLCULO COEFICIENTES DE DISPERSIÓN	
Coeficiente de dispersión transversal, $K_y$ (m <sup>2</sup> /s)	0,00176
Coeficiente de dispersión vertical, $K_z$ (m <sup>2</sup> /s)	0,008496

Distancia a la posición inicial del penacho X (m)	Profundidad fondo mar (m)	$F_0$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	Concentración Escherichia coli $C(X,0,0)$ (UFC/100 mL)	Concentración Enterococos $C(X,0,0)$ (UFC/100 mL)
0	29,50	1,000	1,000	1,000	1,000	593	78
50	28,23	0,923	1,000	1,000	1,000	548	72
100	26,95	0,852	1,000	1,000	0,990	501	66
150	25,68	0,787	1,000	1,000	0,965	450	59
200	24,40	0,726	1,000	1,000	0,932	401	53
250	23,13	0,670	1,000	1,000	0,897	357	47
300	21,85	0,619	1,000	0,999	0,863	317	42
350	20,58	0,571	1,000	0,997	0,832	281	37
400	19,30	0,527	1,000	0,995	0,802	250	33
450	18,03	0,487	1,000	0,992	0,775	222	29
500	16,75	0,450	1,000	0,988	0,751	198	26
550	15,48	0,415	1,000	0,984	0,728	176	23
600	14,20	0,383	1,000	0,979	0,717	160	21
650	12,93	0,354	1,000	0,973	0,717	147	19
700	11,65	0,327	1,000	0,967	0,717	134	18
750	10,38	0,301	1,000	0,961	0,717	123	16
800	9,10	0,278	1,000	0,954	0,717	113	15
850	7,83	0,257	1,000	0,947	0,717	104	14
900	6,55	0,237	1,000	0,940	0,717	95	13
950	5,28	0,219	1,000	0,933	0,717	87	11
1000	4,00	0,202	1,000	0,926	0,717	80	11
1050	2,73	0,187	1,000	0,919	0,717	73	10
1100	1,45	0,172	1,000	0,912	0,717	67	9



4.2.2.9 Cálculo para velocidad de corriente  $U_a = 0,1 \text{ m/s}$

DATOS	
Ancho inicial de la pluma, A (m)	21,21
Espesor de la capa de mezcla, e (m)	10,62
Dilución campo cercano, $S_n$	684,80
Velocidad de la corriente, $U_a$ (m/s)	0,10
Concentración E. coli en efluente, $C_0$ (UFC/100mL)	406.415,00
Concentración Enterococos en efluente (UFC/100mL)	53.559,00
Tiempo autodepuración, $T_{90}$ (horas)	2,00
Coordenadas Y, Z de los puntos de cálculo:	
Coordenada Y (m)	
Coordenada Z (m)	
CÁLCULO COEFICIENTES DE DISPERSIÓN	
Coeficiente de dispersión transversal, $K_y$ (m <sup>2</sup> /s)	0,00176
Coeficiente de dispersión vertical, $K_z$ (m <sup>2</sup> /s)	0,004248

Distancia a la posición inicial del penacho X (m)	Profundidad fondo mar (m)	$F_0$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	Concentración Escherichia coli C(X,0,0) (UFC/100 mL)	Concentración Enterococos C(X,0,0) (UFC/100 mL)
0	29,50	1,000	1,000	1,000	1,000	593	78
50	28,23	0,852	1,000	1,000	1,000	506	67
100	26,95	0,726	1,000	1,000	0,990	427	56
150	25,68	0,619	1,000	0,999	0,965	354	47
200	24,40	0,527	1,000	0,995	0,932	290	38
250	23,13	0,450	1,000	0,988	0,897	237	31
300	21,85	0,383	1,000	0,979	0,863	192	25
350	20,58	0,327	1,000	0,967	0,832	156	21
400	19,30	0,278	1,000	0,954	0,802	126	17
450	18,03	0,237	1,000	0,940	0,775	103	14
500	16,75	0,202	1,000	0,926	0,751	83	11
550	15,48	0,172	1,000	0,912	0,728	68	9
600	14,20	0,147	1,000	0,897	0,717	56	7
650	12,93	0,125	1,000	0,883	0,717	47	6
700	11,65	0,107	1,000	0,869	0,717	39	5
750	10,38	0,091	1,000	0,855	0,717	33	4
800	9,10	0,077	1,000	0,842	0,717	28	4
850	7,83	0,066	1,000	0,829	0,717	23	3
900	6,55	0,056	1,000	0,817	0,717	20	3
950	5,28	0,048	1,000	0,805	0,717	16	2
1000	4,00	0,041	1,000	0,794	0,717	14	2
1050	2,73	0,035	1,000	0,782	0,717	12	2
1100	1,45	0,030	1,000	0,772	0,717	10	1



#### 4.2.2.10 Conclusiones

En el área de influencia del emisario se encuentra la Platja des Geperut, sensible por aguas de baño como se ha dicho anteriormente. Es por ello que se adopta, como zona de baño, cualquier punto 200 m de la costa, en lugar de los 50 m habituales, donde la calidad del agua debe ser excelente. Este punto corresponde con  $X = 880$  m.

Por otro lado, se comprueba además que la calidad del agua sea buena a 50 m de la línea de costa más cercana, correspondiente a la Isla Pantaleu, en el punto  $X = 485$  m del punto de surgencia del penacho.

Para el primer caso, se observa que, en el conjunto desfavorable de hipótesis de cálculo consideradas, las fórmulas predicen, en el límite de la zona de baño una concentración de *E. coli* de 98 UFC/100 mL y de Enterococos de 13 UFC/100 ml con corriente de 0,2 m/s, y una concentración de *E. coli* de 21 UFC/100 mL y de Enterococos de 3 UFC/100 ml, con corriente de 0,1 m/s, correspondiente en todos los casos a aguas de baño de calidad sanitaria “excelente”.

Para el segundo caso, se observa que, en el conjunto desfavorable de hipótesis de cálculo consideradas, las fórmulas predicen, en el límite de la zona de baño una concentración de *E. coli* de 205 UFC/100 mL y de Enterococos de 27 UFC/100 ml con corriente de 0,2 m/s, y una concentración de *E. coli* de 89 UFC/100 mL y de Enterococos de 12 UFC/100 ml, con corriente de 0,1 m/s, correspondiente en todos los casos también a aguas de baño de calidad sanitaria “excelente”.

Los valores obtenidos de concentraciones de *E. coli* y Enterococos en las analíticas realizadas por Abaqua son mucho menores a los estimados en los apartados anteriores, por tanto, es de esperar que la calidad del agua en la zona de baño sea todavía mayor a la obtenida. En los apéndices del presente anejo se adjuntan diferentes resultados de muestras de varios años facilitados por ABAQUA.

En cualquier caso, es necesario controlar, mediante analíticas frecuentes, las características microbiológicas del efluente. Si bien no es necesario, se recomienda, para una mayor seguridad, proceder a su desinfección en la temporada de baño.