



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL
Y MARINO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

INFORME TÉCNICO

para

Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino

Secretaría de Estado de Cambio Climático

Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental

ASISTENCIA TÉCNICA EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE VERTIDOS LÍQUIDOS Y DE ACTUACIONES EN EL MEDIO MARINO

AVANCE

EL SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL MEDIO MARINO FRENTE A
LOS VERTIDOS DE LAS PLANTAS DESALADORAS EN ESPAÑA:
ANÁLISIS Y PROPUESTA DE MEJORAS

(A7-T117)

TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 20-409-5-001

Madrid, noviembre de 2011

Centro de Estudios de Puertos y Costas



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL
Y MARINO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

**TITULO: ASISTENCIA TÉCNICA EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO
AMBIENTAL DE VERTIDOS LÍQUIDOS Y DE ACTUACIONES EN EL MEDIO MARINO
AVANCE
EL SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL MEDIO MARINO FRENTE A LOS VERTIDOS DE LAS
PLANTAS DESALADORAS EN ESPAÑA: ANÁLISIS Y PROPUESTA DE MEJORAS
(A7-T117)**

TOMO ÚNICO

CLIENTE:

DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL

EL PRESENTE INFORME CONSTITUYE UN DOCUMENTO OFICIAL DE ESTE TRABAJO Y, DE ACUERDO CON LAS NORMAS GENERALES DEL ORGANISMO, SU ENTREGA SUPONE EL CUMPLIMIENTO DE LAS ACTUACIONES TÉCNICAS DEL MISMO REFERENTES A LA MATERIA OBJETO DEL INFORME.

VALIDEZ OFICIAL

VISTO EL CONTENIDO DEL INFORME Y SIENDO ACORDE CON LAS CLAUSULAS DEL CONVENIO DE COLABORACION CORRESPONDIENTE, SE PROPONE AUTORIZAR SU EMISIÓN.

EL DIRECTOR DEL CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS

Fdo. José María Grassa Garrido

AUTORIZA LA EMISIÓN DEL INFORME:

Madrid, a 30 de noviembre de 2011

EL DIRECTOR DEL CEDEX

Fdo. Mariano Navas Gutiérrez



SÓLO SON INFORMES OFICIALES DEL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX) LOS REFRENDADOS POR SU DIRECCIÓN.



EL SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL MEDIO MARINO FRENTE A LOS VERTIDOS DE LAS PLANTAS DESALADORAS EN ESPAÑA: ANÁLISIS Y PROPUESTA DE MEJORAS

INDICE

1. ANTECEDENTES Y OBJETO.....	3
2. INTRODUCCIÓN.....	3
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE	4
2.2 SISTEMAS DE VERTIDO AL MAR.....	7
2.3 COMPORTAMIENTO DEL EFLUENTE CUANDO SE VIERTE AL MAR	10
2.4 DILUCIÓN NECESARIA	24
3. EL SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL MEDIO MARINO FRENTE A LOS VERTIDOS DE LAS PLANTAS DESALADORAS EN ESPAÑA.....	27
3.1 ESTABLECIMIENTO DE LÍMITES DE EMISIÓN Y DE NORMAS DE CALIDAD	29
3.2 EMPLEO DE HERRAMIENTAS PARA EL DISEÑO AMBIENTAL DEL DISPOSITIVO DE VERTIDO	34
3.2.1 <i>Tipos de herramientas de predicción. Ventajas e inconvenientes.</i>	34
3.2.2 <i>Herramientas matemáticas disponibles actualmente. Limitaciones</i>	41
3.2.3 <i>Márgenes de seguridad en el uso de las herramientas de predicción</i>	53
3.3 PROGRAMA DE VIGILANCIA AMBIENTAL APROPIADO PARA VERTIDOS DE DESALADORAS.....	55
3.4 DISPONIBILIDAD DE UNA RESERVA DE DILUCIÓN Y EXISTENCIA DE UN PROTOCOLO DE ACTUACIÓN.....	57
4 RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
4.1 RESUMEN.....	59
4.2 CONCLUSIONES	61
4.3 RECOMENDACIONES	74



1. ANTECEDENTES Y OBJETO

En junio de 2009 se firmó una Encomienda de Gestión entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental (DGCEA) del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) para la realización de *Trabajos de asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materias competencia de la Dirección General (2009-2013)*.

En el anejo de la Encomienda se relacionan las actuaciones a realizar, entre los cuales se encuentra la nº 7 titulada ASISTENCIA TÉCNICA EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE VERTIDOS LÍQUIDOS Y DE ACTUACIONES EN EL MEDIO MARINO, en el marco de la cual se inscribe el presente Informe.

El objeto de este Informe es realizar un análisis del sistema de protección del medio marino frente a los vertidos de las plantas desaladoras que se ha venido configurando en España durante la última década y derivar de dicho análisis un conjunto de conclusiones y recomendaciones a proponer a la DGCEA para su actualización y mejora.

No obstante, conviene hacer notar que el CEDEX, aunque posea experiencia y prestigio reconocidos en este campo, no tiene competencia alguna para aprobar criterios de protección ambiental o metodologías de cálculo que se consideren aceptables para una evaluación de impacto ambiental o una autorización de vertido. Esta competencia corresponde por completo a las diferentes Autoridades Ambientales, aunque como es lógico, éstas pueden pedir apoyo científico y técnico al CEDEX para que les presente propuestas. Ejemplos de este modo de proceder lo constituyen la vigente *Instrucción para el proyecto de conducciones de vertido de aguas residuales desde tierra al mar* o las *Recomendaciones para la gestión de los materiales dragados en los puertos españoles*, cuyas versiones de ponencia fueron redactadas por el CEDEX, que también participó en el proceso de discusión y mejora hasta la aprobación por los órganos competentes.

2. INTRODUCCIÓN

Antes de pasar al tema principal del presente informe y con el objeto de facilitar su comprensión, conviene repasar algunos aspectos de los vertidos al mar de las plantas desaladoras.

Por otra parte, dado que desde hace muchos años las desaladoras importantes que se construyen en España son siempre de ósmosis inversa, en adelante nos referiremos exclusivamente a este tipo de desaladoras.



2.1 Características del efluente

Los contaminantes que pueden ir asociados a los vertidos líquidos de las plantas desaladoras de forma permanente o periódica se pueden clasificar en: a) sustancias aportadas por el agua de alimentación, que al ser rechazadas por los filtros o las membranas terminan devolviéndose al mar aunque con concentraciones más elevadas¹ y b) sustancias añadidas durante el proceso con distintos fines como floculantes, biocidas, antiincrustantes, etc.

La componente de las aguas de rechazo debida a las sustancias aportadas por el agua de alimentación es en principio la menos preocupante, sobre todo cuando se vierte al mismo medio de donde se extrae el agua (como sucede cuando el agua se toma del mar) ya que no se añade ninguna carga contaminante al sistema. Hay que tener en cuenta los posibles impactos que se puedan producir como consecuencia de que se devuelven con concentraciones más elevadas, ya que suelen ser caudales importantes en régimen permanente, pero al tratarse de sustancias que ya estaban presentes en el medio, una dilución suficiente resuelve el problema puesto que llevaría las concentraciones de la mezcla a valores similares a los existentes en el entorno. Las sustancias añadidas están presentes en cantidades más pequeñas, pero al ser ajenas al medio, pueden tener un mayor impacto potencial; por ejemplo, los bisulfitos que se emplean a veces como inhibidores del crecimiento biológico consumen todo el oxígeno disuelto del efluente e incluso pueden conservar cierta capacidad reductora tras su vertido al mar.

En cualquier caso, existen algunas excepciones importantes a esta regla: Cuando el agua se toma de pozos profundos, además de estar exenta de oxígeno, suele tener concentraciones elevadas de sulfuro de hidrógeno que resulta tóxico para los organismos acuáticos. Afortunadamente ambos problemas tienen la misma sencilla solución: un tratamiento de aireación. A veces, estas aguas profundas presentan también niveles de radiactividad superiores a los límites admitidos para aguas superficiales, problema que se agrava por los altos factores de reconcentración que tienen las plantas de ósmosis inversa con aguas salobres. Algo similar sucede con los fluoruros y con algunos metales.

Resulta fácil calcular la salinidad del efluente de una planta desaladora a partir de la salinidad del agua de captación y de los caudales de operación. En efecto, llamando Q al caudal, s a la salinidad y designando por los subíndices a , p y e a las aguas bruta (ambiental), producto y de rechazo (efluente) respectivamente, las expresiones de conservación de las masas de agua (supuesta incompresible) y de la sal toman la forma:

$$Q_a = Q_p + Q_e$$

$$s_a Q_a = s_p Q_p + s_e Q_e$$

¹ La concentración de las sustancias rechazadas por las membranas, como por ejemplo, las sales, aumentan en la misma proporción que la relación entre el caudal de toma y el caudal de rechazo. Para una desaladora de ósmosis inversa que desala agua de mar, esta relación toma actualmente un valor muy próximo a 2. La concentración de las sustancias retenidas por los filtros, como por ejemplo, los sólidos en suspensión, aumentan en un factor mucho mayor, cuyo valor concreto dependerá de la frecuencia con la que se realice la operación, del caudal en flujo inverso que se utilice para la limpieza y del tratamiento al que se someta dicho caudal.

Utilizando la definición de *índice de conversión* expresado en tanto por uno (fracción del caudal de toma que se convierte en agua producto):

$$R = Q_p / Q_a$$

Se deduce fácilmente que

$$s_e = (s_a - s_p \cdot R) / (1 - R)$$

Teniendo en cuenta que habitualmente $s_p \ll s_a$, se tiene que:

$$s_e \approx s_a / (1 - R)$$

que también puede expresarse como

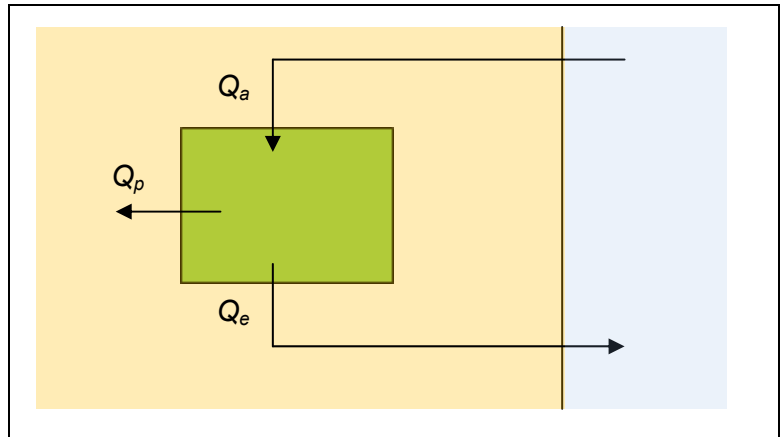
$$s_e / s_a \approx 1 / (1 - R)$$

o como

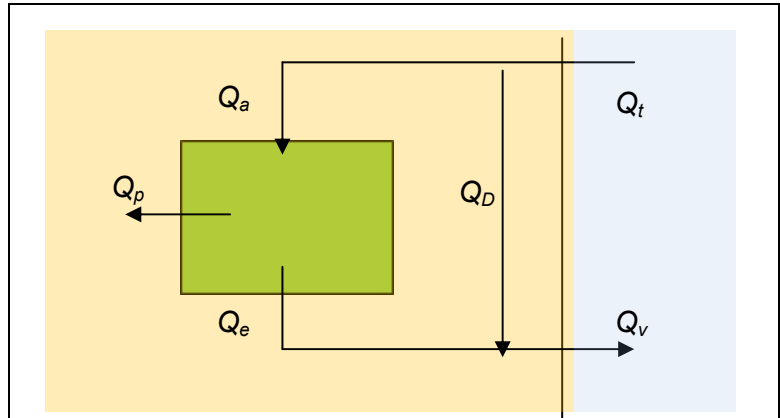
$$(s_e - s_a) / s_a = \Delta s_e / s_a = s_e / s_a - 1 \approx R / (1 - R)$$

O sea, tanto la **salinidad relativa del efluente** (s_e / s_a) como el **exceso relativo de salinidad** (exceso de salinidad del efluente sobre la del medio receptor expresada en términos relativos respecto a ésta, $\Delta s_e / s_a$) dependen exclusivamente del índice de conversión de la planta.

Actualmente en la mayoría de las desaladoras de agua de mar el proceso de desalación se realiza en una única etapa en la que el agua salada de la toma (caudal influente), tras el paso por las membranas de osmosis inversa, se divide en dos caudales efluentes: el agua producto (aproximadamente un 45% en el estado actual de la tecnología de las membranas) y el agua de rechazo (el 55% restante). Sin embargo, hay casos en los que se somete a una nueva etapa de ósmosis inversa, bien el agua producto o bien el agua de rechazo. Lo primero se hace cuando, con el objetivo de cumplir con los requerimientos del anexo I (Parámetros y valores paramétricos) del R.D. 140/2003 por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, hay que reducir aún más la concentración de determinadas sustancias en el agua producto, por ejemplo, el boro. Lo segundo, cuando se desea aumentar el rendimiento de la planta. Lo primero hace que aumente la fracción de caudal influente que se devuelve al mar y por lo tanto, que sea menor el índice de conversión. Lo segundo produce el efecto contrario.



En resumen, los índices de conversión de proceso en las plantas desaladoras de agua de mar suelen oscilar entre un 40% y un 55%, lo que se traduce en salinidades relativas de entre 1,67 y 2,22 (excesos relativos de salinidad de entre 0,67 y 1,22). Para una salinidad del agua de captación de 37,5 psu,² típica del Mediterráneo, esto supone un efluente con salinidades comprendidas entre 62,5 y 83,3 psu. Este parámetro es importante porque de él dependerá la densidad sumergida del efluente y por tanto, tal y como se comenta en el siguiente apartado, su comportamiento en el medio receptor.



Algunas veces parte del caudal de toma se dedica a prediluir el efluente antes de su vertido al mar. Designando mediante los subíndices *t*, *v* y *D* la toma, el vertido y la predilución, y llamando R_D a la fracción del caudal de toma que se dedica a este fin:

$$R_D = Q_D / Q_t$$

y suponiendo aquí también que $s_p \ll s_a$, se tiene:

$$Q_v = Q_e + Q_D = (1 - R) Q_a + Q_D = (1 - R) (1 - R_D) Q_t + R_D Q_t = (1 - R + R R_D) Q_t = (1 - R') Q_t$$

siendo R' el índice de conversión global de la planta:

$$R' = R - R R_D = R (1 - R_D) = (Q_p / Q_a) (Q_a / Q_t) = Q_p / Q_t$$

Por otra parte:

$$s_t Q_t = s_a Q_t \approx s_v Q_v = s_v (1 - R') Q_t$$

de donde

$$s_v / s_a \approx 1 / (1 - R')$$

y

$$(s_v - s_a) / s_a = \Delta s_v / s_a = s_v / s_a - 1 \approx R' / (1 - R')$$

O sea, tanto la salinidad relativa del vertido (s_v / s_a) como el exceso relativo de salinidad ($\Delta s_v / s_a$) dependen exclusivamente del índice global de conversión de la planta, que puede

² psu: "practical salinity unit" o unidad práctica de salinidad. Es la unidad definida por la UNESCO y equivale aproximadamente a 1 g de sal por kg de muestra, que también puede expresarse como 1‰

calcularse simplemente dividiendo el caudal de agua producto por el caudal de toma, variables estas que suelen medirse siempre de forma permanente en las plantas desaladoras. Nótese que no es necesario medir ninguna salinidad, hecho que será de utilidad más adelante.

Obsérvese que si no hay predilución ($Q_D = 0$), se anula R_D y resulta $R = R'$ y entonces este resultado coincide con el anterior.

Respecto a la concentración de sólidos en suspensión en el efluente, dependerá de la concentración en el medio receptor, de la frecuencia con que se limpien los filtros y sobre todo, de cómo se realice el vertido al mar del agua resultante de dicha limpieza. Si llamamos T al período de tiempo transcurrido entre operaciones de limpieza sucesivas, τ al tiempo que dura la evacuación de las aguas de limpieza y Q_f al caudal de flujo inverso empleado en esta operación, la concentración de sólidos en suspensión será

$$SS_e = (SS_a \cdot Q_a \cdot T) / (Q_f \cdot \tau)$$

Actualmente es práctica habitual recoger en un tanque las aguas resultantes de dicha limpieza y verterlas poco a poco mezcladas con el efluente procedente del rechazo de las membranas. En estos casos la concentración de sólidos en suspensión dependerá de la capacidad y de la gestión que se haga de dichos tanques.

Las concentraciones de las sustancias añadidas al proceso son generalmente pequeñas y sus valores dependen mucho de cada caso concreto porque suelen ser el resultado de un proceso de optimización en función de las características locales de las aguas. Hay que tener en cuenta que se trata de un componente del proceso que puede tener un coste significativo.

Conviene llamar la atención sobre la posible presencia de sustancias reductoras que podrían crear situaciones de anoxia más o menos duraderas con independencia de su eventual toxicidad directa.

2.2 Sistemas de vertido al mar

El comportamiento del efluente cuando se vierte al mar depende naturalmente del sistema de vertido utilizado. Estos se pueden clasificar en dos grupos: los que se realizan sobre la misma línea de costa y los que se realizan en el fondo del mar. Los primeros tienen con respecto a los segundos la ventaja de que pueden construirse desde tierra, con lo que se evitan la peligrosidad, la incertidumbre, los impactos ambientales y los elevados costes que presentan las obras marítimas, pero tienen el inconveniente de que el contacto con los volúmenes de agua de mar necesarios para conseguir las diluciones buscadas es mucho más difícil, ya que los calados son menores y el acceso del agua de mar para diluir se produce solo por un semiespacio. Como consecuencia, los primeros son más económicos pero menos eficientes para provocar las diluciones.



Como ejemplos de sistemas de vertido situados en la costa que están en funcionamiento en desaladoras españolas podemos mencionar los siguientes:

- Chorro libre sobre un acantilado. Ejemplo: desaladora de Arucas-Moya, en Gran Canaria.
- Chorro libre sobre la escollera de un dique. Ejemplo: desaladora Las Palmas III.
- Rebose sobre un acantilado. Ejemplo: desaladora de Melilla.
- Descarga enterrada en una playa de bolos. Ejemplo: desaladora del Sureste, en Arinaga, Gran Canaria.
- Chorro a un torrente, cerca de la desembocadura. Ejemplo: desaladora de Palma de Mallorca.
- Canal a una playa. Ejemplo: desaladora de Alicante.



Chorro libre sobre un acantilado. Desaladora de Arucas-Moya



Chorro libre sobre la escollera de un dique. Desaladora Las Palmas III



Rebose sobre un acantilado. Desaladora de Melilla



Descarga enterrada en una playa de bolos. Desaladora de Arinaga, Gran Canaria.

	
<p>Chorro a un torrente, cerca de la desembocadura. Desaladora de Palma de Mallorca.</p>	<p>Canal a una playa. Desaladora de Alicante</p>
	
<p>Chorro libre sobre el fondo marino. Desaladora de Formentera</p>	<p>Emisario submarino. Desaladora de Valdelentisco</p>
<p>Figura 1: Diferentes tipos de vertido presentes en el litoral español</p>	

Sin embargo, el progresivo aumento de tamaño de las desaladoras hace que sus necesidades de dilución del efluente, salvo casos de condiciones especialmente favorables, no puedan ya satisfacerse con este tipo de sistema de vertidos, por lo que se ha ido produciendo una migración hacia sistemas más eficaces. Las mejoras se vienen produciendo en tres direcciones principales:

- a) Vertidos en el fondo del mar mediante tramos difusores con numerosas bocas de descarga, por ejemplo, la desaladora Delta de la Tordera en Girona, las de Valdelentisco y San Pedro del Pinatar en Murcia o la mayoría de las desaladoras actualmente en proyecto o construcción: Torrevieja, Águilas, Campo de Dalías, Cuevas de Almanzora, Fuengirola, Ceuta, etc.

- b) Vertidos combinados con las aguas residuales de otras instalaciones, por ejemplo, la desaladora de Carboneras, que mezcla su efluente con el de la central térmica de Endesa, o la del puerto de Escombreras en Cartagena, que lo mezcla con el de la central térmica de AES Energía Cartagena, o la de Barcelona, que lo mezcla con el de la depuradora del Prat de Llobregat.
- c) Vertidos con predilución, mezclando el efluente, antes de su vertido al mar, con un caudal de agua de mar extraído expresamente para este fin, por ejemplo, las desaladoras de Alicante o la desaladora de Jávea.

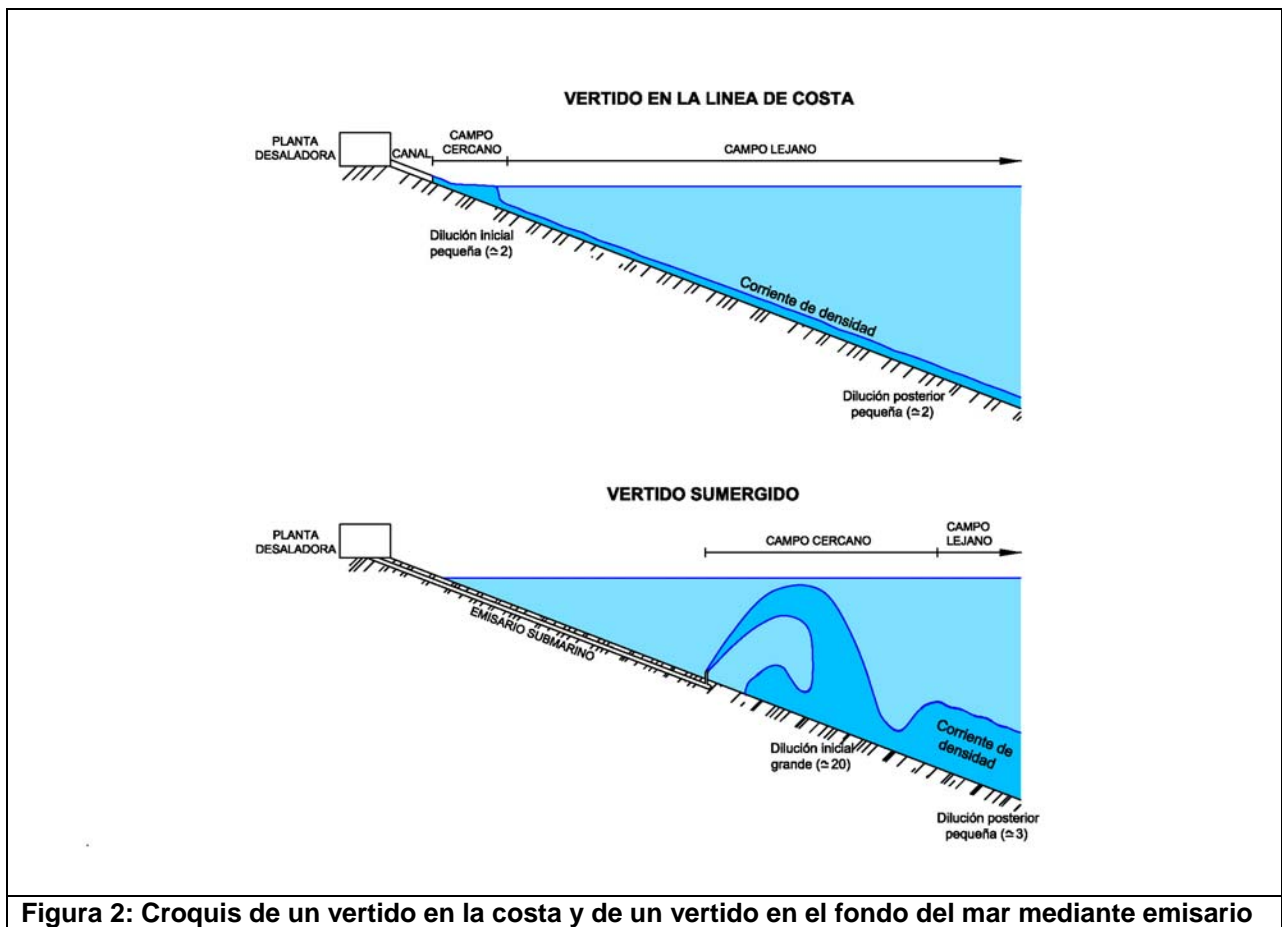


Figura 2: Croquis de un vertido en la costa y de un vertido en el fondo del mar mediante emisario

2.3 Comportamiento del efluente cuando se vierte al mar

Campo cercano y campo lejano

Cuando el efluente llega al mar produce una alteración del campo de velocidades medias que existiría de forma natural en ausencia del vertido, y también un fuerte incremento de la intensidad de la turbulencia caracterizada por un rápido movimiento de parcelas de fluido que intercambian su posición, lo que favorece su mezcla, alcanzándose diluciones significativas en un espacio reducido. La zona donde se produce este comportamiento se denomina *campo*

cercano, y sus características dependen mucho del sistema de vertido y de los parámetros del dispositivo de vertido.



Figura 3: Turbulencias en el campo cercano de un chorro sumergido. El efluente se ha marcado con un colorante (Rodamina)³

Después, como la mezcla sigue teniendo una densidad mayor que la del medio receptor (flotabilidad negativa), se desplaza hacia el fondo⁴, donde al principio se va esparciendo en todas direcciones, pero finalmente constituye una corriente de densidad pegada al fondo claramente diferenciada de la capa superior por su mayor densidad y velocidad, y cuya dirección y sentido vienen determinados por la pendiente del fondo y por las corrientes del medio receptor. La zona ocupada por esta corriente de densidad se denomina *campo lejano* y su comportamiento es similar para todos los sistemas de vertido, aunque los valores concretos de los diferentes parámetros (velocidad, salinidad, espesor, etc.) pueden ser muy diferentes en cada caso

³ Salvo que se diga lo contrario, todas las fotos de ensayos en modelo físico que aparecen en el presente informe se han tomado en las instalaciones del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.

⁴ En los pocos casos en que el rechazo de la desaladora se mezcle con aguas residuales o con aguas procedentes de un circuito de refrigeración, el efluente puede tener una densidad inferior a la del medio receptor, por lo que el desplazamiento se produciría hacia la superficie (flotabilidad positiva).

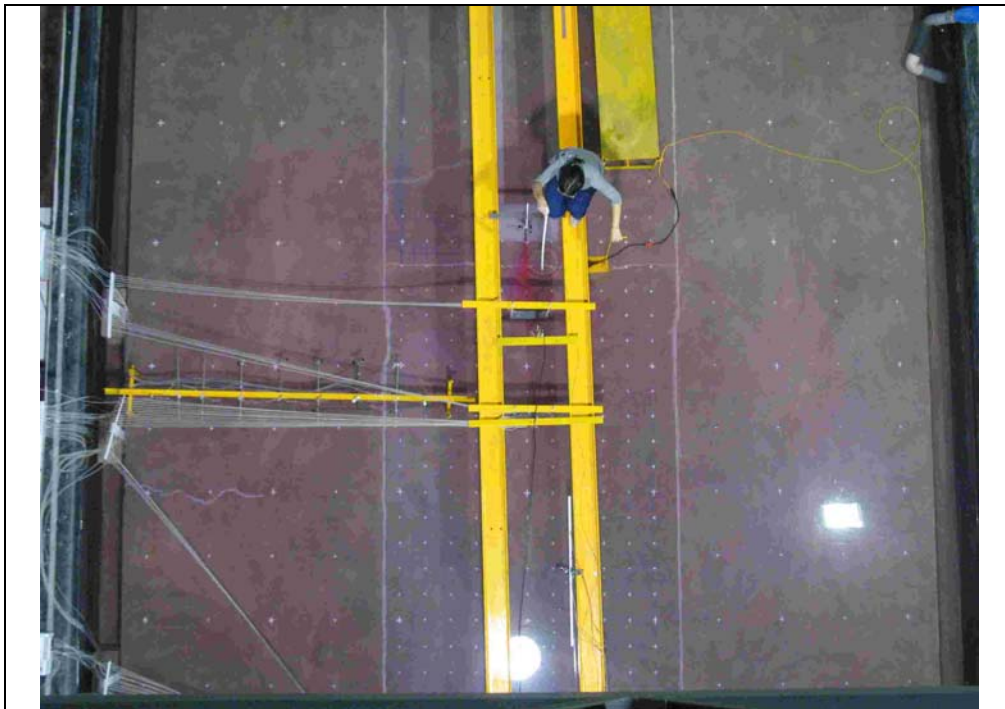


Figura 4: Esparcimiento por el fondo de un vertido mediante chorro sumergido en un fondo con pendiente

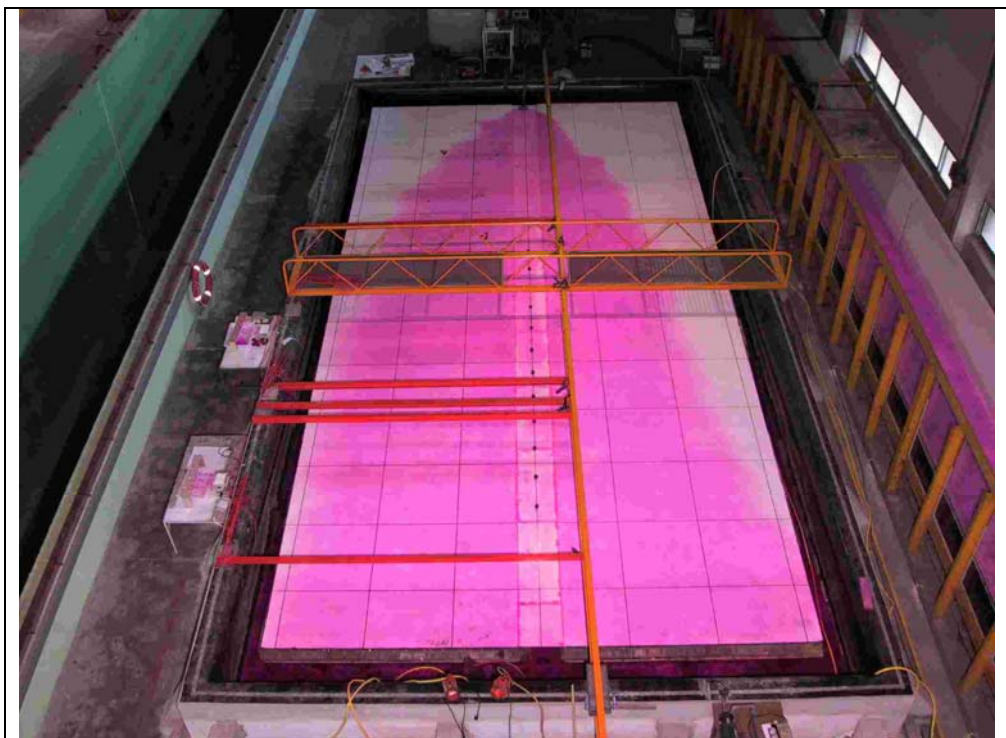


Figura 5: Campo lejano de un vertido en la línea de costa

En el campo lejano, a medida que avanza este flujo, su ancho va aumentando por esparcimiento lateral (si no está encauzado) y consecuentemente, su espesor disminuye.

También se va produciendo lenta pero inexorablemente un intercambio de agua entre la capa hiperdensa y la capa superior, lo que produce una ligera dilución que provoca la aparición y continuo engrosamiento de una capa de interfaz con salinidades intermedias entre las de las dos anteriores. El espesor de la capa hiperdensa se va reduciendo hasta que a cierta distancia desaparece por completo. Al mismo tiempo, el espesor de la capa de interfaz va aumentando y su salinidad media, que al principio se mantiene constantemente igual al promedio entre la de la capa hiperdensa y la del medio receptor, cuando ésta desaparece va disminuyendo hasta que llega a hacerse prácticamente indistinguible de la del medio receptor.

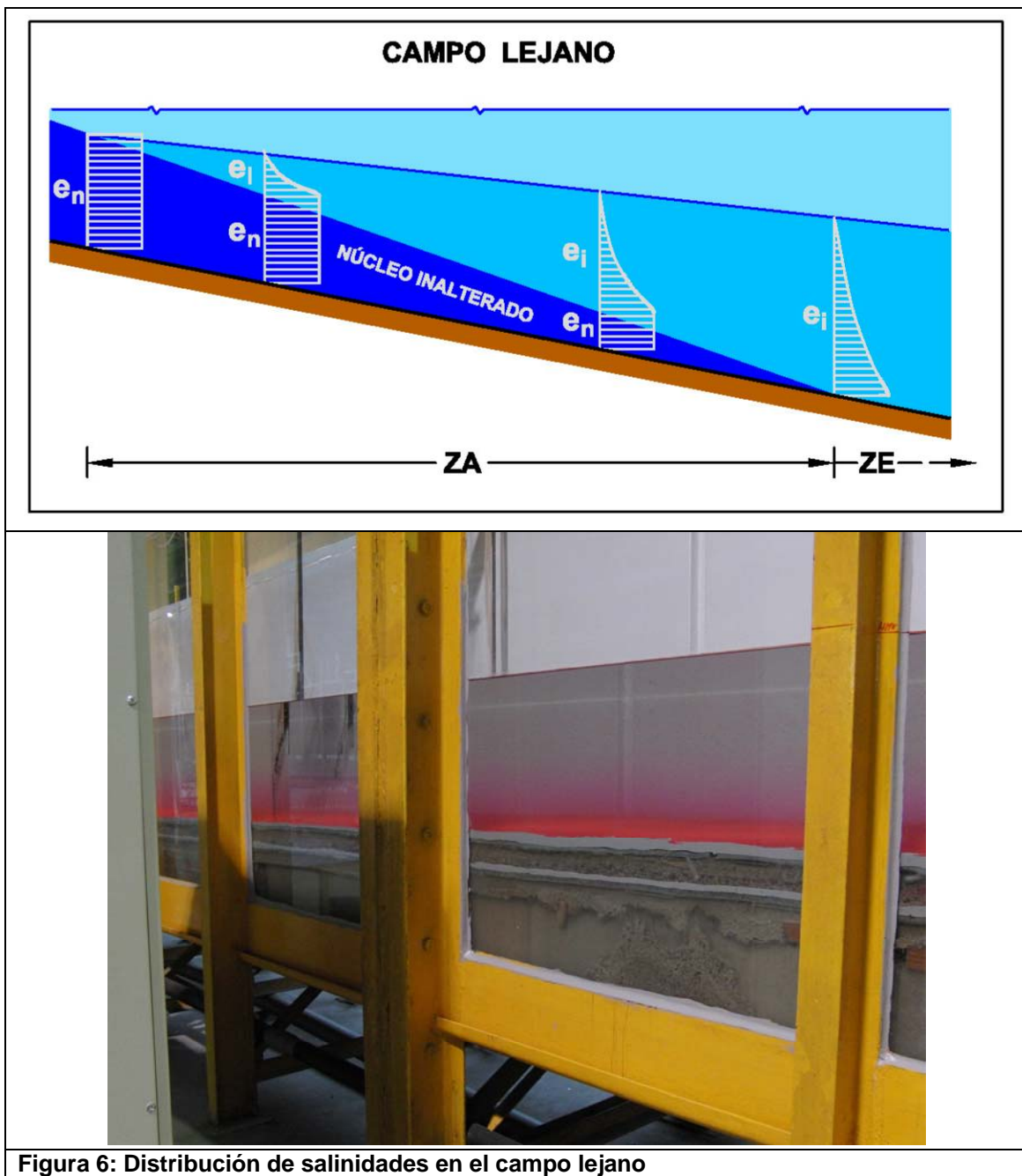


Figura 6: Distribución de salinidades en el campo lejano



Influencia del caudal

La dilución se consigue haciendo que parte del agua del medio receptor se mezcle con el efluente. Al tratarse de un caudal de vertido continuo, el medio receptor tiene que ser capaz de suministrar un caudal de alimentación también continuo. Dado un caudal de vertido, el parámetro del medio receptor que tiene influencia sobre las diluciones máximas que pueden conseguirse es el caudal disponible de agua receptora para alimentar el chorro y no el volumen del medio receptor como erróneamente se piensa algunas veces. El vertido de una desaladora a un embalse sin aportes terminaría por salinizar todo el embalse. En el vertido de una desaladora a una corriente (río, estuario) sería el cociente entre el caudal de aportación de la corriente y el caudal de salmuera el que determinaría la dilución. El volumen del medio receptor es importante sólo cuando se trata de diluir un vertido de corta duración (por ejemplo, un vertido accidental) o cuando se quieren estudiar fenómenos transitorios.

Por otra parte, conforme la dilución conseguida se va haciendo importante (por ejemplo, superior a 10), el comportamiento hidrodinámico de la mezcla se va haciendo cada vez más independiente del valor concreto del caudal vertido porque termina siendo una parte insignificante del caudal de la mezcla. Este hecho se aprovecha para buscar soluciones asintóticas de las expresiones obtenidas por análisis dimensional, de forma que en las expresiones para el cálculo de las diluciones, cuando éstas son elevadas, aunque pueda parecer paradójico, el caudal de vertido no entra como variable.

Influencia del flujo de energía cinética

En un vertido, además del flujo de volumen (y de masa), que viene representado por el caudal, existen flujos de otras magnitudes. Uno de ellos es el flujo de energía cinética, que es proporcional al producto del caudal por el cuadrado de la velocidad. Una parte de esta energía se termina perdiendo debido a la acción de las fuerzas viscosas, pero otra parte se emplea en provocar el mezclado por medio de la producción de vórtices turbulentos. Esto es especialmente importante en flujos en los que, como sucede con los vertidos de salmueras, existe una diferencia de densidad entre el efluente y el medio receptor. Por ejemplo, si el vertido se produce en el fondo (energía potencial nula), sin turbulencia el efluente se esparciría por el fondo sin mezclarse, lo que supone una situación de energía potencial mínima. Con turbulencia se produce un mezclado vertical más o menos importante, con lo que el centro de gravedad está más elevado, lo que significa que esta situación tiene una energía potencial mayor. Esta diferencia de energía potencial la aporta el flujo de energía cinética del efluente.

Influencia del flujo de cantidad de movimiento

Cada elemento de volumen que se vierte posee una cantidad de movimiento, magnitud vectorial que se obtiene multiplicando la masa por el vector velocidad. Como se trata de un caudal continuo, el vertido está produciendo también un flujo continuo de cantidad de movimiento, que es proporcional al producto del caudal por el vector velocidad. Pero una tasa de variación temporal de cantidad de movimiento equivale a la aplicación de una fuerza, y en efecto, la influencia del flujo de cantidad de movimiento puede verse como la de una fuerza permanente actuando en la boca de descarga en la dirección de la velocidad de salida. La acción de esta fuerza durante un incremento de tiempo es lo que en Mecánica se llama un



impulso, cuyo efecto consiste en comunicar una cantidad de movimiento al elemento de volumen evacuado en dicho incremento de tiempo. Si este elemento de volumen no experimenta ninguna fuerza posterior, su cantidad de movimiento permanece constante. Esto es lo que ocurre cuando la densidad del efluente es igual a la del medio receptor siempre que consideremos que cualquier parte del medio receptor puesta en movimiento por dicho elemento de volumen pasa a formar parte del sistema. De esta forma, el volumen del elemento va aumentando pero su cantidad de movimiento se mantiene constante, lo que significa que su velocidad media va disminuyendo.

Influencia de la diferencia de densidad

Si como suele suceder con los vertidos de las desaladoras, la densidad del efluente es mayor que la del medio receptor, el efluente presentará una tendencia a dirigirse en el sentido de la aceleración de la gravedad. En el caso de chorros sumergidos, la base para un tratamiento matemático de este fenómeno se obtiene considerando que el producto de la diferencia de densidad por el caudal y por el vector aceleración de la gravedad es una magnitud vectorial que representa el flujo de peso sumergido. Su unidad en el Sistema Internacional es el newton por segundo (N / s). Por lo tanto, el elemento de volumen vertido en un intervalo de tiempo va acompañado de una fuerza (su peso sumergido) que se mantiene constante si la densidad del medio receptor es homogénea y siempre que, como antes, consideremos que cualquier parte del medio receptor puesta en movimiento por dicho elemento de volumen pasa a formar parte del sistema. Esta fuerza va produciendo una aceleración (es decir, un cambio en su cantidad de movimiento) que, conforme va aumentando el volumen del elemento, se va haciendo menor.

A este respecto conviene hacer dos comentarios. El primero es que tanto la cantidad de movimiento inicial como la fuerza que lleva consigo el elemento de volumen son magnitudes vectoriales cuya dirección relativa puede ser muy variada (flujos verticales, horizontales o inclinados con componente vertical ascendente o descendente; flotabilidad positiva o negativa). El segundo, que mientras el flujo de cantidad de movimiento representa la aplicación de una fuerza permanente, el flujo de peso sumergido representa un aporte continuo de fuerza, por lo que tendrá un efecto global sobre el comportamiento del vertido que va creciendo con el tiempo, y como consecuencia, terminará haciéndose mucho más importante. En particular, las diluciones que pueden conseguirse para tiempos largos en este caso (vertido en un medio de densidad diferente) son mucho mayores que las que se pueden conseguir con un vertido en un medio de la misma densidad.

Sin embargo, en el campo lejano, cuando la mezcla se encuentra ya en el fondo, la diferencia de densidad se convierte en un obstáculo para que continúe la dilución ya que ante cualquier eventual intercambio de masas de agua que se iniciara entre las capas superior (agua de mar) e inferior (mezcla hiperdensa), el gradiente de densidad reaccionaría tratando de restablecer la situación anterior.

A veces, cuando la capa de interfaz en el campo lejano está muy diluida y el medio receptor está estratificado por temperatura (agua más fría en el fondo que en la superficie), aquella



puede separarse del fondo y caminar entre dos aguas por ser su densidad intermedia entre la del fondo y la de la superficie.

En el caso de vertido a una playa, ya sea de forma directa o a través del tramo final de un curso de agua, al principio el efluente empuja y sustituye completamente al agua del medio receptor en todo su espesor. Sin embargo, cuando esta masa homogénea de efluente alcanza una cierta profundidad, se sumerge debido a su mayor densidad dando lugar a una corriente de densidad que avanza por el fondo.

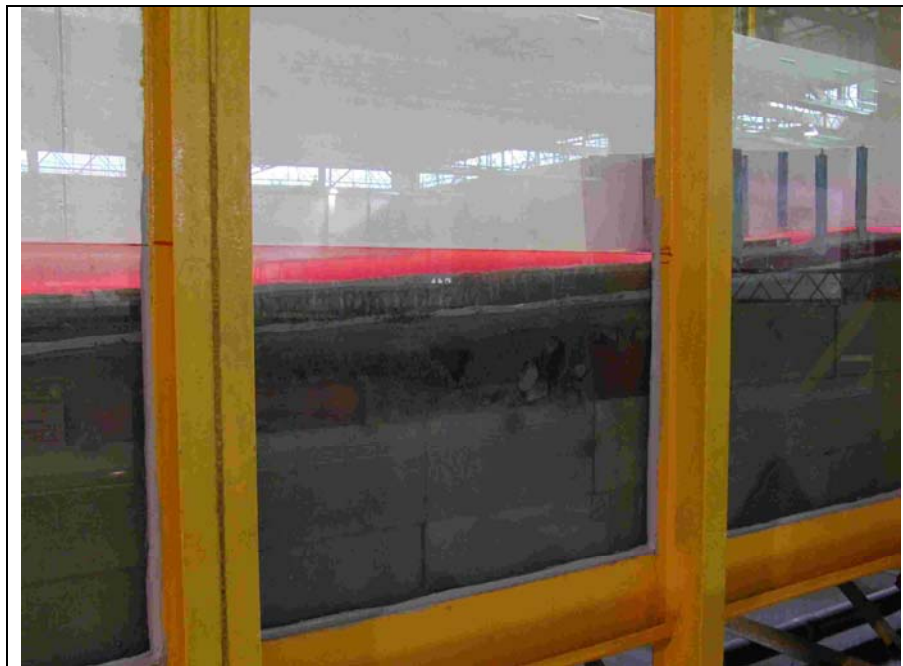


Figura 7: Sumergencia del efluente en un vertido a una playa.

Influencia del fondo

La influencia del fondo tiene un carácter muy diferente según se trata del campo cercano o del campo lejano, y dentro del primer caso, según cual sea el sistema de vertido.

Cuando se trata de un chorro sumergido de densidad superior a la del medio receptor, cualquiera que sea el ángulo inicial que forme con la vertical, su trayectoria siempre termina con un tramo descendente que impacta con el fondo. Al producirse el impacto, la componente normal al fondo de la cantidad de movimiento se anula debido a la fuerza de reacción de éste, pero si en ese momento posee alguna componente tangencial, ésta se mantiene en su conjunto. Por otra parte, la energía cinética de cada porción de la mezcla debe mantenerse de forma aproximada. Cada tubo de corriente de los que podemos suponer que constituyen el chorro, al impactar con el fondo, se esparce en forma de hilos de corriente paralelos a éste en todas las direcciones con velocidad parecida a la que traía, pero con cierta anisotropía para que se cumpla la condición de que se conserve la componente tangencial de la cantidad de

movimiento. El comportamiento del chorro en su conjunto es la superposición del de todos los tubos de corriente, por lo que se superponen velocidades muy diferentes que a su vez, interfieren entre sí, produciendo una acusada turbulencia que se traduce en un incremento localizado de dilución. El resultado es que de la elipse de intersección del chorro descendente con el fondo surge hacia los lados en todas direcciones un flujo supercrítico paralelo y pegado al fondo, de una velocidad media que está determinada sobre todo por la que tenía el chorro al impactar y que suele ser mayor que la velocidad en régimen uniforme que corresponde a la pendiente del fondo, incluso en el caso de que ésta sea supercrítica. Por esta razón casi siempre aparece un resalto hidráulico de la capa hiperdensa donde la mezcla adquiere una dilución adicional.



Conviene hacer aquí una advertencia importante. Si la pendiente es escasa y las corrientes del medio receptor son débiles, el espesor de la capa hiperdensa puede crecer tanto que inunde el punto de descarga y ocupe una parte significativa del chorro. Si esto ocurre, el agua que lo alimenta en ese tramo es ya agua hipersalina y la dilución conseguida, aunque seguirá siendo prácticamente la misma, se traducirá en una menor reducción del exceso de salinidad.

Si el chorro sumergido se inicia con un ángulo muy pequeño respecto al fondo, la presencia de éste hace que se produzca un efecto de succión que atrae el chorro hacia el fondo. Este no es un efecto debido a la diferencia de densidad, ya que ocurriría lo mismo con una pared vertical.

Cuando se trata de un vertido por rebose sobre un acantilado a cierta altura sobre el nivel del mar, el efluente alcanza el medio receptor con dirección prácticamente vertical y sentido descendente, y continúa descendiendo hasta impactar con el fondo. A partir de aquí, el comportamiento es similar al descrito para un chorro sumergido pero con la particularidad de que ahora sólo se propaga en un semiespacio.



CEDEX



Figura 9: Ensayo en canal (2D) de un vertido por rebose sobre un acantilado

Cuando se trata de un vertido en una playa ya hemos dicho que se forma una primera zona ocupada por el efluente en toda la profundidad y a partir de un cierto calado, se produce el hundimiento para dar lugar a una corriente de fondo.

En el campo lejano, la flotabilidad negativa hace que la mezcla tienda a esparcirse horizontalmente por el fondo, lo que hará mientras no encuentre obstáculos que la retengan. Además, si el fondo tiene pendiente, esta misma flotabilidad negativa hará que poco a poco se vaya conformando una corriente descendente en el sentido de la máxima pendiente, cuya velocidad, aunque escasa, será suficiente para evacuar del punto de impacto con el fondo las aguas mezcladas y para forzar cierta inestabilidad en la interfaz entre la corriente hiperdensa y la capa superior que ayude a que el intercambio sea algo mayor. Si el fondo es irregular y el tamaño de las ondulaciones es del mismo orden de magnitud que el espesor de la corriente de densidad, esta avanza siguiendo una trayectoria serpenteante, probablemente con ramificaciones que se separan y se vuelven a unir, llenando zonas bajas hasta que son desbordadas por su contorno más bajo y con un esparcimiento lateral limitado debido al confinamiento que suponen dichas ondulaciones. Como consecuencia, el flujo en el campo lejano está muy determinado por la microbatimetría de la zona.

Influencia de la superficie libre

Si el efluente tiene flotabilidad positiva, la mezcla tiene tendencia a desplazarse en sentido opuesto al de la gravedad y entonces, la superficie libre juega el papel que juega el fondo para los vertidos hiperdensos, con la salvedad de que su pendiente es despreciable. Si está ondulada debido al oleaje, estas ondulaciones no son rígidas como ocurre en el fondo, y la propia mezcla que se encuentra en la superficie es la que forma las ondulaciones.

En el caso de vertidos hiperdensos mediante chorros sumergidos con trayectoria inicial ascendente, si poseen suficiente cantidad de movimiento pueden impactar con la superficie. En esta situación, que debería evitarse por el efecto antiestético que produce⁵, el chorro se rompe con el impacto y se esparce lateralmente, pero se reconfigura de nuevo e inicia una trayectoria

⁵ Aunque el efluente de una desaladora suele ser transparente e incoloro, no resulta estético ver desde fuera como surge agua de un vertido en la superficie. Si se tratara de una surgencia natural, la apreciación sería distinta.

descendente. La deformación del chorro con el impacto puede ser leve o severa según que el contacto sea tangencial o franco.

El efecto sobre la dilución solo puede estudiarse experimentalmente, pero es lógico suponer que se obtendrá una dilución intermedia entre la que se obtendría con un chorro de las mismas características en un medio con la superficie libre más elevada y la de un chorro con menor cantidad de movimiento cuyo contorno fuera tangente a la superficie libre en su posición real.



Figura 10: Influencia en el comportamiento del chorro del impacto con la superficie en su trayectoria ascendente.

Influencia de los contornos laterales

La presencia de un contorno lateral tiene dos efectos: impide que la mezcla lo atraviese, por lo que provoca su encauzamiento, y también impide que venga agua del medio receptor para diluir por el lado ocupado por el contorno.

Si el contorno es un plano (por ejemplo, una pared vertical), estas condiciones de flujo normal nulo se consiguen también si se elimina el contorno y se añade al sistema otro vertido de las mismas características pero con una geometría simétrica de la del vertido existente respecto al plano de contorno. Este hecho se explota con frecuencia para obtener soluciones analíticas de problemas con geometrías sencillas y para diseñar ensayos en modelos físicos a escala reducida: si el dispositivo de vertido a ensayar tiene un plano de simetría, se construye solo la mitad y se adosa a un plano situado en la posición correspondiente al plano de simetría.



Figura 11: Vertido en una playa mediante un canal de descarga. Se aprovecha la existencia de un plano de simetría del problema haciéndolo coincidir con un contorno plano del modelo

Influencia de las corrientes

En el campo cercano de un chorro sumergido, si las corrientes son débiles su efecto se reduce a desviar un poco la trayectoria, pero no influyen mucho en las diluciones conseguidas. Sin embargo, por encima de un cierto valor, la corriente, al rodear el chorro, provoca un patrón de circulación transversal que hace desaparecer la simetría axial de las variables y la autosemejanza de perfiles en el interior del chorro y que termina desviando completamente la dirección de avance del chorro hasta hacerla coincidir con la de la corriente. Entonces su efecto sobre la dilución alcanzada a lo largo de la trayectoria se hace notar y puede llegar a ser muy importante.

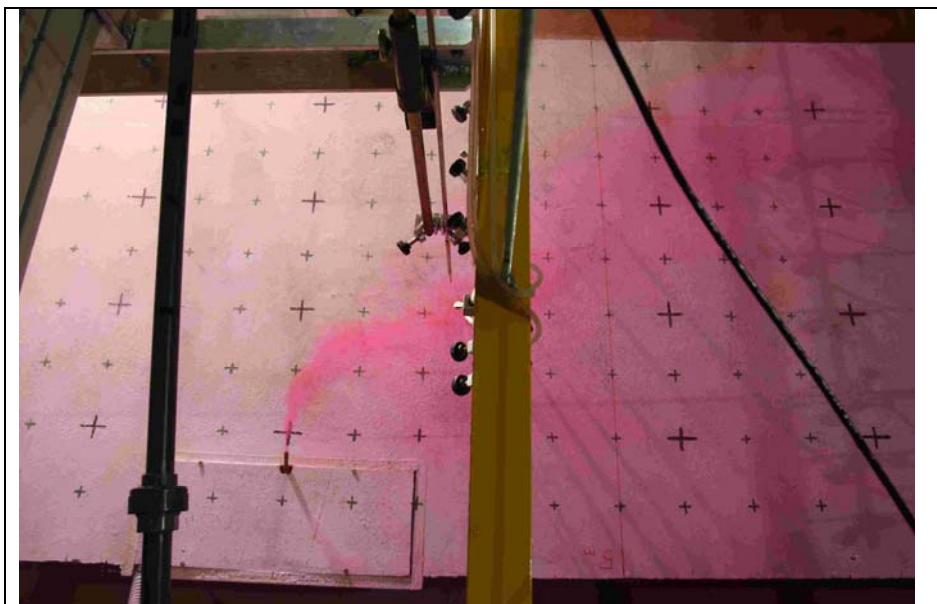


Figura 12: Vertido de un chorro que forma inicialmente un ángulo de

30° con el plano horizontal, sometido a una corriente transversal.

Otro efecto de las corrientes consiste en que disminuye el espesor de la capa hiperdensa que se forma en las proximidades del punto de impacto debido a que mejora la capacidad de evacuación. Para evacuar un caudal determinado, si la velocidad es mayor, la sección será menor. En el campo cercano de un vertido por rebose sobre un acantilado éste es el principal efecto de las corrientes existentes en el medio receptor.

En una playa sin oleaje la corriente es casi siempre despreciable porque la fuerza de rozamiento con el fondo se distribuye en una columna de agua de muy pequeño espesor.

El efecto más importante de las corrientes se produce en el campo lejano. Aquí, como la velocidad de avance de la corriente hiperdensa es muy pequeña, hasta las corrientes más pequeñas del medio receptor consiguen desviar la trayectoria. Además, como cerca del fondo la corriente suele estar muy estratificada (perfil logarítmico), se va a producir una rotura de la estructura vertical de la corriente hiperdensa en dirección transversal, lo que contribuirá a aumentar drásticamente la dilución en esta zona.

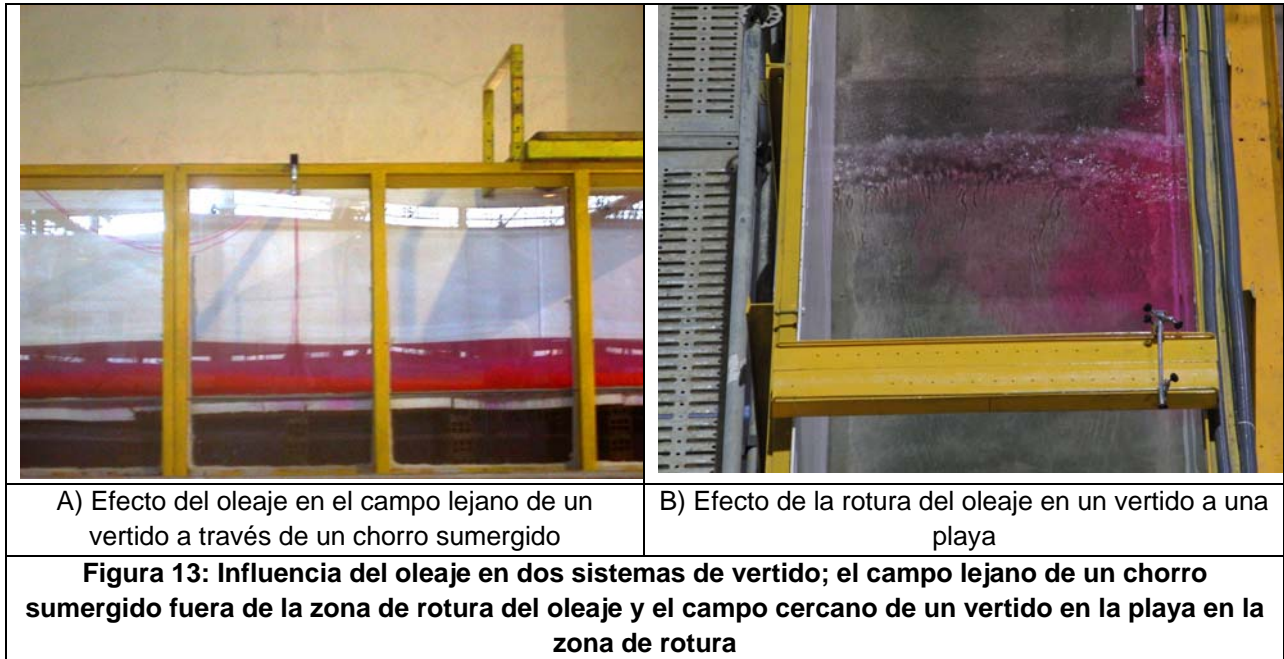
Influencia del oleaje

La influencia de oleaje es muy diferente según que esté rompiendo o que no lo esté.

Si el oleaje no rompe, su influencia se reduce a un movimiento periódico de las partículas de agua, que describen trayectorias curvas casi cerradas de tamaño decreciente conforme nos vamos retirando de la superficie y acercándonos al fondo. Para oleajes no muy grandes, dichas trayectorias son elipses de ejes horizontal y vertical. En aguas profundas las elipses se reducen a circunferencias cuyo diámetro en superficie es igual a la altura de ola y va decreciendo exponencialmente con la profundidad, más rápidamente cuanto menor es el período. En aguas someras, el semieje vertical en superficie es igual a la semialtura de ola y va decreciendo linealmente con la profundidad hasta anularse en el fondo. El semieje horizontal es constante en toda la profundidad y aproximadamente igual al producto de la semialtura de ola por la sexta parte del cociente entre la longitud de onda y la profundidad. Como el gradiente de velocidad es muy pequeño en este movimiento periódico, no crea turbulencia y su efecto dispersivo es despreciable, excepto muy cerca del fondo cuando éste es irregular (Fig. 6A).

Por el contrario, si el oleaje rompe, su efecto dispersivo es muy intenso y se extiende a toda la masa de agua implicada en la rotura (Fig.6B). Cuando la rotura es por peralte, lo que suele ocurrir en presencia de fuertes vientos en cualquier parte del mar, la masa de agua implicada se reduce a una capa superficial de un espesor aproximadamente igual a la altura de ola. Cuando la rotura es por la cercanía del fondo, lo que suele suceder cuando la altura de ola es aproximadamente igual a las tres cuartas partes de la profundidad (con viento o sin él), la masa de agua implicada se extiende a toda la columna de agua en dirección vertical, y a toda la franja que va desde la línea de rotura hasta la línea de costa en dirección horizontal. Además, si el oleaje alcanza la costa con una cierta oblicuidad, al romper genera una corriente de oleaje paralela a la costa, pulsante con cada ola y que afecta solamente a la franja entre línea de

rotura y línea de costa. Es completamente independiente de la corriente general que pueda existir en el medio receptor y de una intensidad mayor que ésta, al menos en la zona de rotura. Como conclusión puede decirse que en vertidos mediante chorros sumergidos situados mar adentro de la línea de rotura, la influencia del oleaje sobre la dilución es muy pequeña, especialmente si la altura de ola no es muy grande. En cambio, si el vertido se produce en la línea de costa, el efecto del oleaje es importante.



Influencia de la presencia de otros chorros

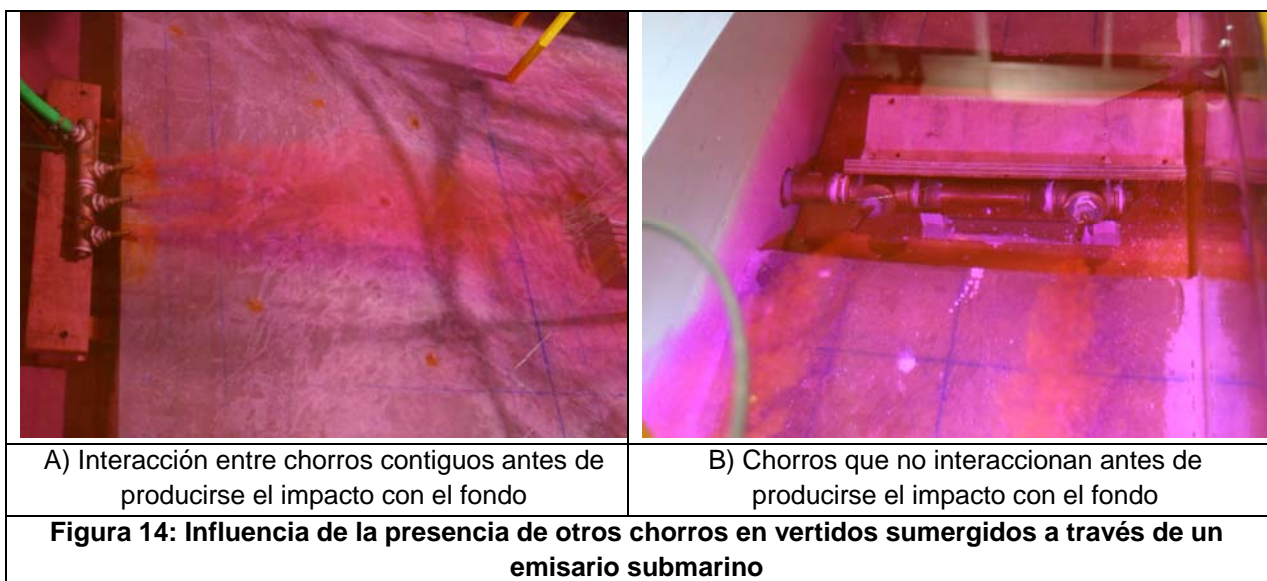
El caudal de agua de mar que se incorpora a un chorro sumergido (“entrainment”) aumenta con el área de la superficie de contacto entre ambos en la zona turbulenta; por otra parte, la velocidad con la que se produce el incremento de dilución es igual al cociente entre dicho caudal y el volumen de la mezcla. Por lo tanto, menores diámetros y mayores longitudes de trayectorias permiten obtener mayores diluciones en el campo cercano. Por esta razón conviene repartir el caudal efluente en varios chorros más delgados y de hecho, numerosos resultados experimentales demuestran que el vertido a través de un emisario submarino que termine con un tramo difusor a una profundidad adecuada en la que se han instalado varias bocas de descarga con diámetros pequeños que producen chorros ascendentes de velocidad considerable es el sistema de vertido más eficaz en el sentido de conseguir la máxima dilución en el mínimo espacio.

Pero la presencia de otros chorros produce interferencias que hacen que la reducción de salinidad obtenida sea inferior a la que se podría obtener si estuviera funcionando sólo uno de los chorros con el mismo caudal que antes le correspondía a cada uno.

Si los chorros están muy próximos, la interferencia se produce a lo largo de la trayectoria. Si se juntan dos chorros, el agua que alimenta a cada uno proviene en parte del otro chorro, lo que complica el cálculo de la reducción de salinidad obtenida con la dilución, pero en cualquier caso ésta será menor que la que obtendría cada chorro por separado. Además, si dos chorros están

próximos, el agua que se encuentre entre los dos debe alimentar a ambos, con lo que su velocidad aumenta. Como consecuencia, disminuye la presión y los chorros experimentan una fuerza de atracción entre ellos que hace que se junten, dando lugar al problema anterior.

Existe otro tipo de interferencia que se produce incluso si los chorros se colocan a suficiente distancia como para impedir que ocurra lo del párrafo anterior. Como ya se ha explicado, al impactar los chorros en el fondo se esparcen en todas direcciones con bastante velocidad, lo que aumenta la dilución. Pero si hay chorros próximos que también impactan con el fondo, las corrientes horizontales pegadas al fondo, que afectan a una extensión bastante mayor que el diámetro de los chorros, también pueden interferirse, con lo que de nuevo, la reducción de salinidad será menor que la que se conseguiría con un solo chorro.



Si el vertido se produce mediante un tramo difusor con chorros dirigidos hacia mar adentro en presencia de corrientes paralelas a la costa, las corrientes harán que se superpongan todos los chorros, lo que se traducirá en una menor reducción de las salinidades.

Por último, la capacidad de evacuación de la capa de fondo que se forma tras el impacto viene determinada por la pendiente y la corriente del medio receptor y es la misma haya uno o varios chorros, por lo que el espesor de la capa hiperdensa se va haciendo mayor conforme aumenta el número de chorros.

Combinación de efectos

Todos los efectos anteriores pueden actuar aisladamente o de forma combinada. El número de combinaciones que puede darse en los casos particulares de vertido es extraordinariamente elevado. Ello resulta más evidente cuando se combinan efectos de naturaleza vectorial como la velocidad inicial de salida de los chorros, el gradiente de densidad, la corriente del medio receptor, la alineación de las bocas de descarga o la pendiente. Como ejemplo y sin necesidad de hacer cálculos, es fácil imaginar la diferencia que supone para la interferencia de chorros el



que exista o no exista corriente, y en el primer caso, entre que la corriente lleve la misma dirección que la alineación de bocas de descarga o que sea perpendicular a ella.

Una complejidad adicional consiste en que las condiciones del medio receptor suelen variar con el tiempo. Si el período característico de duración de una situación es largo respecto al tiempo que tardaría un efluente en alcanzar una zona protegida (digamos superior a un par de horas), se puede estudiar como si se tratara de un régimen permanente, lo que simplifica el tratamiento del problema. Aún así, para analizar la idoneidad de un dispositivo de vertido concreto se necesita estudiar un gran número de situaciones en régimen permanente, asignando a cada una de ellas una probabilidad de ocurrencia.

Otra causa de diversidad de situaciones reside en la gran variedad de microbatimetrías de fondo (que como hemos visto tienen un papel determinante en el campo lejano) que podemos encontrar en la práctica.

Todo ello hace muy difícil la tarea de estimar los excesos de salinidad que se van a producir como consecuencia de un vertido, especialmente si se desean calcular distribuciones de probabilidad para poder aplicar criterios estadísticos de control.

2.4 Dilución necesaria

La dilución S se define normalmente como el cociente entre la masa total M de una muestra y la masa M_e de efluente contenido en esa muestra. Su inverso es por tanto la fracción másica o concentración relativa del efluente en la muestra, y suele designarse con el símbolo p . Por lo tanto, si una muestra es efluente puro se tiene $p = 1$ y $S = 1$; si la muestra es agua del medio receptor se tiene $p = 0$ y $S = \infty$. Entre estos dos extremos la muestra tiene p partes de efluente y $(1 - p)$ partes de agua ambiental.

A veces se llama dilución D al cociente entre la masa de agua ambiental y la masa de efluente:

$D = \frac{1-p}{p}$. Es fácil comprobar que $D = S - 1$, con lo que $p = \frac{1}{S} = \frac{1}{D+1}$. Para diluciones

grandes (por ejemplo, las de las aguas residuales urbanas) la diferencia relativa entre ambas definiciones no es importante (por ejemplo, entre 99 y 100), pero para diluciones pequeñas como las que se manejan en los vertidos de las desaladoras, sí lo son (por ejemplo, entre 4 y 5). A este respecto conviene hacer notar que en el caso de las desaladoras que hacen una predilución del efluente con agua de mar antes de verter la mezcla al mar, se ha hecho costumbre utilizar la dilución D . Para evitar la ambigüedad se recomienda que en estos casos se exprese en la forma $D : 1$, seguido de “(D partes de agua de mar por cada parte de efluente)”.

En general es preferible el uso de la dilución S , ya que si el efluente tiene una concentración c_e de un contaminante que no existe en el medio receptor, la concentración de una muestra con una dilución S es

$$c_m = \frac{c_e \cdot M_e}{S \cdot M_e} = \frac{c_e}{S}$$

Recíprocamente, S puede calcularse directamente dividiendo la concentración en el efluente por la concentración en la muestra.

Si se trata de una sustancia que está también presente en el agua ambiental, como por ejemplo, la sal, la concentración de la muestra será (utilizamos notación de salinidad):

$$s_m = \frac{s_e \cdot M_e + s_a \cdot (S - 1) \cdot M_e}{S \cdot M_e} = \frac{s_e + s_a \cdot (S - 1)}{S}$$

que puede ponerse como

$$s_m - s_a = \frac{s_e - s_a}{S}$$

expresión análoga a la anterior si se considera como contaminante el exceso de salinidad sobre la del medio receptor.

Utilizando esta última expresión y recordando del apartado 2.1 que el exceso de salinidad del efluente puede calcularse a partir del índice de conversión de la planta mediante la expresión

$$s_e - s_a = s_a \frac{R}{1 - R}$$

se pueden calcular las diluciones necesarias para cumplir las diferentes normas de calidad para el exceso de salinidad.

Las normas de calidad vienen expresadas como un valor s_{lim} máximo de la salinidad o como

un incremento relativo máximo $r_{lim} = \frac{(s_m - s_a)_{lim}}{s_a}$.

En el primer caso, la dilución necesaria se puede calcular mediante:

$$S_{min} = \frac{s_e - s_a}{s_{lim} - s_a} = \frac{s_a}{s_{lim} - s_a} \cdot \frac{R}{1 - R}$$

y en el segundo mediante:

$$S_{min} = \frac{1}{r_{lim}} \cdot \frac{R}{1 - R}$$

Así, por ejemplo, para una desaladora con $R = 0,45$, la dilución necesaria para cumplir el requerimiento impuesto por algunas normas autonómicas de que el máximo incremento sea de un 10% ($r_{min} = 0,1$) será de



$$S_{\min} = \frac{1}{0,1} \cdot \frac{0,45}{1-0,45} = 8,2$$

Si la desaladora está en el Mediterráneo ($s_a = 37,5 \text{ psu}$) y existen praderas de *P. oceanica* cerca ($s_{25,\text{lim}} = 38,5$), la dilución que debe superarse al menos el 75% del tiempo es

$$S_{25,\min} = \frac{37,5}{38,5 - 37,5} \cdot \frac{0,45}{1 - 0,45} = 30,7$$

y si la pradera es de *C. nodosa* ($s_{25,\text{lim}} = 39,5$):

$$S_{25,\min} = \frac{37,5}{39,5 - 37,5} \cdot \frac{0,45}{1 - 0,45} = 15,4$$

Conviene destacar el hecho de que si la norma de calidad viene expresada como un incremento relativo máximo de salinidad, la dilución necesaria puede calcularse conociendo exclusivamente el índice de conversión de la planta, no siendo necesario por lo tanto determinar la salinidad del medio receptor. Por el contrario, si viene expresada como una salinidad absoluta máxima, esta determinación es imprescindible, y la dilución necesaria, incluso para un valor fijo del índice de conversión, depende fuertemente del valor obtenido, más cuanto más se acerca la salinidad del medio receptor a la salinidad límite como puede verse en la tabla siguiente.

DILUCIÓN NECESARIA PARA UN VERTIDO CON UN ÍNDICE DE CONVERSIÓN DEL 45%				
$s_{\text{lim}} \text{ (psu)}$	$s_a \text{ (psu)}$			
	36.5	37.0	37.5	38.0
38.0	19.9	30.3	61.4	Infinita
38.5	14.9	20.2	30.7	62.2
39.0	11.9	15.1	20.5	31.1
39.5	10.0	12.1	15.3	20.7
40.0	8.5	10.1	12.3	15.5
40.5	7.5	8.6	10.2	12.4

La salinidad del medio receptor presenta variaciones naturales (espaciales y temporales) del orden de algunas décimas de psu, lo cual plantea dos dificultades:

- Para el proyecto, porque requiere realizar mediciones en varios puntos de la zona potencialmente afectable y a lo largo de bastante tiempo (un año o más) con el fin de proyectar el vertido de forma que se tenga capacidad de dilución suficiente para el caso más desfavorable.
- Para la explotación, porque, aun disponiendo de la capacidad suficiente, conseguir mayores diluciones tiene un coste adicional⁶, por lo que se intentará realizar el vertido de forma que se obtenga la dilución estrictamente necesaria en cada momento. Esto requiere medir continuamente la salinidad del medio sin afectar para poder ajustar la

⁶ Por ejemplo, mayor energía de bombeo o trabajos submarinos para cerrar bocas de descarga.

explotación (índice de conversión global) al exceso de salinidad admisible en cada momento.

Por otra parte, los errores en la determinación de la salinidad con equipos corrientes y metodologías simples son también de algunas décimas de psu, por lo que la determinación del valor de la salinidad s_a del medio receptor en cada caso concreto presenta bastante incertidumbre. Si el criterio de calidad aplicable limita el valor absoluto de la salinidad (aunque sea en términos probabilísticos), esta incertidumbre se traslada de forma muy amplificada (véase el cuadro anterior) a la determinación de la dilución necesaria, cosa que no ocurre si el criterio de calidad limita el incremento relativo de salinidad.

Así, por ejemplo, si $s_{lim} = 38,5$ psu (valor establecida actualmente como límite del percentil del 25% para las praderas de *P. oceánica*) y $s_a = 35,5$ psu (valor típico en la costa mediterránea levantina), la dilución necesaria es de 30,7. Si por los errores de medida durante la caracterización del medio receptor el equipo redactor del proyecto concluye que $s_a = 37,0$ psu, se proyectaría el dispositivo de vertido para alcanzar una dilución de tan sólo 20,2. Si por el contrario se hubiera obtenido $s_a = 38,0$ psu, el proyecto se haría para una dilución de 62,2.

A la vista de esto, no parece conveniente que una variabilidad tan grande de una magnitud de diseño y control de operación tan importante como la dilución dependa tanto de una determinación suficientemente precisa de la salinidad del medio llevada a cabo por el promotor. Es mejor que, o bien se establezcan límites expresados como incrementos relativos máximos de salinidad, que conducen a diluciones objetivo que dependen solo del índice de conversión (que se calcula a partir de variables más fáciles de medir y registrar como son los caudales de toma y de agua producto), o bien se establezcan por las Autoridades Ambientales salinidades nominales del medio receptor para los diferentes frentes costeros, determinadas éstas por especialistas en la medición precisa y frecuente de dicha variable.

3. EL SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL MEDIO MARINO FRENTE A LOS VERTIDOS DE LAS PLANTAS DESALADORAS EN ESPAÑA

Durante la última década se han venido proyectando muchas desaladoras de agua de mar de gran tamaño cuya trascendencia económica, social e incluso política ha hecho que su desarrollo se esté produciendo con una gran celeridad. Desde un punto de vista ambiental, uno de los dos principales problemas que presentan a priori las desaladoras⁷ es el posible impacto ambiental del vertido de las aguas hipersalinas, por lo que resulta imprescindible aplicarles un sistema de control que asegure la protección del medio marino. Sin embargo, actualmente no existe ninguna norma estatal ni autonómica que regule específicamente el vertido de las plantas desaladoras. Esta situación ha hecho que las distintas Autoridades ambientales hayan ido estudiando caso por caso los proyectos sobre los que tenían que pronunciarse y que hayan

⁷ El otro es el consumo de energía.



ido tomando decisiones aplicando criterios que no siempre han resultado consistentes y armónicos entre ellas.

En el presente informe se va a explicar el modelo de sistema de protección del medio marino frente a los vertidos de las plantas desaladoras que se ha ido configurando a nivel estatal durante las últimas décadas, inspirado en parte por las opiniones que el CEDEX ha expresado en los numerosos Informes Técnicos que ha emitido para la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental relativos a los contenidos de las DIAs de las desaladoras que han sido sometidas al procedimiento reglado de Evaluación de Impacto Ambiental durante este período.

Dado el escaso conocimiento que sobre el comportamiento del efluente vertido y sobre su impacto ambiental se tenía en el año 2000 cuando empezó a plantearse la construcción de grandes desaladoras en la costa mediterránea (por ejemplo, las del programa AGUA) y la urgencia de disponer de criterios de calidad para evaluar ambientalmente estos proyectos sin retrasar excesivamente su construcción y puesta en operación, el modelo de sistema de protección se ha basado en los siguientes principios:

- El establecimiento provisional de un margen de seguridad global amplio como consecuencia de las incertidumbres existentes en aquel momento, lo que se ha traducido en:
 - La existencia de varias líneas o barreras de seguridad, de forma que si falla una, existan otras que permitan evitar los efectos negativos del vertido.
 - La inclusión de un margen de seguridad en cada una de estas barreras para tener en cuenta las incertidumbres sobre los datos y las herramientas de diseño.
- El propósito de ir adecuando los márgenes de seguridad al grado de conocimiento del problema que se tenga en cada momento, permitiendo la reducción de los requerimientos conforme éste vaya mejorando para mantener el margen de seguridad global dentro de límites razonables a fin de evitar sobrecostes injustificados en el proyecto, la construcción o la explotación.

Se han establecido las siguientes cuatro barreras de seguridad:

- a) Establecimiento de límites de emisión y de normas de calidad apropiados para vertidos de desaladoras
- b) Empleo de herramientas para el diseño ambiental del dispositivo de vertido (modelos matemáticos o modelos físicos a escala reducida) que, simulando el comportamiento del vertido, permitan predecir los incrementos de salinidad y, en su caso, las concentraciones de otros contaminantes, y comprobar que se cumplen las normas de calidad.



- c) Ejecución de un programa de vigilancia ambiental apropiado para vertidos de desaladoras y, más específicamente, para el sistema de vertido elegido para la desaladora en cuestión
- d) Disponibilidad de una reserva de dilución para corregir un eventual incumplimiento de los límites establecidos detectado por el programa de vigilancia y existencia de un protocolo de actuación que establezca cuándo y cómo debe hacerse uso de dicha reserva.

Las cuatro barreras mencionadas pueden considerarse medidas preventivas. La ejecución del protocolo de actuación es una medida correctora.

En los siguientes apartados se analizan con detalle cada una de estas barreras de seguridad y los márgenes de seguridad establecidos para cada una de ellas.

Respecto al párrafo b) anterior conviene señalar aquí que el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, desde el año 2000 y con financiación de diversas fuentes⁸, ha realizado un gran número de ensayos de simulación de vertidos de salmueras en modelos físicos a escala reducida orientados a proporcionar una formulación basada en el Análisis Dimensional que mejore las existentes hasta este momento para la predicción de las diluciones alcanzables con diferentes dispositivos de vertido. En los próximos meses verá la luz un informe del CEDEX con los resultados de los ensayos realizados hasta ahora y las expresiones para la predicción de las diluciones que se han obtenido en base a ellos.

3.1 Establecimiento de límites de emisión y de normas de calidad

Para el establecimiento de límites de emisión y de normas de calidad se dispone de cuatro instrumentos: la normativa aplicable, la Declaración de Impacto Ambiental (DIA), la Autorización de Vertido (AV) y la realización de estudios para determinar umbrales de tolerancia.

La normativa aplicable ha sido analizada en detalle en otro informe del CEDEX⁹. Las principales conclusiones son:

- No existe ninguna normativa que regule específicamente los vertidos de las desaladoras.
- No se han establecido límites de emisión para el contaminante más significativo de un vertido de este tipo, esto es, el exceso de salinidad respecto a la del agua de mar, y

⁸ Aguas de la Cuenca del Segura, Mancomunidad de los Canales del Taibilla, Dirección General del Agua, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y ACUAMED.

⁹ *Normativa aplicable a los vertidos al mar de las plantas desaladoras*. Informe Técnico del CEDEX para ACUAMED. Enero de 2011.



- El parámetro salinidad sólo se menciona como objetivo de calidad en una norma estatal (el Real Decreto 345/1993, que en su anejo IV establece como condiciones imperativas que la variación de salinidad provocada por un vertido en las aguas para cría de moluscos afectadas por dicho vertido no deberá ser superior a un 10 por 100 de la salinidad medida en las aguas no afectadas y que el valor máximo deberá ser inferior a 40‰ y como condición guía, que la salinidad máxima debe ser inferior a 38‰) y en tres normas autonómicas (en Andalucía, la Orden del 14 de febrero de 1997; en Cantabria, el Decreto 47/2009, de 4 de junio, y en Galicia, la Ley 8/2001, de 2 de agosto), que coinciden en establecer como máxima variación admisible un 10% del valor medido en aguas no afectadas por el vertido, aunque con ligeras diferencias en la forma de expresarlo.

La DIA es un instrumento de regulación de una gran utilidad y que presenta importantes ventajas. Una de ellas es su versatilidad, porque tanto la estructura de sus contenidos como los requerimientos impuestos pueden matizarse en función de las circunstancias de cada caso, que pueden ser tan particulares que raramente podrán ser tenidas en cuenta en una norma de carácter general. Otra ventaja consiste en que en aquellos aspectos que sean comunes a muchas desaladoras concretas (por ejemplo, el tipo de sistema de vertido o las biocenosis que pueden resultar afectadas), el mantenimiento de criterios coherentes en los requerimientos exigidos sirve para orientar a futuros promotores, por lo que adquieren el carácter de directrices supletorias de la falta de normativa específica.

Un ejemplo muy claro de esto lo tenemos en el establecimiento de objetivos de calidad para el parámetro salinidad en el caso de existencia de praderas de *Posidonia oceanica* o de *Cymodocea nodosa* en las proximidades de la zona de vertido. En efecto, las DIA que se han aprobado en los últimos años establecen de forma reiterada que no podrán sobrepasarse la concentración $s_{25, lim}$ en más de un 25% de las observaciones ni la concentración $s_{5, lim}$ en más de un 5% de las observaciones, donde $s_{25, lim}$ y $s_{5, lim}$ tienen los valores de la tabla siguiente:

Habitat	$s_{25, lim}$	$s_{5, lim}$
Praderas de <i>Posidonia oceanica</i>	38,5	40,0
Praderas de <i>Cymodocea nodosa</i>	39,5	41,0

La AV, al referirse exclusivamente al vertido, permite profundizar más en este aspecto, por lo que generalmente regulará un mayor número de contaminantes y especificará con mayor detalle las condiciones en las que puede realizarse el vertido y la forma en la que deben hacerse los muestreos.

El punto 1 del artículo 58 de la Ley 22/1988, de Costas, dice que entre las condiciones a incluir en las autorizaciones de vertido al Dominio Público Marítimo-Terrestre deberán figurar las relativas a:

- Volumen anual de vertido.



- Límites cualitativos del vertido y plazos si proceden, para la progresiva adecuación de las características del efluente a los límites impuestos.
- Evaluación de los efectos sobre el medio receptor, objetivos de calidad de las aguas en la zona receptiva y previsiones que, en caso necesario, se hayan de adoptar para reducir la contaminación.

Sin embargo, el artículo 251 del Decreto 849/1986 (Reglamento del Dominio Público Hidráulico), en la redacción dada por el Decreto 606/2003 dice que las autorizaciones de vertido al Dominio Público Hidráulico deben incluir entre otros extremos:

- El caudal y los valores límite de emisión del efluente, determinados con arreglo a las siguientes reglas generales:
 - 1º) Las características de emisión del vertido serán tales que resulten adecuadas para el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del medio receptor. Se podrá establecer una aplicación gradual de aquéllas hasta su completa consecución.
 - 2º) Se exigirán valores límite de emisión para los parámetros característicos de la actividad causante del vertido.
 - 3º) Los valores límite de emisión no podrán alcanzarse mediante técnicas de dilución¹⁰.

Es decir, para los vertidos al mar y a los estuarios, la autorización de vertido debe contener límites de emisión cualitativos y objetivos de calidad. Por lo tanto, es responsabilidad del titular del vertido que se cumplan los objetivos de calidad, por lo que un incumplimiento de estos podría ser motivo de sanción. Sin embargo, para los vertidos a ríos, lagos y embalses sólo se imponen límites de emisión, pero cuantitativos calculados de forma que se cumplan las normas de calidad del medio receptor. En este caso, si se detecta un incumplimiento de las normas de calidad es dudoso que se pueda sancionar al titular del vertido si éste está cumpliendo con los límites de emisión. Lo que procede entonces es modificar los términos de la autorización de vertido.

Esta diferencia de matiz tiene trascendencia también sobre quién debe correr con los gastos de las campañas de medidas para comprobar el cumplimiento de los objetivos de calidad (que suelen ser bastante elevados) y sobre quién tiene la responsabilidad de acertar en el juicio sobre la idoneidad de las herramientas de simulación utilizadas para pasar de las normas de calidad a los límites de emisión.

El cuarto instrumento para el establecimiento de límites de emisión y de normas de calidad es la realización de estudios para determinar umbrales de tolerancia de comunidades para los que

¹⁰ Este requerimiento, muy apropiado cuando se refiere al vertido de sustancias contaminantes muy persistentes (metales pesados, PCBs, PAHs, etc.), no debería aplicarse a los vertidos de las desaladoras puesto que en este caso lo que se vierte al mar se ha extraído de él y el único problema es que se devuelve con menos agua y por lo tanto, con concentraciones más elevadas, por lo que la dilución con agua de mar es una solución completamente admisible.



CEDEX

no existan todavía valores establecidos. Un ejemplo de esto es el estudio sobre las praderas de *Posidonia oceanica* que el CEDEX promovió y coordinó en el año 2000.

Actualmente se están realizando dos estudios con el mismo fin relativos a las praderas de *Cymodocea nodosa*, uno por la Universidad de Alicante por encargo de AcuaMed y otro por el Instituto Canario de Ciencias Marinas, como parte de un proyecto de investigación financiado por el Plan Nacional de I+D, proyecto en el que también participa el CEDEX, pero solo en temas de eficacia del dispositivo de vertido.

Como ya se ha dicho, uno de los principios del modelo de sistema de protección del medio marino contra los vertidos de las desaladoras que se está explicando, consiste en dotar de un margen de seguridad a cada una de las barreras para tener en cuenta las incertidumbres existentes en cada caso sobre los datos disponibles, sobre las técnicas de medida y sobre los procedimientos de cálculo, márgenes que se irán reduciendo conforme se vayan reduciendo las incertidumbres. En el caso de los límites de emisión y los objetivos de calidad, se está aplicando un triple margen de seguridad: el primero, al pasar de los resultados experimentales sobre los efectos del incremento de salinidad a la decisión sobre el valor límite; el segundo, al aplicar los valores límite establecidos para comunidades para las que se han hecho estudios a otras comunidades todavía por estudiar, pero para las que existen evidencias de que son menos sensibles o de menor significación ecológica, y el tercero al aplicar los valores límite que pueden superarse un 25% del tiempo a las situaciones pésimas, que tienen probabilidades de ser excedidas mucho menores.

Sobre el primero, hay que considerar que los resultados de un estudio científico sobre determinación del umbral de tolerancia vendrán expresados en términos de qué tipo y grado de afección se ha medido para diferentes incrementos de salinidad, incluyendo aquellos casos para los que no se ha detectado ningún efecto, con una estimación de sus incertidumbres. Un ejemplo de esto lo tenemos en la figura siguiente.

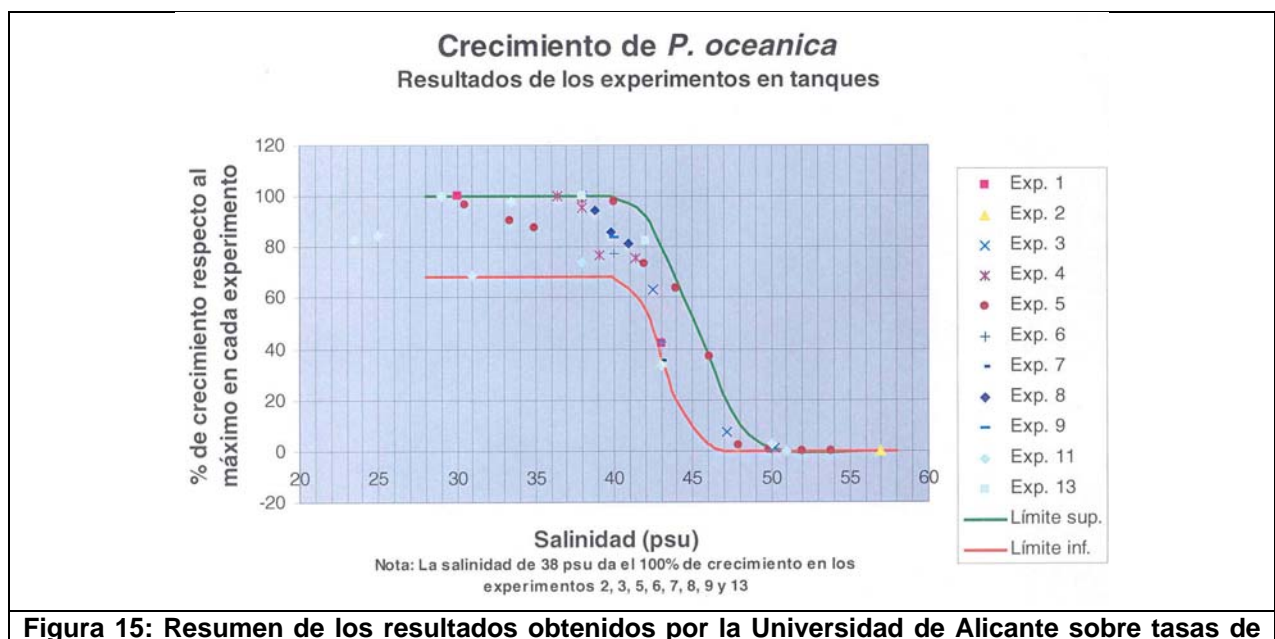


Figura 15: Resumen de los resultados obtenidos por la Universidad de Alicante sobre tasas de



crecimiento de haces de *P. oceanica* en acuarios de unos 300 litros para diferentes salinidades en el marco del estudio coordinado por el CEDEX en el año 2000

El establecimiento de un valor límite como norma de calidad debe tener en cuenta, naturalmente, estos resultados, pero, como ocurre en el caso de la figura anterior, estos por sí solos raramente determinan de una forma precisa el valor que debe adoptarse como límite (¿qué valor se deduciría de la figura?). La decisión final debe tener en cuenta también otros factores como la trascendencia económica e incluso social que puede tener un margen de seguridad excesivamente elevado. Corresponde a la Administración, tras conocer también la información aportada por el sector de la desalación y por la opinión pública, conjugar estos elementos a la hora de decidir sobre el grado de afección aceptable y, como consecuencia, sobre el valor límite a adoptar.

Sobre este aspecto hay que señalar que los límites que se vienen aplicando para las praderas de *P. oceanica* son exactamente los que propusieron conjuntamente los científicos que participaron en el estudio coordinado por el CEDEX, que además hacían mención expresa al “principio de precaución establecido por la Conferencia de Río”. No se ha tenido en cuenta la opinión del sector productivo ni de los usuarios, ni se ha producido ninguna decisión política sobre ello. De hecho, no se han aprobado como norma con efecto jurídico. Teniendo en cuenta que la participación de estos sectores probablemente se traduciría en una elevación de dichos límites, la imposición de estos valores como requerimiento caso por caso en las DIA representa hoy por hoy un margen de seguridad del que se debe ser consciente.

El segundo margen de seguridad se refiere a que como a día de hoy no se conocen los umbrales de tolerancia a los incrementos de salinidad de casi ninguna comunidad, se está actuando como si dichos valores fueran los mismos que los de *P. oceanica* (lo que seguramente es excesivo por tratarse de una especie extraordinariamente sensible a este parámetro). Por otra parte, para la *C.nodosa* los límites que se vienen aplicando ($S_{25,lim} = 39,5$ psu) a la espera de los resultados de las investigaciones que se están llevando a cabo, se han fijado poniendo un margen de seguridad al dato conocido de que existen praderas de esta especie en el Mar Menor, cuya salinidad es de 43 psu.

El tercer margen de seguridad que se viene aplicando *de facto* es que las herramientas de cálculo no se están utilizando con un enfoque estadístico sino solo para situaciones pésimas (mar en calma, producciones máximas) y sin embargo los resultados se comparan con la salinidad que puede superarse un 25% del tiempo (38,5 psu para *P. oceánica*) y no con la que puede superarse un 5% del tiempo (40,0 psu para la misma especie). En un medio receptor con una salinidad de 37,5 psu (típica de la costa mediterránea), la dilución necesaria para que el efluente de una desaladora con un índice de conversión del 45% (por lo tanto, con un exceso de salinidad de 30,7 psu) cumpla con el primer límite es de 30,7 mientras que la que se necesita para que cumpla con el segundo es de sólo 12,3. Este planteamiento, que quizás podría ser aceptable para proteger praderas que se encuentran dentro del campo cercano porque aquí las distribuciones de probabilidad son muy estrechas en torno a los valores medios, resulta excesivamente proteccionista para poblaciones situadas fuera del campo



cercano debido a que la variabilidad de las corrientes, del oleaje de las condiciones de operación de la planta hacen que las distribuciones de probabilidad sean mucho más anchas (porcentajes elevados de tiempo con incrementos nulos de salinidad), por lo que existirá una diferencia importante entre los valores registrados de s_{25} y s_5 .

3.2 Empleo de herramientas para el diseño ambiental del dispositivo de vertido

El diseño ambiental del dispositivo de vertido consiste en la elección del sistema de vertido y de los parámetros geométricos e hidráulicos del dispositivo de vertido de forma que se asegure el cumplimiento de los objetivos de calidad y que se produzca el mínimo impacto ambiental posible.

Las principales herramientas para el diseño ambiental son aquellas que permiten predecir las concentraciones de los distintos contaminantes en función de los parámetros del dispositivo de vertido y de las características del medio receptor.

Sin embargo, como quedó patente en el apartado 2.3, el comportamiento de los efluentes líquidos vertidos al mar es muy complejo y sujeto a muchas variables que actúan simultáneamente: flujo completamente tridimensional, fuerte dependencia de las densidades, formación de interfases con altos gradientes de las variables, interacciones entre chorros, posibles recirculaciones, cambio de variables dominantes en distintas partes de la zona afectada, etc. Como consecuencia, en el momento actual no existe ninguna herramienta (salvo quizás un modelo físico específico para cada caso concreto) que permita estudiar dicho comportamiento con resolución y generalidad suficientes para todo el dominio afectado.

Lo que existen son herramientas que permiten simular con aproximación razonable, o bien tipos de flujos geométrica e hidrodinámicamente simples, o bien partes de flujos más complejos en donde predomina la influencia de un pequeño número de variables.

3.2.1 Tipos de herramientas de predicción. Ventajas e inconvenientes.

Estas herramientas pueden clasificarse en tres grupos:

- a) Modelos matemáticos basados en la aplicación del Análisis Dimensional
- b) Modelos matemáticos basados en la integración de ecuaciones diferenciales
- c) Modelos físicos a escala reducida

Modelos matemáticos basados en la aplicación del Análisis Dimensional

El Análisis Dimensional permite obtener una cierta información sobre la forma en que una variable dependiente depende del conjunto de variables independientes que definen el fenómeno. Por ejemplo, mediante esta técnica puede deducirse que la dilución S_m en el eje de un chorro aislado a una distancia l de la boca de descarga medida a lo largo de la trayectoria puede expresarse mediante la expresión:

$$S_m = f\left(\frac{l}{\sqrt{A}}, F_d, Re, \theta\right)$$

donde A es el área de la boca de descarga, θ es el ángulo inicial del chorro sobre la horizontal, F_d es un número de Froude densimétrico y Re es un número de Reynolds, definidos por:

$$F_d = \frac{u}{\sqrt{\frac{\rho_e - \rho_a}{\rho_a} g \sqrt{A}}}; \quad Re = \frac{u\sqrt{A}}{\nu}$$

siendo u la velocidad del efluente en la boca de descarga; g , la aceleración de la gravedad; ρ_e y ρ_a las densidades del efluente y del medio receptor, y ν , la viscosidad cinemática. La función f debe determinarse por otros procedimientos, por ejemplo, introduciendo esta expresión en una ecuación diferencial que gobierne este fenómeno o experimentalmente mediante ensayos de laboratorio.

Como se ve, en este caso la indefinición es todavía muy grande porque se trata de determinar una función de 4 variables. Sin embargo, para determinados rangos de valores de las variables pueden hacerse simplificaciones obteniéndose lo que se denominan *aproximaciones asintóticas*. Por ejemplo, cuando $Re \gg 1$, la influencia de la viscosidad es despreciable (flujo completamente turbulento), por lo que desaparece la variable Re . Si buscamos una expresión aplicable solo a los casos en que $\theta = 60^\circ$, θ deja de ser una variable. Utilizando ambas simplificaciones se tiene

$$S_m = f\left(\frac{l}{\sqrt{A}}, F_d\right)$$

que es ya una función con sólo 2 variables. Pero todavía podemos encontrar expresiones asintóticas más simples restringiendo aún más los rangos de valores de las variables de modo que su influencia pueda despreciarse. Cuantas más simplificaciones, menos indefinición de la función (y por lo tanto, menor número de ensayos de laboratorio hay que realizar para definirla empíricamente), pero más restringido es su rango de aplicabilidad.

El caso extremo lo tenemos cuando sólo hay un número de variables independientes igual al de dimensiones independientes, porque entonces la función desconocida se reduce a una constante y basta un ensayo de laboratorio para determinarla. En el ejemplo anterior solo hay



dos dimensiones independientes. Si suponemos que las únicas variables importantes son la distancia l y el caudal Q , lo que puede ser aceptable a distancias del orden de magnitud del diámetro de la boca de descarga, el Análisis Dimensional nos conduce a la expresión $S_m = k$; siendo k una constante, que en este caso es fácil de determinar, ya que en las proximidades de la boca de descarga, en el eje, la salinidad es la misma que la del efluente porque la difusión turbulenta solo afecta a la periferia del chorro. Por lo tanto, $k = 1$.

A distancias un poco más grandes el comportamiento del chorro está determinado fundamentalmente por el flujo de cantidad de movimiento en la boca de descarga ($u \cdot Q$). La aplicación del Análisis Dimensional nos lleva entonces a la expresión $S_m = k \cdot l / \sqrt{A}$, donde la constante k hay que determinarla experimentalmente. Pero aún sin hacer experimentos ya podemos ver que en este tramo de la trayectoria la dilución crece proporcionalmente a la distancia.

A distancias aún mayores, la cantidad de movimiento acumulada por la acción de la flotabilidad debida a la diferencia de densidad es mucho mayor que la suministrada por la descarga, por lo que esta última deja de ser importante. Si se desprecia, el Análisis Dimensional nos lleva a

$$S_m = k \cdot \left[\frac{(\rho_e - \rho_a) \cdot g}{\rho_a \cdot Q^2} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot l^{\frac{5}{3}}$$

es decir, la dilución crece con la potencia 5/3 de la distancia.

La ventaja que supone el empleo de estas fórmulas algebraicas tan simples no debe hacernos olvidar que se trata de aproximaciones asintóticas deducidas despreciando el efecto de la mayoría de las variables. La experimentación es la única vía para determinar para qué rango de valores pueden despreciarse dichas variables. Incluso puede resultar que no sea aplicable ninguna de las fórmulas simples y que haya que retener más variables, con lo que hay que determinar la forma de la función. En el ejemplo del chorro, esto ocurre en el tramo en el que la cantidad de movimiento debida a la descarga es parecida a la que se ha acumulado por la flotabilidad. Y la longitud de este tramo puede ocupar una parte significativa de la trayectoria. La extrapolación de las fórmulas asintóticas simples deducidas al considerar sólo la cantidad de movimiento o sólo la flotabilidad hasta que se igualen los valores de ambas expresiones es una opción que surge de forma natural si no se dispone de algo mejor, pero hay que ser conscientes de que los errores en esta región de extrapolación podrían ser inaceptables.

De lo explicado hasta aquí se deducen las ventajas e inconvenientes de los modelos matemáticos basados en la aplicación del Análisis Dimensional. Entre las ventajas están que se trata de expresiones simples, de carácter algebraico y que se puede obtener una para cada variable de interés sin necesidad de calcular lo que ocurre en todo el dominio. Por ejemplo, podemos obtener la expresión de la dilución en el punto de impacto con el fondo sin necesidad de resolver los detalles del complejo esquema de flujo que se produce en ese punto. El principal inconveniente es que cada expresión solo vale para un cierto rango de valores de las variables, pudiendo existir otros rangos en los que no resulta suficientemente aproximada



ninguna de las expresiones simples; por ello se necesita cierta experiencia para una correcta aplicación del método. Otro inconveniente es el coste de realización de un gran número de ensayos cuando hay que determinar experimentalmente la forma de una función porque haya sido necesario retener un número de variables superior al número de dimensiones independientes. De lo cual se deriva que este método solo es práctico si el número de parámetros que define el fenómeno es relativamente pequeño. No sirve, por ejemplo, para resolver problemas en los que la densidad o la velocidad del medio receptor varían de forma irregular en función de la profundidad, pero sí son muy útiles cuando ambas variables son constantes. Pueden aplicarse incluso cuando hay estratificación siempre que ésta sea lineal, es decir, que el gradiente de variación sea constante, porque esta constante se puede tener en cuenta también en el Análisis Dimensional del problema.

Modelos matemáticos basados en la integración de ecuaciones diferenciales

Si se opta por integrar las ecuaciones diferenciales, lo primero que hay que hacer es simplificarlas ya que son demasiado complejas para su integración directa. Las ecuaciones generales son ecuaciones en derivadas parciales para un dominio espacial tridimensional con variación temporal, por lo que además de necesitar una gran potencia de cálculo y de almacenamiento de datos, requieren una gran cantidad de datos como condiciones iniciales y de contorno, lo que supone un elevado coste de campañas de medidas. Por otra parte, su integración numérica presenta problemas de convergencia y estabilidad que dependen del tipo de flujo, por lo que si se trata de modelar el dominio completo se encuentran con frecuencia requerimientos incompatibles. Por estas y otras razones no existe actualmente ningún modelo que pueda aplicarse con la precisión necesaria a toda la zona afectada. No obstante, el extraordinario crecimiento de la potencia de cálculo con el empleo de máquinas de cálculo paralelo permite ser optimista respecto a la evolución a corto plazo.

Por el momento, es necesario identificar los diferentes tipos de flujo y adoptar las hipótesis simplificativas adecuadas para cada uno de ellos, con lo que se obtienen ecuaciones diferentes para cada caso. Un procedimiento general de simplificar las ecuaciones consiste en integrarlas entre los extremos del dominio según direcciones preferenciales que dependen del flujo, con lo que se reduce la dimensionalidad espacial del problema.

Si en el flujo puede identificarse algo similar a una trayectoria y las concentraciones de los distintos parámetros se distribuyen en las diferentes secciones transversales de forma semejante, las ecuaciones se pueden integrar sobre una sección transversal genérica, con lo que desaparecen dos dimensiones espaciales. Si además puede suponerse flujo en régimen permanente, también desaparece la variabilidad temporal, con lo que se llega a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (flujo 1D) que es mucho más fácil de integrar numéricamente. Esta técnica de preintegración transversal de las ecuaciones se ha aplicado con éxito al estudio de un chorro aislado que sale por una boca circular o por una ranura infinitamente larga y al estudio de la corriente hiperdensa característica del campo lejano cuando fluye por un plano inclinado.



Si no existe una trayectoria general pero los desplazamientos se producen fundamentalmente en planos horizontales con poca variabilidad en dirección vertical, las ecuaciones se pueden integrar desde el fondo hasta la superficie, con lo que se elimina una dimensión espacial (flujo 2D). Esta técnica, que tiene muchas aplicaciones en otros campos (propagación de ondas producidas por el oleaje o las mareas, difusión de sustancias que por sus bajas concentraciones no afectan a la densidad del medio, etc.) no resulta de mucha utilidad para los vertidos de las desaladoras, ya que solo serían aplicables cuando el efluente se ha mezclado en toda la columna de agua y entonces los incrementos de salinidad son tan pequeños que no tienen efectos ambientales.

La mayoría de los tipos de flujo que se producen en el vertido de una desaladora son fuertemente tridimensionales (impacto del chorro con el fondo o con la superficie, interferencia entre chorros próximos, efecto de las corrientes ambientales sobre los chorros y sobre la corriente hiperdensa, irregularidades del fondo de tamaño similar al espesor de la capa hiperdensa, etc.) por lo que, aún suponiendo régimen permanente, resultan necesarias simulaciones para flujos 3D. Sin embargo, los modelos existentes en el mercado para simulaciones de este tipo, además de ser caros de adquirir y de utilizar, emplean métodos convencionales de integración numérica (diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos; en general, métodos basados en mallas estructuradas), que no pueden resolver adecuadamente la existencia de interfaces delgadas entre masas de agua con densidades muy diferentes como las que se producen tanto en el campo cercano, durante el contacto directo del efluente con el medio receptor, como en el campo lejano, al formarse la capa hiperdensa que se desplaza por el fondo. En efecto, en cada paso de tiempo la cantidad de propiedad (salinidad, temperatura, cantidad de movimiento) asociada a la partícula fluida situada en uno de los nodos de la malla se reparte entre los nodos de la celda a la que va a parar en su movimiento, lo que equivale a una difusión que se añade a la que se produce por causas físicas. Esta difusión numérica es mayor cuanto mayor es el tamaño de celda y menor el incremento de tiempo. Para los tamaños de celdas que suelen utilizarse por criterios de convergencia y de eficacia del cálculo, la difusión numérica es bastante mayor que la difusión física, lo que hace que los resultados muestren salinidades máximas menores que las que existen en la realidad. Es decir, se trata de un error sistemático que está del lado opuesto al de la seguridad.

Existen técnicas para combatir este defecto, pero hasta el momento resultan insuficientes en el campo concreto de la simulación de vertidos de desaladoras. Una de ellas consiste en utilizar tamaños de celda extraordinariamente pequeños, pero entonces el número de pasos de tiempo crece tanto que, además de elevar de forma importante el coste computacional, hace que la acumulación de errores de redondeo empiece a afectar a la precisión de los resultados. Otra técnica es la denominada difusión de partículas, que consiste en reproducir la sustancia que se difunde mediante un elevado número de partículas, cada una de las cuales representa una cantidad determinada de sustancia. Estas partículas se mueven de acuerdo con un campo de velocidades determinado previamente más un desplazamiento aleatorio cuya magnitud cuadrática media depende del coeficiente de difusión. De esta forma se evita aparentemente la



difusión numérica de la sustancia¹¹, pero en realidad no es así. Los problemas están en el cálculo del campo de velocidades: primero, cuando la sustancia que se difunde influye en la densidad (como ocurre en los vertidos de las desaladoras), el campo de velocidades está influido por la distribución de concentraciones, por lo que no puede calcularse de forma independiente; segundo, la viscosidad puede interpretarse como un coeficiente de difusión de una “sustancia” vectorial que es la cantidad de movimiento, por lo que el problema de la difusión numérica afecta también al cálculo del campo de velocidades. Por ejemplo, debido a esta difusión numérica resultaría que el espesor de la capa hiperdensa crecería a un ritmo más rápido que lo que ocurre en la realidad, con lo que las velocidades y las salinidades calculadas en dicha capa se irían suavizando antes que en la realidad.

Actualmente se está haciendo intentos de aplicar a los modelos de simulación de los vertidos de las desaladoras la técnica SPH (“Smoothed Particle Hydrodynamics”), que se basa en representar el propio fluido como un gran número de partículas, lo que evita la difusión numérica de la cantidad de movimiento. La aplicación de esta técnica a problemas 3D requiere una elevadísima potencia de cálculo que, no obstante, es posible hoy en día utilizando máquinas de cálculo paralelo. En el CEDEX, donde se está aplicando esta técnica para el estudio de otros tipos de flujos desde hace unos años, se está trabajando en la aplicación a la simulación de los vertidos de desaladoras.

Los modelos matemáticos basados en la integración de ecuaciones pueden ser analíticos o numéricos. Las soluciones analíticas sólo pueden obtenerse para casos de geometría e hidrodinámica relativamente simples. En los casos más sencillos entran en competencia con los basados en el Análisis Dimensional. Cuando las condiciones son un poco más complicadas, las soluciones analíticas contienen funciones especiales (Gauss, Gamma, Bessel, Legendre, etc.) o incluso desarrollos en serie, por lo que requieren una potencia de cálculo parecida a la de los modelos numéricos.

La ventaja principal de los modelos numéricos es que se pueden reproducir con detalle contornos complicados (laterales y del fondo) y variaciones fuertes de las condiciones iniciales y de contorno. Pero el comportamiento general está determinado por las condiciones de contorno que se impongan. Por lo tanto, si el usuario no introduce condiciones de contorno acertadas (por falta de experiencia, de tiempo o de presupuesto), obtendremos variabilidad espacial y temporal de gran detalle sobre unos valores medios erróneos.

La ventaja de los modelos de integración de ecuaciones en general, es que de una sola pasada permiten conocer el campo completo de valores de las variables. Los inconvenientes, que o adoptan hipótesis simplificativas demasiado forzadas o consumen mucho tiempo (de ordenador y de los técnicos que lo usan), por lo que no se pueden modelizar muchas hipótesis (lo que impide hacer un planteamiento estadístico), que deben ser manejados por especialistas, que no permiten conocer las distribuciones de probabilidad de las variables (solo se calculan

¹¹ De hecho, si se hace cero el coeficiente de difusión, todas las partículas que partieran de un mismo punto inicial llegarían al mismo punto destino.



valores medios) y que con frecuencia dan una falsa sensación de exactitud de los resultados, fomentada (a veces de forma interesada) por las atractivas salidas gráficas de los resultados.

Modelos físicos a escala reducida

Los modelos físicos a escala reducida son construcciones geoméricamente semejantes a los prototipos a los que representan, en los que se provocan flujos cuyos parámetros (velocidades, caudales, presiones, salinidades, rugosidades, etc.) tienen también una relación de semejanza con los parámetros de los flujos en el prototipo. Esta semejanza de los parámetros físicos es lo que diferencia estos modelos de las maquetas que suelen manejarse en otros sectores (Arquitectura por ejemplo).

Esta técnica se basa en conseguir que las ecuaciones que gobiernan el flujo y las condiciones de contorno sean iguales en el modelo y en el prototipo. De esta manera, los valores de las variables dependientes que midamos en el modelo serán proporcionales a los que podríamos medir en el prototipo, y el coeficiente de proporcionalidad es simplemente el factor de escala que corresponda a cada magnitud. Otra forma de expresar esto es diciendo que cualquier variable adimensional (números de Froude, de Reynolds, etc.) debe tener el mismo valor en el modelo que en el prototipo.

Las principales aplicaciones de los ensayos en modelos físicos en relación con las herramientas para el diseño ambiental de dispositivos de vertido son las siguientes:

- a) Determinar y calibrar fórmulas basadas en el Análisis Dimensional para calcular las variables de mayor interés, incluyendo determinados parámetros estadísticos de sus correspondientes distribuciones de probabilidad.
- b) Calibrar los parámetros de control y validar los resultados de los modelos numéricos
- c) Simular a escala reducida dispositivos de vertido específicos

La primera de estas aplicaciones requiere la planificación y realización de un considerable número de ensayos de forma sistemática. El proceso comienza analizando detenidamente el tipo de flujo que se quiere estudiar y seleccionando las variables que se piensa que van a tener una influencia significativa. La aplicación del Análisis Dimensional permite reducir el número de variables independientes. A partir de aquí es la experiencia la que permite identificar las variables más influyentes y es a éstas a las que se asignan más ensayos en la planificación. Otros criterios que condicionan la elección son la disponibilidad de equipos para reproducir en el ensayo las variables (p.e.: oleaje, velocidad de la corriente) y si su influencia es a favor o en contra de la seguridad. La determinación de parámetros estadísticos de las distribuciones de probabilidad requiere el empleo de técnicas de medida muy rápidas como por ejemplo, microconductivímetros o fluorescencia inducida por laser (LIF).



En los modelos numéricos siempre intervienen unos coeficientes que, aunque puede asociárseles una interpretación física, en realidad tienen como función principal actuar como parámetros de control de los resultados. Esto ocurre por ejemplo con la viscosidad turbulenta, la rugosidad de los contornos, la difusividad, el coeficiente de alimentación lateral de los chorros o de la capa hiperdensa, etc. Los ensayos en modelos físicos de geometrías simples son útiles para ajustar los valores de estos parámetros de forma que los resultados predichos por el modelo numérico sean parecidos a los medidos en el modelo físico. Una vez calibrados los coeficientes, se pueden hacer modelos numéricos de casos reales teniendo en cuenta todas sus complejidades. La validación de los resultados se hace comprobando su concordancia con datos medidos en el prototipo (si está construido y operando) o con datos medidos en un modelo físico a escala para unas pocas hipótesis de funcionamiento.

La tercera de las aplicaciones consiste precisamente en modelizar estos casos reales directamente con el objeto de ensayar en ellos todas las hipótesis de funcionamiento que se consideren relevantes. Esto se hace cuando el flujo que se estudia es tan complejo que no son aceptables las simplificaciones que se suelen hacer en las ecuaciones para posibilitar la preparación de un modelo numérico.

La principal ventaja de un modelo físico es que están presentes todos los fenómenos que ocurren en un flujo real y sus resultados lo están teniendo en cuenta incluso cuando sean tan complejos que todavía no se haya podido construir un modelo teórico para explicarlos. Otra ventaja más importante de lo que parece a primera vista es que con esta herramienta tanto promotores como detractores pueden ver físicamente lo que está ocurriendo.

Como inconveniente señalaremos que en general no es posible construir un modelo físico a escala reducida de forma que se cumplan las leyes de semejanza para todas las variables. Lo que se hace es conseguir que se cumpla la igualdad de los valores de los números adimensionales en los que intervienen las variables más influyentes y aceptar los errores derivados de que no se cumpla dicha igualdad para los menos influyentes. Estos errores se denominan “efectos de escala” y tienen la propiedad de que se hacen más pequeños cuanto más parecidas son los tamaños del modelo y del prototipo.

Otro inconveniente es que, en principio, tienen un coste mayor que los modelos numéricos. Pero si hay que utilizar modelos 3D y se quieren preparar salidas gráficas dinámicas para que el cliente pueda ver los resultados de una manera parecida a lo que se ve en un modelo físico (hoy en día es posible incluso conseguir salidas gráficas en relieve), los costes ya no son tan diferentes y siempre queda la duda de si lo que se está viendo es lo que ocurre en la realidad.

3.2.2 Herramientas matemáticas disponibles actualmente. Limitaciones

Consideraremos herramientas matemáticas disponibles:



CEDEX

- a) Los programas que permiten crear modelos numéricos y realizar simulaciones de una forma relativamente sencilla y que están disponibles en el mercado
- b) Las fórmulas basadas en el Análisis Dimensional con coeficientes determinados experimentalmente y que se pueden encontrar en la literatura.

Por supuesto, todo ello aplicable a los vertidos de las plantas desaladoras.

No consideraremos herramientas disponibles los programas que permiten crear modelos numéricos 2D porque como se dijo en el apartado anterior, no son aplicables a la simulación de vertidos hiperdensos porque no pueden reproducir la estructura fuertemente tridimensional de los flujos que se producen.

Tampoco consideraremos herramientas disponibles los programas que permiten crear modelos numéricos 3D y que están disponibles en el mercado porque además de ser difíciles de manejar por su complejidad técnica y por sus requerimientos computacionales y de definición de sus condiciones de contorno, presentan los problemas de difusión numérica comentados en el apartado anterior y como consecuencia, tienden a producir resultados del lado contrario al de la seguridad. Los modelos basados en la técnica SPH son los que mejor pueden combatir el problema de la difusión numérica, pero aún se encuentran poco desarrollados.

Aunque actualmente no existen todavía estudios de validación de los modelos 3D que permitan confiar en la validez de sus resultados para los estudios de impacto ambiental, se está trabajando en la mejora de estas herramientas y conviene seguir la evolución de sus capacidades. Por ello se da a continuación un listado de los más conocidos y de los enlaces a las páginas web donde puede conseguirse información sobre ellos.

- COHERENS (software libre):
<http://www.mumm.ac.be/coherens/>
- MIKE 3 (Danish Hydraulics Institute, DHI):
<http://www.mikebydhi.com/Products/CoastAndSea/MIKE3.aspx>
- Delft3D (Delft Hydraulics, actualmente perteneciente a Deltares):
<http://delftsoftware.wldelft.nl/>
- TELEMAC 3D (actualmente es software libre):
http://www.telemacsystem.com/index.php?option=com_kunena&Itemid=21&func=view&catid=2&id=143&lang=fr
- ANSYS FLUENT (ANSYS, Inc.):
<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+FLUENT>
- Modelos SPH: SPHERIC (SPH European Research Interest Community):
http://wiki.manchester.ac.uk/spheric/index.php/SPHERIC_Home_Page

Conviene hacer notar que aunque un modelo 3D permite calcular campos tridimensionales irregulares de las variables, esto por sí solo no garantiza que sus predicciones sean mejores que las obtenidas con métodos más sencillos. De hecho es una buena práctica contrastar siempre los resultados de un modelo 3D con los de algún modelo simple.

3.2.2.1 Programas comerciales que permiten crear modelos numéricos relativamente sencillos

En este grupo los más usados son, en orden creciente de precio:

- El programa UM3, que forma parte de la plataforma VISUAL PLUMES (<http://www.epa.gov/ceampubl/swater/vplume/index.html>). Permite crear modelos que integran las ecuaciones lagrangianas del comportamiento de un chorro sumergido en régimen permanente en un medio receptor con estratificación de densidad y de corrientes siempre que no impacte con los contornos (superficie, fondo o paredes laterales). Supone que los valores de las variables (salinidad, velocidad) son homogéneos en cada sección transversal, pero variables de una sección a otra a lo largo del eje. Es también aplicable a difusores con múltiples chorros, pero la hipótesis que adopta para la interferencia entre chorros se reduce a suponer que la alimentación con agua de mar se produce solo por la parte de la periferia no compartida con otros chorros, es decir, no se tienen en cuenta efectos hidrodinámicos. Una descripción de la versión 2D del modelo matemático en el que se basa este programa puede encontrarse en el capítulo 3 del libro *Fundamentals of Environmental Discharge Modeling* (Davis, 1999. CRC Press). La ampliación a 3D se hace adoptando la hipótesis PAE (*Projected area Entrainment*), descrita en *Non-empirical Closure of the Plume Equations* (Frick, 1984).

La plataforma VISUAL PLUMES completa, que incluye versiones ejecutables de este y otros programas, puede bajarse gratuitamente de la dirección de Internet indicada. El programa DKHW, que también está incluido en VISUAL PLUMES, permite crear modelos eulerianos para este mismo tipo de flujos, pero por el momento no admite que el efluente tenga flotabilidad negativa (efluente con densidad superior a la del medio receptor).

- El programa JETLAG/VISJET (<http://www.aoe-water.hku.hk/visjet/visjet.htm>). El módulo JETLAG integra las ecuaciones lagrangianas para el mismo tipo de chorros que el UM3 y con las mismas potencialidades y limitaciones, incluyendo la hipótesis de distribución homogénea de valores de las variables en cada sección transversal. VISJET le añade la posibilidad de una visualización gráfica 3D interactiva de buena calidad. La interferencia entre chorros se tiene en cuenta simplemente superponiendo los valores de las variables obtenidos para cada chorro. El modelo matemático usado para la integración de las ecuaciones está descrito en el capítulo 10 de libro *Turbulent Jets and Plumes* (Lee & Chu, 2003. Kluwer Academic Publishers).



Este programa lo comercializa la Universidad de Hong Kong y el precio de la licencia para un año era en 2009 de unos 220 €

- El programa CORJET (<http://www.cormix.info/integral.php>), que integra las ecuaciones eulerianas para el mismo tipo de chorros que los anteriores. Supone distribución gaussiana de concentraciones en cada sección transversal¹². La interferencia entre chorros no se hace por superposición de concentraciones como en los casos anteriores. Aquí, cuando el diámetro nominal de los chorros crece hasta el punto de hacerse igual a la separación entre las bocas de descarga, el programa conmuta instantáneamente a otro sistema de ecuaciones que simula el vertido a través de una ranura continua de longitud infinita (chorro plano o bidimensional) cuyos parámetros de vertido (ancho de la ranura y velocidad) se calculan de forma que los caudales de volumen y de cantidad de movimiento por unidad de longitud sean iguales que los del chorro original. Esta hipótesis, que es aceptable en el caso asintótico en el que la interacción entre los chorros está completamente desarrollada (es decir, no hay variación de concentraciones en la dirección paralela al tramo difusor), no lo es en absoluto en el tramo que va desde que comienza la interferencia hasta que ésta se hace completa. Y este tramo puede ser tan largo que llegue hasta el punto de impacto del chorro con el fondo, que marca el final de la aplicabilidad de estos programas. Además, como la conmutación se hace en un solo paso de integración, los resultados presentan en este punto fuertes discontinuidades de las variables que no se corresponden con la realidad. Las ecuaciones que integra el programa CORJET para un chorro individual están descritas en *Integral Model for Turbulent Buoyant Jets in Unbounded Stratified Flows. Part I: Single Round Jet* (Jirka, 2004. *Environmental Fluid Mechanics* 4: 1-56) y para el chorro a través de una ranura en *Integral Model for Turbulent Buoyant Jets in Unbounded Stratified Flows. Part II: Plane Jet Dynamics Resulting from Multiport Diffuser Jets* (Jirka, 2006. *Environmental Fluid Mechanics* 6: 43-100).

El programa CORJET solo puede adquirirse como parte del sistema experto CORMIX, pero puede ejecutarse tanto dentro del entorno de CORMIX como de forma independiente. El sistema CORMIX (<http://www.cormix.info/index.php>), que se comentará más adelante con las formulaciones basadas en el Análisis Dimensional, está comercializado actualmente por MixZon Inc, y el precio de la licencia para tres años es de unos 5.400 €

Conviene hacer notar aquí que en 2009, como uno de los productos del proyecto de investigación “Desarrollo e implementación de una metodología para la reducción del impacto ambiental de los vertidos de salmuera procedentes de desaladoras”, se ha puesto a disposición de cualquier usuario que lo desee el uso gratuito por internet del programa MEDVSA-IJETG para chorro individual (<http://www.medvsa.es/herramientas/modelosCampoCercano.html>). Este programa integra las mismas ecuaciones y con los mismos valores de los parámetros de

¹² Se puede pasar de los parámetros que caracterizan una distribución gaussiana a los que caracterizan una distribución homogénea y viceversa mediante unas sencillas fórmulas algebraicas deducidas igualando los flujos de volumen, de cantidad de movimiento y de exceso de salinidad. Por lo tanto, en esencia pueden considerarse equivalentes las hipótesis de distribución gaussiana y de distribución homogénea.



control que el programa CORJET para chorro individual, por lo que obtiene los mismos resultados. El mencionado programa de investigación, cuyo nombre abreviado es MEDVSA (MEtodología para el Diseño de Vertidos de Salmueras) está subvencionado por el Ministerio de Medio Ambiente a través del Programa Nacional de I+D y su ejecución corre a cargo del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria y del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.

- El módulo 310 de D-CORMIX (actualmente, subsistema DHYDRO de CORMIX) es un programa que permite simular el comportamiento de la corriente hiperdensa característica del campo lejano mediante la integración numérica de las ecuaciones eulerianas que se obtienen integrando las ecuaciones generales sobre una sección genérica transversal a la trayectoria. Supone que la sección transversal es rectangular y que los valores de las variables se distribuyen homogéneamente en ella. Este modelo contiene media docena de parámetros de control que deben determinarse mediante ensayos en modelos físicos, lo que hasta el momento solo se ha hecho de una forma incipiente. El modelo matemático cuyas ecuaciones se integran se describe en *Pollutant Transport and Mixing Zone Simulation of Sediment Density Currents (Doneker, Nash & Jirka, 2004. ASCE J. of Hydraulic Engineering, Vol 130, Nº 4. 349-359)*¹³

Como limitaciones de este grupo de herramientas señalaremos en primer lugar que ninguno de los programas comerciales anteriores permiten crear modelos numéricos y realizar simulaciones de forma sencilla de otros tipos de flujo distintos de los mencionados, como por ejemplo, el vertido por rebose de un aliviadero sobre un acantilado, la zona de inmersión en la proximidades de un vertido en una playa, el impacto de los chorros sumergidos con la superficie o con el fondo, la interacción dinámica entre los chorros o la zona del campo cercano que va desde el punto de impacto hasta que la corriente hiperdensa se ha tranquilizado lo suficiente como para que se pueda aplicar el modelo de campo lejano. Por lo tanto, el empleo de estos programas lleva implícito que hay que adoptar alguna hipótesis (y explicarla) sobre cómo se asocia el resultado obtenido por el modelo para una situación idealizada (por ejemplo, chorro que no impacta con los contornos) a una situación real (chorro que impacta con el fondo). En el caso de este ejemplo lo que suele hacerse es quedarse del lado de la seguridad tomando como dilución la que se obtiene en el eje cuando éste, durante su trayectoria descendente, alcanza la misma cota que la boca de descarga, renunciando así a tener en cuenta el incremento de dilución que se produce por las turbulencias generadas por el impacto ante la falta de un modelo numérico fiable para esta zona.

Otra limitación se deriva de la hipótesis de autosemejanza de perfiles que se adopta en todos ellos. Esta hipótesis consiste en suponer que las distribuciones de valores de la variable en las

¹³ En la literatura pueden encontrarse otros modelos matemáticos parecidos aplicables también al estudio de la corriente hiperdensa. Por ejemplo, para corrientes confinadas lateralmente por paredes verticales se puede consultar el capítulo 4 (*Flujos estratificados con mezcla*) del libro *Hidrodinámica ambiental* (Marcelo García, 1996. Universidad Nacional del Litoral) o la primera parte del artículo *Density Currents Entering Lakes and Reservoirs* (Alavian, Jirka, Denton, Johnson & Stefan, 1992. ASCE J. of Hydraulic Engineering, Vol. 118, No. 11); para corrientes sin confinamiento lateral sobre un plano inclinado, la segunda parte de este mismo artículo o *Behavior of Density Currents on an Incline* (Alavian, 1986. Vol. 112, No. 1). No son de utilidad los numerosos textos sobre flujo bicapa sin intercambio entre ellas.



diferentes secciones transversales se pueden hacer colapsar en una sola si se representan mediante variables adimensionales referidas a unos valores de referencia (por ejemplo, diámetro nominal del chorro y velocidad e incremento de salinidad en el eje), que en general serán diferentes para cada sección. Esto es así evidentemente para las distribuciones homogéneas que adoptan los programas UM3, JETLAG y módulo 310 de D-CORMIX, y también lo es para las distribuciones gaussianas del CORJET. Sin embargo, la hipótesis de autosemejanza de perfiles se aleja mucho de la realidad cuando la trayectoria del chorro es curva, más cuanto mayor es su curvatura, por lo que no reproducen bien las trayectorias pseudo-parabólicas de los vertidos hiperdensos como los de las desaladoras ni las trayectorias alabeadas que se forman bajo la acción de corrientes intensas. Tampoco se cumple esta hipótesis en las proximidades de la boca de descarga ya que los puntos cercanos al eje del chorro no notan el efecto de la difusión turbulenta hasta que se ha recorrido un cierto trayecto, por lo que hasta entonces conservan el valor que tenían justo a la salida. El diámetro de este núcleo no afectado va decreciendo hasta que a una cierta distancia se anula. Este tramo se denomina *zona de adaptación al flujo autosemejante (ZAFA)*, en contraposición al resto de la trayectoria que se denomina *zona de flujo autosemejante*. Pues bien, en la ZAFA no resulta de aplicación el modelo de integración numérica, entre otras cosas porque dicho modelo predice un decrecimiento de los valores de las variables en el eje desde la misma sección inicial, cosa que como se ha explicado, no sucede hasta el final de la ZAFA.

Algo similar sucede al comienzo de la corriente hiperdensa. La difusión se produce a través de la interfaz superior de la capa, por lo que los puntos situados cerca del fondo mantienen los mismos valores de exceso de salinidad que tenían durante un cierto trayecto, hasta que el espesor de este núcleo no afectado termina por anularse. En este tramo, que según los resultados experimentales puede tener una longitud del orden del hectómetro para las desaladoras actuales, el D-CORMIX predice disminuciones de concentración desde la sección inicial, lo que está en contra del lado de la seguridad.

La tercera limitación procede de que, al plantear el problema como ecuaciones diferenciales ordinarias tomando la distancia a lo largo del eje como variable independiente, se supone que lo que afecta a cada rebanada del chorro perpendicular al eje se puede calcular en función de las características del medio receptor (velocidad, densidad) a la cota del eje. Esto es correcto para chorros verticales, pero cuando la trayectoria está inclinada (siempre en los vertidos de las desaladoras), los puntos de la periferia de la rebanada se pueden encontrar a cotas muy diferentes y pueden ser afectados de manera muy diferente. Esto hace que, como demuestran los resultados experimentales, las distribuciones transversales de los valores de las variables, ni son autosemejantes ni tan siquiera son simétricas respecto al eje, lo que plantea serias dudas sobre cómo hay que interpretar los resultados y sobre cómo debe realizarse la calibración con los resultados de los modelos físicos.

La última limitación que vamos a comentar aquí se refiere a que las ecuaciones de partida (en derivadas parciales) se promediaron respecto al tiempo para eliminar las desviaciones turbulentas, por lo que los resultados obtenidos al aplicar los modelos se refieren a los valores medios (en el tiempo) de las distintas variables. Los resultados experimentales indican que en un chorro sumergido, los valores en el eje oscilan debido a la turbulencia entre valores



próximos a cero y valores del orden del doble de los valores medios¹⁴. Si la biocenosis objeto de protección siente los efectos con mucha rapidez como por ejemplo podría ocurrir con los misidáceos que viven sobre las hojas de las fanerógamas marinas, son los valores máximos (por ejemplo, el percentil del 5%) y no los valores medios los que resultan de interés.

3.2.2.2 Fórmulas basadas en el Análisis Dimensional

Los tipos de flujo que no admiten una modelación matemática sencilla basada en la integración de las ecuaciones diferenciales pueden estudiarse experimentalmente con la ayuda del Análisis Dimensional. Un texto que ya se ha hecho clásico sobre cómo se puede aplicar esta teoría al estudio de los vertidos es el capítulo 9 del libro *Mixing in Inland and Coastal Waters* (Fischer, List, Koh, Imberger & Brooks, 1979. Academic Press), pero está orientado fundamentalmente a vertidos de efluentes con flotabilidad positiva¹⁵. El único caso de flotabilidad negativa para el que se da una expresión completa (pág. 340) es para la máxima altura alcanzada (altura terminal) por un vertido vertical en sentido ascendente. Otra referencia en la que la aplicación del Análisis Dimensional a vertidos se explica de forma bastante clara es el artículo *Mean Behavior of Buoyant Jets in Crossflow* (Wright, 1977. ASCE J. of the Hydraulic Division, Vol. 103, No. HY5), pero solo se tratan efluentes con flotabilidad positiva.

Reduciéndonos a los vertidos de flotabilidad negativa, las principales referencias en las que pueden encontrarse formulaciones basadas en el Análisis Dimensional con coeficientes ajustados mediante ensayos de laboratorio son las siguientes:

- *Submerged Discharges of Dense Effluent* (Tong y Stolzenbach, 1979. MIT R79-35, R-243 for NOAA): Formulación válida para chorros aislados o múltiples verticales ascendentes en presencia de una corriente homogénea perpendicular al tramo difusor; medio con densidad homogénea y fondo plano horizontal. Se puede calcular la dilución en el punto de impacto, la distancia horizontal de éste a la boca de descarga, la máxima elevación del eje del chorro y las dimensiones de la cuña de retroceso.
- *Inclined Dense Jets in Flowing Current* (Roberts y Toms, 1987. ASCE J. of Hydraulic Engineering. Vol 113, No 3): Formulación válida para un chorro aislado en presencia de una corriente homogénea. El chorro puede ser vertical o formando un ángulo de 60° sobre la horizontal; en este último caso el ángulo horizontal del chorro con el sentido de avance de la corriente puede variar entre 0° y 180° en incrementos de 30°. La gran mayoría de los ensayos se hicieron con números de Froude densimétricos próximos a 25. Fondo horizontal. Se puede calcular la dilución en el punto de impacto y en el punto de máxima elevación del chorro, así como la máxima altura del borde superior del chorro.

¹⁴ Fuera del eje la variación relativa es incluso mayor: entre cero y varias veces el valor medio.

¹⁵ En 1979 había muy pocos estudios experimentales sobre vertidos de efluentes con flotabilidad negativa.



CEDEX

- *Mixing in Inclined Dense Jets (Roberts, Ferrier y Daviero, 1997. ASCE J. of Hydraulic Engineering. Vol 123, No 8)*: Formulación válida para un chorro aislado formando un ángulo de 60° sobre la horizontal en un medio sin corrientes. Fondo horizontal. Además de las tres variables dependientes del párrafo anterior se puede calcular la distancia horizontal al punto de impacto, la distancia horizontal al punto donde las turbulencias se han calmado (inicio del campo lejano), el espesor de la capa hiperdensa en este punto y la dilución alcanzada en el mismo. Como puede verse, supone una ampliación del estudio anterior en cuanto a las variables dependientes que pueden calcularse, pero solo es aplicable a medio receptor sin corrientes.
- *Experimental Studies on Vertical Dense Jets in a Flowing Current (Gungor y Roberts, 2009. ASCE J. of Hydraulic Engineering. Vol 135, No 11)*: Formulación válida para un chorro vertical aislado en presencia de una corriente homogénea. Fondo horizontal. Se puede calcular la dilución en el punto de impacto y en el punto de máxima elevación del chorro, así como la máxima altura del borde superior del chorro, la distancia horizontal al punto de impacto y la situación del eje de la trayectoria.

La principal ventaja de estas herramientas es que mediante simples expresiones algebraicas podemos predecir algunos de los valores de las variables que resultan críticos para el diseño como son la dilución en el punto de impacto con el fondo, la distancia de éste a la boca de descarga y la máxima altura del borde superior del chorro. Y ello con la garantía de haber sido obtenidas mediante ensayos de laboratorio, que por su propia naturaleza están teniendo en cuenta complejos fenómenos para los que no existen modelos teóricos como por ejemplo:

- el mezclado que se produce entre distintos puntos de la sección transversal (e incluso entre secciones transversales próximas) como consecuencia del impacto y de las fuertes corrientes horizontales y turbulencias que éste provoca.
- en el caso de chorros múltiples, la interferencia entre los chorros próximos, ya que si bien han podido permanecer independientes a lo largo de sus trayectorias debido a que la distancia entre las bocas de descarga haya sido mayor que el máximo diámetro que han alcanzado, al impactar con el fondo el diámetro horizontal de la zona afectada crece súbitamente tanto que resulta muy difícil evitar la interferencia¹⁶.
- la realimentación en el tramo final del chorro con agua hipersalina procedente de la capa de mezcla que se produce en el fondo si la pendiente y la velocidad del medio no son suficientemente elevadas como para evacuar lo que va llegando
- el resalto hidráulico circular que se puede producir en torno a cada punto de impacto si la velocidad con la que impacta el chorro es suficientemente alta, con lo cual se evitaría el efecto anterior.

¹⁶ Sería antieconómico diseñar una separación entre bocas de descarga suficientemente grande como para evitar esta interferencia en el fondo.



Conocer de una manera fiable la dilución en el punto de impacto es especialmente importante porque si la dilución conseguida a lo largo de la trayectoria es tan elevada que el exceso de salinidad en el punto de impacto resulta ya inferior al valor límite impuesto, se asegura el cumplimiento de la norma con independencia de las circunstancias que se den a partir de ese momento (variabilidad del relieve del fondo, de las corrientes existentes y de los gradientes verticales de salinidad), lo que hace innecesaria la simulación del campo lejano y por ende, se evitan las incertidumbres asociadas a los modelos de simulación que hubieran podido utilizarse. Incluso podría verse directamente sobre un fondo colonizado por el tipo de población que se desea proteger si no existen mejores alternativas.

Como limitaciones de este grupo de herramientas indicaremos en primer lugar que hasta este momento solo existen formulaciones para los tipos de flujo comentados. Se necesitaría desarrollar formulaciones para otros dispositivos de vertido (en playa, rebose por un acantilado, etc.) y para el campo lejano.

Otra limitación se encuentra en la escasez de datos experimentales que han servido para calibrar estas formulaciones. Esto se debe a que son pocos los laboratorios de hidráulica que disponen de las técnicas y equipamientos necesarios y a que el coste de los ensayos es relativamente elevado si se le compara con el de los ensayos numéricos.

Por último señalaremos la posible influencia de los efectos de escala sobre los resultados de los ensayos físicos, por lo que conviene analizar detalladamente las condiciones bajo las que se han realizado los ensayos.

Conviene recordar aquí que el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX ha realizado un gran número de ensayos de simulación de vertidos de salmueras en modelos físicos a escala reducida orientados a proporcionar una formulación basada en el Análisis Dimensional que mejore las existentes hasta este momento para la predicción de las diluciones alcanzables con diferentes dispositivos de vertido. En los próximos meses verá la luz un informe del CEDEX con los resultados de los ensayos realizados hasta ahora y las expresiones para la predicción de las diluciones que se han obtenido en base a ellos.

Por otra parte, dentro del ya mencionado proyecto de investigación MEDVSA, el CEDEX está ampliando el abanico de ensayos para poder tener en cuenta más variables como por ejemplo, el oleaje o las corrientes, y está llevando a cabo campañas de medida en vertidos de desaladoras en funcionamiento para contrastar los resultados de las herramientas de predicción.

3.2.2.3 Sobre el sistema experto CORMIX

Por la gran cantidad de usuarios existentes (más de 5000 en todo el mundo según sus creadores) conviene hacer aquí un análisis algo más extenso del sistema experto CORMIX, tarea que no resulta fácil dado que se trata de un conjunto de aplicaciones informáticas que, además de realizar los cálculos necesarios para predecir la evolución del vertido, contiene



complementos (utilidades de pre- y post-proceso, ayuda en línea) en mayor o menor número según la licencia que se contrate. Además, cada 2 ó 3 años se modifican o se añaden utilidades en las sucesivas versiones que van apareciendo (actualmente va por la versión 7.0),

En primer lugar hay que advertir que, al contrario de lo que sucede con la mayoría de los programas que se manejan en este campo (UM3, JETLAG o MEDVSA-IJETG) cuyo contenido fundamental es un motor de cálculo para la creación de modelos de simulación, el núcleo principal de CORMIX desde sus primeras versiones es un sistema experto, programado en el lenguaje VP-Expert, uno de los lenguajes que como el PROLOG (más conocido en Europa) se desarrollaron en la década de 1980 especialmente orientados a la programación de sistemas expertos y aplicaciones de la inteligencia artificial, temas muy en boga en aquellos años.

Este programa funciona como una “shell” o cobertura bajo la cual se van ejecutando diversos elementos de software programados en VP-Expert (DATIN, PARAM, CLASS, HYDRO y SUM) que se encargan respectivamente de controlar la entrada de datos por el usuario, el cálculo de parámetros para la toma de decisiones, la clasificación y ordenación de los tipos simples de flujo que se considerarán secuencialmente para el vertido concreto definido por los datos introducidos, la llamada a los diferentes módulos de cálculo hidrodinámico correspondientes a dichos tipos de flujo y la preparación de un sumario de datos y resultados, una evaluación y unas recomendaciones que constituyen las salidas del programa. Los módulos de cálculo hidrodinámico y de dilución son los únicos del núcleo principal de CORMIX que no están programados en VP-Expert (lo están en lenguaje FORTRAN).

Los principales elementos del sistema CORMIX son los siguientes:

- a) Contiene una base de conocimiento en la que se encuentran identificados un gran número de tipos simples de flujo que, aceptando ciertas simplificaciones, pueden corresponder a los que se producen bajo determinadas condiciones en sucesivas fases de la evolución de un vertido (unas 70 clases de flujo para vertido sumergido con una sola boca, unas 60 para vertido sumergido con bocas múltiples y unas 10 para vertidos superficiales).
- b) Para todos y cada uno de ellos incluye un procedimiento de cálculo que permite predecir los valores de las variables de interés (diluciones, concentraciones, velocidades, tamaños) a partir de los de las variables de entrada. Los códigos de estos procedimientos se denominan “módulos” en el vocabulario de CORMIX.
- c) Contiene un procedimiento (el corazón del sistema experto) que, a partir de las características del vertido y del medio receptor introducidas por el usuario, identifica, sin ninguna intervención adicional de éste, primero el subsistema aplicable (CORMIX1 para vertido sumergido con una sola boca, CORMIX2 para vertido sumergido con bocas múltiples y CORMIX3 para vertidos superficiales, todos ellos con flotabilidad positiva; D-CORMIX - o DHYDRO - para vertidos con flotabilidad negativa) y luego, la clase de flujo. Los procedimientos de cálculo son fórmulas algebraicas sencillas obtenidas por Análisis Dimensional o como soluciones exactas o aproximadas de las ecuaciones diferenciales simplificadas con condiciones de contorno sencillas. Las únicas excepciones son el módulo CORJET y el módulo 310 de DHYDRO, ya comentados en



- el apartado anterior, que integran numéricamente unas ecuaciones diferenciales ordinarias.
- d) Como por otra parte, a cada clase de flujo se le ha preasignado una determinada sucesión de tipos simples de flujo, el programa procede a aplicar los módulos correspondientes utilizando como datos de entrada de cada uno una adaptación de los datos de salida del anterior.
 - e) Contiene una abundante colección de mensajes que guían al usuario en la introducción de datos de entrada dentro de rangos razonables, en la comprensión de las clases y tipos de flujo y en la interpretación de los resultados.

La principal ventaja del sistema CORMIX consiste en que es aplicable a una amplia variedad de tipos de vertido (pero no a todos¹⁷) y sobre todo, que su utilización es muy sencilla porque la tarea del usuario se limita a introducir unos pocos datos de entrada (del orden de una veintena) y es el sistema experto el que se encarga de todo, obteniendo resultados en la casi totalidad de los casos y presentándolos con comentarios sobre su interpretación. Por ello, como se dice en el punto 3.1 del Manual de Usuario, es una herramienta orientada a usuarios sin experiencia en hidrodinámica y a la formación. Esto y el hecho de que en sus comienzos fuera de distribución gratuita han contribuido de forma significativa en su amplia difusión.

No obstante, el sistema CORMIX tiene también un conjunto de limitaciones que vamos a comentar.

Los procedimientos de cálculo para cada tipo de flujo simple son adecuados si se cumplen las condiciones que permitieron deducir dichos procedimientos, pero los errores crecen considerablemente conforme nos vamos alejando de estas condiciones. Por ejemplo, el módulo CORJET supone que la distribución de concentraciones en cada sección transversal de un chorro es simétrica, autosemejante y gaussiana, hipótesis bien contrastadas en el caso de un vertido vertical en un medio sin movimiento. Pero si hay corrientes o se trata de un vertido hiperdenso, ya se explicó que no se cumplirá ninguna de estas condiciones, por lo que, no solo aumentarán los errores sino que además, será difícil interpretar los resultados.

Otro inconveniente consiste en que, con la única excepción del CORJET, el sistema no permite que el usuario aplique los diferentes módulos de forma independiente. Esto, que está muy bien para evitar que un usuario sin experiencia los aplique indebidamente, representa una limitación seria para que usuarios experimentados pudieran sacar más partido del programa.

Otro problema consiste en que la clase de flujo asignada a unos determinados datos de entrada no coincide con la que se produce en la realidad en muchos casos. Esto se debe algunas veces a las simplificaciones excesivas contenidas en las reglas del sistema experto, como cuando para un tramo difusor con chorros horizontales alternados a uno y otro lado decide que hay que tratarlo como un vertido vertical porque el valor medio de la cantidad de

¹⁷ El Manual de Usuario de la versión 5.0 señala en el apartado 3.1 que es aplicable al 95% de los casos de vertidos sumergidos con boca única, al 80% de los de vertido sumergido con bocas múltiples, al 90% de los de vertidos superficiales y al 80% de los de vertidos hiperdensos, que son los que nos interesan más.



movimiento horizontal es nulo. Pero la mayoría de las veces se debe a que el sistema experto clasifica el flujo siguiendo un árbol de decisiones (diagramas de clasificación de flujos del Apéndice del Manual de Usuario) donde en cada encrucijada la decisión se toma en función de que el cociente entre los valores de dos variables sea mayor o menor que unas determinadas constantes que según el propio manual del CORMIX han sido extraídas de la literatura referida a tipos de flujos muy básicos sin ningún ajuste (por lo que el propio manual sugiere que deben ser reconsideradas). Por ejemplo, en la figura A.3.a de dicho manual puede verse que la decisión sobre si la clase de flujo es NV3 (impacto en la superficie y reinmersión hasta formar una corriente de fondo) o NV4 (mezcla completa con toda la columna de agua) depende de si la variable L_m (que da un orden de magnitud de la distancia a la cual un chorro puro perpendicular a una corriente se ha desviado hasta tomar prácticamente la dirección de ésta) es mayor o menor que la profundidad del vertido H_s . Pero en realidad, la clase de flujo NV4 es esperable cuando L_m es mucho mayor que H_s y no sólo simplemente mayor. Los ensayos de laboratorio permitirían decidir para qué valor del cociente L_m / H_s se produciría la clase de flujo NV4.

Un inconveniente más lo tenemos en las reglas de transición que utiliza CORMIX para calcular las condiciones de entrada a un módulo de un determinado tipo simple de flujo a partir de los datos de salida del módulo que simula el tipo de flujo inmediato anterior. En general estas reglas se obtienen aplicando la conservación de los flujos de volumen, de cantidad de movimiento y de trazador (energía en el caso de la temperatura o sal en caso de la salinidad) como se dice en la página 76 del Manual, lo que resulta muy adecuado en la mayoría de los casos, pero no así en otros. Por ejemplo, cuando dos tipos de flujo consecutivos tienen geometrías muy diferentes (como sucede el pasar del chorro antes del impacto con el fondo, que es circular, a la corriente de fondo que se produce después del impacto, que es rectangular) CORMIX presenta fuertes discontinuidades de los valores de las variables que no se presentan en la realidad, por lo que los errores en las proximidades de los puntos de acoplamiento entre tipos de flujo diferentes pueden ser considerables.

Pero quizás el mayor inconveniente y la causa de los mayores errores sea que CORMIX solo puede calcular tipos simples de flujo. Cualquier clase de flujo se simula como una sucesión de tipos simples de flujo en los que se desprecia la influencia de la mayoría de las variables. Y ya se explicó antes que generalmente no son aplicables simplificaciones tan fuertes. Por ejemplo, para estudiar un chorro perpendicular a una corriente solo disponemos de un módulo aplicable a chorros poco desviados y otro para chorros muy desviados, porque son los casos asintóticos los únicos para los que es posible obtener soluciones simples, pero en la práctica una buena parte de la trayectoria puede considerarse medianamente desviada, por lo que no es aplicable ninguna de las dos expresiones anteriores. Otro ejemplo es el caso ya comentado de chorros sumergidos múltiples para el que CORJET solo dispone de dos módulos, uno para cuando no hay interacción entre los chorros y otro para cuando la interacción es completa hasta el punto de formar un único chorro de sección rectangular, mientras que en la práctica puede suceder que en la mayor parte de la trayectoria incluso hasta el punto de impacto con el fondo exista una interferencia parcial.

Como conclusión puede decirse que el sistema experto CORMIX es una buena herramienta para que usuarios inexpertos adquieran de forma fácil y rápida un cierto conocimiento de las

clases y tipos de flujo que pueden darse en el entorno de cada dispositivo de vertido siempre que se lea y analice todos los mensajes que el sistema va proporcionando. Pero en según qué casos y en determinados puntos de la trayectoria los errores pueden ser muy importantes, mucho mayores que ese $\pm 50\%$ que sus creadores aseguran que se puede obtener como media. Y para conocer en qué casos y en qué puntos son esperables estos errores mayores sí hay que saber hidrodinámica.

Conviene remarcar aquí que la amplia difusión del sistema CORMIX produce en los usuarios menos expertos la falsa sensación de que sus resultados son muy fiables y que han sido muy contrastados. En el caso de los vertidos de desaladoras los resultados se han contrastado con no más de media docena de series de experimentos y en algunas de éstas los resultados del CORMIX se desvían significativamente de los obtenidos mediante ensayos.

3.2.3 Márgenes de seguridad en el uso de las herramientas de predicción

Los márgenes de seguridad que se vienen aplicando en la barrera de seguridad constituida por el uso de herramientas de predicción son esencialmente los siguientes:

- Aceptar sólo el empleo de herramientas cuya fiabilidad de predicción haya sido suficientemente contrastada y solo cuando se empleen para los tipos de flujos y en los tramos de trayectorias para los que son fiables. Esto obliga a limitar el abanico de tipos de dispositivo de vertido que puede contemplar el proyectista o a utilizar modelos físicos a escala reducida para el proyecto específico de que se trate.
- Comprobar durante el procedimiento de evaluación del impacto ambiental o durante la tramitación de la autorización de vertido la correcta aplicación de dichas herramientas.
- No contar con los incrementos de dilución que se producen en aquellos tramos para los que no existen herramientas de predicción fiables incluso aunque se tenga constancia de que efectivamente se producen.

El primer criterio persigue evitar que el empleo de herramientas poco contrastadas pueda dar resultados erróneos contrarios a la seguridad. Por la aplicación de este criterio solo se están considerando aceptables por el momento:

- a) La aplicación de los programas UM3, JETLAG/VISJET, CORJET o MEDVSA-IJETG para el estudio de chorros que no interacciones entre sí, que no impacten con la superficie y solo antes de que impacten con el fondo. También se considera aceptable la aplicación de cualquier otro programa, comercial o de autor, basado en las mismas premisas que estos siempre que se justifique que proporcionan resultados similares.
- b) La aplicación de cualquier programa, comercial o de autor, basado en las mismas premisas que el módulo 310 de D-CORMIX o en las ecuaciones de los artículos mencionados en la nota al pie de la pagina 65 siempre que se aporten resultados



CEDEX

experimentales de ensayos o de desaladoras en funcionamiento que sirvan para validar los resultados del programa.

- c) La aplicación de las formulaciones basadas en el Análisis Dimensional mencionadas en el apartado 4.2.2.2 siempre que se apliquen dentro de los rangos de valores de las variables adimensionales que se utilizaron en los ensayos que sirvieron de base a dichas formulaciones. Estas son aplicables exclusivamente a puntos especiales del campo cercano (máxima elevación del chorro, punto de impacto con el fondo, etc.) en el caso de chorros aislados (o múltiples que no interaccionen), verticales o formando un ángulo de 60° sobre la horizontal en un medio homogéneo estático o en movimiento.
- d) La utilización de modelos físicos a escala reducida de proyectos concretos, en las condiciones que hayan sido simuladas y siempre que puedan desprejiciarse los efectos de escala.

El segundo criterio está orientado a evitar que por desconocimiento, por equivocación o por cualquier otra causa se apliquen herramientas aceptables de una forma errónea. Para la aplicación de este criterio durante el procedimiento de evaluación de impacto ambiental, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental cuenta con el apoyo del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX en base a una Encomienda de Gestión, colaboración que ha resultado muy eficaz durante los últimos años.

El tercer criterio es muy conservador ya que consiste en eliminar en la predicción cualquier incremento de dilución que pueda producirse en alguna fase de la evolución del vertido si no se utiliza un procedimiento fiable para calcularla, bien porque aún no exista o bien porque el promotor no lo presenta. Por aplicación de este criterio suelen quedar fuera de consideración entre otros los siguientes fenómenos:

- o La mezcla transversal que se produce al impactar el chorro con el fondo. A este respecto conviene recordar que en cualquier sección transversal de un chorro, la dilución promediada en toda la sección es muy aproximadamente igual al doble de la dilución en el eje del chorro. Parece lógico suponer, y así lo confirman los ensayos en modelo físico realizados en el CEDEX, que al formarse la corriente hiperdensa, la dilución se parece más a la promediada que a la que existía en el eje. Por cierto, las diluciones que proporciona el CORJET son diluciones en el eje, mientras que las que calculan el UM3 y el JETLAG/VISJET son diluciones promediadas en la sección transversal.
- o El impacto con la superficie. No se permite que el chorro impacte con la superficie, aparte de por motivos estéticos, porque no existen formulaciones que permitan calcular la dilución en estos casos. Sin embargo, como se dijo más adelante, en una situación como ésta se obtendrá una dilución intermedia entre la que se obtendría con un chorro de las mismas características en un medio con la superficie libre más elevada y la de un chorro con menor cantidad de movimiento cuyo contorno fuera tangente a la superficie libre en su posición real, siendo esta última la opción que suele adoptarse.



- El resalto hidráulico de la corriente de fondo. Tras el impacto con el fondo el flujo pasa de ser casi vertical a ser casi horizontal, pero manteniendo sus velocidades (conservación de la energía cinética), y estas velocidades son casi siempre mayores que la velocidad crítica para la pendiente del fondo, por lo que se produce un resalto hidráulico con pérdida de energía del flujo (que se emplea en crear turbulencias) y, lo que es más importante, con un incremento significativo y muy localizado de la dilución.
- La alimentación de la capa hiperdensa en el campo lejano. A pesar de que, como se expuso en la sección anterior, existen formulaciones aceptables para esta fase de flujo si se utilizan adecuadamente, en los estudios de impacto ambiental revisados en los últimos años no suelen presentarse, o se presentan formulaciones que no se consideran adecuadas, como por ejemplo, cálculos con el sistema CORMIX que emplean módulos no contrastados para vertidos hiperdensos.
- La variabilidad de las corrientes, del oleaje y de las condiciones de operación de la planta. No se están presentando en los estudios de impacto ambiental aplicaciones de las herramientas de predicción con enfoque estadístico. Por ello los resultados se están comparando con el límite más restrictivo (el que puede sobrepasarse un 25% del tiempo) en lugar de hacerlo con el que puede sobrepasarse sólo un 5%.

El efecto combinado de todos estos fenómenos puede multiplicar por un factor superior a 2 las diluciones calculadas con las herramientas de predicción para el campo cercano¹⁸.

Este margen de seguridad se considera excesivo por lo que se recomienda la puesta a punto y utilización de herramientas para estimar estos incrementos de dilución de una manera fiable, o al menos, para flujos idealizados parecidos que, estando todavía del lado de la seguridad, permitan reducir este margen tan amplio.

3.3 Programa de vigilancia ambiental apropiado para vertidos de desaladoras

Dadas las incertidumbres existentes sobre los métodos de cálculo que se están utilizando, los proyectos de construcción y explotación de plantas desaladoras deben incluir un programa de vigilancia ambiental exhaustivo (sobre todo durante los primeros meses). El objetivo de este programa es el de diseñar una serie de pautas de cara a la protección de las posibles zonas sensibles (especialmente de las praderas de fanerógamas marinas *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*) frente a los excesos de salinidad del medio marino generados por los vertidos hipersalinos.

Considerando el caso más típico en el Mediterráneo, un vertido hipersalino mediante emisario submarino con diversas bocas difusoras y que pudiera afectar a praderas de fanerógamas

¹⁸ Y por un factor superior a 4 las diluciones en el eje calculadas con el módulo CORJET del sistema CORMIX



marinas, el plan de vigilancia y control que se viene exigiendo tiene, al menos, los siguientes contenidos:

- Control de la salinidad en el medio receptor mediante medidores autónomos de suficiente precisión. Se determinarán una serie de estaciones fijas de muestreo donde se instalarán los medidores cuyos resultados se analizarán semanalmente para comprobar que se cumplen los criterios de calidad establecidos. La localización de estas estaciones vendrá determinada en principio, por el borde de las praderas de fanerógamas más próximo al punto de vertido, pero hay que tener en cuenta la tendencia del efluente a producir una corriente hiperdensa que se desplaza por el fondo cuesta abajo en la dirección de la máxima pendiente.

Se instalará también en alguna de las estaciones de muestreo un correntímetro autónomo que mida la corriente a 1 metro del fondo.

- Control en el efluente de los siguientes parámetros: pH, oxígeno disuelto, turbidez y nitratos. Estas mediciones se harán al menos una vez a la semana y siempre que se produzca alguna variación significativa respecto al funcionamiento normal de la planta (por ejemplo, durante las operaciones de limpieza de filtros). Los valores medidos deberán cumplir los niveles de emisión que fijen, las normativas estatal o autonómica.
- Control de la dispersión del efluente. Con objeto de comprobar las predicciones realizadas sobre la dispersión del efluente, dentro de las primeras semanas de funcionamiento de la planta y coincidiendo con unos días de calma (altura de ola significativa inferior a 0.2 m) se realizará una campaña de medidas para determinar el campo de salinidades en el entorno de la zona de vertido. Las medidas se orientarán a determinar:
 - a) Los límites superior y laterales de la zona afectada por el incremento de salinidad en las proximidades del dispositivo de vertido. Se entenderá como tal todo punto situado a menos de 100 metros de cualquier punto del tramo difusor.
 - b) La salinidad existente en el punto de impacto con el fondo del chorro que sale por la boca de descarga situada más próxima al centro del tramo difusor, para el caso de vertidos a través de emisario submarino con tramo difusor.
 - c) Los perfiles verticales de salinidad existentes en tres puntos situados a distancias de 100 m, 300 m y 1000 m del centro del dispositivo de vertido, medidas a lo largo del eje de la capa hiperdensa en el sentido de avance de ésta, con especial detalle en el entorno de la superficie de separación entre la capa hipersalina del fondo y el agua de mar.
- Control de las variables de flujo. Con el objeto de poder comprender las causas de eventuales anomalías detectadas en los resultados de las medidas de salinidad y también para estudiar una posible reducción posterior del número de medidas a

realizar en el mar durante el seguimiento, se medirán a intervalos no superiores a tres horas las siguientes variables:

- Salinidad del agua de la toma (s_t) y del vertido (s_v)
- Caudal producto (Q_p)
- Caudal de rechazo (Q_e)
- Caudales de toma para la planta (Q_t) y, en su caso, para prediluir el rechazo (Q_D). Como complemento de dicha información y con objeto de contrastar la calidad de la misma, se medirá también la salinidad del rechazo (s_e) y la del agua de mar no afectada por el vertido (s_a).
- Control del estado de las biocenosis críticas, es decir, de aquellas que estén determinando la dilución mínima necesaria en cada caso concreto.

El programa de vigilancia debe de ajustarse en cada caso en función de la presencia y localización de comunidades a proteger, determinado el número de medidores autónomos de salinidad y de estaciones de control de las praderas y siempre con el objetivo de proteger las zonas sensibles frente a los excesos de salinidad del medio marino generados por los vertidos hipersalinos.

Los márgenes de seguridad en este caso son:

- a) Se suele imponer la colocación de estaciones de control en la frontera de las zonas ocupadas por las comunidades a proteger incluso cuando las herramientas de cálculo indican que están lejos de la zona potencialmente afectada por los incrementos de salinidad significativos.
- b) Además de controlar dichas fronteras, se imponen numerosas mediciones en el campo cercano dado el poco conocimiento que se tenía de los procesos de dilución que tienen lugar tras el vertido. La mejora en el conocimiento de dichos procesos debería tener como consecuencia la reducción de este conjunto de medidas.

3.4 Disponibilidad de una reserva de dilución y existencia de un protocolo de actuación

Esta barrera de protección consiste en que la planta desaladora se diseñe de forma que si durante el programa de vigilancia se detecta un incumplimiento de los límites de salinidad o de otros parámetros controlados, pueda activarse un protocolo de actuación que, entre otras cosas, permita disminuir la salinidad del efluente y/o aumentar la dilución tras el vertido hasta que se corrija el incumplimiento, considerando incluso la reducción de la producción de agua producto si resulta imprescindible.

El margen de seguridad en este caso es la propia disponibilidad de la reserva de dilución y la garantía de su correcta utilización por la existencia de un protocolo de actuación. El promotor debe proponer para su aprobación junto con el programa de vigilancia ambiental, el protocolo de actuación que pondrá en marcha en caso de que se detecte un incumplimiento.



Si las mediciones de los conductivímetros autónomos indican que en alguno de los puntos de medida se están sobrepasando los límites de salinidad admisibles, durante dos semanas consecutivas, o tres en cualquier orden durante las últimas seis semanas, se pondrá en marcha el protocolo de corrección del exceso de salinidad.

Cuando se active el protocolo, en primer lugar se investigará la causa de la anomalía y si se encontrara y fuera corregible, se corregirá. En caso contrario hay que reducir el exceso de salinidad del vertido o aumentar la dilución obtenida tras el vertido.

El exceso de salinidad puede disminuirse de varias maneras dependiendo del sistema de vertido utilizado. De forma general para todos los sistemas de vertido, se puede disminuir la salinidad del efluente mediante una dilución previa de la salmuera con agua de mar, lo que disminuye el índice global de conversión de la planta y también la dilución necesaria tras el vertido. Para ello debe preverse (quizás incluso construirse) la instalación de predilución (incluyendo la instalación de más bocas de descarga de las estrictamente necesarias según los cálculos, en el caso de vertidos mediante emisario submarino).

Para el caso concreto de vertido sumergido mediante chorros ascendentes la dilución obtenida en las proximidades de la zona de vertido por efecto de la propia descarga es aproximadamente proporcional a la velocidad de salida del efluente e inversamente proporcional a la raíz cuadrada del exceso de salinidad de éste con respecto a la del mar. Para una sección de descarga dada (es decir, sin modificar el número de bocas de descarga), el exceso de salinidad determinado por cualquiera de las sondas de medida será aproximadamente proporcional al cociente $\sqrt{(\Delta S_0)^3} / Q_v$ siendo, Q_v el caudal total vertido por el emisario ($Q_e + Q_D$) e ΔS_0 el exceso de salinidad del efluente respecto a la del mar.

Por tanto, para la corrección del exceso de salinidad en este tipo de vertidos se puede proceder a disminuir el parámetro de carga ($\sqrt{(\Delta S_0)^3} / Q_0$) dividiéndolo por un factor que será igual al mayor de los valores del exceso relativo de salinidad e_{25} o e_5 de todos los puntos de medida de control de la zona a proteger, con un valor mínimo de 1,15. Los valores de e_{25} y de e_5 se calculan por las siguientes expresiones:

$$e_{25} = \frac{S_{25} - S_a}{S_{25,lim} - S_a} \quad e_5 = \frac{S_5 - S_a}{S_{5,lim} - S_a}$$

donde S_a es la salinidad del agua de mar en la zona de estudio, $S_{25,lim}$ la salinidad límite que no podrá superarse en más del 25% de las observaciones, $S_{5,lim}$ la salinidad límite que no podrá superarse en más del 5% de las observaciones y S_{25} , S_5 las salinidades sobrepasadas por el 25 % y el 5% de las observaciones.

La dilución obtenida tras el vertido puede aumentarse en el caso de un emisario submarino aumentando el caudal que sale por cada boca de descarga, lo cual puede hacerse aumentando



la producción, aumentando el caudal de predilución manteniendo la producción, reduciendo la producción y derivando el caudal que tendría que pasar por los bastidores cerrados hacia el vertido o manteniendo la producción y el caudal de predilución pero cerrando un número determinado de bocas difusoras.

Si después de esta operación vuelven a darse las condiciones de activación del protocolo, se repetirán los pasos 1 y 2 anteriores, y así tantas veces como sea necesario.

Si tras cualquiera de las operaciones realizadas para corregir el exceso de salinidad requeridas por el presente protocolo se encontrara que durante dos semanas consecutivas el mayor valor de los parámetros e_{25} y e_5 fuera inferior a 0,85 se podría aumentar el parámetro de carga en un porcentaje no superior al 15%.

La aplicación de las herramientas de predicción (modelos matemáticos o físicos) a diferentes alternativas de gestión de la planta, y más concretamente, de las características del efluente, constituye sin duda una ayuda muy útil para decidir el protocolo de actuación más adecuado en cada caso concreto y también para optimizar la explotación de la planta teniendo en cuenta incluso el consumo de energía de las diferentes alternativas.

4 RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Resumen

El objeto de este Informe es realizar un análisis del sistema de protección del medio marino frente a los vertidos de las plantas desaladoras que se ha venido configurando en España durante la última década y derivar de dicho análisis un conjunto de conclusiones y recomendaciones a proponer a la DGCEA para su actualización y mejora. No obstante, conviene hacer notar que el CEDEX, aunque posea experiencia y prestigio reconocidos en este campo, no tiene competencia alguna para aprobar criterios de protección ambiental o metodologías de cálculo que se consideren aceptables para una evaluación de impacto ambiental o una autorización de vertido. Esta competencia corresponde por completo a las diferentes Autoridades Ambientales, aunque como es lógico, éstas pueden pedir apoyo científico y técnico al CEDEX para que les presente propuestas. Ejemplos de este modo de proceder lo constituyen la vigente *Instrucción para el proyecto de conducciones de vertido de aguas residuales desde tierra al mar* o las *Recomendaciones para la gestión de los materiales dragados en los puertos españoles*, cuyas versiones de ponencia fueron redactadas por el CEDEX, que también participó en el proceso de discusión y mejora hasta la aprobación por los órganos competentes.

Con el objeto de facilitar la comprensión del informe se ha considerado conveniente repasar algunos aspectos de los vertidos al mar de las plantas desaladoras. En particular se han descrito las características del efluente, los sistemas de vertido al mar (tanto en la línea de costa como a través de emisarios submarinos) y el comportamiento del efluente tras su vertido,



analizando con cierto detalle la influencia tanto en el campo cercano como en el campo lejano de diversos parámetros: caudal vertido, flujo de energía cinética, flujo de cantidad de movimiento, diferencia de densidad, corrientes, oleaje, interacción con el fondo, con la superficie libre, con los contornos laterales o entre chorros próximos. Se han deducido algunas expresiones para calcular tanto la salinidad relativa del vertido (s_v / s_a) como el exceso relativo de salinidad ($\Delta s_v / s_a$). Se hacen algunas precisiones relativas al concepto de dilución y se dan fórmulas para calcular la dilución mínima necesaria.

Durante la última década se han venido proyectando muchas desaladoras de agua de mar de gran tamaño cuya trascendencia económica, social e incluso política ha hecho que su desarrollo se esté produciendo con una gran celeridad. Desde un punto de vista ambiental, uno de los dos principales problemas que presentan a priori las desaladoras¹⁹ es el posible impacto ambiental del vertido de las aguas hipersalinas, por lo que resulta imprescindible aplicarles un sistema de control que asegure la protección del medio marino. Sin embargo, actualmente no existe ninguna norma estatal ni autonómica que regule específicamente el vertido de las plantas desaladoras. Esta situación ha hecho que las distintas Autoridades ambientales hayan ido estudiando caso por caso los proyectos sobre los que tenían que pronunciarse y que hayan ido tomando decisiones aplicando criterios que no siempre han resultado consistentes y armónicos entre ellas.

En el presente informe se explica el modelo de sistema de protección del medio marino frente a los vertidos de las plantas desaladoras que se ha ido configurando a nivel estatal durante las últimas décadas, inspirado en parte por las opiniones que el CEDEX ha expresado en los numerosos Informes Técnicos que ha emitido para la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental relativos a los contenidos de las DIAs de las desaladoras que han sido sometidas al procedimiento reglado de Evaluación de Impacto Ambiental durante este período.

Dado el escaso conocimiento que sobre el comportamiento del efluente vertido y sobre su impacto ambiental se tenía en el año 2000 cuando empezó a plantearse la construcción de grandes desaladoras en la costa mediterránea (por ejemplo, las del programa AGUA) y la urgencia de disponer de criterios de calidad para evaluar ambientalmente estos proyectos sin retrasar excesivamente su construcción y puesta en operación, el modelo de sistema de protección se ha basado en los siguientes principios:

- El establecimiento provisional de un margen de seguridad global amplio como consecuencia de las incertidumbres existentes en aquel momento, lo que se ha traducido en:
 - La existencia de varias líneas o barreras de seguridad, de forma que si falla una, existan otras que permitan evitar los efectos negativos del vertido.
 - La inclusión de un margen de seguridad en cada una de estas barreras para tener en cuenta las incertidumbres sobre los datos y las herramientas de diseño.

¹⁹ El otro es el consumo de energía.



- El propósito de ir adecuando los márgenes de seguridad al grado de conocimiento del problema que se tenga en cada momento, permitiendo la reducción de los requerimientos conforme éste vaya mejorando para mantener el margen de seguridad global dentro de límites razonables a fin de evitar sobrecostes injustificados en el proyecto, la construcción o la explotación .

Se han establecido las siguientes cuatro barreras de seguridad:

- a) Establecimiento de límites de emisión y de normas de calidad apropiados para vertidos de desaladoras
- b) Empleo de herramientas para el diseño ambiental del dispositivo de vertido (modelos matemáticos o modelos físicos a escala reducida) que, simulando el comportamiento del vertido, permitan predecir los incrementos de salinidad y, en su caso, las concentraciones de otros contaminantes, y comprobar que se cumplen las normas de calidad.
- c) Ejecución de un programa de vigilancia ambiental apropiado para vertidos de desaladoras y, más específicamente, para el sistema de vertido elegido para la desaladora en cuestión
- d) Disponibilidad de una reserva de dilución para corregir un eventual incumplimiento de los límites establecidos detectado por el programa de vigilancia y existencia de un protocolo de actuación que establezca cuándo y cómo debe hacerse uso de dicha reserva.

Respecto al segundo de los puntos anteriores cabe señalar que el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, desde el año 2000 y con financiación de diversas fuentes²⁰, ha realizado un gran número de ensayos de simulación de vertidos de salmueras en modelos físicos a escala reducida orientados a proporcionar una formulación basada en el Análisis Dimensional que mejore las existentes hasta este momento para la predicción de las diluciones alcanzables con diferentes dispositivos de vertido. En los próximos meses verá la luz un informe del CEDEX con los resultados de los ensayos realizados hasta ahora y las expresiones para la predicción de las diluciones que se han obtenido en base a ellos.

Cada uno de los cuatro apartados del capítulo 3 se dedica a analizar en profundidad cada una de estas cuatro barreras, sus fundamentos, el estado actual del conocimiento y los márgenes de seguridad que a día de hoy se vienen imponiendo en España para cada una de ellas.

4.2 Conclusiones

²⁰ Aguas de la Cuenca del Segura, Mancomunidad de los Canales del Taibilla, Dirección General del Agua, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y ACUAMED.



1. En una desaladora con o sin predilución, tanto la salinidad relativa del vertido (s_v / s_a) como el exceso relativo de salinidad ($\Delta s_v / s_a$) dependen exclusivamente del índice de conversión global de la planta, que puede calcularse simplemente dividiendo el caudal de agua producto por el caudal de toma (suma del que va a la planta para proceso y del que se mezcla con el efluente para prediluir), variables estas que suelen medirse siempre de forma permanente en las plantas desaladoras. Nótese que no es necesario medir ninguna salinidad
2. Los índices de conversión de proceso en las plantas desaladoras de agua de mar suelen oscilar entre un 40% y un 55%, lo que se traduce en salinidades relativas de entre 1,67 y 2,22 (excesos relativos de salinidad de entre 0,67 y 1,22). Para una salinidad del agua de captación de 37,5 psu,²¹ típica del Mediterráneo, esto supone un efluente con salinidades comprendidas entre 62,5 y 83,3 psu. Este parámetro es importante porque de él dependerá la densidad sumergida del efluente y por tanto, su comportamiento en el medio receptor.

El índice de conversión global es más variable porque depende del grado de predilución que se haya elegido en cada proyecto concreto.
3. El comportamiento del efluente cuando se vierte al mar depende naturalmente del sistema de vertido utilizado. Estos se pueden clasificar en dos grupos: los que se realizan sobre la misma línea de costa y los que se realizan en el fondo del mar. Los primeros tienen con respecto a los segundos la ventaja de que pueden construirse desde tierra evitando la peligrosidad e incertidumbre que presentan las obras marítimas, pero tienen el inconveniente de que el contacto con los volúmenes de agua de mar necesarios para conseguir las diluciones buscadas es mucho más difícil, ya que los calados son menores y el acceso del agua de mar para diluir se produce solo por un semiespacio. Como consecuencia, los primeros son más económicos pero menos eficientes para provocar las diluciones
4. El progresivo aumento de tamaño de las desaladoras hace que sus necesidades de dilución del efluente, salvo casos de condiciones especialmente favorables, no puedan ya satisfacerse con vertidos en la línea de costa, por lo que se ha ido produciendo una migración hacia sistemas más eficaces. Las mejoras se vienen produciendo en tres direcciones principales: a) Vertidos en el fondo del mar mediante tramos difusores con numerosas bocas de descarga (por ejemplo, la desaladora Delta de la Tordera en Girona, las de Valdelentisco y San Pedro del Pinatar en Murcia o la mayoría de las desaladoras actualmente en proyecto o construcción: Torrevieja, Águilas, Campo de Dalías, Cuevas de Almanzora, Fuengirola, Ceuta, etc.); b) Vertidos combinados con las aguas residuales de otras instalaciones (por ejemplo, la desaladora de Carboneras, que mezcla su efluente con el de la central térmica de Endesa, o la del puerto de Escombreras en Cartagena, que lo mezcla con el de la central térmica de AES Energía Cartagena, o la de Barcelona, que lo mezcla con el de la depuradora del Prat de Llobregat) y c) Vertidos con predilución, mezclando el efluente, antes de su vertido al mar, con un caudal de agua de mar extraído

²¹ psu: "practical salinity unit" o unidad práctica de salinidad. Es la unidad definida por la UNESCO y equivale aproximadamente a 1 g de sal por kg de muestra, que también puede expresarse como 1‰

expresamente para este fin (por ejemplo, las desaladoras de Alicante o la desaladora de Jávea).

5. La dilución S se define normalmente como el cociente entre la masa total M de una muestra y la masa M_e de efluente contenido en esa muestra. Su inverso es por tanto la fracción másica o concentración relativa del efluente en la muestra, y suele designarse con el símbolo p . Por lo tanto, si una muestra es efluente puro se tiene $p = 1$ y $S = 1$; si la muestra es agua del medio receptor se tiene $p = 0$ y $S = \infty$. Entre estos dos extremos la muestra tiene p partes de efluente y $(1 - p)$ partes de agua ambiental.

6. A veces se llama dilución D al cociente entre la masa de agua ambiental y la masa de efluente: $D = \frac{1-p}{p}$. Es fácil comprobar que $D = S - 1$, con lo que $p = \frac{1}{S} = \frac{1}{D+1}$. Para

diluciones grandes (por ejemplo, las de las aguas residuales urbanas) la diferencia relativa entre ambas definiciones no es importante (por ejemplo, entre 99 y 100), pero para diluciones pequeñas como las que se manejan en los vertidos de las desaladoras, sí lo son (por ejemplo, entre 4 y 5). A este respecto conviene hacer notar que en el caso de las desaladoras que hacen una predilución del efluente con agua de mar antes de verter la mezcla al mar, se ha hecho costumbre utilizar la dilución D . Para evitar la ambigüedad se recomienda que en estos casos se exprese en la forma $D : 1$, seguido de “(D partes de agua de mar por cada parte de efluente)”. En general es preferible el uso de la dilución S

7. Las normas de calidad vienen expresadas como un valor s_{lim} máximo de la salinidad o como un incremento relativo máximo $r_{lim} = \frac{(s_m - s_a)_{lim}}{s_a}$.

En el primer caso, la dilución necesaria se puede calcular mediante:

$$S_{min} = \frac{s_e - s_a}{s_{lim} - s_a} = \frac{s_a}{s_{lim} - s_a} \cdot \frac{R}{1 - R}$$

y en el segundo mediante:

$$S_{min} = \frac{1}{r_{lim}} \cdot \frac{R}{1 - R}$$

Así, por ejemplo, para una desaladora con $R = 0,45$, la dilución necesaria para cumplir el requerimiento impuesto por algunas normas autonómicas de que el máximo incremento sea de un 10% ($r_{lim} = 0,1$) será de

$$S_{min} = \frac{1}{0,1} \cdot \frac{0,45}{1 - 0,45} = 8,2$$

Si la desaladora está en el Mediterráneo ($s_a = 37,5 \text{ psu}$) y existen praderas de *P. oceanica* cerca, la dilución que debe superarse al menos el 75% del tiempo es



$$S_{25,\min} = \frac{37,5}{38,5 - 37,5} \cdot \frac{0,45}{1 - 0,45} = 30,7$$

y si la pradera es de *C. nodosa*:

$$S_{25,\min} = \frac{37,5}{39,5 - 37,5} \cdot \frac{0,45}{1 - 0,45} = 15,4$$

8. Conviene destacar el hecho de que si la norma de calidad viene expresada como un incremento relativo máximo de salinidad, la dilución necesaria puede calcularse (y controlarse durante el programa de vigilancia) conociendo exclusivamente el índice de conversión de la planta, no siendo necesario por lo tanto determinar la salinidad del medio receptor s_a . Por el contrario, si viene expresada como una salinidad absoluta máxima, esta determinación es imprescindible, y la dilución necesaria, incluso para un valor fijo del índice de conversión, depende fuertemente del valor obtenido de s_a , más cuanto más se acerca la salinidad del medio receptor a la salinidad límite como puede verse en la tabla siguiente.

DILUCIÓN NECESARIA PARA UN VERTIDO CON UN ÍNDICE DE CONVERSIÓN DEL 45%				
s_{lim} (psu)	s_a (psu)			
	36.5	37.0	37.5	38.0
38.0	19.9	30.3	61.4	Infinita
38.5	14.9	20.2	30.7	62.2
39.0	11.9	15.1	20.5	31.1
39.5	10.0	12.1	15.3	20.7
40.0	8.5	10.1	12.3	15.5
40.5	7.5	8.6	10.2	12.4

9. La salinidad del medio receptor presenta variaciones naturales (espaciales y temporales) del orden de algunas décimas de psu, lo cual plantea dos dificultades:

- Para el proyecto, porque requiere realizar mediciones en varios puntos de la zona potencialmente afectable y a lo largo de bastante tiempo (un año o más) con el fin de proyectar el vertido de forma que se tenga capacidad de dilución suficiente para el caso más desfavorable.
- Para la explotación, porque, aun disponiendo de la capacidad suficiente, conseguir mayores diluciones tiene un coste adicional²², por lo que se intentará realizar el vertido de forma que se obtenga la dilución estrictamente necesaria en cada momento. Esto requiere medir continuamente la salinidad del medio sin afectar para poder ajustar la explotación (índice de conversión global) al exceso de salinidad admisible en cada momento.

Por otra parte, los errores en la determinación de la salinidad con equipos corrientes y metodologías simples son también de algunas décimas de psu, por lo que la determinación

²² Por ejemplo, mayor energía de bombeo o trabajos submarinos para cerrar bocas de descarga.



del valor de la salinidad s_a del medio receptor en cada caso concreto presenta bastante incertidumbre. Si el criterio de calidad aplicable limita el valor absoluto de la salinidad (aunque sea en términos probabilísticos), esta incertidumbre se traslada de forma muy amplificada (véase el cuadro anterior) a la determinación de la dilución necesaria, cosa que no ocurre si el criterio de calidad limita el incremento relativo de salinidad.

Así, por ejemplo, si $s_{lim} = 38,5$ psu (valor establecida actualmente como límite del percentil del 25% para las praderas de P. oceánica) y $s_a = 37,5$ psu (valor típico en la costa mediterránea levantina), la dilución necesaria es de 30,7. Si por los errores de medida durante la caracterización del medio receptor el equipo redactor del proyecto concluye que $s_a = 37,0$ psu, se proyectaría el dispositivo de vertido para alcanzar una dilución de tan sólo 20,2. Si por el contrario se hubiera obtenido $s_a = 38,0$ psu, el proyecto se haría para una dilución de 62,2.

A la vista de esto, no parece conveniente que una variabilidad tan grande de una magnitud de diseño y control de operación tan importante como la dilución dependa tanto de una determinación suficientemente precisa de la salinidad del medio llevada a cabo por el promotor. Es mejor que, o bien se establezcan límites expresados como incrementos relativos máximos de salinidad, que conducen a diluciones objetivo que dependen solo del índice de conversión (que se calcula a partir de variables más fáciles de medir y registrar como son los caudales de toma y de agua producto), o bien se establezcan por las Autoridades Ambientales salinidades nominales del medio receptor para los diferentes frentes costeros, determinadas éstas por especialistas en la medición precisa y frecuente de dicha variable.

Establecimiento de límites de emisión y de normas de calidad

10. Para el establecimiento de límites de emisión y de normas de calidad se dispone de cuatro instrumentos: la normativa aplicable, la Declaración de Impacto Ambiental (DIA), la Autorización de Vertido (AV) y la realización de estudios para determinar umbrales de tolerancia.

11. La normativa aplicable ha sido analizada en detalle en otro informe del CEDEX²³. Las principales conclusiones son:

- No existe ninguna normativa que regule específicamente los vertidos de las desaladoras.
- No se han establecido límites de emisión para el contaminante más significativo de un vertido de este tipo, esto es, el exceso de salinidad respecto a la del agua de mar, y

²³ *Normativa aplicable a los vertidos al mar de las plantas desaladoras*. Informe Técnico del CEDEX para ACUAMED. Enero de 2011.



- El parámetro salinidad sólo se menciona como objetivo de calidad en una norma estatal (el Real Decreto 345/1993, que en su anejo IV establece como condiciones imperativas que la variación de salinidad provocada por un vertido en las aguas para cría de moluscos afectadas por dicho vertido no deberá ser superior a un 10 por 100 de la salinidad medida en las aguas no afectadas y que el valor máximo deberá ser inferior a 40‰ y como condición guía, que la salinidad máxima debe ser inferior a 38‰) y en tres normas autonómicas (en Andalucía, la Orden del 14 de febrero de 1997; en Cantabria, el Decreto 47/2009, de 4 de junio, y en Galicia, la Ley 8/2001, de 2 de agosto), que coinciden en establecer como máxima variación admisible un 10% del valor medido en aguas no afectadas por el vertido, aunque con ligeras diferencias en la forma de expresarlo.

12. Las DIA que se han aprobado en los últimos años establecen de forma reiterada que no podrán sobrepasarse la concentración $s_{25, lim}$ en más de un 25% de las observaciones ni la concentración $s_{5, lim}$ en más de un 5% de las observaciones, donde $s_{25, lim}$ y $s_{5, lim}$ tienen los valores de la tabla siguiente:

Habitat	$s_{25, lim}$	$s_{5, lim}$
Praderas de <i>Posidonia oceanica</i>	38,5	40,0
Praderas de <i>Cymodocea nodosa</i>	39,5	41,0

13. Para los vertidos al mar y a los estuarios, la autorización de vertido debe contener límites de emisión cualitativos y objetivos de calidad. Por lo tanto, es responsabilidad del titular del vertido que se cumplan los objetivos de calidad, por lo que un incumplimiento de estos podría ser motivo de sanción. Sin embargo, para los vertidos a ríos, lagos y embalses sólo se imponen límites de emisión, pero cuantitativos calculados de forma que se cumplan las normas de calidad del medio receptor. En este caso, si se detecta un incumplimiento de las normas de calidad es dudoso que se pueda sancionar al titular del vertido si éste está cumpliendo con los límites de emisión. Lo que procede entonces es modificar los términos de la autorización de vertido.

Esta diferencia de matiz tiene trascendencia también sobre quién debe correr con los gastos de las campañas de medidas para comprobar el cumplimiento de los objetivos de calidad (que suelen ser bastante elevados) y sobre quién tiene la responsabilidad de acertar en el juicio sobre la idoneidad de las herramientas de simulación utilizadas para pasar de las normas de calidad a los límites de emisión.

14. Actualmente se están realizando dos estudios para determinar el umbral de tolerancia de las praderas de *Cymodocea nodosa*, uno por la Universidad de Alicante por encargo de AcuaMed y otro por el Instituto Canario de Ciencias Marinas, como parte de un proyecto de investigación financiado por el Plan Nacional de I+D, proyecto en el que también participa el CEDEX.



15. En relación con los límites de emisión y los objetivos de calidad, se está aplicando un triple margen de seguridad: el primero, al pasar de los resultados experimentales sobre los efectos del incremento de salinidad a la decisión sobre el valor límite; el segundo, al aplicar los valores límite establecidos para comunidades para las que se han hecho estudios a otras comunidades todavía por estudiar, pero para las que existen evidencias de que son menos sensibles o de menor significación ecológica, y el tercero al aplicar los valores límite que pueden superarse un 25% del tiempo a las situaciones pésimas, que tienen probabilidades de ser excedidas mucho menores.

Tipos de herramientas de predicción. Ventajas e inconvenientes

16. El comportamiento de los efluentes líquidos vertidos al mar es muy complejo y sujeto a muchas variables que actúan simultáneamente: flujo completamente tridimensional, fuerte dependencia de las densidades, formación de interfases con altos gradientes de las variables, interacciones entre chorros, posibles recirculaciones, cambio de variables dominantes en distintas partes de la zona afectada, etc. Como consecuencia, en el momento actual no existe ninguna herramienta (salvo quizás un modelo físico específico para cada caso concreto) que permita estudiar dicho comportamiento con resolución y generalidad suficientes para todo el dominio afectado. Lo que existen son herramientas que permiten simular con aproximación razonable, o bien tipos de flujos geométrica e hidrodinámicamente simples, o bien partes de flujos más complejos en donde predomina la influencia de un pequeño número de variables.

17. Entre las ventajas de los modelos matemáticos basados en la aplicación del Análisis Dimensional están que se trata de expresiones simples, de carácter algebraico y que se puede obtener una para cada variable de interés sin necesidad de calcular lo que ocurre en todo el dominio. Por ejemplo, podemos obtener la expresión de la dilución en el punto de impacto con el fondo sin necesidad de resolver los detalles del complejo esquema de flujo que se produce en ese punto. El principal inconveniente es que cada expresión solo vale para un cierto rango de valores de las variables, pudiendo existir otros rangos en los que no resulta suficientemente aproximada ninguna de las expresiones simples²⁴; por ello se necesita cierta experiencia para una correcta aplicación del método. Otro inconveniente es el coste de realización de un gran número de ensayos cuando hay que determinar experimentalmente la forma de una función porque haya sido necesario retener un número de variables superior al número de dimensiones independientes. De lo cual se deriva que este método solo es práctico si el número de parámetros que define el fenómeno es relativamente pequeño. No sirve, por ejemplo, para resolver problemas en los que la densidad o la velocidad del medio receptor varían de forma irregular en función de la profundidad, pero sí son muy útiles cuando ambas variables son constantes. Pueden aplicarse incluso cuando hay estratificación siempre que ésta sea lineal, es decir, que el

²⁴ La experimentación es la única vía para determinar para qué rango de valores pueden desprejarse dichas variables. Incluso puede resultar que no sea aplicable ninguna de las fórmulas simples y que haya que retener más variables, con lo que hay que determinar la forma de la función.



gradiente de variación sea constante, porque esta constante se puede tener en cuenta también en el Análisis Dimensional del problema.

18. La mayoría de los tipos de flujo que se producen en el vertido de una desaladora son fuertemente tridimensionales, por lo que, aún suponiendo régimen permanente, resultan necesarias modelos numéricos para flujos 3D. Sin embargo, los modelos existentes en el mercado para simulaciones de este tipo, además de ser caros de adquirir y de utilizar adecuadamente, emplean métodos convencionales de integración numérica (diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos; en general, métodos basados en mallas estructuradas), que no pueden resolver adecuadamente la existencia de interfaces delgadas entre masas de agua con densidades muy diferentes como las que se producen tanto en el campo cercano, durante el contacto directo del efluente con el medio receptor, como en el campo lejano, al formarse la capa hiperdensa que se desplaza por el fondo. En efecto, en cada paso de tiempo la cantidad de propiedad (salinidad, temperatura, cantidad de movimiento) asociada a la partícula fluida situada en uno de los nodos de la malla se reparte entre los nodos de la celda a la que va a parar en su movimiento, lo que equivale a una difusión de origen puramente numérico que se añade a la que se produce por causas físicas. Para los tamaños de celdas que suelen utilizarse por criterios de convergencia y de eficacia del cálculo, la difusión numérica es bastante mayor que la difusión física, lo que hace que los resultados muestren salinidades máximas menores que las que existen en la realidad. Es decir, se trata de un error sistemático que está del lado opuesto al de la seguridad.

Existen técnicas para combatir este defecto (desplazamiento aleatorio de partículas, métodos SPH), pero hasta el momento resultan insuficientes.

19. La ventaja de los modelos de integración de ecuaciones en general, es que de una sola pasada permiten conocer el campo completo de valores de las variables. Los inconvenientes, que o adoptan hipótesis simplificadoras demasiado forzadas o consumen mucho tiempo (de ordenador y de los técnicos que lo usan), por lo que no se pueden modelizar muchas hipótesis (lo que impide hacer un planteamiento estadístico), que deben ser manejados por especialistas, que no permiten conocer las distribuciones de probabilidad de las variables (solo se calculan valores medios) y que con frecuencia dan una falsa sensación de exactitud de los resultados, fomentada (a veces de forma interesada) por las atractivas salidas gráficas de los resultados.

20. La ventaja principal de los modelos numéricos es que se pueden reproducir con detalle contornos complicados (laterales y del fondo) y variaciones fuertes de las condiciones iniciales y de contorno. Pero el comportamiento general está determinado por las condiciones de contorno que se impongan. Por lo tanto, si el usuario no introduce condiciones de contorno acertadas (por falta de experiencia, de tiempo o de presupuesto), obtendremos variabilidad espacial y temporal de gran detalle sobre unos valores medios erróneos.

21. Las principales aplicaciones de los ensayos en modelos físicos en relación con las herramientas para el diseño ambiental de dispositivos de vertido son las siguientes:



- Determinar y calibrar fórmulas basadas en el Análisis Dimensional para calcular las variables de mayor interés, incluyendo determinados parámetros estadísticos de sus correspondientes distribuciones de probabilidad.
- Calibrar los parámetros de control y validar los resultados de los modelos numéricos
- Simular a escala reducida dispositivos de vertido específicos

22. La principal ventaja de un modelo físico es que están presentes todos los fenómenos que ocurren en un flujo real y sus resultados lo están teniendo en cuenta incluso cuando sean tan complejos que todavía no se haya podido construir un modelo teórico para explicarlos. Otra ventaja más importante de lo que parece a primera vista es que con esta herramienta tanto promotores como detractores pueden ver físicamente lo que está ocurriendo.

Como inconveniente señalaremos que en general no es posible construir un modelo físico a escala reducida de forma que se cumplan las leyes de semejanza para todas las variables. Lo que se hace es conseguir que se cumpla la igualdad de los valores de los números adimensionales en los que intervienen las variables más influyentes y aceptar los errores derivados de que no se cumpla dicha igualdad para los menos influyentes. Estos errores se denominan “efectos de escala” y tienen la propiedad de que se hacen más pequeños cuanto más parecidas son los tamaños del modelo y del prototipo.

Otro inconveniente es que, en principio, tienen un coste mayor que los modelos numéricos. Pero si hay que utilizar modelos 3D y se quieren preparar salidas gráficas dinámicas para que el cliente pueda ver los resultados de una manera parecida a lo que se ve en un modelo físico (hoy en día es posible incluso conseguir salidas gráficas en relieve), los costes ya no son tan diferentes y siempre queda la duda de si lo que se está viendo es lo que ocurre en la realidad.

23. Se han considerado como herramientas matemáticas disponibles actualmente:

- los programas que permiten crear modelos numéricos y realizar simulaciones de una forma relativamente sencilla y que están disponibles en el mercado, y
- las fórmulas basadas en el Análisis Dimensional con coeficientes determinados experimentalmente y que se pueden encontrar en la literatura.

24. Entre los programas que permiten crear modelos numéricos, los más usados son, en orden creciente de precio: el programa UM3 de la plataforma VISUAL PLUMES (gratuito), el programa JETLAG/VISJET (220 € para un año en 2009) y el programa CORJET del sistema CORMIX (5.400 € para tres años en 2009), todos ellos para chorros sumergidos que no impacten con los contornos²⁵, y el módulo 310 de D-CORMIX (actualmente, subsistema

²⁵ En 2009, como uno de los productos del proyecto de investigación “Desarrollo e implementación de una metodología para la reducción del impacto ambiental de los vertidos de salmuera procedentes de desaladoras”, se



CEDEX

DHYDRO de CORMIX) para simular el comportamiento de la corriente hiperdensa característica del campo lejano.

Como limitaciones de estos programas pueden mencionarse:

- No permiten crear modelos numéricos y realizar simulaciones de forma sencilla de otros tipos de flujo distintos de los mencionados.
- La hipótesis de autosemejanza de perfiles que se adopta en todos ellos se aleja mucho de la realidad cuando la trayectoria del chorro es curva, más cuanto mayor es su curvatura, por lo que no reproducen bien las trayectorias pseudo-parabólicas de los vertidos hiperdensos como los de las desaladoras ni las trayectorias alabeadas que se forman bajo la acción de corrientes intensas. Tampoco reproducen bien las zonas de adaptación al flujo autosemejante que aparecen en las proximidades de la boca de descarga y en el primer tramo del campo lejano.
- Al plantear el problema como ecuaciones diferenciales ordinarias tomando la distancia a lo largo del eje como variable independiente, se supone que lo que afecta a cada rebanada del chorro perpendicular al eje se puede calcular en función de las características del medio receptor (velocidad, densidad) a la cota del eje. Esto es correcto para chorros verticales, pero cuando la trayectoria está inclinada (siempre en los vertidos de las desaladoras), los puntos de la periferia de la rebanada se pueden encontrar a cotas muy diferentes y pueden ser afectados de manera muy diferente.
- Todos ellos calculan valores medios en régimen permanente. No es posible conocer la variabilidad estadística de las variables debida a la turbulencia. Si la biocenosis objeto de protección siente los efectos con mucha rapidez como por ejemplo podría ocurrir con los misidáceos que viven sobre las hojas de las fanerógamas marinas, son los valores máximos (por ejemplo, el percentil del 5%) y no los valores medios los que resultan de interés.

25. Entre las fórmulas basadas en el Análisis Dimensional cabe mencionar las que se encuentran en las siguientes referencias bibliográficas:

- *Submerged Discharges of Dense Effluent (Tong y Stolzenbach, 1979. MIT R79-35, R-243 for NOAA)*: Formulación válida para chorros aislados o múltiples verticales ascendentes en presencia de una corriente homogénea perpendicular al tramo difusor; medio con densidad homogénea y fondo plano horizontal.

ha puesto a disposición de cualquier usuario que lo desee el uso gratuito por internet del programa MEDVSA-IJETG para chorro individual (<http://www.medvsa.es/herramientas/modelosCampoCercano.html>). Este programa integra las mismas ecuaciones y con los mismos valores de los parámetros de control que el programa CORJET para chorro individual, por lo que obtiene los mismos resultados. El mencionado programa de investigación, cuyo nombre abreviado es MEDVSA (MEtodología para el Diseño de Vertidos de Salmueras) está subvencionado por el Ministerio de Medio Ambiente a través del Programa Nacional de I+D y su ejecución corre a cargo del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria y del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.



- *Inclined Dense Jets in Flowing Current (Roberts y Toms, 1987. ASCE J. of Hydraulic Engineering. Vol 113, No 3):* Formulación válida para un chorro aislado en presencia de una corriente homogénea.
- *Mixing in Inclined Dense Jets (Roberts, Ferrier y Daviero, 1997. ASCE J. of Hydraulic Engineering. Vol 123, No 8):* Formulación válida para un chorro aislado formando un ángulo de 60° sobre la horizontal en un medio sin corrientes. Fondo horizontal.
- *Experimental Studies on Vertical Dense Jets in a Flowing Current (Gungor y Roberts, 2009. ASCE J. of Hydraulic Engineering. Vol 135, No 11):* Formulación válida para un chorro vertical aislado en presencia de una corriente homogénea. Fondo horizontal.

Como limitaciones de este grupo de herramientas indicaremos en primer lugar que hasta este momento solo existen formulaciones para los tipos de flujo comentados. Se necesitaría desarrollar formulaciones para otros dispositivos de vertido (en playa, rebose por un acantilado, etc.) y para el campo lejano. Otra limitación se encuentra en la escasez de datos experimentales que han servido para calibrar estas formulaciones. Esto se debe a que son pocos los laboratorios de hidráulica que disponen de las técnicas y equipamientos necesarios y a que el coste de los ensayos es relativamente elevado si se le compara con el de los ensayos numéricos. Por último señalaremos la posible influencia de los efectos de escala sobre los resultados de los ensayos físicos, por lo que conviene analizar detalladamente las condiciones bajo las que se han realizado los ensayos.

26. El sistema experto CORMIX es una buena herramienta para que usuarios inexpertos adquieran de forma fácil y rápida un cierto conocimiento de las clases y tipos de flujo que pueden darse en el entorno de cada dispositivo de vertido siempre que se lea y analice todos los mensajes que el sistema va proporcionando. Pero en según qué casos y en determinados puntos de la trayectoria los errores pueden ser muy importantes, mucho mayores que ese $\pm 50\%$ que sus creadores aseguran que se puede obtener como media. Y para conocer en qué casos y en qué puntos son esperables estos errores mayores sí hay que saber hidrodinámica.

Conviene remarcar aquí que la amplia difusión del sistema CORMIX produce en los usuarios menos expertos la falsa sensación de que sus resultados son muy fiables y que han sido muy contrastados. En el caso de los vertidos de desaladoras los resultados se han contrastado con no más de media docena de series de experimentos y en algunas de éstas los resultados del CORMIX se desvían significativamente de los obtenidos mediante ensayos.

27. Los márgenes de seguridad que se vienen aplicando en la barrera de seguridad constituida por el uso de herramientas de predicción son esencialmente los siguientes:



- Aceptar sólo el empleo de herramientas cuya fiabilidad de predicción haya sido suficientemente contrastada y solo cuando se empleen para los tipos de flujos y en los tramos de trayectorias para los que son fiables. Esto obliga a limitar el abanico de tipos de dispositivo de vertido que puede contemplar el proyectista o a utilizar modelos físicos a escala reducida para el proyecto específico de que se trate.
- Comprobar durante el procedimiento de evaluación del impacto ambiental o durante la tramitación de la autorización de vertido la correcta aplicación de dichas herramientas.
- No contar con los incrementos de dilución que se producen en aquellos tramos para los que no existen herramientas de predicción fiables incluso aunque se tenga constancia de que efectivamente se producen.

El efecto combinado de todos estos fenómenos puede multiplicar por un factor superior a 2 las diluciones calculadas con las herramientas de predicción para el campo cercano²⁶.

Programa de vigilancia ambiental apropiado para vertidos de desaladoras

28. Dadas las incertidumbres existentes sobre los métodos de cálculo que se están utilizando, los proyectos de construcción y explotación de plantas desaladoras deben incluir un programa de vigilancia ambiental exhaustivo (sobre todo durante los primeros meses). El objetivo de este programa es el de diseñar una serie de pautas de cara a la protección de las posibles zonas sensibles, (especialmente de las praderas de fanerógamas marinas *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*), frente a los excesos de salinidad del medio marino generados por los vertidos hipersalinos.

29. El programa de vigilancia debe de ajustarse en cada caso en función de la presencia y localización de comunidades a proteger, determinado el número de medidores autónomos de salinidad y de estaciones de control de las praderas y siempre con el objetivo de proteger las zonas sensibles frente a los excesos de salinidad del medio marino generados por los vertidos hipersalinos.

30. Los márgenes de seguridad en este caso son:

- Se suele imponer la colocación de estaciones de control en la frontera de las zonas ocupadas por las comunidades a proteger incluso cuando las herramientas de cálculo indican que están lejos de la zona potencialmente afectada por los incrementos de salinidad significativos.
- Además de controlar dichas fronteras, se imponen numerosas mediciones en el campo cercano dado el poco conocimiento que se tenía de los procesos de dilución que tienen lugar tras el vertido. La mejora en el conocimiento de dichos procesos debería tener como consecuencia la reducción de este conjunto de medidas.

²⁶ Y por un factor superior a 4 las diluciones en el eje calculadas con el módulo CORJET del sistema CORMIX

Disponibilidad de una reserva de dilución y existencia de un protocolo de actuación

31. Esta barrera de protección consiste en que la planta desaladora se diseñe de forma que si durante el programa de vigilancia se detecta un incumplimiento de los límites de salinidad o de otros parámetros controlados, pueda activarse un protocolo de actuación que, entre otras cosas, permita disminuir la salinidad del efluente y/o aumentar la dilución tras el vertido hasta que se corrija el incumplimiento, considerando incluso la reducción de la producción de agua producto si resulta imprescindible. El margen de seguridad en este caso es la propia disponibilidad de la reserva de dilución y la garantía de su correcta utilización por la existencia de un protocolo de actuación. El promotor debe proponer para su aprobación junto con el programa de vigilancia ambiental, el protocolo de actuación que pondrá en marcha en caso de que se detecte un incumplimiento.
32. Si las mediciones de los conductivímetros autónomos indican que en alguno de los puntos de medida se están sobrepasando los límites de salinidad admisibles durante dos semanas consecutivas o tres en cualquier orden durante las últimas seis semanas, se pondrá en marcha el protocolo de corrección del exceso de salinidad. Cuando se active el protocolo en primer lugar se investigará la causa de la anomalía y si se encontrara y fuera corregible, se corregirá. En caso contrario hay que reducir el exceso de salinidad del vertido o aumentar la dilución obtenida tras el vertido.
33. El exceso de salinidad puede disminuirse de varias maneras dependiendo del sistema de vertido utilizado. De forma general para todos los sistemas de vertido, se puede disminuir la salinidad del efluente mediante una dilución previa de la salmuera con agua de mar, lo que disminuye el índice global de conversión de la planta y también la dilución necesaria tras el vertido. Para ello debe preverse (quizás incluso construirse) la instalación de predilución (incluyendo la instalación de más bocas de descarga de las estrictamente necesarias según los cálculos, en el caso de vertidos mediante emisario submarino).
34. La dilución obtenida tras el vertido puede aumentarse en el caso de un emisario submarino aumentando el caudal que sale por cada boca de descarga, lo cual puede hacerse aumentando la producción, aumentando el caudal de predilución manteniendo la producción, reduciendo la producción y derivando el caudal que tendría que pasar por los bastidores cerrados hacia el vertido o manteniendo la producción y el caudal de predilución pero cerrando un número determinado de bocas difusoras.
35. La aplicación de las herramientas de predicción (modelos matemáticos o físicos) a diferentes alternativas de gestión de la planta, y más concretamente, de las características del efluente, constituye sin duda una ayuda muy útil para decidir el protocolo de actuación más adecuado en cada caso concreto y también para optimizar la explotación de la planta teniendo en cuenta incluso el consumo de energía de las diferentes alternativas.



4.3 Recomendaciones

Como ya se ha comentado, el conocimiento que sobre el comportamiento del efluente vertido y sobre su impacto ambiental se tenía en el año 2000 cuando empezó a plantearse la construcción de grandes desaladoras en la costa mediterránea (por ejemplo, las del programa AGUA) era escaso y, no obstante, existía una urgencia de disponer de criterios de calidad para evaluar ambientalmente estos proyectos sin retrasar excesivamente su construcción y puesta en operación. Por ello, el modelo de sistema de protección se ha basado en los siguientes principios:

- El establecimiento provisional de un margen de seguridad global amplio como consecuencia de las incertidumbres existentes en aquel momento
- El propósito de ir adecuando los márgenes de seguridad al grado de conocimiento del problema que se tenga en cada momento, permitiendo la reducción de los requerimientos conforme éste vaya mejorando para mantener el margen de seguridad global dentro de límites razonables a fin de evitar sobrecostes injustificados en el proyecto, la construcción o la explotación.

Desde entonces y promovido en parte por el gran número de desaladoras importantes que se han ido planteando durante esta década, ha mejorado considerablemente el conocimiento sobre el comportamiento de los efluentes y sobre su posible impacto sobre las biocenosis marinas. Por una parte, el CEDEX ha llevado a cabo un programa continuo de investigación sobre el comportamiento del efluente incluyendo la realización de más de un centenar de ensayos en modelos físicos a escala reducida y el estudio experimental de los vertidos de siete desaladoras en funcionamiento realizado expresamente para este fin. Por otra, el Ministerio de Medio Ambiente, a través del Programa Nacional de I+D, ha financiado varios proyectos de investigación destinados a mejorar el conocimiento tanto de las metodologías de diseño (por ejemplo, el proyecto MEDVSA: <http://www.medvsa.es/>) como de las de medición y control del vertido (por ejemplo, el proyecto ASDECO: <http://www.proyectoasdeco.com/>), lo que ha permitido que un número cada vez mayor de entidades públicas y privadas dispongan de especialistas con formación avanzada en esta materia.

Por todo ello se considera que actualmente se dan las circunstancias para llevar a cabo una actualización del sistema de protección del medio marino frente a los vertidos de las plantas desaladoras que se ha venido aplicando en la última década, mejorando las metodologías y reduciendo los márgenes de seguridad que a la luz del conocimiento actual se consideren excesivos. En este sentido se plantean las siguientes recomendaciones.

Establecimiento de límites de emisión y de normas de calidad

- A. Se recomienda sustituir los criterios de limitación del valor absoluto de la salinidad por criterios de limitación del incremento relativo. Existen varias razones que avalan esta recomendación:



- La influencia de la dilución necesaria sobre los costes de construcción y operación del dispositivo de vertido y de ejecución del programa de vigilancia es muy importante y sin embargo, con criterios de limitación del valor absoluto existe el riesgo de establecer una dilución necesaria muy inadecuada (por exceso o por defecto) a causa de pequeños errores en la determinación de la salinidad del medio receptor. Un error de unas décimas de psu, que es normal cuando se utilizan equipos corrientes y metodologías simples de medición, puede hacer que la dilución necesaria calculada sea el doble o la mitad que la realmente necesaria (véase la tabla del apartado 2.4). Y esto es aplicable tanto en la fase de proyecto, cuando lo que se quiere es dimensionar el dispositivo de vertido para tener capacidad de dilución suficiente incluso para la máxima salinidad esperable del medio receptor, como en la fase de explotación, cuando se quiera actuar sobre el índice de conversión global de la planta (por ejemplo, regulando el caudal de predilución) para conseguir la dilución estrictamente necesaria en cada momento.
- Los efectos biológicos de la salinidad (y de otros parámetros) sobre los organismos vivos suelen ser proporcionales a la variación relativa de los valores que dichos parámetros tienen en el medio receptor, razón por la que es frecuente encontrar en la normativa límites expresados en estos términos. Esto no significa que se reduzca por este hecho el nivel de protección. Por ejemplo, el límite absoluto de 38,5 psu correspondiente al percentil del 25% para la *P. oceánica* puede sustituirse por un incremento relativo límite de un 2,7%, que equivale al valor anterior para un agua típica de la costa mediterránea española, que tiene una salinidad de unas 37,5 psu.
- Durante el programa de vigilancia, el efecto combinado de la pequeña variabilidad espacial y temporal de la salinidad del medio receptor con las imprecisiones de los equipos de medida hacen que existan amplias zonas (kilómetros cuadrados) donde no es posible afirmar con seguridad si hay o no hay algún incremento de salinidad con respecto a la del medio receptor, lo que disminuye la eficacia del programa de vigilancia y lo encarece innecesariamente. Sin embargo, el incremento relativo de salinidad en un punto cualquiera se calcula simplemente multiplicando el incremento relativo de salinidad en el efluente por la dilución conseguida en el medio receptor²⁷. El primero se calcula, como hemos visto, mediante una sencilla fórmula cuya única variable es el índice de conversión global de la planta y éste es el cociente entre los caudales producto y de toma, variables ambas que pueden (y suelen) medirse de forma permanente con suficiente precisión. La dilución conseguida en el campo cercano, después de los numerosos ensayos llevados a cabo en el CEDEX y de las campañas de mediciones intensivas realizadas en varias de las desaladoras en funcionamiento, pueden estimarse con suficiente aproximación en función del caudal vertido en cada momento para cada dispositivo de vertido concreto, por lo que tampoco sería necesario hacer medidas en el mar. Sin embargo, estas siguen siendo imprescindibles para comprobar la dilución conseguida en el campo lejano,

²⁷ Para calcular la salinidad absoluta, además de la dilución es necesario conocer la salinidad del medio receptor.



no solo porque en el estado actual de los conocimientos las metodologías de cálculo para el campo lejano nos están todavía tan afinadas, sino también porque aquí tienen una influencia fundamental variables difíciles de conocer (como las microformas del fondo, que encauzan y retienen en mayor o menor medida la capa hiperdensa) o de gran variabilidad (como las corrientes y el oleaje)^{28,29}.

- B. Se deberían revisar los límites aplicados hasta ahora para las praderas de *C. nodosa* para integrar lo antes posibles los resultados de los dos proyectos de investigación en marcha sobre la determinación de su umbral de tolerancia a los incrementos de salinidad. Asimismo, deberían acometerse nuevas investigaciones para determinar los umbrales de tolerancia de otras especies de interés ecológico o económico (pesca, marisqueo, recolección de algas). Mientras tanto, con el fin de cubrir el vacío actual y en la creencia de que se trata de una medida que todavía deja un considerable margen de seguridad que con el avance del conocimiento científico podrá irse ajustando, se recomienda que se establezca un criterio de calidad de carácter general que en cualquier punto situado fuera de la zona de mezcla³⁰. Como criterios de calidad específicos para las praderas de *P. oceánica* y *C. nodosa*, mientras no se adopten otros valores como resultado del avance del conocimiento o de la armonización de la aplicación del principio de precaución con el impacto económico, se propone que se mantengan los límites aplicados hasta ahora, pero convertidos en incrementos relativos de salinidad tomando como salinidad del medio receptor un valor de 37,5 psu para el Mediterráneo y de 36,0 psu para el Atlántico y redondeando hasta las milésimas. Del mismo modo y con el mismo carácter provisional se recomienda que se establezca un criterio de calidad específico para hábitats bentónicos de interés comercial y para aquellos incluidos en una zona con alguna figura de protección ambiental en cuya declaración hayan influido.

²⁸ La dilución obtenida puede medirse con mayor precisión inyectando en el caudal vertido un trazador de alguna sustancia no existente en el medio receptor, lo que hace más fácil medir con precisión su concentración en la muestra incluso con grandes diluciones. En los modelos físicos el agua de mar se simula con agua dulce y el efluente con agua de una salinidad tal que el exceso relativo de densidad, que es el parámetro que gobierna la hidrodinámica tras el vertido, tenga el mismo valor que en el prototipo. Una ventaja de este modo de proceder consiste en que la sal constituye un trazador prácticamente inexistente en el medio receptor, por lo que resulta más fácil medir con precisión las salinidades y, a partir de éstas, las diluciones.

²⁹ Para el promotor de una planta desaladora podría resultar conveniente comprobar si en su caso el incremento de coste que supone conseguir toda la dilución necesaria en el campo cercano queda compensado por el ahorro que supone no tener que realizar modelizaciones ni mediciones en el campo lejano.

³⁰ La zona de mezcla está definida cualitativamente en el artículo 4 de la Directiva 2008/105 y en los puntos 5.1.2.1 y 5.1.2.2 de la Orden ARM/2656/2008. En espera de una norma que la defina cuantitativamente se puede interpretar que coincide con el campo cercano del vertido.

Por lo tanto se propone adoptar los valores de la tabla siguiente:

VALORES LÍMITE PROPUESTOS PARA EL INCREMENTO RELATIVO DE SALINIDAD			
$r_{\text{lim}} = \frac{(s_m - s_a)_{\text{lim}}}{s_a}$			
		$r_{25,\text{lim}}$	$r_{5,\text{lim}}$
<i>Posidonia oceanica</i>	Mediterráneo	0,027	0,067
	Atlántico	NA ⁽¹⁾	NA ⁽¹⁾
<i>Cymodocea nodosa</i>	Mediterráneo	0,053	0,093
	Atlántico	0,097	0,139
Habitats de interés comercial o en zonas protegidas	Mediterráneo y Atlántico	r_A	r_B
General	Mediterráneo y Atlántico	r_C	r_D

⁽¹⁾ No aplicable. No existe *Posidonia oceánica* en el Atlántico.

Se recomienda establecer valores provisionales de los límites r_A a r_D en base a una exhaustiva revisión de la literatura científica existente sobre rangos de salinidad tolerables por diferentes especies marinas.

- C. Los resultados de un estudio científico sobre determinación del umbral de tolerancia deben ser expresados en términos de qué tipo y grado de afección se ha medido para diferentes incrementos de salinidad, incluyendo aquellos casos para los que no se ha detectado ningún efecto, y siempre con una estimación de sus incertidumbres. El establecimiento de un valor límite como norma de calidad debe tener en cuenta, naturalmente, estos resultados, pero también debe tener en cuenta la trascendencia económica e incluso social que puede tener un margen de seguridad excesivamente elevado. Corresponde a la Administración, tras conocer también la información aportada por el sector de la desalación y por la opinión pública, conjugar estos elementos a la hora de decidir sobre el valor límite a adoptar.

Sobre este aspecto hay que señalar que los límites que se vienen aplicando para las praderas de *P. oceanica* son exactamente los que propusieron conjuntamente los científicos que participaron en el estudio coordinado por el CEDEX, que además hacían mención expresa al “principio de precaución establecido por la Conferencia de Río”. No se ha tenido en cuenta la opinión del sector productivo ni de los usuarios, ni se ha producido ninguna decisión política sobre ello. De hecho, no se han aprobado como norma con efecto jurídico. Sería deseable que se revisaran esos límites de acuerdo con las ideas expresadas en el párrafo anterior.



CEDEX

- D. Los estudios de dispersión de vertidos realizados para los estudios de impacto ambiental o para solicitar autorizaciones de vertido deberían hacerse con un planteamiento estadístico teniendo en cuenta la variabilidad de las condiciones de explotación y la de las características del medio receptor (corrientes y oleaje). Si se pueden asociar probabilidades a las diluciones calculadas, quizás sería posible (sobre todo en el campo lejano) comprobar que las situaciones pésimas (aquellas en las que se consigue menor dilución) tienen una probabilidad inferior al 5%, y entonces el límite con el que hay que comparar es el percentil del 5% y no el del 25%.

Empleo de herramientas para el diseño ambiental del dispositivo de vertido

- E. El margen de seguridad que se viene aplicando en relación con esta barrera de seguridad se considera excesivo a la luz de los nuevos conocimientos adquiridos en esta materia durante la última década. Los métodos de cálculo disponibles actualmente no reproducen bien el conjunto de fenómenos que tienen lugar tras el vertido debido a que adoptan hipótesis fuertemente simplificadoras, pero usados de forma adecuada y aplicando los márgenes de seguridad que se han explicado más arriba producen resultados consistentes que sistemáticamente dan diluciones bastante inferiores a las que se han medido al final del campo cercano en los ensayos de laboratorio y en las campañas de medida en plantas desaladoras en funcionamiento. Por tanto se recomienda la puesta a punto y utilización de herramientas para estimar estos incrementos de dilución de una manera fiable, o al menos, para flujos idealizados parecidos que, estando todavía del lado de la seguridad, permitan reducir este margen tan ancho. Se debería ampliar considerablemente el abanico de herramientas disponibles para el diseño ambiental del dispositivo de vertido de forma que se cubran otros tipos de vertido (en playa, rebose por un acantilado, en dársenas portuarias, etc.) y un mayor número de variables y efectos combinados (el impacto de los chorros sumergidos con la superficie o con el fondo, la interacción dinámica entre los chorros, la zona del campo cercano que va desde el punto de impacto hasta que la corriente hiperdensa se ha tranquilizado lo suficiente como para que se pueda aplicar el modelo de campo lejano, el efecto de la corriente sobre el campo lejano, el efecto del oleaje sobre los vertidos en playa y sobre el campo lejano, etc.)

Como paso necesario para ello, deberían realizarse simulaciones en modelo físico que permitan calibrar y validar dichas herramientas (ya sean fórmulas basadas en el Análisis Dimensional o programas que integren las ecuaciones) para los tipos de vertido y combinaciones de variables y efectos que todavía no tengan un soporte experimental suficiente.

A este respecto cabe señalar que el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX ha realizado desde el año 2000 un gran número de ensayos de simulación de vertidos de salmueras en modelos físicos a escala reducida orientados a proporcionar una formulación basada en el Análisis Dimensional que mejore las existentes hasta este momento para la predicción de las diluciones alcanzables con diferentes dispositivos de vertido. En los próximos meses verá la luz un informe del CEDEX con los resultados de



los ensayos realizados hasta ahora y las expresiones para la predicción de las diluciones que se han obtenido en base a ellos.

Por otra parte, dentro del ya mencionado proyecto de investigación MEDVSA, el CEDEX está ampliando el abanico de ensayos para poder tener en cuenta más variables como por ejemplo, el oleaje o las corrientes, y ha llevado a cabo campañas de medida en vertidos de desaladoras en funcionamiento para contrastar los resultados de las herramientas de predicción.

Finalmente destacaremos el hecho de que la herramienta que proporciona resultados más ajustados a la realidad a día de hoy es la realización de ensayos en un modelo físico a escala reducida para cada proyecto específico. Se recomienda por tanto que, al menos en aquellos casos en los que resulte difícil de conseguir la dilución necesaria por la escasez de calado o por la proximidad de la zona sensible, se exija que el diseño proyectado se compruebe mediante ensayos en un modelo físico.

Programa de vigilancia ambiental apropiado para vertidos de desaladoras

- F. Se han venido imponiendo numerosas mediciones en el campo cercano dado el poco conocimiento que se tenía de los procesos de dilución que tienen lugar tras el vertido. La mejora en el conocimiento de dichos procesos debería tener como consecuencia la reducción de este conjunto de medidas a cambio de realizar un registro continuo de los caudales de toma y producto y de disponer de una metodología fiable para calcular la dilución conseguida en el campo cercano para el dispositivo de vertido concreto de que se trate. El registro continuo de caudales puede ser muy útil también para investigar posibles anomalías detectadas en la vigilancia del campo lejano.
- G. La medición de la dilución conseguida en el campo lejano está sujeta a errores importantes debido a la imprecisión en las medidas de salinidad y a la pequeña variabilidad espacial y temporal de la salinidad del medio receptor. Se recomienda que esta medición, que solo se necesita si no se ha alcanzado la dilución necesaria en el campo cercano, se realice con conductivímetros y procedimientos de gran precisión calibrados frecuentemente o bien inyectando en el efluente algún trazador que no exista en el medio y que pueda medirse con precisión a bajas concentraciones.
- H. Se deberían revisar los programas de vigilancia ambiental de las plantas desaladoras, al menos de aquellas que aún no han entrado en funcionamiento, con el objeto de incorporar las recomendaciones anteriores.

Disponibilidad de una reserva de dilución y existencia de un protocolo de actuación

- I. De entre las diversas opciones existentes para disminuir el exceso de salinidad del efluente o aumentar la dilución tras el vertido en caso de incumplimiento de los límites de salinidad se recomienda la de construir un bypass entre la toma y el vertido y



controlar permanentemente el caudal de predilución. Se considera muy versátil y con pocos costes de operación.

- J. Desde el punto de vista de la explotación podrían aprovecharse los porcentajes de excedencia permitidos para ahorrar tiempo de bombeo para la predilución. En este caso debe preverse no obstante que parte de las excedencias podrían producirse como consecuencia de averías u operaciones de mantenimiento.

- K. Durante el trayecto del efluente desde el punto de descarga hasta la frontera de la zona a proteger, éste se va mezclando no sólo con el agua del medio receptor, sino también con el efluente que ha salido un poco antes o un poco después. Por lo tanto, si por un fallo de operación se produce durante unas horas un vertido anormal (por caudal o por salinidad) que derive en una menor dilución en el medio receptor, se puede corregir parcialmente si se vierte durante un tiempo en unas condiciones que deriven en una dilución bastante mayor que la estrictamente necesaria.



Madrid, marzo de 2011

Los Autores del Informe,

Ana Álvarez García
Licenciada en Biología Marina
Investigadora

Antonio Ruiz Mateo
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director de Medio Marino

Vº Bº

D. José María Grassa Garrido
Director del Centro de Estudios de Puertos y Costas