

## ***LÍNEA DE INVESTIGACIÓN 5.***

Desarrollo de sistemas avanzados de dilución de salmueras. Investigación y modelización del efecto de la ósmosis directa sobre los modelos matemáticos.

### **Objeto de la línea de investigación**

La presente línea de investigación pretende evaluar, entre otros, el efecto del fenómeno de la ósmosis directa sobre la dilución de salmueras en el agua de mar. Una salmuera concentrada, cuando es vertida al mar, provocará un intercambio de sales para equilibrar los potenciales químicos mediante el transporte de sales entre las dos disoluciones, produciéndose de este modo una ósmosis directa. Este es el fenómeno que se quiere investigar en más detalle y ver como afecta a los modelos matemáticos de dilución de salmuera.

### **Proceso aplicado**

Para evaluar el efecto de la ósmosis directa y otros efectos sobre los modelos de dilución se ha diseñado una planta piloto que consta de un tanque de PRFV con una serie de sensores de conductividad a distintas alturas y longitudes, con el fin de parametrizar el modo de dilución. Los resultados obtenidos en planta piloto se contrastarán con los obtenidos por medio de los programas matemáticos utilizados para simular esta dilución (entre ellos, el más utilizado en España, el CORMIX).

En el presente proyecto participan, además de Sacyr y Sadyt, la empresa ECOAGUA Ingenieros, empresa con una amplia experiencia y prestigio en el sector de la desalación.

Además de la simulación de vertido en el tanque de salmueras a escala macroscópica, se fijaron en el año 2007 dos nuevos objetivos o líneas de investigación para los años 2008 y 2009, consistentes en lo siguiente;

- estudio de los coeficientes de difusión de la salmuera en agua de mar con interferometría holográfica

- modelización de vertidos y formación del personal investigador en el manejo de las aplicaciones informáticas de simulación. Comparación de resultados de los modelos con plantas reales

## **Situación actual del proyecto. Estado de desarrollo**

### **Modelización de vertidos**

El objetivo de esta línea de investigación es comprobar de manera clara si la difusión de sales de la descarga de salmuera en el mar podría ser mucho más rápida de lo que predicen los Modelos actuales de simulación, debido a la existencia de un efecto no contemplado en dicho modelo como es el fenómeno de difusión por ósmosis.

Durante el año 2007 se realizaron las siguientes actividades;

- estudios de recopilación bibliográfica y teórica
- compra del programa CORMIX para su evaluación
- diseño de la instalación piloto

Durante el año 2008 y 2009. Se finalizó la instalación de la planta piloto en las instalaciones de la Desaladora de Cuevas de Almanzora, donde se han realizado los primeros ensayos sobre dilución. A continuación se muestran algunas imágenes de la instalación experimental.

Estos trabajos se han subcontratado al Instituto Universitario del Agua y Ciencias Ambientales de la Universidad de Alicante, siendo dirigidos los trabajos por el Prof. Dr. Daniel Prats, del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Alicante y responsable de dicho Instituto.

### **Descripción de los ensayos realizados**

Se han realizado algunas pruebas a escala laboratorio para fijar algunos parámetros antes de realizar los ensayo a en el tanque escala piloto.

Se utilizó un tanque de ensayo de dimensiones 18x31x15 cm<sup>3</sup> en metacrilato.



*Figura 1. Imagen del dispositivo experimental de laboratorio.*

En esta planta se realizaron pruebas previas para la selección de colorante para visualizar correctamente la pluma. Se han realizado pruebas con azul de metileno, cloruro de cobalto y sulfato de cobre.

Según la relación densidad –concentración de disolución la que se aproximaría más a las condiciones de vertido de salmuera de agua de mar en el mar sería la mezcla de solución de cloruro sódicos + salmuera de Cuevas de Almanzora + azul de metileno.

Las pruebas realizadas de descarga de solución coloreada salina en el tanque a escala laboratorio para observar la forma de la pluma dieron como resultado que las plumas son de flotabilidad negativa, tal como sucede con la salmuera, es decir, después de alcanzarse una altura máxima los chorros comienzan a caer al fondo formando una capa hipersalina.



$\text{CuSO}_4$  (60 g/L)



$\text{CoCl}_2$  (60 g/L)



60 g/L NaCl y 20 ppm azul de metileno

*Figura 2. Imágenes de la pluma en ensayos de laboratorio*

## Ensayos en planta piloto

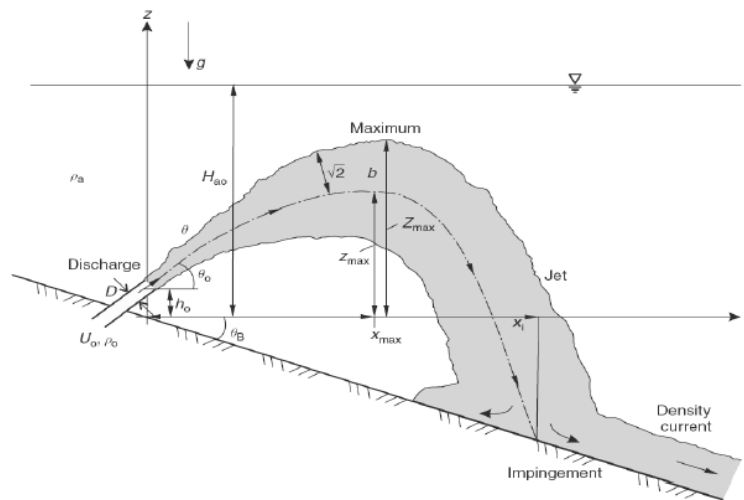
Paralelamente se realizó la puesta a punto de la planta escala piloto situada en Cuevas de Almanzora. A continuación se muestran algunas imágenes del estado final de la planta piloto tanque y elementos auxiliares y cuadro de control)



*Figura 3. Detalles de la planta piloto instalada en Cuevas de Almanzora*

Se realizó un estudio de las características del Modelo de la planta piloto de difusión de la salmuera, con el fin de que mantener las relaciones de semejanza entre el prototipo y el modelo.

Se ha realizado la simulación de la pluma de descarga con el modelo Corjet integrado en el Software Cormix) con el que se predice la geometría de ésta.

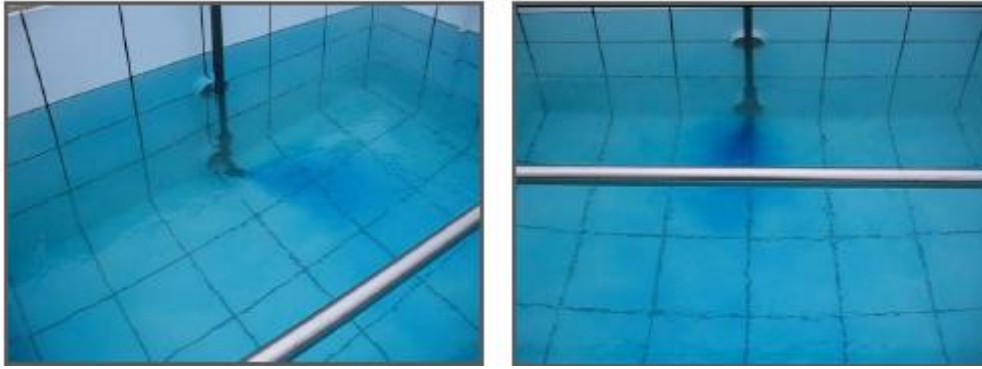


*Figura 4. Esquema típico de descarga negativa en ambiente estancado con pendiente negativa*

La planta piloto dispone de tanque de dilución (rectangular de 50 m<sup>3</sup> de capacidad), tanque de alimentación de salmuera con agitación, bomba de descarga y sistema de regulación de caudal, sistema boquilla difusor, un conjunto de 23 sondas de conductividad, data logger de registro de datos, medidores de caudal electromagnéticos, y cuadro de control y maniobra. El tanque se pintó de blanco para observar mejor los contrastes de color, y se pintó una escala de 0,5 m, para disponer de una referencia gráfica.

Se llevaron a cabo la calibración y la validación de los equipos de medida de la conductividad, caudalímetros, el registro de datos. Se realizaron también las pruebas hidráulicas.

Se realizó un primer experimento con colorante para determinar a priori la mejor ubicación de las sondas de conductividad, utilizando una solución sintética utilizando cloruro sódico y azul de metileno, simulando el incremento de conductividad que se puede esperar en el vertido de salmuera frente al medio marino, utilizando una caudal de 128 L/h. Los resultados se muestran en las siguientes imágenes



*Figura 5. Vistas de de la pluma utilizando cloruro sódico y azul de metileno.*

Por parte de Ecoagua ya se realizaron también varios ensayos a nivel de laboratorio, con tinta y cloruro de cobalto, que se presentaron en el informe del año 2007.

### **Interferometría holográfica**

Con el fin de profundizar en el análisis de los mecanismos de dilución de las salmueras en el mar, durante el año 2008 se abrió una nueva línea de investigación relacionada, basada en el uso de la tecnología de interferometría holográfica para el estudio de los coeficientes y mecanismos de difusión de la salmuera de desalación en el mar.

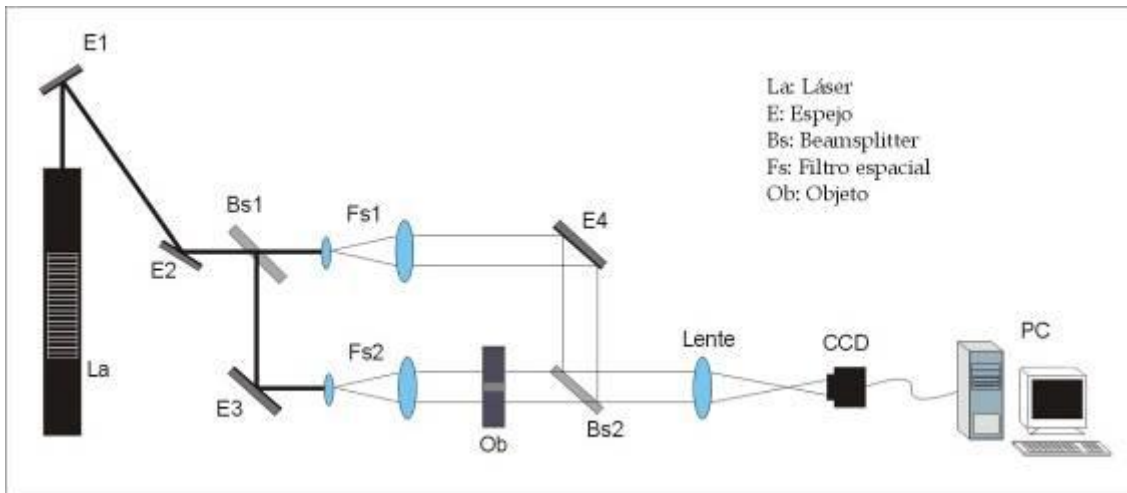
Para estos trabajos ha sido subcontratado el Instituto de Ingeniería de los Procesos Químicos de la Universidad de Alicante, siendo dirigidos los trabajos por el Prof. Dr. Julio Fernández, del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Alicante y responsable de dicho Instituto.

### **Estudios de interferometría holográfica**

Para el estudio de la difusión de los vertidos de salmuera en agua del mar se ha utilizado la técnica de la interferometría holográfica. Se trata de una técnica óptica que, combinando la holografía y la interferometría, permite observar los cambios de camino óptico como franjas de interferencia.

Este camino óptico es el producto del índice de refracción por la distancia recorrida por el haz de luz; en consecuencia, si se utiliza un recipiente físicamente estable y transparente, es posible visualizar los cambios de índice de refracción que tienen lugar en un medio transparente en forma de franjas de interferencia. Dado que el índice de refracción está directamente relacionado con la concentración de la disolución, es posible determinar perfiles de concentración en procesos de transferencia de materia (ósmosis, ultrafiltración, difusión, etc.).

El dispositivo experimental consta del montaje de interferometría holográfica y del módulo donde tiene lugar el proceso que se quiere estudiar (difusión, dilución, dispersión). Para trabajar en interferometría holográfica se requiere un montaje óptico como el que se muestra en la Figura 6.



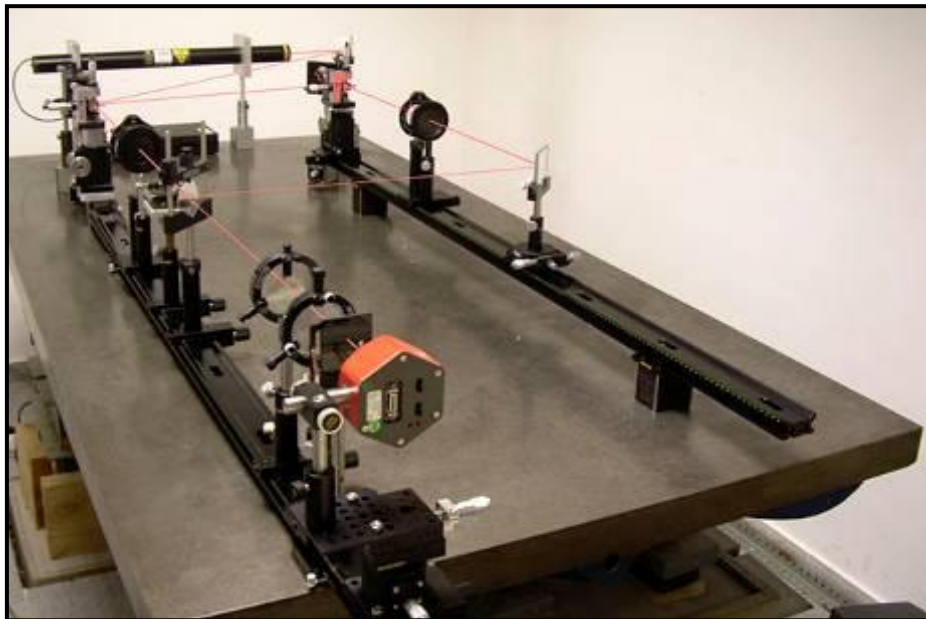
*Figura 6. Montaje experimental*

El montaje se compone de los siguientes elementos:

- *La*: Láser de He-Ne que emite luz coherente.
- *Bs<sub>1</sub>*, *Bs<sub>2</sub>*: Separador de haces, que también pueden hacer la función inversa de unión.
- *S<sub>f1</sub>*, *S<sub>f2</sub>*: Conjunto formado por un filtro espacial, que crea una fuente de luz puntual, y una lente de focal larga, que convierte el haz en colimado.
- *M<sub>1</sub>*, *M<sub>2</sub>*, *M<sub>3</sub>*, *M<sub>4</sub>*: Espejos de caras planas para dirigir los haces.
- *Ob*: Módulo donde tiene lugar el proceso a estudiar.

- *Lens*: Lente o conjunto de lentes, para enfocar la imagen del sistema de difusión sobre la cámara de video.
- *CCD*: Cámara de video.
- *PC*: Ordenador para el registro de datos.

El sistema óptico descrito se ha montado en una sala convenientemente acondicionada a fin de mantener una temperatura constante, reducir las vibraciones, etc. En la Figura 7 se muestra una fotografía del montaje.



*Figura 7. Montaje de interferometría holográfica*

En primer lugar se deben realizar experimentos con el fin de calibrar y comprobar el buen funcionamiento del sistema. Para ello, se ha determinado el coeficiente de difusión de disoluciones de cloruro potásico, un dato que se conoce con exactitud por la bibliografía y que tradicionalmente se viene usando en este laboratorio para este fin.

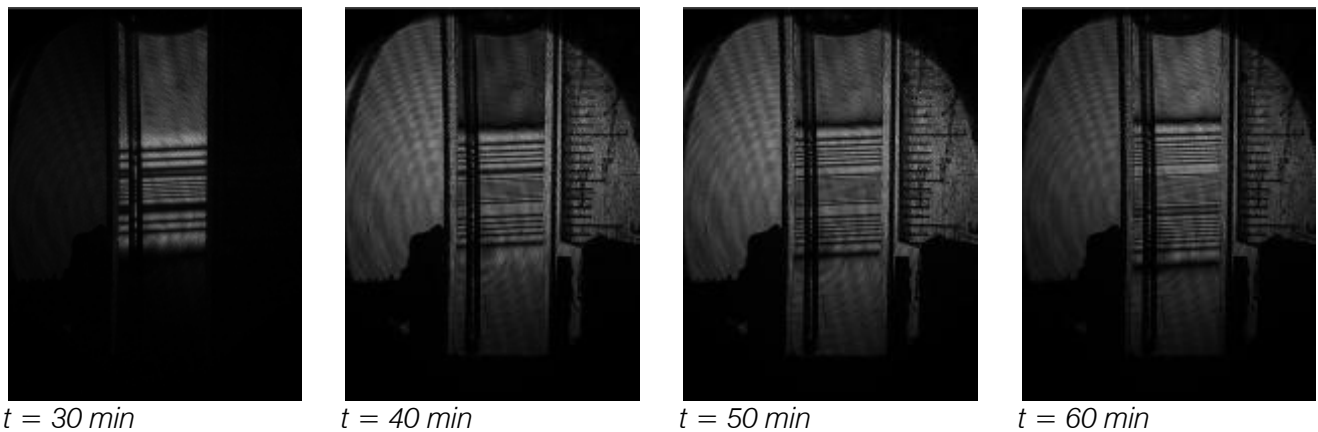
Empleando el procedimiento descrito se puede obtener el coeficiente de difusión de la salmuera en el agua de mar. Como paso previo, se han realizado experimentos utilizando cloruro sódico a distintas concentraciones, ya que es la sal mayoritaria en agua de mar. Las disoluciones empleadas tienen la misma concentración que las disoluciones de KCl. La disolución ligera tiene una



concentración del 2.07% en peso de NaCl y la pesada del 2.78% en peso de NaCl.

El valor del coeficiente de difusión del NaCl obtenido es  $1.52 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ . Si se compara este valor con el dato bibliográfico ( $1.53 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) se tiene un error del 0.7%, lo cual se considera aceptable.

Tras la obtención del coeficiente de difusión del cloruro sódico, se procede al cálculo del coeficiente de difusión entre el agua de mar y salmuera sin diluir, obteniéndose un valor del coeficiente de difusión de  $1.27 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ . Este valor se podrá utilizar en el análisis posterior del vertido de un emisario procedente de una desaladora. En la *Figura 8* se muestran algunos de los interferogramas obtenidos:

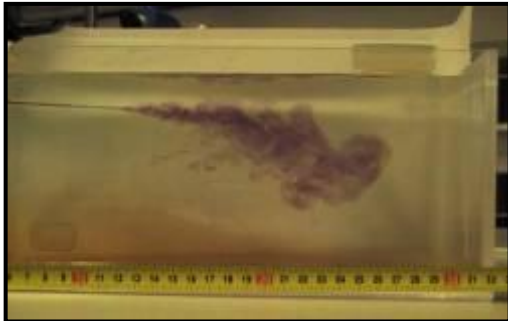


*Figura 8. Interferogramas de salmuera y agua de mar*

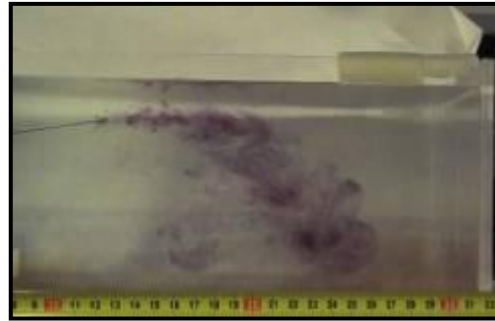
Un paso importante en la investigación es el diseño de un módulo que reproduzca lo mejor posible el comportamiento del fenómeno que se quiere estudiar; en este caso, el vertido a través de emisarios de salmuera procedente de plantas desaladoras en el mar.

Como paso previo al diseño del módulo, se han llevado a cabo diversas pruebas a fin de determinar sus dimensiones. El experimento ha consistido en introducir una corriente de salmuera, teñida con un colorante, a diferentes velocidades en un baño que contiene agua de mar. Con esto se ve el alcance de la pluma de salmuera y su dispersión en el agua de mar. La entrada de la salmuera se ha hecho en horizontal e inclinada, para apreciar las diferencias en el alcance. Las velocidades empleadas están comprendidas entre 10 y 100 cm/s, con ángulos de inclinación de 9, 16, 40 y 50°. En las siguientes Figuras

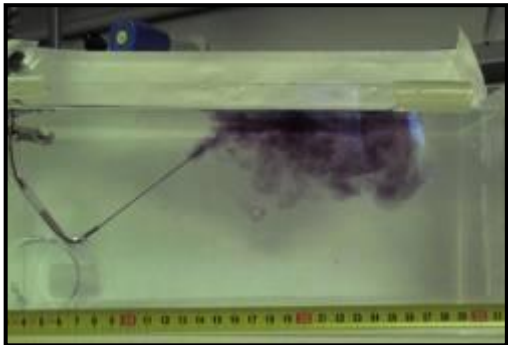
se observa que cuanto mayor es la velocidad y la inclinación, mayor es el alcance de la pluma, describiendo una curva con forma de parábola. También se aprecia que cuanto mayor es la velocidad, mayor es la altura que alcanza la pluma.



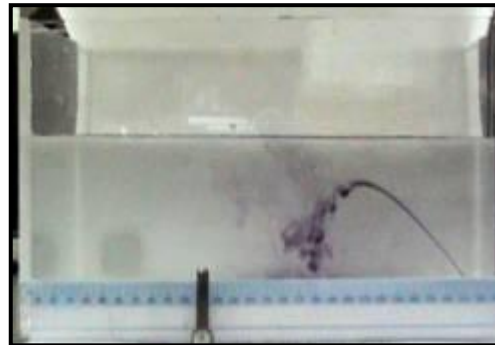
Entrada horizontal y  $v = 90$  cm/s



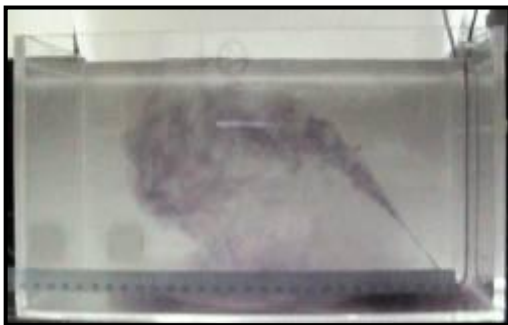
Entrada a  $16^\circ$  y  $v = 36$  cm/s



Entrada a  $40^\circ$  y  $v = 68$  cm/s



Entrada a  $50^\circ$  y  $v = 40$  cm/s



Entrada a  $50^\circ$  y  $v = 60$  cm/s



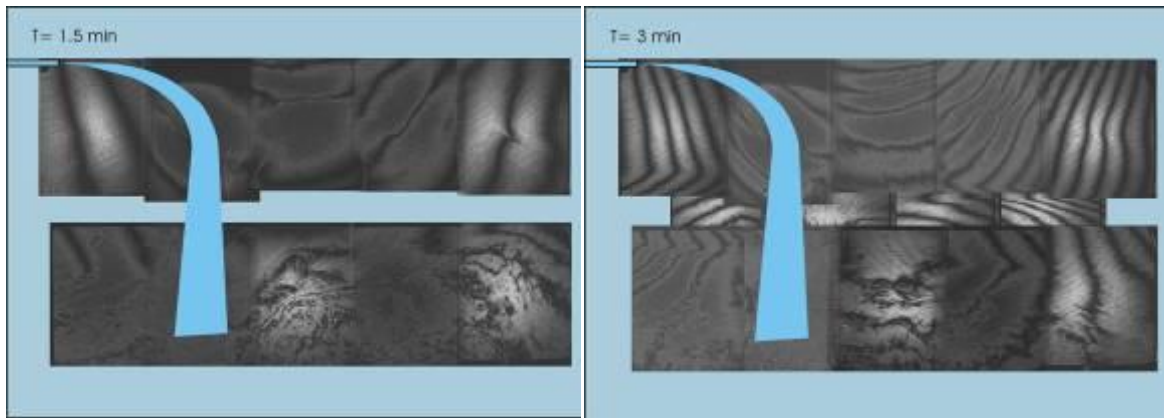
Entrada a  $50^\circ$  y  $v = 100$  cm/s

*Figura 9. Imágenes de las plumas obtenidas con diversas configuraciones de la descarga*

Utilizando el módulo descrito se han realizado una serie de experimentos de difusión de salmuera en agua de mar.

Una serie consta de 10 experimentos realizados con las mismas condiciones de entrada de salmuera, pero en cada uno de ellos se cambian las

coordenadas x-y (zona que atraviesa el láser y queda registrada). La salmuera está entrando al módulo durante diez minutos y una vez se detiene la entrada, se deja el experimento cinco minutos más hasta que se alcance el régimen estacionario. Una vez se tienen todos los experimentos de una serie, se unen para formar un interferograma, conjunto que permita ver qué ha ocurrido en todo el módulo. Se toman interferogramas a varios tiempos para seguir la evolución de las franjas y facilitar la posterior interpretación.



*Figura 10. Integración de los interferogramas*

Finalmente utilizando el programa de software matemático Matlab se ha preparado un programa que permite simular lo que está ocurriendo en el módulo. Para ello, se ha partido de los datos obtenidos al medir las franjas de interferencia de los distintos experimentos y se ha interpolado la información de las zonas del módulo de las que no se tienen datos.

### **Aspectos a desarrollar del proyecto**

#### **Ensayos de planta piloto dilución**

La planta piloto para los ensayos de dilución de salmueras acaba de finalizar su instalación, por lo que solo se han podido realizar los primeros ensayos de dilución. La planta ha sido instalada en la desaladora de Cuevas de Almanzora (Almería).

Estos trabajos han arrastrado un cierto retraso debido a que inicialmente se programó su ubicación en el CIMAR (Centro de Estudios Marinos de Santa Pola, dependiente de la Universidad de Alicante), gracias a su proximidad al mar, pero finalmente no se llegó a un acuerdo con esta institución para la instalación de la planta piloto, después de varios meses de negociaciones, por lo que se decidió reubicarla en la desaladora de Cuevas de Almanzora.

### **Interferometría holográfica**

Las fases de que constaba esta parte del proyecto, que comenzó en el año 2008, eran las siguientes;

- Recopilación bibliográfica y técnica
- Preparación del dispositivo y medios necesarios para el estudio
- Realización de ensayos sobre dilución de salmueras
- Modelización del proceso

Los tres primeros objetivos ya se han llevado a cabo. Para la consecución del cuarto objetivo, la modelización del proceso, es necesario realizar más experiencias. Esta línea de investigación surgió como una nueva línea en el año 2008, por lo que no ha podido culminarse, aunque ha dado lugar ya a interesantes conclusiones. Como ya se ha señalado a lo largo del informe, un primer paso para la modelización del proceso, en el que se va a seguir trabajando a pesar de la finalización del proyecto, debe ser:

- Diseño de un módulo de mayores dimensiones para evitar la limitación de las paredes. En este nuevo módulo se procederá a realizar nuevas experiencias con objeto de:
  - o Determinar, mediante interferometría holográfica, los perfiles de concentración de sal, utilizando como variables el ángulo del vertido y la concentración.

- Estudiar el empleo de salmuera con distintos niveles de dilución a fin de simular mejor las condiciones reales.
- Estudiar cómo varía la concentración de sal cuando se deposita en el fondo una solución de salmuera.

Se pretende, por tanto, encontrar un modelo matemático que simule los vertidos al mar de las desaladoras. Para ello se va a seguir trabajando para mejorar las instalaciones donde tienen lugar las pruebas, además de intentar determinar qué dilución salmuera-agua de mar es menos perjudicial para el fondo marino.

### **Estudio de difusión de salmueras reales**

En este campo no se ha podido avanzar, dado que Sadyt no cuenta en este momento con plantas desaladoras de agua de mar en funcionamiento (salvo una instalación en Argelia y otra en Las Palmas), donde poder realizar adecuadamente el seguimiento del vertido. Por ello, y al depender de otras empresas o instituciones, no ha sido posible avanzar en este campo, aunque está previsto en una posible ampliación futura de las investigaciones del proyecto, ya que nos parecen importantes los estudios de campo para confirmar los datos obtenidos en laboratorio y en planta piloto.

## **Resultados y Conclusiones LÍNEA DE INVESTIGACIÓN 5. Efectos sobre los modelos matemáticos de dilución de salmueras**

Las conclusiones más importantes del proyecto son;

- Los modelos matemáticos utilizados en España para la simulación de la dilución de vertidos de salmueras provienen de otras aplicaciones distintas y no consideran todos los efectos posibles (como la ósmosis directa) en la mezcla de la salmuera en el mar. Esto implica que se están diseñando instalaciones de vertido con una información imprecisa
- Los resultados de laboratorio demuestran la anterior afirmación por lo que se hace necesario un análisis más riguroso de estos modelos por

medio de un sistema piloto de dimensiones suficientes para simular correctamente el proceso

Respecto a los estudios realizados con interferometría holográfica, básicamente en esta etapa se ha puesto optimizado el dispositivo y la tecnología, y realizado numerosos ensayos con el fin de determinar los coeficientes de difusión de la salmuera en el agua de mar. Finalmente, quedaría por encontrar el modelo matemático que simule de forma adecuada los vertidos al mar de las desaladoras. Para ello se va a seguir trabajando para mejorar las instalaciones donde tienen lugar las pruebas, además de intentar determinar qué dilución salmuera-agua de mar es menos perjudicial para el fondo marino.