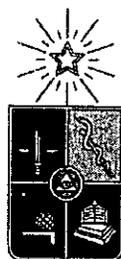


UCH = FC  
B. Ambiental  
T 596  
C.1

FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



Universidad de Chile

**Herramienta de Gestión para la Salmonicultura  
en Bahía Chacabuco.**

Memoria de Título

Entregada a la Universidad de Chile

en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de  
Biólogo c/mención en Medio Ambiente.

por

**Antonio Tironi Silva**

Diciembre, 2006  
Santiago - Chile



Director de Memoria de Título: Dr. Víctor H. Marín

FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

INFORME DE APROBACION  
MEMORIA DE TITULO

Se informa a la Escuela de Ciencias de la Facultad de Ciencias que la Memoria de Título presentada por el candidato.

ANTONIO TIRONI SILVA

Ha sido aprobada por la Comisión de Evaluación de la Memoria de Título como requisito para optar al Título de Biólogo c/mención en Medio Ambiente, en el examen de Defensa de la Memoria rendido el día de del año 2006.

Director de Memoria de Título:

Dr. Víctor H. Marín

Comisión de Evaluación de la Memoria de Título

Dr. Rodrigo Ramos Jiliberto

Dr. Ramiro O. Bustamante





## AGRADECIMIENTOS

Si me pusiera a agradecerle a todos los que de alguna manera u otra me ayudaron en este trabajo, la lista seria muy larga y aburrida. Por eso me remito a quienes deben aparecer acá, porque su aporte fue fundamental, tanto que sin ellos no podría haber hecho este trabajo.

Entonces, muchas, pero muchas gracias, a Víctor Marín, Luisa Delgado, Francisco Campuzano, Matt, Pamela, Marce y Cristian. Una mención especial para Carol, mi revisora preferida.

Cualquiera que crea que soy lo peor porque no aparece entre los recién mencionados, tiene una excelente excusa para invitarme un café y hacer sus descargos, el cual desde ya acepto encantado.

No pudiendo resistir a la tentación,

### CREDITOS ESPECIALES. (Mi familia)

Carol

Mamá

Papá

Camila

Emilia

Fernando "Fiera" Hoces

## ÍNDICE DE CONTENIDOS



<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>II</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b>	<b>II</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS O CUADROS</b>	<b>VI</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos Específicos	3
<b>ÁREA DE ESTUDIO.</b>	<b>4</b>
<b>2 MATERIALES Y MÉTODOS.</b>	<b>5</b>
2.1 Modelo Numérico.	5
2.1.1 Estructura de Modelación.	7
2.1.2 Modelo Chacabuco	9
<i>Características Generales.</i>	9
<i>Generación de la grilla.</i>	9
<i>Condiciones de Borde e Iniciales.</i>	10
<i>Estrategia de Modelación.</i>	11
2.1.3 Modulo Lagrangiano.	11
<i>Supuestos.</i>	11
<i>Estrategia de modelación.</i>	13
<i>Análisis Cuantitativo.</i>	14
2.1.4 Análisis de Sensitividad.	15
2.2 Aplicación SIG.	17
2.3 Herramienta de gestión.	17
<b>3 RESULTADOS</b>	<b>19</b>
3.1 Modelo Chacabuco	19
3.2 Modulo Lagrangiano	25
<i>Dispersión de Pellets.</i>	25
<i>Concentración de Fecas.</i>	29
<i>Transectos.</i>	30
3.3 Análisis de Sensitividad.	33
3.4 Aplicación SIG y herramienta de gestión	34
<b>4 DISCUSION</b>	<b>37</b>
<b>5 BIBLIOGRAFIA.</b>	<b>41</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Estructura modular MOHID Water. Las palabras blancas enmarcadas representan los principales módulos. En amarillo se muestran módulos alternativos..... 7
- Figura 2: Estructura de Modelación. (A) Grilla Modelo “Fiordos”, (B) Grilla Modelo “Aysén”, (C) Grilla Modelo Chacabuco..... 8
- Figura 3: Batimetría disponible al generar la grilla del modelo Chacabuco. En verde se muestra el área que cubrirá la herramienta de gestión..... 10
- Figura 4: Distribución espacial de las estaciones de monitoreo aplicadas sobre el modelo. Cada celda representa 100 m. aproximadamente..... 14
- Figura 5: Grilla utilizada en la modelación de bahía Chacabuco. La imagen inferior corresponde a una visión general de la grilla. En la esquina superior izquierda se observa un acercamiento a la grilla 3D en Bahía Chacabuco, y a su costado un acercamiento de la grilla 2D al área de bahía Chacabuco. La definición de la grilla es de  $9 \times 10^{-4}$  grados (aprox. 100m). La escala de colores indica profundidad (m). ..... 20
- Figura 6: Perfil de salinidad del modelo (○). Este se obtuvo del promedio de 14 días de la última salida del modelo. En líneas punteadas se muestra la desviación estándar. (●) muestra el perfil de salinidad obtenido en crucero CIMAR-FIORDO 7. El mapa indica el lugar de la bahía desde donde se muestreo el perfil. .... 21
- Figura 7: Corte YZ de la Bahía Chacabuco. El color indica salinidad (psu). La línea roja en el mapa indica el lugar y la extensión del corte desde donde se obtuvo esta imagen. Adicionalmente, el punto rojo muestra el lugar de la descarga del estero Dengle..... 22
- Figura 8: Relación entre los valores observados del nivel del mar comparados con los predichos por el modelo padre para cuatro estaciones mareográficas. (Fuente: Marín & Campuzano, 2006)..... 23
- Figura 9: Mareas vaciante y llenante en Bahía Chacabuco, a dos profundidades. La imagen A corresponde a la marea vaciante y B marea llenante, mientras que sus sub-índices corresponden a la capa de la grilla. La capa 11 corresponde a la superficie, mientras que la 6 esta a 12 m. de profundidad..... 24
- Figura 10: Dispersión de pellets simulado a través de derivadores lagrangianos, origen 1. El color indica la profundidad en la que se encuentra cada partícula. La celda celeste corresponde a la ubicación de la balsa-jaula..... 26
- Figura 11: Dispersión de pellets simulado a través de derivadores lagrangianos, Origen 2. El color indica la profundidad en la que se encuentra cada partícula. La celda verde corresponde a la ubicación de la balsa-jaula..... 27

Figura 12: Dispersión de pellets simulado a través de derivadores lagrangianos, Origen 3. El color indica la profundidad en la que se encuentra cada partícula. La celda con el azul mas oscuro corresponde al lugar donde esta instalada la balsa jaula..... 27

Figura 13: Dispersión de pellets simulado a través de derivadores lagrangianos, Origen 4. El color indica la profundidad en la que se encuentra cada partícula. En esta imagen la celda de azul mas oscuro muestra la ubicación de la balsa-jaula. .... 28

Figura 14: Dispersión de pellets simulado a través de derivadores lagrangianos, Origen 5. El color indica la profundidad en la que se encuentra cada partícula. La celda con una "x" muestra la ubicación de la balsa-jaula..... 28

Figura 15: Superposición de la dispersión de los desechos particulados de las 5 balsas-jaula ubicadas en la bahía. El color indica la profundidad en la que se encuentra cada partícula. .... 29

Figura 16: Concentración de fecas proveniente de balsas jaula en el fondo marino, Bahía Chacabuco. La escala esta en mg/L..... 30

Figura 17: Distribución espacial del muestreo para el numero de partículas por caja. La línea segmentada roja muestra el transecto Norte-Sur (NS) y la línea verde indica el transecto Este-Oeste (EO). Los cuadros verdes muestran la ubicación de las balsas-jaula. .... 31

Figura 18: Cantidad de partículas a lo largo del eje Norte-Sur de la bahía. El eje y esta en escala logarítmica. .... 32

Figura 19: Cantidad de partículas a lo largo del eje Oeste-Este de la bahía. El eje y esta en escala logarítmica..... 32



## ÍNDICE DE TABLAS O CUADROS

Tabla 1: Módulos principales del sistema de modelación MOHID. La primera columna muestra el nombre usado para cada módulo al interior del sistema (inglés), la segunda columna corresponde a una breve descripción. <a href="http://www.mohid.com">http://www.mohid.com</a> (Fuente: Marin & Campuzano).....	6
Tabla 2: Principales características de los modelos generados.....	9
Tabla 3: Parámetros modificados para el análisis de sensibilidad, clasificados según escenario. ....	16
Tabla 4: Resultados análisis de sensibilidad. El valor de los parámetros varió dentro de un rango a partir del valor por defecto del parámetro (Tabla 3). La sensibilidad se calculo utilizando la ecuación (1). El escenario E1 fue el más sensible.....	33
Tabla 5: Coberturas incorporadas a la aplicación SIG en ArcView 3.3. Se muestra la descripción de cada cobertura, el nombre del archivo incorporado al SIG y la fuente de cada una. ....	36



## RESUMEN

Entre las múltiples presiones sobre las zonas costeras en Chile, la salmonicultura destaca por sus proyecciones de expansión y sostenido crecimiento experimentado en los últimos años. Los principales impactos ambientales asociados a esta industria desde una perspectiva biogeoquímica provienen de la acumulación y dispersión de los desechos orgánicos particulados (pellets no consumidos y fecas). Por tanto, el manejo de estos residuos aparece como un factor clave en su gestión ambiental. En este trabajo, se utilizó el software de modelación MOHID para desarrollar un modelo hidrodinámico de Bahía Chacabuco (XI Región, Chile), sobre el cual se corrió un módulo lagrangiano para simular la dispersión de los desechos particulados provenientes de 5 balsas jaula instaladas en la bahía.

Los resultados muestran que la acumulación de desechos particulados ocurre principalmente bajo las balsas-jaula (100 m.), mostrando una dispersión máxima entre los 500 y 1300 metros dependiendo de su ubicación. Esto concuerda con experiencias anteriores en modelación de este tipo de sistemas. Los resultados de este modelo fueron agregados a una herramienta de visualización en SIG, constituyendo la herramienta de gestión para la salmonicultura. Esta herramienta se encuentra disponible en línea, de manera gratuita y con acceso libre para todos los usuarios del sistema, dando un paso importante hacia el manejo integrado de zonas costeras en la región.

## ABSTRACT

Due to the sustained growth of the salmon aquaculture industry in the last few years and its projected expansion, this activity represents one of the most significant pressures affecting the coastal zones in Southern Chile. From a biogeochemical perspective, the main environmental impact associated with this industry comes from the accumulation and dispersion of the particulate waste such as uneaten pellets and faeces. In this sense, the reduction and handling of wastes is a key component of the environmental management of this industry. In this study, MOHID water modeling software is used to develop a hydrodynamic model of Chacabuco Bay (XI Region, Chile). A lagrangian module was coupled to the hydrodynamic model in order to simulate particulate waste dispersion from the five cage production systems installed in the bay.

The results indicate that the accumulation of particulate waste mainly occurs under the cages (within 100 m from the perimeter). The maximum dispersion of particulates was between 500 and 1200 meters, depending on the location of the raft. These results agree with previous experiences in modeling this type of system. Additionally, the results of this model were incorporated into GIS visualization software, thereby creating a management tool for salmon aquaculture. This tool is freely available online for all users and represents an important step towards the integrated management of coastal zones in Southern Chile.

## 1 INTRODUCCIÓN.

Las zonas costeras están bajo diversas e intensas presiones como consecuencia de sus múltiples usos (e.g. urbanización, turismo, transporte, etc.) así como la (sobre) explotación de los recursos naturales que éstas proveen (Turner, 1999). Si consideramos a estas zonas y a las sociedades humanas que en ellas habitan como componentes (sub-sistemas) de un sistema eco-social (Marin & Delgado, 2005), estas presiones –socio-económicas- provocan cambios en el estado de los ecosistemas. Ello, a su vez, retorna a la sociedad local como impacto negativo sobre su bienestar, sobre todo para aquellas en las cuales la prosperidad depende de los flujos de bienes y servicios ecosistémicos (Dakers, 2000).

En Chile, el cultivo de salmónidos juega un rol protagónico entre las presiones sobre la zona costeras en la zona sur, producto del crecimiento experimentado en los últimos años, el que ha llegado a representar el 59,8% de las exportaciones pesqueras (SubPesca, 2004). Adicionalmente, en la XI Región de Aysén, el sector pesquero -cuyo 70% corresponde a desembarcos provenientes de cultivos de salmónidos- aporta con el 21.6 % del PIB regional (Tironi et al., 2006). En el año 2005 se cosechó el 20,4% del total nacional, lo que representa un crecimiento de un 40% respecto de año anterior<sup>1</sup>. Asimismo, proyecciones del sector estiman que para el 2010 el 40 % de la producción nacional provendría de la XI región (PROT, 2004). Considerando estas proyecciones, factores como la demanda de mano de obra, infraestructura, servicios y capacitación por parte de la industria salmonera la configuran como un polo de desarrollo regional o *fuerza conductora* (*sensu* Turner, 1999) en la dinámica de los sistemas eco-sociales de

---

<sup>1</sup> Carlos Odebret, representante de SalmónChile en la XI Región, entrevista en [www.aqua.cl](http://www.aqua.cl).  
<http://www.aqua.cl/entrevistas/entrevista.php?doc=92> [Consulta: 16/08/2006]

Aysén. El manejo de sistemas que involucran interacciones ecológicas, sociales y económicas, requiere de un enfoque integrado, donde la modelación de procesos clave se transforma en una herramienta vital para reforzar las instituciones (Turner, 2000; Proyecto ECOManage, 2003)

Uno de los procesos clave de la industria salmonicultora, es el manejo de los desechos particulados (pellets no consumidos y fecas) vertidos desde las balsas-jaula. Estos desechos, que generalmente se depositan bajo las cercanías de las balsas-jaula, representan una entrada de carbono orgánico y nitrógeno que además de provocar grandes cambios en las comunidades bentónicas adyacentes puede exceder la capacidad de carga del ecosistema (Pérez y col., 2002). Adicionalmente, la acumulación de estos desechos provoca aumentos en la productividad primaria, impactos negativos sobre la biodiversidad de organismos bentónicos (Lim, 1991) e incluso la formación de una capa anóxica bajo las balsas-jaula. A nivel internacional se han realizado múltiples proyectos para modelar la dinámica de dispersión y los impactos asociados a estos desechos (Cromey y col, 2002; Pérez y col., 2002; MedVeg Project, 2004; Karakassis et al, 2002). Sin embargo, su desarrollo en Chile es incipiente.

Aún cuando la modelación numérica puede jugar un rol importante en la comprensión dinámica de los ecosistemas costeros, el diseño, la calibración y validación de modelos hacen difícil su uso masivo. Sin embargo, la participación de los distintos actores es parte fundamental en la definición, manejo y gestión de los ecosistemas (Marín & Delgado, 2005). Por tanto, los resultados de la modelación deberían estar disponibles en un formato de fácil visualización de forma de facilitar su uso por parte de los actores locales en el proceso de toma de decisiones. Experiencias

desarrolladas en otras áreas de aplicación como el manejo de inundaciones (Zerger & Wealands, 2004; Yang & Rystedt, 2002) o de sedimentos contaminados (Tsanis y col, 1996), muestran que la combinación de modelos hidrodinámicos y sistemas de información geográfica (SIG) puede ser una poderosa herramienta de gestión. El objetivo principal de este seminario fue desarrollar una herramienta de gestión para el análisis integrado de la salmonicultura en los fiordos australes de Chile, bajo el marco conceptual del manejo integrado de zonas costeras, y por medio del desarrollo de modelos numéricos e interfases de visualización SIG.

### **1.1 Objetivos Específicos**

- Modelar la hidrodinámica de Bahía Chacabuco (Fiordo Aysén), incluyendo un módulo lagrangiano para analizar la dispersión de los sedimentos provenientes de la actividad salmonera, como una aproximación para medir los impactos asociados de ésta.
- Implementar coberturas SIG, que permitan visualizar espacialmente la dinámica de la actividad salmonicultora en la Bahía, con énfasis en la dispersión de sus desechos particulados.
- Implementar una herramienta de gestión, que combine los resultados de la modelación numérica y las coberturas SIG.

## ÁREA DE ESTUDIO.

Bahía Chacabuco [45°28'15.2"S; 72°49'47.1"W] se ubica en el extremo oriental del Fiordo Aysén, al sur de la desembocadura del río homónimo (Fig. 1). Es una bahía semi-cerrada, protegida por la Islas Carmen y Partida. Posee una boca de aproximadamente 1 km y un área de 3,7 km<sup>2</sup>. Se encuentra rodeada en su mayoría de cerros altos (500 m.s.n.m aprox.), con terrenos más bajos localizados en el área sur y este. Posee un clima templado frío y lluvioso de costa occidental, con temperaturas medias entre 5 y 17 ° C y un promedio de precipitaciones anuales de más de 3000 mm. (Proyecto Alumysa, 2001)

El principal asentamiento humano en la Bahía corresponde a Puerto Chacabuco (1442 hab.). Ubicado en el costado este de la bahía, corresponde al principal centro de transferencia de productos desde y hacia el interior de la región, además de ser el único acceso marítimo comercial, convirtiéndolo en pieza fundamental del ciclo productivo de los distintos sectores económicos de la región (PRDU Aysén, 2004). También funciona como Terminal petrolero y gasero, aparte de ser puerto de embarque para productos mineros, principalmente plata y zinc. Al mismo tiempo, Pto. Chacabuco es parte fundamental de la industria salmonicultora. A parte de ser la principal entrada de peces provenientes desde los centros de engorda, funciona como centro de procesamiento -con 3 plantas de este tipo operando en el lugar- y puerto de embarque para la exportación de los productos elaborados del salmón.

Adicionalmente, la bahía está siendo sometida a presiones ambientales entre las que destacan; 5 complejos de engorda de salmónidos operando en la rada, el vertido de residuos industriales líquidos desde las diversas industrias pesqueras de la zona y los desechos asociados a las actividades de carga y descarga de los terminales petrolero y mineros.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS.

### 2.1 Modelo Numérico.

El modelo fue implementado por medio del software de libre distribución MOHID Water Modelling System v.4.6. Este es un sistema de modelación en 3 dimensiones, desarrollado y mantenido por MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) en el Instituto Superior Técnico (IST) de la Universidad Técnica de Lisboa. MOHID permite la adopción de una filosofía de modelación integrada, no solo de procesos físicos o biogeoquímicos, sino también de múltiples escalas y sistemas, permitiendo el uso de modelos anidados que permiten integrar cuencas y sistemas marinos (ej: estuarios), gracias a un lenguaje de programación orientado a objetos<sup>2</sup>. El sistema está compuesto de herramientas de pre-procesamiento (e.g. MOHID GIS), de una interfase gráfica para la implementación de los modelos (MOHID GUI) y de herramientas para el post-procesamiento de los resultados (e.g. MOHID GIS, MOHID POST, MOHID Time Series Editor y MOHID Statistical Analyzer). Actualmente MOHID cuenta con 3 herramientas base; Water, Land y Soil.

MOHID<sup>3</sup> Water es un sistema numérico para la modelación tridimensional de ecosistemas acuáticos, compuesto por más de 40 módulos los cuales interactúan y se acoplan para el desarrollo de modelos en un vasto campo de aplicaciones (Marin & Campuzano, 2006). La Tabla 1 muestra los principales módulos del sistema, mientras que la estructura de modelación se muestra en la Figura 1,

---

<sup>2</sup> [http://www.mohid.com/what\\_is\\_mohid.htm](http://www.mohid.com/what_is_mohid.htm) [Consulta: 16/08/2006]

<sup>3</sup> <http://www.mohid.com>. [Consulta: 16/08/2006]

Tabla 1: Módulos principales del sistema de modelación MOHID. La primera columna muestra el nombre usado para cada módulo al interior del sistema (inglés), la segunda columna corresponde a una breve descripción. <http://www.mohid.com> (Fuente: Marín & Campuzano, 2006)

Nombre del módulo	Descripción
Geometry	Guarda y mantiene la información de los volúmenes finitos.
Hydrodynamic	Modelo hidrodinámico baroclínico 3D de superficie libre. Computa el nivel del agua, velocidades y flujos.
Discharges	Almacena información sobre descargas de agua dulce así como otras descargas antropogénicas.
Turbulence	Modelo unidimensional de turbulencia basado en el modelo GOTM.
Water Properties	Modelo de transporte euleriano. Maneja la evolución de las propiedades del agua (temperatura, salinidad, oxígeno, etc.).
Lagrangian	Modelo de transporte lagrangiano. Maneja la evolución de las mismas propiedades del módulo anterior pero usando una aproximación lagrangiana. Puede ser usado para simular dispersión de petróleo.
Oil Dispersion	Modulo para la simulación de derrames de petróleo. Simula la dispersión del petróleo por medio de procesos internos del petróleo tales como evaporación, dispersión, sedimentación, etc.
Water Quality	Modelo de calidad de agua cero-dimensional. Simula los ciclos del oxígeno, nitrógeno y fósforo.
Life	Modelo ecológico (proceso-funcional, biogeoquímico) de la columna de agua de 12 componentes. Incorpora productores, consumidores, descomponedores así como materia orgánica, nitrato, amonio, silicato y oxígeno.

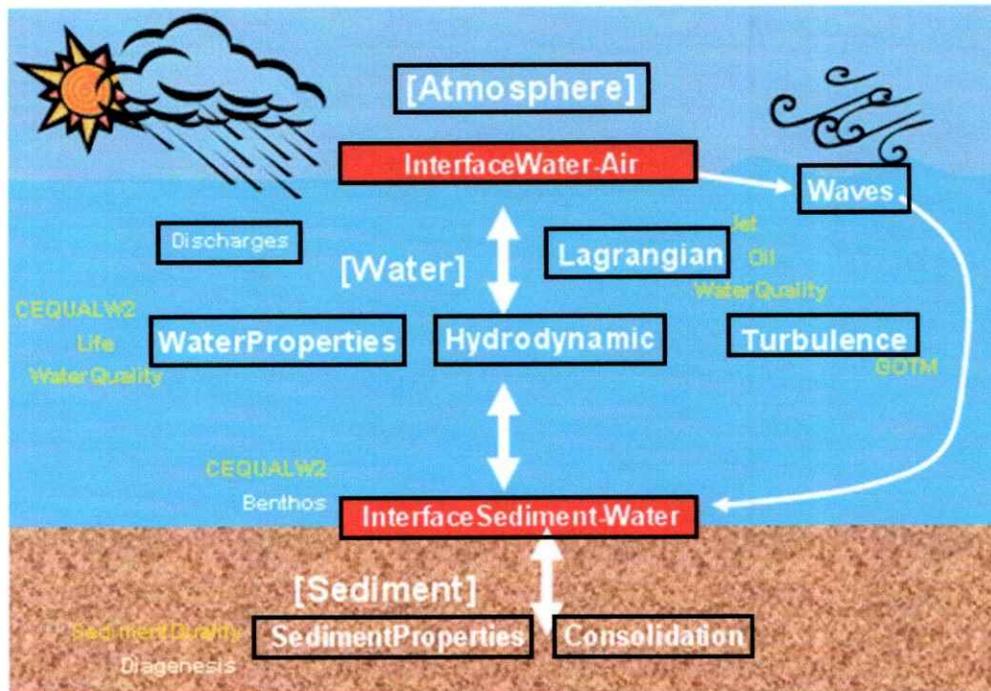


Figura 1: Estructura modular de MOHID Water. Las palabras blancas enmarcadas representan los principales módulos. En amarillo se muestran módulos alternativos.

### 2.1.1 Estructura de Modelación.

Con el objetivo de reducir los errores numéricos y mejorar la estabilidad del modelo, se adoptó una estructura de modelación anidada en 3 niveles. Un primer modelo (“Fiordos”), es un modelo barotrópico<sup>4</sup> de la zona norte de los fiordos australes del sur de Chile, entre los 41°S y los 46°S, con celdas de 2,2 Km. de definición. Sus condiciones de borde (componentes de marea) se generaron según el modelo de mareas FES2004. El objetivo de este modelo es generar las condiciones de borde (mareas) para el segundo modelo anidado, el “Aysén”. Éste también es un modelo barotrópico, de mayor definición en su geometría (500 m), que además de considerar los componentes de marea del modelo abuelo entre sus condiciones iniciales, considera las descargas del Río Aysén, Cuervo y Cóndor, cuyos caudales mensuales

<sup>4</sup> En un modelo barotrópico la densidad depende solo de la presión.

fueron generados a partir de bases de datos de la DGA. Los dos modelos de jerarquía superior fueron desarrollados por Marín & Campuzano (2006), como parte del proyecto ECOManage<sup>5</sup>. Finalmente, el tercer modelo anidado, “Chacabuco”, correspondiente a la cabeza del fiordo, es un modelo baroclínico<sup>6</sup>, de 11 capas, cuyas características, dado que es el modelo a partir del cual se extraerán los resultados de este trabajo, se especifican en detalle a continuación. En la Figura 2 se resume la estructura anidada de modelación. Por su parte la Tabla 2 resume las características principales de los 3 modelos generados.

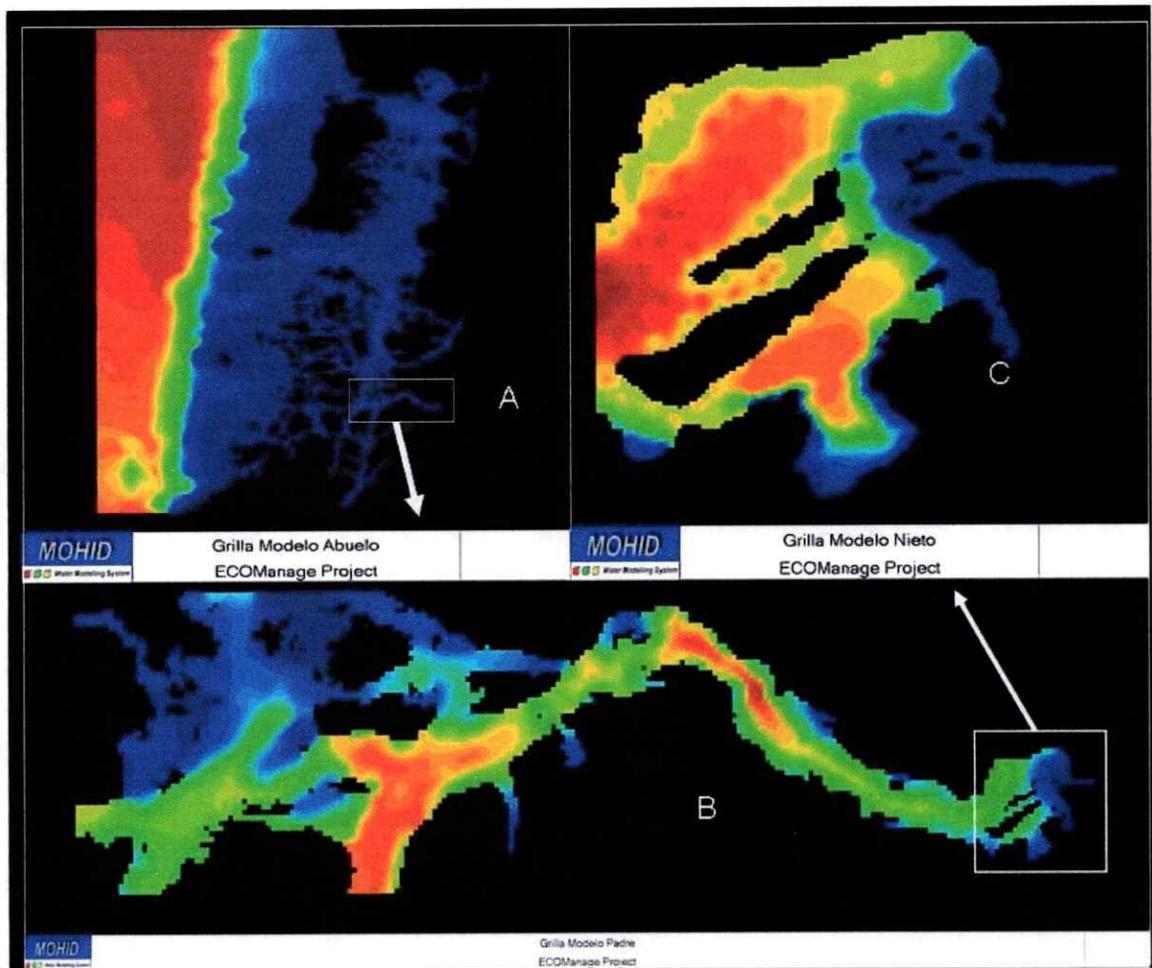


Figura 2: Estructura de Modelación. (A) Grilla Modelo “Fiordos”, (B) Grilla Modelo “Aysén”, (C) Grilla Modelo Chacabuco.

<sup>5</sup> para mas información visite [www.ecomanage.info](http://www.ecomanage.info) [Consulta: 16/08/2006]

<sup>6</sup> En un modelo baroclínico la densidad depende de la temperatura, salinidad y presión.

Tabla 2: Principales características de los modelos generados.

Modelo	Jerarquía	C. de Borde	Definición (Km.)	Geometría	Tipo	Descargas	Mareas
Fiordos	1	FES2004	2.2	Cartesiana, 1 capa	Barotrópico	No	FES2004
Aysén	2	M. Fiordos	0.5	Cartesiana, 1 capa	Barotrópico	Si	No
Chacabuco	3	M. Aysén	0.1	Cartesiana, 11 capas	Baroclínico	Si	No

### 2.1.2 Modelo Chacabuco

#### *Características Generales.*

Este modelo fue generado con el objetivo de simular la hidrodinámica de Bahía Chacabuco. Originalmente, el tercer modelo anidado cubría solo el área de dicha Bahía, pero al analizar algunos resultados preliminares, se decidió ampliar el área de modelación de manera de considerar la influencia del Río Aysén en la salinidad de la Bahía. Considerando la disponibilidad de datos de batimetría, la dinámica de circulación de la bahía y la cabeza del fiordo (obtenidos del modelo padre), se decidió ampliar la grilla a la versión actual (Fig. 2).

#### *Generación de la grilla.*

Para generar la grilla del modelo, MOHID requiere de una línea de costa y la batimetría del área a modelar, las que fueron obtenidas desde las cartas IGM 8610, 8611 y 8612 del Fiordo Aysén, Bahía Chacabuco y la desembocadura del río Aysén. Sin embargo, los datos de batimetría disponibles (Fig. 3) no eran suficientes como para

generar una grilla 3D. Para solucionar esto, se utilizó geoestadística (método de interpolación de Krig) para generar una batimetría con mejor cobertura de puntos.

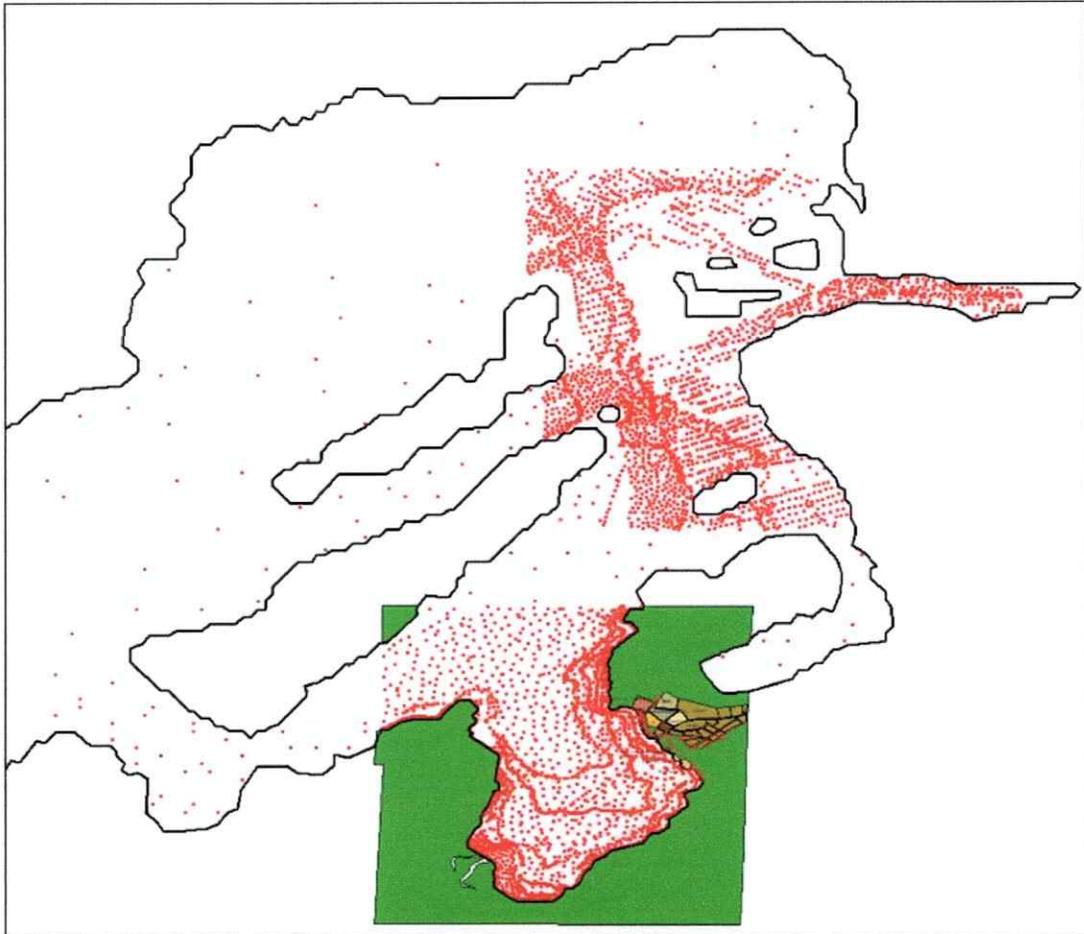


Figura 3: Batimetría disponible al generar la grilla del modelo Chacabuco. En verde se muestra el área que cubrirá la herramienta de gestión.

#### *Condiciones de Borde e Iniciales.*

De las condiciones de borde, los componentes de marea los recibe del modelo Fiordos, la salinidad y temperatura se asignaron dándole un valor a cada una de las 11 capas del modelo. Estos datos fueron obtenidos de los cruceros CIMAR-FIORDO

(CONA), mientras que el volumen de las descargas de los Ríos Aysén y Dengle, se obtuvieron de las bases de datos de la Dirección General de Aguas- Aysén.

#### *Estrategia de Modelación.*

La estrategia de modelación para el modelo Fiordos ha sido descrita por Marín & Campuzano (2006). Para el modelo Chacabuco, primero se inicializaron los modelos Fiordos y Aysén por diez días. Luego se inicializó el modelo Chacabuco también durante 10 días, con el objetivo de estabilizar el nivel del agua. Para estabilizar los campos de salinidad y temperatura se corrió el modelo por 25 días, para finalmente generar una tercera corrida –incorporando el modulo lagrangiano de dispersión de partículas (ver abajo)- de 16 días al final de la cual se extraen los resultados de este trabajo. El salto de tiempo de los modelos Fiordos, Aysén y Chacabuco fueron de 120, 60 y 30 segundos respectivamente.

### **2.1.3 Modulo Lagrangiano.**

#### *Supuestos.*

La dispersión espacial de los desechos particulados provenientes de la salmonicultura en Bahía Chacabuco se modeló por medio del módulo lagrangiano de MOHID. Una serie de supuestos fueron considerados para adaptar las capacidades del software para la generación de la herramienta de gestión aquí propuesta. Éstos se listan a continuación.

- Velocidad de sedimentación: Si bien la velocidad de sedimentación depende del tamaño de la partícula (Perez, 2002), y tanto los pellets como las fecas de salmón sufren aumentos en su tamaño al descender por la columna de agua (Chen, 1999), se optó por considerar una velocidad de sedimentación constante. Si bien MOHID es capaz de modelar la velocidad de sedimentación de las partículas según su tamaño, los volúmenes de descargas de un complejo de balsas-jaulas hacen difícil esta tarea producto de su alto requerimiento en memoria RAM.
- Volúmenes de Descarga: Para determinar la magnitud de las descargas de desechos particulados desde los complejos de balsas-jaulas ubicados en Bahía Chacabuco, se supuso una densidad de  $10 \text{ Kg m}^{-3}$ , y balsas jaulas de  $20 \times 20 \times 15$  m. Se consideró 1 balsa-jaula por complejo y una digestibilidad de un 85% para la comida, considerada como de alta calidad (POCH consultores, 2004). La cantidad de pellets que fueron vertidos directamente al mar fue de un 5%, y se consideró que de este porcentaje, la mitad (50%) de los pellets eran comidos por la fauna ictica local en su descenso por la columna de agua o en su deposición en el sedimento (Cromey et al., 2002).
- Etapas de Producción: No se consideraron las diferencias entre las etapas en el ciclo productivo del salmón. Se calcularon volúmenes de descargas para fecas y pellets cada 2 horas, considerando los supuestos recién descritos, y de esta manera se introdujo al modelo de dispersión.
- Consolidación: El modelo no considera la consolidación en el sedimento. Dada la estructura modular del software, incorporar el proceso mediante el cual los sedimentos ya no están disponibles para la resuspensión requería de una cantidad de información sobre la calidad de los sedimentos no disponible al momento que se desarrolló este seminario. Para evaluar la influencia de estas consideraciones se agregó al análisis de sensibilidad del modelo un escenario sin resuspensión.

### *Estrategia de modelación.*

Se adoptaron distintas estrategias para modelar los pellets y las fecas. Los primeros se simularon como partículas dentro del modulo lagrangiano, y la magnitud de las descargas fue calculada como número de partículas, considerando la cantidad de pellets calibre 2500 por kilo (POCH consultores, 2004). Esto significó una tasa de descarga de 450 pellets por hora.

Cuando se utiliza el modulo lagrangiano de MOHID con una tasa de sedimentación fija, el volumen de cada partícula no influye en la dinámica de dispersión. Sin embargo, esa variable se utiliza para determinar la cantidad de partículas vertidas desde cada origen. Cuando los orígenes corresponden a una caja, el programa calcula el número de partículas a descargar dividiendo el volumen de cada una por el total de la caja. De esta manera se definió que cada balsa-jaula vertiera 450 partículas cada 2 horas. La tasa de sedimentación se fijó en  $0,128 \text{ m s}^{-1}$  (Pérez, 2002).

Adicionalmente, las fecas fueron simuladas como concentración (en  $\text{mg L}^{-1}$ ) de una propiedad independiente del número de partículas, pero que se dispersa según éstas. La concentración de fecas se calculó como el 15% de la biomasa de peces por jaula, considerada la tasa de digestibilidad antes mencionada. La concentración final, vertida como pulsos de 2 horas, se consideró de  $3 \times 10^{-5} \text{ mg L}^{-1}$ . La velocidad de sedimentación se fijó en  $0,04 \text{ m s}^{-1}$  (Pérez, 2002).

### *Análisis Cuantitativo.*

Se monitoreó el número de partículas en 13 estaciones (Fig.4), de manera de expresar cuantitativamente la dispersión de partículas en la bahía. MOHID permite el monitoreo a través de cajas, entregando el volumen utilizado por los derivadores dentro de cada caja, los que al ser dividido por el volumen fijo de cada partícula, da el número de estas.

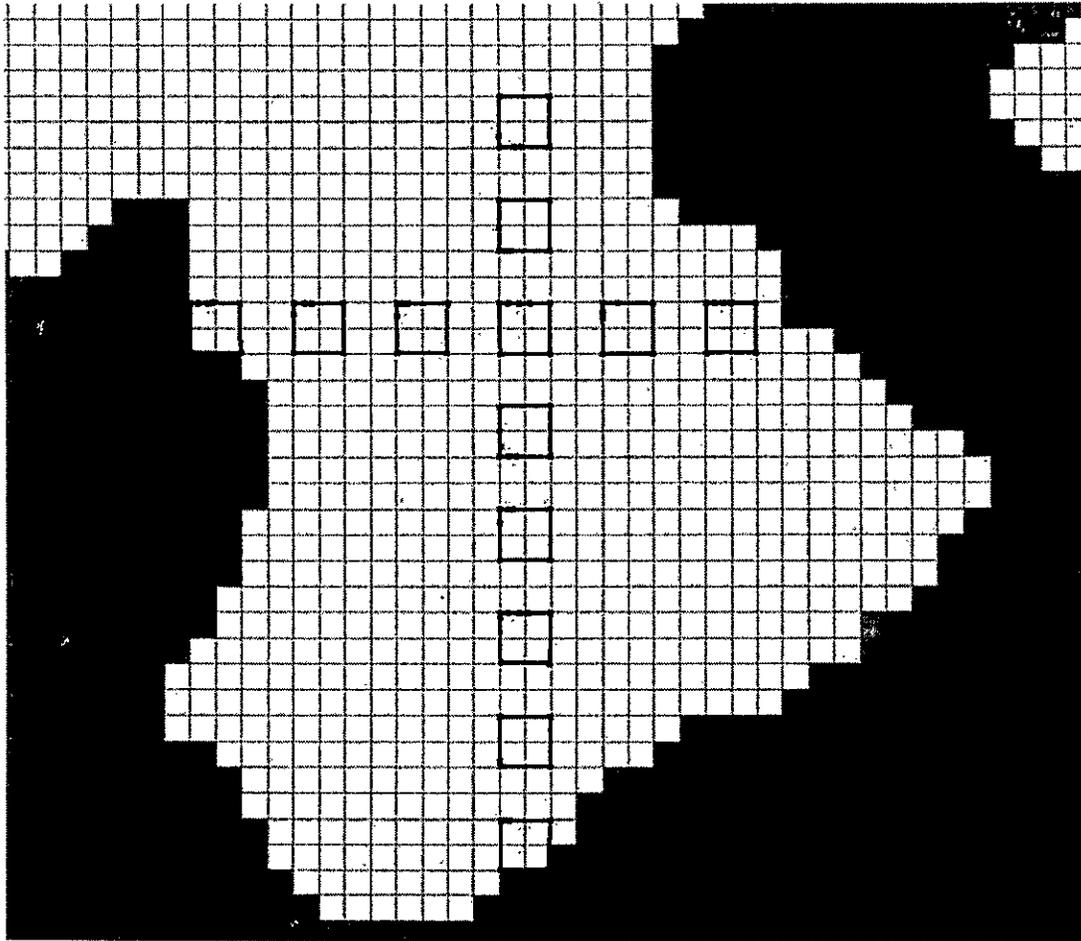


Figura 4: Distribución espacial de las estaciones de monitoreo aplicadas sobre el modelo. Cada celda representa 100 m. aproximadamente.

#### 2.1.4 Análisis de Sensitividad.

Para el análisis de sensitividad, se definieron valores base para cada parámetro según la literatura o valores *por defecto* del software, los que se modificaron en cada escenario alternativo de manera de mantenerlos dentro del rango conocido para éstos según la bibliografía disponible. Se definieron 7 escenarios;

- Resuspensión: Existen 3 parámetros que determinan la resuspensión en el modelo. Se definió un valor por defecto para cada uno, y se corrieron dos escenarios donde se modificó cada parámetro en un +/- 100%. De esta manera los valores se mantenían dentro del rango encontrado en la literatura (Cromey et al., 2002, Wiberg, 2003). Adicionalmente se corrió un tercer escenario donde la resuspensión se redujo a valores próximos a 0 para ver el efecto de ésta en la dispersión de las partículas.
  
- Velocidades de sedimentación: En este escenario se analizaron las velocidades de sedimentación tanto de fecas como de pellets, modificándolos de manera que también se mantengan dentro de un rango predefinido. El valor por defecto fue de  $0,128 \text{ m s}^{-1}$  para los pellets y de  $0,04 \text{ m s}^{-1}$  para las fecas. Estos valores están cerca del máximo del rango de velocidades (Cromey et al., 2002; Chen et al., 1999), por lo que se optó por correr dos escenarios, donde se modificaron esos valores disminuyéndolos en un 25% y 50% respectivamente.
  
- Movimiento Aleatorio: El modulo lagrangiano de MOHID utiliza dos parámetros para darle movimiento aleatorio a las partículas y representar la turbulencia (Cromey et al., 2002). MOHID calcula este movimiento aleatorio modificando las velocidades

de las partículas de manera proporcional al módulo de estas, tanto vertical como horizontalmente. Sin embargo son solo estas últimas las que se modificaron para este escenario. El escenario base se corrió con una variación aleatoria correspondiente al +/- 2% de las velocidades promedio. Se corrieron dos escenarios más donde se aumento esta variabilidad a un 4% y un 20%. El resumen de los parámetros modificados se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros modificados para el análisis de sensibilidad, clasificados según escenario.

Parámetros	valores por defecto	E1 Resuspensión		E2 Sedimentación		E3 Movimiento Aleatorio		No Resusp
		default/2	default*2	default*0.75	default*0.5	default*2	default/2	
VARVELHX*	0.02	-	-	-	-	0.04	0.01	-
VARVELH*	0.02	-	-	-	-	0.04	0.01	-
Critical Shear Stress of Erosion	0.02	0.01	0.04	-	-	-	-	0.00001
Critical Shear Stress of Deposition	0.004	0.002	0.008	-	-	-	-	0.00001
Tasa de Erosión	0.005	0.0025	0.01	-	-	-	-	1.00E-10
Velocidad de Sedimentación (pellet)	0.128	-	-	0.096	0.064	-	-	-
Velocidad de Sedimentación (faeces)	0.04	-	-	0.03	0.02	-	-	-

\*varvelhx y varvelh son dos parámetros que determinan el movimiento aleatorio de las partículas.

## **2.2 Aplicación SIG.**

Para generar la aplicación de SIG se digitalizó y georeferenció la carta IGM 8611 de Bahía Chacabuco. Luego se generaron coberturas, de polígonos y puntos, con la posición de las balsas-jaulas, los muelles del Puerto y empresas petroleras, las descargas de las procesadoras de alimento, la batimetría de la Bahía y las calles y manzanas de la localidad de Bahía Chacabuco. Los datos agregados a la aplicación SIG fueron obtenidos desde bases de datos existentes. Adicionalmente, se georeferenció, mediante observaciones de terreno apoyadas por un posicionador satelital, las instalaciones de las diferentes industrias presentes en la localidad de Bahía Chacabuco.

## **2.3 Herramienta de gestión.**

La herramienta de gestión básicamente es una interfaz que une los resultados del modelo insertándolos dentro de la aplicación SIG (Arcview 3.3). Para esto se generó un protocolo que defina el formato de salidas del modelo y la manera en que son insertadas en la aplicación, para futuros usos de esta herramienta. Se escogió un formato JPG para las imágenes por su relación calidad/compresión. Las imágenes se georeferenciaron respecto de la cobertura geográfica base por medio de la aproximación por polinomios disponible en el software ERDAS Imagine 8.6. Los elementos incluidos en la herramienta son:

(1) Dispersión de pellets para las 5 balsas-jaula por separado, permitiendo superponer unas con otras.

(2) Ubicación de las estaciones de algunos programas estatales de monitoreo.

(3) Concentración de fecas en la Bahía después de dos semanas de descarga.

(4) Marea vaciante.

(5) Marea Llenante.

Finalmente se programaron una serie de botones, incluyendo texto de ayuda, en la interfaz de Arcview 3.3 de manera de permitir una fácil visualización de los resultados del modelo y las diversas coberturas geográficas a gusto del usuario y con ayuda en español. La herramienta se anexa en el CD que acompaña a este seminario.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Modelo Chacabuco

La grilla final utilizada en el modelo posee un dominio cartesiano de 11 capas, con una mayor definición en las capas superiores. Las 11 capas, ordenadas desde la superficie hasta el fondo, tienen las siguientes dimensiones verticales (m); 1, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100, 100, 100. La grilla tiene 120 x 123 celdas de  $9 \times 10^{-4}$  grados (aprox. 100 m) cada una. El detalle de la geometría se observa en la Figura 5.

Si bien en la zona superior de la grilla se generan unos pozos (Fig. 5) producto de la baja densidad de información disponible (batimetría), para el área de la bahía la cobertura de puntos es suficiente como para generar una grilla sin este fenómeno.

El modelo Chacabuco fue calibrado para salinidad y mareas. La Figura 6 muestra que el modelo es capaz de reproducir la curva de salinidad característica de un estuario, donde el agua dulce ingresa solo por las capas superficiales.

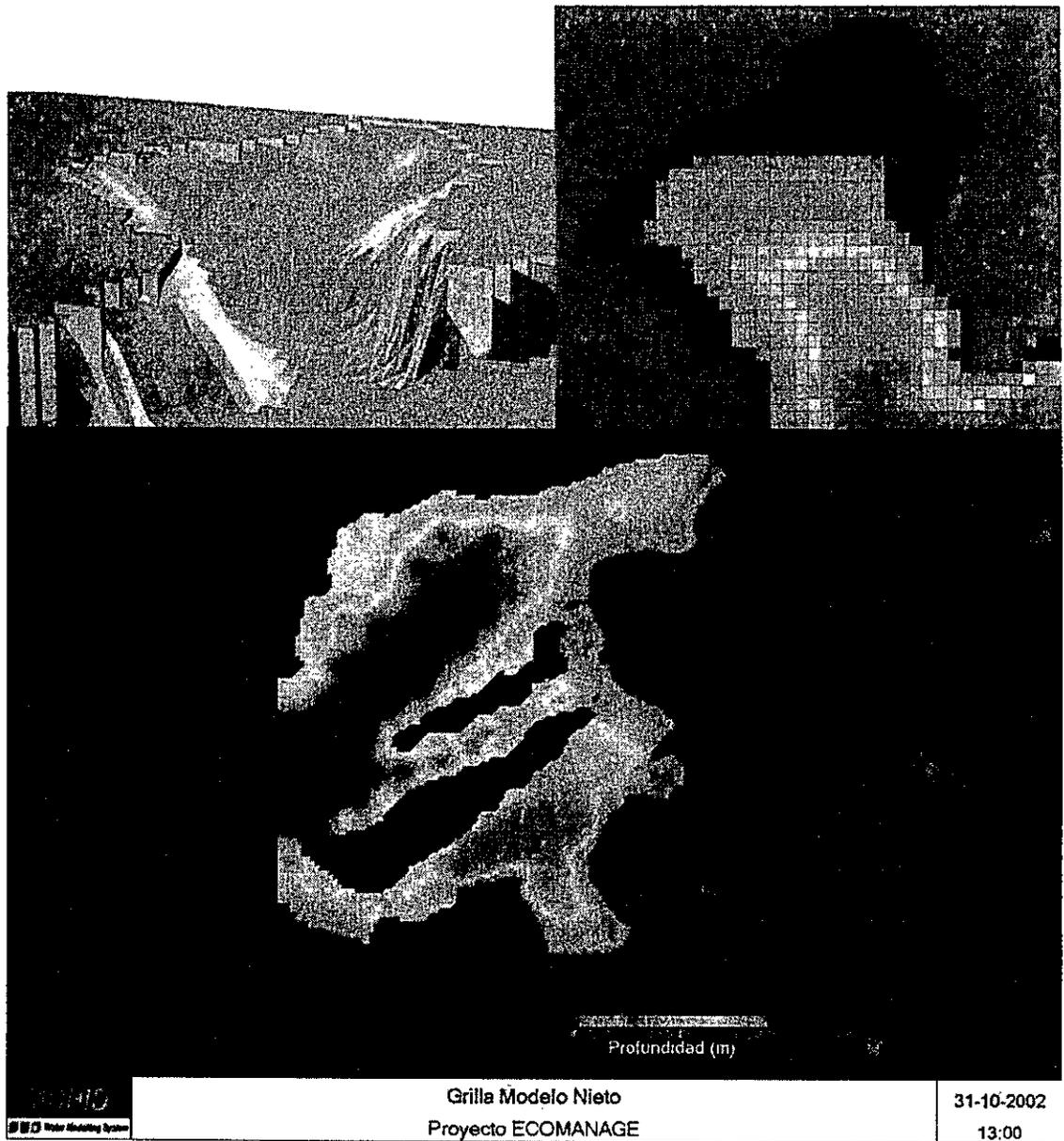


Figura 5: Grilla utilizada en la modelación de bahía Chacabuco. La imagen inferior corresponde a una visión general de la grilla. En la esquina superior izquierda se observa un acercamiento a la grilla 3D en Bahía Chacabuco, y a su costado un acercamiento de la grilla 2D al área de bahía Chacabuco. La definición de la grilla es de  $9 \times 10^{-4}$  grados (aprox. 100m). La escala de colores indica profundidad (m).

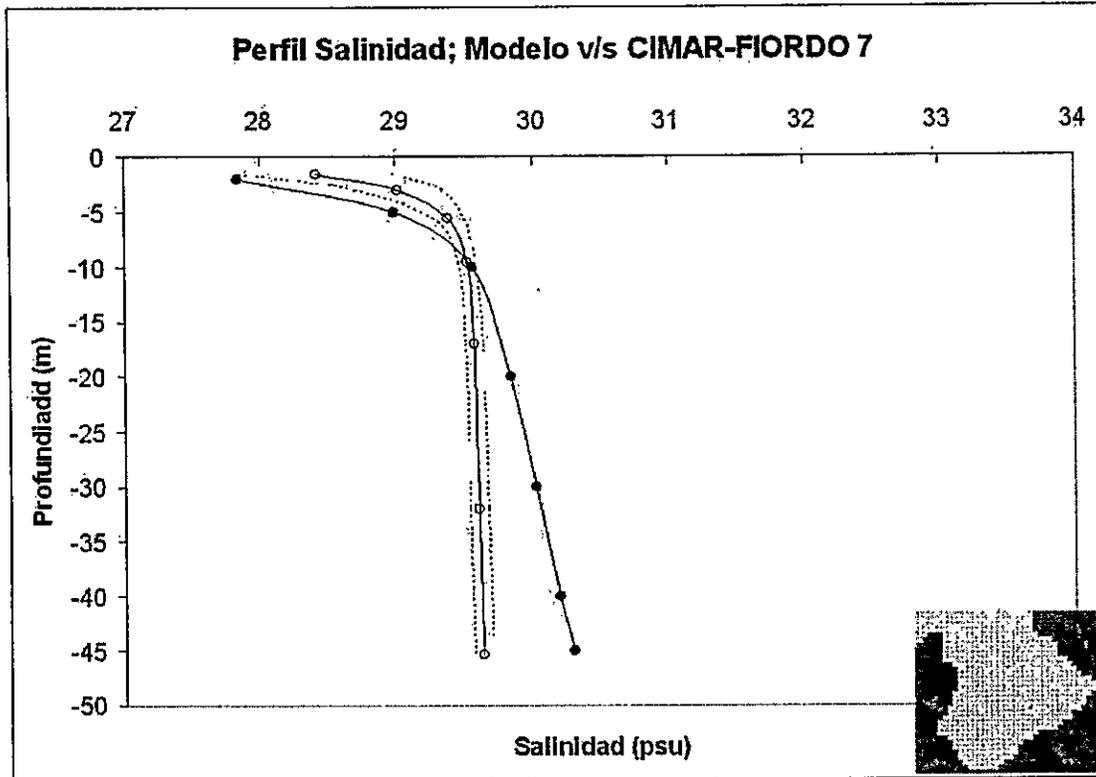


Figura 6: Perfil de salinidad del modelo (o). Este se obtuvo del promedio de 14 días de la última salida del modelo. En líneas punteadas se muestra la desviación estándar. (●) muestra el perfil de salinidad obtenido en cruceiro CIMAR-FIORDO 7. El mapa indica el lugar de la bahía desde donde se muestreo el perfil.

La Figura 7 muestra un corte transversal de la bahía, donde se puede ver la estratificación, el ingreso del estero Dengle y la geometría del modelo en la parte baja de la Bahía. La imagen superior muestra el ingreso del estero Dengle (en azul) por las capas superiores de la grilla durante marea vaciante. La imagen inferior muestra cómo disminuye la influencia de la entrada del río durante marea llenante.

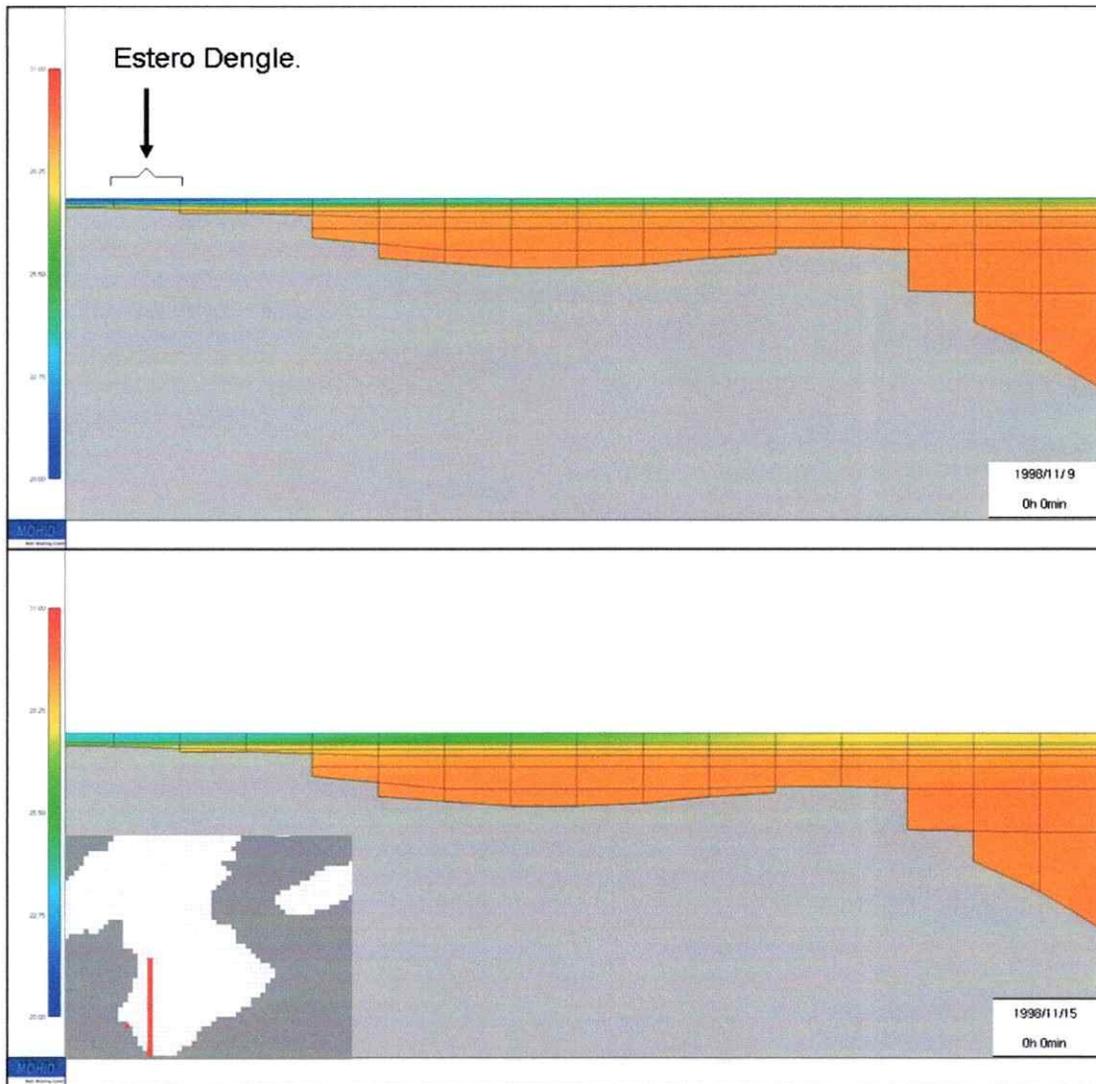


Figura 7: Corte YZ de la Bahía Chacabuco. El color indica salinidad (psu). La línea roja en el mapa indica el lugar y la extensión del corte desde donde se obtuvo esta imagen. Adicionalmente, el punto rojo muestra el lugar de la descarga del estero Dingle.

Adicionalmente se calibró el modelo para la altura del nivel del mar, de manera de ajustarlo para simular las mareas de la bahía. Estas se consideraron calibradas a partir de resultados del modelo Aysén considerando que las mareas las recibe de éste, y que una de las estaciones con que se calibró está ubicada precisamente en Bahía Chacabuco. Entre los resultados de la calibración del modelo Aysén destaca la bondad del ajuste de la relación entre datos obtenidos del modelo y estaciones mareográficas (Fig. 8), con un valor  $r^2 = 0,94$  para la estación de Bahía Chacabuco (Marín & Campuzano, 2006).

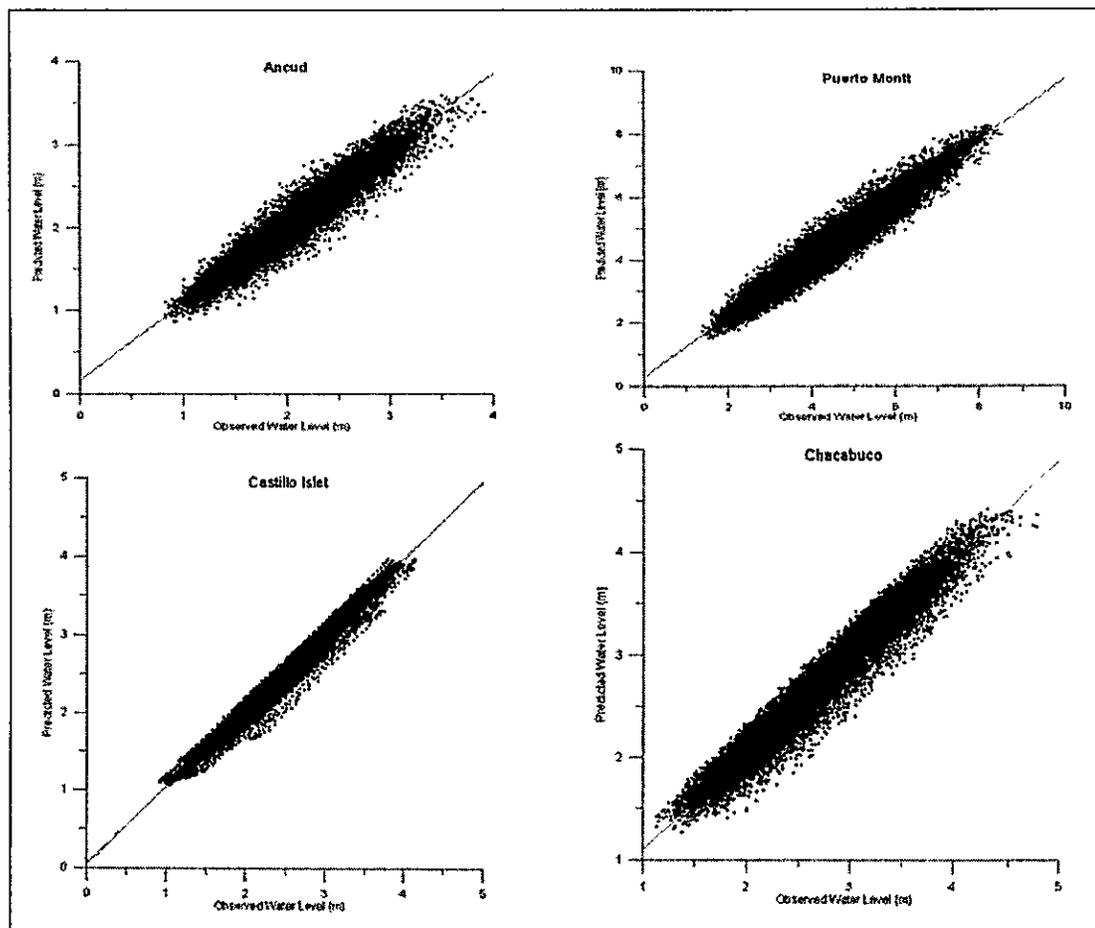


Figura 8: Relación entre los valores observados del nivel del mar comparados con los predichos por el modelo padre para cuatro estaciones mareográficas. (Fuente: Marín & Campuzano, 2006)

Finalmente, la Figura 9 muestra el esquema de las corrientes para las condiciones de marea vaciante y llenante en la bahía, a dos profundidades distintas del modelo, la capa superior (A11 y B11) y la capa de los 12 metros (A6 y B6)

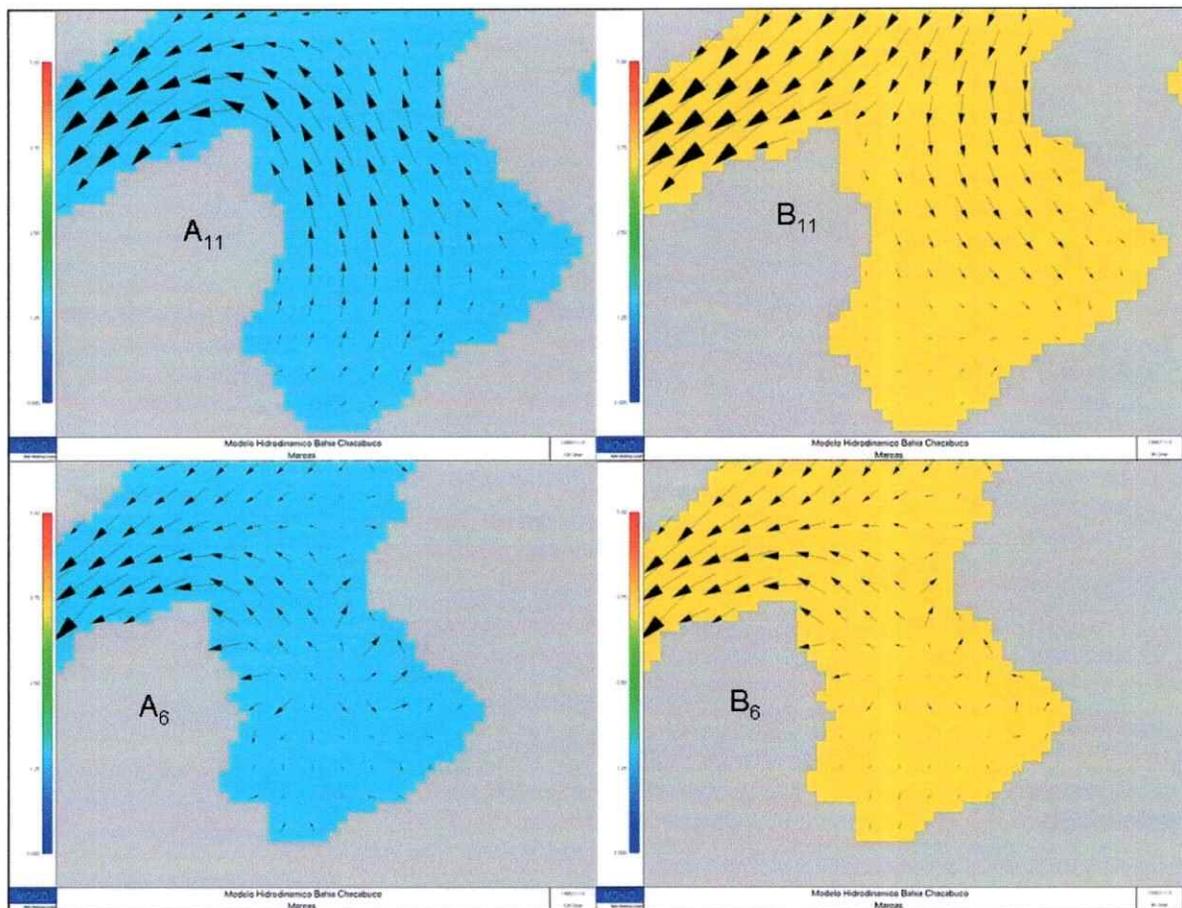


Figura 9: Mareas vaciante y llenante en Bahía Chacabuco, a dos profundidades. La imagen A corresponde a la marea vaciante y B marea llenante, mientras que sus sub-índices corresponden a la capa de la grilla. La capa 11 corresponde a la superficie, mientras que la 6 esta a 12 m. de profundidad.

En resumen, el modelo hidrodinámico es capaz de reproducir las principales características del sistema estuarino en la zona de bahía Chacabuco. Este modelo hidrodinámico calibrado fue usado por tanto para estudiar la dispersión de partículas

provenientes de la actividad salmonicultora de la bahía, por medio del módulo lagrangiano de MOHID.

### **3.2 Modulo Lagrangiano**

#### *Dispersión de Pellets.*

Los resultados de la dispersión de los pellets, después 16 días de funcionamiento de 5 balsas jaulas presentes en la bahía, con una tasa de desecho de 450 partículas por hora por balsa para simular los pellets de alimento para salmones, se muestra en la Figuras 10, 11, 12, 13, 14. Los resultados se muestran por separado para una visualización más clara. El origen 1 fue el que mostró la menor dispersión de sus desechos particulados. La mayoría de los desechos se depositaron bajo la balsa jaula o a 100-200 metros de ésta, mientras que una pequeña cantidad se dispersó incluso fuera de la bahía. La dispersión de los desechos del origen dos fue la más claramente delimitada, mostrando una pluma de dispersión con una dirección SE. Además, éste es el origen de mayor proporción dispersión/cantidad, alcanzando las 11 celdas, o 1100 metros aproximadamente. De las tres balsas instaladas al fondo de la Bahía, la dispersión de las partículas del origen 3 alcanzó 500-600 m aprox. en el eje Este- Oeste, y 400-700 m en el eje Norte-Sur. Al igual que en el origen 1, una pequeña cantidad de partículas mostró una mayor dispersión, alcanzando 1,3 km (partículas de color amarillo) aproximadamente. La dispersión de las partículas provenientes del origen 4 (Fig. 13) muestra un patrón discontinuo. Al revisar la evolución diaria, a lo largo de las dos semanas de simulación, se pudo ver que los espacios sin deposición de desechos se formaron solo al final (últimos 2 días) de la simulación. Por tanto, esta dispersión en "parches" se puede deber al efecto de la resuspensión. La dispersión

ocurrió principalmente en dos ejes, Sur y Nor Oeste, alcanzando 400 m. en cada caso. También se observa una acumulación de partículas a 1.1 Km del origen. De las balsas ubicadas al fondo de la bahía, el origen 5 (Fig. 14) mostró la menor dispersión, alcanzando solo 2 celdas (200 m. aprox.) hacia el oeste y 3 celdas al Norte. También se ve una pequeña cantidad de partículas aproximadamente a 900 metros (9 celdas) al norte de la balsa.

La Figura 15 muestra que la dispersión de pellets en la bahía Chacabuco tiene un patrón espacial definido. Salvo en el origen 2, se pudo observar que la dispersión de partículas se concentró en las cercanías de cada balsa (2-5 celdas), salvo pequeños grupos de partículas que se dispersaban a mayor distancia. Cabe preguntarse si con mayores tiempos de simulación el área entre estas partículas más alejadas y el origen de estas se cubriría con partículas.

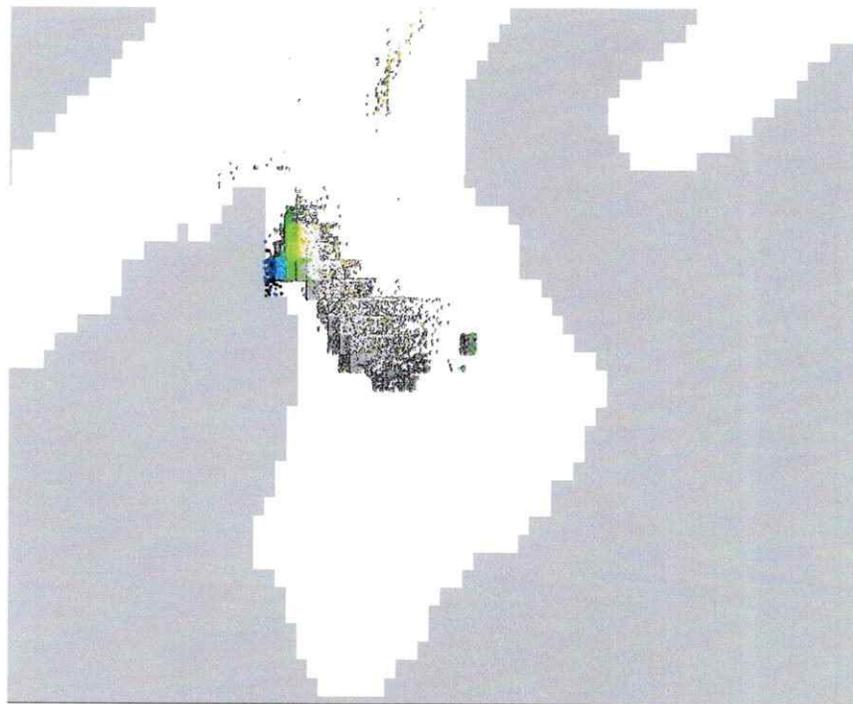


Figura 10: Dispersión de pellets simulado a través de derivadores lagrangianos, origen 1. Las partículas en colores muestran los resultados de la dispersión de los pellets en el escenario por defecto. La celda celeste corresponde a la ubicación de la balsa-jaula. Las partículas en escala de grises corresponden al conjunto de resultados obtenidos del análisis de sensibilidad.

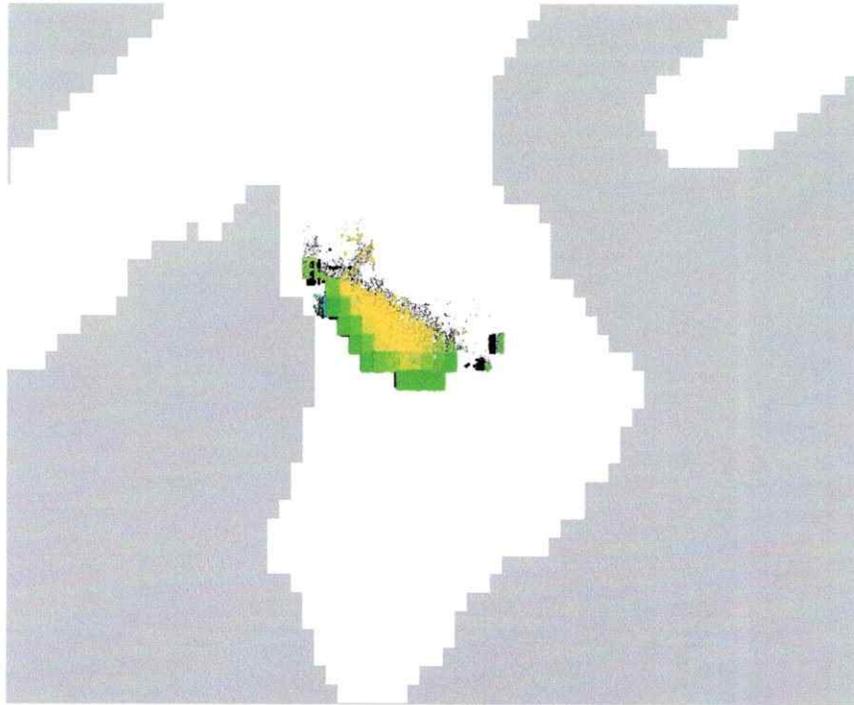


Figura 11: Dispersión de pellets simulado a través de derivadores lagrangianos, Origen 2. Las partículas en colores muestran los resultados de la dispersión de los pellets en el escenario por defecto. Las partículas en escala de grises corresponden al conjunto de resultados obtenidos del análisis de sensibilidad.

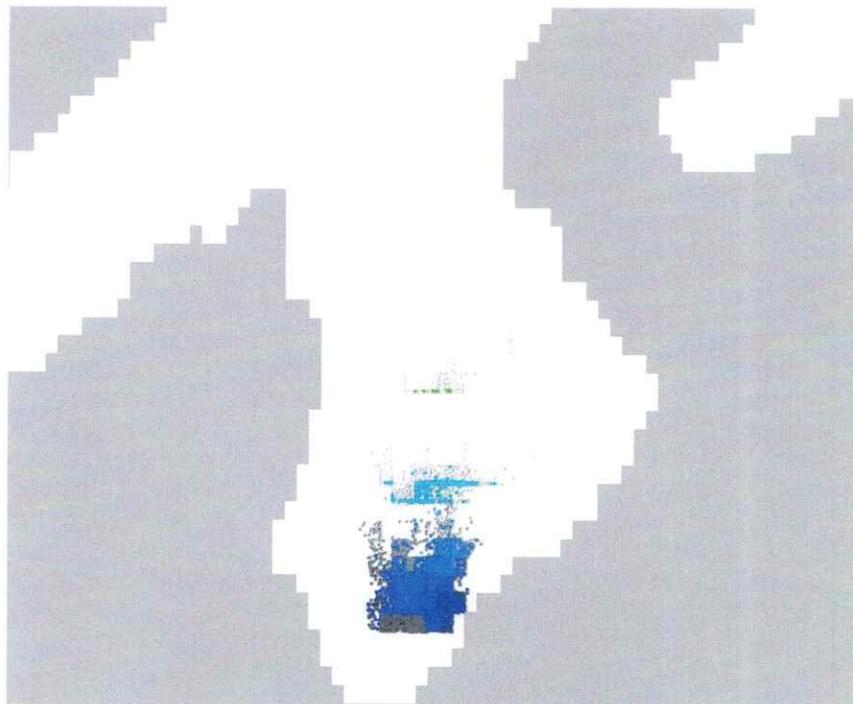


Figura 12: Dispersión de pellets simulado a través de derivadores lagrangianos, Origen 3. Las partículas en colores muestran los resultados de la dispersión de los pellets en el escenario por defecto. La celda con el azul mas oscuro corresponde al lugar donde esta instalada la balsa jaula. Las partículas en escala de grises corresponden al conjunto de resultados obtenidos del análisis de sensibilidad.

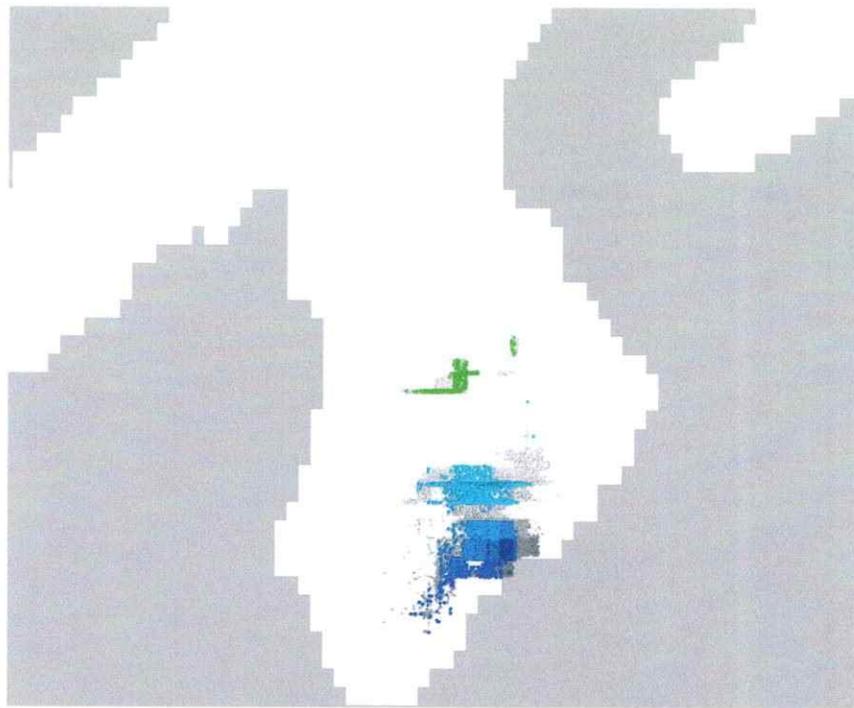


Figura 13: Dispersión de pellets simulado a través de derivadores lagrangianos, Origen 4. Las partículas en colores muestran los resultados de la dispersión de los pellets en el escenario por defecto. En esta imagen la celda de azul mas oscuro muestra la ubicación de la balsa-jaula. Las partículas en escala de grises corresponden al conjunto de resultados obtenidos del análisis de sensibilidad.

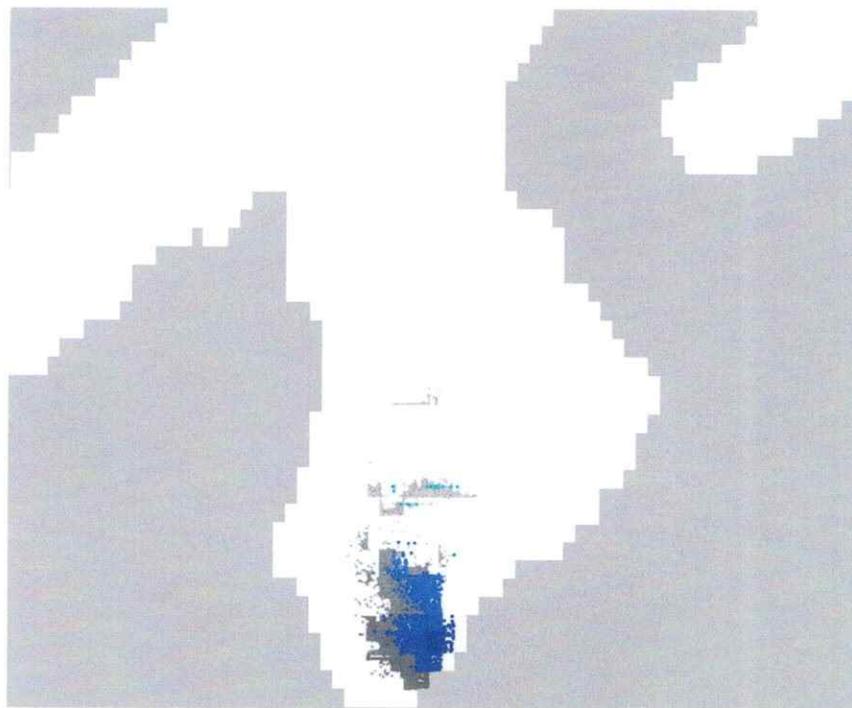


Figura 14: Dispersión de pellets simulado a través de derivadores lagrangianos, Origen 5. Las partículas en colores muestran los resultados de la dispersión de los pellets en el escenario por defecto. Las partículas en escala de grises corresponden al conjunto de resultados obtenidos del análisis de sensibilidad.

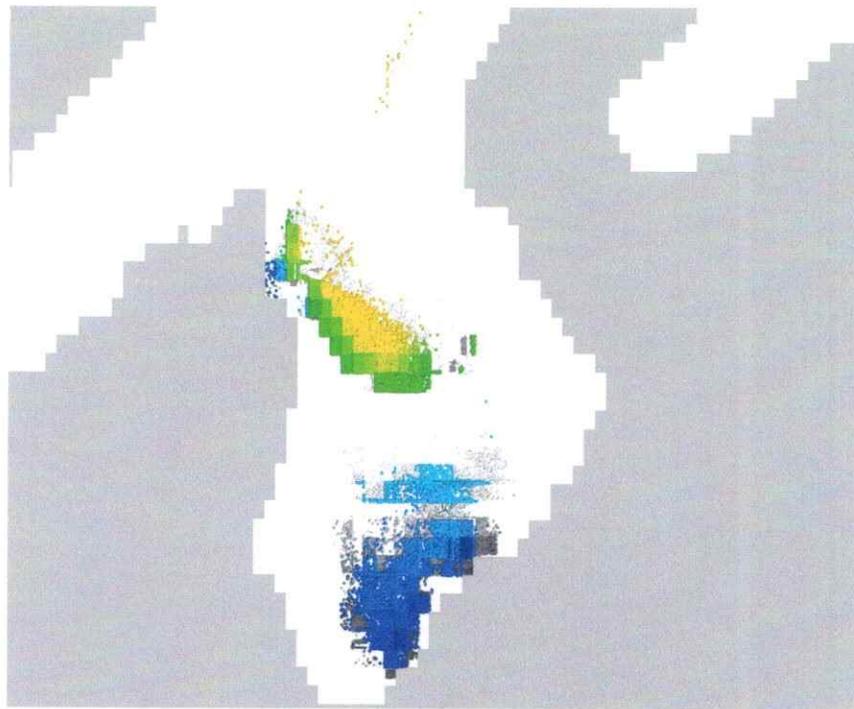


Figura 15: Superposición de la dispersión de los desechos particulados de las 5 balsas-jaula ubicadas en la bahía. Las partículas en colores muestran los resultados de la dispersión de los pellets en el escenario por defecto. Las partículas en escala de grises corresponden al conjunto de resultados obtenidos del análisis de sensibilidad.

#### *Concentración de Fecas.*

Los resultados de la concentración de fecas en el fondo marino de la bahía, después de una semana, considerando una descarga por hora de  $3 \times 10^{-5} \text{ mg L}^{-1}$ , se muestran a continuación en la Figura 16. Esta muestra que a pesar de que 3 de las 5 balsas-jaula de la bahía están ubicados al fondo de esta, la mayor concentración se observa en la zona noroeste, debajo de las dos balsas-jaula ubicadas en esa zona.

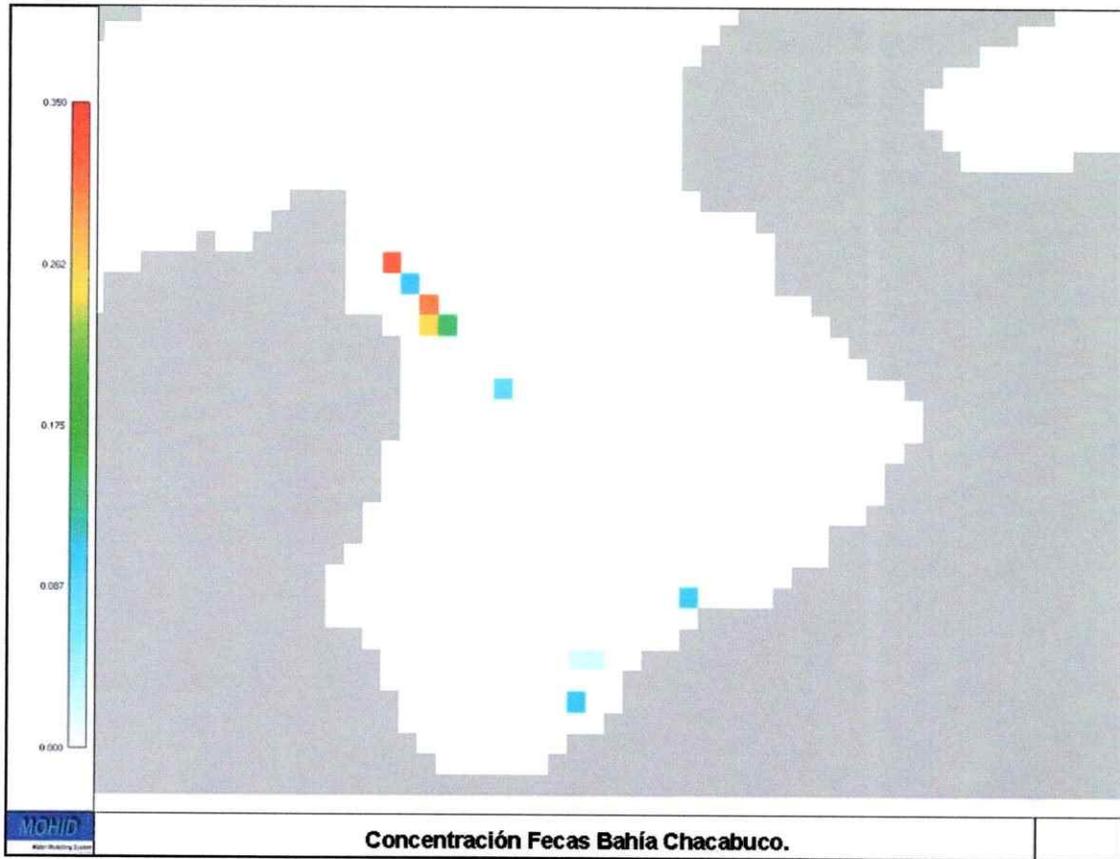


Figura 16: Concentración de fecas proveniente de balsas jaula en el fondo marino, Bahía Chacabuco. La escala esta en mg/L.

*Transectos.*

MOHID permite expresar los resultados mediante un monitoreo por cajas, como se detalla en la sección 2 (Mat. y Métodos). A continuación se muestran los resultados de dos transectos para el área de la bahía. La Figura 17 muestra distribución espacial de este muestreo. La Figuras 18 y 19 muestran los resultados cuantitativos (numero de partículas) para los dos transectos recién referidos.

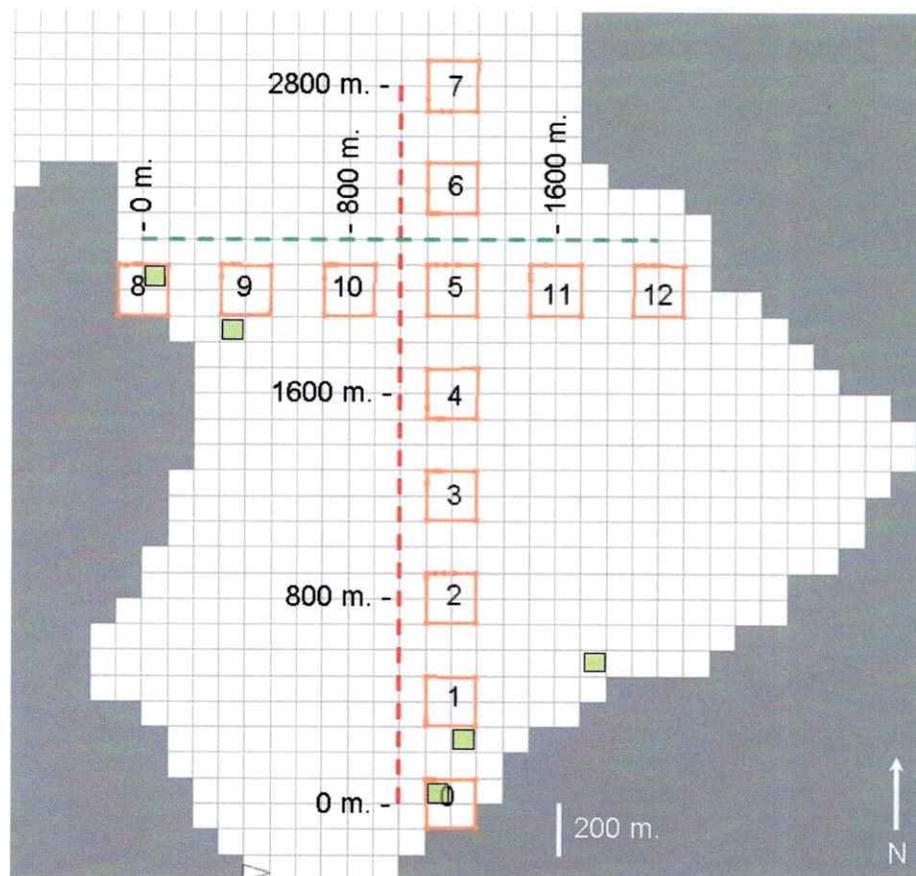


Figura 17: Distribución espacial del muestreo para el número de partículas por caja. La línea segmentada roja muestra el transecto Norte-Sur (NS) y la línea verde indica el transecto Este-Oeste (EO). Los cuadros verdes muestran la ubicación de las balsas-jaula.

Nuevamente se ve que la mayor cantidad de pellets ( $1 \times 10^5$ ) estaría bajo las balsas jaula, al comienzo del transecto, disminuyendo a un 10% de ese valor ( $1 \times 10^4$ ) al alejarse 400 m. de la balsa, disminuyendo en dos ordenes de magnitud más a los 800 m. ( $1 \times 10^2$  partículas). Se puede ver la influencia de la pluma de dispersión del origen 2 en el pick de 500 partículas a los 1600 m. Aquí también se ve como la cantidad de partículas disminuye casi exponencialmente al alejarse del origen de emisión de estas, si bien esta vez habría un desplazamiento hacia el este del punto de mayor concentración, seguramente producto de la pendiente del fondo marino en esa área de la bahía, pasando de 10 m. a más de 100 m. de profundidad en menos de 150 m. de recorrido horizontal.

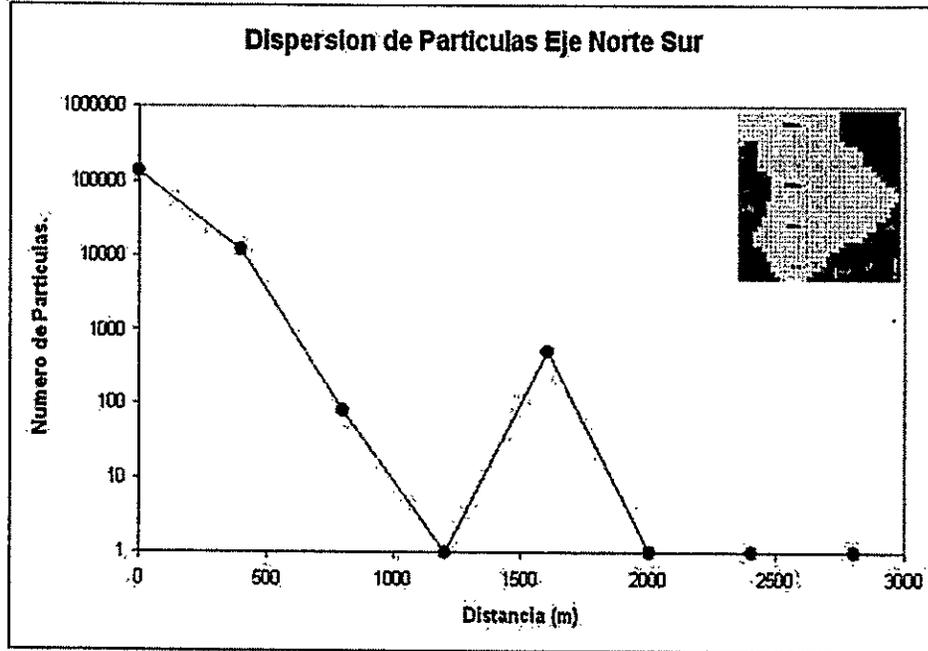


Figura 18: Cantidad de partículas a lo largo del eje Norte-Sur de la bahía. El eje y esta en escala logarítmica.

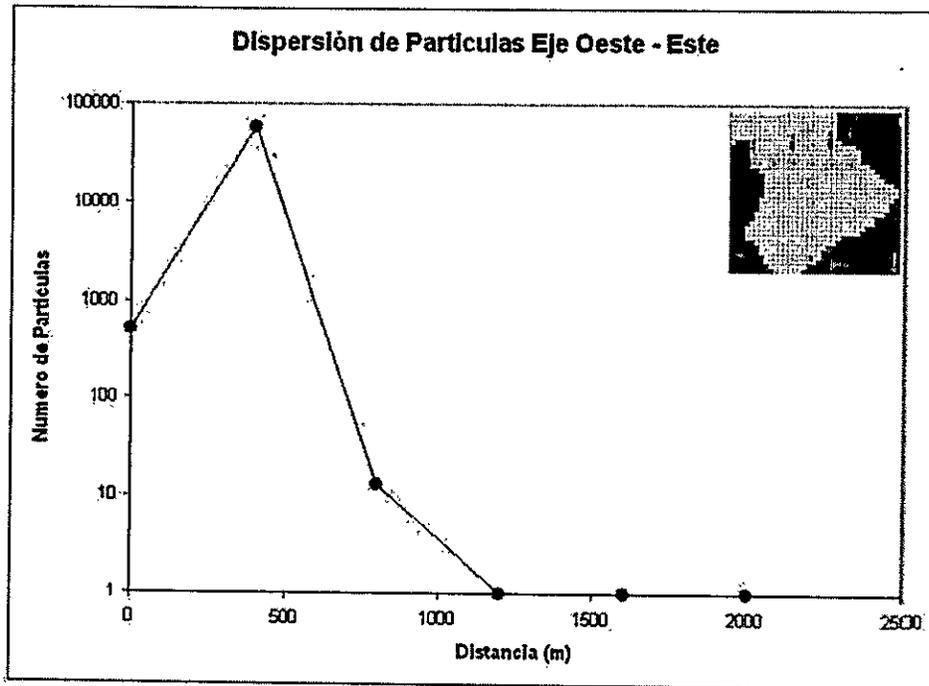


Figura 19: Cantidad de partículas a lo largo del eje Oeste-Este de la bahía. El eje y esta en escala logarítmica.

### 3.3 Análisis de Sensitividad.

La cantidad de partículas en la caja numero 9 ( $N_9$ ), al día nº 16 de simulación, se utilizó como la variable sobre la cual se realizó el análisis de sensibilidad. Se eligió esta caja por ser la que mejor representó la variabilidad de los resultados del modelo entre los diferentes escenarios del análisis. La sensibilidad del modelo se analizó según la variación en  $N_9$  relativo al cambio en el valor de un parámetro  $P$  (Huntley et al, 1987). Esta se calculó según la fórmula:

$$S_x = \frac{(N_{9s,x} - N_{9def}) / N_{9def}}{(P_{s,x} - P_{def}) / P_{def}} \quad (1)$$

Donde  $N_{9s,x}$  es el valor de  $N_9$  para un escenario  $x$  del análisis de sensibilidad, y  $N_{9def}$  es el valor de  $N_9$  por defecto.  $P_{s,x}$  corresponde al valor del parámetro  $P$  para el escenario del análisis de sensibilidad  $x$ , mientras que  $P_{def}$  al valor por defecto del parámetro. Los resultados de este análisis, agrupados en escenarios, se muestran en la Tabla 4. Las variables más sensibles resultaron ser las que definen la resuspensión, específicamente las que definen la erosión (*shear stress* de erosión) y deposición (*shear stress* de deposición) de partículas en el fondo.

Tabla 4: Resultados análisis de sensibilidad. El valor de los parámetros varió dentro de un rango a partir del valor por defecto del parámetro (Tabla 3). La sensibilidad se calculo utilizando la ecuación (1). El escenario E1 fue el más sensible.

9	Escenario	Sensitividad ( $\times 10^3$ ) del número de partículas.			
		200%	-75%	-50%	-200000%
x	Resuspensión (E1)	-664.3		335.5	982.8
o	Velocidad de Sedimentación (E2)		-1.8	107.1	
m	Movimiento Aleatorio. (E3)	90.5		128.6	

### 3.4 Aplicación SIG y herramienta de gestión

Los datos incorporados a la aplicación SIG, junto a la fuente de donde fueron obtenidos, se muestra en la Tabla 5. La Herramienta de Gestión consiste en la personalización de la interfaz grafica del software de SIG ArcView 3.3, de ESRI, con funciones específicas para visualizar los resultados del modelo de dispersión de partículas y las coberturas de SIG recién listadas. Se agregaron botones con ayuda en español para permitir la visualización de estas diferentes coberturas y resultados, agrupándolos en 3 grupos, como se lista a continuación;

- Coberturas GIS.
  - Botón "F": Activa la visualización del componente físico del sistema, mostrando la batimetría de la bahía y la línea de los 60 metros de profundidad, dato importante para la caracterización preliminar de sitio (CPS), tramite fundamental en la instalación de nuevas balsas-jaula.
  - Botón "U": Muestra la dimensión urbana de la bahía, permitiendo la visualización de la localidad de bahía chacabuco, con sus calles, puntos de interés, empresas instaladas en el sector, además de la ubicación y origen de las descargas de residuos líquidos.
  - Botón "S": Muestra las coberturas relacionadas con la salmonicultura en la bahía, revelando la ubicación de las balsas-jaula actualmente operando en la bahía, y el área considerada como apta para la acuicultura según la legislación chilena.
  - Botón "M": Activa la cobertura que muestra la ubicación de las estaciones propuestas en el anteproyecto de la norma secundaria para el monitoreo de la calidad de aguas de la bahía.

- Dispersión de pellets según origen.
  - Cada botón corresponde a un origen, asignándole un número a cada uno. El 6° botón con el signo de sumatoria ( $\Sigma$ ) muestra la dispersión de todos los orígenes juntos. Cada origen trae incorporada la incerteza del modelo para los resultados de dispersión, según como variaron éstos en el análisis de sensibilidad.
  
- Modelo Hidrodinámico.
  - Esta sección se compone de 3 botones. El primero muestra la grilla utilizada en el modelo hidrodinámico, el segundo una imagen con la marea llenante en la bahía, y el tercero una salida del modelo con una marea vaciante.

La herramienta se encuentra en el CD adjunto a este documento. Los requerimientos mínimos de software son el ArcView 3.3 (con la extensión Image Analyst), 50 Megabites (MB) de espacio en el disco duro, un procesador de 1 Ghz y 512 MB de RAM<sup>7</sup>. Las instrucciones de instalación se encuentran en el archivo "Léame" del CD adjunto.

---

<sup>7</sup> Fuente: <http://www.esri.com/software/arcgis/arcview/about/sys-reqs.html> (26/07/2006)

Tabla 5: Coberturas incorporadas a la aplicación SIG en ArcView 3.3. Se muestra la descripción de cada cobertura, el nombre del archivo incorporado al SIG y la fuente de cada una.

Cobertura	Archivo.	Fuente
Estaciones Propuestas monitoreo NS marina.	Estaciones_norma_f.shp	CONAMA XI Región
Áreas Aptas para la Acuicultura (AAA)	AAA_f.shp	CONAMA XI Región
Oficinas importantes Pto. Chacabuco.	Oficinas.shp	Propia
Pto. Chacabuco	Pto_Chacabuco.shp	Propia
Descargas Residuos Líquidos	Descargas_bahia_fin.shp	CONAMA XI Región
Calles Pto. Chacabuco	Calles.shp	Carta SHOA 8611
Balsas-jaula instaladas en la bahía.	Balsas_bahia.shp	CONAMA XI Región
Isolínea 60m de profundidad.	Isolinea60.shp	Carta SHOA 8611
Polígono con la costa de la bahía.	Costa_bahia_gis.shp	Carta SHOA 8611
Batimetría bahía.	Bat_bahia.shp	Carta SHOA 8611
Imagen Carta SHOA utilizada.	Bahia_final.img	Carta SHOA 8611

#### 4 DISCUSION

La modelación de la dispersión de los desechos particulados desde balsas-jaula de cultivos de salmones se ha intentado en múltiples oportunidades y desde distintos enfoques. Desde modelos numéricos como el aquí presentado, hasta modelos basados en sistemas de información geográfica (Pérez et al, 2002). Entre todos estos intentos, el modelo DEPOMOD resulta útil como punto de comparación con los resultados obtenidos aquí por medio del modelo MOHID. Por una parte, el módulo de dispersión de partículas de DEPOMOD es uno de los pocos ya validados; por otra, sus resultados muestran diferencias entre la dispersión modelada y la observada de un 13% a un 20% (Cromey et al, 2002). Aún así, existen varias diferencias entre ambos modelos. La velocidad de sedimentación de las partículas utilizada en el presente trabajo ( $1,28 \times 10^{-1} \text{ m s}^{-1}$ ) fue fija durante la simulación, mientras que en DEPOMOD esta varía aleatoriamente dentro de un rango. Para el caso de la modelación descrita en este trabajo, se optó por mantener constante esta velocidad dado el alto número de partículas simuladas ( $4 \times 10^9$ ), que corresponde a cinco órdenes de magnitud más que en DEPOMOD ( $7 \times 10^4$ ). El uso de velocidades variables habría sido limitante respecto de la capacidad de memoria RAM (2 Gbyte) del sistema computacional usado. Sin embargo, la cantidad de partículas usadas en este trabajo se acerca más a la cantidad real de desechos vertidos desde los sistemas de cultivo actuales (POCH consultores, 2004) que aquellas usadas en los modelos DEPOMOD. Otra diferencia sustancial es la escala de ambos modelos. El trabajo de Cromey et al (2002) tiene una resolución de  $10 \times 10 \text{ m}$ . y cubre un área de  $0.25 \text{ Km}^2$ , mientras que el presente trabajo tiene una resolución de  $100 \times 100 \text{ m}$ . y cubre un área de  $147 \text{ Km}^2$ . Una última diferencia importante son los tiempos de simulación. Cromey en su trabajo muestra resultados para un día (24h) de simulación, con un ingreso único de partículas al inicio

de la simulación, mientras que en el modelo de bahía Chacabuco se simularon dos semanas con descargas cada 2 horas.

Pese a las diferencias anteriormente descritas, ambos modelos (DEPOMOD y MOHID) muestran resultados similares respecto de la dispersión de partículas. DEPOMOD muestra que la acumulación de material particulado ocurre principalmente bajo las balsas jaula (100 m), alcanzando una dispersión máxima en el rango de los 200-300 m. Nuestros resultados, para profundidades equivalentes, muestran un rango similar, entre los 300-400m de dispersión. Por tanto, la simulación de la dispersión de pellets vertidos desde balsas-jaula por medio de MOHID muestra resultados congruentes con experiencias previas en modelación de dispersión de partículas (Cromey et al, 2002; Pérez et al, 2002; Pachang & Newell, 1997).

Se hace difícil analizar las consecuencias de la dispersión de los pellets y fecas sobre la bahía Chacabuco en el estado actual de modelo. Este da cuenta solo de la dispersión en términos físicos de estas partículas, por lo que en términos de consecuencias lo único que se podría afirmar con cierta seguridad es que el área de la bahía cubierta con desechos estaría entre el 17 y el 27 %, tomando en cuenta solo la dispersión de los pellets vertidos por 5 balsas durante 15 días. En la bahía actualmente funcionan al menos 30 balsas<sup>8</sup>, algunas instaladas desde hace más de 15 años, por lo que cualquier resultado obtenido de este modelo es una subestimación de la situación real.

Considerando esta información como punto de partida, se podrían analizar sus consecuencias en términos de la concentración de oxígeno en los sedimentos, o de la entrada de nutrientes como carbono y nitrógeno a la columna de agua y los efectos de

---

<sup>8</sup> Observables a simple vista en Google Earth®

esta sobre la ecología de la bahía, pero sería irresponsable realizarlas a partir de los resultados de un modelo de dispersión de partículas, tomando en cuenta que se pretende que este trabajo llegue hasta autoridades locales. El modelo en su estado actual de calibración y validación, permite tener una idea de la escala espacial de estos procesos. Sin embargo, actualmente ya se están añadiendo módulos biogeoquímicos y ecológicos que permitirán estudiar estos fenómenos ecológicos.

De los resultados de este trabajo y del análisis de sensibilidad del modelo se pudo ver que la variación en algunos supuestos y sus parámetros asociados -como velocidades de sedimentación, esfuerzo de corte (*shear stress*) del fondo, tasas de erosión o los valores utilizados para la resuspensión- varían los resultados de dispersión para algunos orígenes (particularmente el origen 1, Fig. 10). Sin embargo, apenas modifican el resultado final de la dispersión de los pellets en bahía Chacabuco, como lo muestra la Figura 15.

Si se considera que la modelación numérica es un proceso iterativo y que aquí se ha planteado desde la perspectiva de su uso como herramienta de gestión, entonces debería ocurrir que: (1) se continúe con el mejoramiento del modelo y (2) que la herramienta desarrollada sea puesta a disposición de sus potenciales usuarios. Lo primero tiene como propósito mejorar su capacidad predictiva, por ejemplo afinando las condiciones iniciales y de borde (Marín & Campuzano, 2006). Además se requiere de un proceso de validación acorde a los objetivos y necesidades del modelo. Sin embargo, debido a las múltiples definiciones y formas de validación, para el caso de este modelo, dado que está pensado para una herramienta de gestión, la validación dependería de la credibilidad de este frente a sus usuarios (Rykiel, 1996). Por tanto, la transferencia y uso del modelo pasa a tener un rol fundamental.

Sin embargo, aún cuando los resultados del módulo lagrangiano no fueron validados en el sentido clásico (comparación con datos independientes), el análisis de sensibilidad mostró que: (1) los parámetros más sensibles son los que influyen en la resuspensión, lo que concuerda con trabajos anteriores (Cromey et al, 2002, Pachang & Newell, 1997) y (2) el escenario sin resuspensión, donde ésta fue disminuida en varios órdenes de magnitud, muestra una dispersión de partículas congruentes con el escenario estándar. Vale decir, incluso variando sus parámetros más sensibles, el modelo de dispersión de partículas se comporta de manera robusta.

Por tanto, vuelve a cobrar importancia asegurar que los actores relevantes de la XI región puedan tener acceso a esta herramienta. Esta etapa está considerada como parte de las actividades del proyecto ECOManage en Chile. En la primera fase, los resultados de las simulaciones estarán disponibles a través del portal Internet del Laboratorio de Modelación Ecológica: <http://ecosistemas.uchile.cl>. Adicionalmente, por este mismo medio se establecerá un canal de comunicación con los usuarios de la herramienta.

En resumen, este trabajo muestra que es factible utilizar herramientas de modelación numérica para asesorar el manejo de los desechos particulados en la industria salmonicultora en Chile, a partir de información disponible en los distintos organismos del estado y utilizando software de distribución libre. Esto implica menores costos y una mejor accesibilidad. Finalmente, el acceso libre de cualquier usuario del sistema eco-social de bahía Chacabuco a modelos como el aquí presentado es un paso sustancial hacia el manejo integrado de zonas costeras en Aysén, al colocar en un mismo nivel de acceso a la información a todos los usuarios del sistema, debilitando la asimetría que actualmente existe en Chile.

## 5 BIBLIOGRAFIA.

1. CH2MHILL. 2001. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Alumysa, capítulo 4, sección G, línea base marina, puerto y planta reductora aluminio.
2. Chen, Y. S., Beveridge, M. C. M. & Telfer T. C. 1999. Settling rate characteristics and nutrient content of the faeces of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and the implications for modelling of solid wastes dispersion *Aquaculture Research*, 30, pp. 395–398.
3. Cromey C. J., Nickell, T.D., Black, K.D., 2002. DEPOMOD—modelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms. *Aquaculture* 214, pp. 211 –239.
4. Dakers A. 2002 Ecosystem Services, their use and the role of ecological engineering: State of the Art. En: Costanza, Jorgensen (eds) *Understanding and Solving Environmental Problems in the 21<sup>st</sup> century, Towards a new, integrated hard problem Science*. Elsevier Science Ltd, UK. p. 221 – 255.
5. Halls, J.N, 2003. River run: an interactive GIS and dynamic graphing website for decision support and exploratory data analysis of water quality parameters of the lower Cape Fear river. *Environmental Modelling & Software* 18, pp. 513–520.
6. Huntley, ME., Marín, V., Escritor, F. 1987. Zooplankton grazers as transformers of ocean optics: A dynamic model. *Journal of Marine Research* 45, pp. 911-945.
7. Karakassis I., Tsapakis M., Smith CJ., Rumohr H., 2002. Fish farming impacts in the Mediterranean studied through sediment profiling imagery. *Marine Ecology Progress Series* 227, pp. 125–133.
8. Marín V., Campuzano F., 2006. Un modelo hidrodinámico-barotrópico para los fiordos australes de Chile entre los 41°S y los 46°S
9. Marín V., Delgado L.. en prensa. FES-sistemas: un concepto para la incorporación de las sociedades humanas en el análisis medioambiental en Chile. *Revista Ambiente y Desarrollo*.
10. MedVeg Project, 2004. Fish farm impacts on primary production in surrounding waters (Deliverable n° 17) web: [www.medveg.dk](http://www.medveg.dk) [Consulta: 16/08/2006]
11. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Habiterra S.A 2004. Plan Regulador Comunal de Aysén.
12. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Habiterra S.A. 2005. Plan Regional de Ordenamiento Territorial.
13. Pachang V., Newell C. 1997. Modeling Hydrodynamics and aquaculture waste in coastal Maine. *Estuarios* 20, pp. 14 – 41

14. Perez O. M., Telfer T. C., Beveridge M.C.M., Ross L.G., 2002. Geographical Information Systems (GIS) as a simple tool to aid modelling of particulate waste distribution at marine fish cage sites. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 54, pp. 761-768.
15. POCH ambiental Consultores. Declaración de Impacto Ambiental, Centro Engorda Salmonideos, Canal King lado nor-este isla Gertrudis, Pert nº 203111106, 2004. Disponible en línea en el buscador de proyectos de <http://www.e-seia.cl/> [Consulta: 16/08/2006]
16. Proyecto ECOManage. Resumen Ejecutivo. [http://www.ecomanage.info/about\\_es.htm](http://www.ecomanage.info/about_es.htm). [Consulta: 16/08/2006]
17. Rykiel E.J. 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90, pp. 229-244.
18. Subsecretaría de Pesca, Ministerio de Economía. 2004. Informe Consolidado de Pesca y Acuicultura.
19. Tironi A., Yarrow M., Ramírez A., 2005. Análisis General del Impacto Económico Social de la Norma Secundaria de Calidad de Aguas del Río Aysén en el sector Agropecuario y otras actividades económicas. Servicio Agrícola Ganadero XI Región, MINAGRI, Coyhaique, Chile.
20. Tsanis I.K., Valeo C., Wu J., Boyle S. 1996. Managing contaminated sediments using a hydrodynamic model and a GIS. *Environmental Technology* 17, pp. 877-883.
21. Turner R. K., 2000. Integrating natural and socio-economic science in coastal management. *Journal of Marine Systems* 25, pp. 447-460.
22. Turner R.K., Salomons W. 1999. Introduction and Overview. pp. 1-10 En: Salomons W., Turner R.K., de Lacerda L. D., Ramachandran S. *Perspectives on Integrated Coastal Zone Management*. Springer-Verlag, Berlin.
23. Wiberg P., Modeling Sediment Erosion and Redistribution in Fine-Grained Shelf Environments. EuroSTRATAFORM Program report, Department of Environmental Sciences, University of Virginia. [http://www.onr.navy.mil/sci\\_tech/32/321/docs/cg/03/cgwiber2.pdf](http://www.onr.navy.mil/sci_tech/32/321/docs/cg/03/cgwiber2.pdf) [Consulta: 16/08/2006]
24. Yang, X., Rystedt, B. 2002. Predicting flood inundation and risk using GIS and hydrodynamic model: a case study at Eskilstuna, Sweden. *Indian Cartographer* 22, pp. 183-191.
25. Zerger A., Wealands S., 2004. Beyond Modelling: Linking Models with GIS for Flood Risk Management. *Natural Hazards* 33, pp. 191-208.