

**DESAL2014** *Santiago de Chile. 15 al 17 de octubre*

4<sup>th</sup> Latin American Congress on  
Desalination and Water Reuse

# Corrientes y oleaje en el comportamiento de un vertido hipersalino. Modelo físico reducido.

Fernando Benayas\*, Manuel Antequera & Encarnación González

*Técnico de la Gerencia de Medio Ambiente, Aguas de las Cuencas Mediterráneas, S.A.  
(ACUAMED)*

desal2014.com



**GECAMIN**  
Conferences for Mining

## ¿Qué es Acuamed?

Aguas de las Cuencas Mediterráneas S.A. (Acuamed) es el principal instrumento del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Estado español para la contratación, construcción, adquisición y explotación de toda clase de obras hidráulicas en el Mediterráneo español. Mayor operador europeo de infraestructuras hidráulicas.

**ACUAMED** es una Sociedad mercantil participada al 100% por el Estado español  
**Capital social:** 1.605 millones €.  
**Fondos propios:** 1.704 millones €.

Problemática Cuenca Mediterránea española:

- **Restricciones de agua** para el riego y abastecimiento.
- **Déficit estructural** de recursos hídricos.
- **Disminución de los recursos naturales renovables.**
- **Inundaciones.**
- **Sequías permanentes.**
- **Sobreexplotación** de acuíferos.

A la vez es el lugar donde se desarrolla una agricultura de las más competitivas.



Más del 66% de la superficie europea de invernaderos está en España

# Líneas básicas de actuación:



## Generación de nuevos recursos



Depuración y terciarios para reutilización



Desalación



## Gestión, mejora y protección ambiental

Mejora de la gestión del recurso hídrico



Modernización de regadíos



Protección frente a avenidas



Restauración ambiental

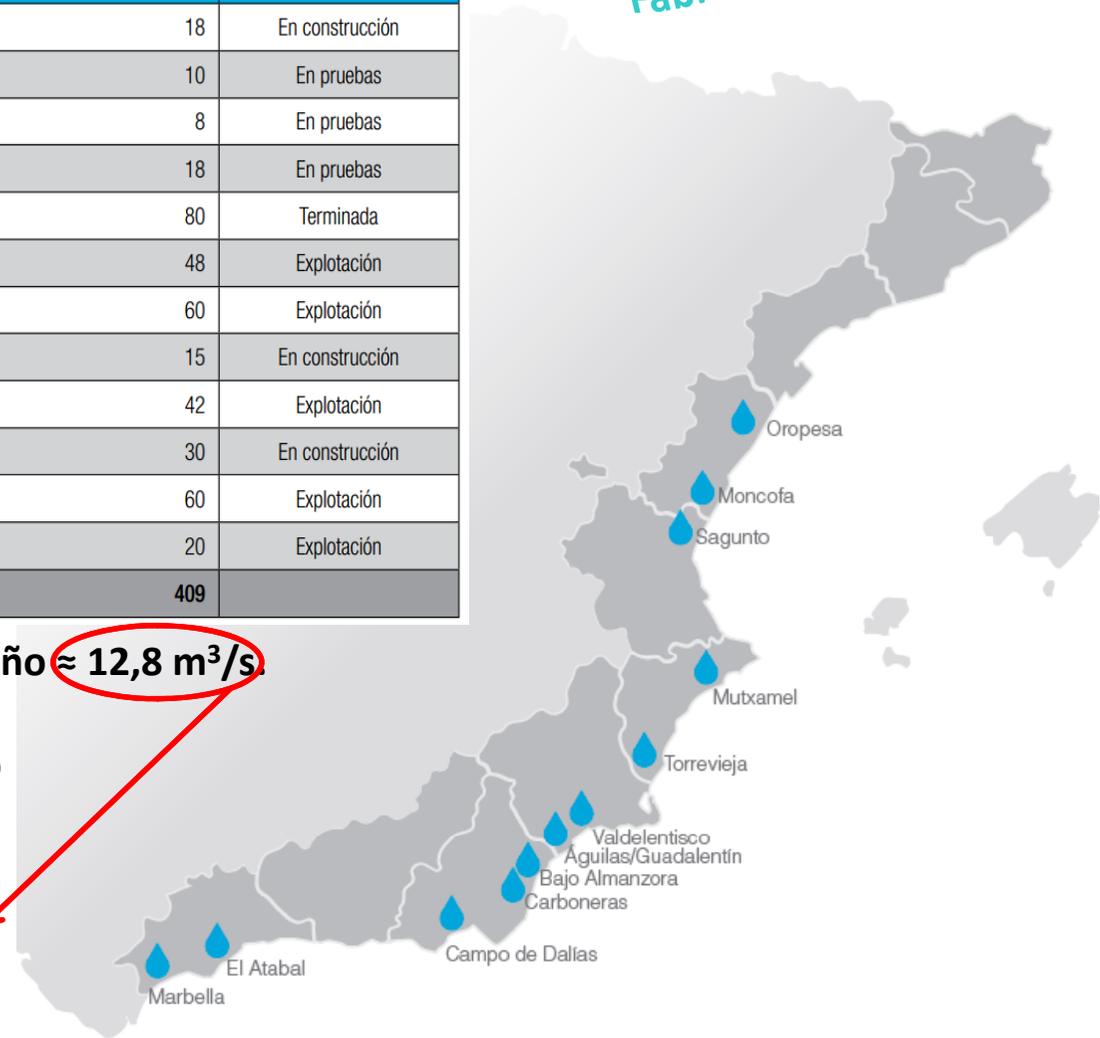


Mejora de la calidad del agua

## Situación de la 12 plantas desaladoras promovidas por Acuamed

Planta desaladora	Provincia	Uso	Capacidad de producción (hm <sup>3</sup> /año)	Situación
Oropesa	Castellón	Abastecimiento	18	En construcción
Moncófar	Castellón	Abastecimiento	10	En pruebas
Sagunto	Valencia	Abastecimiento	8	En pruebas
Mutxamel	Alicante	Abastecimiento	18	En pruebas
Torrevieja	Alicante	Abastecimiento / Riego	80	Terminada
Valdelentisco	Murcia	Abastecimiento / Riego	48	Explotación
Águilas	Murcia	Abastecimiento / Riego	60	Explotación
Bajo Almanzora	Almería	Riego	15	En construcción
Carboneras	Almería	Abastecimiento / Riego	42	Explotación
Campo de Dalias	Almería	Abastecimiento / Riego	30	En construcción
El Atabal	Málaga	Abastecimiento	60	Explotación
Marbella	Málaga	Abastecimiento	20	Explotación
			<b>409</b>	

Fabricamos agua...



Capacidad total de producción: **406 hm<sup>3</sup>/año ≈ 12,8 m<sup>3</sup>/s**

Abastecimiento a **5 millones de personas**

Superficie regable: **250.000 ha de regadío**

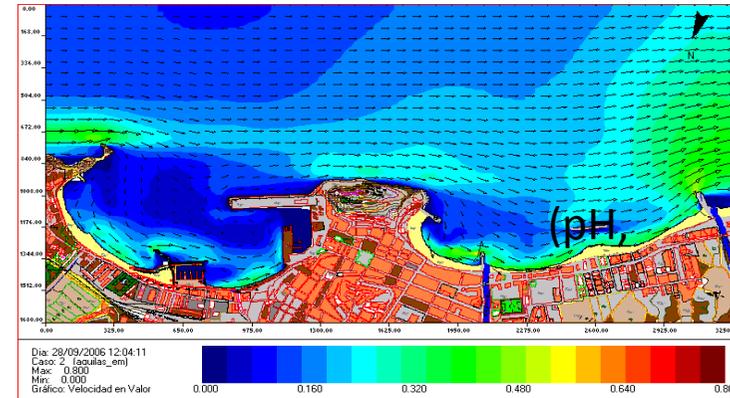
La extracción de agua fresca en la minería chilena de cobre en 2012 fue de **12,4 m<sup>3</sup>/s**. Fuente: Comisión Chilena del Cobre. 2013

# La desalación y su entorno: control del medio marino I

**Prioridad:** minimizar la afección a los ecosistemas marinos desde el diseño a la ejecución de la obra, así como durante la explotación de las plantas.

## 1. FASE PREOPERACIONAL

- Batimetría y registro de corrientes.
  - Caracterización de la columna de agua sólidos SS, oxígeno disuelto, nitratos, etc.)
  - Perfiles CTD (curvas de salinidad y temperatura).
  - Simulación de la pluma de vertido: CORMIX, COHERENS, modelos físicos...
  - Caracterización praderas de fanerógamas marinas y otros organismos marinos.
- CARTOGRAFÍA BIONÓMICA.**



# La desalación y su entorno: control del medio marino II

## 2. Fase de obras

- Seguimiento parámetros físico-químicos.
- Seguimiento estado praderas de fanerógamas marinas.
- Control calidad material de dragado.



Control del dragado y turbidez generada



## 3. Fase de explotación

- Instalación estaciones de control.
- Control calidad del medio receptor.
- Control calidad del efluente.
- Control posibles afecciones sobre praderas de fanerógamas marinas y otros organismos marinos (arrecifes biogénicos, equinodermos, moluscos, etc.).
- Vigilancia estructural conducciones marinas.



# Planta desaladora de la Marina Baja (Mutxamel, Alicante)



## Planta desaladora de la Marina Baja (Mutxamel, Alicante)

Tecnología de ósmosis inversa  
Producción: 50.000 m<sup>3</sup>/día (1ª fase)  
80.000 m<sup>3</sup>/día (2ª fase)

Comienzo obras: 22 abril 2009  
Fin de las obras: 22 octubre 2012  
Inversión aproximada 62 mill.euros



Caudal de vertido: 61.111 m<sup>3</sup>/día (1ª fase)  
97.778 m<sup>3</sup>/día (2ª fase)  
Salmuera: 68,2 psu y 18º C  
Factor de conversión: 45%

## Planta desaladora de la Marina Baja (Mutxamel, Alicante)

La planta desaladora de Mutxamel, en datos:

### Captación (5m)

- ✓ Toma directa.
- ✓ 4.214 m de conducción hasta planta.

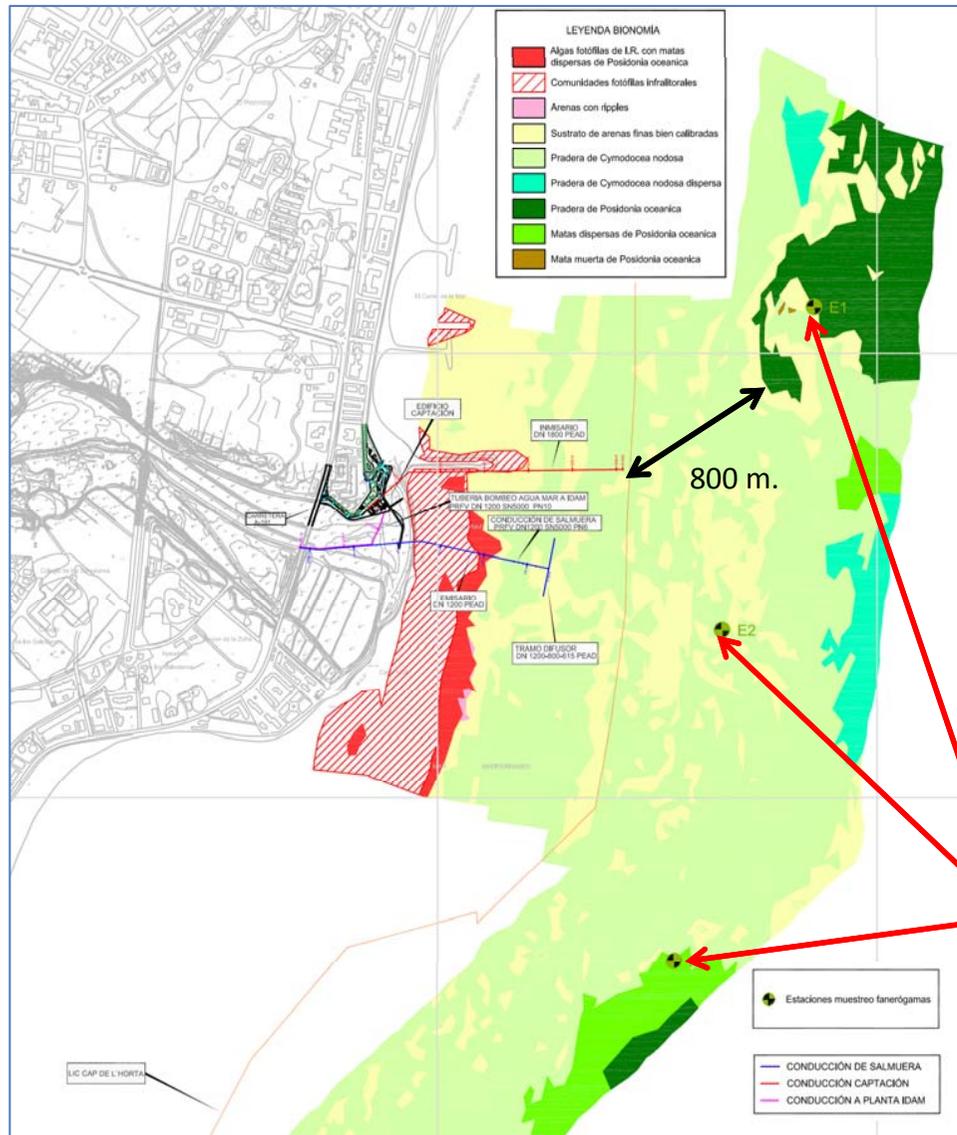
### Vertido (7,10 m)

- ✓ Desembocadura del río Seco.
- ✓ Tramo terrestre: 3.720 m y 1.200 mm  $\phi$ .
- ✓ Tramo submarino: 300 m de longitud y 1.200 mm  $\phi$ .
- ✓ Tramo difusor: 130 m longitud, 27 bocas, 110mm  $\phi$ , 5m separación y 45°.



**Red de distribución:** 39 km de conducciones y 36.500 m<sup>3</sup> de almacenamiento.  
12.800 m conducción y 2 depósitos (10.000 + 8.000 m<sup>3</sup>) a los TT.MM. San Juan, San Vicente del Raspeig y Alicante.  
26.135 m conducción y Refuerzo del abastecimiento de Campello y Mutxamel.

## Planta desaladora de la Marina Baja (Mutxamel, Alicante)



- **Tramitación ambiental:**

Declaración de Impacto Ambiental (DIA)  
Resolución de 5 de marzo de 2007, de la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio Climático (BOE nº 73 de 26 de marzo de 2007) del Ministerio de Medio Ambiente.

Autorización Ambiental Integrada (AAI)  
Resolución otorgada por la Dirección General de Calidad Ambiental de la Generalitat Valenciana.

Umbrales protección:

*Posidonia oceanica* 38,5 psu

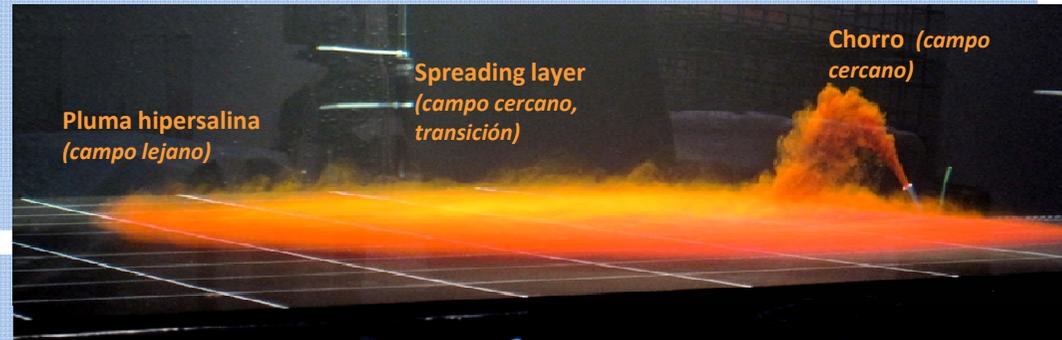
*Cymodocea nodosa* 39,5 psu

## Modelo físico reducido

### Simulación de un vertido hipersalino mediante modelos numéricos: CORMIX

#### Ventajas

- Gran variedad de dispositivos de vertido (chorro individual, múltiples, sumergidos...)
- Predicción variables de interés: diluciones, concentraciones...
- Considera influencias medio receptor (corriente, densidad, salinidad,  $T^a$ ...).



#### Inconvenientes

- Fiabilidad: determinados tipos de flujo.
- No considera series temporales (variaciones de condiciones).
- Calibración/validación resultados en CL escasa o nula.
- Sólo fiable hasta justo antes del impacto con el fondo (CORJET). Mucha incertidumbre después.
- En CORJET no puede haber impacto con contornos (superficie, fondo o paredes laterales).
- No considera el oleaje sobre la mezcla (vertical y horizontal).
- Interpretación resultados por usuario experto.

Avances en modelado de vertidos hipersalinos: **proyecto MEDVSA** <http://www.medvsa.es>  
**Herramientas modelado briHne** <http://www.brihne.ihcantabria.com/>

## Modelo físico reducido

# Aplicación CORMIX: cálculo dilución-boquillas. Escenarios de explotación.

### Datos de entrada

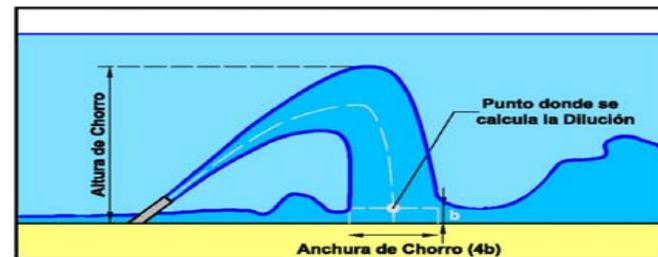
Datos simulación CORMIX 1		
Profundidad ficticia	100	m
Velocidad ambiente	0	m/s
Densidad ambiente media	1.027,50	kg/m <sup>3</sup>
Coef. De Darcy	0,0293	m <sup>2</sup>
Manning = 0.03	0,03	s/m <sup>1/3</sup>
Velocidad viento	0	m/s
Nº de bastidores	---	---
nº de bocas	---	---
Caudal vertido por cada boca	---	m <sup>3</sup> /s
Incremento de concentración	30,68	psu
Densidad del vertido	1.053,00	kg/m <sup>3</sup>
Distancia a costa	300	m
Diametro boca	0,11	m
Altura boca sobre fondo	1	m
Ángulo θ (chorro respecto al fondo)	45	°
Ángulo σ (chorro respecto a corriente)	90	°
Región de interes	100.000	m
Intervalo de la malla de puntos	30	---

Producción por bastidor (1 a 3)	16666,00	m <sup>3</sup> /día
Producción por bastidor (4 a 5)	15000,00	m <sup>3</sup> /día
Caudal de salmuera por bastidor (1-3)	20369,56	m <sup>3</sup> /día
Caudal de salmuera por bastidor (4-5)	18333,33	m <sup>3</sup> /día
Salinidad Ambiente	37,50	
Salinidad vertido	68,18	
Profundidad real zona vertido	7,10	m
Distancia entre difusores	5,00	m
Dilución necesaria Cymodocea	15,00	
Dilución necesaria Posidonia	30,00	
Altura geométrica disponible	50,75	m

**DILUCIONES**

Nº de bocas	1 BASTIDOR					2 BASTIDORES					3 BASTIDORES				
	Altura mar (m)	Dilución	Altura chorro (m)	Anch. chorro (m)	Salinidad (psu)	Altura mar (m)	Dilución	Altura chorro (m)	Anch. chorro (m)	Salinidad (psu)	Altura mar (m)	Dilución	Altura chorro (m)	Anch. chorro (m)	Salinidad (psu)
3	7,57	30,40	8,80	6,64	38,51	30,40	57,80	16,50	12,96	38,03	68,21	85,30	24,25	19,28	37,86
4	4,34	23,60	6,86	5,04	38,80	17,56	44,10	12,65	9,80	38,20	39,44	64,70	18,44	14,52	37,97
5	2,84	19,50	5,72	4,12	39,07	11,61	35,90	10,35	7,88	38,35	26,10	52,40	14,96	11,68	38,09
6	2,02	16,80	4,94	3,48	39,33	8,37	30,40	8,80	6,64	38,51	18,83	44,10	12,65	9,80	38,20
7	1,53	14,90	4,39	3,04	39,56	6,41	26,50	7,69	5,72	38,66	14,44	38,20	11,01	8,44	38,30
8	1,21	13,40	3,97	2,72	39,79	5,13	23,60	6,86	5,04	38,80	11,59	33,80	9,77	7,44	38,41
9	0,98	12,30	3,66	2,44	39,99	4,26	21,30	6,22	4,52	38,94	9,63	30,40	8,80	6,64	38,51
10	0,83	11,40	3,41	2,24	40,19	3,64	19,50	5,72	4,12	39,07	8,23	27,70	8,01	6,00	38,61
11	0,71	10,70	3,21	2,08	40,37	3,17	18,00	5,30	3,76	39,20	7,19	25,40	7,39	5,48	38,71
12	0,62	10,10	3,02	1,92	40,54	2,82	16,80	4,94	3,48	39,33	6,40	23,60	6,86	5,04	38,80
13	0,55	9,70	2,89	1,80	40,66	2,54	15,80	4,65	3,24	39,44	5,79	22,00	6,42	4,68	38,89
14	0,43	9,20	2,77	1,72	40,83	2,07	14,90	4,39	3,04	39,56	4,73	20,70	6,03	4,40	38,98
15	0,39	8,90	2,65	1,60	40,95	1,89	14,10	4,17	2,84	39,68	4,34	19,50	5,72	4,12	39,07
16	0,35	8,60	2,56	1,52	41,07	1,75	13,40	3,97	2,72	39,79	4,02	18,50	5,41	3,88	39,16
17	0,32	8,30	2,47	1,48	41,20	1,63	12,80	3,81	2,56	39,90	3,75	17,60	5,17	3,68	39,24
18	0,29	8,10	2,42	1,40	41,29	1,53	12,30	3,66	2,44	39,99	3,52	16,80	4,94	3,48	39,33
19	0,27	7,90	2,35	1,36	41,38	1,44	11,90	3,54	2,32	40,08	3,33	16,10	4,74	3,32	39,41
20	0,25	7,70	2,28	1,32	41,48	1,37	11,40	3,41	2,24	40,19	3,17	15,40	4,55	3,16	39,49
21	0,24	7,50	2,24	1,28	41,59	1,31	11,10	3,30	2,16	40,26	3,03	14,90	4,39	3,04	39,56
22	0,22	7,30	2,18	1,24	41,70	1,25	10,70	3,21	2,08	40,37	2,91	14,30	4,24	2,92	39,65
23	0,21	7,20	2,14	1,20	41,76	1,21	10,40	3,11	2,00	40,45	2,80	13,90	4,10	2,80	39,71
24	0,20	7,10	2,09	1,16	41,82	1,17	10,10	3,02	1,92	40,54	2,71	13,40	3,97	2,72	39,79
25	0,19	7,00	2,06	1,12	41,88	1,13	9,90	2,95	1,88	40,60	2,63	13,00	3,87	2,60	39,86
26	0,18	6,90	2,03	1,12	41,95	1,10	9,70	2,89	1,80	40,66	2,55	12,70	3,75	2,52	39,92

  Incumple condición    
   Cumple umbral Cymodocea    
   Cumple umbral Posidonia



## Modelo físico reducido

**Encomienda de Gestión con el CEDEX para la Asistencia Técnica para el diseño, construcción y vigilancia ambiental de los dispositivos de vertido al mar de efluentes líquidos.**



**OBJETIVO:** despejar incertidumbres acerca de las diluciones conseguibles con un diseño de vertido determinado, considerando las condiciones climatológicas marinas (corrientes y oleaje) sobre los fenómenos de mezcla y dispersión del efluente hipersalino.

### METODOLOGÍA

1. Revisión del diseño del tramo difusor.
2. Adaptación del modelo físico. Calibración.
3. Estudio corrientes, planteamiento y realización de ensayos:
  - I. Ensayo en condición de calma.
  - II. Ensayo con corriente lateral de intensidad baja.
  - III. Ensayo con corriente lateral de intensidad media.
  - IV. Ensayo con corriente lateral y con oleaje de régimen medio en la zona.
4. Mediciones, análisis y obtención de resultados.

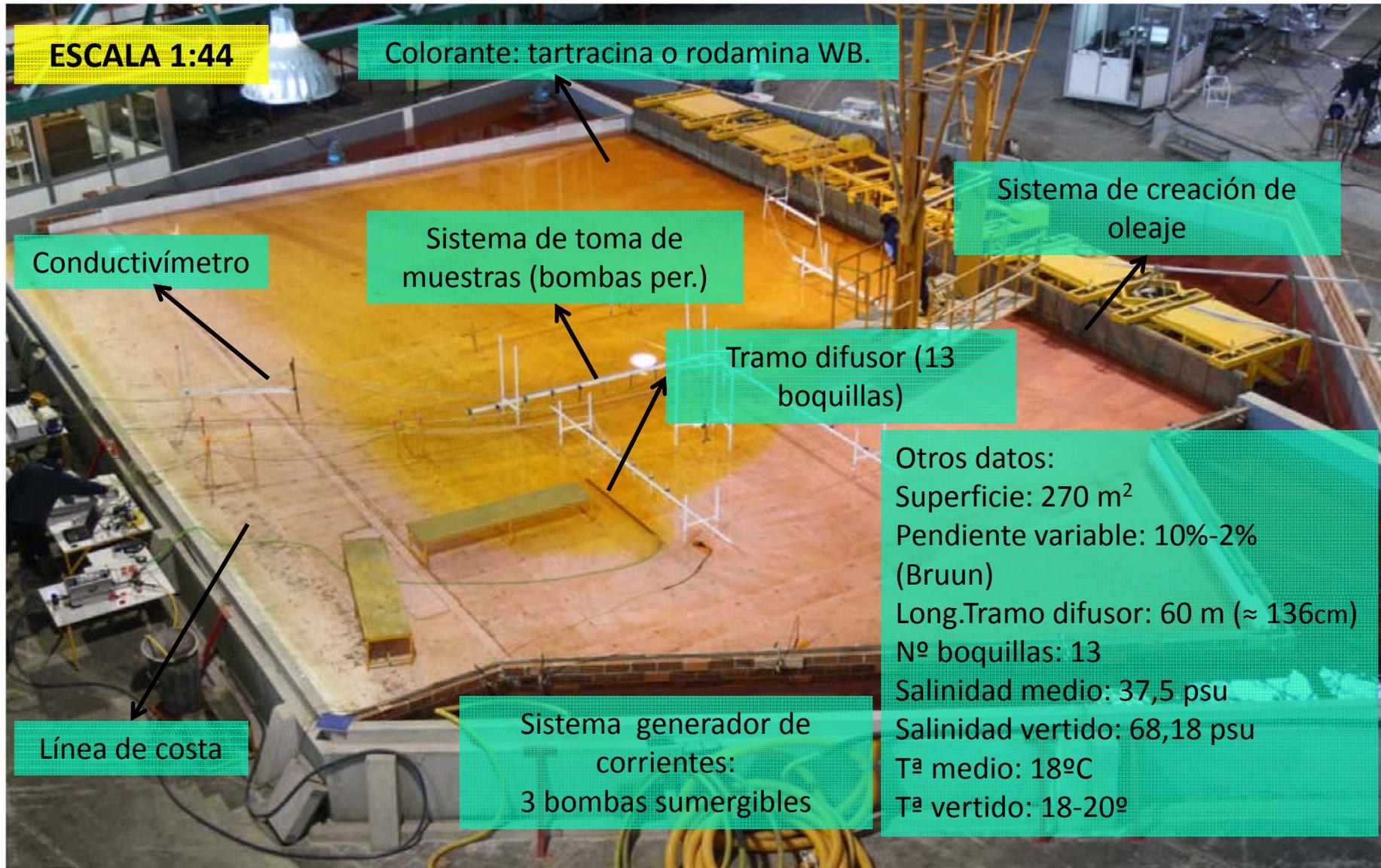
## Modelo físico reducido

Nave de ensayos del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.



**APOYO MULTIDISCIPLINAR DE ASISTENCIA TÉCNICA (70%)  
Y DE I+D+i (30 %) EN TECNOLOGÍAS DE INGENIERÍA CIVIL,  
CONSTRUCCIÓN Y TEMAS AMBIENTALES ASOCIADOS A  
DIFERENTES ADMINISTRACIONES, INSTITUCIONES  
PÚBLICAS Y EMPRESAS PRIVADAS.**

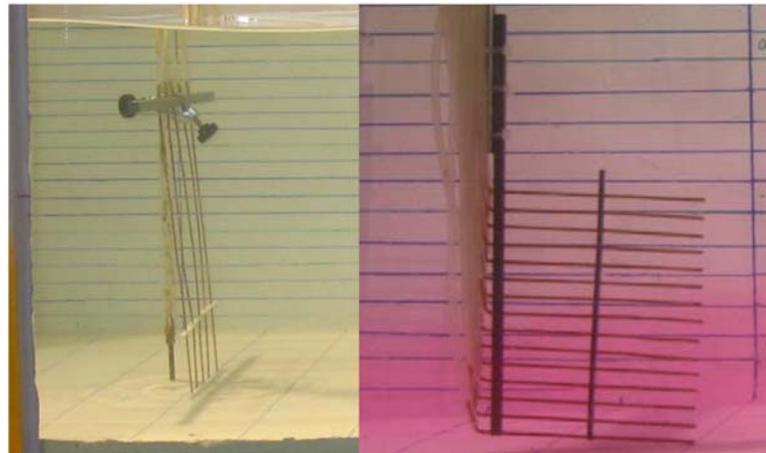
## Modelo físico reducido. CONSTRUCCIÓN.



## Modelo físico reducido. CONSTRUCCIÓN.



Depósitos salmuera y colorante



Sistema de toma de muestras (tubos capilares de cobre)



Salinómetro precisión



Tramo difusor y boquilla (PVC)



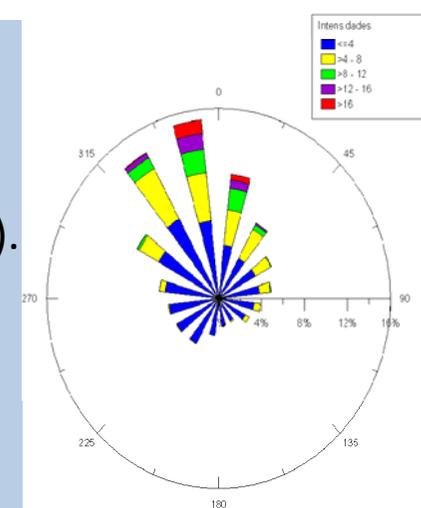
Paletas de oleaje (mediante software GEDAP)

## Modelo físico reducido. PREPARACIÓN ENSAYOS.

Simulación efluente  
hiperdenso

		Salmuera	Ambiente	$\Delta\rho$
Prototipo	Salinidad (psu)	68,2	37,5	$\frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_0} = \frac{1050,74 - 1027,18}{1050,74} \approx 0,0224$
	Temperatura (°C)	20	18	
	Densidad (kg/ m <sup>3</sup> )	1050,74	1027,18	
Modelo	Salinidad (psu)	30,4	0,3	$\frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_0} = \frac{1021,75 - 998,83}{1021,75} \approx 0,0224$
	Temperatura (°C)	10	10	
	Densidad (kg/ m <sup>3</sup> )	1021,75	998,83	

- Estudio de corrientes
  - ✓ Mayor frecuencia NW y NE.
  - ✓ Calma (< 2 cm/s), en torno a un 40%.
  - ✓ Corriente 2-4 cm/s, un 30% (no exc. 70%).
  - ✓ Corriente 10 cm/s (no excedencia 90%).



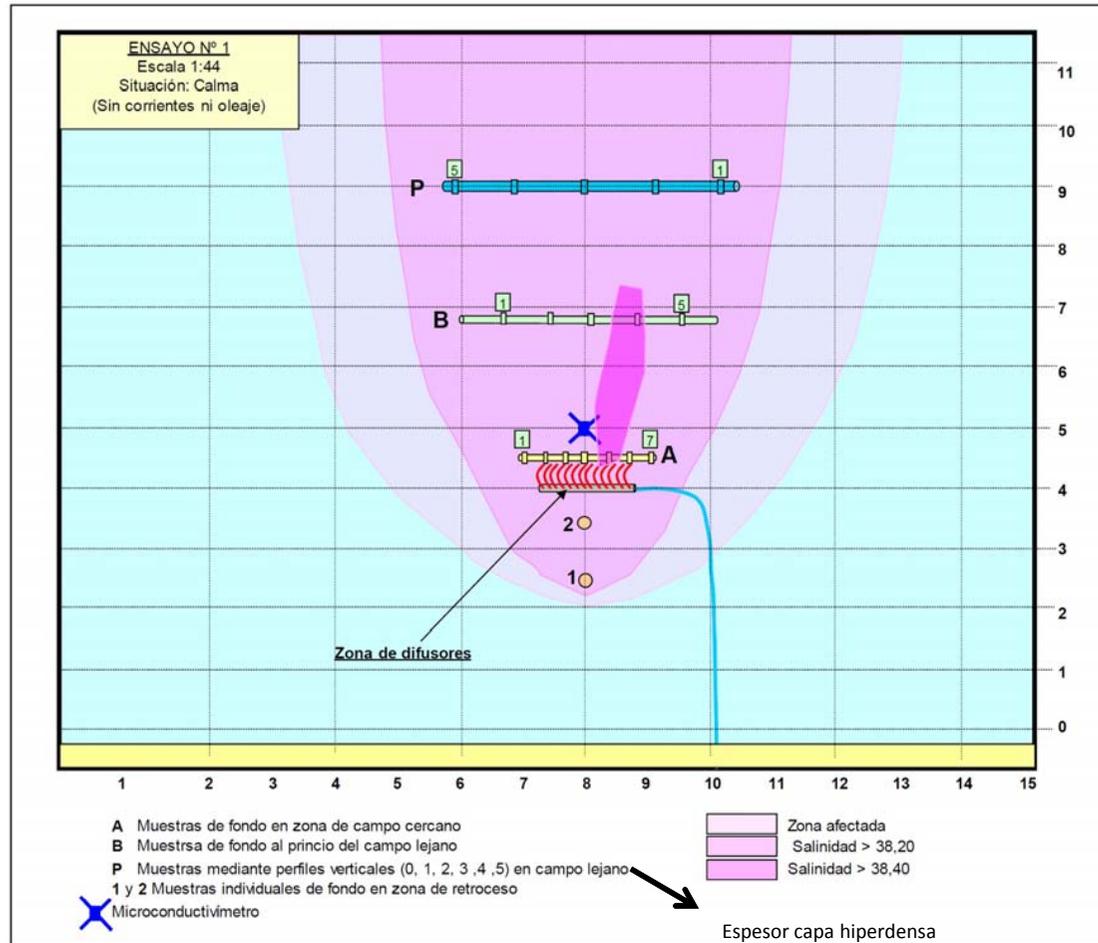
Calibrado sistema de corrientes (variador de frecuencia).

- Oleaje (datos Puertos del Estado) (no excedencia 80%)
  - Altura significativa real 0,92 m  $\approx$  0,021 m (modelo)
  - Periodo de pico real 6,87 s  $\approx$  1,051 s (modelo)

Establecimiento y  
calibración condiciones  
climatológicas

# Modelo físico reducido. DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

## ENSAYO 1. Situación de calma hidrodinámica (prob. presentación 40%).



### Condiciones de simulación:

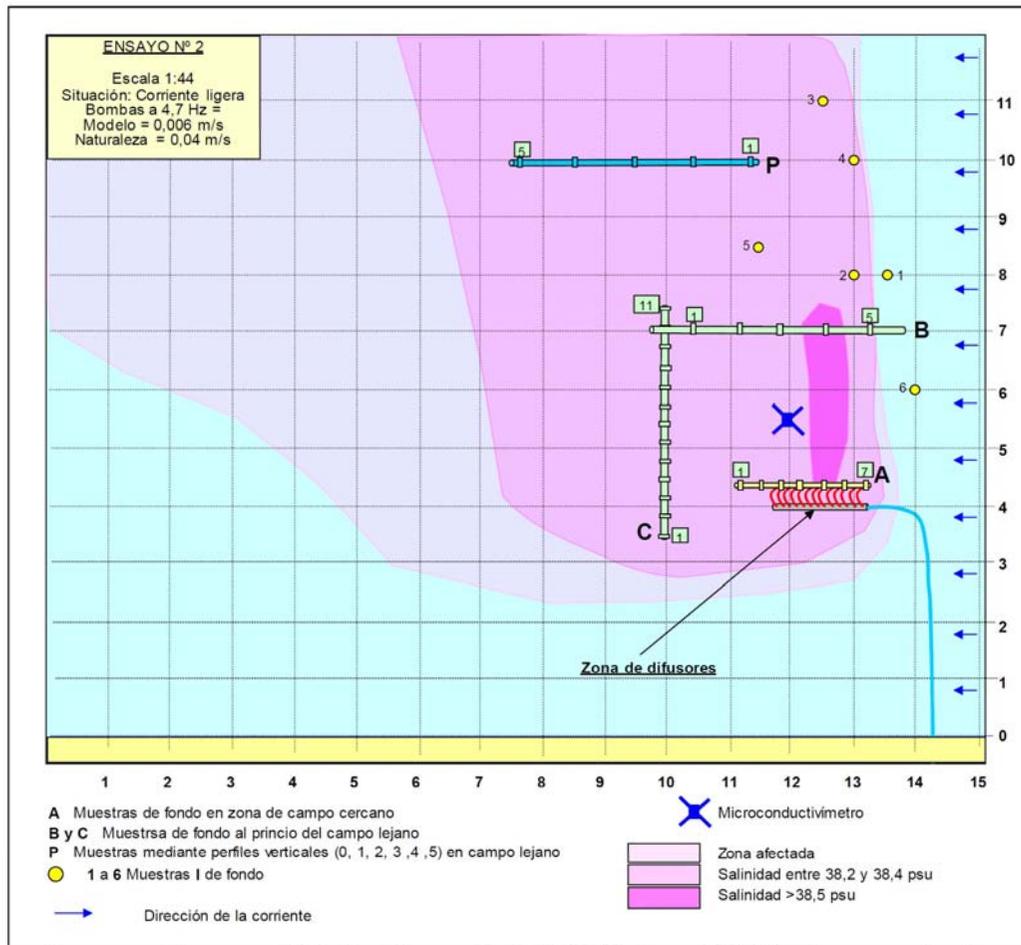
- Sin corrientes.
- Sin oleaje.
- “Condiciones pésimas”, a priori.

### Resultados:

- % salmuera en muestras siempre inferior a 3%.
- Salinidad medida en capa de mezcla  $\leq 38,42$ psu.
- Diluciones superiores a 30 (incluso en campo cercano).
- Incrementos salinidad  $\leq 1$  psu.

# Modelo físico reducido. DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

## ENSAYO 2. Situación hidrodinámica: corriente de 4 cm/s (70% prob. no excedencia).



### Condiciones de simulación:

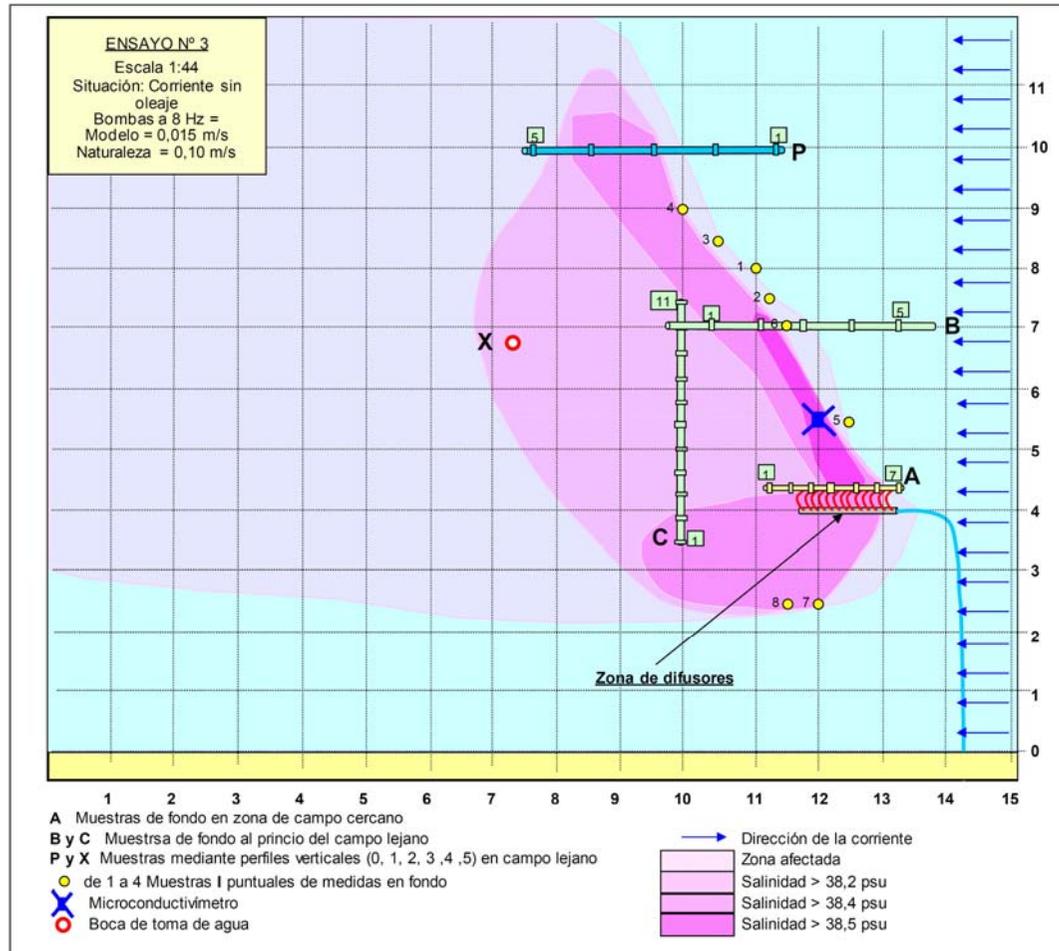
- Sin oleaje.
- Corriente paralela a costa de 4 cm/s ( $\approx 0,6$  cm/s)
- Diluciones mayores esperables.

### Resultados:

- Deformación mancha hipersalina.
- Salinidad en el fondo entre 38,2 y 38,4 psu (exc. A5 y B4, con 38,55 psu).
- Acción de la corriente curva los chorros de salida produciendo **interferencias** de unos con otros.
- Disminución diluciones campo cercano en algún caso ( $< 30$ psu).
- CL: diluciones parecidas al E1, incluso mejores ligeramente.
- No se supera nunca 38,5 psu en CL
- Incrementos salinidad  $\leq 1$  psu.

# Modelo físico reducido. DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

## ENSAYO 3. Corriente lateral de 10 cm/s (90% prob. no excedencia)



Condiciones de simulación:

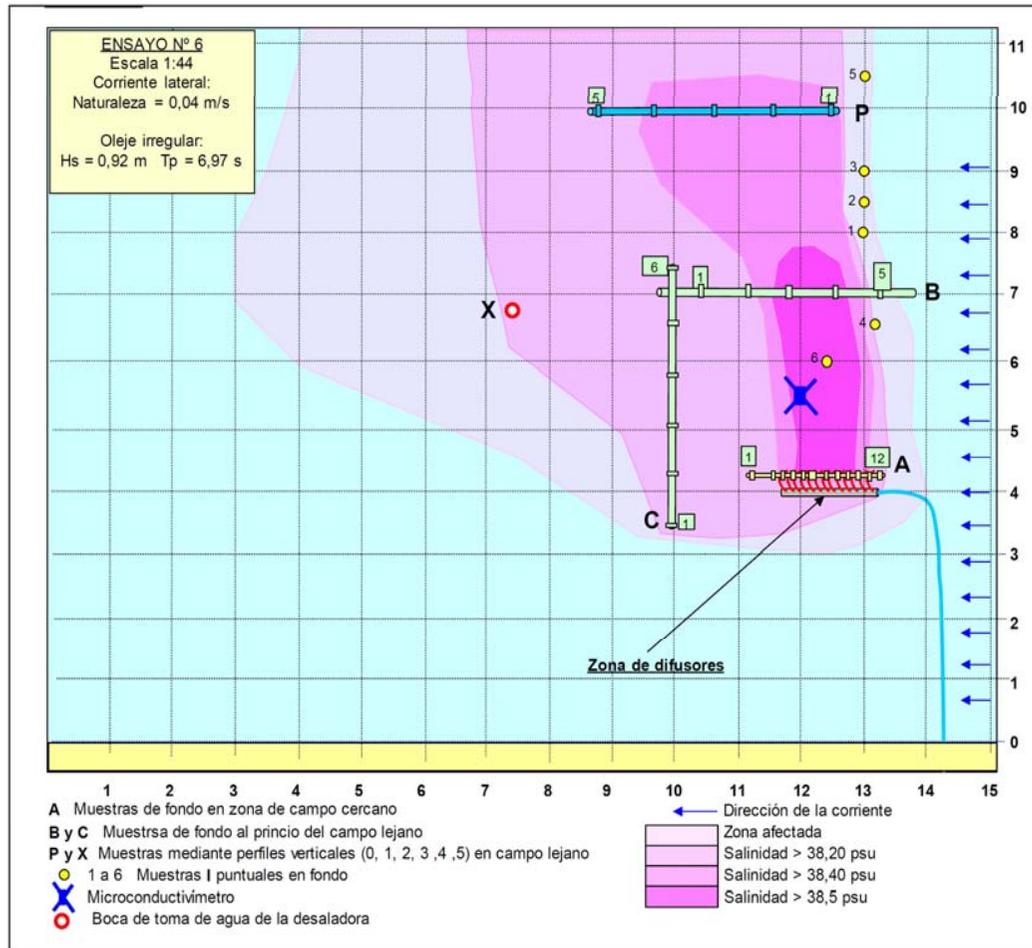
- Sin oleaje.
- Corriente paralela a costa de 10 cm/s ( $\approx 1,5$  cm/s)
- Diluciones mayores esperables.
- **Ubicación captación agua de mar.**

Resultados:

- **Mayor deformación mancha.**
- Salinidad en el fondo < 38,5 psu (exc. A5 y B2 psu). 
- Valores > 38,2 en captación en fondo, hasta 1,75 m (espesor capa) y toma agua a 3-4 m del fondo.
- Mayor nº puntos con salinidad > 38,4.
- Mayor velocidad avance capa.
- **Acción de la corriente curva los chorros de salida produciendo interferencias de unos con otros.**

# Modelo físico reducido. DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

## ENSAYO 4. Corriente lateral de 4 cm/s (prob. 70%) y oleaje medio.



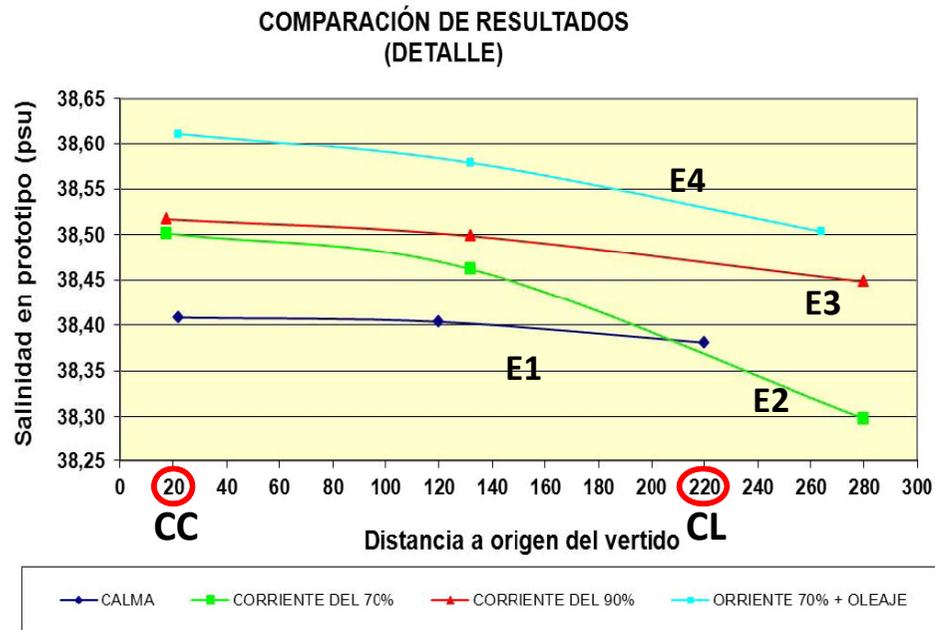
### Condiciones de simulación:

- Oleaje irregular perpendicular a costa de 0,92 m de altura significativa y 6,87 s de periodo. Software GEDAP.
- Corriente paralela a costa de 4 cm/s ( $\approx 0,6$  cm/s).
- **Ubicación captación agua de mar.**

### Resultados:

- Similares a E3, pero algo superiores.
- **Superación ligera de 38,5 psu en zona de impacto e inicio de CL.**
- Valor máximo: 38,66 psu (A5)  $\approx$  dilución 26,47. Cumple *Cymodocea*.
- 38,36 en captación en fondo, hasta 1,32 m (espesor capa) y toma agua a 3-4 m del fondo.
- Menor velocidad avance que E3.

## Modelo físico reducido. CONCLUSIONES.



- E1 presenta siempre valores inferiores a 38,5 psu (umbral *Posidonia*) incluso en CC.
- E2 sólo supera 38,5 ligeramente en CC, disminuyendo claramente en zona de establecimiento de capa hiperdensa y CL.
- E3 también supera ligeramente 38,5 psu en CC, se mantiene en zona establecimiento y disminuye en CL.
- E4 supera 38,5 en CC y comienzo de zona de establecimiento, marcando 38,5 psu en CL.

- Mayor influencia de corriente que oleaje en la forma de la capa de mezcla y, por tanto, afección al medio (comparación E2-E4).
- Valores inferiores a umbral de *Cymodocea nodosa* en todos los ensayos, incluso en el mismo punto de impacto del chorro.
- Mayores diluciones en situaciones de calma al no haber interacción entre chorros (=menor dilución con corriente).
- Disminución de salinidad en CL en todos los casos, menor en calma.
- Efecto corriente y oleaje sobre dilución es muy leve (como máximo, diferencia de 0,2 psu en un mismo punto entre ensayos).
- En CL (220-290 m), siempre se llega con 38,5 psu (*Posidonia*) y las praderas están a 800 m.
- Orden de salinidad en CC:

$$E1 < E2 < E3 < E4$$

### IMPORTANTE

	Dilución	Salinidad muestra (psu)
Resultado con CORMIX (calma)	22	38.90
E1 (calma)	33.70	38.41
E2 (corriente baja)	30.68	38.5
E3 (corriente media)	30.08	38.52
E4 (corriente baja y oleaje)	27.64	38.61

An underwater photograph showing a dense field of green seaweed in the foreground and middle ground. Several small fish are swimming in the clear, blue-green water above the seaweed. The background is a hazy, light blue, suggesting a deep or open water environment.

GRACIAS

Contacto: [fbenayas@acuamed.es](mailto:fbenayas@acuamed.es)

*[Video](#)*

Foto: J. Miguel Sandoval Gil