



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

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

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

CRISTIAN RAFAEL POLGATIZ MONSALVE

PROFESOR GUIA:
GUILLERMO DURÁN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FRANCISCO CISTERNAS
PABLO REY
ANDRÉS WEINTRAUB

SANTIAGO, CHILE
ENERO 2010

*Dedicado a mis padres, Juan y Elcira, por su amor, confianza y apoyo
y a mi amor durante todos estos años, Paula*

los amo con todo mi corazón...

Agradecimientos

Para la realización de esta tesis no puedo dejar de agradecer el apoyo de varias personas que fueron fundamentales para el desarrollo de esta.

Quisiera agradecer a los profesores Guillermo Duran y Andrés Weintraub por su apoyo, motivación y quienes confiaron plenamente en mi para el desarrollo del proyecto Corfo que enmarcó esta tesis de Magíster .

Al profesor y amigo Francisco Cisternas con quien tuvimos extensas conversaciones y reuniones para finalmente construir el modelo matemático y a quien agradezco sinceramente todo el apoyo entregado.

A mis amigos Rodrigo Niklitschek por su confianza depositada en mi para la elaboración de esta tesis y Fredi Espinoza, quien fue fundamental en ayudarme a comprender el problema y resolver todas mis dudas. Sin ellos la posibilidad de realizar este proyecto no se hubiese concretado.

No quiero dejar de agradecer también a Diego Delle Donne por el desarrollo de la interfaz que permitió visualizar el modelo construido de manera sencilla y amigable para los usuarios finales.

Y finalmente quisiera agradecer a mi familia, a mis amigos y a todas las personas que contribuyeron a que esta tesis se llevase a cabo. Gracias a todos...

Resumen Ejecutivo

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 salmónes 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 sobre un 15% , reduce los tiempos de planificación de 2 días a 30 segundos, entrega una planificación obtenida de mejor calidad y detalle y genera otros beneficios cualitativos.

Índice general

Resumen Ejecutivo	III
1. Introducción	1
1.1. La Industria del Salmón en Chile	1
1.2. Salmones Multiexport S.A.	3
2. El Cultivo de Salmones	5
2.1. Reproducción	5
2.2. Crianza en Agua Dulce	6
2.2.1. Incubación	6
2.2.2. Eclosión	7
2.2.3. Alevinaje	8
2.3. Engorda en Agua Mar	8
	IV

2.3.1. Smoltificación	9
2.3.2. Engorda	10
2.3.3. Cosecha	11
3. Mallas de Cultivo	12
3.1. Composición de las mallas de cultivo	12
3.2. Mantenimiento de las mallas de cultivo	13
3.2.1. Lavado	14
3.2.2. Reparado	15
3.2.3. Factores de deterioro en las mallas de cultivo	16
3.2.4. Pérdidas económicas asociadas a los factores de deterioro	17
3.2.5. Medidas de prevención	17
4. Modelo MIP	19
4.1. Situación actual	19
4.2. Justificación de un modelo matemático para el uso eficiente de las mallas de cultivo	21
4.3. Descripción Conceptual del Modelo	22
4.4. Formulación del modelo matemático	25

5. Resultados e impacto	29
5.1. Descripción de la metodología	29
5.2. Comparación de Resultados	31
5.2.1. Antecedentes para el cálculo de la Situación Base	31
5.2.2. Resultados	32
5.3. Resultados Análisis de Sensibilidad	36
5.3.1. Barcos de redes y Rendimiento	36
5.3.2. Tiempo de Respuesta de Talleres	37
5.3.3. Variación de la Permanencia de una Malla en una Jaula	38
6. Conclusiones	40
Bibliografía	43
A. Registro del crecimiento de algas en mallas de cultivo	45
A.1. Metodología y resultados del registro	46
B. CPA : Costo de permanencia en el agua	49
B.1. Introducción	49
B.2. Metodología	50

B.3. Construcción de la función de costo	52
C. Distribución geográfica de los centros de cultivo para la Situación Base	54
D. Visualización de los Resultados de la Situación Base Optimizada	56
D.1. Plan de mantención	57
D.2. Utilización de barcos y costos asociados	58
D.3. Mallas Requeridas	59
D.4. Compra de Mallas de Cultivo	60

Índice de figuras

1.1. Producción de Salmón y Trucha Cultivado 1997 - 2007	3
2.1. Esquema de desove de salmones reproductores	6
2.2. Incubacion de ovas de salmónidos	7
2.3. Eclosión de las ovas	7
2.4. Alimentación de alevines en bateas	8
2.5. Mallas de cultivo en una balsa jaula	9
2.6. Salmones en engorda en centro de cultivo	10
2.7. Cosecha de salmones por medio de well-boat	11
2.8. Cosecha de salmones por medio de well-boat	11
3.1. Tipos de tejidos de mallas de cultivo	13
3.2. Malla de Cultivo	13
3.3. Carga de mallas de cultivo en hidrolavadora	14

ÍNDICE DE FIGURAS

3.4. Revisión de malla de cultivo a reparar	15
3.5. Proceso de pintado en taller de redes	18
A.1. Malla de cultivo recién instalada	46
A.2. Malla de cultivo después de 3 días	47
A.3. Malla de cultivo después de 6 días	47
A.4. Malla de cultivo después de 10 días	48
A.5. Malla de cultivo después de 13 días	48
C.1. Distribución geográfica de los centros de cultivo del área Dalcahue	55
D.1. Detalle de plan de mantención entregado por la herramienta	57
D.2. Detalle de utilización de barcos de redes y costos asociados	58
D.3. Detalle del tipo de mallas requeridas por periodo	59
D.4. Detalle de mallas compradas según el tipo	60

Capítulo 1

Introducción

1.1. La Industria del Salmón en Chile

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).

Una de las primeras iniciativas privadas que daría un giro radical a la salmonicultura en Chile se cristalizó en 1974 con el inicio del cultivo de trucha arco iris, con fines netamente comerciales para consumo nacional y exportación. En 1976, luego de la construcción de las dos primeras jaulas para alevines, llegaron a nuestro país 500 mil ovas de salmón Coho. En 1977 se inició un cultivo de circuito abierto y se liberaron más de 200 mil alevines de salmón Coho en el lago Popetán y 170 mil alevines de salmón Chinook en Curaco de Vélez (X región). En 1978, el aporte del Estado se hizo más importante con la creación de la Subsecretaría de Pesca y el Servicio Nacional de Pesca, Sernapesca. Así,

entre los años 1978 y 1980 se desarrollaron una serie de iniciativas privadas y se crearon distintas empresas dedicadas exclusivamente a la salmonicultura.

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 salmonicultora y la producción ya superó las 2100 toneladas anuales. Ese mismo año, y como muestra de una consolidación definitiva de la industria salmonicultora, 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 salmonicultura 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.

Junto con las mejoras en los procesos de alimentación, la industria avanzó en otras técnicas de cultivo. Actualmente, los peces se trasladan del agua hacia los equipos de selección con bombas, mientras que el conteo, selección y graduación se realiza en una sola operación, disminuyendo al máximo el contacto de los salmónidos con elementos extraños.

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.

Hoy la industria salmonicultora es el cuarto sector exportador del país, genera más de 45.000 empleos directos e indirectos, y es el segundo productor de salmones en el mundo superado sólo por Noruega ¹.

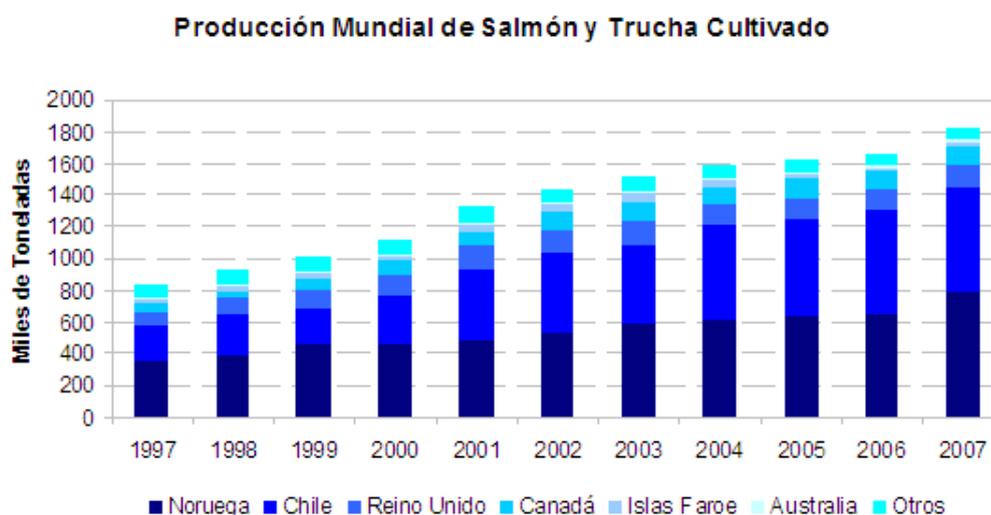


Figura 1.1: Producción de Salmón y Trucha Cultivado 1997 - 2007

1.2. Salmones Multiexport S.A.

La empresa donde se implementó la herramienta desarrollada en este trabajo es Salmones Multiexport, parte del holding empresarial Multiexport Foods.

Multiexport Foods S.A. es la empresa controladora de las compañías Salmones Multiexport S.A., Mytilus Multiexport S.A. y Cultivos Acuícolas Internacionales S.A.

¹Fuente: SalmonChile A.G - www.salmonchile.cl

- Mytilus Multiexport S.A. inició sus operaciones en el año 2005, y se dedica a la producción de mejillones o choritos (*Mytilus chilensis*) en la isla de Chiloé, X Región de Chile.
- La empresa Cultivos Acuícolas Internacionales S.A., fue establecida legalmente en 2006 y aún no inicia actividades productivas. Esta compañía se dedicará en el futuro inmediato a la producción mediante acuicultura de nuevas especies en la región de Latinoamérica.
- Salmones Multiexport S.A. es una de las principales empresas chilenas y mundiales 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.

Capítulo 2

El Cultivo de Salmones

Las etapas involucradas dentro del cultivo de salmones son **reproducción, crianza en agua dulce y engorda en agua de mar**. El detalle de cada una de estas etapas se describe a continuación¹:

2.1. Reproducción

En otoño se produce el desove de los reproductores. Para esto se cosechan las ovas de las hembras y el semen de los machos, de cuya mezcla resulta la ova fertilizada. El proceso se realiza a una temperatura aproximada de 8° Celsius.

¹Fuente: Salmón Chile A.G. - www.salmonchile.cl

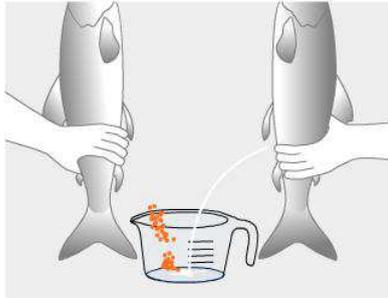


Figura 2.1: Esquema de desove de salmones reproductores

2.2. Crianza en Agua Dulce

Esta etapa se realiza en gran parte en pisciculturas dedicadas exclusivamente a la reproducción de salmones. La localización de estas está orientada principalmente en sectores con buen aporte de agua dulce (ríos o lagos), pues posterior a la cría de ellos en pisciculturas, los salmones son trasladados a centros de cultivo ubicados en sectores de agua dulce debido a que aún no están adaptados para sobrevivir en ambientes de mayor salinidad. Las sub-etapas de la Crianza en Agua Dulce son:

2.2.1. Incubación

La incubación de las ovas tiene lugar en agua dulce, donde éstas completan su desarrollo, hasta la eclosión. La velocidad con que se desarrollan las ovas depende fundamentalmente de la temperatura del agua durante la incubación. Esta etapa es muy delicada y requiere de aguas claras y bien oxigenadas, con una temperatura máxima de 12° Celsius, en condiciones de penumbra o semi penumbra. En este período, la manipulación de las ovas debe ser mínima, reduciéndose sólo a la extracción cuidadosa de ovas muertas, que se distinguen fácilmente por su color blanquecino opaco. Tras cuatro semanas en incubadora los huevos alcanzan el estado conocido como “ova ojo”, siendo lo suficientemente fuertes para tolerar su transporte.

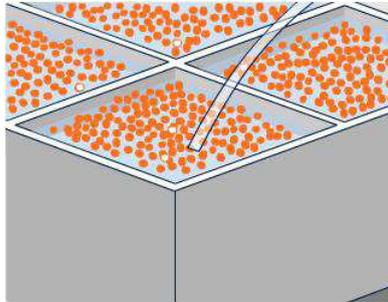


Figura 2.2: Incubación de ovas de salmónidos

2.2.2. Eclosión

Luego viene la eclosión, momento en que los pequeños alevines rompen el huevo y pueden comenzar a nadar juntos a sus sacos vitelinos (Ver figura 2.3). Esta primera etapa se desarrolla en incubadoras y termina aproximadamente un mes después, cuando se produce la completa absorción del saco.

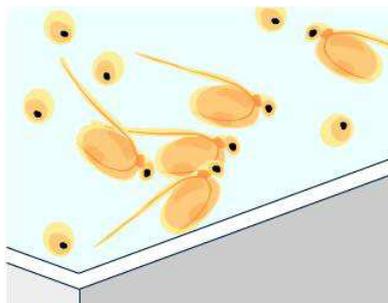


Figura 2.3: Eclosión de las ovas

2.2.3. Alevinaje

Cumplida la fase anterior, el alevín nada libremente e inicia su alimentación, ya sea en el mismo incubador, en bateas, o mallas de primera alimentación, hasta convertirse en el denominado alevín parr, o salmón juvenil. Es en esta etapa es cuando los peces crecen más rápidamente, y sus requerimientos nutricionales son mayores.

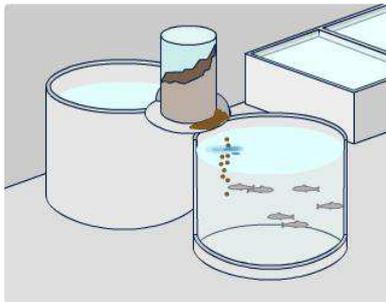


Figura 2.4: Alimentación de alevines en bateas

2.3. Engorda en Agua Mar

Para el cultivo del salmón en el mar se han desarrollado balsas jaulas flotantes, las cuales están constituidas por mallas de cultivo y estas mallas son las encargadas de contener los peces durante su etapa de desarrollo en el mar. Estas estructuras son capaces de soportar fuertes vientos, oleajes y corrientes, comunes en las X, XI y XII Regiones de Chile, principales zonas del país donde se inserta la salmonicultura.

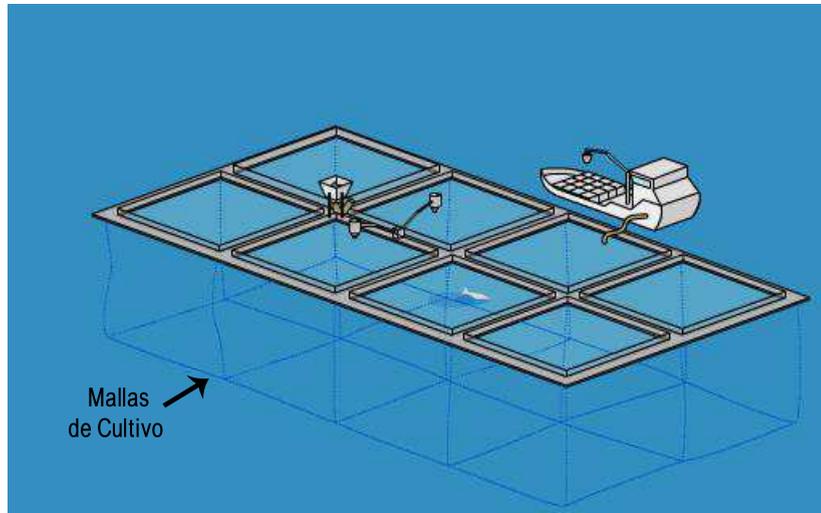
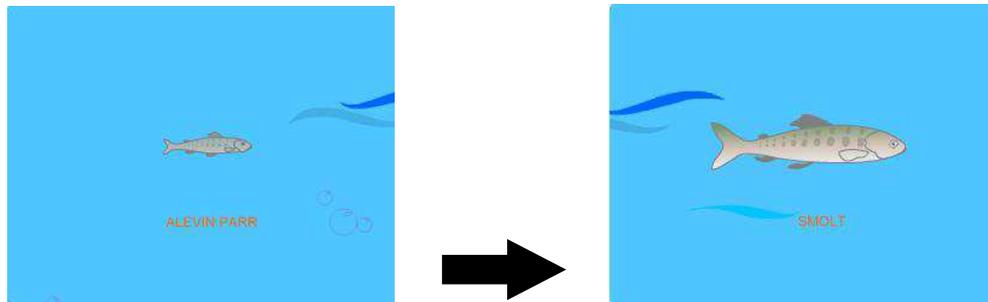


Figura 2.5: Mallas de cultivo en una balsa jaula

Existen 3 sub-etapas que caracterizan esta etapa, las cuales se desarrollan en su totalidad en balsas jaulas (o centros de cultivo) en el mar. A continuación se detallan cada una de estas sub-etapas:

2.3.1. Smoltificación

Cuando los peces son suficientemente grandes para tolerar el agua de mar, se les denomina “smolt”. Ello ocurre, normalmente, en la primavera del año siguiente a su primera alimentación. Durante el proceso denominado “smoltificación”, el salmón pierde sus marcas “parr”, el estómago se platea, y el dorso se torna verde o pardo.



2.3.2. Engorda

Es aquí donde los peces comienzan a ser alimentados con dietas especiales de engorda, suministradas y controladas, en gran medida, por sistemas automatizados que permiten un mejor aprovechamiento del alimento y un especial cuidado del medio ambiente (Ver figura 2.6). Casi un año después del ingreso a las balsas jaulas, los peces alcanzan un promedio de 10 libras de peso, momento adecuado para su cosecha.

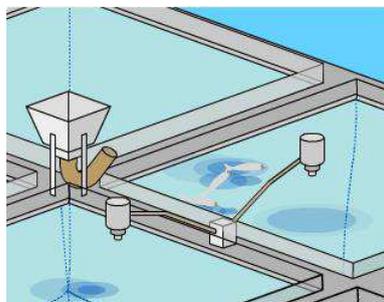


Figura 2.6: Salmones en engorda en centro de cultivo

2.3.3. Cosecha

La cosecha se inicia levantando las mallas y separando los peces por tamaño, para reunir los que serán extraídos. Esta práctica debe ser rápida y cuidadosa. Por años, este proceso se ha realizado mediante barcos especialmente acondicionados para iniciar el faenamiento junto a las mismas jaulas. Hoy son cada vez más las empresas que contratan los servicios de well-boats², que permiten llegar con los peces vivos hasta la misma planta faenadora.

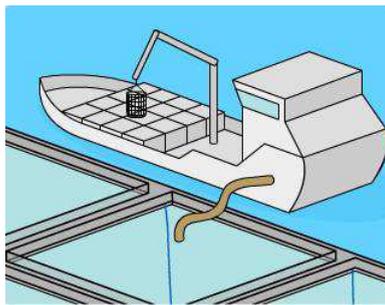


Figura 2.7: Cosecha de salmones por medio de well-boat



Figura 2.8: Cosecha de salmones por medio de well-boat

²Well-Boat: embarcación construida para el transporte de peces vivos.

Capítulo 3

Mallas de Cultivo

3.1. Composición de las mallas de cultivo

Tal como fue mencionado en la sección 2.3 , los salmones son criados en balsas jaulas flotantes, las cuales poseen mallas de cultivo donde están contenidos los salmones durante todo su proceso de engorda. Estas mallas están confeccionadas con diversos tipos de **nylon** o **poliéster** (Ver figura 3.1), lo que permite un mejor manejo y traslado por su alta flexibilidad. Estas mallas son “tejidas” según los requerimientos técnicos de los compradores quienes proporcionan el grosor, las dimensiones de la apertura del tejido, el tipo de material y el tipo de nudo por el cual será tejida la red. Las dimensiones de las mallas de cultivo dependerán de los requerimientos técnicos del cliente, pero 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 (usualmente llamada 20x20) de ancho con profundidades que son de 10 metros o de 17 metros (Ver figura 3.2).



Figura 3.1: Tipos de tejidos de mallas de cultivo

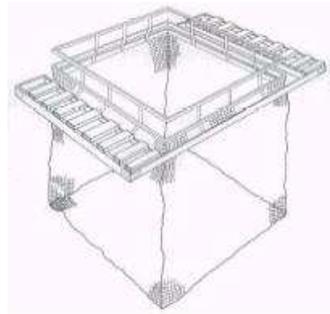


Figura 3.2: Malla de Cultivo

3.2. 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 fouling¹ y por lo tanto las mallas deben ser reparadas o cambiadas para realizarles mantención.

La mantención de las mallas consta de 2 etapas principales, las cuales se realizan en los **Talleres de Redes**, empresas dedicadas exclusivamente a la mantención de las mallas de cultivo. Estas etapas son:

¹Fouling: se refiere al material orgánico que se adhiere en la malla debida a su exposición al agua de mar.

3.2.1. Lavado

Una vez que las mallas son llevadas a los talleres, estas deben ser lavadas para poder extraer todo el fouling adherido a ellas. Este proceso se realiza por medio de lavadoras de tambor, llamadas hidrolavadoras (Ver figura 3.3) o por mangueras de alta presión. Una vez finalizado este proceso, las mallas deben ser desinfectadas para cumplir con las normativas de bioseguridad establecidas.



Figura 3.3: Carga de mallas de cultivo en hidrolavadora

3.2.2. 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, es derivada a los centros de acopio de mallas para ser retiradas posteriormente por la empresa dueña de las mallas.



Figura 3.4: Revisión de malla de cultivo a reparar

Dentro de los talleres, las mallas son codificadas para asegurar que la entrega de mallas sea a quien corresponde. En ocasiones las empresas salmoneras codifican sus mallas para ellas poder llevar un mejor control de las actividades realizadas a sus mallas.

3.2.3. 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 de la malla de cultivo y aumenta el peso de esta, generando dificultades en el manejo de la malla de cultivo y aumenta el riesgo de ruptura de la malla. El crecimiento de algas 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 por la malla baja creando una disminución en los niveles de oxígeno en el agua [1], generando así aletargamiento de los peces (disminución de ingesta de alimento) o hasta la muerte. El crecimiento de algas tiene directa relación con el aumento de luz solar, por lo que este efecto se ve incrementado en verano. En el Anexo A se muestra más detalladamente el desarrollo de fouling en las mallas.

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 salmoneras.

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.

3.2.4. Pérdidas económicas asociadas a los factores de deterioro

Como fue explicado anteriormente, los factores de deterioro pueden ocasionar los siguientes problemas si no son tratados a tiempo:

Ruptura de mallas Tener 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 estos tienen un precio promedio de 3 Kg. por salmón, a precio del salmón² del año 2008, las pérdidas superarían el medio millón de dólares.

Problemas de crecimiento Tal como fue descrito en los factores de deterioro, el crecimiento de algas en la malla de cultivo produce bajas en los niveles de alimentación de los peces. Este impacto hace que los peces estén más tiempo en las jaulas debido a su mal desarrollo, lo que conlleva a pérdidas a la empresa, tanto por el mayor esfuerzo realizado para poder lograr el estado deseado de los peces para cosecha como también por la imposibilidad de ocupar o disponer de las mallas de cultivo a tiempo para otros grupos de peces que lo requieran.

3.2.5. Medidas de prevención

Con el fin de mitigar el deterioro de las mallas de cultivo, se adoptan las siguientes medidas de prevención:

Revisión periódica de las mallas Consta en revisiones realizadas a las mallas de cultivo ejecutadas por buzos que tiene por fin ver el estado de las mallas de cultivo y el nivel de crecimiento de algas.

²Precio de referencia según Fondo Monetario Internacional, estadísticas de producción acuícola

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 se traslada por medio de camiones a talleres de mantenimiento y reparado de redes, denominados **Talleres de Redes**, quienes limpian y reparan las mallas de cultivo, dejándolas listas para su reutilización. Es en esta etapa donde la empresa dueña de la malla de cultivo decide si pinta o no pinta la malla de cultivo con pintura que disminuye la adhesión de las algas (Ver figura 3.5), la cual es denominada pintura antifouling, lo que permite extender la duración de la malla de cultivo sumergida en el mar.



Figura 3.5: Proceso de pintado en taller de redes

Capítulo 4

Modelo MIP

4.1. Situación actual

Tal como fue mencionado en el capítulo anterior, 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 las empresas. En la Tabla 4.1 se detallan algunos costos involucrados en el mantenimiento de las mallas de cultivo a modo de establecer un orden de magnitud.

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

Tabla 4.1: Principales Costos Directos de Mantenimiento de mallas de cultivo

Las decisiones que actualmente toman las empresas en relación a la mantención de las mallas de cultivo son:

- Cuando instalar una malla.
- Cuando retirar una malla.
- Cuando cambiar una malla instalada, por una limpia o por otra más grande.
- Si se debe pintar una malla.
- Cuantas mallas se deben comprar y cuando comprarlas.
- Los centros que debe visitar un barco por semana.
- Cuando realizar cambio de mallas loberas.

Estas decisiones, considerando además la disponibilidad de un barco de redes y las capacidades de los talleres de redes, se basan en juicios de expertos sin que herramientas específicas los apoyen, quienes día a día deciden de mejor manera sobre las acciones a tomar. Además, estas decisiones se ven fuertemente afectadas por condiciones externas como: i) alto nivel de luz solar, que tal como fue descrito anteriormente aumenta el crecimiento de fouling en las redes; ii) malas condiciones climáticas, que impide que los barcos

realicen sus tareas; iii) variabilidad de la capacidad de los talleres, debido precisamente a la falta de programación adecuada de la llegada de las mallas al taller.

4.2. Justificación de un modelo matemático para el uso eficiente de las mallas de cultivo

En virtud de lo señalado en la sección anterior y 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), lograr hacer una planificación mensual resulta bastante difícil. Ya de ahí realizar proyecciones semestrales o anuales, utilizando solamente planillas Excel, resultan labores que conllevan varios días de trabajo, generando así una merma en las labores diarias del experto como también una incapacidad de determinar de buena manera soluciones eficientes. Tomando en consideración el alto nivel de combinaciones y variables involucradas y el bajo nivel de tecnología empleada como soporte a la toma de decisiones, hacen que el problema de mantenimiento de las mallas de cultivo sea apto para ser modelado matemáticamente [2].

A partir del levantamiento de este problema, se ha definido el objetivo de este trabajo, cuyo fin 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 mantención, reparación y cambio de las mallas de cultivo de salmones, utilizando un modelo de optimización que contemple todas las condiciones y restricciones que posee este problema y que sea una apoyo para el experto en la toma de decisiones.

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 [3], [4], [5], [6], [7] o bien mejoras en la planificación de sus cultivos [8], [9], [10], [11], muestran

los efectos positivos, los beneficios y la necesidad de la utilización de modelos de optimización dentro de la industria del salmón.

4.3. Descripción Conceptual del Modelo

Antes de ver la formulación del modelo, es necesario mencionar que el mismo toma conjuntos de *centros*¹ que la empresa tiene, los cuales se denominan *áreas*². La utilización de recursos que están involucrados tanto en la mantención (buzos y talleres) como en el traslado de las redes es independiente por área, lo que permite resolver el problema de cada una de las áreas por separado.

El fin de esta sección es describir conceptualmente qué es lo que hace el modelo, cuáles son sus limitantes y los resultados que entrega. Cabe mencionar que dadas las características del problema se realizó **MIP** para el desarrollo del modelo matemático.

1. Inputs del Modelo

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

- a) Horizonte de tiempo del modelo, expresados 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.

¹Un **centro** o mejor dicho 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.

² Estas áreas corresponden a las áreas geográficas que la misma empresa ha definido como agrupación para sus los centros.

- e) Recursos disponible del área (cantidad de barcos de redes) y su rendimiento de faenas o actividades por día que pueden realizar.
 - f) Asignación de los barcos de redes a los centros de cultivo del área.
 - g) La permanencia máxima que una red puede tener en el agua, definido en *semanas*.
 - h) Stock inicial de redes de cada tipo en el área.
 - i) El tiempo de respuesta de los talleres³, expresados en *semanas*.
 - j) Costo de mantención de redes en los talleres, expresados en $[\frac{US\$}{m^2}]$.
 - k) Costos de impregnar pintura antifouling en las redes en los talleres, expresados en $[\frac{US\$}{Kg}]$.
 - l) Costo de la pintura antifouling⁴, expresados en $[\frac{US\$}{Lts}]$.
 - m) Costos de traslado⁵, expresados 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 es obligado a satisfacer los requerimientos de redes.
 3. Se generan restricciones que condicionan el punto anterior, específicamente las relacionadas con los rendimientos que tiene los barcos de redes y los periodos destinados para la instalación de redes loberas. Con esto el modelo buscará de que modo cumple la demanda por redes adecuándose a los recursos disponibles.
 4. Tomando estas restricciones y consideraciones, finalmente el modelo **minimiza** los costos de mantención, de transporte y de compra de redes de cultivo.
 5. El modelo aparte de entregarnos la información necesaria para poder determinar el plan de mantención para las redes, indica también la cantidad de movimiento

³Tiempo que tarda una red en ser trasladada y reparada en el taller.

⁴Pintura anti-incrustantes marinos [Algas, moluscos, etc.].

⁵El *costo de traslado* se determina a través de la distancia (Centro - Puerto de Carga) en $[mm]$, el consumo de petróleo de los barcos $[\frac{Lts}{mm}]$ y el precio del petróleo.

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 de redes que deben ser compradas (i.e. Stock crítico de redes).

6. Como fue mencionado anteriormente, los parámetros necesariamente variarán según el área que deseemos evaluar (distintos rendimientos, cantidad de barcos, N° de centros, distintos tiempos de respuesta, etc), lo cual es posible de realizar sin alterar la estructura del modelo.

4.4. 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.
- 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.

$$p = \begin{cases} 1 & \text{la malla no es pintada,} \\ 2 & \text{la malla es pintada.} \end{cases}$$

- 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_{kdp} = 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 (Ver Anexo B).

- 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. cambio de redes loberas.
- $MInv_k$ = 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

- $X_{kjtdp} = \begin{cases} 1 & \text{si coloco la malla tipo } k, \text{ en la jaula } j \text{ en el periodo } t, \\ & \text{por } d \text{ periodos, con estado de pintura } p \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $W_{bct} = \begin{cases} 1 & \text{si utilizo el barco } b \text{ en el centro } c \text{ en el periodo } t \\ 0 & \sim \end{cases}$
- 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

$$\begin{aligned} \text{mín} \sum_{k,j,t,d,p} CPA_{kdpt} \cdot X_{kjtdp} + \sum_k CComp_k \cdot MComp_k + \sum_{bct} CTrans_c \cdot W_{bct} \cdot 2 \quad (4.1) \\ + \sum_{k,j,d,p} X_{kj0dp} \cdot CPA_{k,Hist_{kj}+d,p,0} \end{aligned}$$

5. Restricciones

- a) Naturaleza de las variables.

$$X_{kjtdp}, W_{bct} \quad \text{Binaria} \quad (4.2)$$

$$U_k, MU_{kt}, MComp_k \text{ positivas}$$

- b) Satisfacción de la demanda.

$$\sum_{p,\theta \in [0..T]: \theta \leq t, d > t - \theta} X_{kj\theta dp} \geq DDA_{kjt} \quad \forall k, j, t \quad (4.3)$$

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

$$\sum_{j,p,\theta \in [0..T]: \theta \leq t, d > t - \theta - TR} X_{kj\theta dp} = MU_{kt} \quad \forall k, t \quad (4.4)$$

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

$$MU_{kt} \leq U_k \quad \forall k, t \quad (4.5)$$

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

$$\sum_{k,j \in J_c, d, p} X_{kjtdp} + \sum_{k,j \in J_c, \theta < t, \delta = t - \theta, p} X_{kj\theta\delta p} \leq W_{bct} \cdot Rend_{ct} \quad \forall c, t \quad (4.6)$$

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

$$W_{bct} \leq 2 \cdot Barco_{bc} \cdot DiasLab \quad \forall b, c, t \quad (4.7)$$

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

$$MComp_k \geq U_k - MInv_k \quad \forall k \quad (4.8)$$

Capítulo 5

Resultados e impacto

5.1. Descripción de la metodología

Este capítulo tiene 2 secciones:

1. Comparación de los resultados del modelo matemático con los resultados calculados actualmente por los expertos
2. Análisis de Sensibilidad del modelo

Para el primer punto lugar se debe definir una Situación Base del problema, de modo de tener un punto de comparación para los resultados obtenidos de nuestra modelo. Esta Situación Base será determinada por lo expertos y con la misma información que ellos hicieron sus cálculos y valorizaciones el modelo determinará una solución. Una vez

tenidos ambos valores, la de situación base y la del resultado del modelo se compararán y se concluirá en función de estos.

Posteriormente en la segunda sección, con el fin de lograr identificar el impacto que tiene en los resultados del modelo matemático construido, determinadas variaciones en los parámetros o variables, realizaremos un análisis de sensibilidad al modelo y veremos como las variables del determinan el resultado final. Las variables a evaluar son:

- Barcos de Redes y Rendimiento.
- Tiempo de Respuesta de Talleres.
- Variación de la permanencia de las mallas en una jaula.

La metodología para el desarrollo de este análisis fue la de determinar una situación base, la cual representa de mejor modo el comportamiento actual de un área de cultivo. Posteriormente se fueron variando los valores de cada una de las variables descritas anteriormente, se analizaron los resultados obtenidos y así se concluyó y se realizaron comentarios sobre el comportamiento e impacto que tienen las variables en el modelo matemático.

La aplicación se ejecutó en OPL 1.71, CPLEX 11.2, en un procesador Intel®Core™DUO T7200 de 2.00 GHz y 1 GB de RAM.

5.2. Comparación de Resultados

5.2.1. Antecedentes para el cálculo de la Situación Base

Para la realización de este análisis se tomó como área de evaluación al área **Dalcahue**¹. Los valores de sus parámetros son:

- En el área operan 3 barcos de redes.
- Cada barco puede realizar 7 actividades ² en un día de trabajo.
- El horizonte de evaluación es de un **semestre**³.
- Durante 4 semanas los barcos no realizarán cambios de mallas sino que estarán asignados a realizar labores de cambio de mallas loberas⁴.
- El área posee 6 centros de cultivo. La distribución de estos centros en el área se pueden observar en el Anexo C.
- Existen 2 tipos de mallas de cultivo, mallas de 1" y mallas de 2".
- El tiempo de respuesta de los talleres⁵ es de **1 semana**.
- Stock Inicial de Mallas

¹Ubicación Geográfica: Isla Grande de Chiloé, X Región de los Lagos

²Las actividades que un barco realiza son **instalación** y **retiro** de mallas. Un **recambio** de mallas involucra las dos actividades mencionadas anteriormente

³Equivalente a 24 semanas

⁴Se 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

⁵Incluye tiempo de traslado

Mallas 1''	Mallas 2''
35	98

Tabla 5.1: Stock Inicial

5.2.2. Resultados

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

- Situación Base

La situación base puede ser evaluada económicamente de dos formas:

- **Gasto Presupuestado** Situación Base : Es aquel gasto que considerando los parámetros descritos en 5.2.1, se debieron haber efectuado en Mantenimiento de Mallas en un periodo de tiempo de 24 semanas según el plan de mantenimiento que la empresa estimó .
- **Gasto Real** Situación Base : Es aquel gasto que efectivamente la empresa incurrió en Mantenimiento de Mallas en el mismo periodo de 24 semanas. Los parámetros descritos en 5.2.1 se mantuvieron iguales.

Gasto Presupuestado Mantenimiento de Redes [US\$]	Gasto Real Mantenimiento de Redes [US\$]
541.460	580.520

Tabla 5.2: Situación base

La diferencia entre el gasto real versus el presupuestado se debe a la poca información con que se realizan las estimaciones. Los estimaciones de capacidad de talleres y los movimientos de los barcos no estaban consideradas dentro del plan de mantenimiento, pero a pesar de esto el valor estimado por los expertos es bastante cercano a la realidad.

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 presupuestados** del periodo, las mallas estimadas y los parámetros descritos a continuación, definiendo de esta manera la **Situación Base**:

Gasto Mantenición [US\$]	Gasto Transporte [US\$]	Gasto en Compra mallas 1"[US\$]	Gasto en Compra mallas 2"[US\$]
541.460	140.000	0	239.250

Tabla 5.3: 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
3	7	35	28	120	112

Tabla 5.4: Parámetros de la Situación base

■ Situación Base Optimizada

Considerando los parámetros definidos en 5.2.1 y utilizando los resultados obtenidos tras aplicar el MIP desarrollado definimos la **Situación Base Optimizada**. Los resultados se describen a continuación:

Gasto Mantenimiento [US\$]	Gasto Transporte [US\$]	Gasto en Compra mallas 1''[US\$]	Gasto en Compra mallas 2''[US\$]
528.207	12.214	0	222.639

Tabla 5.5: Valores de Gastos de la Situación Optimizada

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
3	7	35	0	145	0

Tabla 5.6: Parámetros de la Situación Optimizada

■ Comparación Situación Base v/s Situación Base Optimizada

Considerando las tablas 5.3 y 5.5 podemos construir el siguiente resumen:

Gasto total Sit. Base [US\$]	Gasto total Sit. Optimizada	Diferencia [US\$]
920.710	763.060	157.650

Tabla 5.7: 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 17%, sin embargo esta diferencia no considera el ahorro generado por el no uso de pintura antifouling que valorizada equivale a US\$ 187.065, es decir una disminución total del 31%. Además por construcción del modelo, ahora se entrega un plan de mantenimiento más acabado, la utilización

de cada barco de redes según el centro asignado y su costo asociado, las cantidades de mallas utilizadas en cada semana y las mallas requeridas (Ver Anexo D), 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).

5.3. Resultados Análisis de Sensibilidad

5.3.1. 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” a distintos rendimientos, expresados en actividades por barco y número de barcos utilizados⁶:

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
3	7	763.060	35	0	145	0
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

Tabla 5.8: Resultados análisis de sensibilidad para barcos de redes y su rendimiento

De la Tabla 5.8 podemos realizar los siguientes comentarios:

- Aunque en general todos los resultados tienen la misma cantidad de mallas para

⁶Cuando el Nº 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

ambos tipos, las estrategias de traslado de mallas son distintas y eso se ve reflejado en la columna de Costo Func. Obj. de la Tabla 5.8 , donde se aprecia el aumento gradual de los costos por concepto de transporte y de utilización de mallas. Un buen control de los rendimientos de los barcos de redes permitirá que existan ahorros significativos 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 justificar el uso de 3 embarcaciones, pero si no es tal el escenario, es recomendable dejar solamente 2 embarcaciones en el área.

5.3.2. 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:

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

Tabla 5.9: Resultados análisis de sensibilidad para el tiempo de respuesta de talleres

De la Tabla 5.9 podemos concluir lo siguiente:

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

- 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 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 en las redes que los talleres están procesando. El esquema nuevo que se está empezando a utilizar para el sistema de costeo y de procesamiento de las mallas en los talleres permiten manejar de mejor modo el tiempo de proceso de una malla, pues será procesado independiente si fue solicitada o no.

5.3.3. 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:

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
...	765.060	35	0	145	0
-1 semana	1.024.851	35	0	150	36
-2 semanas	1.481.737	35	28	168	140

Tabla 5.10: Resultados análisis de sensibilidad para la variación de la permanencia de una malla en una jaula

Con los resultados presentados en la Tabla 5.10 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 cuando 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 nuestra variable que mayor impacto causa marginalmente es la **Variación de 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 y no debe ser tomada en menos. El juicio de expertos en este caso es una buena aproximación a la realidad.

Los tiempos de respuestas de talleres como fue mencionado debe ser controlado por la empresa para que no existan diferencias tales 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 asociados simplemente a la capacidad de actividades que un barco puede realizar. 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.

Capítulo 6

Conclusiones

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

- Usar 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 día a día.
- 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.
- Ayudó 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. El impacto del rendimiento de los barcos de redes en la planificación y su valorización puede ser medido, lo que permite a la empresa definir rangos de rendimiento permisibles a las empresas dueñas de los barcos.
- 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 la incertidumbre del tiempo que tardarán en reparar las mallas.
- Los tiempos de planificación se hacen mucho menores, por lo que se pueden evaluar mayores escenarios y a más largo plazo. Además de mejorar el tiempo de planificación, la calidad de la planificación a nivel de detalle es mucho mejor.

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 Multiexport Foods, 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) debido a una correcta planificación de recursos; 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.

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, pero que no se muestra con suficiente fuerza, 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 de un virus que impide el crecimiento de los salmones (ISA), y sumado a la crisis económica a nivel mundial, la industria tuvo 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.

Cómo trabajos futuros el modelo podría incorporar variables aleatorias, cómo el clima, para incorporar de manera automática la implicancia de esto en el recambio de mallas.

Bibliografía

- [1] 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*, pages: 8-12, UK Edition N° 2, 2003.
- [2] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky and E. Simchi-Levi. Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Cases.
- [3] O. Forsberg and A. Guttormsenb. Modeling optimal dietary pigmentation strategies in farmed Atlantic salmon: Application of mixed-integer non-linear mathematical programming techniques, 2006.
- [4] 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.
- [5] R. Hilborn and C. Walters. Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty, pp. 471 - 486, 1986.
- [6] W. Brown and A. Hussen. A production analysis of the Little White Salmon and Willard National fish hatcheries, 1974.
- [7] M. Ryea and I. Maob. Nonadditive genetic effects and inbreeding depression for body weight in Atlantic salmon, 1998.

- [8] P. Jensson and E. Gunn. Optimization of production planning in fish farming, 2001.
- [9] 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.
- [10] P. Leung and R. Yu Optimal Partial Harvesting Schedule for Aquaculture Operations, *Marine Resource Economics*, Volume 21, pp. 301 315, 2006.
- [11] M. Gustavson. Maximizing Profits for a Commercial Salmon Rearing Facility Using Linear Programming, 1972.

Anexo A

Registro del crecimiento de algas en mallas de cultivo

A.1. Metodología y resultados del registro

A modo de entender el impacto del fouling en las mallas de cultivo, se mostrará gráficamente su evolución a través de un registro fotográfico realizado a uno de los centros de cultivo de la empresa.

El registro se realizó durante el mes de Febrero del 2008 en el centro de cultivo **Huyar** perteneciente al área **Dalcahue** de la empresa, la cual está ubicada en la Isla Grande de Chiloé, X Región de los Lagos. La metodología empleada consistió en registrar periódicamente una misma sección de malla sumergida en el mar durante un mes, a modo de visualizar el desarrollo de fouling en una malla de cultivo. El fin de este registro es el de visualizar, bajo las condiciones más extremas, el desarrollo y crecimiento de algas en las mallas para así entender su impacto en los salmones contenidos en ellas.

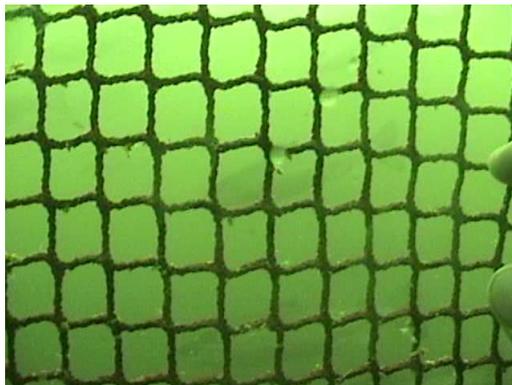


Figura A.1: Malla de cultivo recién instalada

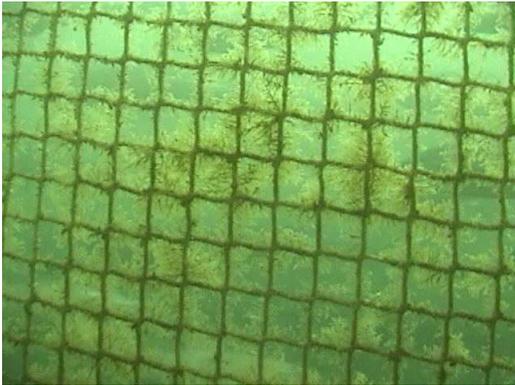


Figura A.2: Malla de cultivo después de 3 días



Figura A.3: Malla de cultivo después de 6 días

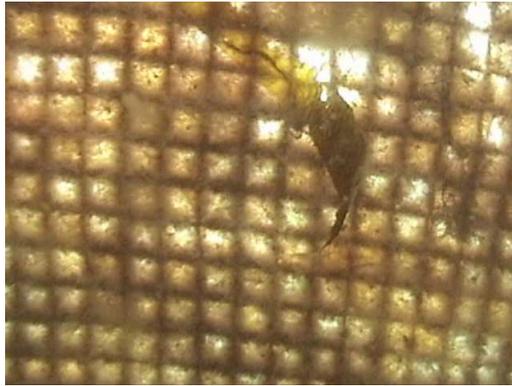


Figura A.4: Malla de cultivo después de 10 días



Figura A.5: Malla de cultivo después de 13 días

Como es posible de apreciar en las imágenes, el crecimiento de algas es evidente pasado los 6 días de la malla en el agua. Con esto queda de manifiesto que si no existen medidas de prevención adecuadas, el impacto que puede ocasionar el crecimiento de algas en el desarrollo de los salmones puede ser significativo.

Anexo B

CPA : Costo de permanencia en el agua

B.1. Introducción

El *CPA* o el costo de permanencia en el agua, se refiere al costo asociado a la mantención de las mallas de cultivo. Este costo puede ser desglosado de la siguiente manera:

- **Costo Fijo:** es el costo de lavado, reparado y servicio de pintado de mallas que un taller de redes le cobra a una empresa salmonera. Las tarifas se convienen por medio de un contrato.
- **Costo Variable:** es el costo que, dependiendo de la cantidad de periodos que permanece una malla de cultivo en el agua¹, debe incurrir una empresa salmonera. Este costo para la empresa no es de fácil valorización, pues se refiere al costo adicional

¹Se refiere a la cantidad de periodos que una malla de cultivo estuvo instalada en una jaula de un centro de cultivo.

que la empresa salmonera percibe por no ejecutar adecuadamente sus medidas de prevención a los factores de deterioro. Estos costos están descritos en la subsección 3.2.4, "*Pérdidas económicas asociadas a los factores de deterioro*". Estos costos son::

- **Baja en crecimiento de los peces:** se refiere al esfuerzo económico adicional necesario realizado por la empresa para que los salmones dentro de la jaula mantengan los niveles deseados de crecimiento. Como fue descrito en 3.2.4, el crecimiento se ve afectado por una inadecuada mantención de la malla de cultivo ya que al bajar los niveles de oxígeno los salmones bajan también su nivel de alimentación. La velocidad en que crecen las algas dependen directamente de la estación del año, de tal modo que a mayor luz solar y temperatura, mayor es el crecimiento de las algas.
- **Cobros adicionales de los talleres de redes:** debido a que una malla de cultivo al estar demasiado sucia, en las faenas de cambio de mallas y debido al peso extra que posee (por el exceso de algas en ella), es necesario cortarla en trozos para poder retirarla. El exceso de algas y la re-confección de las mallas son cobros adicionales que los talleres de redes realizan a las empresas salmoneras pues necesitan procesos de post-lavado y/o post-reparado según corresponda.
- **Ruptura de mallas:** pérdida económica asociada a la fuga de peces de una jaula.

Las empresas tienen certeza solamente de una parte de los costos al momento de realizar una mantención a sus mallas de cultivo. Sin embargo, los años que lleva desarrollándose la industria a permitido entender y distinguir el comportamiento de las mallas de cultivo según sea la época del año (invierno o verano).

B.2. Metodología

Dado que las empresas tienen conocimiento de la variabilidad de los costos asociados a 2 épocas del año, específicamente en verano e invierno, es posible determinar basándose

en el juicio de expertos el costo de cada uno de ellos. Estos costos son denominados **Costo de permanencia en el agua de invierno**, $CPAI_{kdp}$ o **Costo de permanencia en el agua de verano**, $CPAV_{kdp}$ y corresponden al costo de realizar una mantención a una malla de tipo k , con estado de pintura p con d periodos instalada en una jaula en invierno y verano respectivamente. El cálculo de cada uno de ellos está dado por la siguiente fórmula:

- Costo de permanencia en el agua en verano

$$CPAV_{kdp} = \text{Costo de mantención de una malla tipo } k \text{ en verano} \cdot 2^{TCV(dp)} \quad (\text{B.1})$$

+Costo asociado al estado de pintura p

tal que:

$TCV(dp)$ = tasa de crecimiento en verano según el periodo d y el estado de pintura p

- Costo de permanencia en el agua en invierno

$$CPAI_{kdp} = \text{Costo de mantención de una malla tipo } k \text{ en invierno} \cdot 2^{TCI(dp)} \quad (\text{B.2})$$

+Costo asociado al estado de pintura p

tal que:

$TCI(dp)$ = tasa de crecimiento en invierno según el periodo d y el estado de pintura p

Los valores de $TCV(dp)$ y el de $TCI(dp)$ son calibrados de modo de representar de mejor manera los costos de permanencia en el agua según sea la época.

Una vez que los valores de $CPAV_{kdp}$ y de $CPAI_{kdp}$ son calibrados es posible construir el **Costo de permanencia en el agua**, CPA_{kdp} , para cualquier periodo de tiempo. Dado que

$CPAV_{kdp}$ y $CPAI_{kdp}$ son los costos que mejor caracterizan cada época del año descrita, se asigna el $CPAI_{kdp}$ a la semana del día del solsticio de invierno ($t = 1$) y el $CPAV_{kdp}$ a la semana del solsticio de verano ($t = 26$). Luego se construye la función que determina el CPA_{kdp} ponderando $CPAV_{kdp}$ y $CPAI_{kdp}$ según la semana en que se desea iniciar la planificación.

B.3. Construcción de la función de costo

Para la construcción del CPA_{kdp} debemos considerar:

1. Índices

- t = Período, $t \in \{1, \dots, SemAño\}$, Donde $SemAño$ es la cantidad de semanas del año.
- k = Tipo de malla, $k \in \{1, \dots, K\}$, Donde K es el número total de tipos de mallas utilizados.
- 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.

$$p = \begin{cases} 1 & \text{la malla **no** es pintada,} \\ 2 & \text{la malla es pintada.} \end{cases}$$

2. Parámetros

- Sem = Semana inicial. Indica el número de semana en que se inicia el horizonte de planificación.
- $SemAño$ = Cantidad de semanas que tiene un año

- $CPAV_{kdp}$ = 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.

3. Función de costo de permanencia en el agua

La función de costo CPA_{kdp} se construye de la siguiente manera:

- Si $Sem + t + \lfloor d/2 \rfloor \leq 26$

$$CPA_{kdp} = CPAI_{kdp} + (CPAV_{kdp} - CPAI_{kdp}) \cdot \left[\frac{[Sem + t + \lfloor d/2 \rfloor]_{SemAño} + 1}{26} \right] \quad \forall k, d, p, t \quad (B.3)$$

- Si $Sem + t + \lfloor d/2 \rfloor > 26$

$$CPA_{kdp} = CPAV_{kdp} + (CPAI_{kdp} - CPAV_{kdp}) \cdot \left[\frac{[Sem + t + \lfloor d/2 \rfloor]_{SemAño} + 1 - 26}{26} \right] \quad \forall k, d, p, t \quad (B.4)$$

Anexo C

Distribución geográfica de los centros de cultivo para la Situación Base

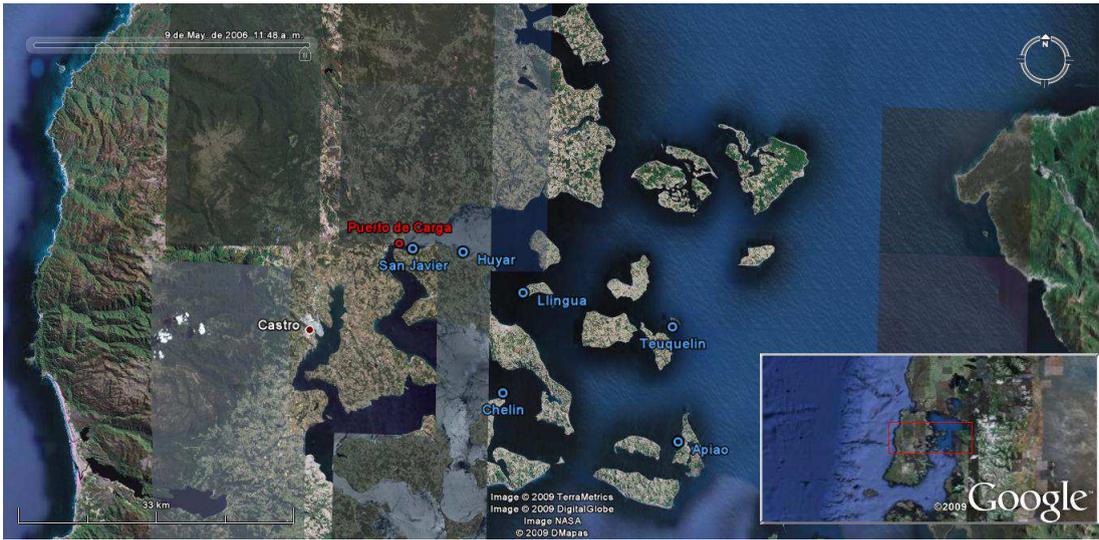


Figura C.1: Distribución geográfica de los centros de cultivo del área Dalcahue

Anexo D

Visualización de los Resultados de la Situación Base Optimizada

D.1. Plan de mantenimiento

Cambios de mallas de tipo		Malla 2"																							
Centro	Jau/Per	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
San Javier	3		3		2		2		2		2		3			3		3		3		4			
Jaulas por centro	2		3		2		2		2		3			3		3		3		4					
Demanda de jaulas	3		3		2		2		2		3			3		3		3		4					
Historia de jaulas	4		3		2		2		2		3			4			3		2		4				
Cambios de lobera	5		3		2		3		2		3			3		3		3		4					
Datos de navegaci	6		3		2		3		2		3			3		3		3		4					
Asignación de barca	7		3		2		3		2		3			3		3		3		4					
Datos económicos	8		3		2		3		2		3			4			3		3		3				
Estrategia de costc	9		3		2		3		2		3			4			3		3		3				
Solución	10		3		2		3		2		3			3		3		3		4					
Cambios de mallas	11		3		2		3		2		3			4			3		3		3				
Actividades por cei	12		3		2		3		2		3			4			3		3		4				
Mallas requeridas	13		3		2		3		2		3			3		3		3		4					
Compra de mallas	14		3		2		3		2		3			4			3		3		4				
Cheim	15		3		4				4		4			4			3		4						
	16		3		3		3		4		4			4			3		4						
	17		3		3		3		4		4			4			3		4						
	18		3		3		3		4		4			4			3		4						
	19		3		2		4				3			3		3		3		4					
	20		3		2		4				3			3		3		3		4					
	21		3		2		4				3			3		3		3		4					
	22		4				2		3		4			4			3		4						
	23		4				2		3		4			4			3		4						
	24		4				2		3		4			4			3		4						
	25		4				3		4		4			3			3		4						
	26		4				2		3		4			4			3		4						
	27		4				3		4		4			3			3		4						
	28		4				2		3		4			4			3		4						
Huyar	29		3		2		2		2		2			3		3		3		4					
	30		3		2		2		2		2			3		4			3		3				
	31		3		2		2		2		2			3		3		3		4					
	32		3		2		2		2		2			3		4			3		3				
	33		3		2		2		4		3			4			2		4						

Figura D.1: Detalle de plan de mantenimiento entregado por la herramienta

La figura D.1 nos muestra el output entregado por la herramienta, donde especifica los cambios de malla a realizar por cada jaula de cada centro. Los números representados en la planilla cumplen una doble función, pues la posición nos indica en que semana se debe realizar el cambio de mallas y el valor, son las semanas que debe permanecer la malla cambiada en esa jaula antes de ser retirada.

D.2. Utilización de barcos y costos asociados



Figura D.2: Detalle de utilización de barcos de redes y costos asociados

La herramienta desarrollada entrega de manera detallada la cantidad de movimientos que cada barco de redes realiza a cada centro y el costo que incurren por este concepto, tal como se puede apreciar en la figura D.2.

D.3. Mallas Requeridas

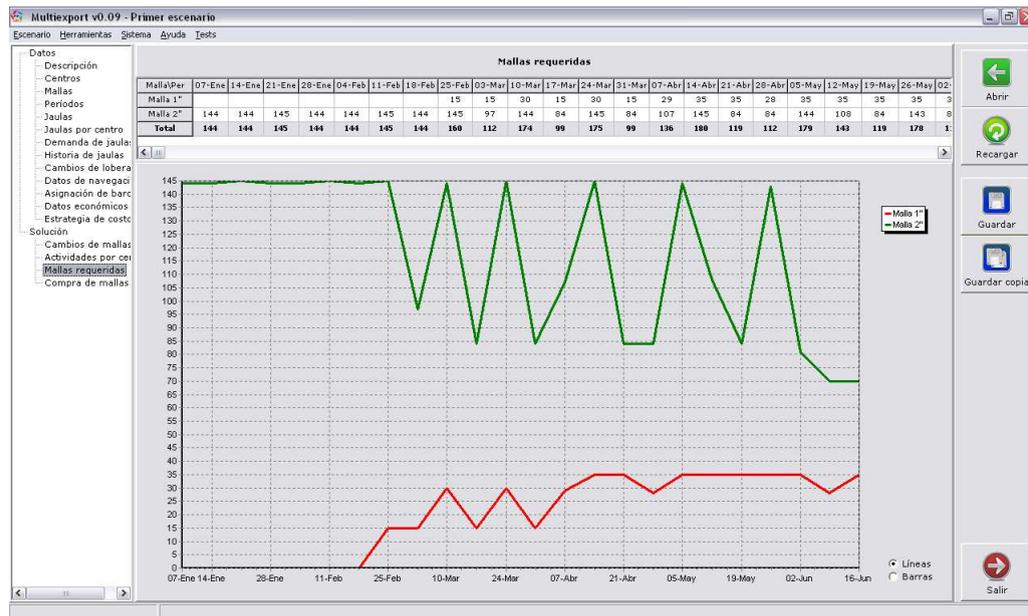
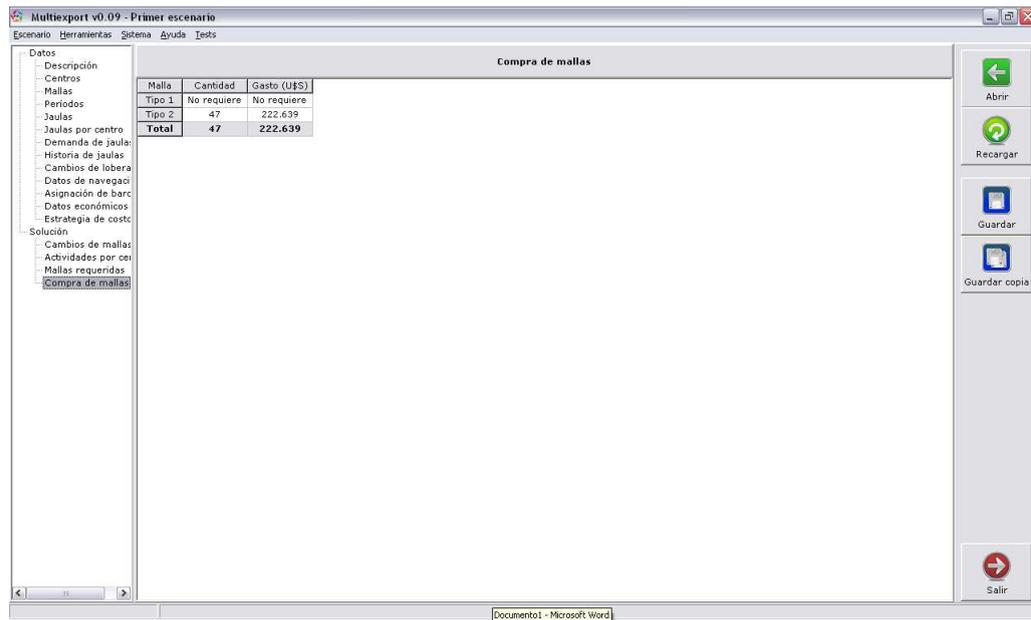


Figura D.3: Detalle del tipo de mallas requeridas por periodo

La figura D.3 nos muestra el output que la herramienta entrega sobre cada tipo de malla requerida en función de los periodos. Se grafica las cantidades de mallas de cultivo requeridas para una visualización más amigable para el usuario.

D.4. Compra de Mallas de Cultivo



The screenshot shows a software window titled 'Multiexport v0.09 - Primer escenario'. On the left is a tree view with 'Compra de mallas' selected. The main area displays a table with the following data:

Malla	Cantidad	Gasto (U\$S)
Tipo 1	No requiere	No requiere
Tipo 2	47	222.639
Total	47	222.639

On the right side of the window, there are buttons for 'Abrir', 'Recargar', 'Guardar', 'Guardar copia', and 'Salir'.

Figura D.4: Detalle de mallas compradas según el tipo

La figura D.4 muestra el output que la herramienta entrega en relación a la cantidad de mallas y el costo asociado a la compra de mallas nuevas.