



IH cantabria

INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL

**Modelos de campo lejano. Bases teóricas.
Modelación hidrodinámica.
Plan Nacional I+D+i: 045/RN08/3.3**

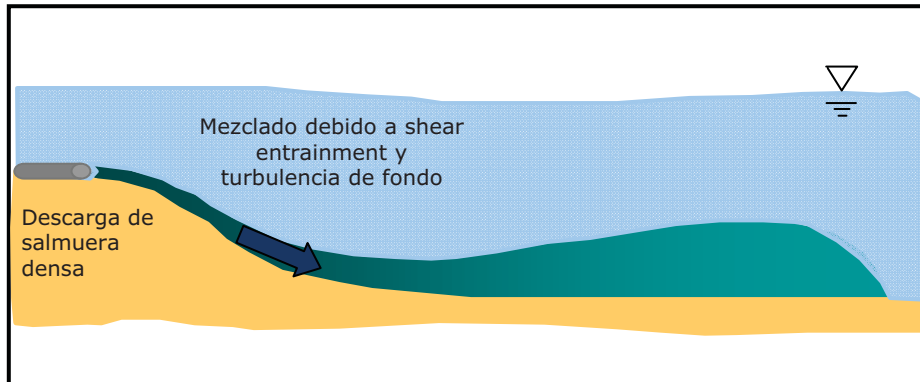
Andrés García Gómez

Contenidos de la presentación

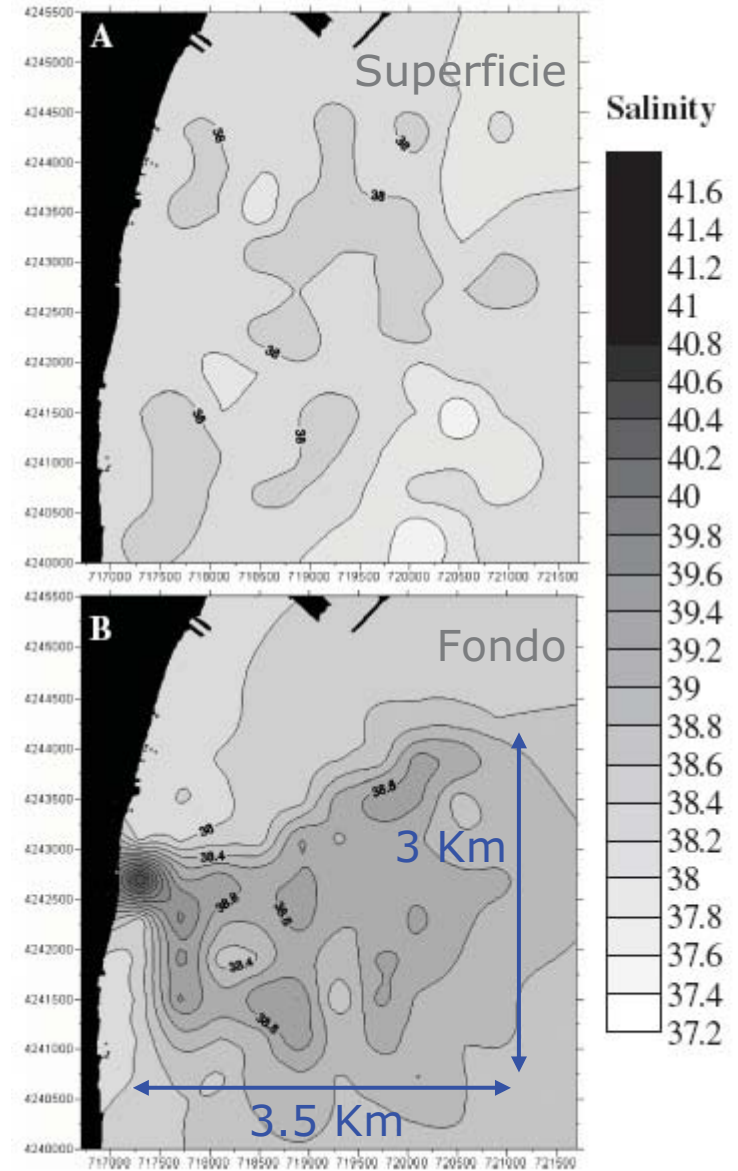
- 1. Introducción
- 2. El campo lejano
- 3. Modelado en campo lejano. Bases teóricas
- 4. Modelado en campo lejano. Herramientas
- 5. Plan Nacional I+D+i 045/RN08/3.3
- 6. Conclusiones

1. Introducción

Evolución del vertido hiperdenso:



Fluido bicapa



Fuente: Fernández-Torquemada y Sánchez-Lizaso

1. Introducción

Efectos de la salmuera:

Anoxia en los fondos en zonas con escasa renovación

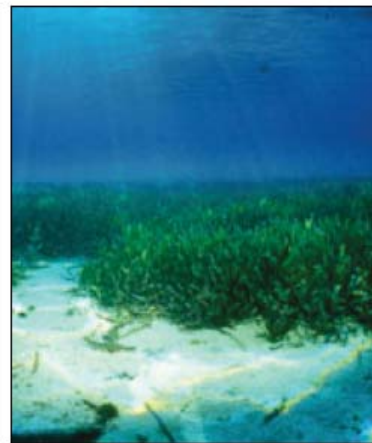
Turbulencia y reducción de la entrada de la luz

Afección a especies marinas

Afección a fanerógamas marinas

Mar Mediterráneo

hasta 40 m



Posidonia oceanica

hasta 30 m



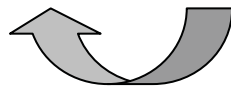
Cymodocea nodosa

hasta 20 m



Caulerpa prolifera

Directiva
92/43/CEE



1. Introducción

La legislación no contempla límites para este tipo de vertidos



Investigaciones para establecer límites críticos de salinidad

ESPECIE	LÍMITE CRÍTICO DE SALINIDAD
<i>Posidonia oceánica</i>	No superar 38.5 psu en más del 25% de las observaciones. No superar 40 psu en más del 5% de las observaciones.
<i>Cymodocea nodosa</i>	No superar 39.5 psu en más del 25% de las observaciones. No superar 41 psu en más del 5% de las observaciones.
<i>Caulerpa prolifera</i>	No superar 44 psu
Bivalvos	No superar la salinidad 50 – 70 psu

criterios estadísticos



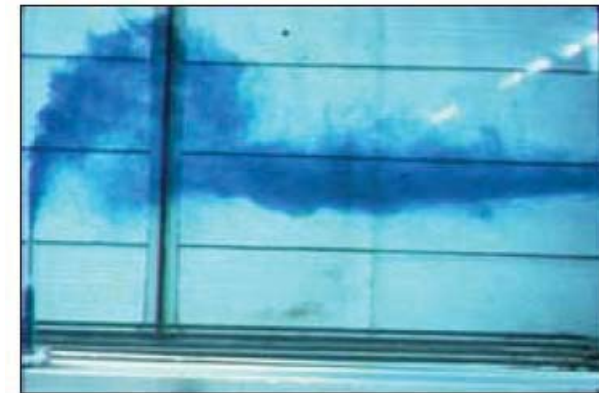
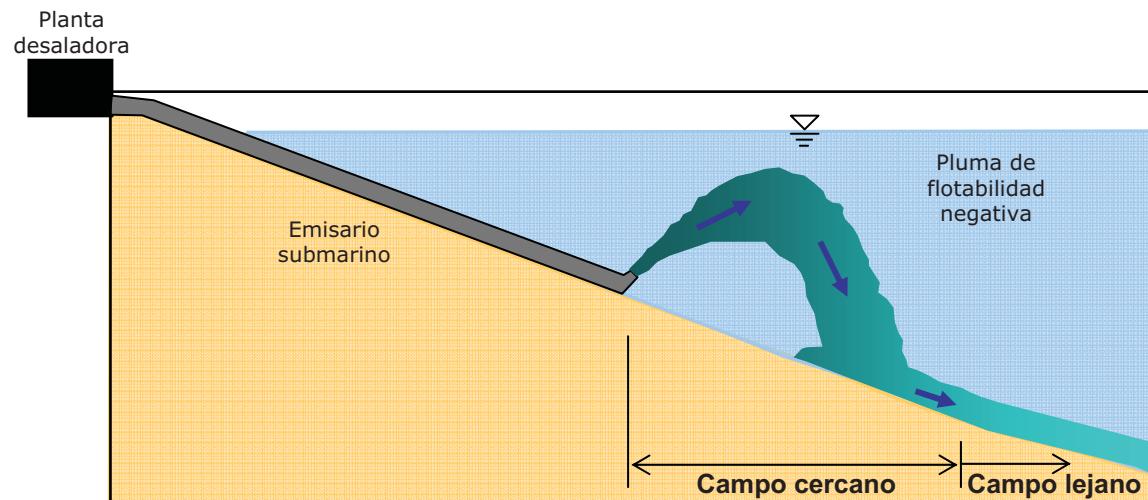
1. Introducción

Consecución de una dilución suficiente del vertido en el medio marino



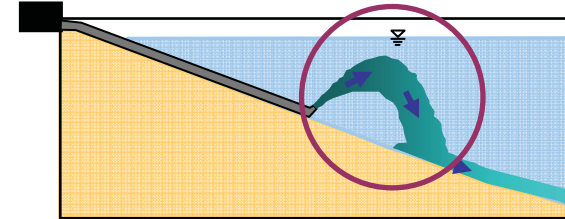
Estudio de su comportamiento

(propiedades del efluente vs. propiedades fluido ambiente, condiciones del medio receptor)



Fuente: ensayos CORMIX

1. Introducción



Campo cercano:

comportamiento

- propiedades del efluente vs. fluido ambiente
- sistema de vertido

altas diluciones

escalas espacio-temporales reducidas (m, segundos)

Campo lejano:

comportamiento

- condiciones del medio receptor
- diferencia de densidad entre fluidos

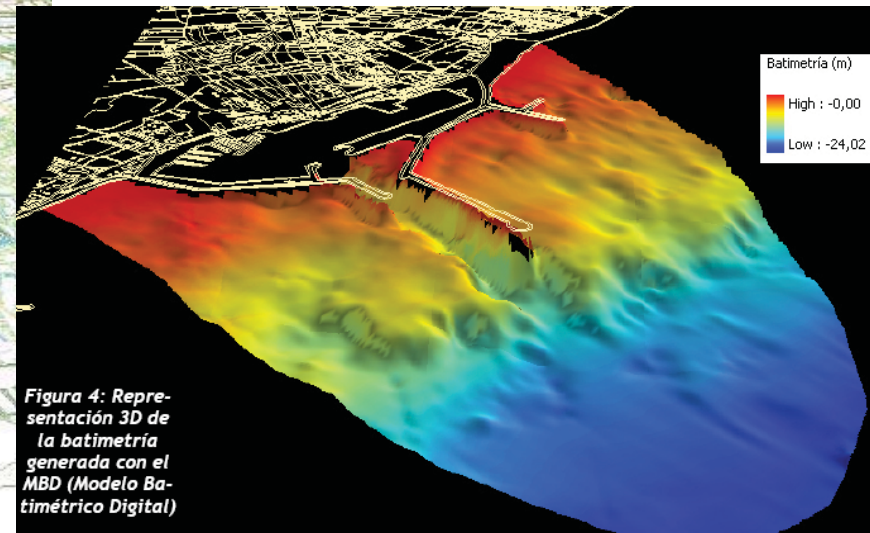
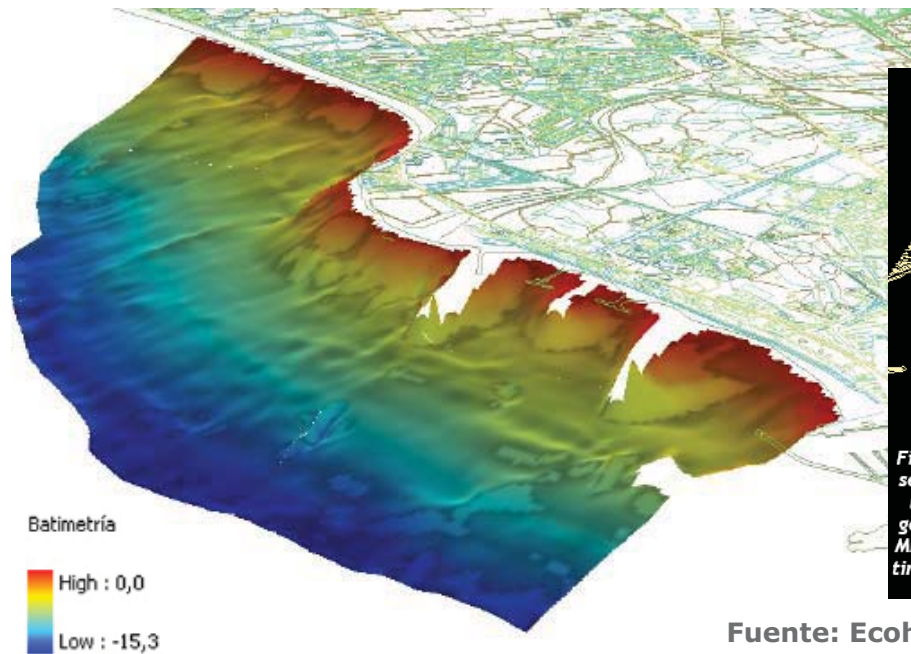
bajas diluciones

escalas espacio-temporales grandes (Km, horas)

2. El campo lejano

En el campo lejano los parámetros del medio receptor son determinantes en el comportamiento de la pluma

Batimetría:



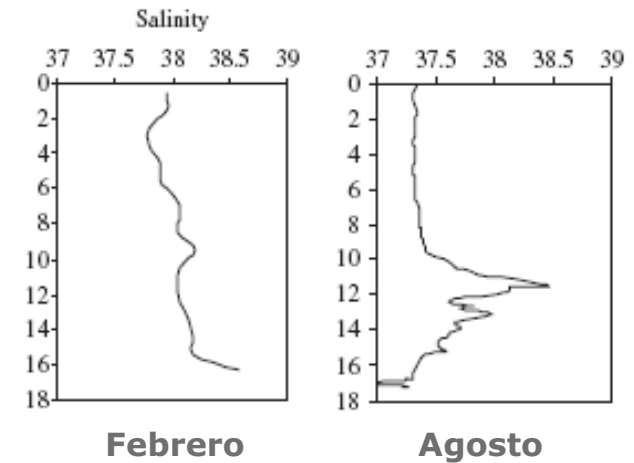
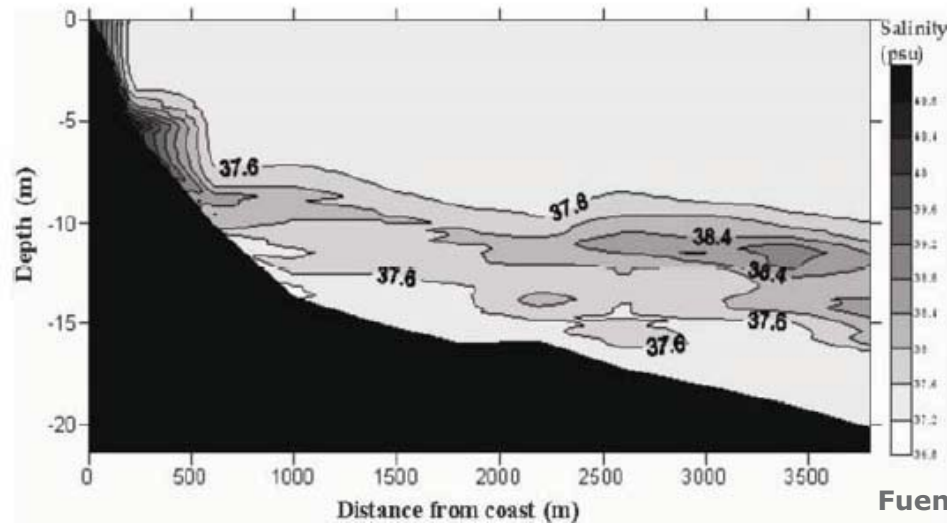
Fuente: Ecohydros, S.L.

2. El campo lejano

Corrientes ambientales:

- Misma dirección y sentido
- Transversales

Estratificación del medio:



Fuente: Fernández-Torquemada et al. (2005)

Oleaje:

- Factor poco estudiado
- Importancia en aguas someras

3. Modelado en campo lejano. Bases teóricas

Modelado



Ecuaciones

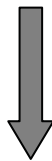
Estado
Continuidad
Cant. Movimiento
Transporte

1) Ecuación de estado:

$$\rho = f(T, S, P)$$

ρ es la densidad
T es la temperatura
S es la salinidad
P es la presión

Fluido incompresible



$$\rho = f(T, S)$$

Fórmula empírica de la UNESCO (1981)

$$\rho(T, S) = 999.842594 + 6.793952 \cdot 10^{-2}T - 9.09529 \cdot 10^{-3}T^2 + 1.001685 \cdot 10^{-4}T^3 - 1.120083 \cdot 10^{-6}T^4 + 6.536332 \cdot 10^{-9}T^5 + (0.824493 - 4.0899 \cdot 10^{-3}T + 7.6438 \cdot 10^{-5}T^2 - 8.2467 \cdot 10^{-7}T^3 + 5.3875 \cdot 10^{-9}T^4)S + (-5.72466 \cdot 10^{-3} + 1.0227 \cdot 10^{-4}T - 1.6546 \cdot 10^{-6}T^2)S^{1.5} + 4.8314 \cdot 10^{-4}S^2$$

3. Modelado en campo lejano. Bases teóricas

Modelado



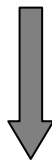
Ecuaciones

{ Estado
Continuidad
Cant. Movimiento
Transporte

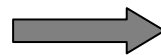
2) Ecuación de continuidad:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \vec{u} = 0$$

Fluido incompresible



$$\nabla \vec{u} = 0$$



$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

u, v, w son las componentes del vector velocidad

3. Modelado en campo lejano. Bases teóricas

Modelado



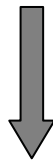
Ecuaciones

{ Estado
Continuidad
Cant. Movimiento
Transporte

3) Ecuaciones de cantidad de movimiento:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \vec{u} + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)$$

Fluido incompresible
Hipótesis de Boussinesq



$$\rho_0 \frac{Du_i}{Dt} = \rho_0 F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (\text{Ecs. de Navier-Stokes})$$

ρ_0 es la densidad

F_i son las componentes de las fuerzas inerciales

μ es la viscosidad dinámica del fluido

3. Modelado en campo lejano. Bases teóricas

Modelado



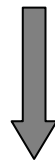
Ecuaciones

{ Estado
Continuidad
Cant. Movimiento
Transporte

4) Ecuación de transporte (advección-difusión)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + R = 0$$

Ley de difusión de Fick



$$q_i = -k \frac{\partial c}{\partial x_i}$$



$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = k \frac{\partial^2 c}{\partial x_i^2} + R$$

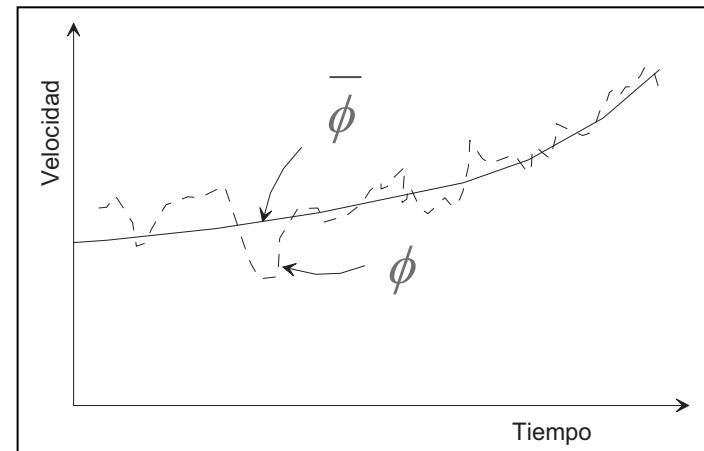
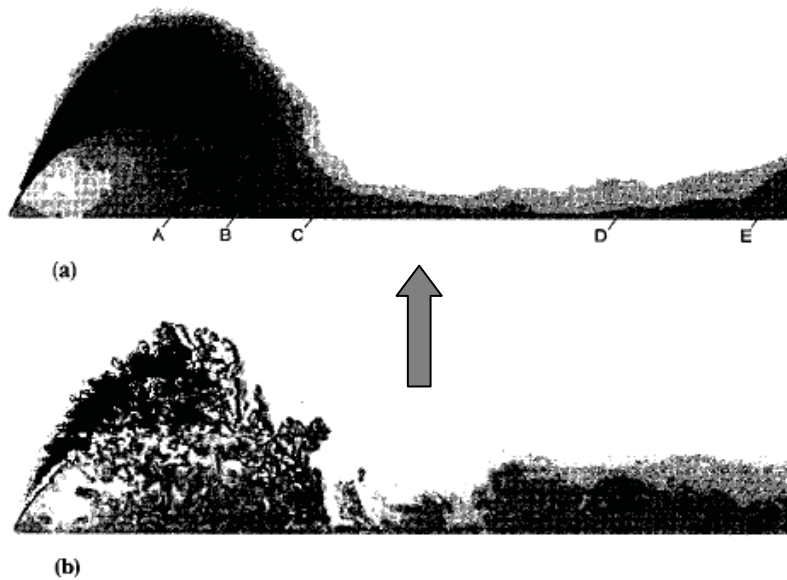
k es el coeficiente de difusión molecular
R son las fuentes y sumideros

3. Modelado en campo lejano. Bases teóricas

Fenómenos y flujos turbulentos

Descomposición de Reynolds

$$\phi(t) = \bar{\phi} + \phi'(t)$$



Fuente: Roberts (1997)

3. Modelado en campo lejano. Bases teóricas

Modelado



Ecuaciones { Estado
Continuidad
Cant. Movimiento
Transporte

2) Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

3) Ecuaciones de Navier-Stokes (Ecs. de Reynolds)

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = \rho_0 \left[F_x - \underbrace{\left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right)}_{\text{}} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right)$$

Modelos de cierre de la turbulencia

3. Modelado en campo lejano. Bases teóricas



4) Ecuación de transporte (advección-difusión)

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}c}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}c}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}c}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}'c'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'c'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'c'}{\partial z} = k \left(\frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} \right) + \bar{R}$$

Hipótesis de Reynolds

$$\overline{u_i'c'} = -D_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i}$$

D_x, D_y, D_z son los coeficientes de difusión turbulenta

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}c}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}c}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}c}{\partial z} = (k + D_x) \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + (k + D_y) \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} + (k + D_z) \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} + \bar{R}$$

$$k \ll D_i$$

4. Modelado en campo lejano. Herramientas

Tipos de modelos: Eulerianos
 Lagrangianos

Modelos lagrangianos:

Análisis de trayectorias de partículas
Resolución por métodos probabilísticos

Combinado - euleriano para la hidrodinámica
 - lagrangiano para el transporte de sustancias

SPH - completamente lagrangiano
(Smoothed Particle
Hydrodynamics)

4. Modelado en campo lejano. Herramientas

Tipos de modelos: Eulerianos
Lagrangianos

Modelos eulerianos:

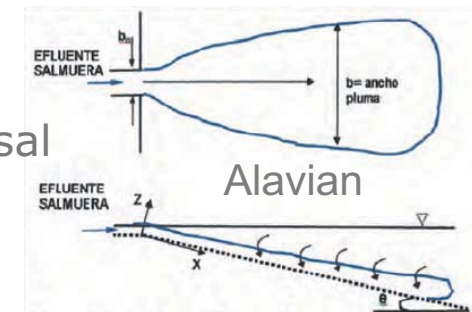
Discretización del dominio espacial en celdas de cálculo
Resolución de las ecuaciones en un marco espacial fijo

De integración

- Resuelven ecuaciones integradas en sección transversal
- Métodos numéricos sencillos
- Sólo medio receptor ilimitado

Hidrodinámicos

- Resuelven ecuaciones 3D
- Manejan gran cantidad de variables
- Complejidad y errores de difusión numérica

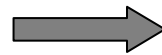


4. Modelado en campo lejano. Herramientas

Habitualmente se emplean modelos eulerianos 3D

Herramientas:

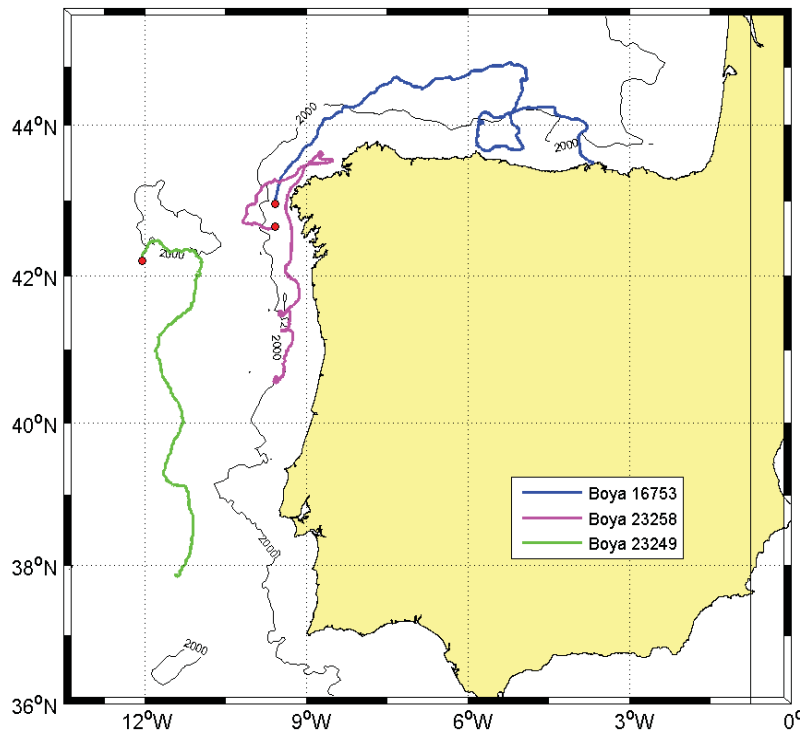
- COHERENS
- MOHID
- Delft3D
- Telemac 3D
- MIKE 3
- ROMS



Esquemas numéricos, ADI
Mallas celdas esféricas
Tridimensionalidad
Incorporación batimetría
Corrientes multidireccionales
Interacción con contornos
Sinergias de vertidos

...

4. Modelado en campo lejano. Herramientas



Corrientes ambientales

Marea astronómica

Viento

Rotura del oleaje

Baroclínicas

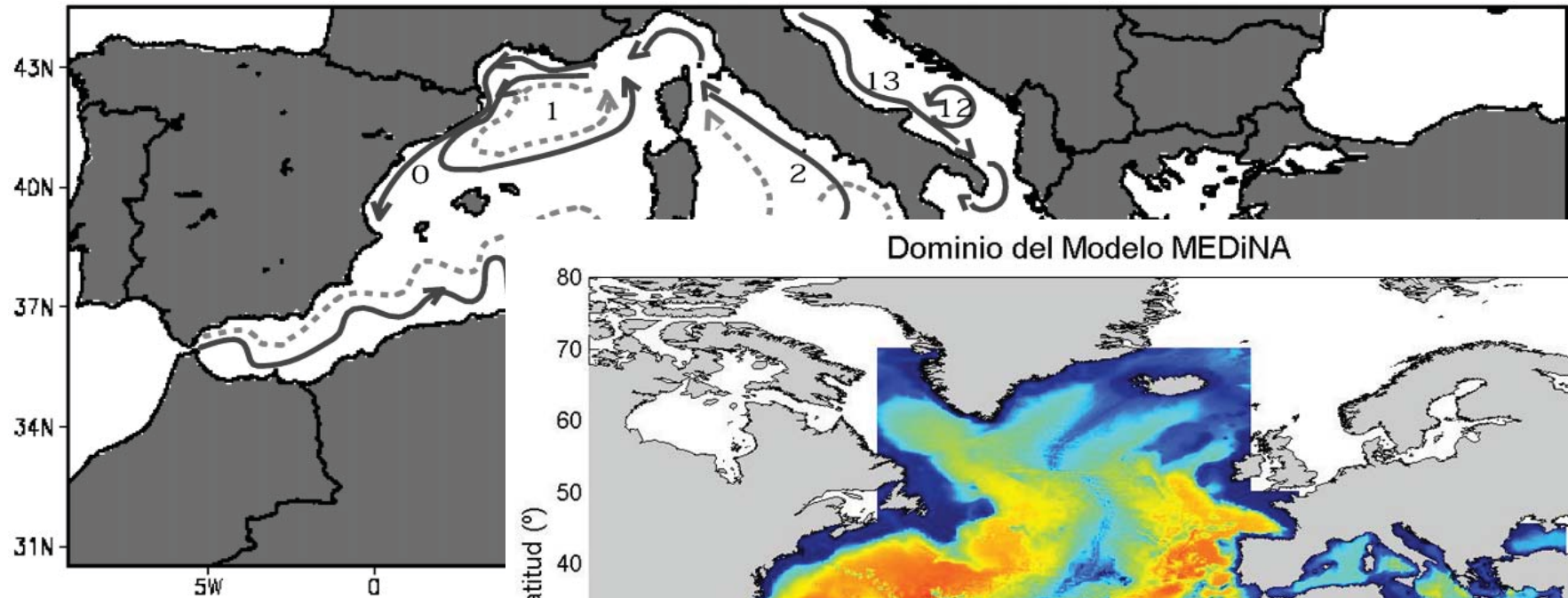


Variabilidad

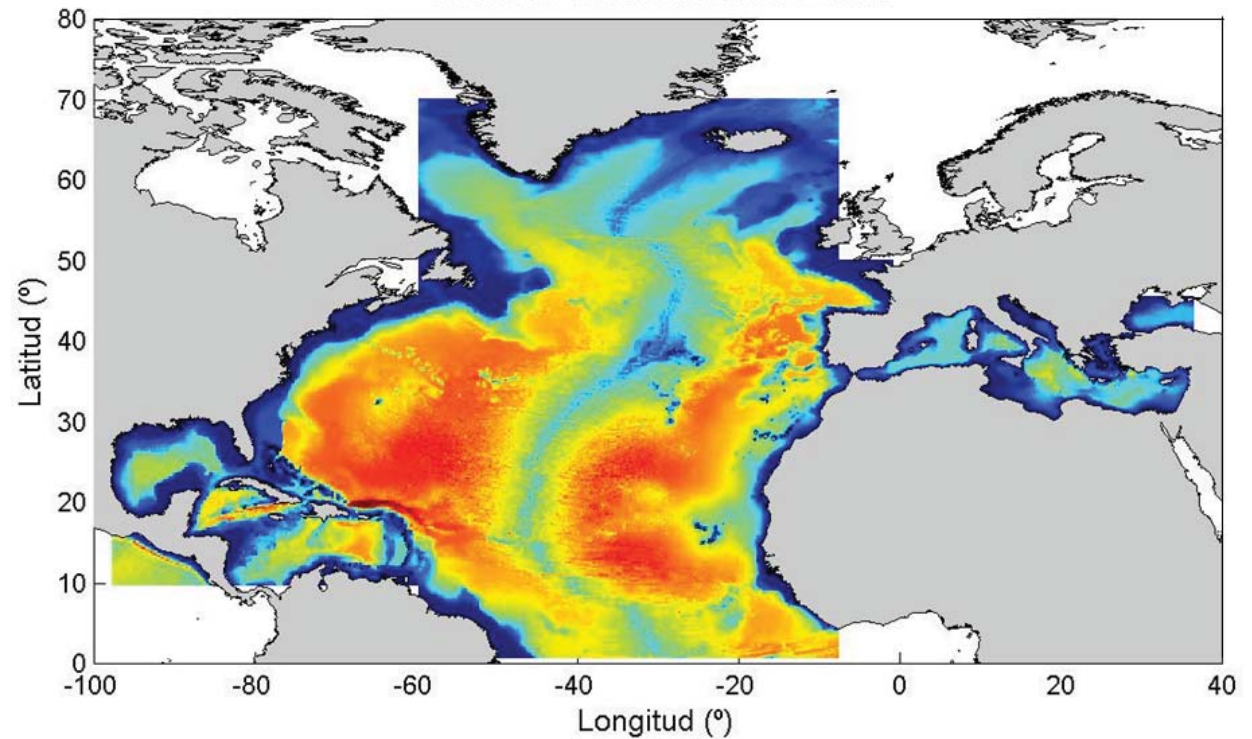


Modelado numérico

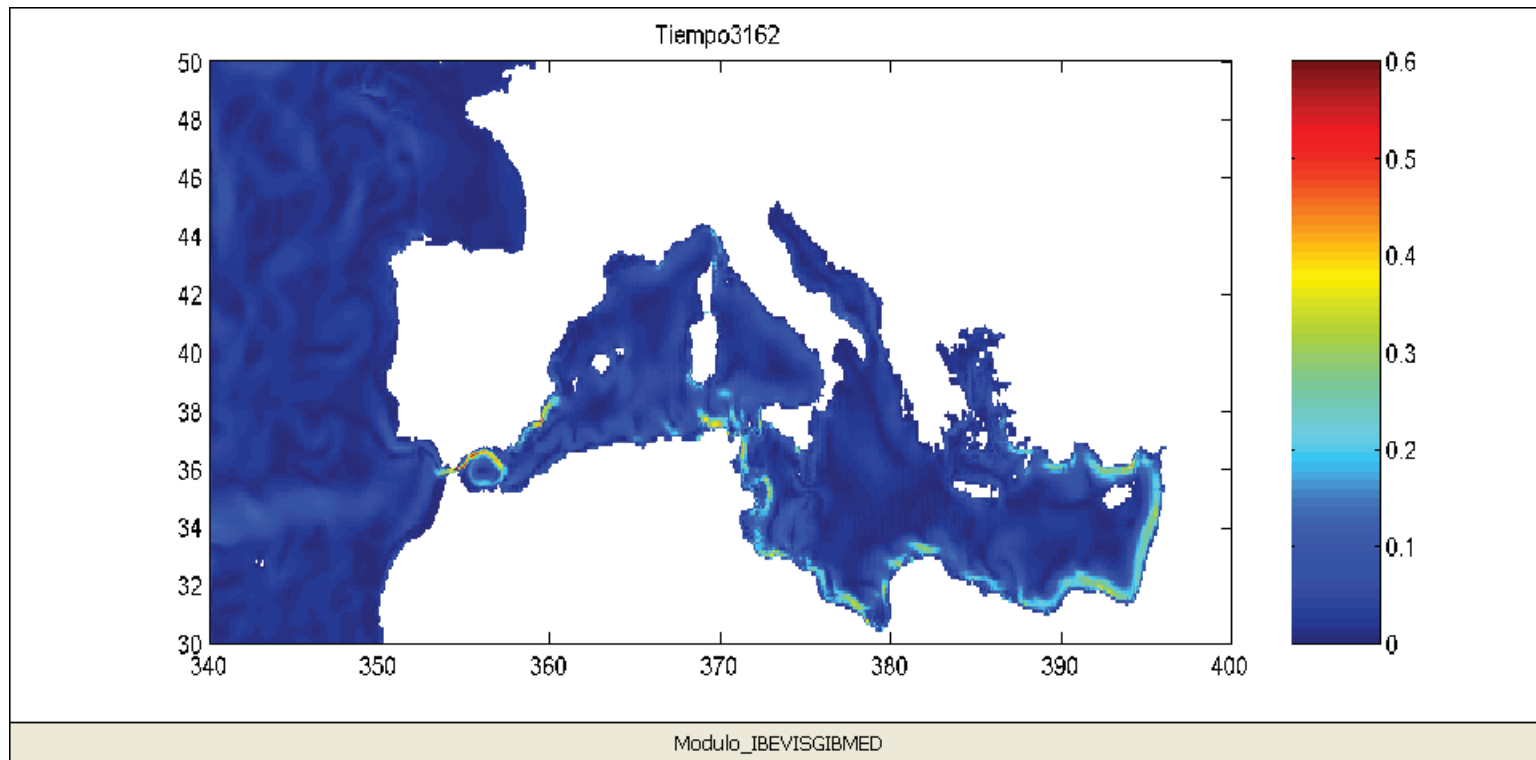
4. Modelado en campo lejano. Herramientas



Modelado numérico



4. Modelado en campo lejano. Herramientas



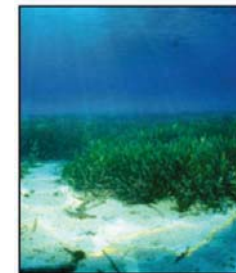
Variabilidad de las corrientes → Modelado numérico

5. Plan Nacional I+D+i: 045/RN08/3.3

Programa Nacional Desarrollo Experimental. Gestión y Uso Sostenible de los Recursos Naturales

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS VERTIDOS DE SALMUERA PROCEDENTES DE DESALADORAS (IH Cantabria, CEPYC, CEDEX)

Objetivo general: Ofrecer una metodología y técnica para el diseño de los vertidos al mar de salmuera, que permita compatibilizar el desarrollo de la desalinización como fuente de recurso hídrico con la garantía de protección y conservación de los ecosistemas marinos en el ámbito del Mar Mediterráneo



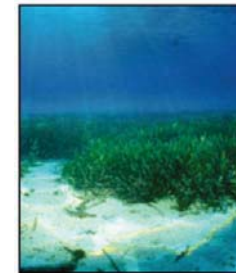
5. Plan Nacional I+D+i: 045/RN08/3.3

Objetivos específicos:

Optimizar los sistemas y los criterios en el vertido al mar de la salmuera.

Propuesta metodológica general para la realización de estudios de comportamiento, considerando todos los aspectos:

- Localización.
- Sistema de descarga.
- Caracterización del efluente y del medio receptor.
- Modelización numérica: campo cercano y lejano.
- Normas de calidad ambiental en el medio receptor.
- Planes de vigilancia ambiental.



5. Plan Nacional I+D+i: 045/RN08/3.3

Tareas:

1. Análisis experimental en laboratorio de sistemas de vertido

Campo cercano:

- Vertidos en playas, ramblas y desembocaduras de canales
- Vertidos por rebose (acantilados, muros)
- Vertidos a través de dispositivos sumergidos
- Vertidos a través de escolleras

Campo lejano:

- Ensayos para estudiar el efecto de la corriente

5. Plan Nacional I+D+i: 045/RN08/3.3

Tareas:

2. Análisis numérico de los sistemas de vertido de salmuera

- Modelado mediante modelos comerciales y análisis de sus limitaciones
- Implementación del modelado del campo cercano en modelos de [CFD \(Computational Fluid Dynamics\)](#) modelos SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)
- Implementación del modelado del campo lejano mediante el modelo [ROMS](#)
- Análisis de la viabilidad del modelado conjunto del campo cercano y el campo lejano

5. Plan Nacional I+D+i: 045/RN08/3.3

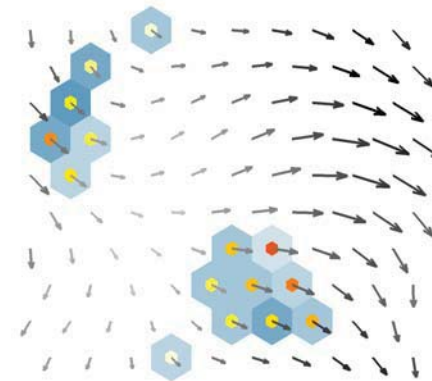
Tareas:

3. Desarrollo de una metodología de diseño probabilista



Aplicación de sistemas expertos de clasificación (SOM) para establecer escenarios de vertido

- Identificación de variables hidrodinámicas
- Análisis de las bases de datos numéricos y experimentales
- Selección de escenarios representativos (SOM)
- Análisis estadístico de la variabilidad
- Propagación de patrones seleccionados
- Asignación de probabilidades de ocurrencia



5. Plan Nacional I+D+i: 045/RN08/3.3

Tareas:

4. Validación de las herramientas de cálculo



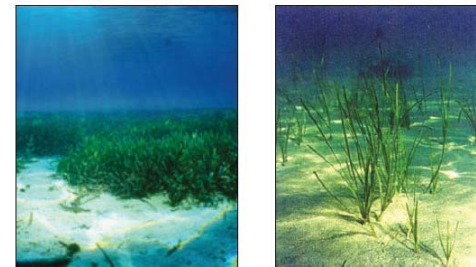
Comparación de resultados con datos de campo

5. Análisis integrado de los resultados y redacción de una guía metodológica para el diseño de sistemas de vertido de salmuera

6. Plan de difusión y formación

6. Conclusiones

Salmuera → exceso de salinidad → afección ecosistemas marinos



Vacío legal sobre criterios de vertido

↳ Límites críticos de salinidad → estadísticos

Comportamiento de la salmuera en el mar

↳ Campo cercano y campo lejano

diferencia de densidad de fluidos
parámetros del medio receptor

Batimetría

Corrientes

Estratificación

Oleaje

6. Conclusiones

Corrientes marinas → Diversas causas (aleatoriedad)
→ Influencia circulación de gran escala

Variabilidad de los patrones de circulación del agua

Actualmente no existe una metodología de diseño integral
Variabilidad de las condiciones ambientales
Tratamiento estadístico de resultados

Se está desarrollando un ambicioso proyecto de investigación
Guía metodológica de diseño
Herramientas de gestión

SOM CFD SPH ROMS cercano-lejano



Modelos de campo lejano. Bases teóricas.
Modelación hidrodinámica.
Plan Nacional I+D+i: 045/RN08/3.3

¡Gracias por su atención!

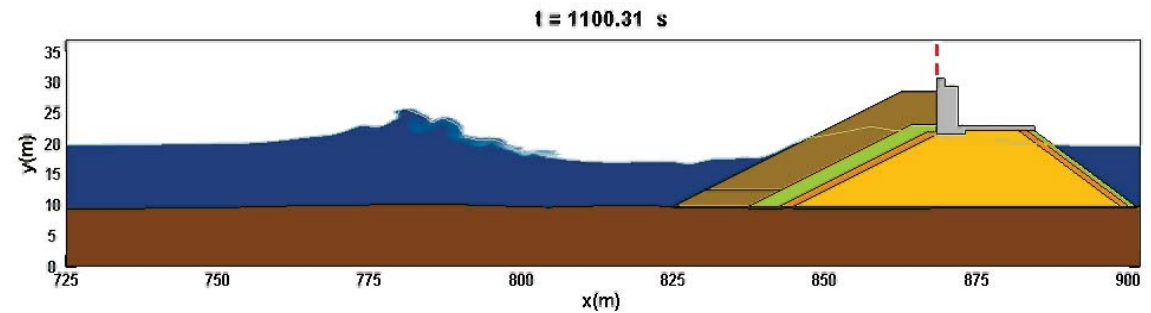
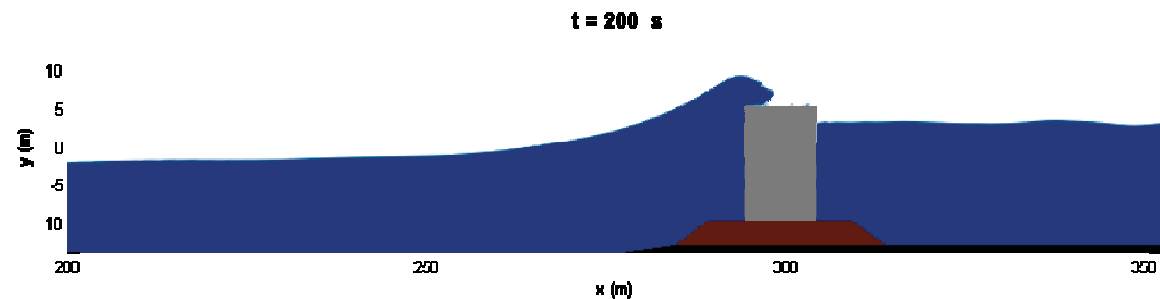
Thank you for your attention!

Andrés García Gómez

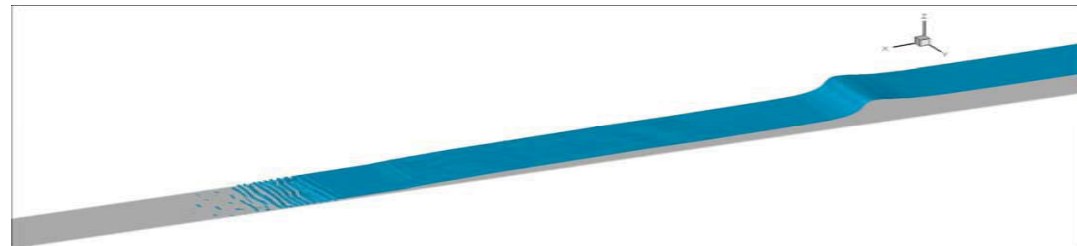
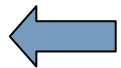
5. Plan Nacional I+D+i: 045/RN08/3.3

Modelado del campo cercano con Computational Fluid Dynamics

IH-2VOF

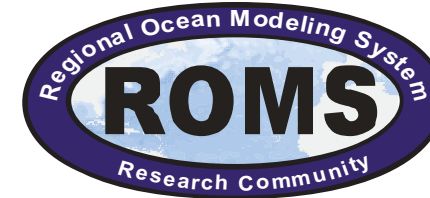


IH-3VOF



5. Plan Nacional I+D+i: 045/RN08/3.3

Modelado del campo lejano mediante



- Coordenada vertical S
- Coordenadas horizontales curvilíneas
- Análisis de los modelos de cierre de la turbulencia

- Existen algunas experiencias de simulación de plumas hiperdensas (Hetland, R., 2004)

Versión para aguas someras

