

---

# PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA EL USO EFICIENTE DE MALLAS DE CULTIVO EN UNA EMPRESA SALMONERA

---

FRANCISCO CISTERNAS\*  
GUILLERMO DURÁN\*\*  
CRISTIAN POLGATIZ\*  
ANDRÉS WEINTRAUB\*

## Resumen

*La industria salmonera en Chile representa uno de los sectores más importantes de exportaciones de alimentos del país. Con una producción de más de 600 mil toneladas y ventas por más de 2.200 millones de dólares en 2008, es uno de los polos de desarrollos más importantes del sur de Chile. Dentro de las actividades más relevantes en el proceso de producción de esta industria, está el cultivo de salmones en el mar. Esto requiere de centros de cultivos especializados cuya mantención es realizada en tierra por talleres artesanales. El presente trabajo presenta la creación de una herramienta basada en modelos de programación entera mixta para optimizar el uso de recursos, mejorar la planificación y realizar evaluaciones económicas que facilitan el análisis y la toma de decisiones con respecto a la mantención, reparación y cambio de mallas de cultivo. El prototipo fue implementado en una de las principales empresas de la industria. Los resultados obtenidos logran reducir los costos de mantención de las mallas alrededor de un 15% y generan también diversos beneficios cualitativos.*

**Palabras Clave:** Cultivo de Salmones, Mallas de Cultivo, Planificación, Programación Lineal Entera.

---

\*Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

\*\*Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile; Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina y CONICET, Argentina.

---

## 1. Introducción

---

La introducción de especies acuícolas exóticas se produjo en Chile entre 1850 y 1920, pero los primeros salmones llegaron a nuestro país a partir de 1921, gracias a la labor del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP).

De todos modos, fue recién a principios de los años 80 que se comenzó a cultivar el salmón en Chile. Hacia 1985, existían en nuestro país 36 centros de cultivo operando y la producción total llegaba a más de 1200 toneladas. Un año más tarde comenzó el auge de la industria salmoniculora y la producción ya superó las 2100 toneladas anuales. Ese mismo año, y como muestra de una consolidación definitiva de la industria salmoniculora, nació la Asociación de Productores de Salmón y Trucha de Chile A.G, hoy SalmonChile, la Asociación Gremial que aglutina a las empresas del sector en el país.

En 1990, la salmoniculora comenzó a desarrollar reproducción en Chile y se obtuvieron las primeras Ovas nacionales de Salmón Coho, uno de los 3 tipos que hoy se cultivan (los otros dos son la Trucha y el Salmón del Atlántico). Este hito se recuerda como el primer adelanto científico chileno en el área y el punto de partida para el despegue definitivo de la industria. Desde ese momento se realizaron las mejoras más importantes en los alimentos para salmones. El aumento de los volúmenes permitió la profesionalización de la industria, incorporando los alimentos secos con crecientes contenidos de lípidos, y un balance más eficiente entre éstos y las proteínas.

No obstante los avances de la industria chilena y de los mercados, en 1998 la industria vivió uno de sus momentos más complicados debido a la crisis asiática, que hizo caer los precios en Japón, y una sobreproducción a nivel mundial. Sin embargo, y gracias a las medidas necesarias para enfrentar la situación y la correcta manera de abordar los desafíos por parte de los diversos productores, la industria pudo sobrellevar el problema y seguir aumentando su producción.

Hasta 2008 la industria salmoniculora era el cuarto sector exportador del país, generaba más de 45.000 empleos directos e indirectos, y era el segundo productor de salmones en el mundo superado sólo por Noruega <sup>1</sup>. La crisis generada en la industria el año pasado por la aparición del virus ISA en la mayor parte de los centros de cultivo de las empresas en agua-mar ha sido un fuerte golpe para su desarrollo y aún no hay datos de cuánto ha afectado a estas estadísticas.

La empresa donde se implementó la herramienta desarrollada en este trabajo es Salmones Multiexport, parte del holding empresarial Multiexport Foods. Salmones Multiexport es una de las principales empresas chilenas y mundiales

---

<sup>1</sup>Fuente: SalmonChile A.G - [www.salmonchile.cl](http://www.salmonchile.cl)

del sector. Su inicio de actividades se remonta a 1989, se dedica a la producción, procesamiento y comercialización de salmones y truchas cultivados en Chile. Sus operaciones productivas se extienden desde la IX hasta la XI región de Chile, donde cuenta con centros de pisciculturas, smoltificación, engorda y plantas de procesamiento que se encuentran entre las más eficientes del mundo. Salmones Multiexport esta integrada verticalmente, operando desde la reproducción hasta la distribución al cliente.

El cultivo del salmón se divide en tres etapas:

1. **Reproducción:** cada empresa cuenta con centros especializados de reproducción y genética, donde se producen las ovas (1 a 2 meses)
2. **Crianza en agua dulce:** en esta etapa los peces son criados en pisciculturas, hasta alcanzar los pesos requeridos para su traspaso a centros en agua dulce, donde se smoltifican <sup>2</sup>(10 a 14 meses)
3. **Engorda en agua de mar:** es la etapa más larga, en ella los peces son trasladados a los centros de cultivo ubicados en el mar, donde concluirán su desarrollo (16 a 20 meses)

En la etapa de engorda en agua de mar, los salmones son criados en balsas que contienen jaulas flotantes, las cuales poseen mallas de cultivo donde están contenidos los salmones durante todo el proceso (usaremos los términos mallas y redes como sinónimos a lo largo de este trabajo).

El objetivo del presente trabajo es optimizar el uso de recursos, mejorar la planificación y realizar evaluaciones económicas que faciliten el análisis y la toma de decisiones con respecto a la manutención, reparación y cambio de las mallas de cultivo de salmones.

El desarrollo de modelos de optimización ha estado presente dentro de la evolución del cultivo de salmones en grandes volúmenes, lo que ha sido fuente de investigación de varios autores, quienes buscando mejoras en el crecimiento y la productividad ([4], [9], [6], [1], [10], [2]), o bien mejoras en la planificación de sus cultivos ([7], [3], [8], [5]), muestran los efectos positivos, los beneficios y la necesidad de la utilización de modelos de optimización dentro de la industria del salmón.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se describe el problema a encarar. En la Sección 3 se detalla el modelo matemático desarrollado. La Sección 4 muestra los resultados y el impacto del trabajo, mientras que en la última Sección se reseñan las principales conclusiones.

---

<sup>2</sup>Smoltificación: Adaptación natural de los peces para condiciones de mayor salinidad

---

## 2. Descripción del problema

---

### 2.1. Composición de las mallas de cultivo

Las mallas de cultivo están confeccionadas con diversos tipos de **nylon** o **poliéster** (ver figura 1), lo que permite un mejor manejo y traslado por su alta flexibilidad.



Figura 1: Tipos de tejidos de mallas de cultivo

Las dimensiones más usadas son 30 metros de largo por 30 metros de ancho (usualmente llamado 30x30), o 20 metros de largo por 20 metros de ancho (usualmente llamada 20x20), con profundidades que son de 10 metros o de 17 metros (ver figura 2).

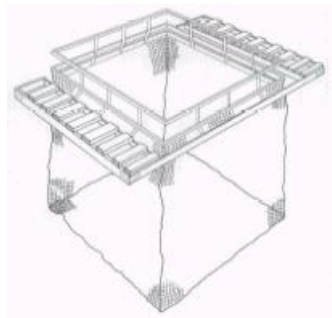


Figura 2: Malla de Cultivo

### 2.2. Mantenimiento de las mallas de cultivo

Dado que la composición de las redes de cultivo es de nylon o poliéster con el paso del tiempo se deteriora y/o se ensucia con fouling<sup>3</sup>, y por lo tanto las mallas deben ser reparadas o cambiadas para realizarles mantenimiento.

---

<sup>3</sup>Fouling: se refiere al material orgánico que se adhiere en la malla debida a su exposición al agua de mar.

La mantención de las mallas consta de 3 etapas principales, las cuales se realizan en **Talleres de Redes**, empresas dedicadas exclusivamente a esta tarea. Estas etapas son:

**Lavado** Una vez que las mallas son llevadas a los talleres están deben ser lavadas para poder extraer todo el fouling adherido a las mallas. Este proceso se realiza por medio de lavadoras de tambor, llamadas hidrolavadoras o por mangueras de alta presión. Posteriormente las redes deben ser desinfectadas para cumplir con las normativas de bioseguridad establecidas.

**Reparado** Una vez realizado la etapa anterior las mallas son revisados por cuadrillas de 3 o más personas, quienes van revisando tramo a tramo las mallas para ver cualquier desperfecto que estas tengan e ir reparando de ser necesario. Una vez que la mallas es revisada completamente esta es derivada a los centros de acopio de mallas para ser retiradas por la empresa dueña de las mallas.

**Pintado** Una vez lavadas y reparadas las mallas pueden ser pintadas con pintura anti-fouling. El pintado tiene un costo adicional, pero permite que la malla dure más tiempo en el agua.

### 2.3. Factores de deterioro en las mallas de cultivo

Durante la permanencia de las mallas de cultivo en el mar, los principales factores de deterioro o causales de mantención son:

**Crecimiento de algas** El crecimiento de algas o desarrollo de fouling en las mallas de cultivo disminuye la resistencia y aumenta el peso de la malla, generando dificultades en su manejo y aumentando el riesgo de ruptura. Asimismo, causa también un impacto negativo en el desarrollo de los peces, pues al estar la malla “sucia” debido al exceso de algas en la misma, la circulación del agua baja creando una disminución en los niveles de oxígeno en el agua, generando así aletargamiento de los peces (disminución de ingesta de alimento) y aumentando la mortalidad. El crecimiento de algas tiene directa relación con el aumento de luz solar, por lo que este efecto se ve incrementado en verano.

**Ataque de lobos marinos** Uno de los predadores naturales que los salmones tienen en esta zona son los lobos marinos. Estos mamíferos son capaces de romper las mallas de cultivo en busca de los peces, generando grandes pérdidas a las empresas. Para proteger a los centros de los ataques de los lobos marinos, las jaulas de cultivo tienen además por encima una red más resistente, conocida como **malla lobera**.

**Condiciones ambientales** En general las mallas de cultivo no sufren grandes deterioros con el clima, pero en condiciones de extremo mal tiempo o de mucho sol, las mallas aumentan su desgaste.

## 2.4. Pérdidas económicas asociadas a los factores de deterioro

Los factores de deterioro pueden ocasionar los siguientes problemas si no son tratados a tiempo:

**Ruptura de mallas** Una ruptura de malla implica una fuga masiva de salmones, con la consecuente pérdida de la inversión realizada. Si se considera que en cada jaula hay aproximadamente 90.000 peces, y si éstos tienen un peso promedio de 3 Kg. por salmón, a precio del salmón<sup>4</sup> del año 2008, las pérdidas por la ruptura de una malla superarían el medio millón de dólares.

**Problemas de crecimiento** El crecimiento de algas en la malla de cultivo disminuye los niveles de oxígeno en su interior, esto causa que los peces permanezcan un mayor tiempo en engorda, debido a un desarrollo más lento [2]. Todo esto retarda la recuperación de capital, aumenta los costos por kilogramo de salmón generado y disminuye la disponibilidad del centro para otras cosechas.

## 2.5. Medidas de prevención

Las medidas de prevención son las siguientes:

**Revisión periódica de las mallas** Consta en revisiones realizadas por buzos con el fin de ver el estado de las mallas y el nivel de crecimiento de algas.

**Mantenimiento periódico de las mallas** La forma de realizar las mantenciones periódicas involucra distintas etapas y actores. En primer lugar se solicita a una embarcación destinada exclusivamente para el movimiento y manejo de redes, la cual llamaremos **Barco de Redes**, que vaya a un centro de cultivo y cambie una malla, que está “sucia” o rota en el centro de cultivo, y la reemplace por otra que esté limpia y en óptimas condiciones. Una vez que el Barco de Redes realiza la faena de cambio, se traslada al puerto de carga y la malla se lleva por medio de camiones a talleres de mantenimiento y reparación de redes. Estos talleres limpian y reparan las mallas de cultivo, dejándolas listas para su reutilización. Es en esta etapa donde la empresa dueña de la

---

<sup>4</sup>Precio de referencia según Fondo Monetario Internacional, estadísticas de producción acuícola.

malla de cultivo decide si pinta o no pinta la malla con pintura que disminuye la adhesión de las algas.

## 2.6. Situación Actual

Como fue mencionado, las empresas poseen mecanismos de prevención ante los problemas que pudiesen estar asociados al correcto funcionamiento de las mallas de cultivo. Pero estas medidas tienen altos costos para la empresa. En el Cuadro 1 se detallan algunos costos involucrados en el mantenimiento de las mallas de cultivo, a modo de establecer un orden de magnitud.

<b>Costos Directos de Mantencion</b>	<b>Valor</b>
Contratar equipo de buceo para inspeccionar las jaulas y verificar la condición de las mallas.	US\$ 20.000 mensuales por equipo
Transporte de mallas por los Barcos de Redes.	US\$ 30.000 mensuales por barco
Mantenición y Reparación de las mallas.	US\$ 0,26 por m <sup>2</sup>
Pintado de las mallas con pintura antifouling	US\$ 0,65 por Kg
Costo de malla nueva (Precio ref.: Malla de cultivo de 30x30)	US\$ 4.400

Cuadro 1: Principales costos directos de mantenimiento de mallas de cultivo

Actualmente las decisiones que la empresa debe tomar son: cuándo instalar una malla; cuándo retirar una malla; cuándo cambiar una malla instalada, por una limpia o por otra más grande; pintar o no pintar una malla; cuántas mallas se deben comprar y cuándo comprarlas; qué centros debe visitar un barco por semana; cuándo realizar cambio de mallas loberas.

Estas decisiones, considerando además la disponibilidad de los barco de redes y las capacidades de los talleres de redes, se basan en juicios expertos sin herramientas específicas que los apoyen.

Estas decisiones se ven fuertemente afectadas por condiciones externas, como el nivel de luz solar, lo que aumenta el crecimiento de fouling en las redes; o condiciones climáticas, que impiden que los barcos realicen sus tareas. Además, la falta de programación adecuada de la llegada de las mallas al taller genera inconvenientes en los tiempos de respuesta.

Si consideramos que la cantidad de mallas que la empresa tiene ha ido en aumento (930 mallas de cultivo de 1" y de 2" aproximadamente en la actualidad), y que existe una gran variabilidad de las necesidades asociada a los recursos involucrados, lograr hacer una planificación mensual ya resulta bastante difícil. Realizar proyecciones semestrales o anuales de manera manual lleva varios días de trabajo, generando así una merma en las labores diarias del experto, así como también una incapacidad de determinar de buena

manera soluciones eficientes. Considerar todas las combinaciones posibles sin ningún soporte tecnológico (solamente planillas Excel) es prácticamente imposible, por lo que resulta necesario el uso de herramientas de programación matemática a modo de apoyar al experto en la toma de decisiones.

---

### 3. Modelo de Programación Entera Mixta

---

Se representó el problema mediante un modelo de Programación Entera Mixta (MIP). A continuación describimos algunos puntos conceptuales del modelo y su formulación matemática.

#### 3.1. Descripción conceptual del modelo matemático

Antes de dar la formulación del modelo, es necesario mencionar que el mismo toma conjuntos de *centros*<sup>5</sup> que la empresa tiene, los cuales se denominan *áreas*<sup>6</sup>. Esto nos permite resolver el problema de cada una de estas áreas por separado, pues son independientes en la operación que involucra tanto la mantención como el traslado de las redes de los centros a los talleres (hay un taller distinto asignado a cada área).

El fin de esta sección es describir conceptualmente qué es lo que hace el modelo, cuáles son sus limitantes y los resultados que entrega.

##### 1. Inputs del Modelo

A continuación se especificarán los inputs base que se le debe entregar al modelo:

- a) Horizonte de tiempo del modelo, expresado en *semanas*.
- b) Tipos de red utilizadas en el área y sus características básicas:
  - Dimensión de la red, expresado en  $m^2$ .
  - Peso de la red, expresado en *Kg*.
- c) La cantidad de jaulas totales del área.
- d) La cantidad de centros del área.
- e) Recursos disponible del área (cantidad de barcos de redes) y su rendimiento de faenas o actividades por día que pueden realizar.
- f) La permanencia máxima que una red puede tener en el agua, definido en *semanas*.

---

<sup>5</sup>Un **centro de cultivo** es un conjunto de **módulos** en los cuales están contenidos las jaulas. Cada módulo contiene 14 o 28 jaulas y en cada centro hay de uno a dos módulos.

<sup>6</sup>Estas áreas corresponden a las áreas geográficas que la misma empresa ha definido como agrupación para sus centros.



- g) Stock inicial de redes de cada tipo en el área.
  - h) El tiempo de respuesta de los talleres<sup>7</sup>, expresado en *semanas*.
  - i) Costo de mantención de redes en los talleres, expresado en  $[\frac{US\$}{m^2}]$ .
  - j) Costo de impregnar pintura antifouling en las redes en los talleres, expresado en  $[\frac{US\$}{Kg}]$ .
  - k) Costo de la pintura antifouling<sup>8</sup>, expresado en  $[\frac{US\$}{Lts}]$ .
  - l) Costo de traslado<sup>9</sup>, expresado en  $[US\$]$
2. Con la información entregada de la utilización de centros (Plan de Producción, Carta Gantt) se define cuándo y qué tipo de redes serán requeridas de cada uno de los centros. Es decir la demanda por redes (parámetro del modelo) está determinada a partir de esta información y el modelo está obligado a satisfacer los requerimientos de redes.
  3. Se generan restricciones relacionadas con los rendimientos que tienen los barcos de redes y los periodos destinados para la instalación de redes loberas. El modelo buscará de que modo cumple la demanda por redes adecuándose a los recursos disponibles.
  4. Tomando estas restricciones y consideraciones, el modelo **minimiza** los costos de mantención, de transporte y de compra de redes de cultivo.
  5. Además de entregarnos la información necesaria para poder determinar el plan de mantención para las redes, el modelo indica también la cantidad de viajes realizados hacia cada uno de los centros, la cantidad de redes utilizadas en cada periodo de tiempo y la cantidad de redes necesarias para dar cumplimiento a todo el periodo de evaluación incluyendo la cantidad que deben ser compradas (i.e. Stock crítico de redes).
  6. Los parámetros necesariamente variarán según el área que deseemos evaluar (distintos rendimientos, cantidad de barcos, número de centros, distintos tiempos de respuesta, etc), lo cual es posible de realizar sin alterar la estructura del modelo.

### 3.2. Formulación del modelo matemático

#### 1. Índices

- $t =$  Período,  $t \in \{1, \dots, T\}$ , donde  $T$  es el número total de períodos en el horizonte de planificación, medidos en meses.

<sup>7</sup>Tiempo que tarda una red en ser trasladada y reparada en el taller.

<sup>8</sup>Pintura anti-incrustantes marinos [Algas, moluscos, etc.].

<sup>9</sup>El *costo de traslado* se determina a través de la distancia (Centro - Puerto de Carga) en  $[mn]$ , el consumo de petróleo de los barcos  $[\frac{Lts}{mn}]$  y el precio del petróleo.

- $k =$  Tipo de malla,  $k \in \{1, \dots, K\}$ , donde  $K$  es el número total de tipos de mallas utilizados.
- $j =$  Jaula perteneciente a los centros abiertos,  $j \in \{1, \dots, J\}$ , donde  $J$  es el número total de jaulas en todos los centros.
- $c =$  Cento abierto,  $c \in \{1, \dots, C\}$ , donde  $C$  es el número total de centros.
- $d =$  Número de periodos que permanecerá la malla en el agua cuando la coloque,  $d \in \{1, \dots, D\}$ , donde  $D$  es el máximo de periodos que la malla puede permanecer en el agua.
- $p =$  Establece el estado de la pintura de la malla.
- $b =$  Número de barcos,  $b \in \{1, \dots, B\}$ , donde  $B$  es el número total barcos.

## 2. Parámetros

- $DDA_{kjt} =$  Demanda de mallas tipo  $k$  de la jaula  $j$  en el periodo  $t$ .
- $CPAV_{kdp} =$  Costo incurrido por mantener en el agua una malla de tipo  $k$ , por  $d$  periodos con estado de pintura  $p$  y en periodo de Verano.
- $CPAI_{kdp} =$  Costo incurrido por mantener en el agua una malla de tipo  $k$ , por  $d$  periodos con estado de pintura  $p$  y en periodo de Invierno.
- $CPA_{kdpt} =$  Costo incurrido por mantener en el agua una malla de tipo  $k$ , por  $d$  periodos con estado de pintura  $p$  y empezando en el periodo  $t$ . (este parámetro se calcula en función de los 2 anteriores)
- Semana Inicial = Indica el número de semana (correlativa del año) en que se inicia el horizonte de planificación.
- $TR =$  Tiempo que tarda una malla en ser reparada, desde que es retirada de su jaula.
- $CTrans_c =$  Costos de transporte al centro  $c$ , este costo se incurre al colocar o sacar una o más jaulas en el centro  $c$ .
- $CComp_k =$  Costo de comprar una malla de tipo  $k$ .
- $J_c =$  Índices de jaulas que pertenecen al centro  $c$ .
- $Hist_{kjp} =$  Cantidad de periodos que una malla tipo  $k$ , ha permanecido en la jaula  $j$ , con estado de pintura  $p$ , hasta hoy.
- $MInv_k =$  Cantidad de mallas tipo  $k$  que tengo en inventario.
- $Aux_{kjp} = \begin{cases} 1 & \text{si la jaula } j, \text{ tiene una malla } k, \text{ con estado de pintura } p \\ & \text{en el periodo } 0. \\ 0 & \sim \end{cases}$

- $Barcos_{bc}$  = Matriz de asignación de barcos por centro
- $Rend_{ct}$  = Rendimiento del barco b en periodo t
- $DiasLab$  = Cantidad de días laborales en una semana

3. Variables

- $X_{kjtdp} = \begin{cases} 1 & \text{si coloco la malla tipo k, en la jaula j en el periodo t,} \\ & \text{por d periodos, con estado de pintura p} \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $W_{bct} = \begin{cases} 1 & \text{si utilizo el barco b en el centro c en el periodo t} \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $U_k$  = Cantidad total de mallas tipo k que tengo que disponer para el horizonte de planeación.
- $MU_{kt}$  = Cantidad de mallas tipo k requeridas en el periodo t.
- $MComp_k$  = Cantidad de mallas tipo k que debo adicionar a mi inventario para satisfacer las necesidades del horizonte de planeación.

4. Función Objetivo

$$\begin{aligned} \min \sum_{kjtdp} CPA_{kdpt} \cdot X_{kjtdp} + \sum_k CComp_k \cdot MComp_k + \sum_{bct} CTrans_c \cdot W_{bct} \cdot 2 \\ + \sum_{k,j,d,p} X_{kj0dp} \cdot CPA_{k,Hist_{kjp+d,p},0} \end{aligned} \tag{1}$$

5. Restricciones

a) Naturaleza de las variables.

$$\begin{aligned} X_{kjtdp} & \quad \text{Binaria} \\ W_{bct}, U_k, MU_{kt}, MComp_k & \quad \text{positivas} \end{aligned} \tag{2}$$

b) Satisfacción de la demanda.

$$\sum_{p,\theta \in [0..T]: \theta \leq t, d > t - \theta} X_{kj\theta dp} \geq DDA_{kjt} \quad \forall k, j, t \tag{3}$$

c) Mallas tipo k que están siendo utilizadas este periodo.

$$\sum_{j,p,\theta \in [0..T]: \theta \leq t, d > t - \theta - TR} X_{kj\theta dp} = MU_{kt} \quad \forall k, t \tag{4}$$

d) Máximo número de mallas tipo k que están siendo utilizados.

$$MU_{kt} \leq U_k \quad \forall k, t \tag{5}$$

e) Indica si hay utilización de transporte desde o hacia el centro  $c$ .

$$\sum_{k,j \in J_c, d, p} X_{kjtdp} + \sum_{k,j \in J_c, \theta < t, \delta = t - \theta, p} X_{kj\theta\delta p} \leq W_{bct} \cdot Rend_{ct} \quad \forall c, t \quad (6)$$

f) Uso máximo de un barco en un centro en un periodo

$$W_{bct} \leq 2 \cdot Barco_{bc} \cdot DiasLab \quad \forall b, c, t \quad (7)$$

g) Calcular el número de mallas que se deben comprar.

$$MComp_k \geq U_k - MInv_k \quad \forall k \quad (8)$$

Cabe observar que el modelo maneja las semanas destinadas a cambios de mallas loberas asignando rendimiento 0 a los barcos de talleres en esas semanas (lo que implica que durante esas semanas no hay ningún cambio de mallas de cultivo).

---

## 4. Resultados e impacto

---

Se comparó el impacto del modelo contra lo realizado por la empresa, tomando como situación base una de las áreas de cultivo.

La aplicación se ejecutó en OPL 1.71, y se utilizó el solver de programación lineal entera CPLEX 11.2, en un procesador Intel®Core™DUO T7200 de 2.00 GHz y 1 GB de RAM. Los tiempos de corrida de la aplicación varían de acuerdo al tamaño de las áreas entre 15 y 30 segundos.

### 4.1. Situación Base

#### 4.1.1. Antecedentes

Para la realización de este análisis se tomó como área de evaluación el área **Dalcahue**<sup>10</sup>. Los valores de los parámetros son:

- En el área operan 3 barcos de redes.
- Cada barco puede realizar 7 actividades<sup>11</sup> en un día de trabajo.
- El área posee 6 centros de cultivo.
- El horizonte de evaluación es de un **semestre**<sup>12</sup>.

<sup>10</sup>Ubicación Geográfica: Isla Grande de Chiloé, X Región de los Lagos

<sup>11</sup>Las actividades que un barco realiza son **instalación** y **retiro** de mallas. Un **recambio** de mallas involucra las dos actividades mencionadas anteriormente

<sup>12</sup>Equivalente a 24 semanas

- Durante 6 semanas los barcos no realizarán cambios de mallas sino que estarán asignados a realizar labores de cambio de mallas loberas<sup>13</sup>.
- Existen 2 tipos de mallas de cultivo, mallas de 1” y mallas de 2”.
- El tiempo de respuesta de los talleres<sup>14</sup> es de **1 semana**.
- Stock Inicial de Mallas

Mallas 1”	Mallas 2”
35	98

Cuadro 2: Stock Inicial

#### 4.1.2. Resultados

A continuación se presentarán los resultados obtenidos para la situación base:

- Situación Base

La situación base puede ser considerada de dos formas:

- **Gasto Presupuestado:** Es aquel gasto que considerando los parámetros descritos en 4.1.1, se debieron haber efectuado en Mantenición de Mallas en un periodo de tiempo de 24 semanas, según el plan de mantención que la empresa estimó.
- **Gasto Real:** Es aquel gasto que efectivamente la empresa incurrió en Mantención de Mallas en el mismo periodo de 24 semanas. Los parámetros descritos en 4.1.1 se mantuvieron iguales.

Gasto Presupuestado Mantención de Redes [US\$]	Gasto Real Mantención de Redes [US\$]
<b>541.460</b>	<b>580.520</b>

Cuadro 3: Situación base

La diferencia entre el gasto real versus el presupuestado se debe a la poca información con que se realizan las estimaciones. Las estimaciones

<sup>13</sup>Se pueden dar escenarios en que el uso de las embarcaciones sea bajo, es decir menores que 2 actividades por semana los cuales también podrían ser considerados para las labores de cambio de mallas loberas

<sup>14</sup>Incluye tiempo de traslado

de capacidad de talleres y los movimientos de los barcos no estaban consideradas dentro del plan de mantención.

Las compras de nuevas mallas se realiza en función de los requerimientos de todas las áreas, pero la asignación de las mallas no quedaba registrada pues la distribución era en función de las contingencias que la empresa tiene en todas sus áreas. Presupuestariamente se estimaron aproximadamente 111 mallas de 2" (equivalentes a [US\$]478.500) para las 2 áreas de cultivo de la X Región de los Lagos, las cuales presentan tamaños similares lo que hace suponer que el gasto incurrido por el área en concepto de mallas nuevas compradas es de [US\$]239.250 por área.

Por lo tanto, para comparar nuestra situación base con las futuras propuestas de mejora que nos entrega el modelo, consideraremos los **gastos reales** del periodo, las mallas utilizadas y los parámetros descritos a continuación, definiendo de esta manera la **Situación Base**:

Gasto Mantención [US\$]	Gasto Transporte [US\$]	Gasto en Compra mallas 1" [US\$]	Gasto en Compra mallas 2" [US\$]
<b>580.520</b>	<b>85.072</b>	<b>0</b>	<b>239.250</b>

Cuadro 4: Valores de Gastos de la Situación base

Nº barcos operando	Rendimiento barco	Total mallas 1" utilizadas	Nº faenas con mallas 1" pintadas	Total mallas 2" utilizadas	Nº faenas con mallas 2" pintadas
<b>3</b>	<b>7</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>121</b>	<b>32</b>

Cuadro 5: Parámetros de la Situación base

- Situación Base Optimizada

Considerando los parámetros definidos en 4.1.1 y utilizando los resultados obtenidos tras aplicar el MIP desarrollado definimos la **Situación Base Optimizada**. Los resultados se describen a continuación::

Gasto Mantención [US\$]	Gasto Transporte [US\$]	Gasto en Compra mallas 1" [US\$]	Gasto en Compra mallas 2" [US\$]
<b>528.207</b>	<b>12.214</b>	<b>0</b>	<b>222.639</b>

Cuadro 6: Valores de Gastos de la Situación Optimizada

- Comparación Situación Base v/s Situación Base Optimizada

Considerando los cuadros 4 y 6 podemos construir el siguiente resumen:

Nº barcos operando	Rendimiento barco	Total mallas 1" utilizadas	Nº faenas con mallas 1" pintadas	Total mallas 2" utilizadas	Nº faenas con mallas 2" pintadas
<b>3</b>	<b>7</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>145</b>	<b>0</b>

Cuadro 7: Parámetros de la Situación Optimizada

Gasto total Sit. Base [US\$]	Gasto total Sit. Optimizada	Diferencia [US\$]
<b>904.842</b>	<b>763.060</b>	<b>141.782</b>

Cuadro 8: Diferencia en gastos

Como era de esperarse, el modelo mejoró la situación base disminuyendo los costos asociados a la mantención de las mallas de cultivo en un 16%. Además por construcción del modelo, ahora se entrega un plan de mantenimiento más acabado, ya que actualmente los planes de mantenimiento son aproximados (proyectados en su gran mayoría a estimaciones mensuales de requerimientos de mallas de cultivo por centro).

## 4.2. Resultados del Análisis de Sensibilidad

Con el fin de lograr identificar el impacto que tiene en los resultados del problema original determinadas variaciones en los parámetros, analizamos los distintos resultados ante variaciones del rendimiento de los barcos, del número de los mismos que se utilizan, del tiempo de respuesta de los talleres o de la permanencia de una malla en el agua.

### 4.2.1. Barcos de redes y rendimiento

A continuación se muestra un cuadro comparativo que muestra el costo calculado por el modelo, las cantidades de mallas requeridas y la cantidad de mallas que deben ser "pintadas" para distintos rendimientos de los barcos (expresados en actividades por barco) y distinto número de barcos utilizados<sup>15</sup>:

Del Cuadro 9 podemos realizar los siguientes comentarios:

- Aunque en general todos los resultados tienen similar cantidad de mallas utilizadas de ambos tipos, las estrategias de traslado de mallas son distintas y eso se ve reflejado en la columna de Costo del Cuadro 9, donde se aprecia la diferencia de los costos por concepto de transporte y de

<sup>15</sup>Cuando el número de barcos de redes es igual a 2, se descontará al valor de la función objetivo [US\$] 40.000, por el ahorro del arriendo de la embarcación

Nº barcos operando	Rend. Barco redes	Costo Func. Obj. [US\$]	Total mallas 1" utilizadas	Nº faenas con mallas 1" pintadas	Total mallas 2" utilizadas	Nº faenas con mallas 2" pintadas
3	10	762.295	35	0	145	0
3	9	762.591	35	0	145	0
3	8	762.557	35	0	145	0
<b>3</b>	<b>7</b>	<b>763.060</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>145</b>	<b>0</b>
3	6	760.142	36	0	144	0
3	5	765.209	35	0	145	0
3	4	762.191	35	0	143	1
2	10	722.295	35	0	145	0
2	9	722.591	35	0	145	0
2	8	722.557	35	0	145	0
2	7	722.512	35	0	145	0
2	6	723.241	35	0	145	0
2	5	723.744	35	0	144	0
2	4	726.744	35	0	145	0

Cuadro 9: Resultados análisis de sensibilidad para barcos de redes y su rendimiento

utilización de mallas. Un buen control de los rendimientos de los barcos de redes permitirá que existan ahorros significativos por este rubro en el mediano plazo.

- El costo de tener 3 barcos en el área no genera el ahorro suficiente que justifique la incorporación de una embarcación más. En periodos de tiempo que existan necesidades de embarcación con el fin de brindar apoyo a otro tipo de actividades, puede justificarse el uso de 3 embarcaciones, pero si no es tal el escenario, es recomendable dejar solamente 2 embarcaciones en el área.

#### 4.2.2. Tiempo de Respuesta de Talleres

Con el fin de entender el impacto que tiene dentro de nuestra solución los tiempos en que las mallas **no** se encuentran en las jaulas por motivos de reparado y/o traslado, se analizó como varía la solución base frente a cambios en los tiempos de respuesta:

Del Cuadro 10 podemos concluir lo siguiente:

- A medida que aumentan los tiempos de respuesta mayor es el requerimiento de mallas y de mallas pintadas para satisfacer las necesidades del área.



Tiempo de Respuesta de Taller	Costo Func. Obj. [US\$]	Total mallas 1" utilizadas	Nº faenas con mallas 1" pintadas	Total mallas 2" utilizadas	Nº faenas con mallas 2" pintadas
1	763.060	35	0	145	0
2	910.136	36	14	168	6
3	1.006.532	36	25	168	54
4	1.192.391	36	28	224	0

Cuadro 10: Resultados análisis de sensibilidad para el tiempo de respuesta de talleres

- Dentro de este parámetro existen 2 variables que **deben** ser objeto de constante control. El primero es el cumplimiento de los tiempos de reparación de los talleres y el segundo los tiempos de traslados de las mallas de cultivo desde y hacia los centros de cultivo (poniendo también reparo en los tiempos de muertos del proceso), ya que cualquier retraso en alguno de estas variables hará que la estrategia, y por ende los costos asociados, cambien.
- Los resultados obtenidos hacen pensar que es necesario crear un estándar de tiempo de permanencia de una malla en un taller. Esto nos permitiría lograr una planificación más certera pero requeriría de mayor control sobre los talleres.

#### 4.2.3. Variación de la Permanencia de una Malla en una Jaula

Con el fin de entender como el modelo varía su solución a partir de distintos rangos de permanencia de una malla en el agua, se mostrarán a continuación los resultados obtenidos. Estos resultados se obtienen a partir de modificar el parámetro *CPA* del modelo. La forma de entender esta variación es esencialmente modificando el tiempo promedio que una malla se conserva en el agua (o sea, aumentando o disminuyendo el número de semanas que una malla se mantiene en promedio en el agua).

- Con los resultados presentados en el Cuadro 11 podemos ver el impacto que tiene la estrategia a seguir según sea el criterio definido para el tiempo de permanencia de una malla en una jaula. Criterios conservadores, es decir más cautos al momento de decidir cuándo realizar un cambio de las mallas, generan mayores costos sobre aquellos criterios en que ven de modo más optimista la permanencia de las mallas en el agua.

Con la información reunida y tras el análisis realizado queda demostrado que la variable que mayor impacto causa marginalmente es la **Variación de**

Variación en el Rango de Permanencia	Costo Func. Obj. [US\$]	Total mallas 1" utilizadas	Nº faenas con mallas 1" pintadas	Total mallas 2" utilizadas	Nº faenas con mallas 2" pintadas
+2 semanas	457.823	35	0	133	0
+1 semana	590.104	35	0	140	0
...	<b>765.060</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>145</b>	<b>0</b>
-1 semana	1.024.851	35	0	150	36
-2 semanas	1.481.737	35	28	168	140

Cuadro 11: Resultados análisis de sensibilidad para la variación de la permanencia de una malla en una jaula

**la permanencia de las mallas en una jaula.** Esta es una variable que las personas encargadas de la toma de decisiones deben determinar según sea el comportamiento que ellos perciban del área geográfica en que se encuentran. El juicio de expertos en este caso es una buena aproximación a la realidad.

Los tiempos de respuestas de talleres deben ser controlados por la empresa productora para que la estrategia definida no varíe y no se deban tomar decisiones apresuradas (tanto en pintado como en compra de mallas).

Finalmente, los barcos de redes deben mantener altos rendimientos para no caer en gastos adicionales. Una manera de hacer que los administradores de barcos de redes enfoquen sus esfuerzos en mejorar sus rendimientos, es el de tener contratos con tarifas variables (por ejemplo en función de las actividades realizadas) pudiendo así mantener un alto estándar en servicio y menores costos finales para la empresa.

---

## 5. Conclusiones

---

Cómo se puede ver en este trabajo, la solución propuesta tiene múltiples ventajas con respecto a la situación base.

- Usar un MIP mejora la solución actual del problema y ayuda a una mejor planificación. La utilización de este modelo permite realizar una planificación a largo plazo (un horizonte de seis meses) mientras que antes se resolvía prácticamente semana a semana.
- Permite elaborar escenarios con variables que no son controlables, cómo variaciones climáticas, o condiciones laborales extraordinarias en el arriendo de barcos o reparación de las mallas. Con esto se pueden realizar simulaciones y evaluar configuraciones a un mucho menor costo y en un menor tiempo.

- Ayuda a responder una de las preguntas largamente sin respuesta de la industria: “¿Es rentable utilizar antifouling?”. La respuesta depende del periodo de permanencia de la red en el agua y la época del año en que se instalará la malla (debido a la intensidad del sol). Esto sorprendió a la contraparte en la empresa, pero se ajustó a la intuición que se tenía al respecto y respaldó la toma de decisiones al respecto.
- El uso de eficiente de los barcos es muy importante debido a su alto costo de arriendo y mano de obra. La herramienta generada permite evaluar el número de barcos y el riesgo que puede involucrar tener una cantidad muy ajustada a la demanda.
- Se puede involucrar a los talleres de reparación de mallas dentro de la cadena de suministro, informando con mayor anticipación el flujo de mallas, lo que les permite ajustar sus recursos, para disminuir costos y tiempos de reparación, y sobre todo tener menos incertidumbre del tiempo que tardarán en reparar las mallas. Como se vio en el análisis de sensibilidad de este parámetro, el efecto sobre los costos que tiene cada semana adicional que los talleres tardan en reparar las mallas es muy alto.
- Los tiempos de planificación disminuyen notablemente, por lo que se pueden evaluar mayores escenarios y a más largo plazo. Además, los expertos encargados del tema tienen mayor tiempo disponible para realizar otras actividades.

Todos estos beneficios detectados se resumen en una herramienta para la toma de decisiones con respecto al mantenimiento de las mallas de cultivo. La potencialidad de ahorro es importante si se utiliza con una mirada en el largo plazo.

La herramienta fue implementada de manera piloto en Salmones Multi-export, pero la extensión de esta solución a otras empresas de la industria, como empresas productoras, transportistas de redes y reparadoras de redes es evidente y representaría un beneficio importante para la industria.

Adicionalmente a los beneficios mostrados de manera explícita en este trabajo, se deben considerar otras mejoras que incorpora la solución propuesta que son difíciles de cuantificar, como lo son los beneficios asociados al mayor crecimiento de los peces debido a menores condiciones de stress y mayor limpieza de las mallas; mejores relaciones con empresas contratistas (talleres de redes, barcos de redes, etc); menor uso de personal en la creación de estos escenarios y menor tiempo de resolución de los mismos, lo que posibilita evaluar múltiples escenarios de manera rápida y eficiente, ya que actualmente la creación de cada escenario tarda aproximadamente 2 días y con la herramienta los

tiempos de resolución son menores a 30 segundos (y se consigue una planificación de mejor calidad y con mayor nivel de detalle, dado que la herramienta planifica a nivel de jaula y la elaboración manual, a nivel de centro).

Un aspecto interesante de esta herramienta es que permite al usuario forzar decisiones. Lo que permite por un lado incorporar aspectos que no fueron modelados explícitamente, como es el caso del cambio de mallas loberas. También puede ser utilizado para que el usuario experto considere en la solución imprevistos o cosas muy difíciles de modelar, cómo una huelga, o acciones que ya fueron tomadas, para que se adapte de mejor forma a la realidad. Esta flexibilidad permite que la herramienta sea mucho más aplicable, puesto que la realidad es mucho más compleja de lo que se puede modelar y de esta forma se puede adaptar con mucho mayor facilidad a las condiciones observadas.

Otro aspecto muy importante en la implementación de este trabajo, es que se desarrolló una aplicación muy flexible, que genera automáticamente gráficos de uso de mallas, costos en que se incurre, una matriz con la planificación de la mantención de las mallas, permite ingresar la historia de planificaciones previas, permite al usuario fijar algunos valores de variables de forma sencilla, usa colores para indicar pintado de mallas, entre otras cosas. Todo lo cual representa parte fundamental de la solución, puesto que sin esta interfaz amigable, a pesar de sus beneficios evidentes, sería difícil que se utilice cotidianamente.

Durante el 2008 la industria salmonera en Chile sufrió una profunda crisis impulsada por la aparición del virus ISA que detiene fuertemente el crecimiento de los salmones e incluso puede aumentar la mortalidad. Este flagelo, sumado a la crisis económica a nivel mundial, hizo que la industria tuviera que disminuir drásticamente sus dotaciones y reducir la cantidad de centros de cultivos y personal que no estuviera dedicado al proceso productivo. Es por esto que la empresa piloto congeló la implementación de la herramienta y cambió algunos procesos operativos del proceso de mantención. Por esto la herramienta a la fecha no se encuentra en uso, aunque se espera que se retome su utilización una vez que la industria se normalice.

**Agradecimientos:** A Corfo, Salmones Multiexport S.A. y el Instituto Científico Milenio “Sistemas Complejos de Ingeniería”, por el apoyo financiero para la realización de este proyecto. A Diego Delle Donne por el trabajo realizado en la programación de la aplicación; a Javier Marengo, quien brindó su apoyo en diversas etapas del trabajo; y a Rodrigo Niklitschek y Fredi Espinoza, de Salmones Multiexport, por toda su colaboración para la concreción de este proyecto. El segundo autor es parcialmente financiado por Fondecyt 1080286 y el cuarto autor es parcialmente financiado por Fondecyt 1085188.

## Referencias

- [1] W. Brown and A. Hussen. A Production Economic Analysis of the Little White Salmon and Willard National Fish Hatcheries, Report 428, Oregon State University, 1974.
- [2] V. Crampton, A. Bergheim, M. Gausen, A. Næss and P.M. Hølland. Effects of low oxygen on fish performance. Oxygen levels in commercial salmon farming conditions. *EWOS Perspective*, pp. 8-12, UK Edition N<sup>o</sup> 2, 2003.
- [3] O. Forsberg. Optimal harvesting of farmed Atlantic salmon at two cohort management strategies and different harvest operation restrictions, *Aquaculture Economics and Management*, Volume 3, Number 2, pp. 143 – 158, 1999.
- [4] O. Forsberg and A. Guttormsenb. Modeling optimal dietary pigmentation strategies in farmed Atlantic salmon: Application of mixed-integer non-linear mathematical programming techniques, *Aquaculture* 261(1), pp. 118-124, 2006.
- [5] M. Gustavson. Maximizing Profits for a Commercial Salmon Rearing Facility Using Linear Programming, Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterrey, California, 1972.
- [6] R. Hilborn and C. Walters (editors). Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty, Chapman & Hall, London, 1992.
- [7] P. Jensson and E. Gunn. Optimization of production planning in fish farming, Technical Report, University of Iceland, 2001.
- [8] P. Leung and R. Yu Optimal Partial Harvesting Schedule for Aquaculture Operations, *Marine Resource Economics*, Volume 21, pp. 301 – 315, 2006.
- [9] R. Pomeroy, B.Bravo-Ureta, D. Solís and R. Johnston. Bioeconomic modelling and salmon aquaculture: an overview of the literature, *Int. J. Environment and Pollution*, Volume 33, Number 4, pp 485 - 500, 2008.
- [10] M. Ryea and I. Maob. Nonadditive genetic effects and inbreeding depression for body weight in Atlantic salmon, *Livest. Prod. Sci.* 57, pp. 15–22, 1998.