



GOBIERNO DE  
**CHILE**  
MINISTERIO DE ECONOMÍA

Materiales y Resultados del Taller de Capacidad de Carga  
**Sustentabilidad y Manejo a Largo  
Plazo de la Actividad Acuícola**  
Long-term Sustainability and Management  
of Aquaculture Activities



Materiales y Resultados del Taller de Capacidad de Carga  
**Sustentabilidad y Manejo a Largo Plazo  
de la Actividad Acuícola**

---

Puerto Montt - Chile  
Enero de 2010

# Tabla de Contenidos

Agradecimientos . . . . .	II
Tabla de Contenidos . . . . .	III
Introducción . . . . .	1
Recomendaciones . . . . .	3
Conclusiones. . . . .	9

## RESÚMENES

<b>W. Silvert:</b> ¡Tantos efectos! ¿Cómo los abordamos? . . . . .	17
<b>W. Silvert:</b> Entregando ciencia donde se la necesite . . . . .	19
<b>P. Guillibrand:</b> El Rol de los Modelos Computacionales en la Regulación y Manejo de la Industria Acuícola en Escocia . . . . .	21
<b>P. Guillibrand:</b> Revisión de Modelos Computacionales Usados en la Regulación y Manejo de la Industria Acuícola en Escocia . . . . .	23
<b>K. Boxaspen:</b> Acuicultura Sustentable y Capacidad de Carga en Aguas Noruegas . . . . .	25
<b>K. Boxaspen:</b> Utilización de Sistemas de Regulación MOM y MOLO - Vigilancia Ambiental, Modelación y Uso de Área en Zona Costera . . . . .	27
<b>K. Black:</b> Modelación del Impacto Ambiental de la Acuicultura . . . . .	29
<b>M. Salamanca:</b> Desarrollo de un modelo para predecir la capacidad ambiental de un centro acuícola y su efecto en la producción . . . . .	32
<b>F. Tapia:</b> Estudios de Monitoreo Oceanográfico y Estudios Orientados a Procesos como Plataforma para Evaluar la Capacidad de Carga de los Fiordos Chilenos: Un caso de estudio en el Estuario Reloncaví. . . . .	33
<b>V. Marín:</b> Modelación Integrada de los Fiordos Australes: El Sistema de Modelación MOHID. 13 . . . . .	34
<b>P. Moreno:</b> Modelos para la evaluación de la capacidad de carga de fiordos aplicables a ecosistemas del sur de Chile . . . . .	35
<b>A. Troncoso:</b> Capacidad de Carga Productiva de un Área de Cultivos de Choritos. . . . .	36
<b>R. Riquelme:</b> Un Modelo Matemático para el Cálculo de la Capacidad Ambiental del Cultivo de Salmónidos. . . . .	38
<b>Y. Niño:</b> Hidrodinámica y Procesos de Transporte en la Capa Límite Béntica . . . . .	40
<b>M. Hevia:</b> Modelación de la Sedimentación Bentónica Bajo las Balsas Jaulas . . . . .	41
<b>E. Ovalle:</b> Modelación Fiordo del Reloncaví: Primeros Resultados. . . . .	42
<b>English Version.</b> . . . . .	43

Las Subsecretarías de Economía y de Pesca del Ministerio de Economía, agradecen al Departamento de Oceanografía de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas de la Universidad de Concepción y al Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad Arturo Prat, Puerto Montt, y al Departamento de Ingeniería Matemática de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Concepción, por su apoyo técnico y científico en la organización y realización de este Taller de Capacidad de Carga, como también a los expositores nacionales y extranjeros que aportaron con sus experiencias al éxito de este evento. Nuestro especial reconocimiento al Dr. William Silvert, Dr. Phil Guillibrand, Dr. Karin Boxaspen, Dr. Kenny Black, Dr. Marco Salamanca, Dr. Víctor Marín, Dr. Yarko Niño, Dr. Fabián Tapia, Dr. Elías Ovalle, Dr. Martín Hevia, Dr. Roberto Riquelme, Dr. Alfredo Troncoso, Paula Moreno y Dr. (c) Patricio Campos, quienes, además de aportar con sus comentarios y recomendaciones, dejaron material valioso para complementar este documento.

# INTRODUCCION

La acuicultura es una actividad económica de gran importancia para la plataforma exportadora del país. Por esto, y debido a la aparición de amenazas de orden sanitario y ambiental, el Ministerio de Economía y en particular la Subsecretaría de Pesca, han elaborado una serie de estrategias tendientes a abordar, de manera sistémica y coordinada, acciones necesarias que contribuyan a resolver o mitigar los efectos actuales y potenciales de tales amenazas.

Uno de los temas relevantes de plantear, es el relacionado con la formulación de estudios tendientes a determinar la Capacidad de Carga de los cuerpos de agua marinos y estructurar un plan de investigación y desarrollo (I+D) que aborde estos problemas de manera efectiva.

En este marco, el Consejo Estratégico Público Privado del Cluster Acuícola, impulsó la ejecución de varios proyectos destinados a evaluar la Capacidad de Carga en distintas zonas de cultivo de salmónidos y moluscos, a través del Fondo de Investigación Pesquera (FIP), del Programa Fondef de Conicyt y de Innova Chile de CORFO. Adicionalmente al financiamiento de estos proyectos, se estimó necesario desarrollar un taller de trabajo entre investigadores que pusiera en común el estado del arte de la I+D a nivel mundial, beneficiando por esta vía los proyectos en marcha e identificando y esbozando el diseño de las futuras medida de administración de la actividad.

El uso de modelos de Capacidad de Carga como herramienta de gestión de una actividad económica, permite comprender los procesos, las capacidades y limitaciones de la renovación natural de los distintos cuerpos de agua, tanto a nivel local como regional y, por lo tanto, la capacidad de absorber la carga ambiental producto de las actividades acuícolas actuales y potenciales.

Los modelos que permiten calcular la Capacidad de Carga, se basan en principios y conocimientos científicos de alta complejidad, los que, a través de una descripción estructurada y cuantificada de variables y características ambientales significativas, permiten sustentar decisiones de manejo, tanto públicas como privadas, que aseguren la sustentabilidad de la actividad productiva y de la calidad ambiental de las áreas donde ellas se insertan.

El taller "Capacidad de Carga: Sustentabilidad y Manejo a Largo Plazo de la Actividad Acuícola", se llevó a cabo en la ciudad de Puerto Montt entre el 11-13 de enero de 2010 y contó con la participación de destacados expertos nacionales y extranjeros, intercambiando avances y experiencias sobre las estrategias para el diseño y uso de los Modelos de Capacidad de Carga como herramienta para el manejo de las actividades acuícolas. Por otra parte, se revisaron estudios (realizados y en ejecución) sobre esta materia y se realizaron propuestas de líneas de trabajo y estrategias metodológicas.

Este documento contiene un resumen de cada una de las presentaciones realizadas, así como las conclusiones finales del evento, y se entrega con el fin de difundir a toda la comunidad científica, al sector público vinculado a la actividad acuícola y a las empresas productoras una reseña de la mejor información disponible a la fecha sobre esta importante herramienta.

## RECOMENDACIONES

Por lo general, la industria acuícola busca aumentar los niveles de producción con el fin de conseguir economías de escala. En el estado actual de conocimiento, no es seguro suponer que un cambio en la escala de producción será ambientalmente aceptable, socialmente equitativo y viable económicamente, según se define para el desarrollo sostenible de la acuicultura. Es necesario, por lo tanto, establecer criterios para fijar la producción acuícola máxima en cada área de cultivo con el fin de evitar la degradación del medio marino y, en particular, de la zona costera que está ya bajo una considerable presión humana en la mayor parte del mundo.

Por lo tanto, se deben tener en cuenta las mediciones operativas de la capacidad de carga en la selección y gestión de centros de cultivo con el fin de permitir el uso sustentable de los recursos marinos.

### **Capacidad de carga, indicadores y modelos**

La capacidad de carga medioambiental se puede definir como la biomasa máxima en cultivo que puede soportar un ecosistema determinado, en un periodo de tiempo definido. El término capacidad de carga a menudo es utilizado en el contexto de la gestión o planificación costera, con respecto a actividades humanas como la acuicultura.

El concepto de capacidad de carga resulta especialmente apropiado para sistemas de cultivo que dependen directamente del medio en cuanto a la fuente de alimentación, como es el caso del cultivo de mitílidos. Sin embargo, cuando se considera, por ejemplo, la salmonicultura donde el alimento que se proporciona a los peces proviene del exterior, es más correcto hablar de capacidad de asimilación o de soporte en lugar de de carga. En estos casos, el interés se centra en la capacidad del ambiente para absorber y asimilar el exceso de carga de compuestos y nutrientes orgánicos. Si el entorno que la recibe no puede asimilar eficazmente la carga de nutrientes y de materia orgánica, se observan efectos negativos, como por ejemplo, el deterioro del agua o de la calidad de los sedimentos que pueden poner en peligro la integridad y la salud del ecosistema.

Hablar en términos de impactos inaceptables, implica que éstos son definidos por los responsables de las políticas y no directamente por los científicos. A fin de minimizar arbitrariedades, es necesario alcanzar un consenso entre los distintos usuarios y así garantizar la armonización con respecto a los impactos aceptables de la acuicultura.

Una forma de definir los impactos aceptables es establecer los criterios y variables que se han de utilizar para calcular la capacidad de carga y de asimilación. En este caso, entre los aspectos más difíciles que es necesario incluir, se encuentran:

- El componente ecológico de la capacidad de carga, es decir, ¿Cuáles son los impactos ecológicos aceptables? Se puede seleccionar una serie de variables, como el bajo nivel de oxígeno en el agua (hipoxia), o el carbono orgánico particulado (eutrofización).
- Los efectos acumulativos de los centros de cultivo sobre las masas de agua o los litorales en un espacio limitado;



- Los efectos sinérgicos u hostiles con otros usos u otras fuentes de nutrientes;
- Una normativa desequilibrada, donde, por ejemplo, se utiliza una normativa rígida para reducir la emisión de nutrientes en áreas donde contribuye con una proporción pequeña a la descarga total de nutrientes;

Además, se puede utilizar variables relacionadas con la calidad ambiental o estándares como los niveles de producción primaria, los niveles de oxígeno en los sedimentos, o el estado de las comunidades bentónicas, y comparar los valores medidos con los valores umbral para determinar cuándo son inaceptables los impactos de la actividad.

El papel de los organismos reguladores es planificar las actividades humanas, de tal manera que se minimicen los riesgos de los impactos ecológicos, sociales y económicos no deseados sobre los entornos de interés. Una de las herramientas que se han desarrollado para ayudar a proteger el medio ambiente son los Estándares de Calidad Ambiental. Estos estándares establecen generalmente las concentraciones en el medio ambiente de ciertos compuestos, por debajo de los cuales es de esperar que no tengan lugar los efectos inaceptables. Uno de los primeros pasos hacia el desarrollo de los estándares medioambientales es la selección de indicadores acerca del estado medioambiental. Los indicadores proporcionan información útil sobre el estado del medio ambiente antes, durante y después de un hecho, como es el inicio del ciclo de crecimiento de la acuicultura.

Si se desea evaluar la capacidad de un área para la instalación de un centro de cultivo, se necesita predecir los impactos futuros potenciales de la actividad planificada y, para ello, se emplean modelos. Los modelos son cada vez más flexibles y precisos, pero su calidad y aplicabilidad dependen de la validez de las hipótesis subyacentes y de que se comprueben en un conjunto amplio de condiciones ambientales.

La utilización de indicadores y modelos mejora la capacidad de los científicos, reguladores y productores, para evaluar el impacto potencial de nuevas operaciones de acuicultura, para caracterizar y evaluar cualquier impacto real, y para delimitar las áreas en las que se puede minimizar el impacto de los cultivos marinos.

Si Chile quiere consolidar su industria acuícola, tiene que disponer de información que le permita administrar en forma eficiente las áreas de cultivo de salmones y mitílidos, y las herramientas de manejo para alcanzar este objetivo no son otras que los Modelos de Capacidad de Carga y Capacidad de Asimilación.

Se debe dar una alta prioridad a los estudios científicos relacionados con las interacciones de la acuicultura y el ambiente, con el objetivo de asesorar a los gobiernos en prácticas de manejo adecuadas.

Los modelos complejos son necesarios para comprender los sistemas. Muchos de los procesos que se ilustran en los modelos conceptuales, provienen de observaciones y de trabajos con modelos. Para capturar estos procesos se necesita modelos muy complejos. El uso de modelos simples busca construir un puente sobre la brecha entre una investigación muy complicada y la comprensión de los procesos. Se trata de proporcionar una herramienta útil que pueda ser empleada para la obtención de los parámetros claves del sistema. En mu-

chos casos, después de analizar un sistema y definir cuáles son las variables críticas, no es necesario modelar las demás. Se puede usar un modelo complejo para estimar las variables críticas, y luego utilizar variantes más sencillas. Esta estrategia es una forma de reducir la complejidad del sistema.

No se puede trabajar con un solo modelo y confiar solamente en sus resultados. Para evaluar el impacto de la acuicultura hay que analizar una amplia gama de efectos y utilizar diferentes modelos para cubrir diferentes efectos a distintas escalas.

En relación a modelos simples y complejos, se recomienda priorizar inicialmente el uso de modelos sencillos con el propósito de describir la situación existente y qué es lo que se requiere. Una vez que se tenga una idea general de la situación de una cuenca o cuerpo de agua, se puede pasar a utilizar modelos más complejos y obtener así respuestas mucho más refinadas.

Si bien se necesita desarrollar modelos de gran escala para analizar los problemas a escala local y regional, no se puede olvidar los micro-procesos. Se requiere investigación teórica, numérica, experimental y de campo para desarrollar éstos, validarlos, calibrarlos e integrarlos después a modelos de mayor escala.

Se debe considerar la modelación de los cambios que ocurren después de la sedimentación (tasa de recambio de carbono y eventos de resuspensión), porque son una etapa importante en la vinculación de las cargas de carbono con los índices de enriquecimiento bentónico.

Se recomienda considerar la capacidad de carga de todos los parámetros medibles en la selección y gestión de un centro de cultivo. Para lograr el desarrollo sustentable de la acuicultura, es importante considerar los aspectos ambientales, sociales, físicos, de producción y económicos de la actividad.

Los centros de cultivo deben ajustar su producción a la capacidad de carga del entorno local. Cada ecosistema tiene una capacidad diferente para absorber y asimilar el exceso de carga de compuestos orgánicos y nutrientes. Se recomienda establecer un límite máximo de producción para cada centro de cultivo, incluso en el caso que existan condiciones medioambientales más favorables.

Se debe realizar una evaluación de la proporción máxima de espacio permisible que puede utilizarse para la acuicultura en cada cuerpo de agua, teniendo en cuenta otros usos. Se deben usar indicadores ecológicos y socioeconómicos además de modelos y estándares para obtener la mejor evaluación integrada posible de la asignación del espacio.

La capacidad de carga no es sólo un número: las recomendaciones de capacidad de carga se deben basar en la cantidad y ubicación de los centros de cultivo en un cuerpo de agua, más que en las unidades de peces a cultivar en una jaula.

Se recomienda implementar un plan de recolección de información de buena calidad, tanto en los fiordos o cuerpos de agua que ya están siendo usados para la acuicultura, como en aquellos que aún no lo están. Para este fin, es ideal usar instrumentos anclados y efectuar mediciones a la largo plazo para, eventualmente, parametrizar y validar los modelos.

Hay pocos esfuerzos orientados hacia el estudio de la capacidad de carga en el cultivo de mitilidos; éstos están enfocados principalmente hacia la acuicultura intensiva y fiordos. Se debe hacer un mayor esfuerzo para estudiar la capacidad de carga en ambientes de canales, esteros y áreas de baja profundidad, donde actualmente está concentrada en su mayor parte la acuicultura.

Se recomienda analizar las posibles sinergias entre los diferentes tipos de cultivos: de peces (adición de nutrientes) y de mitilidos (remoción de fitoplancton), y evaluar si pueden operar juntos adecuadamente.

Se debe incentivar estudios para determinar los tiempos de residencias en distintos sistemas marinos. Es fundamental conocer el comportamiento de los sistemas hidrográficos para apoyar los estudios de capacidad de carga. El Estado debe hacerse cargo de sustentar este tipo de estudios regionales.

Existe una significativa sensibilidad de las estimaciones de capacidad de carga hacia la variabilidad espacial y temporal en el ambiente físico, lo que lleva a considerar la necesidad de incorporar escalas, tanto espaciales como temporales de forma más explícita en una definición formal de capacidad de carga, para ser usada en futuros esfuerzos de monitoreo y administración de la acuicultura en el sur de Chile.

Los modelos simples que predicen la dispersión y aporte de residuos orgánicos desde las jaulas de cultivo, pueden ser usados como herramientas de gestión para la localización de los sitios y para la evaluación del potencial de enriquecimiento orgánico de los ecosistemas bentónicos. Un número importante de características físicas que influyen en la dispersión de residuos particulados provenientes de los centros de cultivo, pueden ser incorporados en modelos simples de dispersión.

Las recomendaciones de capacidad de carga centradas en el número y ubicación de los centros de cultivo dentro de un cuerpo de agua dado, tendrían mayor valor práctico que una estrategia basada en un solo centro de cultivo (v.g., límites de biomasa a cultivar en una jaula).

La re-orientación de las jaulas de cultivo en función de las corrientes prevaletentes en un cuerpo de agua, podría incrementar sustancialmente la capacidad de carga de los centros productivos durante periodos ambientalmente desfavorables.

Debido a la necesidad de aplicar modelos para estimar la capacidad de carga de fiordos y canales en la zona sur de Chile, es esencial que, tanto el gobierno como el sector privado, colaboren en el desarrollo de planes de monitoreo y protocolos de observación de variabilidad ambiental que proporcionen información utilizable para implementar dichos modelos. Este plan debe contener al menos el registro de los siguientes parámetros:

- Registro de corrientes
- Monitoreo de aportes de ríos
- Batimetría
- Producción primaria y niveles ambientales de nutrientes y oxígeno disuelto
- Información productiva de los centros de cultivo

La ciencia tiene que ser entregada a quienes la necesiten en un lenguaje fácil de entender. Una forma de abordar este desafío es mediante el desarrollo de Sistemas Expertos. Los Sistemas de Apoyo a las Decisiones (SAD) resultan de particular importancia para el manejo de la acuicultura, porque no sólo pueden llevar a cabo modelación, sino que también presentar los resultados de una forma en la que los no-científicos puedan interpretarlos y usarlos para la toma de decisiones.

El gobierno debe implementar un sistema experto que permita mejorar el acceso a los resultados científicos, por parte de las personas que tienen que tomar decisiones.

Es altamente estratégico levantar un Catálogo de los Fiordos, Canales y Bahías del Sur de Chile. Este debería contener, a lo menos, información de batimetría, volumen, área superficial, rango de mareas y pluviometría. Este tipo de información es básica para el desarrollo de modelos en los cuerpos de agua sometidos a cultivo y de gran valor, tanto para los reguladores como los modeladores. (Ejemplo, Anton Edwards y Fiona Sharples, 1986 "Catálogo de Fiordos Escoceses").

#### **Ejemplo de modelos e indicadores**

La macrofauna bentónica es la medida tradicional del impacto sobre el bentos. Sin embargo, exige mucho tiempo, es de alto costo y requiere destreza y experiencia para identificarla de forma cuantitativa. Por ello, se ha invertido un mayor esfuerzo en identificar indicadores biogeoquímicos simples de los sedimentos, por ejemplo, la concentración de materia orgánica en el sedimento para indicar el 'grado' y la extensión del impacto del cultivo de peces. También se han considerado variables biológicas como abundancia o riqueza de especies, velocidad de las corrientes, granulometría, potencial redox, carbono orgánico total, etc. Como indicadores de la columna de agua, se han utilizado el amonio y el oxígeno disuelto.

## EJEMPLOS DE MODELOS PARA EVALUAR EL IMPACTO DE LA ACUICULTURA EN EL MEDIO AMBIENTE

Nombre del Modelo	Escala	Descripción
DEPOMOD	Local - Jaula	Modelos de seguimiento de partículas utilizado para predecir el impacto de los residuos (como partículas y compuestos químicos) sobre la comunidad béntica. Se desarrolló para el cultivo de salmones en el Atlántico Norte.
Modelo CSTT	Local - Masa de Agua	Modelo de caja única que predice el máximo de clorofila del fitoplancton que puede provenir del enriquecimiento de nutrientes. También existe en una versión dinámica (dCSTT) que utiliza el mismo modelo físico que el LESV.
LESV	Local - Masa de Agua	Modelo vector del estado de los ecosistemas de fiordos. Consta de un modelo físico de tres capas (ACExR) derivado del FjordEnv.
ShellSIM	Basado en Individuos	Modelo dinámico para la alimentación, biodeposición, metabolismo, excreción y el crecimiento de moluscos bivalvos en función de la temperatura, salinidad, y de la disponibilidad y composición de seston.
TRIMODENA	Hidrodinámico tridimensional.	Incluye un modelo hidrodinámico de elementos finitos en 3D para la simulación numérica de los procesos dispersivos, y un modelo lagrangiano en 3D de rastreo de partículas para simular la dispersión de partículas, ambos se han aplicado a la contaminación de los cultivos marinos.
EDMA	Local Masa de agua y Jaula	Utiliza el BNRS (Simulador de redes de reacciones biogeoquímicas, para la descomposición orgánica y los procesos de oxidación en el sedimento)
KK3D	Sedimento Unidimensional vertical	Modelo de seguimiento de partículas utilizado para predecir los vertidos en forma de partículas provenientes de los centros de cultivo de peces, incluyendo la hipoxia del fondo. El modelo se ha parametrizado para peces.
FjordEnv	Local - Masa de Agua	Modelo hidrodinámico de tres capas para intercambio en fiordos. Parametriza numerosos procesos físicos e incluye una biología pelágica simple y la penetración de la luz.
MOM	Local - Masa de Agua	El modelo MOM se puede utilizar para calcular la capacidad de asimilación (producción total de peces) de un área de cultivos de peces. Contiene cuatro sub-modelos: un modelo de peces, un modelo de jaulas de calidad del agua, un modelo de dispersión y un modelo béntico.

## CONCLUSIONES

1) Existen varias definiciones de Capacidad de Carga

**Capacidad de Carga** de un área se refiere al potencial de producción máxima de una especie que el ambiente puede sustentar indefinidamente, en relación con el alimento, hábitat, agua (oxígeno) y otras necesidades disponibles en el ambiente.

**Capacidad Asimilativa** es la habilidad natural del ecosistema para usar y descomponer contaminantes potenciales sin efectos “perjudiciales” para el ambiente.

**Capacidad Ambiental** es la habilidad del ambiente para acomodarse a una actividad en particular o tasa de actividad con un impacto aceptable. Esto incluye los aspectos estéticos y otros valores sociales.

Para la salmonicultura es más apropiado usar las definiciones de **Capacidad Asimilativa** y **Capacidad Ambiental**.

La definición de **Capacidad de Carga** es más apropiada para ser aplicada al cultivo de mitílicos.

2) En el contexto de la modelación del cultivo de salmónidos o peces, se hace necesario modelar:

- a. La acumulación de materia orgánica sobre los fondos marinos en los que operan los centros de cultivo, no debe poner en riesgo la existencia de la macro infauna bentónica.
- b. La calidad del agua en las jaulas de cultivo debe cumplir con las necesidades de los peces, es decir, la concentración de oxígeno se debe mantener sobre un nivel umbral y las de amonio y otras sustancias potencialmente peligrosas, bajo niveles umbrales.
- c. El aporte de nutrientes y materia orgánica proveniente de los centros de cultivo no debe deteriorar la calidad del agua en el área circundante del centro de cultivo.
- d. Los efectos potenciales de los centros de cultivo sobre las aguas costeras circundantes tales como bahías, estuarios, canales y fiordos.
- e. La dispersión y destino de los residuos sólidos y particulados que se originan de los cultivos. Esto es relevante para la selección y/o reubicación de sitios y para el diseño e interpretación de programas de monitoreo.

3) Los modelos son esenciales para la administración de la acuicultura, tanto para los empresarios que necesitan operar sus centros de cultivo en forma eficiente, como para los administradores que necesitan asegurar que los centros de cultivo pueden coexistir en forma segura, entre ellos y con el medio ambiente.

4) En el contexto de la modelación del cultivo de mitílicos, se hace necesario además modelar la Producción Primaria.

5) Los procesos turbulentos en la capa límite béntica tienen mucha importancia en los procesos de transporte e incorporación de sólidos al resto de la columna de agua.



6) Para poder desarrollar los modelos, sin importar lo sofisticado o comprehensivo que ellos sean, es necesario la validación de éstos. Tanto para el desarrollo como para la validación, es necesario disponer de bases de datos confiables de la variabilidad ambiental que el modelo requiera. La programación no es lo más importante.

7) Los modelos deben estar sustentados en la comprensión de los procesos y se tiene que saber exactamente lo que está sucediendo con el sistema, en la mayor medida de lo posible. Además, tienen que ser respaldados por las observaciones y monitoreos. Los modelos no sustituyen ni las observaciones ni el monitoreo.

8) Los niveles de incertidumbre de los modelos afectan la forma en que se manejan los centros de cultivo, tanto interna (cultivo) como externamente (regulación).

9) Los modelos pueden ser usados de diferentes maneras, para:

- Predecir, aunque con varios grados de confianza e incertidumbre
- Evaluar riesgos
- Estimar valores umbrales razonables
- Explorar diferentes opciones

10) La Capacidad de Carga, más que ser un simple número, debe definir las escalas espacio-temporales relevantes. En este sentido, es esencial caracterizar la variabilidad hidrodinámica en función de estas escalas.

11) La Capacidad de Carga es un concepto multi-escalar que requiere la implementación de una variedad de modelos numéricos. Estos pueden tener diversos grados de complejidad y presentar también diversas necesidades de datos.

12) En lo particular, se identificaron dos escalas de modelación necesarias para analizar el proceso de Capacidad de Carga:

**a)** Modelos a escala local, destinados a los análisis de campo cercano de los centros de cultivo, por ejemplo, centrados en los peces en cultivo, en el bentos y calidad de agua, y,

**b)** Modelos a escala regional, destinados al análisis de campo lejano de los centros de cultivo, por ejemplo, calidad de agua en una cuenca.

13) Los modelos no pueden considerar diferentes escalas de tiempo. Se requiere de modelos diferentes para cubrir todos los aspectos del impacto de la acuicultura. El incluir muchos procesos en un solo modelo, casi siempre lleva al fracaso.

14) En términos prácticos, un modelo debe ser lo suficientemente simple como para que sus parámetros sean factibles de estimar utilizando observaciones oceanográficas y químicas estándares, además de la información productiva disponible.

15) Como ejemplos de modelos a escala local, se presentaron trabajos que usan el DEPOMOD para modelar centros de cultivo, así como otros modelos para el cultivo de choritos. Como ejemplo de modelación regional, se describieron las iniciativas de modelación del Seno del Reloncaví (FVCOM) y del Fiordo Aysén (MOHID).

16) Los modelos a escala local sirven para definir los límites productivos de los centros de cultivo y sus potenciales efectos en las bahías y/o fiordos donde se encuentran ubicados (e.g. efectos sobre el fondo marino, contenido de oxígeno y producción primaria).

17) Los modelos a escala regional sirven para estimar las escalas espaciales en las que pueden afectar procesos tales como, contaminación por virus ISA y transporte de partículas desde los centros de cultivo.

18) Es necesario adoptar un enfoque proactivo y estratégico en la acuicultura, basado en el desarrollo de ambos tipos de modelos (locales y regionales).

19) Los modelos locales, debido a su rol en el desarrollo de la industria, deberían ser desarrollados y financiados por ésta. En tanto que debería ser rol del Estado estimular el desarrollo de modelos regionales y buscar los mecanismos de financiamiento para los estudios de terreno requeridos para contar con los datos necesarios para su validación.

20) La ciencia es útil para la administración sólo si las personas encargadas de la planificación y el manejo entienden los resultados científicos. A menudo, este tipo de estudios son ignorados porque nadie los entiende y por lo tanto no se pueden implementar.

21) Es necesario contar con interfaces de fácil uso por parte de no-expertos y que sirvan para el cálculo rápido de variables que permitan tomar decisiones respecto del desarrollo de proyectos acuícolas. Se enfatizó que la decisión acerca de los límites que deben ser usados en la implementación de tales sistemas de apoyo a las decisiones, son decisiones políticas que corresponden a los tomadores de decisiones.

22) Es posible encapsular modelos complejos en un Sistema de Apoyo a las Decisiones, de modo tal que puedan ser operados y entendidos por productores, administradores y otros inversionistas.

23) Se debe cautelar el buen uso de los modelos, es decir, que quien use el modelo, tenga una capacitación adecuada en las entradas e interpretación de las salidas del modelo. Esto involucra un compromiso con el desarrollo de capital humano.

24) El taller sirvió como un punto de encuentro entre la Academia, el Gobierno y la Industria, para discutir las diversas perspectivas desde las cuales se puede analizar la Capacidad de Carga del sistema de estuarios, fiordos y canales australes de Chile.

25) En general, los procesos dinámicos en los fiordos se consideran bastantes similares en el mundo, por lo que algunos estudios realizados en Chile a la fecha, permitirían validar ciertos modelos desarrollados para este

tipo de sistemas en el hemisferio norte. Sin embargo, los modelos biológicos son absolutamente diferentes y, eventualmente, tendrían que reescribirse en algún grado y reconfigurar varios de sus parámetros. Muchos modelos son óptimos para ciertos tipos de ambientes y no para otros: fiordos, canales, bahías.

26) El modelo ACExR-LESV es apto para predecir las condiciones físicas y el potencial de enriquecimiento de nutrientes y clorofila en los fiordos. ACExR-LESV es el más utilizado para la determinación de las capacidades de carga y de asimilación en los fiordos escoceses que están siendo usados para la acuicultura.

#### Ejemplos de modelos aplicados en Chile

27) El modelo matemático (SENCAP), es un modelo hidrodinámico-biológico, basado en el transporte advectivo de oxígeno y un balance entre los procesos que aportan y consumen este gas, en un volumen de agua donde se realizan actividades de engorda de salmones. Constituye una herramienta de manejo para evaluar la condición ambiental de un centro de cultivo, y proyectar la capacidad ambiental futura según sus rangos productivos.

28) MOHID permite la modelación hidrodinámica anidada, lo que facilita el desarrollo de modelos en zonas costeras de topografía compleja como los fiordos australes de Chile, y la implementación de aplicaciones tanto eulerianas (dispersión de sedimentos) como lagrangianas (simulación de la dispersión de desechos particulados provenientes de balsas jaulas de cultivo de salmones).

29) Para la modelación de la calidad de agua a escala de cuenca, la aplicación del modelo MOHID al estudio de dispersión y acumulación de partículas sobre un área de un fiordo, constituye una opción atractiva en términos de la transición que logra entre procesos a escala local (dentro de y entre cultivos), y aquellas variables ambientales que es necesario modelar a mayor escala, como la concentración de oxígeno, amonio y otros nutrientes orgánicos.

30) Los modelos de calidad del agua a escala de fiordos como el FjordEnv, son alternativas posibles para abordar la estimación de los tiempos de residencia, cambios en las condiciones ambientales generados por centros de cultivo y, en última instancia, estimar la capacidad de carga de los fiordos en el sur de Chile.

31) Las estrategias del tipo modelo MOM son muy informativas a la escala individual de un centro, pero su utilidad es limitada cuando se insertan en un contexto de circulación a la escala del fiordo.

32) El modelo de capacidad de carga productiva desarrollado para un área de la zona sur de Chile, permite disponer de una metodología para calcular la capacidad de carga del cultivo de mitilidos en la zona del mar interior de Chiloé.

33) El modelo de depositación bentónica, permite simular la extensión del área de dispersión de residuos y de carga, y puede ser usado para determinar la ubicación de los centros de cultivo, la proximidad de módulos de

jaulas y los niveles de producción.

34) Existen en el país, grupos de trabajo capaces de desarrollar, validar y calibrar modelos relacionados con los micro-procesos (resuspensión) y acoplarlos a los modelos de escala local y regional.

#### Objetivo y Utilidad de los Modelos de Capacidad de Carga y su relación con los EQO & EQS

35) Los Objetivos de Calidad Ambiental (EQO) describen los resultados esperados, y los Estándares de Calidad Ambiental (EQS) son estándares que deben ser cumplidas con el objeto de alcanzar los EQO. Los modelos se usan para evaluar la probabilidad de cumplimiento de los EQS por parte de una actividad productiva. Los objetivos de los modelos en acuicultura:

- Permiten el manejo de las autorizaciones de descarga sitio por sitio
  - Modelación del enriquecimiento orgánico (DEPOMOD). Su función es prevenir impactos ambientales no deseados producto de un excesivo enriquecimiento de carbono orgánico localizado
  - Modelación de la dispersión de contaminantes (modelos de advección – Dispersión). Su función es prevenir impactos ambientales no deseados, producto de la descarga de compuestos químicos tóxicos en los centros de cultivo.
- Desarrollar una estrategia para la expansión y desarrollo de la industria
  - Modelación del enriquecimiento de nutrientes de los cuerpos de agua.
  - Modelación del control de enfermedades y parásitos (flujo residual)

## RESÚMENES

# 1

William Silvert  
Instituto Nacional de  
Investigação Agrária e  
das Pescas, IPIMAR  
Lisboa, Portugal

## ¡Tantos Efectos! ¿Cómo los abordamos?

La acuicultura afecta al medio ambiente de distintas maneras (partículas como heces y alimento, nutrientes disueltos, consumo de oxígeno, productos farmacéuticos, estructuras físicas, descargas de residuos y enfermedades) y en diferentes escalas de tiempo y espacio. Por ejemplo, el agotamiento de oxígeno por lo general es muy local y aparece solamente en el área inmediata al centro de cultivo, las partículas viajan cientos de metros y las sustancias disueltas pueden dispersarse a través de todo un cuerpo de agua. Por lo tanto, poder predecir todos los efectos puede ser complicado y no se puede efectuar de manera efectiva usando sólo un modelo. Además, aparte de tratar de incorporar todo tipo de impactos en un sólo modelo, hace ya un tiempo que los modeladores han descubierto que el tratar de operar modelos que incorporen drásticamente distintas etapas en el tiempo y rangos espaciales, resulta simplemente imposible. Consecuentemente, cualquier estrategia de modelación tiene que involucrar una serie completa de modelos con el propósito de cubrir la variedad de efectos y escalas que están presentes. Desafortunadamente, algunos de estos modelos son tan atractivos que hay una tendencia a usar solamente uno y por lo tanto enfocarse sólo en una categoría de impacto ambiental. Para evitar esto, resulta necesario empezar con una visión general de todos los posibles efectos de preocupación mediante la colaboración entre científicos y partes interesadas, y asegurarse de que todos estos efectos sean suficientemente considerados, a pesar de que no todos ellos hayan sido aún investigados acuciosamente y pudieran no ser comprendidos a cabalidad. Entonces, ¿Qué modelamos? Nunca modelamos todo, solamente se consideran los factores más importantes ¿Cuáles son los más importantes? Las respuestas no siempre son obvias. Muchos modelos son optimizados para ciertos tipos de ambiente y su uso puede simplificar el proceso de modelación.

¿Qué se necesita para Modelar? Se necesita información y conocimiento. La programación computacional no es importante. Algunos modelos requieren de información que es difícil de obtener, o que no son confiables. Muchos resultados de modelos predictivos están basados en datos correctos y pueden ser confiables. Muchas predicciones proveen de una base firme para tomar acciones. Pero no todas las preguntas son adecuadamente respondidas por los modelos. No siempre podemos definir umbrales claros para efectos críticos, pero tenemos una buena idea de qué niveles son aceptables. Los modelos pueden ser usados de distintas maneras: con fines predictivos, aunque con varios grados de confiabilidad e incertidumbre, para evaluar el riesgo, estimar valores razonables de umbrales y para explorar distintas opciones. La forma en la cual usamos los modelos depende de si somos empresarios independientes, administradores u otro tipo de usuario. Los modelos son esenciales para la administración de la acuicultura, tanto para los empresarios que necesitan operar sus centros de cultivo en forma eficiente como para los administradores que necesitan asegurarse de que los centros de cultivo puedan coexistir en forma segura entre ellos y con el medio ambiente.

Los modelos están aún lejos de ser herramientas perfectas y no pueden otorgar respuestas confiables a todas las preguntas que puedan surgir. Debemos continuar trabajando en el desarrollo de modelos y facilitar su uso entre todos los inversionistas, incluyendo acuicultores, reguladores y todo otro usuario del ambiente marino. Para lograrlo, debemos asegurarnos que la modelación sea asequible a todos los interesados, de forma tal que resulte creíble y transparente.

## 2

William Silvert  
Instituto Nacional de  
Investigação Agrária  
e das Pescas, IPIMAR  
Lisboa, Portugal

## Entregando ciencia donde se la necesite

El modelamiento científico tiende a ser abstracto y técnico y, por lo tanto, resulta difícil para los científicos entenderlo a cabalidad y poder evaluarlo. Más aún, no son muchos los científicos expertos, de modo tal que, cuando se requiere un modelamiento predictivo para ayudar en la planificación de labores y licencias en acuicultura, no siempre es posible contar con un científico que realice las labores de modelamiento. En ocasiones resulta aún menos posible para el científico encontrar el tiempo para trasladarse al sitio y explicar e interpretar los resultados del modelo a los gerentes y accionistas. Una forma de abordar este problema es mediante el desarrollo de Sistemas Expertos que son programas computacionales diseñados para aplicar técnicas de modelamiento Standard sin la intervención de modeladores altamente calificados. Los Sistemas de Apoyo a las Decisiones (SAD) son de particular importancia para el manejo de la acuicultura, porque no sólo pueden llevar a cabo la modelación sino que también presentar los resultados de una forma tal que los no-científicos puedan interpretarlos y usarlos para la toma de decisiones. Esta charla describe en términos generales, el diseño y el uso de SAD, e incluye una presentación de varios prototipos diseñados para ilustrar las diversas formas en las cuales pueden ser usados.

No hay duda alguna de que la ciencia puede resultar útil en la planificación y administración, pero solamente resulta útil si las personas que están realizando la planificación y la administración conocen y entienden los resultados científicos. En ocasiones, los resultados de los estudios científicos son ignorados porque nadie los entiende ni puede usarlos. Entendemos cada vez más que los resultados de las investigaciones científicas deben ser difundidos entre los potenciales usuarios. Los informes técnicos y los artículos publicados en revistas científicas no resultan suficientes para efectuar esta difusión. La ciencia tiene que ser entregada a aquellos que la necesitan en su propio idioma, en una forma que resulte fácil de entender. Un Sistema Experto es un programa computacional que considera la experiencia técnica, pero que no requiere de un experto técnico para ser operado. El programa tiene una interface de usuario que solicita el ingreso de data usando un lenguaje común e informa los resultados en una forma que no es demasiado técnica y que puede ser fácilmente entendida y usada. Los tres prototipos SAD que acá se presentan son limitados en alcance, pero presentan la idea básica de cómo podría funcionar un SAD para la acuicultura. Resulta posible encapsular modelos complejos en un SAD de modo tal que puedan ser operados y entendidos por acuicultores, gerentes y otros inversionistas. Hacer esto puede ser difícil y costoso, involucrando programaciones más sofisticadas GIS y bases de datos. En aquellas áreas en donde existe mucha acuicultura esto podría definitivamente valer la pena.



# 3

## El Rol de los Modelos Computacionales en la Regulación y Manejo de la Industria Acuícola en Escocia

Philip Gillibrand  
National Institute for  
Water and Atmos-  
phere Research  
Christchurch  
New Zealand

La acuicultura en Escocia, en particular el cultivo del Salmón del Atlántico (*Salmo salar*), se ha expandido desde sus inicios experimentales en el Fiordo de Ailort a fines de la década de 1960, a una producción anual a fines de 1990 superior a las 100.000 toneladas, en alrededor de 350 sitios con un valor estimado para la economía nacional de £324m. Los sitios de producción están localizados predominantemente en fiordos y ensenadas de las costas e islas del oeste y norte. La calidad de las prístinas aguas de las costas al oeste y norte de Escocia es una consecuencia del origen Nor-Atlántico de las aguas, en combinación con la baja densidad poblacional de estas regiones. La creciente industria proporcionó valiosas oportunidades de empleo a las comunidades rurales locales, al tiempo que otras industrias agrícolas estaban declinando. Pero la misma calidad prístina de las aguas, que es muy beneficiosa para el cultivo del salmón, también dan origen a un precioso recurso ecosistémico y a múltiples usuarios marinos que demandan protección contra un desarrollo no sustentable. Por lo tanto, el objetivo de la regulación y manejo de la acuicultura en Escocia ha sido estimular el crecimiento sustentable de la industria a fin de proveer de trabajo a las comunidades locales, aunque también protegiendo la integridad de los ecosistemas y ambientes insustituibles para las generaciones futuras.

Entre 1979 y 1980, el desarrollo de la industria acuícola en Escocia fue regulado a través de normas de planificación locales con poca, si es que existió alguna, atención sobre los impactos ambientales potencialmente dañinos. A medida que se expandió la industria del cultivo de peces, algunos casos de estudio pusieron en evidencia el potencial de efectos negativos producto de una expansión descontrolada. Además, se hizo más difícil identificar lugares apropiados para la instalación de nuevos centros de cultivo y los productores comenzaron a solicitar concesiones de acuicultura para cultivar mayores biomasas en los sitios existentes. En la década de los años 90, se desarrollaron modelos computacionales simples, capaces de evaluar el potencial aumento de nutrientes en un fiordo o ensenada en particular debido a la actividad de cultivo de peces, para disponer de evaluaciones objetivas del riesgo de daño ambiental en dichas lugares en relación a otros fiordos existentes en el país. De esa forma, se podría evitar el desarrollo en fiordos con malas características de intercambio, donde las emisiones de nutrientes provenientes de los centros de cultivo pudieran tener probablemente efectos más perjudiciales. Este proceso culminó con la publicación de las Pautas de Instalación para la Autorización de Centros de Cultivo de Peces en Aguas de Escocia en 1999, la que clasificó todos los fiordos y ensenadas en tres grupos; la Categoría 1 fue considerada como la más sensitiva a la expansión y se recomendó una estrategia precautoria a un mayor desarrollo. Anualmente se publican actualizaciones de la norma, basadas en el resultado de modelos para la industria a nivel nacional. En paralelo con el desarrollo de normas de instalación, que juegan un rol estratégico en el crecimiento de la industria, se dictaron condiciones ambientales más estrictas para el otorgamiento de licencias de concesiones (administradas por la Agencia de Protección Ambiental

de Escocia, SEPA). Se les exige a los productores entregar Declaraciones de Impacto Ambiental, que incluyen la modelación para predecir el impacto ambiental del depósito de carbono orgánico particulado bajo las jaulas de cultivo (o centros de cultivo). También se han desarrollado modelos para predecir la dispersión y post-tratamiento de concentraciones in situ de quimio-terapéuticos, tales como Slice©, Excis© y Salmosan©, y son usados en el proceso de autorización para el tratamiento del piojo de mar o caligus. El objetivo de todos estos modelos es prevenir impactos ambientales localizados inaceptables provenientes de actividades de cultivo de peces. En años recientes, la transmisión de patógenos y parásitos entre los peces de cultivo y silvestres ha emergido como un área de creciente preocupación. El brote de la Anemia Infecciosa del Salmón (ISA) en 1998 amenazó la viabilidad de la industria, y las infecciones por caligus en los centros de cultivo de peces han sido también responsabilizadas, aunque no en forma concluyente, de la disminución del salmón nativo y las poblaciones de truchas marinas. Los modelos de dispersión de patógenos y parásitos han ayudado a establecer Acuerdos de Áreas de Manejo para la industria acuícola, que posteriormente han mejorado el control del número de caligus y limitado la dispersión de las enfermedades infecciosas. En esta presentación, describiré la historia, desarrollo y fundamentos del rol de los modelos computacionales en el manejo y regulación de la industria acuícola en Escocia, desde los primeros inicios de evaluación de objetivos al conjunto de estrategias actuales para el desarrollo sustentable de esta industria rural clave.

# 4

Philip Gillibrand  
National Institute for  
Water and Atmos-  
phere Research  
Christchurch  
New Zealand

## Revisión de Modelos Computacionales Usados en la Regulación y Manejo de la Industria Acuícola en Escocia

Desde inicios de 1990, los modelos computacionales han jugado un creciente rol de importancia en el manejo y regulación de la industria acuícola de Escocia. Desde los simples modelos de caja, diseñados para evaluar el riesgo potencial relativo para los ambientes de fiordos por la emisión de nutrientes desde los centros de cultivo de peces, a complejos modelos tridimensionales acoplados a modelos biofísicos que predicen la ruta de transporte y dispersión de las larvas planctónicas de caligus. Estos modelos han contribuido al crecimiento sustentable de la industria acuícola en Escocia, aunque también han permitido a los reguladores limitar los efectos dañinos tanto a nivel local como a escala regional. Los modelos pueden ser clasificados en tres grupos principales: 1) Aquellos orientados a predecir y prevenir impactos ambientales negativos a escala local de centro de cultivo; 2) los orientados a estimar los efectos regionales (escala de la cuenca de un fiordo) de los nutrientes (solubles) y que han sido usados para orientar estratégicamente la expansión de la industria lejos de las áreas más vulnerables; 3) modelos usados para entender y predecir el transporte y dispersión de patógenos y parásitos, tanto entre centros de cultivo como entre centros de cultivos y poblaciones de peces nativos silvestres, lo que ha contribuido a establecer Acuerdos de Áreas de Manejo. En esta presentación, describo (en variados detalles) los modelos claves usados en la regulación de la acuicultura escocesa desde 1990 al presente, y resalto algunos desarrollos recientes en la modelación de la capacidad asimilativa de ambientes con intercambio restringido.

### Modelos de Impacto Local

Los impactos adversos sobre el bentos bajo las jaulas fueron los primeros efectos ambientales reconocidos de los cultivos intensivos de peces en balsas-jaulas, y se desarrollaron rápidamente modelos para cuantificar las potenciales cargas de carbono orgánico sobre el fondo marino. Uno de dichos modelos desarrollados en Escocia, el cual ahora tiene una amplia base de usuarios a nivel internacional, es el DEPOMOD (y varias derivaciones relacionadas), el cual usa mediciones de corrientes locales para seguir la depositación de partículas de carbono provenientes de los sitios de cultivo y predecir las cargas orgánicas e impactos bentónicos bajo las jaulas de peces. El DEPOMOD es integral al proceso de otorgamiento de concesiones de cultivo en Escocia, donde el impacto espacial de los centros de cultivo está estrictamente controlado. Otros modelos para áreas locales serán descritos aquí en relación a las descargas de quimio-terapéuticos anti-parasitarios. Los modelos para predecir la dispersión y concentraciones post-tratamientos in-situ de quimio-terapéuticos aplicados como tratamientos de baño, tales como Aquagard©, Salmosan© y Excis©, fueron desarrollados para asegurar que los Estándares de Calidad Ambiental (EQS) establecidos por la Agencia de Protección Ambiental Escocesa (SEPA) para proteger organismos marinos no objetivo, no fueran vulnerados. Estos son modelos típicamente de advección-difusión, aunque los detalles de los modelos difieren debido a que las escalas de tiempo sobre las cuales son aplicados los diversos EQS también difieren, y por lo tanto los mecanismos físicos que gobiernan la dispersión también variarán. El DEPOMOD

fue extendido para incorporar predicciones de concentraciones de sedimentos post-tratamiento de medicamento Slice© incorporado en el alimento. Durante el proceso de aplicación, se solicita a los productores demostrar que su centro de cultivo propuesto podría ser tratado para la infección de caligus (o piojo de mar) sin producir daños colaterales en el ecosistema local.

#### Modelos de Escala Regional

Los centros de cultivo de peces emiten considerables cantidades de nutrientes solubles, principalmente nitrógeno y fósforo. En regiones remotas, lejos de áreas con alta densidad poblacional y agricultura intensiva, los nutrientes derivados de la acuicultura aportan un componente sustancial del presupuesto de nutrientes en los sistemas de fiordos semi-cerrados, y se sabe poco del funcionamiento de los efectos de estos nutrientes sobre los ecosistemas locales y regionales. Un modelo de caja simple (el Modelo ECE) calculó el balance entre la fuente total de nitrógeno proveniente de un centro de cultivo de peces dentro de un fiordo en particular y la tasa de recambio del fiordo, para entregar estimaciones del incremento potencial de nutrientes sobre los niveles históricos o de base. El modelo, que consideró al nitrógeno como un trazador conservativo, fue usado para clasificar todos fiordos usados para el cultivo en base al enriquecimiento potencial de nitrógeno con el fin de identificar aquellos con más riesgo de sobre-explotación en relación a la tasa de recambio, y orientar el desarrollo hacia áreas menos sensitivas. El modelo ECE aún es usado en el manejo de la industria escocesa, pero ya no es considerado adecuado para este propósito. Un nuevo modelo acoplado de intercambio físico y efecto ecológico (el modelo ACExR-LESV) ha sido desarrollado recientemente, y actualmente está siendo puesto a prueba dentro del sistema consultivo de Escocia.

#### Dispersión de Patógenos y Parásitos

La transmisión de patógenos y parásitos entre centros de cultivo de salmones y entre peces cultivados y nativos silvestres, plantean una amenaza seria a la industria de la acuicultura. La dispersión dentro del sistema de fiordos es un proceso temporal y espacialmente variable; la estrategia de modelación simple no es viable, puesto que el campo de flujos necesita ser resuelto en el espacio y el tiempo. Describiré dos estudios que consideran el problema de la dispersión de parásitos y patógenos: 1) la estrategia considerada para abordar el brote de ISA (Anemia Infecciosa del Salmón) en 1998; y 2) un modelo biofísico acoplado desarrollado para investigar la dispersión de las larvas planctónicas de caligus a partir de estudios de algunos sitios seleccionados. En el último, un modelo hidrodinámico sustenta un modelo lagrangiano del desarrollo de caligus, comportamiento y mortalidad para predecir la dispersión y riesgo de infección de una fuente de cultivo de peces conocido. Ambas estrategias de modelación han contribuido al establecimiento de Acuerdos de Área de Manejo en Escocia, lo cual ha ayudado a reducir la transmisión de enfermedades y limitar las infecciones por caligus.

Los modelos descritos aquí consideran las principales inquietudes ambientales que han surgido a partir del rápido crecimiento de la industria del cultivo del salmón en Escocia, principalmente el enriquecimiento orgánico, emisión de nutrientes, uso de compuestos químicos y transmisión de parásitos y patógenos. Los modelos han sido diseñados y usados para administrar una industria que se ha extendido a través de aproximadamente 350 concesiones de cultivo en aproximadamente 100 fiordos y ensenadas a lo largo de la costa de Escocia. La industria ha crecido dentro de una importante economía rural, y lo ha hecho de una forma relativamente sustentable, con pocos casos de impacto ambiental inaceptables. Los modelos descritos en esta presentación han contribuido a dicho crecimiento sustentable.

# 5

Karin Boxaspen  
Head of Aquaculture  
Programme  
Institute of Marine  
Research  
Norway

## Acuicultura Sustentable y Capacidad de Carga en Aguas Noruegas

La acuicultura es una industria vital en Noruega. El mayor potencial de crecimiento está en el cultivo del salmón, el bacalao y los crustáceos. Durante los últimos 40 años, la acuicultura en Noruega se ha desarrollado a gran escala, con una producción en el 2007 de más de 800.000 ton equivalente a aproximadamente 17.5 billones de Coronas Noruegas. El crecimiento de la acuicultura no puede estar determinado solamente por la demanda del mercado, sino que también se debe desarrollar dentro de límites que puedan ser tolerados por el medio ambiente. Una acuicultura sustentable es aquella que es manejada en equilibrio con el medio ambiente. La estrategia para una acuicultura sustentable está basada en cinco áreas principales en las que la industria impacta al medio ambiente: escapes e interacción genética; contaminación y descargas; enfermedades, incluyendo parásitos; zonificación, y recursos alimentarios.

#### Investigación y asesoría en acuicultura

Durante el proceso de formulación de la estrategia, el Ministerio de Pesquería y Asuntos Costeros ha recibido información de una amplia variedad de fuentes. El Directorio de Pesquería, la Autoridad de Sanidad Alimentaria Noruega, el Instituto de Investigación Marina y el Instituto Nacional de Veterinaria, han ayudado considerablemente en la identificación de los problemas.

#### Escapes e interacción genética

Los stocks mundiales del salmón del Atlántico en estado salvaje se han visto significativamente reducidos durante los últimos 30 años. El salmón ha desaparecido de aproximadamente 45 cauces de agua en Noruega, y aproximadamente 100 de las 400 poblaciones noruegas restantes, son vulnerables. Existe consenso entre los investigadores respecto a que el cruzamiento constante con salmones en cultivo escapados y migrantes, resulta perjudicial para el salmón silvestre. El bacalao cultivado ha demostrado ser más experto para escapar que el salmón y la trucha arco iris. Escapan relativamente más bacalao que otras especies en cultivo. Esto se debe, entre otras cosas, a que el bacalao tiene patrones de comportamiento distinto en las jaulas, buscando los agujeros e incluso se les ha observado masticando las redes para encontrar vías de escape. Esto es respaldado por significativas e inexplicables pérdidas durante su producción. Por otro lado, el bacalao en cultivo desova en las jaulas y representa un desafío a la calidad genética de las poblaciones silvestres. Se han implementado una serie de medidas administrativas para reducir estas pérdidas. Se están desarrollando métodos para marcar a los peces y permitir rastrear su origen. Se está usando identificación por ADN para determinar el origen de los peces escapados.

### Contaminación y descargas

En general, las descargas de nutrientes y de materia orgánica desde los centros de cultivo son un problema medio ambiental menor en Noruega. La larga línea costera y el uso extensivo de sitios de cultivo con altos niveles de circulación y calidad de agua, son factores que contribuyen a ello. En muchas regiones la actividad se desarrolla en fiordos relativamente profundos y bahías con buena circulación de agua, en donde la capacidad de carga y las propiedades de auto-purificación son relativamente buenas. Sin embargo, la descarga de estos residuos, pueden tener efectos locales negativos, dependiente de la ubicación. En algunas zonas de acuicultura, los efectos regionales no pueden ser excluidos. La descomposición de la materia orgánica (alimento no consumido y heces), pueden resultar en la reducción del oxígeno y en un cambio en la diversidad de las especies. Se han desarrollado métodos para monitorear los efectos en el fondo marino y en la fauna bentónica, bajo y cerca de los centros de cultivo. Estos métodos (MOM: centros de cultivo – monitoreo – modelación), son definidos por la Standard, NS9410, y obligatorio por resolución. Los métodos describen cómo se deben monitorear los efectos sobre el bentos marino, y que valores límites (indicadores medio ambientales) deben ser aplicados para evaluar si estos efectos resultan aceptables.

### Enfermedades

Las enfermedades, incluyendo los parásitos, continúan siendo un factor importante de pérdidas para la acuicultura noruega. Sin embargo, la situación sanitaria ha mejorado mucho durante los últimos 20 años, gracias a las vacunas y a otras medidas implementadas en contra de las enfermedades más comunes desde finales de los años 80. Con respecto a enfermedades bacterianas, el uso de antibióticos puede ser un indicador del estado sanitario de la acuicultura. Actualmente, el consumo total de antibióticos se ha reducido significativamente desde su nivel más alto a fines de los años 80 y principios de los 90. En 2008, la acuicultura usó un total de 905 kilos de antibióticos. Requerimientos más estrictos en los procedimientos operacionales, nuevas y mejores drogas, incluyendo vacunas, han hecho una significativa contribución a la reducción de problemas derivados de enfermedades bacterianas. Las mayores pérdidas por enfermedades en la acuicultura noruega se debieron a enfermedades virales, tales como enfermedad del páncreas (PD), inflamación muscular del corazón y esqueleto (HSMI), anemia infecciosa del salmón (ISA), y necrosis pancreática infecciosa. La enfermedad que ha tenido el mayor impacto en los peces silvestres es el piojo del salmón. Este parásito es un gran problema en los fiordos, tanto para los salmónidos silvestres como para los cultivados. Se han usado modelos numéricos para elaborar series de tiempo de la distribución del piojo del salmón en el fiordo noruego Sognefjorden. Se han calculado las corrientes y la hidrografía a partir de un modelo oceánico tridimensional de alta resolución. La distribución del piojo del salmón se ha calculado con un modelo de advección particular tri-dimensional, que incluye el crecimiento dependiente de la temperatura. Los resultados del modelo muestran que, para los fiordos noruegos, la variabilidad de la distribución del piojo del salmón es enorme, con una dispersión por las corrientes que varía entre 0 a 100 km en sólo unos pocos días. Los experimentos con el modelo de distribución del piojo del salmón, han demostrado que esta herramienta puede proveer de información útil.

### Manejo de Áreas (zonas)

La acuicultura tiene una estructura de ubicación y de zonificación que reducen el impacto en el medio ambiente y el riesgo de infección. El manejo efectivo de las zonas facilita la producción máxima dentro de un área geográfica limitada y sin impacto indeseable en el medio ambiente. Para asegurar esto, dependemos de una buena estructura de zonas y de una adecuada ubicación.

## 6

Karin Boxaspen  
Head of Aquaculture  
Programme  
Institute of Marine  
Research  
Norway

## Utilización de Sistemas de Regulación MOM y MOLO - Vigilancia Ambiental, Modelación y Uso de Área en la Zona Costera

La capacidad de carga de un sitio o área usada para la acuicultura se define como la máxima biomasa de peces o moluscos que pueden ser cultivados sin generar un impacto ambiental que exceda límites de tolerancia acordados. Si se desea que la industria acuícola sea sustentable, estos límites deben ser medibles y no se pueden exceder. La acuicultura afecta al ambiente de varias maneras: a través de la descarga de nutrientes, residuos de alimento y fecas, propagación de infecciones y parásitos, y a través de la influencia genética. Cada uno de estos impactos tiene sus propios límites de tolerancia y capacidad de carga. Esto significa que los impactos individuales que tengan la menor capacidad de carga, determinan la capacidad de carga del sitio o área: una capacidad de carga alta basada en la descarga de excesos de alimentos y fecas es poco útil si los centros acuícola liberan gran cantidad de larvas de caligus que ponen en peligro las poblaciones de salmónes silvestres. En general, los impactos irreversibles son considerados los más serios, pero otros factores también son tomados en cuenta, tales como el tamaño del área afectada o los impactos sobre la biodiversidad.

Por lo tanto, se ha establecido una norma, "Monitoreo ambiental para el cultivo de peces marinos" (NS9410), que describe cómo se debería monitorear el bentos bajo y alrededor de las jaulas, con el objeto de asegurar que no se exceda su capacidad de carga. La norma consiste en dos estudios, uno para el centro de cultivo mismo y otro para el área circundante. El estudio tipo B se usa en el área del centro de cultivo mismo, donde se acepta algún grado de impacto. Consiste de tres grupos de parámetros y está diseñado para evaluar la condición ambiental del bentos, que puede fluctuar desde ser un ambiente altamente contaminado a estar relativamente no afectado. El estudio tipo C es un análisis de la comunidad bentónica y se ha diseñado para áreas mayores alrededor de los centros de cultivo.

Si queremos asegurarnos en forma efectiva que los impactos ambientales de la industria acuícola están ajustados a la capacidad de carga local, debemos ser capaces de calcular la capacidad de carga y monitorear que no sea excedida. Sobre este principio se sustenta el sistema MOM (acrónimo en Noruego para "Modelación – Centro de Engorda – Monitoreo), pero hasta aquí los modelos y programas de monitoreo estandarizados sólo se han desarrollado para impactos sobre el bentos. El objetivo, entonces, es desarrollar sistemas de manejo equivalentes para los otros impactos ambientales importantes de la actividad acuícola y usar este conocimiento para crear sistemas de manejo comprensivos. Esto se ha logrado con la integración del área al sistema MOM dentro de un esquema de manejo cohesivo – MOLO (MOM – Lokalisering) (monitoreo ambiental – localización). La localización es una característica central del nuevo sistema para zonación y adaptación ambiental, en la medida que queramos saber dónde deberíamos instalar un centro de cultivo, cuán grande puede ser y cómo debería operar.



### **MOLO: Centros de cultivo, Monitoreo y Localización**

Para que la industria acuícola sea sustentable, los impactos ambientales generados por los cultivos no deben exceder la capacidad de carga de las áreas donde se localizan. Los peces y moluscos en cultivo deben mantenerse en buenas condiciones y la acuicultura debe estar coordinada con otras actividades que se ejecutan a lo largo de la costa. Por lo tanto, encontrar sitios adecuados es la clave para asegurar que la industria sea sustentable, con lo cual queremos decir que no sólo basta con decidir dónde ubicar un centro de cultivo, sino qué también saber que tamaño debería tener y cómo debería ser diseñado y operar. El creciente tamaño de los centros de cultivo ha hecho progresivamente importante encontrar buenas localidades y más aún ahora que la competencia por el espacio es tan aguda que la industria acuícola debe hacer un uso óptimo de las áreas disponibles. Por lo tanto, instalar un cultivo marino es un procedimiento complejo que involucra analizar una variedad de condiciones locales, como también tener en cuenta consideraciones ambientales, las necesidades de los animales en cultivo y, por último, pero no menos importante, los deseos de las poblaciones costeras y otros usuarios del borde costero. Estos análisis a menudo son tan complicados que requieren de nuevas herramientas y procedimientos. Por lo tanto, el Ministerio de Pesquerías y Asuntos Costeros ha solicitado al Instituto de Investigaciones Marinas priorizar el desarrollo de un sistema comprehensivo de planificación ambiental y de áreas para la industria acuícola. El sistema se denomina MOLO (Mom – Location), que se forma de la combinación del acrónimo MOM, que es un sistema para el monitoreo del impacto ambiental causado por los cultivos marinos, y “localización”. MOLO consiste de tres módulos:

**Módulo de Exploración:** Este módulo es usado para encontrar sectores adecuados y calcular cuánto se podrá producir. Combina información de corrientes, profundidades, distancias a otros cultivos y rutas de navegación, mostradas en un mapa electrónico (GIS), con modelos para calcular la capacidad de carga expresada como cantidad de peces o moluscos que pueden ser cultivados en una localidad dada. El módulo permite, además, mover el centro de cultivo alrededor del mapa, y va indicando constantemente cuán adecuada es un área en particular. Se ha desarrollado un prototipo para localizar cultivos de mitílicos ([www.akvavis.no](http://www.akvavis.no)) y salmones.

**Módulo de la Autoridad:** Como su nombre lo sugiere, está principalmente orientado a las autoridades. Sin embargo, también es útil para la industria, debido a que despliega mapas con información relevante acerca del área. Esto significa que muestra los resultados de monitoreo ambiental, sitios de descarga de aguas servidas, áreas de esparcimiento, datos de planificación, rutas de navegación, etc. El módulo da acceso a los postulantes a concesiones, planificadores y autoridades, a los mismos datos en los que se basan las decisiones.

**Módulo de Solicitud:** Es la parte final del sistema. Es un generador de solicitudes que las pueden crear basándose en diseños generados por la autoridad, incluyendo mapas de alta resolución. Este módulo simplifica el procedimiento de solicitud, asegura que éstas sean consistentes y presentadas apropiadamente, y representa una forma fácil de emitir electrónicamente una solicitud a las autoridades encargadas de tramitar una concesión.

# 7

Kenneth D. Black  
Scottish Association  
for Marine Science  
Dunstaffnage Marine  
Laboratory  
Oban, Argyll PA37 1AQ,  
Scotland, UK

## Modelación del Impacto Ambiental de la Acuicultura

Sustentabilidad es donde los efectos ambientales concuerdan con los aspectos socioeconómicos y de mercado. Hay varias definiciones de sustentabilidad pero, en esencia, éstas se condensan en torno a conceptos relacionados con el manejo. Es perfectamente aceptable explotar el ambiente, asegurando que éste se realice en forma tal que: a) No interfiera significativamente con el uso comercial o recreativo del ambiente por otros usuarios; b) No reduzca las opciones de futuros usuarios a beneficiarse de los recursos ambientales; y, c) No altere ni disminuya significativamente la calidad ambiental y la biodiversidad per se. Hay tres categorías de sustentabilidad y se pueden resumir con las siguientes preguntas:

**Económica:** ¿Genera suficiente rentabilidad como para justificar el capital que se requiere invertir? ¿Quién obtiene el beneficio: la economía local o inversionistas distantes?

**Ambiental:** ¿La actividad tiene efectos significativos sobre la capacidad del ecosistema para proveer de bienes y servicios ahora y en el futuro? ¿Son degradados los valores estéticos?

**Social:** ¿Se beneficia la sociedad civil local? ¿Promueve o degrada la cultura local? ¿Promueve la cohesión social?

Algunas veces los beneficios económicos a corto plazo son usados para justificar actividades, a pesar de dudosos análisis económicos que ignoran la sustentabilidad ambiental y social. En dichos casos, inevitablemente ocurrirán crisis después de rápidos crecimientos, a menos que la capacidad institucional (para regular la industria) crezca al mismo tiempo y ritmo que la actividad.

**Capacidad de Carga.** La capacidad de carga de una especie biológica en un ambiente, es el tamaño poblacional de las especies que el ambiente puede sustentar indefinidamente, dado el alimento, hábitat, agua (oxígeno) y otras necesidades disponibles en el ambiente. La capacidad asimilativa es la habilidad natural de los ecosistemas para usar y descomponer contaminantes potenciales sin efectos “adversos” para el ambiente. La Capacidad ambiental es la habilidad del ambiente para sostener una actividad en particular o tasa de actividad, sin un impacto inaceptable. Estos incluyen valores estéticos y sociales.

**Capacidad Asimilativa.** Es la capacidad de un sitio, cuerpo de agua o región para permanecer dentro de indicadores establecidos para asegurar la salud del ecosistema. Los estándares de calidad pueden ser diferentes dependiendo de la escala y deberían llegar a ser más rigurosos con el aumento de la escala. Las escalas en las que puede impactar la acuicultura dependen de una combinación entre la naturaleza de la presión, características de dispersión del agua en y cerca del sitio de cultivo, y del tiempo de respuesta para el impacto. La CSTT propuso considerar 3 escalas, referidas a lo que el



equipo llamó zonas A, B, y C. La característica clave para definir las, es el tiempo de residencia de partículas con flotabilidad neutra dentro de la zona. La Zona A, es la escala a nivel de centro de cultivo, que incluye la parte del fondo marino que recibe los residuos orgánicos que caen desde del cultivo, y la parte de la columna de agua en la que permanecen los residuos y contaminantes por algunas horas. La Zona B es la escala correspondiente al cuerpo de agua, y la Zona C es la escala regional.

¿Capacidad asimilativa de qué? Por lo general, los residuos sólidos están relacionados con la Zona A, y algunas veces con la Zona B; los nutrientes disueltos con las Zonas A y B, los medicamentos y compuestos químicos con las Zonas A y B; los escapes con las Zonas B y C; y los parásitos y enfermedades, Zonas A, B y C.

Todos estos también están relacionados con la economía y, en última instancia, con aspectos de sustentabilidad social. Cada uno puede limitar la escala de un cultivo a un área en particular, dependiendo de la condición del ecosistema que puede ser afectado tanto por factores naturales como humanos. De este modo, la evaluación de la capacidad asimilativa debe tener una dimensión holística. Tiene poco valor estar dentro de la capacidad asimilativa en algunos de estos aspectos, pero fuera de ella en otros. Puede ser útil una estrategia de factor limitante, v.g., una evaluación y focalización sobre el factor que presenta el mayor riesgo en un sitio en particular. La EIA debería enfatizar aquellos aspectos que son más probablemente limitantes.

**Escalas Temporales.** Los nutrientes y residuos sólidos pueden representar impactos efímeros y reversibles permitiendo que el ecosistema no cambie su estado a gran escala y que pudiera reducir su capacidad de retornar a algún estado de equilibrio “saludable” en un tiempo aceptable. Por ejemplo, un agotamiento agudo del oxígeno dentro de una cuenca podría originar una mortalidad masiva de especies y dar como resultado una recolonización y retorno a la condición de ecosistema “normal”, muy lentos. Los compuestos químicos de corta vida media que no se bio-acumulan, pueden comportarse en forma similar pero persistente, bio-acumulando compuestos químicos que podrían presentar daños a muy largo plazo para el ecosistema y para su habilidad de proveer bienes y servicios. Los escapes podrían perturbar en forma permanente las poblaciones naturales mediante las interacciones genéticas o ecológicas. De la misma forma, las enfermedades y parásitos podrían, en principio, originar la extinción de poblaciones silvestres regionales.

**Residuos sólidos.** Efectos bentónicos a escala local, bien definidos. Se entienden menos y son más difíciles de predecir los efectos acumulativos que se originan en numerosos centros de cultivo estrechamente espaciados. Se requiere de una estrategia precautoria, tal que las desviaciones substanciales de los Estándares de Calidad del Sedimento o Bentos sean permitidas sólo en un porcentaje muy pequeño en un tipo particular de sustrato, y que ninguno de los dos centros de cultivo debería tener efectos bentónicos que interactúen. Hay que tener especial cuidado en asegurarse que una amplia hipoxia en una cuenca no sea la consecuencia de múltiples usos. Existen modelos para una regulación efectiva (v.g. AutoDEPOMOD) que pueden ayudar a predecir la probable escala y grado de impacto, asegurando de este modo que, al menos, no se permitan infracciones desastrosas de la capacidad asimilativa. Ellos pueden ser usados también para determinar monitoreo intensivos apropiados. Recientemente hemos incluido y probado acoplar el DEPOMOD a modelos hidrodinámicos 3-D para considerar efectos a gran escala en sitios dinámicos.

**Compuestos químicos.** En Europa está aumentando la resistencia a los medicamentos contra el piojo marino. En Escocia, esto ocurre a pesar de una metodología estratégica para el manejo del parásito, basada en tratamientos coordinados entre empresas con peces de una misma clase de edad en el cuerpo de agua. Los antiparasitarios son un factor limitante para algunos salmoneros en Escocia, por ejemplo, el tamaño del cultivo es determinado por la cantidad de medicamento autorizado por los reguladores, sobre la base de estudios y modelación de EQS. Todos los sitios deben correr modelos bajo condiciones estándares para justificar sus volúmenes de medicamentos. Los reguladores deben tener la capacidad para fiscalizar e implementar regulaciones, particularmente en ambientes donde los medicamentos no estén siendo exitosos y exista mayor probabilidad de transgresión. Tanto en Escocia como en Noruega, el número de piojos de mar por pez están sujetos a inspección y acción, si los objetivos no son alcanzados.

**Monitoreo.** Es importante modelar los impactos locales para establecer la escala inicial de un proyecto productivo. El monitoreo es clave para validar las predicciones del modelo y para facilitar los ajustes regulatorios a escala de centro de cultivo. La modelación nunca puede sustituir el monitoreo de lo que realmente está ocurriendo. Para los impactos a escala de sitio (Zona A), los cultivadores deben costear el monitoreo. El monitoreo llevado a cabo por el cultivador debe ser efectuado por un código de práctica que inspire confianza pública. Los reguladores deben tener la capacidad de conducir una cantidad significativa de auditorías de cumplimiento. Para los impactos en las Zonas B y C, los reguladores deben tomar la responsabilidad del monitoreo con el fin de proteger tanto el ecosistema, como la industria y a otros usuarios, de un desempeño ambiental deficiente. Los reguladores deben tener la autoridad para reducir, cerrar o relocalizar centros de cultivo donde el desempeño ambiental es pobre.

**Desafíos claves.** Se debe incentivar, entre los reguladores y planificadores a nivel de Gobierno Nacional y Regional, la capacidad institucional para manejar la actividad acuícola de manera sustentable. Los planificadores y reguladores deben fomentar el desarrollo de la capacidad para implementar mejores prácticas regulatorias emergentes y poner en práctica éstas para el medio ambiente en Chile. De igual forma, la industria debe fomentar el desarrollo de la capacidad de implementar sistemas de manejo ambiental transparentes y, donde sea necesario, debería tener incentivos apropiados para hacerlo. Se debe dar una alta prioridad a los estudios científicos relacionados con las interacciones de la acuicultura y el ambiente, con el propósito de asesorar a los gobiernos en prácticas de manejo adecuadas. Los aspectos relacionados con la “capacidad asimilativa” están siendo investigados muy activamente en muchos países. La regulación e implementación de Estrategias Ecosistémicas – de la cual la capacidad asimilativa es un precepto central – no está particularmente bien desarrollada en ninguna parte.

## 8

## Desarrollo de un Modelo para Predecir la Capacidad Ambiental de un Centro Acuícola y su efecto en la Producción

Marco Salamanca<sup>1</sup>  
 Patricio Campos<sup>2</sup>  
 Alfredo Troncoso<sup>1</sup>  
 Roberto Riquelme<sup>3</sup>

1: Departamento de Oceanografía,  
 Facultad de Ciencias Naturales y  
 Oceanográficas,  
 Universidad de Concepción.  
 2: Instituto de Ciencia y Tecnología,  
 Universidad Arturo Prat.  
 3: Departamento de Ingeniería  
 Matemática, Facultad de Ciencias  
 Físicas y Matemáticas,  
 Universidad de Concepción.

El Proyecto Fondef D0411333 “Desarrollo de un Modelo para Predecir la Capacidad Ambiental de un Centro Acuícola y su Efecto en la Producción”, abordó la temática relacionada con la disponibilidad de oxígeno en un sistema sometido al uso intensivo de un volumen de agua discreto. En este ambiente de alta complejidad los centros de cultivo pueden considerarse ecosistemas forzados, donde los flujos de intercambio y las tasas de transferencia están aumentados varios órdenes de magnitud respecto a los naturales no intervenidos. Por lo tanto, evaluar, caracterizar y modelar éstos, requiere entender el funcionamiento del ecosistema donde se inserta esta actividad, conocer la fisiología del organismo frente a la variabilidad natural y artificial de la disponibilidad de oxígeno, producto del proceso de crecimiento en un ambiente espacial y volumétricamente limitado, para después modelarla con el fin de simular la respuesta de éste al impacto del recurso en cultivo. Esto permite ordenar la actividad acuícola, optimizando el ciclo productivo y así definir planes de gestión que permitan mejorar el estado sanitario y la productividad, manteniendo una calidad ambiental que permita que el ecosistema natural adyacente opere normalmente. El presente proyecto generó información científica básica cuantitativa, en términos de tasas de producción y consumo de oxígeno en un centro dedicado al cultivo de salmones. Esto permitió estimar la disponibilidad real de oxígeno para sustentar una actividad de cultivo que depende de la producción natural de este gas. Se generó un modelo matemático basado en el transporte advectivo de oxígeno y un balance entre los procesos que aportan y consumen oxígeno en un volumen de agua donde se realizan actividades de engorda de salmones. Este modelo fue validado contra las observaciones de terreno que se realizaron a lo largo de la etapa de mediciones de esta variable que abarcó la caracterización de la variabilidad estacional de este gas. El grado de exactitud varió entre un 83 y un 78%, con lo cual se simuló algunos escenarios, como por ejemplo con la biomasa de salmones actuales en cultivo, con un 20% más y un 20% menos. Los resultados muestran que el oxígeno disminuye de 10 mg/L afuera de una balsa jaula a 3,7 mg/l (63%) en el interior. Si se aumenta la biomasa en cultivo un 20% el contenido de oxígeno disminuye a 2,5 mg/L (75%), valor que es crítico para el crecimiento de los peces, y si la biomasa disminuye un 20% el oxígeno disminuye a 5,5 mg/L (45%), manteniendo oxigenada la columna de agua teniendo un impacto positivo en el cuerpo de agua. Con la información anterior, entonces se puede diseñar un programa de manejo de la biomasa máxima por jaula para mantener óptimo el crecimiento del pez, manejando el número de balsas por centro que permitan hacer los trasposos necesarios de peces para mantener la condición óptima operativa del centro. El producto final fue un software que permite el cálculo de la biomasa óptima por balsa y que puede ser operado por el jefe de centro o por los niveles gerenciales que cada empresa decida.

## 9

## Monitoreo Oceanográfico y Estudios Orientados a Procesos como Plataforma para Evaluar la Capacidad de Carga de los Fiordos Chilenos: Un caso de estudio en el Estuario Reloncaví

Fabián Tapia<sup>1</sup>  
 Giovanni Daneri<sup>1,2</sup>  
 Oscar Pizarro<sup>1</sup>  
 Humberto González<sup>1,3</sup>  
 Silvio Pantoja<sup>1</sup>  
 José Luis Iriarte<sup>1,3</sup>  
 Paulina Montero<sup>1,2</sup>

1: Programa COPAS Sur-Austral,  
 Universidad de Concepción.  
 2: Centro de Investigación en Eco-  
 sistemas de la Patagonia (CIEP).  
 3: Universidad Austral de Chile.

La reciente crisis sanitaria de la industria salmonera ha incrementado la conciencia pública respecto de la extensa actividad de la acuicultura y su potencial impacto en los ecosistemas de la Patagonia. Para evaluar y relativizar cuantitativamente estos impactos con las actividades de cultivo, se ha añadido el concepto de “capacidad de carga”. A menudo se ha definido como el nivel de producción de biomasa más allá del cual las condiciones de la columna de agua y del sedimento caen por debajo de estándares de calidad medio ambientales pre-definidos. Se informan los resultados de un estudio reciente (2008-2009, FIP 2007-21) dirigido a estimar la capacidad de carga de un fiordo en el sur de Chile (Estuario Reloncaví, 41.5°S), el cual es extensivamente usado por la industria de cultivo de salmónidos y mitilicultura. Nuestros análisis combinaron registros continuos in situ de corrientes y variabilidad en la temperatura desde instrumentos anclados a lo largo del fiordo con data de encuestas oceanográficas estacionales conducidas para caracterizar la estructura hidrográfica, así como los rangos de procesos biológicos claves. Esta data e información productiva recopilada de la industria y de la autoridad gubernamental, fueron usadas para parametrizar el modelo MOM (Stigebrandt et al. 2004) y, dada una muestra de las condiciones de la columna de agua y del sedimento considerada aceptable, para estimar la producción máxima por centro de cultivo para los dos principales especies de salmónidos cultivados a lo largo del fiordo: El Salmón Atlántico y la trucha. Se efectuaron análisis separados para cada una de las cuatro sub-cuencas definidas desde encuestas batimétricas conducidas a lo largo del fiordo. El ciclo anual de los estimados de estas capacidades de carga fueron luego comparadas con la producción pesquera reportada por los centros durante el 2007-2008. Para ambas especies, los estimados más bajos de capacidad de carga correspondieron con el criterio basado en las concentraciones de oxígeno de la columna de agua. Basado en este criterio, los niveles de producción informados por los centros de cultivo durante 2007-2008 estuvieron cerca de la capacidad de carga durante el invierno, y hasta 3 veces mayores que la capacidad de carga durante el verano. Nuestros análisis también sugieren que una re-orientación de las jaulas de cultivo en función de las corrientes prevalecientes podría incrementar sustancialmente la capacidad de carga del centro durante los meses de verano, especialmente cerca de la desembocadura del fiordo. Nuestros estudios resaltan la sensibilidad de las estimaciones de capacidad de carga hacia la variabilidad espacial y temporal en el ambiente físico, y la necesidad de incorporar escalas (tanto espaciales como temporales), de forma más explícita en una definición formal de capacidad de carga para ser usada en futuros esfuerzos para monitorear y administrar la acuicultura en el sur de Chile. El definir capacidad de carga y un set de parámetros/límites medio ambientales claves es un desafío en sí mismo. El emprender este tipo de estudios comprensivos orientados a procesos de los ecosistemas de los fiordos podría proveer la información que se requiere para lograr esta tarea.

# 10

## Modelación Integrada de los Fiordos Australes: El Sistema de Modelación MOHID

Víctor H. Marín Ph. D.,  
Dr. (c) Antonio Tironi  
Dra. Luisa E. Delgado

Laboratorio de Modelación Ecológica  
Departamento de Ciencias Ecológicas  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Chile

Existen varias definiciones para el término “capacidad de carga”; desde aquellas generales (e.g. el tamaño poblacional de una especie que puede ser sostenido por un ecosistema, dada una cierta disponibilidad de recursos) hasta aquellas directamente asociadas a la acuicultura (e.g. el nivel de producción sustentable que puede ser alcanzado en un cuerpo de agua sin perturbar mucho la integridad medioambiental). La mayoría de los estudios de capacidad de carga, aplicados a ecosistemas marinos costeros, se basan en el desarrollo de modelos numéricos; desde los simples y altamente parametrizados (modelos de cajas) hasta aquellos con hidrodinámica, bidimensional o tridimensional, explícita. El Sistema de Modelación de Aguas MOHID (del portugués Modelo Hidrodinámico) fue generado en 1985 como un modelo bidimensional de diferencias finitas para el análisis de mareas en zonas costeras. En su condición actual (2009), es un sistema de modelación tridimensional (de volúmenes finitos), baroclínico, que incluye una serie de módulos para el análisis integrado de ecosistemas marinos. MOHID permite la modelación hidrodinámica anidada, lo que facilita el desarrollo de modelos en zonas costeras de topografía compleja (como los fiordos australes de Chile), y la implementación de aplicaciones tanto eulerianas como lagrangianas. Durante el proyecto ECO-Manage (Sexto Programa Marco, Unión Europea; <http://ecosistemas.uchile.cl>) se implementaron una serie de modelos para la zona del Fiordo Aysén en la XI Región de Chile, así como para zonas estuarinas de Brasil y Argentina. Los resultados de este esfuerzo internacional pueden verse en los libros electrónicos disponibles en:  
<http://ecosistemas.uchile.cl/ecomanage/documentos/ebooks/>.

El objetivo de esta ponencia es describir las principales características de MOHID respecto de la modelación hidrodinámica de los fiordos australes, y mostrar ejemplos de su uso en el fiordo Aysén (modelo lagrangiano de productos de desecho de balsas jaulas de cultivo de salmónes) y en el fiordo Baker y Pascua (modelo euleriano de dispersión de sedimentos). Se discute su aplicación para estudios de capacidad de carga de la industria salmonera.

# 11

## Modelos para la evaluación de la capacidad de carga de fiordos aplicables a ecosistemas del sur de Chile

Paula Moreno<sup>1</sup>  
Fabián Tapia<sup>2</sup>  
Susana Giglio<sup>3</sup>

1: Programa de Acuicultura,  
WWF Chile.  
2: Programa COPAS Sur-Austral,  
Universidad de Concepción.  
3: Universidad de Concepción.

El crecimiento explosivo de la salmonicultura en el sur de Chile y los recientes problemas de orden sanitario que dicho sector productivo ha debido enfrentar, evidencian la necesidad de incorporar criterios oceanográficos y también herramientas de modelación cuantitativa a la evaluación del impacto de esta actividad sobre ecosistemas acuáticos, y sobre otras actividades humanas que se desarrollan en la región.

Un gran número de concesiones de acuicultura se encuentran ubicadas en fiordos y canales, principalmente por las favorables condiciones físicas y químicas del agua, y por la protección que la geomorfología de estas cuencas semicerradas otorga a las instalaciones de cultivo. Son estas mismas condiciones topográficas, batimétricas e hidrodinámicas las que convierten a los fiordos y canales en sistemas altamente sensibles y potencialmente vulnerables al impacto de la acumulación de materia orgánica sobre el fondo, producto de fecas y alimento no consumido, y de los desechos metabólicos de los peces en cultivo. La capacidad de un fiordo para asimilar estos ingresos, sin que las condiciones físico-químicas del agua bajen de un nivel mínimo de calidad, depende, en gran medida, de la variabilidad espacial y temporal en las tasas de recambio de agua y de la composición y capacidad metabólica de la fauna bentónica. De esta forma, los patrones de variabilidad física y biológica actúan en conjunto para determinar, de un lugar a otro y de una época del año a la otra, la “capacidad de carga” o nivel de tolerancia que una determinada cuenca tiene a la incorporación de materia orgánica y desechos metabólicos producto del cultivo intensivo de peces.

Sobrepasar esta capacidad implica que las condiciones físicas y químicas del agua y sedimentos pueden, eventualmente, verse alteradas a la escala de toda una cuenca y poner en peligro la supervivencia de la fauna y flora autóctonas, la sustentabilidad de la actividad salmonicultora y el desarrollo de otras actividades humanas en la región. Por ello, y dada la importancia económica y el nivel de crecimiento de la salmonicultura en Chile, WWF ha encargado la realización de una recopilación y revisión de la información disponible sobre modelos de estimación de capacidad de carga, con un énfasis en los métodos utilizados en países líderes en producción de salmónidos de cultivo en el mundo: Chile, Noruega, Canadá y Escocia.

# 12

## Capacidad de Carga Productiva de un Área de Cultivos de Choritos

V. Alfredo Troncoso<sup>1</sup>

Marco Salamanca<sup>1</sup>

Patricio Campos<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Oceanografía,  
Facultad de Ciencias  
Naturales y Oceanográficas,  
Universidad de Concepción

<sup>2</sup> Instituto de Ciencia y Tecnología,  
Universidad Arturo Prat

La Capacidad de Carga Productiva de un área de cultivo de choritos (*Mytilus chilensis*) fue estudiada en el Canal Yal (Chiloé, Chile) durante 18 meses entre el 2000 y 2001. Los objetivos específicos del estudio fueron: 1) disponer de una metodología para calcular la Capacidad de Carga Productiva para una zona del mar interior de Chiloé, 2) Balance de masa de C y N, 3) Modelo de circulación, 4) Cantidad máxima de C y N disponible en el Canal de Yal (Capacidad de Carga), 5) Modelo de advección-difusión para el Canal de Yal, 6) Validación del modelo en aspectos físicos y velocidad característica, y 7) Validación del modelo en aspectos biológicos. Conceptualmente, en una primera etapa se asumió que el área de estudio y alrededores, corresponden a una zona donde ingresa materia desde diferentes fuentes, y además que hay producción in situ. En este estudio se utilizó el carbono (C) y el nitrógeno (N) como variables de estado, las cuales son transferidas y/o modificados por procesos al interior de los compartimentos del sistema que interactúan. Para entender la mecánica que opera en el área, se realizó un balance de masa de C y N, integrado anualmente y resolviendo paralelamente el comportamiento hidrodinámico local a la misma escala temporal. Para ello, se fijaron arbitrariamente los límites físicos del área de estudio y a modelar, basado principalmente en el movimiento que deberían seguir las corrientes de marea en el canal. Seguidamente, se caracterizaron los principales procesos que intervienen en los flujos biogeoquímicos del C y N (Producción Primaria e hidrodinámica local). Para desarrollar las actividades, fue necesario dividir el proyecto en cuatro subproyectos: 1) caracterización oceanográfica y dinámica del área, 2) estudios fisiológicos de organismos en cultivo, 3) cuantificación de la producción primaria, y 4) modelación numérica de la capacidad de carga.

### Principales resultados

#### 1) Hidrodinámica

##### Intensidad de corrientes

El modelo reproduce las observaciones de campo, en términos de promedios y desviaciones estándar, así como también de la dispersión de los datos. La exactitud de las mediciones de velocidad reproducidas por el modelo fue del orden de un 70,7% con un error de un 29,3%.

##### Comportamiento de las corrientes

La dinámica está dominado por las corrientes de marea con frecuencias de 0.08 y 0.16 (ciclos  $\times$  hr<sup>-1</sup>), donde el sistema de corrientes mareales muestra un patrón complejo, comportándose como una onda parcialmente progresiva (llenante) y estacionaria (vaciante), es decir, durante la llenante las máximas velocidades se alcanzan una hora antes de la máxima altura, pero en la vaciante las máximas velocidades coinciden con la máxima altura de la marea.

#### 2) Balance de masa.

Para establecer el balance se midió y se estimaron los siguientes procesos:

a) Mediciones: producción primaria, ingestión zooplanctónica y sedimentación,

b) Estimaciones: respiración y mortalidad fitoplanctónica; respiración, excreción, mortalidad y formación de fecas zooplanctónicas.

Además, se midieron los inventarios de fito- y zooplancton, Carbono y Nitrógeno Orgánico Particulado (COP, NOP). Adicionalmente, los nutrientes inorgánicos Nitratos, Nitritos, Fosfatos y Silicatos fueron también cuantificados.

La capacidad de carga anual del Canal de Yal fue estimada a partir del balance de masa C y N del Canal de Yal y del modelo de circulación del mismo canal (transporte mareal cero), es decir no hay cambios, en términos de masa al interior del canal por efecto del transporte.

La capacidad de carga anual de carbono y nitrógeno del Canal de Yal, estimada en este estudio, es de  $2.06 \pm 1.70 \text{ Ton C} \times \text{Há}^{-1} \times \text{año}^{-1}$  y  $0.46 \pm 0.10 \text{ Ton N} \times \text{Há}^{-1} \times \text{año}^{-1}$ .

En la actualidad, solo en el sector de Vilupulli (lado SW del canal), se encuentra concesionado para acuicultura de organismos filtradores (principalmente *M. chilensis*) ocupando un área de ca. 68 Há. La capacidad de carga anual para el área concesionada estimada a partir de nuestras mediciones, alcanza a  $140.1 \pm 115.6 \text{ Ton C} \times \text{año}^{-1}$  y  $31.3 \pm 6.8 \text{ Ton N} \times \text{año}^{-1}$ .

#### 3) Validación del modelo biológico.

La validación de la Productividad Primaria (PP) estimada por el modelo de transporte, se realizó, a través de una regresión lineal entre profundidades discretas de la PP modelada y la PP in situ. El modelo explica un 87.9% la PP in situ. De igual modo se validó la PP integrada diaria de la capa fótica del Canal de Yal, en este caso el modelo explica entre un 85.1 y 88.4% de la PP in situ cuando se corrige el "efecto botella", es decir, sin advección-difusión, sin sedimentación ni pastoreo zooplanctónico. El modelo nos indica que la PP anual para el Canal Yal fue de  $1502 \text{ (g C} \times \text{m}^{-2} \times \text{año}^{-1})$  con un promedio diario de  $4115 \pm 2552 \text{ (mg C} \times \text{m}^{-2} \times \text{d}^{-1})$ .

#### 4) Potencial cultivable del Canal Yal.

Se estimó el potencial cultivable del Canal Yal, para distintas tallas de choritos (20, 25, ..., 70 mm), número de cuelgas por línea (155, 200, 250, 300) y número líneas (1, 2) por longline (200 m), a partir de los porcentaje de remoción de carbono fitoplanctónico en tres escenarios de 26.234, 80.326 y 216.095  $\mu\text{g C} \times \text{L}^{-1}$  (mínimo, promedio y máximo, respectivamente). Se estableció que las líneas simples con densidades de cuelgas de 200 o 300 por longline alcanzan para filtrar la escasa biomasa de fitoplancton durante el período de invernal (peor escenario).

Financiamiento: Proyecto Fondef D98i-1054.



# 13

## Un Modelo Matemático para el Cálculo de la Capacidad Ambiental del Cultivo de Salmónidos

Roberto Riquelme<sup>1</sup>  
Marco Salamanca<sup>2</sup>  
Alfredo Troncoso<sup>2</sup>  
Patricio Campos<sup>3</sup>

1: Departamento de Ingeniería Matemática, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Concepción.  
2: Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción.  
3: Instituto de Ciencia y Tecnología, Universidad Arturo Prat

El término Capacidad Ambiental aplicado en la acuicultura se define como la cantidad de producción de la industria que puede ser sostenida por el ambiente sin un efecto deletéreo. En general, la estrategia productiva aplicada por la industria salmonera ha generado, en el mediano plazo, una pérdida de espacios útiles para la acuicultura por la saturación con materia orgánica. Las medidas de manejo que se han estado aplicando por parte de algunas empresas no han sido suficientes para revertir esta pérdida de sitios, por lo que la salmonicultura depende exclusivamente del ambiente para la dilución y bio-proceso de los residuos sólidos y disueltos producidos y para que no se generen condiciones anaeróbicas que limiten, tanto la apertura de nuevas concesiones, como la producción de los centros en plena actividad. El Modelo Matemático (SENCAP) es un modelo Hidrodinámico-Biológico, basado en el transporte advectivo de oxígeno y un balance entre los procesos que aportan y consumen oxígeno en un volumen de agua donde se realizan actividades de engorda de salmones. Integra conocimientos físicos, químicos y biológicos, generando una herramienta que permite evaluar la condición ambiental actual en la que se encuentran un centro de cultivo, y proyectar la capacidad ambiental futura según sus rangos productivos. El Modelo es de tipo holístico, comprensivo y considera la capacidad asimilativa y ambiental del ecosistema donde se desarrollan los cultivos. Es no reductivo, es decir, multi-paramétrico, entendiendo las relaciones entre las variables y los flujos que hay entre los diferentes compartimentos que interactúan en el ecosistema en que se inserta la actividad. El modelo consiste básicamente en:

- i. Modelo Hidrodinámico: Ecuaciones y Variables Básicas, Esquema de Turbulencia, Condiciones de Frontera, Sistema Sigma-Coordenado
- ii. Esquema Numérico: Simulación Real
- iii. Modelo de consumo de oxígeno: Modelo propuesto, Modelo simplificado

El modelo de consumo de oxígeno resuelve la ecuación de advección-difusión modificada, considerando condiciones de borde reales aportadas por las observaciones y mediciones realizadas en la etapa de terreno y caracterización de la variabilidad de los procesos que aportan y remueven oxígeno de la columna de agua, según el sistema de coordenadas definido de acuerdo al esquema de módulos de volúmenes finitos seleccionados, con la profundidad variable, considerando la batimetría local del centro de experimentación. El modelo considera como variables de entrada el tiempo a simular, diámetro de las jaulas, velocidad del agua, temperatura del agua, peso promedio de los salmones, biomasa total en el módulo de jaulas, número de jaulas, oxígeno disuelto en el agua fuera de las jaulas y la profundidad de hábitat de los salmones. Para validar los resultados de las simulaciones se comparó los resultados de una simulación de 25 horas de variación de oxígeno,

considerando una biomasa en cultivo en un centro productivo y tres escenarios; i) la biomasa existente, ii) 20% menos de biomasa y iii) 20% más de biomasa. La complejidad de la modelación está en determinar de manera eficiente los diferentes parámetros involucrados, en particular determinar el valor de la función  $\alpha$  (balance de oxígeno a través del tiempo) ya que en ella están involucrados los diferentes subsistemas que intervienen en el consumo y producción de oxígeno, incluyendo el consumo propio de la población que está en la jaula. Es aquí donde puede usarse una modelación estocástica para el consumo de oxígeno por la población, ya que ésta varía en tamaño y sus metabolismos. La dificultad de una implementación estocástica radica en que se hace necesario una gran cantidad de recursos computacionales, pues para sólo un caso debería ejecutarse el programa al menos unas 2.000 veces, teniendo en cuenta que, hasta el momento, para simular un día el programa demora 4 horas, y al ejecutarlo 2.000 veces demoraría 8.000 horas, aproximadamente un año. El modelo fue validado contra las observaciones de terreno que se realizaron a lo largo de la etapa de mediciones de este parámetro que abarcó la caracterización de la variabilidad estacional de este gas. El grado de exactitud varió entre un 83% y un 78%, con lo cual se simularon algunos escenarios, por ejemplo, la biomasa de salmones actuales en cultivo, con un 20% más y un 20% menos. Los resultados muestran que el oxígeno disminuye de 10 mg/L afuera de una balsa jaula a 3,7 mg/L (63%) en el interior. Si se aumenta la biomasa en cultivo un 20% el contenido de oxígeno disminuye a 2,5 mg/L (75%), valor que es crítico para el crecimiento de los peces y si la biomasa disminuye un 20% el oxígeno disminuye a 5,5 mg/L (45%), manteniendo oxigenada la columna de agua teniendo un impacto positivo en el cuerpo de agua. Al describir el comportamiento del oxígeno en una balsa jaula, el Modelo permite definir algunas acciones que mejoren el manejo productivo, disminuyendo las consecuencias ambientales en el centro como un todo. En general, estas dicen relación principalmente con el manejo de la densidad de la biomasa en cultivo en las diferentes etapas del ciclo biológico y productivo del salmón. Además, permite optimizar el uso del espacio del centro y minimizar el impacto ambiental al mantener la saturación en niveles que permitan el normal funcionamiento del ecosistema en el que está inserto el centro de cultivo.



# 14

## Hidrodinámica y Procesos de Transporte en la Capa Límite Béntica

Yarko Niño  
Departamento de  
Ingeniería Civil  
Universidad de Chile

Se discute la hidrodinámica de las Capas Límites Bénticas (BBL) de los sistemas acuáticos en el contexto de los procesos de transporte de masa y aspectos de la calidad de agua. La Capa Límite Béntica es un concepto usado para referirse a la región de la columna de agua que está en contacto e interactúa dinámicamente con los sedimentos del fondo del sistema acuático. Esta zona tiene una gran influencia en i) La estructura de flujo, dada que es la región donde es disipada la mayor parte de la energía cinética del flujo, y ii) los parámetros que contribuyen a determinar la calidad del agua de estos sistemas, particularmente cuando los tiempos de residencia son altos, debido a los procesos de intercambio de masa entre la columna de agua y el lecho del sedimento, dada la generalmente alta acumulación de materia orgánica, nutrientes, y contaminantes en el sedimento del lecho de los sistemas naturales afectados por la actividad antrópica. Investigaciones respecto de los procesos de transporte en Capa Límite Béntica desarrollados por el grupo de Recursos Acuáticos y Medio Ambiente de la Universidad de Chile se han enfocado en tres aspectos relacionados:

- i) la estructura turbulenta del capa límite béntica (BBL),
- ii) el arrastre por convección del sedimento en la interface sedimento-agua (SWI)
- iii) los procesos de intercambio de masa en la interface sedimento-agua (SWI).

El último se enfoca tanto en los balances de oxígeno disuelto como en los efectos de turbulencia/ola en los rangos de transferencia de masa en la interface sedimento-agua. Los resultados de esta investigación pueden contribuir con cierres para ser usados por modelos hidrodinámicos y de calidad de agua que usualmente no tienen resolución espacial para cubrir los detalles de procesos de transporte en la interface sedimento-agua. El intercambio de masa entre la columna de agua y los sedimentos ocurre a través de las subcapas difusivas. La turbulencia de la capa límite béntica corresponde a la fuerza por unidad de área que el fluido ejerce sobre el lecho (velocidad de corte). Estos procesos turbulentos en la capa límite béntica tienen mucha importancia en los procesos de transporte e incorporación y sedimentación de sólidos que están en las cercanías del bentos. Si el esfuerzo de corte es suficientemente grande, es posible que estos sólidos se resuspendan y sean transportados desde esta zona hacia el resto de la columna de agua. Los procesos de transportes en sistemas naturales ocurren a una variedad de escalas y suele ocurrir que éstos no puedan ser resueltos por los modelos, simplemente por los dominios demasiados grandes en los cuales se quiere trabajar. Esta incapacidad que tienen los modelos para resolver en particular el intercambio en la capa límite béntica, se puede abordar usando las relaciones de cierre. Si bien se necesita desarrollar modelos de gran escala para analizar los problemas a escala local y regional, no se puede olvidar los micro-procesos. Se requiere investigación teórica, numérica, experimental y de campo para poder desarrollar éstos, validarlos, calibrarlos e integrarlos después en modelos de mayor escala.

# 15

## Modelación de la Sedimentación Béntica Bajo las Balsas Jaulas

Martín Hevia  
Fundación Chile

El éxito de la salmonicultura ha traído consigo preocupaciones respecto del impacto ecológico de residuos orgánicos como alimento no consumido y heces, y residuos solubles inorgánicos (nutrientes). Una pregunta básica es el tamaño y número de centros de cultivo que se pueden instalar en un determinado cuerpo de agua. Es esencial conocer el destino del material generado en las jaulas si se desea manejar con éxito estos centros productivos y prevenir interacciones no deseadas entre centro de cultivos y el indebido cambio ecológico (Silvert, 1992).

Los modelos simples que predicen la dispersión y aporte de residuos orgánicos desde las jaulas de cultivo pueden ser usados como herramientas de gestión para la localización de los centros y para la evaluación del potencial de enriquecimiento de los ecosistemas bénticos. Este estudio muestra que un número importante de características físicas que influyen en la dispersión de residuos particulados de los centros de cultivo pueden ser incorporados en modelos simples de dispersión. Se presenta una modificación del modelo de sedimento originalmente descrito por Gowen et al. (1988). Las modificaciones incluyen: variación en la topografía del fondo, cambios en la velocidad de corriente en profundidad; corrección del flujo horizontal de corriente en respuesta a la profundidad cambiante.

Modelos del tipo mostrado acá pueden ser usados para la protección medio ambiental y para el manejo de centros de cultivo. La simulación de la extensión del área de dispersión de residuos y de carga, puede ser usada para determinar la ubicación de los centros de cultivo, la proximidad de módulos de jaulas y los niveles de producción. Tanto para la industria acuícola como para el manejo medio ambiental, la predicción de la carga máxima de residuos bajo las jaulas resulta importante.

En el contexto del manejo de un centro de cultivo y del manejo del medio ambiente, la modelación de la carga de residuos particulados es de considerable importancia si se logra estimar va a obtener el máximo valor usando modelos de dispersión simples como herramientas de gestión. Para examinar con mayor detalle cómo se comporta el modelo es necesario modelar la dispersión desde centros de cultivos instalados en áreas con batimetría y regímenes de corrientes complejos. Más aún, la validación del modelo sólo se puede lograr al comparar la dispersión y aporte de carbono al fondo marino, con indicadores químicos y biológicos de enriquecimiento béntico y métodos independientes para estimar cargas como las trampas de sedimentos. Se concluye que la inclusión de la batimetría y variación vertical y horizontal y la velocidad de la corriente en el modelo original fortalecen el modelo aquí presentado.

# 16

## Modelación Fiordo del Reloncaví: Primeros Resultados

E.M. Ovalle,  
O. Pizarro,  
J. Concha

Departamento  
de Geofísica  
Universidad de  
Concepción

Se presentan resultados preliminares relativos a la validación de la modelación numérica del Estuario de Reloncaví. Para tal efecto, se divide el fiordo en 4 sectores (Boca, Marimeli, Puelo y Cochamó), donde se efectúan comparaciones de mediciones de campo (temperatura, salinidad, velocidades paralelas y perpendiculares al fiordo) con los resultados numéricos. Las comparaciones se efectúan sobre promedios temporales de 3 días en las variables hidrodinámicas, para eliminar los efectos de las mareas. Las simulaciones muestran características del flujo que concuerdan con las observaciones.

Financiamiento: Proyecto Basal PFB-31/2007 "Aplicaciones de la Oceanografía para el Desarrollo Económico Sustentable de la Zona Sur-Austral de Chile"

## Materials and Results of Workshop on Carrying Capacity Long-term Sustainability and Management of Aquaculture Activities

---

Puerto Montt - Chile  
January 2010

# Table of Contents

Acknowledgements . . . . .	44
Table of Contents. . . . .	45
Introduction . . . . .	47
Recommendations . . . . .	49
Conclusions . . . . .	55

## ABSTRACTS

<b>W. Silvert:</b> So Many Effects ! How do we Cope ? . . . . .	63
<b>W. Silvert:</b> Delivering Science Where It is Needed . . . . .	64
<b>P. Guilibrand:</b> The Role of Computer Models in the Regulation and Management of the Scottish Aquaculture Industry. . . . .	65
<b>P. Guilibrand:</b> An Overview of the Computer Models Used in the Regulation and Management of the Scottish Aquaculture Industry . . . . .	67
<b>K. Boxaspen:</b> Sustainable Aquaculture and Carrying Capacity in Norwegian Waters . . . . .	69
<b>K. Boxaspen:</b> Use of Regulation Systems MOM and MOLO Environmental Surveillance, Modelling and Use of Area in the Coastal Zone . . . . .	71
<b>K. Black:</b> Modelling Environmental Impact of Aquaculture . . . . .	73
<b>M. Salamanca:</b> Development of a numerical model to predict the environmental capacity in aquaculture centers and its effect on production . . . . .	76
<b>F. Tapia:</b> ceanographic Monitoring and Process-Oriented Studies as a Platform to Assess the Carrying Capacity of Chilean Fjords: a Case Study in the Estuario Reloncavi. . . . .	77
<b>V. Marín:</b> ntegrated Modeling of the Austral Fjords: The MOHID Modeling System . . . . .	78
<b>P. Moreno:</b> Models for Fjord Carrying Capacity Assessment Applicable to the Ecosystems at the South of Chile. . . . .	79
<b>A. Troncoso:</b> Production Carrying Capacity of an Area for Mussel Culture. . . . .	81
<b>R. Riquelme:</b> Mathematical Model for Salmon Farming Environmental Carrying Capacity Assessment . . . . .	83
<b>Y. Niño:</b> Hydrodynamics and Transport Processes in the Benthic Boundary Layer. . . . .	85
<b>M. Hevia:</b> Modeling Benthic Deposition under Fish Cages . . . . .	86
<b>E. Ovalle:</b> Modeling of Reloncavi Fjord: First Results . . . . .	87

## Acknowledgements

The Economy and the Fishery Under Secretariats of the Chilean Government, wish to thank the Department of Oceanography of the Faculty of Natural and Oceanographic Sciences of the University of Concepcion, the Science and Technological Institute of the University Arturo Prat, Puerto Montt, and the Department of Mathematical Engineering of the Faculty of Physical and Mathematical Sciences of the University of Concepcion, for their scientific support in the organization of this Carrying Capacity Workshop. We also thank the support of the national and international scientists who contributed with their knowledge and experience to the success of this event. Our special recognition to Dr. William Silvert, Dr. Philip Gillibrand, Dr. Karin Boxaspen, Dr. Kenny Black, Dr. Marco Salamanca, Dr. Víctor Marín, Dr. Yarko Niño, Dr. Fabián Tapia, Dr. Elías Ovalle, Dr. Martín Hevia, Dr. Roberto Riquelme, Dr. Alfredo Troncoso, Paula Moreno and Dr. (c) Patricio Campos, who besides contributing with their comments and recommendations, provided us with valuable material which will contribute to the completion of this document.

# INTRODUCTION

Aquaculture is a very important activity for the Chilean exporting platform. Due to the appearance of sanitary and environmental threats, the Ministry of Economy and in particular the Fishery Under Secretariat of the Chilean government, have elaborated a series of strategies to take in a systematic and coordinated way the necessary actions to solve, or mitigate, the current and potential effects of these threats.

One of the relevant topics is the formulation of studies to determine the Carrying Capacity of marine bodies of water and the structuring of a research and development plan (R&D) which will effectively deal with these problems.

Within this framework, the Strategic Public Private Council of the Aquatic Cluster, through the Fondo de Investigación Pesquera (FIP), the CONICYT / FONDEF Program and Innova Chile, CORFO, promoted the execution of several projects which evaluated the Carrying Capacity of different salmon farms and mollusc culture areas. In addition to the financing of these projects, the development of a Workshop between researchers which would bring together the state of the art and R&D at a global scale was estimated necessary. This Workshop would benefit ongoing projects and it would identify and outline the design of future actions for the administration of the activity.

The use of Carrying Capacity models as a management tool of an economic activity allows the understanding of processes, the capacities and limitations of the natural renewal of different bodies of water, both at a local and regional level. Therefore, it allows to determine the absorbing capacity of the environmental load which comes from current and potential aquatic activities.

Models which allow the calculation of Carrying Capacity are based on highly complex scientific principles and knowledge. These principles, through a structured description and through quantified variables and relevant environmental characteristic, allow the sustainability and management decisions, both public and private, which secure the sustainability of the productive activity and the environmental quality of the areas where these are carried out.

The Workshop "Carrying Capacity: Long-Term Sustainability and Management of Aquaculture Activities" was held in Puerto Montt, on 11-13 January 2010 with the attendance of national and international experts. Participants shared experiences on strategies for the design and use of Carrying Capacity Models as tools for the management of aquatic activities. Finished and ongoing studies on the matter were also examined. Proposals were made in order to define work areas and methodology strategies.

This document transcribes all the presentations delivered at the Workshop as well as the final conclusions. Its purpose is to provide the scientific community, the public sector involved in the aquatic activity and processing companies with a summary of the best updated available information on this important tool.

# RECOMMENDATIONS

In general, the aquaculture industry seeks to increase production levels in order to achieve economies of scale. At the current state of knowledge, it is not safe to assume that a change in the scale of production will be environmentally acceptable, socially equitable and economically viable, according to what is defined as sustainable development in aquaculture. It is therefore necessary to establish criteria to fix the maximum level of aquaculture production in each area of culturing, with the goal of avoiding degradation of the marine environment, and in particular of coastal areas that are already under considerable pressure from human societies throughout most of the world.

Consequently, operative measurements of carrying capacity should be kept in mind in the selection and management of culture centers for the sustainable use of marine resources.

## **Carrying capacity, indicators and models**

Environmental carrying capacity may be defined as the maximum biomass that can be supported by a given ecosystem for a given period of time. The term 'carrying capacity' is often used in the context of coastal management or planning, with regard to human activities such as industry or aquaculture.

However, when considering other forms of aquaculture, such as finfish cultivation in net pens, which provide allochthonous food to the farmed organisms, it is more accurate to speak of 'holding' rather than 'carrying' capacity. In such cases our concerns focus on the ability of the environment to absorb and assimilate excess loading of organic compounds and nutrients. If the receiving environment cannot efficiently 'metabolize' or assimilate the load of nutrients and organic matter, we observe negative effects, for instance deterioration in water or sediment quality that may jeopardize the integrity and health of the ecosystem.

Speaking in terms of 'unacceptable impacts' implies that it is something defined by policy makers rather than by scientists. In order to minimize arbitrariness, there is a need to achieve consensus among stakeholders in order to ensure harmonization with respect to acceptable aquaculture impacts.

One way to define acceptable impacts is by establishing criteria and variables to be used for estimating carrying and holding capacity. In this case, some of the most difficult issues that need to be considered include:

The ecological component of carrying capacity; that is to say, what are unacceptable ecological impacts? A series of environmental variables like low oxygen in the water (hypoxia), high chlorophyll a or particulate organic carbon (eutrophication), as well as damage to important habitats or species may be chosen. One example is the use of 'exclusion criteria' such as protected habitats or species, as well as activities that could be harmful for aquaculture by causing harmful algal blooms (HABs) or polluted sites;



- The accumulative effects of aquaculture farms on water bodies or coastlines with limited space;
- Synergistic or hostile effects with other uses or other sources of nutrients;
- Unbalanced regulation, where, for example, a rigid regulation is used to reduce nutrient emissions from aquaculture in areas where it contributes in a minor proportion of the total nutrient discharge.

Moreover, we could use variables related to environmental quality or standards, such as primary production levels, sediment oxygen levels or the status of benthic communities, and compare measured values against established threshold values to determine when the impacts of the activity are 'unacceptable'.

The role of environmental and coastal managers is to plan human activities so that the risks of unacceptable ecological, social and economic impacts on the environment of concern are minimized. One of the tools that have been developed to help managers protect the environment is the Environmental Quality Standard (EQS). These standards generally set concentrations in the environment for certain compounds, below which unacceptable effects are expected not to occur.

One of the first steps towards the development of environmental standards is the selection of indicators of environmental status. Ecological indicators are quantifiable variables that enable us to assess changes in habitat characteristics and ecological function and structure. Indicators may also be used to characterize the effect of the environment on aquaculture, as well as social and economic changes related to aquaculture.

Indicators provide useful information on the status of the environment before, during or after an event such as the start of the aquaculture growing cycle. Indicators are therefore very useful in monitoring programmes that continuously prove the state of the environment.

If we want to assess the suitability of a site for aquaculture, we need to predict potential future impacts of the planned activity, and to do this we need to employ models.

Validated models can predict future conditions without any further measurements since they have been field-tested before use. Models are increasingly more flexible and precise, mainly due to increasing computer power, but their quality and applicability depend on the validity of the underlying assumptions and testing across a large range of environmental conditions.

Using both indicators and models greatly increases the ability of scientists, regulators, producers and environmental consultants to carefully assess the potential impact of new aquaculture operations, to characterize and evaluate any actual impact, and to define areas where the impact of marine aquaculture could be minimized.

If Chile aims to consolidate its aquatic industry it must count with information which allows the efficient administration of salmon and mussel culture areas, and the management tools which are necessary to achieve this objective are no other than Carrying Capacity and Assimilative Capacity Models.

Scientific research related to the interactions between aquaculture and the environment must be prioritized. The objective of this research is to advice the government with adequate management practices.

Complex models are necessary to understand the systems. Many of the processes that are illustrated in the conceptual models come from observations and from model work. Very complex models are necessary in order to capture these processes. The use of simple models seeks to build a bridge over the gap between a very complex research and the understanding of the processes. The idea is to provide a useful tool which may be used in obtaining the key parameters of the system. In many cases, after analyzing a system and defining the critical variables, it is not necessary to model the other ones. A complex model may be used to estimate to critical variables, and then use more simple variations of the model. This strategy is a way to reduce the complexity of the system.

We should not work with just one model and rely solely on its results. To evaluate the impact of aquaculture, it is necessary to analyze a wide range of models to cover different effects at different scales.

In relation to simple and complex models, it is recommended to initially prioritize the use of simple models, with the objective of describing the existing situation and what is required. Once a general idea of the situation of a basin or body of water has been obtained, we can move on to the use of more complex models and thus obtain much more refined responses.

The better a system is understood, the greater the probability that it can be exploited within sustainable limits.

Although the development of great scale models is necessary in order to analyze the problems at a local and regional scale, micro-processes should not be forgotten. Theoretical, numerical, experimental and field research are required to develop, validate, calibrate and integrate them later to models at a larger scale.

The modeling of the changes that occur after sedimentation must be considered, because they represent an important stage in the link of carbon loads with benthic enrichment indexes.

It is recommended to consider the carrying capacity of all the measurable parameters in the selection and management of culture centers. To achieve sustainable development of the aquaculture sector, it is important to consider environmental, social, physical, productive and economic aspects of this activity.

Culture centers should adjust their production to the load capacity of the local environment. Each ecosystem has a different capacity to absorb and assimilate the excess load of organic compounds and nutrients.

It is recommended to establish a maximum limit for each culture center, including the cases where more favorable environmental conditions are present.

An evaluation should be made of the maximum proportion of space that can be used for aquaculture within each water mass, taking into account other uses. Ecological and socioeconomic indicators should be used, as well as models and standards to obtain the best integrated evaluation possible for the allocation of space.

Carrying capacity is not just a number; the recommendations should be based on the number and location of the centers in given fjords, rather than on the number of fish to be bred in a cage.

The implementation of a good quality information recollection plan is recommended, both for fjords and bodies of water which are already used in aquaculture as well as for those which are not yet being used. With this purpose, it is best to use anchored instruments and take measures in the long term to, eventually, parametrize and validate the models.

There are few efforts oriented to the study of carrying capacity in mussel culture; these have been focused mainly on intensive aquaculture and fjords. More effort should be made to study carrying capacity in canals, estuaries and areas with low depths, where most aquaculture activity is currently concentrated.

It is recommended to analyze the possible synergies among the different types of cultures: of fish (addition of nutrients) and mussels (removal of phytoplankton) and evaluate whether they can operate adequately together.

Studies should be encouraged to determine the residence time in different marine systems. It is fundamental to know the behavior of hydrographic systems in order to support studies of carrying capacity. The Government should be responsible for financing these types of regional studies.

The estimations of Carrying Capacity are highly sensitive to spatial and temporal variability in the physical environment. This raises the need to incorporate both spatial and temporal scales more explicitly in a formal definition of carrying capacity to be used in future monitoring efforts and in the administration of aquaculture in southern Chile.

Carrying capacity recommendations which are centered in the number and location of culture centers within a given body of water would have a higher practical value than a strategy based in only one culture center (v.g. biomass limits to be cultured in one cage).

The reorientation of culture cages in function of the prevailing currents in a body of water could substantially increase the Carrying Capacity of productive centers during unfavorable environmental periods.

Given the necessity to apply models to estimate the carrying capacity of fjords and channels in southern Chile, it is essential that, both the government and the private sector, collaborate in the development of monitoring plans and environmental variability observation protocols which will provide information to be used in the implementation of the model. This plan must register, at least, the following parameters:

- Current registers
- Monitoring of river inputs
- Bathymetry
- Primary production and environmental levels of nutrients and dissolved oxygen
- Production information from culture centers

Simple models that predict dispersion and input of organic waste from culture cages may be used as management tools for the location of the centers and for the evaluation of potential organic enrichment of benthic

ecosystems. An important number of physical characteristics which influence waste particulate dispersion in the culture center may be incorporated to simple dispersion models.

Scientific information must be integrated with those who need it in easy-to-understand language. One way of addressing this challenge is through the development of Expert Systems. The Decision-making Support System (DSS) is particularly important for aquaculture because it will not only be possible to carry out modeling, but also to present the results in a way that allows non-scientists to interpret them and use them in decision-making.

Interfaces need to be easily understood by users who could use the results generated by the models.

The government should implement an expert system which allows access to scientific results to those in charge of decision-making.

It is highly strategic to elaborate a Catalog of the Fjords, Channels and Bays in southern Chile. This catalog should include, at least, information on bathymetry, volume, superficial area, tidal range and pluviometry. This type of information is essential for the development of models in bodies of water subject to culture and is of great value, both for regulators and modelers (Example: Anton Edwards and Fiona Sharples, 1986 "Catalog of Scottish Fjords")

### **Examples of models and indicators**

Benthic macrofauna is the traditional measure of benthic impact; yet it is time-consuming, expensive and requires skill and experience to be identified quantitatively. Considerable effort has therefore been invested in an attempt to identify simple, universal biogeochemical sediment indicators that may be used as proxies: concentration of organic matter in the sediment has been successfully used to indicate the 'degree' and spatial extent of fish farm impact. Biological variables such as the abundance or species richness, current velocity, grain size, redox potential or total organic carbon (TOC), etc. have also been considered. Ammonium and dissolved oxygen have been considered as water column indicators

## EXAMPLES OF MODELS TO EVALUATE THE IMPACT OF AQUACULTURE IN THE ENVIRONMENT

Name of Model	Scale	Description
DEPOMOD	Local - Cage	Particle tracking models used in predicting the impact of particulate waste material (and special components such as medicines) from fish farms and the benthic community impact of that flux. Was developed for salmon farms in the North Atlantic.
Modelo CSTT	CSTT Model Water-body	CSTT is a single-box model that predicts the maximum phytoplankton chlorophyll that can result from nutrient enrichment. The model also exists in a dynamic version (dCSTT) using the same ACExR physical model as LESV.
LESV	Water-body	Fjord ecosystem state vector model. Includes a 3-layer physical model (ACExR) derived from FjordEnv
ShellSIM	Individual-based	Dynamic model for feeding, biodeposition, metabolism, excretion, and growth among bivalve shellfish in function of temperature, salinity, and seston availability and composition.
TRIMODENA	3-dimensional Hydrodynamic Local – cage Water-body	Includes a 3D finite element hydrodynamic model for the numerical simulation of dispersive processes, and a 3D Lagrangian particle tracking model to simulate particle dispersion; both have been applied to mariculture pollution.
EDMA	1-dimensional (vertical) sediment	Uses BNRS (Biogeochemical Reaction Network Simulator, for organic decay and oxidation processes in sediment): a general programming environment made freely available by the Geochemistry Department of Utrecht University.
KK3D	Local – Cage Water-body	Particle tracking model used to predict the impact of particulate waste from fish farms, including hypoxia of the bottom. The model has been parameterized for finfish.
FjordEnv	Local – Cage Water-body	Three-layer model for fjord exchange, parameterizing many physical processes and including simple pelagic biology and light penetration.
MOM	Local - Cage	The MOM model can be used to calculate the holding capacity (TPF-Total Fish Production) of an area for fish farming containing four sub-models: a fish model, a cage water quality model, a dispersion model, and a benthic model.

## CONCLUSIONS OF THE WORKSHOP

1. There are several definitions of Carrying Capacity

**Carrying capacity** of an area refers to the maximum production potential of a species that the environment can sustain indefinitely in relation to food, habitat, water (oxygen) and other needs available in the environment.

**Assimilative capacity** is the ability of the ecosystem to use and decompose potential contaminants without “harmful” effects on the environment.

**Environmental capacity** is the ability of the environment to accommodate, with an acceptable level of impact, to a particular activity or rate of activity. This includes esthetic aspects and consideration of other social values.

It is more appropriate to use the definitions **Assimilative Capacity** and **Environmental Capacity** for salmon farming.

The definition **Carrying Capacity** is the most appropriate to be applied to mussel cultures.

2) In the context of modeling culturing salmon or other fish, it is necessary to model:

- a. The accumulation of organic matter on sea floors where culture centers operate should not put the existence of macro benthic infauna at risk.
- b. Water quality in culture cages should comply with the needs of the fish, that is, the concentration of oxygen should be kept above the threshold level, while the levels of ammonia and other potentially dangerous substances should be kept below threshold levels.
- c. The contribution of nutrients and organic matter from the culture centers should not deteriorate the water quality in the area surrounding the culture center.
- d. The potential effects of the culture centers on surrounding coastal waters, such as bays, estuaries, canals and fjords.
- e. The dispersion and destination of solid and particulate residues that originate from culture centers. This is relevant for the selection and/or relocation of sites and for the design and interpretation of monitoring programs.

3) Models are essential in the administration of aquaculture. This is valid not only for entrepreneur who need to run their culture centers in an efficient way, but also for administrators who need to ensure that the culture centers may coexist in a safe manner, among themselves and with the environment.

4) It is also necessary to model primary production in the context of modeling mussel culture.

5) Turbulent processes in the Benthic Boundary Layer (BLL) are of great importance in transport processes and in the incorporation of solids to the water column.

6) To develop models, no matter how sophisticated or comprehensive they are, we need to validate them. Reliable databases on environmental variability are necessary to both develop and validate the models. Programming is not the most important issue.

7) Models must be sustained in the comprehension of the processes and it is mandatory that we know exactly what is happening with the system, as much as possible. Furthermore, models must be backed up by observations and monitoring. Models do not replace observations or monitoring.

8) The uncertainty levels of models affect the way in which culture centers are managed, both internally (culture) and externally (regulation).

9) Models may be used in different ways, to:

- Predict, although this is done with a certain degree of trust and uncertainty
- Evaluate risks
- Estimate reasonable threshold values
- Explore different options

10) The carrying capacity is more than a simple number. It should define relevant space-time scales. In this sense, it is essential to characterize hydrodynamic variability in function of these scales.

11) Carrying capacity is a multi-scale concept that requires implementing a variety of numeric models that can have diverse degrees of complexity and also present different data requirements.

12) In particular, two scales of modeling were identified as necessary to analyze the process of carrying capacity:

- a) Models at a local scale, aimed at field analysis close to culture centers, for example, centered on culture fish, benthos and the quality of water, and,
- b) Models at a regional scale, aimed at field analysis far from culture centers, for example, basin water quality.

13) Models should not consider different time scales. Different models are required to cover every aspect of the impact of aquaculture. Including many processes into only one model, often leads to failure.

14) In practical terms, a model should be simple enough so that its parameters are feasible to be estimated using standard oceanographic and chemical observations, besides the available productive information.

15) As examples of the first type of model, papers were presented that use DEPOMOD to model culture centers, as well as other models for mussel cultures. As an example of the second type of model, the modeling initiatives of Seno del Reloncaví (FVCOM) and Aysén Fiord (MOHID) were described.

16) The models at a local scale serve to define the productive limits of the culture centers and their potential effects on the bays and/or fjords where they are located (e.g. effects on the sea floor, on oxygen content and primary production).

17) The models at a regional scale serve to estimate the spatial scale at which processes can be affected, such as contamination by the ISA virus and transporting of particles from culture centers.

18) It was emphasized that there is a need for a proactive and strategic focus on aquaculture based on the development of both types of models. It was also discussed that local models, given their role in the development of the industry, should be developed and financed by the industry. Likewise, the Chilean government should play the role of stimulating the development of regional models and seek funding mechanisms for the field studies required to have the necessary data for validating the models.

19) Science is helpful for the administration only if the people responsible for the planning and management understand scientific results. Often these types of studies are ignored because no one understands them and, therefore, they can not be used.

20) There was also discussion of the need for friendly interfaces that are easy-to-use for non-experts and serve for rapid calculation of variables to make decisions about the development of aquatic projects. In this respect, it was emphasized that the decision regarding the limits that should be used in implementing such support systems to decision-making is political and corresponds to the area of responsibility of political decision-makers.

21) It is possible to encapsulate complex models in a Decision-making Support System (DSS), in a way that they can be operated and understood by fish farmers, administrators and other stakeholders.

22) Care should be taken regarding the good use of the models. That is, those using the models should have proper training about entering data and interpreting the outputs of the models. This involves a commitment to develop human capital.

23) The Workshop served as a bridge to bring together academics, representatives of government and the industry, in order to discuss the diverse perspectives from which we can analyze the carrying capacity of estuaries, fjords and canals in southern Chile.

24) It is generally considered that dynamic processes in fjords are fairly similar worldwide. Therefore, some of the studies conducted in Chile to date, would allow the validation of some models developed for these types of systems in the northern hemisphere. Nevertheless, biological models are absolutely different, and, eventually, they would have to be rewritten in certain degree and several of their parameters should be reconfigured. Many models are optimum for certain types of environment and not for others: fjords, channels, bays.

25) The ACExR-LESV model is suitable to predict physical conditions and the enrichment potential of nutrients and chlorophyll in fjords. ACExR-LESV is the most used for determination of carrying and assimilative capacities in Scottish fjords used for aquaculture.

#### **Examples of models applied in Chile**

26) The Mathematical Model (SENCAP) is a hydrodynamic-biological model, based in the advective transport of oxygen and a balance between processes which provide and consume this gas, in a volume of water where fish growth are being carried out. It constitutes a management tool to evaluate the environmental condition of a culture center, and it projects future environmental capacity in accordance to its productive ranges.

27) MOHID allows nested hydrodynamic modeling, which facilitates the development of models in coastal areas with complex topography such as the austral fjords in Chile, and the implementation of eulerians (sediment dispersion) and lagrangians (simulation of the particulate waste dispersion coming from cages for salmon farming) applications

28) The modeling of water quality at basin scale, the application of MOHID model to the study of dispersion and accumulation of particles on a fjord area constitutes an attractive option in terms of the transition which it achieves between local scale processes (inside and among cultures), and those environmental variables which should be modeled at a larger scale, such as oxygen concentration, ammonium and other organic nutrients.

29) Water quality models at fjord scale such as FjordEnv, are possible alternatives to address the estimation of residence time, changes in environmental conditions generated by culture centers, and, finally, estimate the carrying capacity in the fjords of southern Chile.

30) Strategies of the MOM type of model are highly informative to the individual scale of a center, but its utility is limited when they are inserted in a circulation context to the fjord scale.

31) The "productive carrying capacity" model developed for an area in southern Chile, provides a methodology to calculate the carrying capacity for the culture of mussels in the inner sea area of Chiloé.

32) The Benthic Depositional Model, allows the simulation of the extension of the waste and load dispersion and may be used to determine the location of the culture centers, the proximity of cage modules and the production levels.

33) There are work groups in Chile able to develop, validate and calibrate models related to micro-processes (resuspension) and couple them to local and regional scale models.

#### **Objective and Usefulness of Carrying Capacity Models and its relation with EQO & EQS**

34) Environmental Quality Objectives (EQO) describe the expected results, and Environmental Quality Standards (EQS) are standards which must be met with the purpose of achieving EQO. Models are used to evaluate the probability of achievement of AQS by a productive activity.

#### **Objectives of models in aquaculture:**

They allow the management of unload authorizations site by site

- Modeling of organic enrichment (DEPOMOD). Its function is to prevent undesired environmental impact due to an excessive enrichment of organic localized carbon.
- Modeling of pollution dispersion (advection models – Dispersion). Its function is to prevent undesired environmental impact, due to the discharge of toxic chemical compounds on the culture centers.

They develop a strategy for the expansion and development of the industry

- Modeling of nutrient enrichment in bodies of water.
- Modeling of disease and parasite control (residual flow)



# ABSTRACTS

# 1

## So Many Effects! How do we Cope?

William Silvert  
Instituto Nacional de  
Investigação Agrária e  
das Pescas, IPIMAR  
Lisboa, Portugal

Aquaculture affects the environment in many different ways (particles as faeces and feed, dissolved nutrients, oxygen depletion, pharmaceuticals, physical structures, activities, onshore processing and discharges of wastes, and diseases), and over many different time and space scales. For example, oxygen depletion is usually very local and appears only in the immediate vicinity of the farm site but particles travel hundreds of meters and dissolved substances can disperse through the entire water body. Predicting what all the effects may be is therefore very complicated and cannot be done effectively with just one model – aside from trying to pack all kinds of impacts into one modelling framework, modellers have long since discovered that trying to run models which incorporate drastically different time steps and spatial ranges is simply not possible. Consequently any modelling approach has to involve a whole suite of models in order to cover the variety of effects and scales that are present. Unfortunately though some of these models are so attractive that there is a tendency to use just one model and thus focus on only one category of environmental impact. To avoid this it is necessary to start with an overview of all the possible effects of concern that is worked out by collaboration between scientists and stakeholders, and to ensure that all of these effects are sufficiently considered, even though not all of them have yet been thoroughly investigated and may not be fully understood. So what do we model? We never model everything, just the most important factors. What are those? The answers are not always obvious. Many models are optimized for certain kinds of environments and their use can simplify the modeling process. What needs to Model? We need data and knowledge – the computer programming is not important. Some models require data that are hard to obtain, or that are not reliable. Many of the results of predictive models are based on firm data and can be trusted. Many model predictions provide a firm basis for action, but not all questions are well answered by models. We cannot always define sharp thresholds for critical effects, but we have a pretty good idea of what levels are acceptable. The models can be used in various ways: to predict, although with various degrees of reliability and uncertainty, to assess risk, to estimate reasonable threshold values and to explore different options. How we use models depends on whether we are independent business men, managers, or other kinds of stakeholders. Models are essential in the management of aquaculture both for the businessmen who need to run their fish farms efficiently and for the managers who need to ensure that farms can coexist safely with each other and with the environment. Models are still far from perfect tools, and cannot provide reliable answers to all of the questions that can arise. We should further the development of models and facilitate their use by all stakeholders, including fish farmers, managers, and all other users of the marine environment. To do so we need to ensure that modelling is accessible to all stakeholders in a way that is credible and transparent.

# 2

## Delivering Science Where It is Needed

William Silvert  
Instituto Nacional de  
Investigação Agrária  
e das Pescas, IPIMAR  
Lisboa, Portugal

Scientific modelling tends to be abstract and technical and thus difficult for non-scientists to understand fully and evaluate. Furthermore scientific experts are not abundant, so when predictive modelling is required to assist in aquaculture planning and licensing, it is not always possible to have a scientist carry out the modelling work, and even less often possible for the scientist to have the time to come to the site to explain and interpret the model results to managers and stakeholders. One way of getting around this problem is by the development of Expert Systems which are computer programs designed to apply standard modelling techniques without the intervention of highly skilled modellers. Of particular importance for aquaculture management are Decision Support Systems (DSS) which can not only carry out modelling but can also present the results in such a way that non-scientists can interpret and use them for decision making. This talk describes in general terms the design and use of DSS and includes presentation of several prototypes designed to illustrate various ways in which they can be used. There is no doubt that science can be useful in planning and management, but it is only useful if the people who are doing the planning and management know and understand the scientific results. Often the results of scientific study are ignored because no one understands them and can use them. More and more we understand that the results of scientific investigations have to be disseminated to potential users. Technical reports and articles in scientific journals are not enough to do this. Science has to be delivered to those who need it in their language, in a way that they can easily understand. An Expert System is a computer program that embodies technical expertise, but that does not require a technical expert to operate. The program has a user interface that asks for input data in ordinary language and reports the results in a form that is not too technical and can be easily understood and used. The three DSS prototypes shown here are limited in scope but present the basic idea of how a DSS for aquaculture might work. The first (1993) example is purely fictitious but presents the elements that should be present in a working DSS. The other two examples are actually based on valid models and can be used for preliminary site selection and CC. It is possible to encapsulate complex models in an Expert System or Decision Support System in such a way that they can be run and understood by fish farmers, managers and other stakeholders. Doing this can be difficult and expensive, involving some sophisticated GIS and database programming. In areas with a lot of aquaculture it may well be worth doing it.

# 3

## The Role of Computer Models in the Regulation and Management of the Scottish Aquaculture Industry

Philip Gillibrand  
National Institute for  
Water and Atmos-  
phere Research  
Christchurch  
New Zealand

Aquaculture in Scotland, in particular the culture of Atlantic Salmon (*Salmo salar*), has expanded from experimental beginnings in Loch Ailort in the late 1960s to an annual production in the late 1990s of over 100,000 tonnes at about 350 sites with an estimated value to the national economy of £324m. Production sites are located predominantly in the sea-lochs (fiords) and voes of the western and northern coasts and islands. The pristine water quality of the coastal waters to the west and north of Scotland is a consequence of the North Atlantic origin of the water combined with the low population density in these regions. The growing industry provided invaluable employment opportunities to local rural communities, at a time when other agricultural industries were declining. But the same pristine water quality, which is so beneficial to the culturing of salmon, also gives rise to a precious ecosystem resource and multiple marine stakeholders that demand protection from unsustainable development. The goal of regulation and management of Scottish aquaculture, therefore, has been to encourage sustainable growth of the industry in order to provide jobs for local communities, whilst also protecting the integrity of unique ecosystems and environments for future generations.

Throughout the 1970s and 1980s, development of the Scottish aquaculture industry was regulated through local planning guidelines with little, if any, attention paid to potentially detrimental environmental impacts. As the finfish industry expanded, the potential for harmful effects from uncontrolled expansion became apparent from case studies. Moreover, appropriate locations for new sites became harder to identify, and producers began requesting consents for larger biomass farms at existing sites. In the 1990s, simple computer models, capable of assessing the potential nutrient enhancement in a particular sea-loch or voe due to fish farming activity, were developed to provide objective assessments of the risk of environmental harm in that location relative to other sea-lochs around the country. In that way, development could be steered away from sea-lochs with poor exchange characteristics where the nutrient emissions from farms were thought likely to have the most detrimental effects. This process culminated in the publication of the Locational Guidelines for the Authorisation of Marine Fish Farms in Scottish Waters in 1999, which categorised all sea-lochs and voes into three groups; areas classified as Category 1 were considered most sensitive to expansion and a precautionary approach to further development was recommended. Updated guidelines are published annually, based on model results for the nationwide industry.

In parallel with the development of the locational guidelines, which play a strategic role in the growth of the industry, more stringent environmental conditions were placed on individual site licenses (administered by the Scottish Environment Protection Agency). Producers were required to provide Environmental Impact Statements, which include modelling to predict the benthic impact of particulate organic carbon deposition beneath cage sites. Models have also been developed to

predict the dispersion and post-treatment in situ concentrations of sea lice chemotherapeutants, such as Slice©, Excis© and Salmosan©, and are used in the consent process for sea lice medication. The objective of all these models is to prevent unacceptable localised environmental impacts from fish farming activities.

In recent years, the transmission of pathogens and parasites between farmed and native wild fish has emerged as an area of over-riding concern. The outbreak of Infectious Salmon Anaemia (ISA) in 1998 threatened the viability of the industry, and sea lice infestations on fish farms have also been blamed, though not conclusively, for the decline of native salmon and sea trout populations. Models of the dispersal of pathogens and parasites have helped establish Area Management Agreements for the aquaculture industry, which have subsequently improved the control of sea lice numbers and limited the spread of infectious diseases.

In this presentation, I will describe the history, development and rationale of the role of computer models in the management and regulation of the Scottish aquaculture industry, from the early beginnings of objective assessment to the present day strategic framework for sustainable development of this key rural industry.

# 4

Philip Gillibrand  
National Institute for  
Water and Atmos-  
phere Research  
Christchurch  
New Zealand

## An Overview of the Computer Models Used in the Regulation and Management of the Scottish Aquaculture Industry

Since the early 1990s, computer models have played an increasingly important role in the management and regulation of the Scottish aquaculture industry. From simple box models, designed to assess the potential relative risk to sea-loch (fiord) environments due to nutrient emissions from finfish cage sites, to complex three-dimensional coupled biophysical models that predict the transport pathways and dispersal of planktonic sea lice larvae, models have contributed to the sustainable growth of the Scottish aquaculture industry whilst also enabling regulators to limit harmful effects at both local and regional scales. The models can be broken into three main groups: 1) those aimed at predicting and preventing harmful environmental impacts at local farm scales; 2) those aimed at estimating the regional, fiord basin scale, effects of (soluble) nutrients which have been used to strategically steer industry expansion away from the most vulnerable areas; 3) models used to understand and predict the transport and dispersal of pathogens and parasites, both between farms and between farms and native wild fish populations, which have contributed to the establishment of Area Management Agreements. In this presentation, I describe (in varying detail) the key models used in the regulation of Scottish aquaculture from 1990 to the present day, and highlight some recent developments in modelling the assimilative capacity of restricted exchange environments.

### Local Impact Models

Adverse impacts on the benthos beneath sites were one of the first recognised environmental effects of intensive sea-cage culture of finfish, and models to quantify potential carbon loadings on the seabed were quickly developed. One such model developed in Scotland, which now has a wide international user base, is DEPOMOD (and various related offshoots), which uses local current measurements to track the deposition of particulate carbon from farm sites and predict organic loadings and benthic impacts beneath fish cages. DEPOMOD is integral to the process for fish farm licensing in Scotland, where the spatial impact of farms is strictly controlled. Other local area models we will describe here relate to the discharge of anti-parasitic therapeutants. Models to predict the dispersion and post-treatment in situ concentrations of chemotherapeutants applied as bath treatments, such as Aquagard©, Salmosan© and Excis©, were developed to ensure that Environmental Quality Standards (EQS) set by the Scottish Environment Protection Agency (SEPA) to protect non-target marine organisms were not breached. These are typically advection-diffusion models, although the details of the models differ because the time scales on which the various EQS are applied differ, and the physical mechanisms driving dispersion also therefore vary. DEPOMOD was extended to incorporate predictions of post-treatment sediment concentrations of the in-feed therapeutant Slice©. During the application process, producers were required to demonstrate that their proposed farms could be treated for sea lice infestation without harmful side effects on the local ecosystem.

### Regional Scale Models

Fish farms emit considerable quantities of soluble nutrients, mainly nitrogen and phosphorus. In remote regions, away from areas of high population density and intensive agriculture, nutrients derived from aquaculture contribute a substantial component of the nutrient budget in semi-enclosed fjord systems, and the effects of those nutrients on local and regional ecosystem functioning is still poorly understood. A simple box model (the ECE model) calculated the balance between the total source of nitrogen from local fish farms within a particular sea-loch and the flushing rate of the sea-loch, to provide estimates of the potential nutrient enhancement above background levels. The model, which treated nitrogen as a conservative tracer, was used to rank all farmed sea-lochs by potential nitrogen enrichment in order to identify those most at risk of over-exploitation relative to their flushing rate, and steer development towards less sensitive areas. The ECE model is still used in the management of the Scottish industry, but is no longer considered fit-for-purpose. A new coupled model of physical exchange and ecological effect (the ACExR-LESV model) has recently been developed, and is currently being trialled within the Scottish advisory system.

### Pathogen and Parasite Dispersal

The transmission of pathogens and parasites between salmon farms, and between farmed and native wild fish, poses a serious threat to the aquaculture industry. Dispersal within fiordic sea-lochs is a temporally- and spatially-varying process; the simple model approach is not viable, since flow fields need to be resolved in space and time. I will describe two studies that addressed the issue of parasite and pathogen dispersal: 1) the approach taken to tackle the outbreak of Infectious Salmon Anaemia in 1998; and 2) a coupled biophysical model developed to investigate the dispersal of planktonic sea lice larvae from selected study sites. In the latter, a hydrodynamic model underpins a lagrangian model of sea lice development, behaviour and mortality to predict dispersal and infection risk from a known farm source. Both modelling approaches have contributed to the establishment of Area Management Agreements in Scotland, which have helped to reduce disease transmission and limit sea lice infestations. The models described here address the main environmental concerns that have arisen from the rapid growth of the Scottish salmon farming industry, namely organic enrichment, nutrient emissions, chemical usage and parasite and pathogen transmission. The models have been designed and used to manage an industry spread across ~350 sites in ~100 sea-lochs and voes along the Scottish coast. The industry has grown into a major rural economy, and has done so in a relatively sustainable manner, with few examples of unacceptable environmental impact. The models described in this presentation have contributed to that sustainable growth.

# 5

## Sustainable Aquaculture and Carrying Capacity in Norwegian Waters

Karin Boxaspen  
Head of Aquaculture  
Programme  
Institute of Marine  
Research  
Norway

Aquaculture is a vital industry in Norway. The greatest potential for growth is in the farming of salmon, cod and shellfish. Over the last 40 years, aquaculture has developed into a major industry in Norway, with over 800,000 tons of farmed fish produced in 2007, equivalent to around NOK 17.5 billion in first-hand turnover. Growth in the aquaculture industry cannot be determined solely by market demand; it must occur within the limits that the environment can tolerate. Sustainable production is therefore a precondition for long-term development and growth. A sustainable aquaculture industry is one which is run with consideration for the environment, and adapted to the marine environment and biological diversity. Nevertheless, the Norwegian aquaculture industry faces a range of environmental challenges. Strategy for a sustainable aquaculture is based on five main areas in which the industry impacts the environment: genetic interaction and escapes; pollution and discharges; disease, including parasites; zoning, and feed and feed resources.

### Research and Advice Aquaculture

During the process of devising the strategy, the Ministry of Fisheries and Coastal Affairs has received input from a wide variety of sources. The Directorate of Fisheries, the Norwegian Food Safety Authority, the Institute of Marine Research and the National Veterinary Institute have helped considerably with identification of the problems, and with quality assurance.

### Genetic interaction and escapes

World stocks of wild Atlantic salmon have been significantly reduced over the last 30 years. Salmon have disappeared from around 45 watercourses in Norway, and around 100 of the remaining 400 Norwegian populations are vulnerable. There is a large degree of agreement in research environments that substantial and persistent interbreeding with escaped, migrant, farmed salmon is detrimental to wild salmon. Farmed cod have proven to be more adept at escaping than salmon and rainbow trout, and relatively more cod escape than the other farmed species. This is due among other things to cod having different behaviour patterns in the cages, looking for holes, and they have even been observed chewing their way through nets. This is something which is supported by very high - and partly inexplicable - losses during production. Farmed cod which spawn in the cages represent a challenge to the genetic distinctiveness of wild cod, due to the release of fertilised eggs. A series of administrative measures have been introduced to reduce the likelihood of escape. Methods for marking fish are under development, to allow them to be traced to their origin. DNA identification is now in use to identify where escaped fish come from, and these methods have been shown to be suitable, and escape episodes have been resolved.



## 6 Use of Regulation Systems MOM and MOLO Environmental Surveillance, Modelling and use of Area in the Coastal Zone

# 6

Karin Boxaspen  
Head of Aquaculture  
Programme  
Institute of Marine  
Research  
Norway

We define the carrying capacity of a site or area used for aquaculture as the maximum quantity of fish or shellfish that can be farmed there without the environmental impacts exceeding agreed tolerance limits. These limits on permitted impacts must be measurable, and cannot be exceeded if the aquaculture industry is to be sustainable. Aquaculture affects the environment in a variety of ways: through the discharge of nutrients, excess feed and feces; by spreading infections and parasites; and through genetic influences. Each of these impacts has its own tolerance limits and its own carrying capacity. This means that the individual impact resulting in the lowest carrying capacity determines the carrying capacity of the site or area: a high carrying capacity based on the discharge of excess feed and feces is of little use if the facilities release so many larval salmon lice that wild salmon populations are endangered. In general, irreversible impacts are considered the most serious, but other factors are also taken into account, such as the size of the affected area or impacts on biodiversity. A standard has therefore been produced, "Environmental monitoring of marine fish farms" (NS 9410), describing how the seabed below and around aquaculture facilities should be monitored, in order to ensure that its carrying capacity is not exceeded. The standard consists of two surveys, one for the facility itself and one for the areas around it. The B-survey is used in the area of the facility itself, where some impact on the seabed is acceptable. It consists of three groups of parameters, and is designed to assess the environmental condition of seabeds that can range from being highly contaminated to being relatively unaffected. The C-survey is an analysis of the benthic fauna community, and is designed for larger areas around fish farms. If we want to effectively ensure that the environmental impacts of the aquaculture industry are adjusted to the local carrying capacity, we must be able to calculate the carrying capacity and monitor that it is not exceeded. This principle underpins the MOM system (the Norwegian acronym for "Modelling – Ongrowing fish farms – Monitoring"), but so far models and standardised monitoring programmes have only been developed for impact on the seabed. The goal is to develop equivalent management systems for the other important environmental impacts of aquaculture, and to use that knowledge to create comprehensive management systems. Work on integration of the area into the MOM system into a cohesive management system - MOLO (MOM–LOkalisering) (environmental monitoring - location) has been initiated. Localisation will be a central feature of the new system for zoning and environment adaptation, as we want to know where farming facilities ought to be sited, how big they can be and how they should be run.

### **MOLO: Fish farms, Monitoring and Location**

For the aquaculture industry to be sustainable, the environmental impacts produced by farms must not exceed the carrying capacity of the areas where they are located. Farmed fish and shellfish must also be kept in good conditions, and aquaculture must be coordinated with other activities that take

### **Pollution and discharges**

In general, discharges of nutrient and organic materials from fish farming are a minor environmental problem in Norway. The long coastline and extensive use of farming locations with high levels of water circulation and good water quality are contributory factors. Farming takes place in many regions in relatively deep fjords and inlets with good receiving waters, where the carrying capacity and self-purification properties are relatively good. The discharge of these wastes can however have negative local effects, depending on the location. In some aquaculture zones, regional effects cannot be excluded. The decomposition of organic materials (spilt feed and faeces) can result in oxygen reduction and a change in species diversity. Methods for monitoring the effects on the bottom and on benthic fauna under and near farming facilities have been developed. These methods (MOM: fish farms - monitoring - modelling) are defined in a standard, NS9410, and mandatory by regulation. The methods describe how effects on the sea bed are to be monitored, and which limit values (environmental standards) are to be applied to assess whether such effects are acceptable.

### **Diseases**

Disease, including parasites, continues to be a major loss factor in Norwegian aquaculture. The health situation has however been much improved over the last 20 years, thanks to vaccines and other measures launched against the most common diseases towards the end of the 1980s. Use of antibiotics can be an indicator of the state of health within aquaculture with regard to bacterial disease. Total consumption has been reduced significantly from its peak in the late 1980s and early 1990s. In 2008, a total of 905 kilos of antibiotics were used in aquaculture. Tougher requirements for operating procedures, new and better drugs, including vaccines, made a major contribution to reduced problems from bacterial disease in salmon. The biggest losses to disease within Norwegian aquaculture are due to viral diseases such as pancreas disease (PD), heart and skeletal muscle inflammation (HSMI), infectious salmon anaemia (ISA), and infectious pancreatic necrosis (IPN). The disease in farming which has the most serious impact on wild fish is primarily salmon lice. This parasite is a huge problem for both wild and farmed salmonid fish in fjords. An assessment of salmon lice in a fjord system will bring forward the knowledge of wild salmonid fish stocks and help manage salmonid fish farming. Numerical models have been used to produce time series of salmon lice distribution in the Norwegian fjord Sognefjorden. Currents and hydrography have been calculated from a high resolution, three-dimensional ocean model. The distribution of salmon lice has been calculated by a three-dimensional particle advection model including temperature dependent growth. The model results show that the variability in salmon lice distribution is huge for the Norwegian fjord areas, with spreading of lice with the currents ranging from 0 to 100 km within only a few days. The experiments with the salmon lice distribution model have shown that this tool can provide some useful information. Especially the huge potential spreading of the salmon lice and the result that salmon lice originating from the inner part of the fjord perhaps are less harmful to the smolt than those from sources in the outer part of the fjord.

### **Area management (zones)**

The aquaculture industry has a location structure and zoning which reduces impact on the environment and the risk of infection. Effective zoning facilitates maximum production within a limited geographical area and without unacceptable impact on the environment. To ensure this, we are dependent on a good zonal structure and the suitability of the location.

place along the coast. Finding suitable locations is therefore the key to ensuring that the industry is sustainable, by which we mean not only deciding where to locate farms, but also how big they should be and how they should be designed and run. The growing size of farms has made it increasingly important to find good locations and competition for space is now so fierce that the aquaculture industry must make optimal use of the available areas. Locating an aquaculture facility is therefore a complex procedure that involves analysing a number of local conditions, as well as taking into account environmental considerations, the needs of the farmed animals, and last, but by no means least, the wishes of the coastal population and other users of the coastal zone. These analyses are often so complicated that they require new tools and procedures. The Ministry of Fisheries and Coastal Affairs has therefore asked the Institute of Marine Research to prioritise the development of a comprehensive system of environmental and area planning for the aquaculture industry. The system is called MOLO (MOM – LOcation), which comes from combining the acronym MOM, which is a system for monitoring environmental impacts caused by aquaculture farms, with “location”. MOLO will consist of three separate modules:

#### **The exploration module:**

The exploration module will be used to find suitable locations and to calculate how much they can produce. It combines information about currents, depths, distances to other farms and fairways shown on electronic maps (GIS) with models to calculate carrying capacity expressed as the quantity of fish and shellfish that can be produced at a given location. The module allows you to move the farm around the map, constantly telling you how suitable the individual location is. A prototype for locating mussel farms ([www.akvavis.no](http://www.akvavis.no)) has been developed, and a prototype for salmon will be ready in autumn 2009.

#### **The governance module:**

The governance module, as its name suggests, is primarily aimed at the authorities. Nevertheless, it will also be useful to the industry, because it will map available, relevant information about an area. This means that it will show the results of environmental monitoring, sewage discharge locations, leisure areas, planning data, fairways, etc. The module will give license applicants, planners and the authorities access to the same background data on which decisions will be based.

#### **The application module:**

The application module is the final part of the system. It is an application generator that can create electronic applications based on templates produced by the authorities, including high resolution maps. This will simplify the application procedure, ensure that applications are properly presented and consistent, and provide an easy way of submitting applications electronically to the licensing authorities.

# 7

## Modelling Environmental Impact of Aquaculture

Kenneth D. Black  
Scottish Association  
for Marine Science  
Dunstaffnage Marine  
Laboratory  
Oban, Argyll PA37 1AQ,  
Scotland, UK

Sustainability is where environmental effects meet socioeconomics and markets. There are various definitions of Sustainability but, in essence, these condense around concepts relating to management. It is perfectly acceptable to exploit the environment, provided that this is done in a way which: a) does not significantly interfere with the commercial or amenity use of that environment by others; b) does not reduce the scope for future users to benefit from the environmental resource; and, c) does not significantly alter or diminish environmental quality and biodiversity per se. There are three categories to sustainability and it can be resumed with questions:

**Economic:** Does it make sufficient profit to justify the capital investment required? Who gets the benefit: the local economy or distant investors?

**Environmental:** Does the activity have significant effects on the ability of the ecosystem to provide goods and services now and in the future? Are aesthetic values degraded?

**Social:** Does local civil society benefit? Does it enhance or degrade local culture? Does it enhance social cohesion?

Short term economic benefits are sometimes used to justify activities in spite of dubious economic analyses that ignore environmental and social sustainability. In such cases crash inevitably follows boom unless institutional capacity (to regulate the industry) grows at the same time and pace as the activity.

#### **Carrying Capacity.**

The **carrying capacity** of a biological species in an environment is the population size of the species that the environment can sustain indefinitely, given the food, habitat, water (oxygen) and other necessities available in the environment. **Assimilative capacity** is the natural ability of the ecosystem to use and decompose potential pollutants without “harmful” effects to the environment. **Environmental capacity** is the ability of the environment to accommodate a particular activity or rate of activity without unacceptable impact. This includes aesthetic and other social values. Assimilative capacity. The capacity of a site, water body or region to remain within standards set to ensure ecosystem health. The quality standards may be different depending on the scale and should become more stringent with increasing scale. The scales on which aquaculture can impact on ecosystem depend on a combination of the nature of the pressure, the dispersion characteristics of the water at and near the farm site, and the response time for the impact. The CSTT proposed that 3 scales be considered, applying to what the team called zones A, B, and C. The key defining feature is the resident time of neutrally buoyant particles within the zone. Zone A is the farm scale that includes the part of the seabed that receives organic waste sinking from a farm and the part of the water column in which wastes and pollutants remain for a few hours. Zone B is the water body scale, and Zone C is the regional scale.

Assimilative capacity for what? Solid wastes are typically related with Zone A, sometimes zone B; dissolved plant nutrients with Zones A and B, medicines and chemicals, Zones A and B; escapes, Zones B and C; and parasites and diseases, Zones A, B and C.

All of these are also linked to economic and ultimately social sustainability issues. Each of these may limit the scale of aquaculture at a particular location depending on ecosystem status which can be affected by both natural and human factors. Thus assessing assimilative capacity must have a holistic dimension – there is little value in being within assimilative capacity for some of these issues but beyond it for others. A limiting factor approach may be useful i.e. an assessment of and focus on the factor that presents the most risk in a particular location. EIA should emphasise those issues that are likely to be limiting.

**Temporal Scales.** Nutrients and waste solids may represent ephemeral and reversible impacts provided that the ecosystem does not change its state at a large scale that might reduce its ability to return to some “healthy” equilibrium in an acceptable time. For example, severe depletion of oxygen within a large basin might result in the mass mortality of a large number of species and result in very slow recolonisation and return to “normal” ecosystem function. Chemicals with short-half lives that do not bio accumulate may behave similarly but persistent, bio-accumulating chemicals might present very long term damage to the ecosystem and to its ability to provide goods and services. Escapes might permanently disrupt natural populations through genetic or ecological interactions. Similarly diseases and parasites might conceivably result in the extinction of regional wild populations.

**Solid Wastes.** Well known range of benthic effects at the local scale. Cumulative effects from large numbers of closely spaced farms, is less well understood and more difficult to predict. A precautionary approach is required such that substantial deviation from Sediment/Benthic Quality Standards is only permitted on a very small percentage of the particular substrate type and that no two farms should have benthic effects that interact. Particular care must be taken to ensure that basin wide hypoxia does not arise from multiple use. Effective regulatory models are available (e.g. AutoDEPOMOD) that can help predict the likely scale and degree of impact thus ensuring, at least, that disastrous breaches of assimilative capacity are not permitted. They can also be used to determine appropriate monitoring intensities. We are currently adding the time dimension to DEPOMOD to help predict recovery times. We have recently added and tested the coupling of DEPOMOD to 3-D hydrodynamical models to consider long-range effects at dynamic sites.

**Chemical.** In Europe, resistance to sea-lice medicines is growing. In Scotland, this is despite a strategic approach to sea lice management that relies on concerted treatments by fish farmers in single year-class water-bodies and strong links with the wild fish interests through area management agreements, although these good practices have helped reduce lice on farms and minimised medicine use. Sealice medicines are the limiting factor for some Scottish fish farms i.e. the scale of the farm is determined by the amount of medicine that is consented by the regulator on the basis of EQS studies and modelling. All sites must run models under standard conditions to justify their sealice medicine consents amounts. Regulators must have the capacity to police and enforce regulations particularly in an environment where medicines are failing and breaches become more likely. In both Scotland and Norway sea lice numbers on farmed fish are subject to inspection and action if targets are not reached.

**Monitoring.** Modelling local impacts is important to set the initial scale of development. Monitoring is key to validate model predictions and to enable regulatory adjustment to farm scale. Modelling can never be a substitute for monitoring what is actually happening. For impacts at the site scale (zone A) the farmer must be expected to bear the cost of monitoring. Monitoring carried out by the farmer must be done to a code of practice that inspires public confidence. Regulators must have the capacity to conduct a significant amount of compliance auditing. For impacts at Zones B and C, regulators must take the lead on monitoring in order to protect both the ecosystem, the industry and other resource users from poor environmental performance. Regulators must have the authority to down-scale, close or relocate farms where environmental performance is poor.

**Key Challenges.** Institutional capacity to manage the fish farming industry sustainably must be incentivised amongst National and Local government regulators and planners. Planners and regulators must further develop the capacity to implement emerging best regulatory practices and to tailor these for the Chilean environment. Industry must similarly further develop the capacity to implement transparent environmental management systems and where necessary should have the appropriate incentives to do so (carrot and stick). Scientific research into the interactions of aquaculture with the environment must be given a high priority in order to best advise government on appropriate management practices. The science surrounding “assimilative capacity” is being very actively researched in many countries. The regulation and implementation of the Ecosystem Approach – of which assimilative capacity is a core tenet – is not particularly well developed anywhere, in my opinion.

## 8

## Development of a Numerical Model to Predict the Environmental Capacity in Aquaculture Centres and its Effect on Production

Marco Salamanca<sup>1</sup>  
 Patricio Campos<sup>2</sup>  
 Alfredo Troncoso<sup>1</sup>  
 Roberto Riquelme<sup>3</sup>

1. Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción.
2. Instituto de Ciencia y Tecnología, Universidad Arturo Prat.
3. Departamento de Ingeniería Matemática, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Concepción.

The main topic of this project (Fondef D0411333) is related with the oxygen availability in a system under the intensive use of a discrete water volume. In this highly complex system, farm cage systems may be considered as forced ecosystems, where fluxes exchange and transfer rates are enhanced several times with respect to natural systems not used by people. Therefore, being able to evaluate, characterize and model these systems is an even more complex task, which requires understanding how the ecosystem where this activity is carried out operates, knowing animal physiology response to the natural and not natural variability of oxygen, as a result of the growth process in a spatial and limited water volume, with the final task of modelling the ecosystem response to the impact of the cultivated organism. This allows managing the aquaculture activity, optimizing the productive cycles and consequently management plans, which result in an improvement of the sanitary fish condition and productivity, keeping the environmental quality and allowing normal operation of the adjacent natural ecosystem, may be designed. This project generated basic quantitative scientific information, in terms of production rate and oxygen consumption in a salmon cage farm. This allowed estimating the actual oxygen availability to sustain an aquaculture activity which depends on the natural availability of oxygen. The project developed a mathematical model based on oxygen advective transport and a balance between those processes that supply and consume oxygen in a given water volume, where fish salmon growth is carried out. This model was validated with field observations obtained during time series dissolved oxygen measurements. The model accuracy varied from 83 and 78%. With these values several oxygen content scenarios were modelled: i) actual salmon biomass; ii) 20% more than actual values and iii) 20% less biomass than current salmon biomass in cultivation. Results show that oxygen concentration decreases from 10 mg/L outside the cages to 3.7 mg/L inside the cages (~ 63%) with current salmon biomass. If fish biomass increases a 20%, the oxygen content decreases to 2.5 mg/L (~75%) inside the cages, oxygen level that is critical for fish growth. If the fish biomass decreases by a 20%, the oxygen decreases to 5.5 mg/L (~45%) inside the cage, maintaining the water column oxygenated, which is a positive impact. With the above information, then a maximum biomass management program can be designed to keep the fish growth optimal, managing the number of cages per centre, allowing making the necessary fish transfer among cages to keep the optimal operation of the farm. The study final product was software to calculate the optimal biomass per cage (SENCAP). This software can be easily operated by the site manager or any other person designated to carry out this activity.

## 9

## Oceanographic Monitoring and Process-Oriented Studies as a Platform to Assess the Carrying Capacity of Chilean Fjords: a case study in the Estuario Reloncavi

Fabián Tapia<sup>1</sup>  
 Giovanni Daneri<sup>1,2</sup>  
 Oscar Pizarro<sup>1</sup>  
 Humberto González<sup>1,3</sup>  
 Silvio Pantoja<sup>1</sup>  
 José Luis Iriarte<sup>1,3</sup>  
 Paulina Montero<sup>1,2</sup>

- 1: Programa COPAS Sur-Austral, Universidad de Concepción.
- 2: Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP).
- 3: Universidad Austral de Chile.

The recent sanitary crisis of the Chilean salmon industry has increased public awareness of extensive aquaculture activities and their potential impact on Patagonian ecosystems. To assess and quantitatively relate such impacts with farming activities, the concept of “carrying capacity” has been coined, and often defined as the level of biomass production beyond which water column and sediment conditions fall below pre-defined standards of environmental quality. We report the results of a recent study (2008-2009, FIP 2007-21) aimed at estimating the carrying capacity of a fjord in southern Chile (Estuario Reloncavi, 41.5°S), which is used intensively by the salmon and mussel farming industry. Our analyses combined in situ continuous records of currents and temperature variability from instruments moored along the fjord with data from seasonal oceanographic surveys conducted to characterize hydrographic structure as well as rates of key biological processes. These data and productive information gathered from the industry and the government authority were used to parameterize the MOM model (Stigebrandt et al. 2004) and, given a set of water column and sediment conditions deemed as acceptable, to estimate maximum production per farm for the two main species of salmonids farmed along the fjord: Atlantic salmon and trout. Separate analyses were performed for each of four sub-basins defined from bathymetric surveys conducted along the fjord. The annual cycle of these carrying capacity estimates was then compared with the fish production reported by farms during 2007-2008. For both species, the lowest estimates of carrying capacity corresponded to the criterion based on water column oxygen concentration. Based on this criterion, production levels reported by farms during 2007-2008 were near the carrying capacity during winter, and up to 3 times greater than carrying capacity during summer. Our analyses also suggest that a re-orientation of net pens relative to the prevailing currents could substantially increase farm-scale carrying capacity during the summer months, especially near the fjord's mouth. Our results highlight the sensitivity of carrying capacity estimates to spatial and temporal variability in the physical environment, and the need to incorporate scale (both spatial and temporal) more explicitly into a formal definition of carrying capacity to be used in future efforts to monitor and manage the aquaculture industry in southern Chile. Defining carrying capacity and a set of key environmental parameters/limits is a challenge in itself. Undertaking this type of process-oriented comprehensive studies of fjord ecosystems may provide the information that is required to accomplish this task.



# 10

## Integrated Modeling of the Austral Fjords: The MOHID Modeling System

Víctor H. Marín Ph. D.,  
Dr. (c) Antonio Tironi  
Dra. Luisa E. Delgado

Laboratorio de Modelación Ecológica  
Departamento de Ciencias Ecológicas  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Chile

There are numerous definitions for the term “carrying capacity”, from the general ones (e.g. the population size of a specie that can be held by an ecosystem, given a certain resource availability) to those directly associated to aquaculture (e.g. the sustainable production level which can be farmed by a body water without altering much the environmental integrity). Most of the studies on carrying capacity applying to coastal marine ecosystems, are based on numerical modeling development; from the simple and highly parameterized (box models) to those with hydrodynamic, explicitly bi- or tridimensional. The MOHID Water Modeling System (from the Portuguese Modelo Hidrodinâmico) was generated in 1985 as a bi-dimensional model of finite-differences approach for the tidal analysis in costal zones. In its present condition (2009), it is a tri-dimensional modeling system (finite-volumes), baroclinic, which includes numerous modules to marine ecosystems integrated analysis. MOHID allows the hydrodynamic nested modeling, which facilitates the development of complex topography coastal zone (such as the fjords of Chile), and implementation of application both Eulerians as Lagrangians. During the ECOManage project (Sixth Frame Program, European Union; <http://ecosistemas.uchile.cl>) a number of models for the Aysen Fjord, XI Region of Chile, were implemented, as well as to estuaries zones of Brazil and Argentina. The results of this international effort can be review in the e-books available at: <http://ecosistemas.uchile.cl/ecomanage/documentos/ebooks/>. The objective of this presentation is to describe the main characteristics of MOHID in respect to the hydrodynamic modeling of austral fjords, and show examples of its use in the Aysen fjord (Langragians model of wastes from fish cage farms) and in the Baker and Pascua fjord (sediments dispersion Eulerians model). Its application for carrying capacity assessment in the salmon farming industry is discussed.

# 11

## Models for Fjord Carrying Capacity Assessment Applicable to the Ecosystems at the South of Chile

Paula Moreno<sup>1</sup>  
Fabián Tapia<sup>2</sup>  
Susana Giglio<sup>3</sup>

1: Programa de Acuicultura,  
WWF Chile.  
2: Programa COPAS Sur-Austral,  
Universidad de Concepción.  
3: Universidad de Concepción.

The explosive growth of salmon farming in the South of Chile and the recent sanitary problems that this industry has had to confront, evidence the necessity of incorporating oceanography criteria and quantitative modeling tools for the environmental assessment of this activity on the aquatic ecosystems, and on other human activities developed in that region.

A number of aquaculture licenses are located in fjords and channels, mainly due to favorable physical and chemical water conditions, and to the protection that the geomorphology of these semi-closed basins confers to the farm infrastructure. These topographic, bathymetric and hydrodynamic conditions are the same that convert the fjords and channels in highly sensitive systems, potentially exposed to the impact of material waste accumulated over seabed compound of feces and waste food, and metabolic wastes from farmed fish. The fjord capacity to assimilate these input without the physical-chemical water conditions reach a minimal level of quality depend broadly on space and temporary variability of flushing rate, and the composition and metabolic capacity of benthic fauna. So, the physical and biological pattern variability work altogether to determine, from one site to another and from one time of year to the other, the “carrying capacity” or tolerance level that one basin specifically has to the material and metabolic waste input from fish farming.

Exceeding this capacity implies that the physical and chemical water and sediment conditions can, eventually, be disturbed at such a scale as an entire basin and endanger the survival of native fauna and flora, fish farming sustainability and the development of other human activities in the region. Hence, and due to the economical relevance and the level of salmon farming growth, WWF-Chile funded a revision of the available information on modeling studies to assess carrying capacity, emphasized on methods used by the leading countries in salmon farming production worldwide: Chile, Norway, Canada and Scotland.



# 12

## Production Carrying Capacity of an Area for Mussel Culture

V. Alfredo Troncoso <sup>1</sup>  
Marco Salamanca <sup>1</sup>  
Patricio Campos <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Oceanografía,  
Facultad de Ciencias  
Naturales y Oceanográficas,  
Universidad de Concepción

<sup>2</sup> Instituto de Ciencia y Tecnología,  
Universidad Arturo Prat

The Production Carrying Capacity of an area for mussel (*Mytilus chilensis*) culture was studied in the Yal Channel (Chiloé, Chile) from 2000 to 2001 (18 month). The study specific objectives were: 1) develop an approach for Production Carrying Capacity assess of an area in the inland sea of Chiloé, 2) assess the C and N mass balance, 3) develop the circulation model, 4) assess the maximal amount of C and N available into the Yal Channel (Carrying Capacity), 5) develop the advection-diffusion model for the Yal Channel, 6), 7) physical model validation, and 8) biological model validation. In a first stage, conceptually the study area and surrounding water were assumed belonging to a zone where the origin of organic material came from different sources and an in situ production. In this study we used carbon (C) and nitrogen (N) as state variables, which are transferred and/or modified by process into the compartments of the system. To understand the mechanisms that operate in the area, the mass balance was calculated, integrating yearly and resolving the local hydrodynamic. For that objective the physical boundaries of the area study to modelling was fit arbitrarily, mainly based on the movement that would follow the tidal current into the channel. The main processes that intervene in the C and N biogeochemical fluxes, then, were characterized (primary production and local hydrodynamic). To develop the activities, was necessary divide the project in four subprojects: 1) oceanography characterization and dynamic of the area, 2) physiological studies of cultured mussel, 3) quantification of primary production, and 4) numerical modelling of carrying capacity.

### Mainly results

#### 1) Hydrodynamic

##### Current intensities

The model predicts the field measures, both in base on averages and standard deviations and on the data dispersion. The measures accuracy of the current velocities predict by the model was near  $70.7\% \pm 29,3\%$

##### Currents

The dynamic are dominated by the tidal currents with a frequency of 0.08 and 0.16 (cycles x h<sup>-1</sup>), where the tidal current system shows a complex pattern as a partially progressive wave (flood tide) and stationary (ebbs tide), i.e., during the flood tide the maximal current velocities are registered one hour before the high tide, but during ebb tide the maximal current velocities fit with the high tide.

## 2) Mass balance

To establish the mass balance the following process were assess:

- a. Measures: Primary production, zooplankton ingestion and sedimentation,
- b. Assessment: Respiration and mortality of phytoplankton; zooplankton respiration, excretion,
- c. mortality and faeces production.

Besides, phyto- and zooplankton stocking, particulate carbon, and organic nitrogen (POC, NOP) was measured. Additionally, inorganic nutrients as nitrate, nitrite, phosphate and silicates also were quantified.

The annual carrying capacity in the Yal Channel was estimated from C and N mass balance and from the channel circulation model (tidal transport null), i.e., no mass changes into de Yal Channel due to transport. According to the present study the annual carrying capacity of C and N in the Yal Channel was  $2.06 \pm 1.7$  ton C x ha<sup>-1</sup> x year<sup>-1</sup> and  $0.46 \pm 0.10$  ton N x ha<sup>-1</sup> x year<sup>-1</sup>.

In 2001, only for the Vilupulli area (SW of Yal Channel) was licensed for suspension-feeding bivalve aquaculture (mainly *M. chilensis*) what represented ca. 68 ha. From our estimates, the annual carrying capacity for that area was  $140.1 \pm 115.6$  ton C x year<sup>-1</sup> and  $31.3 \pm 6.8$  ton N x year<sup>-1</sup>.

## 3) Biological Model Validation

The validation of the Primary Productivity (PP) assessed by the transport model was made through a lineal regression from discrete deep of PP modeled and PP in situ. Model explains 87.9% of primary production in situ. Alike, daily integrated primary production of the Yal Channel photic layer was validated, and in this case the model predicted from 85.5 and 88.4% of the in situ primary production when the "bottle effect" was corrected, i.e. without advection-diffusion, sedimentation, nor plankton grazing. The model predict that the annual primary production for the Yal Channel was 1,502 (g C x m<sup>-2</sup> x year<sup>-1</sup>) with a daily average of  $4,115 \pm 2.552$  (mg C x m<sup>-2</sup> x year<sup>-1</sup>).

## 4) Yal Channel Production Carrying Capacity

The production carrying capacity for Yal Channel was estimated in function of mussel size (20-70 mm), ropes number per line (155, 200, 250, 300) and number of lines (1, 2) per long-line (200 m) based on the percentage of removal of phytoplankton carbon in the three sceneries de 26,234; 80,326 and 216,09  $\mu\text{g C} \times \text{L}^{-1}$  (minimal, average and maximum, respectively). The simple lines with ropes densities of 200 or 300 per long line are enough to filter the limited phytoplankton biomass during winter time (the worst scenario)

Project funded by Fondef D098i-1054.

# 13

Roberto Riquelme<sup>1</sup>  
Marco Salamanca<sup>2</sup>  
Alfredo Troncoso<sup>2</sup>  
Patricio Campos<sup>3</sup>

1: Departamento de Ingeniería Matemática, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Concepción.  
2: Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción.  
3: Instituto de Ciencia y Tecnología, Universidad Arturo Prat

## Mathematical Model for Salmon Farming Environmental Carrying Capacity Assessment

The concept of Carrying Capacity applied to aquaculture is defined as the industrial production that can be sustained by the environment without deleterious effects. In general, the production strategy used by fish farming has generated a loss of useful sites due to saturation with organic matter. The management strategies applied by some fish farms have been not sufficient to reverse these site losses, hence the salmon farming industry depends exclusively on the environment capacity for the dilution and bio-processing of solid and dissolved wastes, and avoid the generation of anaerobic conditions which would restrict both implementation of new sites and the production of currently operating farms. The Mathematic Model, SENCAP (Salmon Environmental Capacity), is a Hydrodynamic-Biologic Model based on the oxygen advective transport and a balance among processes that generate and consume oxygen in the water volume where fish is farmed. The model integrates physical, chemical and biological knowledge, generating a tool to assess the present sites environmental conditions, and projects the future environment capacity according to its production plan. This model is a holistic and comprehensive one, and it considers the assimilative and environment capacity of the ecosystem where the farm is developed. It is not reductive, i.e., multi-parametric, understanding the relationships among the variables and fluxes existing among different compartments that interact in the ecosystem where the farm is developed. Basically the Model consists of:

- i) Hydrodynamic Model: Equations and basic variables, turbulence scheme, border conditions, Sigma-coordinates System
- ii) Numeric Scheme: Actual simulation
- iii) Oxygen consume model: Proposed model, Simplified model

The oxygen consumption model solves the modified advection-diffusion equation, considering actual border condition given by the observations and measurements made during the campaign stage and the characterization of the process variability that contributes and removes oxygen from water column by the defined coordinated system, according to the scheme of the finite-volumes selected with the changing depth, considering the local bathymetry of the experimental site. The model considers as an input variable the simulation time, cage diameter, current velocity, water temperature, average salmon weight, farm total biomass, cage number, water dissolved oxygen outside the cages and the site depth. To validate the simulation output, results of a 25 hours simulation of oxygen oscillation were compared, considering a biomass in culture and three stages: i) actual biomass, ii) 20% less biomass, and, iii) 20% more biomass. The modeling complexity corresponds to determining, efficiently, the different parameters involved, in particular determine the value of function  $\alpha$  (oxygen balance through the time) because in this value different subsystems

are involved which intervene in the oxygen consumption and production, including the fish consumption in the cage itself. It is here where a stochastically modeling for the oxygen consumption can be used, since the population varies in size and metabolism. The difficulty in a stochastically implementation is located in the necessity of a enormous computational resources, in as much as for one case the program would have to be executed at least 2,000 times, considering than to simulate one day, the program takes 4 hours, and when executing it 2,000 times it would take approximately 8,000 hours, a year. The model was validated against field observations made throughout the stage of these parameter measurements that included the characterization of the seasonal variability of this gas. Accurateness varied from 83% to 78%, and consequently some scenes were simulated, i.e. with the actual salmon biomass farmed, with 20% more and 20% less. The results show that the oxygen diminishes from 10 mg/L outside the cage to 3.7 mg/L (63%) into the cage. If the cultured biomass is increased in 20% the oxygen content falls to 2.5 mg/L (75%), value that is critical for the suitable growth of fish; and if the cultured biomass diminishes to 20%, oxygen concentration falls to 5.5 mg/L (45%), maintaining the water column adequately oxygenated and having a positive impact in the water body. As it describes the oxygen behavior in a cage, the Model allows the definition of some management strategies to improve some production practices, diminishing the environmental consequences in the whole farm site. Generally, these production practices are related mainly with the farmed biomass density management during the different stages of biological and productive cycle of salmon. In addition, it allows the optimization of the space used in the site, minimizing the environmental impact when the levels of saturation are maintaining within limits that allow the normal operation of the ecosystem where the farm is inserted.

# 14

Yarko Niño  
Departamento de  
Ingeniería Civil,  
Universidad de Chile

## Hydrodynamics and Transport Processes in the Benthic Boundary Layer

The hydrodynamics of the benthic boundary layer (BBL) of aquatic systems is discussed in the context of mass transport processes and water quality issues. The BBL is a concept used to refer to the region of the water column that is in contact and dynamically interacts with the bottom sediments of the aquatic system. This zone has strong influence on i) the flow structure, since it is the region where most of the kinetic energy of the flow is dissipated; and ii) the parameters that contribute to determine the water quality of these systems, particularly when the residence times are high, due to the mass exchange processes between the water column and the sediment bed, given the generally high accumulation of organic matter, nutrients, and contaminants in the bed sediments of natural systems affected by anthropic activity. Research on transport processes in the BBL conducted by the Water Resources and Environment group of the Universidad de Chile has focused on three related aspects:

- i) the BBL turbulent structure
- ii) sediment entrainment at the sediment-water interface (SWI), and
- iii) mass exchange processes at the SWI.

A summary of the main aspects of this research is presented, including experimental observations and models for the threshold conditions of sediment entrainment and near bed sediment concentrations, as well as field and laboratory experiments and numerical simulations of mass transfer processes at the SWI. The latter focuses on both dissolved oxygen balances and turbulence/wave effects on mass transfer rates at the SWI. Results of this research can contribute with closures that can be used by hydrodynamic and water quality models that usually do not have the spatial resolution to account for the details of transport processes at the SWI.

Mass exchange between the water column and sediment is given through diffusive sublayers. Turbulence of the Benthic Boundary Layer corresponds to the force by unit of area that the fluid exerts on the waterbed (velocity stress). These turbulent processes on the Benthic Boundary Layer are very important on transport processes and in the incorporation and sedimentation of solids found in the vicinity of the benthos. If this shear stress is big enough, it is possible that these solids are resuspended and are transported from this area into the rest of the water column. Transport processes in natural systems happen at a variety of scales. It happens often that transport processes may not be solved by the models, simply because of the large domains on which we want to work on. This incapacity of the model in solving particularly the exchange in the Benthic Boundary Layer may be dealt with using closures. Although it is clear that great scale models should be developed in order to analyze problems at a local and regional scale, micro-processes should not be forgotten. Theoretical, numerical, experimental and field research is required to develop, validate and calibrate them, for their use in models at a larger scale.

# 15

## Modelling Benthic Deposition under Fish Cages

Martín Hevia  
Fundación Chile

The success of salmon farming has brought with it concerns over the ecological impact of organic waste in the form of uneaten food and faeces, and soluble inorganic waste (nutrients). One basic question is the size and number of farms which can be sited in a given water body. Knowledge of the fate of material derived from cage farming is essential if cage farming is to be successfully managed to prevent undesirable interaction between farms and undue ecological change (Silvert, 1992).

Simple models which predict the dispersion and input of organic waste from cage fish farms can be used as management tools for the siting of farms and assessing the potential for enrichment of the benthic ecosystem. This study shows that a number of important physical features which influence the dispersion of particulate waste from fish farms can be incorporated into simple dispersion models. A modification of the sediment model originally described by Gowen et al. (1988) is presented. The modifications include: variation in bottom topography; changes in current speed with depth; correction of horizontal current flow in response to changing depth.

Models of the type showed here can be used for environmental protection and farm management. Simulation of the areal extent of waste dispersion and loading can be used to determine the location of farms, the proximity of cage flotillas and production levels. For both farm and environmental management, accurate prediction of the maximum loading of waste beneath farm cages is important.

In the context of farm and environmental management, it is suggested that accurately modelling particulate waste loading is of considerable importance if the maximum value is to be gained from using simple dispersion models as management tools.

To further examine how the modified model performs it will be necessary to model dispersion from farms in locations with complex bathymetry and current regimes. Furthermore, validation of the model can only be achieved by comparing dispersion and carbon input to the seabed with chemical and biological indicators of benthic enrichment and independent methods of estimating loading such as particle traps. However, we conclude that inclusion of bathymetry and vertical and horizontal variation in current speed into the original model makes the model more robust.

# 16

## Modeling of Reloncavi Fjord: First Results

E.M. Ovalle,  
O. Pizarro,  
J. Concha

Departamento  
de Geofísica  
Universidad de  
Concepción

Preliminary results related to the validation of numerical modeling of Reloncaví Fjord, are shown. For such purpose, the fjord was divided into four sectors (Boca, Marimeli, Puelo and Cochamó), where comparisons of field measurements are made (temperature, salinity, parallel and perpendicular velocities to the fjord) with the numerical results. The comparisons are made on the base of time averages of 3 days in the hydrodynamic variables, to eliminate the tidal effects. Simulations show characteristics of the flow that fit with observations.

**GOBIERNO DE CHILE**  
**MINISTERIO DE ECONOMIA, FOMENTO Y TURISMO**  
Subsecretaría de Pesca  
Departamento de Acuicultura  
[www.subpesca.cl](http://www.subpesca.cl)