



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

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA PROGRAMACIÓN DE COSECHA FORESTAL  
CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE ADYACENCIA E IMPACTO AMBIENTAL  
ESTUDIO DE CASO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MARIO ENRIQUE VALENZUELA SANDOVAL

PROFESOR GUÍA:  
RAFAEL EPSTEIN NUMHAUSER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE  
GUILLERMO DURAN

SANTIAGO DE CHILE  
2015

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE: Grado de Magíster en  
Gestión de Operaciones.  
POR: Mario Enrique Valenzuela Sandoval  
FECHA: 27/05/2015  
PROFESOR GUÍA: Rafael Epstein N.

## PROPUESTA METODOLÓGICA PARA PROGRAMACIÓN DE COSECHA FORESTAL CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE ADYACENCIA E IMPACTO AMBIENTAL ESTUDIO DE CASO

El presente trabajo desarrolla una secuencia de intervenciones de cosecha forestal que incorporan restricciones de adyacencia en una zona de estudio que posee lugares ambientalmente sensibles donde la cosecha forestal puede generar grandes impactos sobre el paisaje.

Se generaron coberturas de información gráfica de la zona de estudio, incluyendo superficie de bosques y coberturas de visibilidad. Con esto se implementó un modelo matemático de programación lineal entera binaria. El desarrollo del modelo consideró tres etapas: desarrollo de un modelo básico que considera sólo restricciones de adyacencia denominado Modelo I. A este modelo se le agregaron restricciones de índole operativa lo que generó el Modelo II y por último, se incluyeron penalizaciones de la función objetivo cuando se intervienen zonas que son catalogadas como visibles y que por ende generan impacto visual, esto se tradujo en el Modelo III.

El Modelo III (el de mayores restricciones) programó un 91,9% de la superficie disponible para cosecha requiriendo intervenir un total de 127 escenario (87,5% del total de escenarios). La cosecha en términos de volumen y superficie se comportó oscilante anualmente motivado esto por las restricciones de adyacencia y períodos de exclusión de dos años. Se agregaron restricciones de operación al modelo reflejando las regulaciones de transporte y eficiencia de equipos de cosecha. Las restricciones de cosecha sobre áreas sensibles no representaron problemas al momento de encontrar soluciones al problema, en ningún momento esta fue una restricción activa dado que el límite impuesto era no cosechar más de un 50% de la superficie sensible y en el Modelo III se llegó a un 24% en el global para los cinco períodos. La superficie visible, que activa la penalización de la función objetivo llegó a un 53,4% para el global de cinco años, lo que quiere decir que en todo el horizonte de planificación, cerca de la mitad de la superficie visible será intervenida, pero siempre respetando las regulaciones de adyacencia lo que minimiza el impacto sobre el paisaje.

La metodología desarrollada es aplicable a la planeación estratégica, táctica y operativa de una empresa forestal. Además, constituye una aplicación de métodos sofisticados de programación forestal que incluyen variables medioambientales relevantes. La implementación es de fácil entendimiento y uso, lo que permite generar salidas gráficas en Sistemas de Información Geográfica. Además, el método entrega la posibilidad de incorporar en la planificación de la cosecha aquellos aspectos de interés de las regulaciones ambientales y sociales de distintos grupos de interés.

SUMMARY OF THE THESIS TO OBTAIN  
THE TITLE: Master Degree in Operations  
Management.  
BY: Mario Enrique Valenzuela Sandoval  
DATE: 27/05/2015  
Advisor: Rafael Epstein N.

## PROPOSED METHODOLOGY FOR SCHEDULING OF FOREST HARVESTING CONSIDERING ENVIRONMENTAL AND ADJACENCY CONSTRAINTS

This paper develops a sequence of interventions that incorporate forest harvest adjacency constraints in an area of study that has environmentally sensitive areas where forest harvesting can generate large impacts on the landscape.

Graphic information coverage of the study area was generated, including forest area coverage and visibility. With this a mathematical model of binary integer linear programming was implemented. The development of the model considered three stages: developing a basic model that considers only called adjacency restrictions Model I. This model was added restrictions operational nature which generated the Model II and finally, penalties were included objective function when areas are classified as visible and therefore generate visual impact is involved, this resulted in Model III.

Model III (the most stringent restrictions) programmed 91.9% of the area available for harvest intervene requiring a total of 127 units (87.5% of total units). The harvest in terms of volume and surface behaved oscillating annually motivated this adjacency restrictions and exclusion periods of two years. Operating restrictions to the model reflecting the transport regulations and efficiency of harvesting equipment were added. Harvest restrictions on sensitive areas did not represent problems when finding solutions to the problem, this was no time restriction active since the limit was not harvest more than 50% of the sensitive surface and the Model III was reached 24% overall for the five periods. The visible surface, which activates the penalties of the objective function, reached 53.4% for the overall five years, which means that throughout the planning horizon, about half of the visible surface will be tapped, but regulations respecting adjacency and minimizing the impact on the landscape.

The methodology developed is applicable to the strategic, tactical and operational planning of a forestry company. It also constitutes an application of sophisticated methods of forest programming including relevant environmental variables. Implementation is easy to understand and use, which can generate graphical output in GIS. Furthermore, the method gives the possibility of incorporating in harvest planning aspects of interest to environmental and social regulations of various interest groups.

## Dedicatoria

*A mi esposa e hijos por su constante apoyo y motivación  
A mis padres por ser una constante inspiración  
A mis suegros por su preocupación y apoyo en este proceso*

## Agradecimientos

En primer lugar quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi profesor guía Rafael Epstein, sin su orientación, apoyo y motivación inicial no hubiera sido posible terminar este proceso.

Además quiero agradecer sinceramente a Forestal Arauco S.A. y en especial a Víctor Cubillos, Gerente de Forestal Arauco Zona Sur S.A, empresa que brindó su apoyo para el desarrollo de este proyecto.

Por último, quiero agradecer especialmente a Rodrigo Benard y a la Unidad de Planificación de Producción de Forestal Arauco Zona Sur S.A. quién brindó todo su apoyo para el desarrollo de este proyecto.

## Tabla de Contenido

1	Antecedentes Generales	1
1.1	Planificación de cosecha	1
1.2	Cosecha	2
1.3	Revisión bibliográfica	3
1.3.1	Enfoque de soluciones matemáticas	3
1.3.2	Modelo de Restricción de Unidades (URM)	3
1.3.3	Modelo de Restricción de Área (ARM)	5
1.3.4	Formulación de Empaquetamiento de Cluster	7
1.3.5	Formulación Bucket	7
1.3.6	Mejoras a la formulación del problema ARM	8
1.3.7	Modelos desarrollados que incorporan el impacto ambiental	9
1.3.8	Impacto visual	10
2	Descripción del problema y justificación	10
3	Metodología	11
3.1	Etapa 1: Recopilación y preparación de la información	11
3.1.1	Zona de estudio	11
3.1.2	Áreas sensibles	15
3.1.3	Áreas de impacto visual	16
3.1.4	Adyacencia de escenarios	17
3.2	Etapa 2. Formulación matemática del problema	18
4	Resultados	20
4.1	Modelo I	20
4.2	Modelo II	25
4.3	Modelo III	30
4.4	Resultados Comparativos	35
4.5	Implementación y puesta en práctica	37
4.5.1	Aspectos generales de la implementación	37
4.5.2	Uso y Mejoras de la solución entregada por el modelo	38
4.5.3	Implementación propuesta	39
5	Comentarios y Conclusiones	41
6	Bibliografía	43

## Índice de Tablas

Cuadro 1. Detalle de la zona de estudio .....	13
Cuadro 2. Volumen por tipo de equipo de cosecha (m3 ssc).....	14
Cuadro 3. Volumen por temporada de cosecha y tipo de equipo (m3 ssc) .....	14
Cuadro 4. Volumen por tipo de producto y temporada de cosecha (m3 ssc).....	14
Cuadro 5. Superficie planificada en área sensible (hectáreas) .....	15
Cuadro 6. Detalle de superficie visible por predio (hectáreas) .....	16
Cuadro 7. Implementación del Modelo I.....	21
Cuadro 8. Información de solución modelo básico.....	21
Cuadro 9. Distribución anual del volumen cosechado con el Modelo I .....	22
Cuadro 10. Distribución anual de la superficie con el Modelo I.....	22
Cuadro 11. Distribución del volumen de cosecha por temporada con el Modelo I (m3 ssc).....	22
Cuadro 12. Superficie programada en áreas sensibles con el Modelo I .....	24
Cuadro 13. Intervención de áreas visibles con el Modelo I (has) .....	24
Cuadro 14. Implementación del Modelo II.....	26
Cuadro 15. Información de solución Modelo II .....	26
Cuadro 16. Distribución anual del volumen cosechado con el Modelo II .....	26
Cuadro 17. Distribución anual de la superficie con el Modelo II .....	27
Cuadro 18. Distribución del volumen de cosecha por temporada con el Modelo II (m3 ssc).....	27
Cuadro 19. Superficie programada en áreas sensibles con el Modelo II .....	29
Cuadro 20. Intervención de áreas visibles con el Modelo II (has) .....	29
Cuadro 21. Información de solución Modelo III .....	31
Cuadro 22. Distribución anual del volumen cosechado con el Modelo III .....	31
Cuadro 23. Distribución anual de la superficie con el Modelo III.....	32
Cuadro 24. Distribución del volumen de cosecha por temporada con el Modelo III (m3 ssc).....	32
Cuadro 25. Superficie programada en áreas sensibles con el Modelo III .....	34
Cuadro 26. Intervención de áreas visibles con el Modelo III (has) .....	34
Cuadro 27. Comparación de los resultados obtenidos para los tres modelos implementados.....	36
Cuadro 28. Variación del margen esperado.....	36
Cuadro 29. Estadística de superficie programada (has) .....	36
Cuadro 30. Salida del resultado del modelo.....	38
Cuadro 31. Superficie final planificada para la zona de estudio (has).....	38
Cuadro 32. Comparación de los resultados del Modelo III con la planificación final .....	39

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Esquema de planificación de cosecha forestal _____	2
Ilustración 2. Representación esquemática del modelo de planeación desarrollado por Epstein (1989) _____	4
Ilustración 3: Cliques maximales _____	5
Ilustración 4. Vista general de la zona de estudio _____	12
Ilustración 5: Detalle de la zona de estudio _____	13
Ilustración 6. Detalle de las áreas ambientalmente sensibles _____	15
Ilustración 7. Detalle de las zonas visibles _____	16
Ilustración 8. Esquema de polígonos vecinos _____	17
Ilustración 9. Matriz de incidencia de escenarios adyacentes _____	17
Ilustración 10: Resultado de programación de cosecha Modelo I _____	25
Ilustración 11. Resultado de programación de cosecha Modelo II _____	30
Ilustración 12. Resultado de programación de cosecha Modelo III _____	35
Ilustración 13. Histograma de distribución de tamaño de superficies programadas según modelo implementado _____	37
Ilustración 14. Propuesta de Implementación del Modelo _____	40
Ilustración 15. Sectores Visibles de la Zona de Estudio para un punto de observación en particular (Sector Sur de la Isla del Rey) _____	A



## 1 Antecedentes Generales

El ciclo forestal tradicional se define a partir de diferentes actividades, siendo las más relevantes la plantación, manejo y cosecha. Es en esta última actividad donde se producen los principales ingresos financieros generados a partir de la venta de productos del bosque, específicamente los productos madereros.

Las actividades de cosecha forestal tienen por objetivo la generación y extracción de los productos generados en el bosque. Esta actividad es realizada, en el caso de las grandes empresas que basan su patrimonio en plantaciones artificiales, por maquinaria especialmente diseñada para esto (tractores forestales, torres de madereo y sistemas de cosecha altamente mecanizado). Para lograr lo anterior, se debe disponer de infraestructura adecuada para la operación eficiente de la actividad de cosecha y del transporte de los productos a los clientes, entendiéndose por esto a una red de caminos y sectores de acopio de madera denominados canchas de madereo.

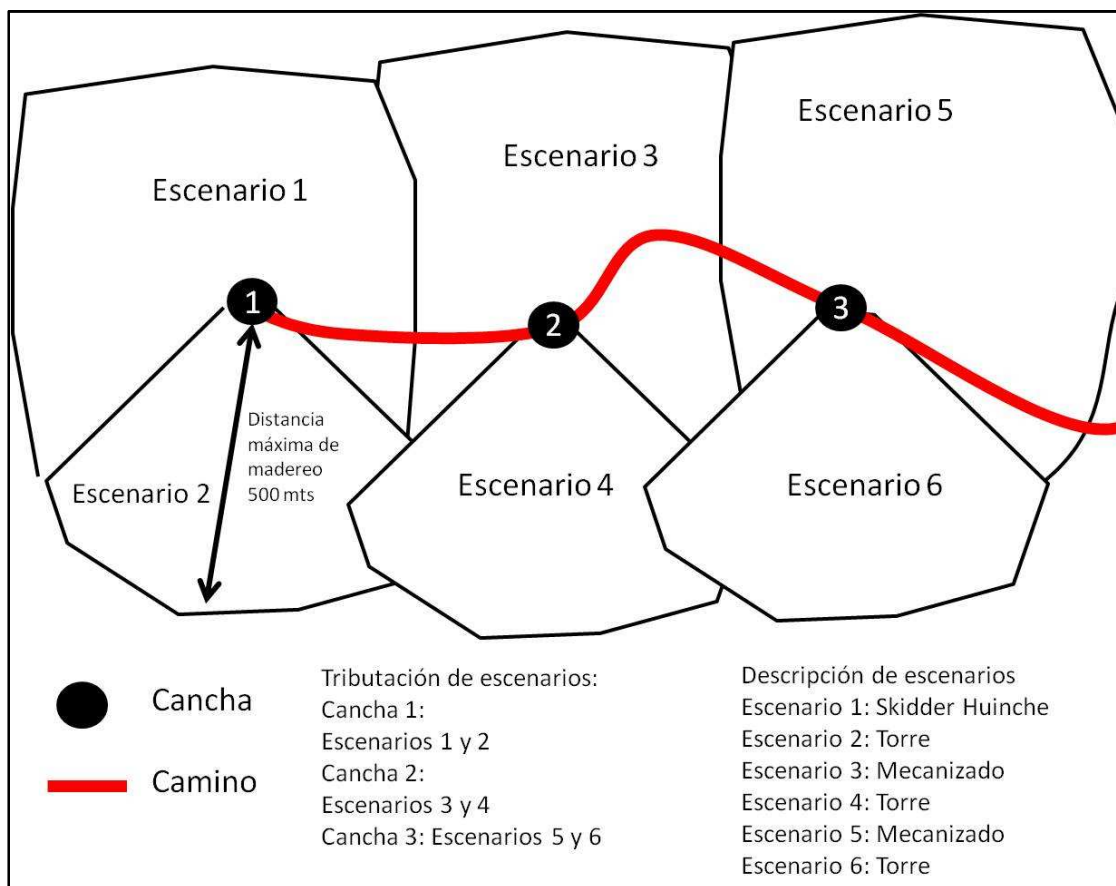
### 1.1 Planificación de cosecha

Para el caso de la empresa donde se desarrolló el proyecto se denomina planificación de cosecha forestal a la actividad que tiene por objetivo diseñar la red de caminos y canchas de madereo. Según las condiciones topográficas se asignan diferentes equipos de cosecha forestal. Los casos de laderas con fuertes pendientes (> a 35%) deben ser cosechados con torres de madereo. En caso de pendientes entre 21% y 35% inclusive, se asigna equipo tractor forestal (skidder). Para sectores con poca pendiente, esto es entre 0% y 20% se destinan equipo de cosecha mecanizada, que se caracterizan por su alta productividad (Forestal Arauco S.A., 2009).

Por otro lado, para cada equipo de cosecha se define una distancia máxima de madereo. De esta forma, las torres tienen una distancia de madereo máxima de 450 metros, los skidder de 350 metros si el madereo es cuesta arriba y 450 si es cuesta abajo. Los equipos de alta productividad mecanizados se planifican con distancias de madereo de 500 metros como máximo. Adicionalmente, se debe decidir los lugares donde se construirán las canchas de madereo, que tienen por objeto el acopio de la madera que cada equipo genera en su actividad extractiva (Forestal Valdivia S.A., 2009).

La mezcla de las condiciones topográficas, distancia de madereo y ubicación de canchas determinan los escenarios de cosecha. De esta forma, un escenario se define como una superficie que cosecha un determinado tipo de equipo y que tributa a una cancha de madereo específica.

## Ilustración 1. Esquema de planificación de cosecha forestal



### 1.2 Cosecha

Tradicionalmente, las actividades de cosecha de plantaciones forestales se tienden a realizar en grandes extensiones de terreno y con la técnica denominada Tala Rasa, correspondiendo esta última a la corta de la totalidad de los árboles planificados para cosecha. Esta técnica, se encuentra regulada por normativas medioambientales (Chile. Ministerio del Medio Ambiente, 2011). En general, las superficies máximas a ser intervenidas sin necesidad de presentar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) debe ser menor a las 500 hectáreas, superficies mayores deben ser sometidas a una EIA<sup>1</sup>.

Programar la cosecha forestal de grandes extensiones de superficie tiene una serie de beneficios económicos, asociados a economías de escala y facilidades de logística, sin embargo, los impactos a los cuales se ve sometida el área de influencia directa puede llegar a producir alteraciones en los cursos de agua, el suelo, deterioro de corredores biológicos e impacto visual o paisaje (FAO, 1995) (Troncoso et al, 2000). Todos estos factores son cada vez más demandados por la sociedad quien a través de regulaciones y certificación de procesos le agrega restricciones a la actividad forestal.

<sup>1</sup> Este límite máximo de cosecha forestal en superficies continuas aplica a la zona donde se realiza el estudio.

Dentro de este contexto, la generación de un programa de cosecha anual que minimice los impactos sobre factores ambientales cobra una gran importancia en la gestión de las empresas forestales.

El enfoque de modelos de programación de cosecha con restricción de adyacencia, ofrece una posibilidad de generar herramientas de apoyo a la gestión que permiten acelerar análisis de diferentes escenarios, buscando maximizar los retornos netos de la actividad pero respetando las regulaciones imperantes.

### **1.3 Revisión bibliográfica**

#### **1.3.1 Enfoque de soluciones matemáticas**

La problemática de generar programas de cosecha que incorporen restricciones de adyacencia ha sido un tema que ha dado pie para variadas publicaciones que han desarrollado distintos enfoques para su solución con métodos computacionales. En general, el objetivo que se persigue es generar alternativas de manejo de bosques que incorporen aspectos de dispersión del hábitat en la maximización del beneficio económico de la cosecha de productos forestales incorporando para ello restricciones ambientales, asociadas a zonas de cosecha disjunta o no adyacente (Epstein, 1989) (Goycoolea et al, 2005).

En la literatura es posible identificar dos enfoques principales, el primero denominado Modelo de Restricción de Unidades (URM por sus siglas en inglés) y el segundo Modelo de Restricción de Área (ARM por sus siglas en inglés).

#### **1.3.2 Modelo de Restricción de Unidades (URM)**

El URM es un enfoque basado en la determinación de las áreas a cosechar utilizando como restricción no cosechar unidades vecinas o adyacentes entre sí en el mismo período. La principal característica de este enfoque es que las unidades a cosechar están pre-definidas y estas pueden ser de tamaños absolutamente variables. En este caso, la debilidad del método es que aun respetando la cosecha de unidades no adyacentes, no se asegura que estas sean de tamaños razonables desde el punto de vista de las regulaciones ambientales imperantes. De acuerdo a Boston y Bettinger (2001) en Estados Unidos, específicamente en los estados de Oregon y California la superficie máxima continua a cosechar llega a 49 has y 17 has respectivamente, mientras que en Suecia indican como máxima superficie 20 has. Esto da una idea que la definición de las unidades de cosecha representa un aspecto de gran importancia en los resultados de la aplicación del método URM dado que depende de la calidad de la planificación de las unidades de cosecha en términos de la superficie.

Epstein (1989) da una descripción detallada del enfoque URM para abordar el problema de planificación forestal con restricciones de adyacencia. En este caso, el modelo se describe de la siguiente manera:

Variable de decisión: cosechar o no la unidad  $k$  en el período  $t$

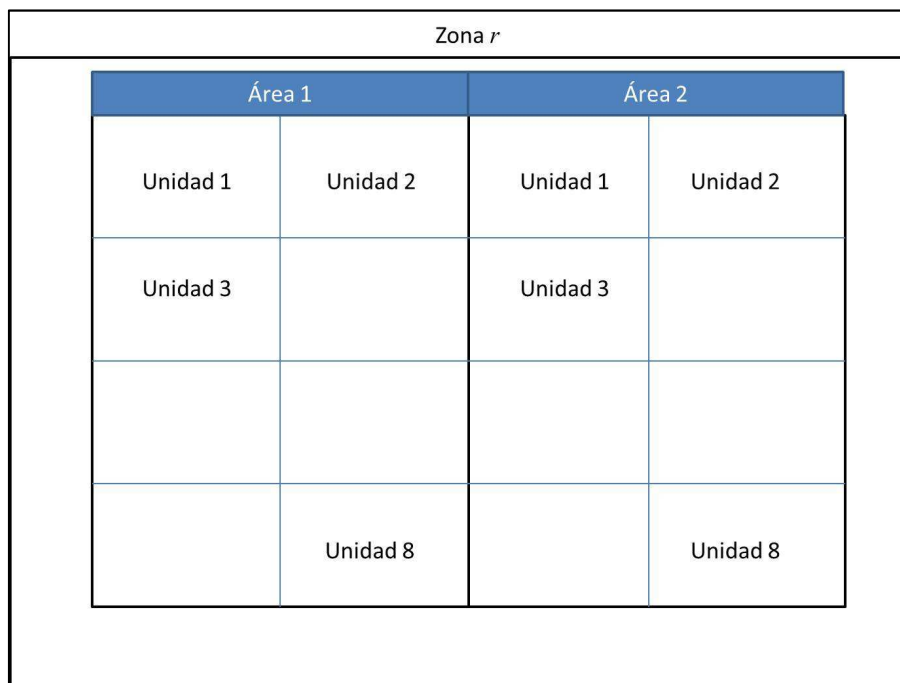
Función Objetivo: Maximizar el beneficio neto de la cosecha de las unidades de cosecha

Restricciones:

- i. Cada unidad debe ser cosechada a lo más una vez en todo el período de planificación
- ii. No es posible cosechar dos unidades vecinas en el mismo período de tiempo
- iii. Las variables de decisión son binarias

En este caso, este modelo se encuentra inserto en un desarrollo más amplio que consiste en determinar alternativas de manejo de zonas de manejo forestal. Esquemáticamente se puede representar de la siguiente forma: El patrimonio en análisis se divide en Zonas, cada Zona consta de Áreas y cada Área posee Unidades que son la que finalmente sobre las que se debe decidir si cosechar o no.

**Ilustración 2. Representación esquemática del modelo de planeación desarrollado por Epstein (1989)**

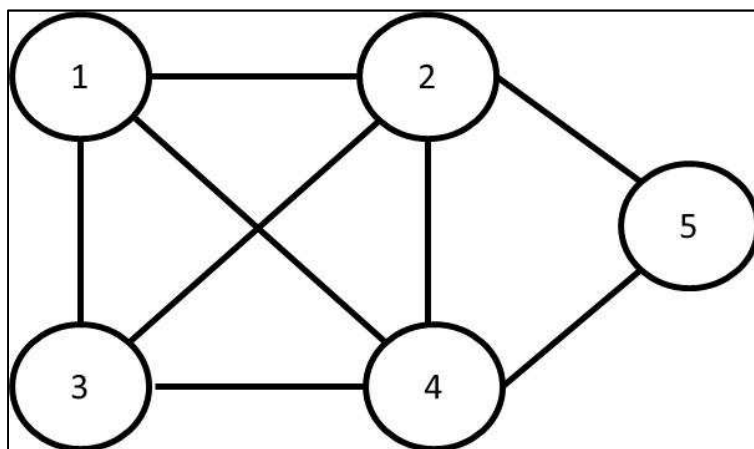


En el trabajo desarrollado por Epstein (1989) se propone la utilización de la técnica de Generación de Columnas para la elaboración de alternativas de manejo factibles, respetando las restricciones de adyacencia en cada una de estas alternativas. De esta manera, el problema se aborda con un Problema Maestro y un Subproblema.

El subproblema se encarga de generar alternativas de manejo que respeten las restricciones de adyacencia a través de técnicas basadas en una primera instancia de Heurísticas y en una segunda con métodos de planos de corte. Con estas alternativas se ingresa la nueva columna al problema maestro que en definitiva se encarga de decidir qué alternativas de manejo son las óptimas para las zonas en estudio. Lo interesante desde el punto de vista de la decisión de cosecha de las unidades es que se propone una nueva formulación al problema URM, mucho más robusta y que genera ahorros en tiempos de proceso y recursos de CPU. Esta formulación cambia las restricciones de adyacencia tradicionales (i) por el enfoque a través de Cliques Maximales.

Los cliques se definen como un subgrafo completo (donde todos sus nodos son mutuamente excluyentes o donde para cada par de nodos existe una arista que los conecta (Wolsey, 1998). Un clique se dice maximal si este no está incluido en otro clique. Dentro del contexto que estamos desarrollando, cada nodo digamos que representa una unidad sobre la que se debe decidir si cosechar o no. Cada arista representa si esta unidad es vecina o adyacente a otra, por ejemplo, si tomamos la ilustración 3, vemos que entre el nodo 1 y 2 existe arista por lo tanto las unidades 1 y 2 son adyacentes. De igual forma, los nodos 1, 2, 3 y 4 forman un clique maximal dado que todos sus nodos están conectados entre sí. Por otra parte, los nodos 2, 4 y 5 también forman un clique maximal.

**Ilustración 3: Cliques maximales**



El uso de esta técnica se traduce en que para un enfoque tradicional y utilizando la misma ilustración 3 se debían generar restricciones para cada nodo y definir el conjunto de los nodos vecinos, ahora con el uso de los cliques solo se deben generar restricciones por cada clique maximal lo que reduce considerablemente el número de restricciones del problema (Epstein, 1989).

### 1.3.3 Modelo de Restricción de Área (ARM)

El enfoque de restricción de superficie o área de cosecha consiste en programar cosecha de unidades de manejo (que pueden ser adyacentes) siempre y cuando estas no superen un límite máximo de superficie dado. Dada la complejidad de este tipo de problemas ha sido abordado principalmente a través de heurísticas (Goycoolea et al, 2005). Enfoques de soluciones exactas ha sido propuestas por Mc Dill et al. (2000), Martins et al. (1999) y Martins et al., (2000). Goycoolea et al (2005) indica que es común el uso de técnicas de agrupación de unidades de cosecha, generando lo que se denomina clusters factibles, que son grupos de unidades de cosecha adyacentes que no superan el umbral máximo permitido de cosecha.

El modelo ARM se puede describir más específicamente de la siguiente manera:

Se tiene un conjunto  $S$  de unidades con las siguientes características:

$a_s$ : Superficie de la unidad  $s$

$p_{s,t}$ : Beneficio monetario derivado de la cosecha de la unidad  $s$   
 $\alpha_{s,t}$ : Volumen disponible en la unidad en el período  $t$

Además, se define un conjunto  $E$  que representa todos los pares de unidades adyacentes, es decir, si por ejemplo las unidades  $r, s$  son vecinas, entonces el par  $\{r, s\} \in E$ . Por otra parte se define el conjunto  $N(s)$  que contiene a todas las unidades que son adyacentes a  $s$ . Entonces, la unidad  $r$  pertenece a  $N(s)$  si y sólo si  $r$  es adyacente a  $s$  o equivalentemente si  $\{r, s\} \in E$ . Por último se define un conjunto  $C$  de unidades contiguas denominado "Cluster" de unidades y para cada cluster se define: el área total, el beneficio monetario de cosechar dicho cluster y el volumen disponible para cosecha.

Entonces, el enfoque ARM consiste en seleccionar, para cada periodo de tiempo, un conjunto de unidades a cosechar de manera de maximizar el beneficio neto sujeto a restricciones de:

- Rendimiento no decreciente: esto quiere decir que el volumen a extraer no debe ser decreciente. También se puede exigir volumen máximos y mínimos por periodos.
- Unicidad de cosecha de rodales: los rodales deben ser cosechados solo una vez en el horizonte de planificación.
- Restricción de área máxima: los grupos de rodales no contiguos que se cosechen en un período no deben superar un límite máximo dado.

McDill et al (2002), propuso dos modelos de solución para el problema de programación de cosecha con restricciones de adyacencia. El primero utilizando el Algoritmo de Ruta, que genera un conjunto de restricciones que evita cosechar sectores concurrentes de unidades adyacentes solo cuando el total de superficie combinada excede una superficie máxima a cosechar. El segundo enfoque un conjunto de Unidades Generales de Manejo que consiste en grupos de unidades de cosecha cuyas áreas combinadas no excede la superficie máxima definida.

La Formulación de Ruta puede ser descrita de la siguiente manera. Para cada rodal  $s$  y para cada período  $t$  se define una variable binaria

$$Y_{s,t} = \begin{cases} 1, & \text{si la unidad } s \text{ se cosecha en el periodo } t \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Entonces, si por ejemplo se tiene un conjunto (cluster) de unidades donde la suma de sus superficies lo hace ser un cluster infactible (área del cluster mayor que área máxima permitida) entonces no se deberá permitir que las unidades que pertenecen a este cluster se cosechen simultáneamente en un mismo período y así asegurar soluciones factibles al problema.

De manera de generalizar este enfoque se define un conjunto  $A$  que representa todos los cluster infactibles. Esto es,  $C \in A$  si y sólo si  $C$  corresponde a un conjunto de unidades adyacentes tales que la suma de sus superficies sean mayores que las máximas permitidas. Lo anterior genera un conjunto de restricciones para evitar programar cluster infactibles. Las restricciones toman la siguiente forma:

$$\sum_{s \in C} y_{s,t} \leq |C| - 1 \quad \forall C \in A, \forall t = 1, \dots, T$$

Estas restricciones pueden ser muy numerosas, por lo que McDill et al (2002) propone utilizar sólo las necesarias. Esto se fundamenta en que si se consideran dos cluster  $C$  y  $D$  tales que  $C \subseteq D$  restringir la cosecha del cluster  $C$  también prohíbe la cosecha del cluster  $D$ . Generalizando lo anterior se debe definir un cluster minimal. Esto se entiende por un cluster  $C$  infactible en donde al eliminar uno de sus elementos se transforma en un cluster factible. Entonces si  $C$  es un cluster minimal infactible no puede contener cualquier otro cluster infactible. Entonces las restricciones planteadas para evitar cosecha de cluster infactibles toman la forma siguiente:

$$\sum_{s \in C} y_{s,t} \leq |C| - 1 \quad \forall C \in A', \forall t = 1, \dots, T$$

Donde  $A'$  se define como:

$$A' = \{C \in A: C \text{ es Cluster Minimal Infactible}\}$$

### 1.3.4 Formulación de Empaquetamiento de Cluster

Este caso corresponde a una manera alternativa a la formulación ARM, basado en que la orientación ahora está puesta en los conjuntos de rodales factibles. La variable de decisión se transforma en:

$$X_{C,t} = \begin{cases} 1, & \text{si el cluster } C \text{ se cosecha en el periodo } t \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Donde  $X_{C,t}$  corresponde a un cluster factible de cosechar.

Se definen también cluster infactibles, por ejemplo si el cluster  $C$  y  $D$  se intersectan (es decir tienen rodales en común) son infactibles. También aplica para cluster que sean adyacentes y que superen la superficie máxima a cosechar en un período. Goycolea et al (2004) señala que la manera de incorporar restricciones de incompatibilidad a la formulación es a través de las restricciones siguientes:

$$x_{C,t} + x_{D,t} \leq 1$$

Esta restricción representa la incompatibilidad de cosechar los cluster  $C$  y  $D$  en el mismo periodo  $t$ .

### 1.3.5 Formulación Bucket

En el enfoque ARM, el modelo nunca cosechará simultáneamente más cluster que rodales en el bosque. Esto se origina naturalmente en el hecho de que se deben cosechar cluster disjuntos y no adyacentes. Lo anterior origina un tercer enfoque de solución al problema de programación de cosecha.

Este método consiste en generar Bucket (Cubos) a-priori y de esta manera se asignan los rodales a estos cubos determinando la superficie a cosechar. Específicamente, para cada rodal  $i$  se define un cubo  $Bi$  respetando las siguientes consideraciones:

- Cada rodal  $i$  es asignado al menos a un cubo
- La superficie total asignada a un cubo  $Bi$  no puede exceder la superficie máxima permitida y,

- Los cubos deben ser no adyacentes entre ellos

Entonces, si consideramos una asignación dada a un cubo que genera un cubo no vacío y los rodales del cubo están todos conectados a otros rodales, entonces se tiene un cluster factible.

Para cada una de las formulaciones anteriores del problema de ARM, se pueden agregar algunas extensiones de manera de hacer más robusta la modelación. Uno de los aspectos a considerar son los costos de cosecha, dado que estos no se comportan siempre de manera lineal, a diferencia de los beneficios de la explotación, sino que a menudo se presentan con un componente de costo fijo y otro variable. En el caso de la formulación de Empaquetamiento de Cluster es posible incorporar estos costos dado que los cluster son determinados a priori (Goycolea, 2009).

También es posible incorporar restricciones asociadas a las superficie promedio cosechada, lo que le entrega mayor flexibilidad a la búsqueda de solución (no superar un área máxima de cosecha). Además se pueden agregar restricciones de períodos de exclusión de los cluster adyacentes a los elegidos para cosecha. Este periodo de exclusión puede ser de uno o varios periodos, dependiendo de las especies que se planten en las zonas cosechadas (Goycolea, 2009).

Adicionalmente, se pueden agregar regulaciones de distribución espacial de la cosecha, por ejemplo, generar cluster con espacios vacíos en medio puede no ser deseable desde el punto de vista de la conservación de la vida silvestre. En otros casos puede ser deseable acotar el mínimo de superficie cosechable (Goycolea, 2009).

Por último, Goycolea, et al. (2005), señala que también es factible utilizar dos orientaciones respecto a la definición de adyacencia: la definida utilizando el concepto de bordes compartidos entre dos clusters, y la de distancia entre clusters. El cambiar la definición de adyacencia tradicional (bordes comunes) obedece a que las restricciones de área máxima de cosecha tienden a dejar bosques fragmentados lo que va en desmedro de la mayoría de las especies que colonizan estos sectores.

### 1.3.6 Mejoras a la formulación del problema ARM

Vielma et al. (2003), propone incorporar mejoras al modelo de programación de cosecha extendiéndolo en una modelación de multi-periodos, dado que las formulaciones anteriormente revisadas han sido aplicadas a instancias medianas y pequeñas. Ampliar el problema a una instancia de multi-periodos implica que la agregación de restricciones de volumen de producción complique significativamente la solución del problema. Típicamente, la regulación del volumen de cosecha se logra al incorporar restricciones del tipo:

$$\left(1 - \frac{\Delta}{100}\right) \sum_S v_{S,t-1} x_{S,t-1} \leq \sum_S v_{S,t} x_{S,t} \leq \left(1 + \frac{\Delta}{100}\right) \sum_S v_{S,t-1} x_{S,t-1}$$

Donde

$x_{S,t}$ : Variable de decisión del modelo (cosechar o no el cluster  $S$ ) en el periodo  $t$ .

$V_{S,t}$ : Volumen disponible en el cluster  $S$  en el periodo  $t$ .

$\Delta$ : Tolerancia que se está dispuesto a conceder en la solución del modelo.



También es posible modelar la restricción exigiéndole cumplir con un volumen mínimo y máximo de cosecha, lo que se muestra explícitamente a continuación:

$$L \leq \sum_S v_{S,t} x_{S,t} \leq U$$

Donde  $L$  representa el mínimo y  $U$  el máximo volumen de cosecha del cluster  $S$ .

En cualquiera de las dos formas de representar esta regulación de volumen, al menos una de las desigualdades está activa, lo que genera un corte en el polytopo del problema. Esto provoca que la relajación del problema tenga muchas fracciones lo que implica que el problema se vuelve de difícil solución. Para salvar esta implicancia, Vielma et al. (2003) propone utilizar una penalización de la función objetivo basada en la violación de la restricción de producción y una heurística para encontrar soluciones enteras en el nodo raíz del método de Ramificación y Acotamiento, esto mejora el desempeño de la formulación en términos de encontrar soluciones en menor tiempo.

Goycoolea et al (2005) propone el uso de diferentes tipos de adyacencia (débil y fuertes) entre clusters, dependiendo si estos cluster comparten un lado completo y sólo un vértice, en cuyo caso es una adyacencia débil. Además propone un mejoramiento en la formulación tradicional al problema ARM lo que permite abordar problemas medianos a grandes con mayor facilidad. Además propone una nueva metodología que está orientada a generar desigualdades válidas que fortalecen la formulación y ayudan a encontrar soluciones en un menor tiempo.

### **1.3.7 Modelos desarrollados que incorporan el impacto ambiental**

Si bien en los modelos de programación de cosecha la idea subyacente es la regulación de superficies continuas de tala rasa, existen otras orientaciones referentes específicamente a abordar el impacto ambiental de la cosecha forestal. Troncoso et al. (2000) propone un modelo de programación entera orientado a decidir la cantidad de canchas de madereo a planificar bajo ciertas restricciones ambientales. Para cuantificar el efecto o impacto ambiental Troncoso et al. (2000) considera dos tipos de costo ambiental:

Costo ambiental N°1: reforestación de la cancha con técnicas de recuperación de suelo (subsulado) más un costo de oportunidad de los ingresos por venta por el volumen que se pierde de vender en relación a un sitio no compactado.

Costo ambiental N°2: reforestación de la cancha sin técnicas de recuperación de suelo, considerando sólo el costo de oportunidad de los ingresos por venta por el volumen que se pierde de vender en relación a un sitio no compactado.

El modelo que se implementó permite decidir sobre: rodales a cosechar, número y tamaño de canchas y sistema de cosecha a utilizar. Los resultados de la modelación mostraron que la incorporación de costos y restricciones ambientales no generan gran impacto sobre los resultados económicos de la cosecha forestal. Las restricciones impuestas sobre los costos ambientales no tienen influencia en los resultados del modelo. Distinto es el caso de las restricciones sobre la distancia promedio de madereo,

que afecta principalmente al rendimiento de los equipos de cosecha y con ello el resultado económico de la actividad.

### **1.3.8 Impacto visual**

Según Dunn (1974), el paisaje se define como el “complejo de interrelaciones derivadas de las interacciones entre rocas, agua, aire, plantas, animales y hombres. Otro enfoque considera al paisaje visual como expresión de los valores estéticos, plásticos y emocionales del medio natural, lo que le da importancia al paisaje como expresión del medio (Conesa, 1997).

Para analizar el paisaje se deben determinar una serie de Factores de Visualización. El primero de ellos lo constituye la Cuenca Visual, entendida como la zona desde la que son visibles un conjunto de puntos. En el análisis de la Cuenca Visual se debe determinar fragilidad de la cuenca en términos del tamaño, compacidad y forma. El segundo factor de caracterización del paisaje es la Intervisibilidad que tiene por objetivo evaluar un paisaje de acuerdo la visibilidad recíproca de todas las unidades entre sí (Gayoso & Acuña, 1999).

Según Gayoso y Acuña (1999) la riqueza del paisaje está determinada por tres elementos principales:

- Fragilidad del paisaje: que indica la vulnerabilidad o el grado de deterioro que puede presentar un paisaje ante intervenciones forestales como la cosecha.
- Calidad visual del paisaje: se determina a través de la evaluación de valores estéticos que posee el paisaje de manera subjetiva.
- Potencialidad del paisaje: se entiende como la capacidad de generar miradores turísticos en función de la amplitud y profundidad de la vista.

Gayoso y Acuña (1999) proponen desarrollar una Evaluación del Paisaje Visual (EPV) para la generación de planes de desarrollo forestal. Esta evaluación debe simular los impactos generados por las operaciones forestales. Específicamente, para la actividad de cosecha se sugiere tener los siguientes elementos incorporados dentro de la planificación de actividades extractivas.

- Las áreas de corta deben reflejar la escala del paisaje (pequeñas en valles y lomajes suaves y de mayor extensión en sectores altos)
- Las áreas deben ser asimétricas e irregulares siguiendo las formas del terreno
- Para el caso de plantaciones las zonas de tala rasa deben estar separadas por zonas de bosque sin cortar de una superficie equivalente. Además en estas zonas se debería mantener y enriquecer zonas de bosque nativo. Es deseable también evitar cosechar zonas con formas geométricas.

## **2 Descripción del problema y justificación**

El problema a enfrentar consiste en como programar faenas de cosecha en sectores donde los factores de impacto visual, sobre el agua, suelo y fragmentación sean controlados bajo ciertos parámetros y a la vez se maximice el margen actualizado de la actividad.

Específicamente, se quiere obtener un programa de cosecha anual que represente una secuencia de escenarios a intervenir. Dicha secuencia debe contemplar restricciones de adyacencia o vecindad, intervención de zonas ambientalmente sensibles y restricciones propias de la operación como temporada de cosecha en el año y regulación de volumen por tipo de equipo.

La importancia de la problemática radica en que si bien en Chile no existen fuertes regulaciones de áreas máximas de tala rasa, las empresas se encuentran en proceso de revisión de sus métodos de trabajo tendientes a obtener certificaciones de producción sustentable que son más exigentes en materia de áreas máximas de cosecha. Sumado a esto, la percepción del público en general respecto a las zonas cosechadas con el método de tala rasa es negativa, por lo que este factor (percepción pública) también se transforma en una restricción a considerar para el desarrollo de faenas de cosecha en sectores donde es relevante.

### **Objetivo General**

Desarrollar un programa de cosecha anual que incorpore restricciones operativas, de adyacencia, período de exclusión e impacto ambiental para una zona de estudio.

### **Objetivos Específicos**

- Preparar y consolidar la información necesaria para el desarrollo del modelo de la zona de estudio
- Desarrollar una herramienta computacional que permita programar la intervención de los escenarios de cosecha en un horizonte de planificación de cinco años respetando las restricciones de adyacencia, período de exclusión y de regulaciones ambientales

## **3 Metodología**

Para desarrollar el proyecto se dividió el trabajo en dos etapas:

- 1.- Recopilación y preparación de la información de la zona de estudio necesaria para desarrollar el modelo de decisión
- 2.- Formulación e implementación del modelo matemático

### **3.1 Etapa 1: Recopilación y preparación de la información**

#### **3.1.1 Zona de estudio**

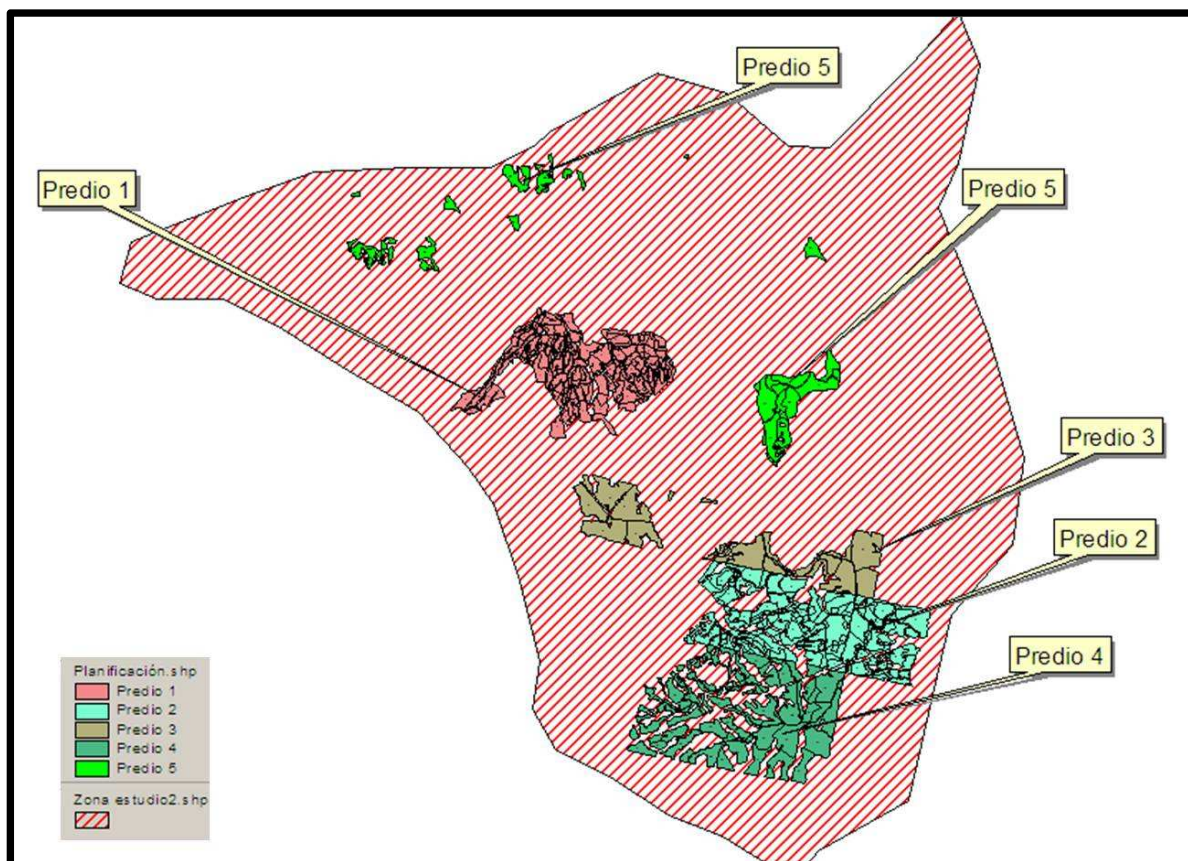
Corresponde a una zona geográfica determinada en donde se desarrollarán actividades forestales de cosecha. Para el caso del presente proyecto se utilizó el patrimonio de plantaciones forestales de *Pinus radiata* D.don perteneciente a Forestal Valdivia S.A. ubicados en la Isla del Rey, comuna de Corral, XIV Región de Los Ríos, Chile.

#### Ilustración 4. Vista general de la zona de estudio



Dentro de la isla existen cinco predios de propiedad de Forestal Arauco S.A. (FASA) los que son considerados en este proyecto.

### Ilustración 5: Detalle de la zona de estudio



En lo referido a patrimonio forestal se puede resumir la zona de estudio de acuerdo al siguiente cuadro.

**Cuadro 1. Detalle de la zona de estudio**

Predio	Superficie (has <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> ssc <sup>3</sup> )
Predio 1	164	62.402
Predio 2	212	77.406
Predio 3	102	48.062
Predio 4	186	90.992
Predio 5	85	34.084
Total	749	312.946

Como parte de la etapa de planificación de cosecha se determinaron los escenarios de cosecha respectivos, definiéndose los tipos de equipo por cada escenario. En total se dispone de 145 escenarios que se resumen como sigue.

<sup>2</sup> has: Hectáreas, unidad de superficie utilizada comúnmente en planificación forestal

<sup>3</sup> m<sup>3</sup> ssc: unidad de medida de volumen de madera en forma de rollizos, corresponde al volumen del tronco como un sólido sin la corteza.

**Cuadro 2. Volumen por tipo de equipo de cosecha (m3 ssc)**

Predio	Skidder	Torre	Mecanizado	Total general
Predio 1	54.359	8.043		62.402
Predio 2	36.307	38.283	2.816	77.406
Predio 3	19.257		28.805	48.062
Predio 4	59.025	13.828	18.138	90.992
Predio 5	21.697	8.473	3.915	34.084
Total	190.645	68.627	53.675	312.946

Dentro del proceso de planificación se definieron superficies de invierno y verano. Esto se denomina **temporadas de cosecha**, es así como cuando se habla de temporada de verano, implica que la red de caminos y canchas de esta temporada tiene carpeta de rodado de tierra y deben ser cosechados en periodo estival, mientras que los sectores de invierno, tienen caminos de ripio y pueden ser cosechados tanto en periodos de invierno como de verano. Se presenta un cuadro que resume el volumen habilitado por cada temporada.

**Cuadro 3. Volumen por temporada de cosecha y tipo de equipo (m3 ssc)**

Predio	INVIERNO				VERANO				Total
	Skidder	Torre	Mecanizado	Total	Skidder	Torre	Mecanizado	Total	
Predio 1					54.359	8.043		62.402	62.402
Predio 2	36.307	38.283	2.816	77.406					77.406
Predio 3	19.257		28.805	48.062					48.062
Predio 4	59.025	13.828	18.138	90.992					90.992
Predio 5					21.697	8.473	3.915	34.084	34.084
Total	114.589	52.111	46.943	216.460	76.056	16.516	3.915	96.486	312.946

A nivel de productos disponibles, se dispuso de información de estimaciones de existencias basadas en inventarios forestales. Se presenta un resumen de esta información a nivel de tipos de productos podados, aserrables y pulpables.

**Cuadro 4. Volumen por tipo de producto y temporada de cosecha (m3 ssc)**

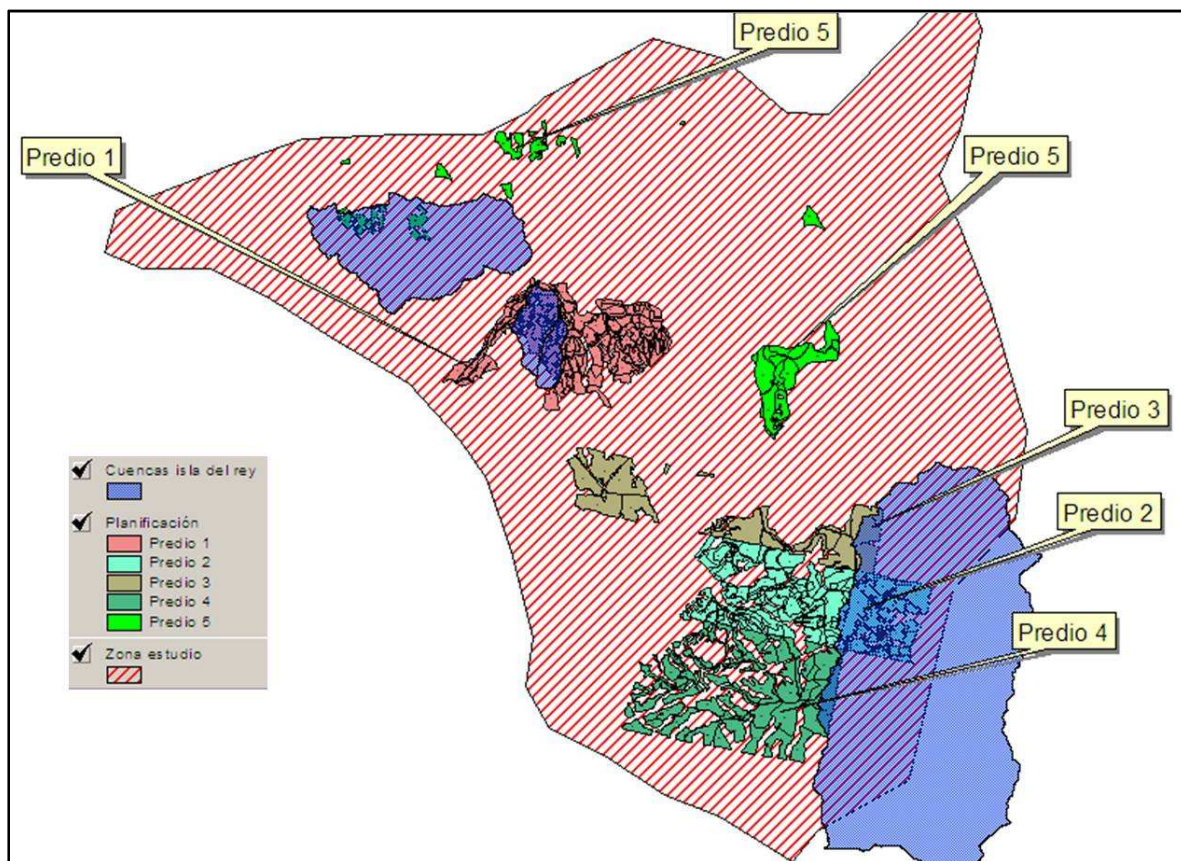
Predio	Invierno			Verano			Total
	Podado	Regular	Pulpable	Podado	Regular	Pulpable	
Predio 1				7.625	40.635	14.142	62.402
Predio 2	10.115	50.583	16.708				77.406
Predio 3		37.789	10.272				48.062
Predio 4		65.983	25.009				90.992
Predio 5				-	25.553	8.531	34.084
Total	10.115	154.355	51.989	7.625	66.188	22.673	312.946
%	5%	71%	24%	8%	69%	23%	



### 3.1.2 Áreas sensibles

Uno de los aspectos a considerar en la generación del programa de cosecha lo constituyen las áreas ambientalmente sensibles. De este modo se contó con información de las Cuencas Prioritarias<sup>4</sup> que están contenidas dentro del área de estudio. Con esto, se obtuvo la superficie y volumen que está inserto dentro de esta área sensible.

**Ilustración 6. Detalle de las áreas ambientalmente sensibles**



Un 19,6% de la superficie planificada está dentro del área sensible. El detalle se muestra en el siguiente cuadro.

**Cuadro 5. Superficie planificada en área sensible (hectáreas)**

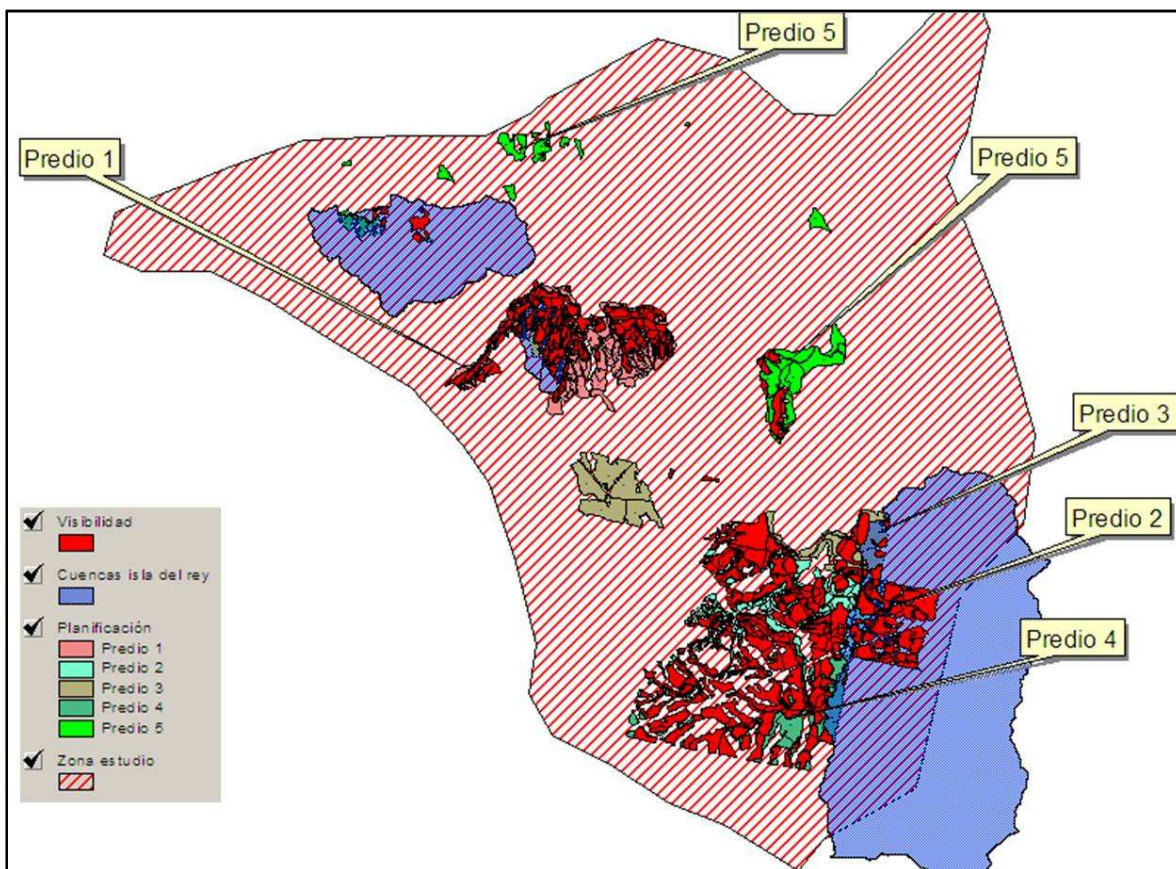
Temporada	Superficie Planificada	Superficie Planificada en Área Sensible
INVIERNO	500,4	100,1
VERANO	249,0	46,7
Total	749,4	146,9

<sup>4</sup> Información entregada por Forestal Arauco S.A.

### 3.1.3 Áreas de impacto visual

Otro factor que se incluyó en el desarrollo del proyecto fue el impacto visual. Para esto se elaboró una cobertura de visibilidad basada en la toma de puntos de visibilidad. Dichos puntos responden a sectores donde existe una amplia visión de la superficie planificada, pensando en rutas turísticas o alto tránsito de personas. En la siguiente ilustración se distinguen las zonas visibles en color rojo (ver Anexo A).

**Ilustración 7. Detalle de las zonas visibles**



Al analizar la proporción de superficie planificada visible se encontró que el 55% de la superficie planificada es visible desde alguno de los puntos definidos y por ende es susceptible de tener un impacto visual importante al momento de realizar la cosecha. A continuación se presenta un cuadro con el detalle por predio.

**Cuadro 6. Detalle de superficie visible por predio (hectáreas)**

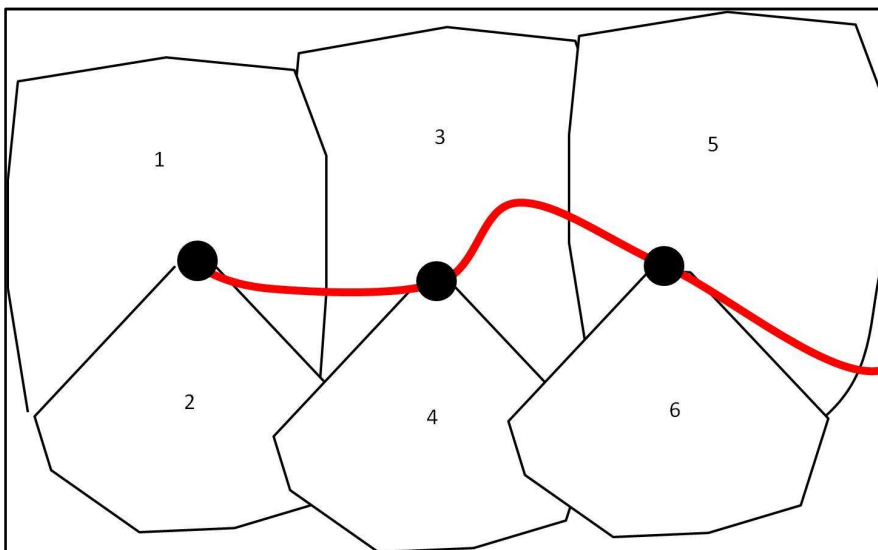
Predio	Sup. Planificada	Sup. Visible	% de Visibilidad
Predio 1	163,8	88,4	54%
Predio 2	211,9	157,0	74%
Predio 3	102,4	18,5	18%
Predio 4	186,1	134,1	72%
Predio 5	85,3	17,5	20%
Total	749,4	415,4	55%



### 3.1.4 Adyacencia de escenarios

Para lograr desarrollar un programa de cosecha que incorpore en sus resultados restricciones de adyacencia, fue necesario determinar para cada escenario, cuáles eran sus escenarios vecinos. Gráficamente, un escenario de cosecha se representa por un polígono. De esta manera, dos escenarios se dicen adyacentes o vecinos si los polígonos que los representan comparten al menos uno de sus lados.

**Ilustración 8. Esquema de polígonos vecinos**



Tomando como ejemplo la ilustración 6, el escenario 1 es vecino con el 2 y el 3, no así con el 4, 5 y 6. Para lograr determinar los escenarios vecinos se usaron las coberturas de planificación de cosecha y con las herramientas de Geoprocésamiento de ArcView 3.2 se construyó una cobertura que incorpora esta información.

Para representar lo anterior se construyó una matriz de incidencia binaria de dimensión  $N \times N$ , donde  $N$  es el número de escenarios de la superficie planificada.

**Ilustración 9. Matriz de incidencia de escenarios adyacentes**

	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0
2	1	1	1	1	0	0
3	1	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	0	1
5	0	0	1	0	1	1
6	0	0	1	1	1	1

Las filas y columnas representan los escenarios y tiene valores 0 ó 1. La forma de leer la información de la matriz de incidencia es por filas. Esto quiere decir que si se quiere saber cuál(es) es(son) el(los) escenario vecinos del escenario 1 se debe leer la primera fila que corresponde al escenario 1, indicando que este escenario tiene como vecinos a los escenario 2 y 3. La diagonal de la matriz siempre tiene el valor 1.

Una vez construida la matriz de incidencia, se descompuso en vectores  $V_i$  de dimensión  $N$  correspondientes a cada fila de la matriz. Por ejemplo, para el escenario 1, 2 y 3:

$$\begin{aligned} V_1 &= (1, 1, 1, 0, 0, 0) \\ V_2 &= (1, 1, 1, 1, 0, 0) \\ V_3 &= (1, 1, 1, 1, 1, 1) \end{aligned}$$

El vector  $V_i$  se denomina conjunto  $V_i$  de cada escenario.

### 3.2 Etapa 2. Formulación matemática del problema

El problema de generar un programa de cosecha considerando restricciones de adyacencia, posee la estructura básica para ser desarrollado a través de un enfoque de programación lineal entera, dado que la decisión que se debe tomar es cosechar o no cosechar un determinado escenario sujeto a variadas restricciones.

Más específicamente, para cada período del horizonte de planificación se debe decidir que escenarios van a constituir el programa de cosecha de la temporada de invierno y de verano. Además, se espera que el modelo encuentre un programa que considere restricciones de adyacencia, esto orientado a reducir la superficie continua cosechada en un año. Por otra parte interesa incorporar dentro de la solución, aspectos relacionados a la regulación del volumen por tipo de equipo, al impacto visual y restringir la cosecha en las áreas sensibles para la zona de estudio.

De esta manera el problema puede ser modelado de la siguiente manera:

Variable de Decisión: Cosechar o no cosechar un escenario determinado en un período dado

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{si el escenario } i \text{ de tipo de equipo } j \text{ y temporada } l \text{ se cosecha en el periodo } k \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Función Objetivo: Maximizar el beneficio neto actualizado de la cosecha del bosque.

$$Max = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \frac{M'_i X_{ijkl}}{(1+r)^k}$$

Restricciones:

- Cada escenario se debe cosechar solo una vez en el horizonte de planificación

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J X_{ijkl} \leq 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, I$$

- Si se cosecha un escenario, los escenarios vecinos o adyacentes no pueden cosecharse en el mismo período ni en el período siguiente. Esto quiere decir que la vecindad de un escenario tiene un período de exclusión de dos años.

Para el período 1:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{i \in V_l} X_{ijkl} \leq 1, \quad \forall i = 1, \dots, N; k = 1$$

Para el período 2 en adelante:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{i \in V_i} X_{ijkl} + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{i \in V_i} X_{ijk-1l} \leq 1, \quad \forall i = 1 \dots, N; k = 2, \dots, K$$

- Las áreas sensibles presentes en la zona de estudio no deben ser cosechadas más allá de una proporción dada por periodo. Para el caso del proyecto se consideró cosechar no más del 50% de escenarios pertenecientes al área sensible.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \alpha_i X_{ijkl} \leq \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{2} \quad \forall k = 1, \dots, K$$

Restricciones operativas:

- El volumen cosechado en cada temporada no debe ser superior a la capacidad instalada del transporte fluvial. El volumen de cosecha por temporada y anual está acotado por la capacidad de flete fluvial que representa el factor limitante o cuello de botella del sistema. Además, la temporada estival representa 1 mes de los 12 del año, lo que también obliga a restringir el volumen cosechado en esta temporada y ajustarlo a la capacidad de transporte.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \beta_i X_{ijkl} \leq Cap \quad \forall k = 1, \dots, K; \forall l = 1, \dots, L$$

- En cada periodo y temporada se debe cosechar al menos *CosMin* m3 correspondiente a tipo de equipo Mecanizado. Por las características del tipo de equipo mecanizado, se le debe asignar por temporada un volumen mínimo de manera de hacer conveniente el traslado de los equipos.

$$\sum_{i=1}^I \beta_i X_{ijkl} \geq CosMin \quad \forall k = 1, \dots, K; \forall l = 1, \dots, L; j = Mecanizado$$

- Se debe minimizar la cosecha en sectores visibles. Para incluir esta restricción dentro del problema se optó por incluir en la función objetivo una penalización por violación de esta restricción. De esta manera la Función Objetivo vería modificado el parámetro  $M_i$ . Restando del beneficio neto del escenario  $i$  el proporcional de su visibilidad expresado como  $Vis_i$ .

$$M'_i = M_i - (1 - Vis_i)$$

- Las variables deben ser binarias

$$X_{ijkl} \in \{0,1\}$$

Parámetros del modelo:

$M_i$ : Margen económico de cosechar el escenario  $i$ . Este parámetro se calcula de la siguiente manera:

$$M_i = \text{Precio}_i - (\text{Matp}_i + \text{Cos}_i + \text{Trans}_i + \text{Cam}_i)$$

Donde,

$\text{Precio}_i$ = Precio de venta promedio de los productos extraídos del escenario  $i$ . Se considera precio ponderado dado que existen 3 tipos de productos con valores de venta diferenciados.

$\text{Matp}_i$ = Valor de la materia prima expresada en unidades monetarias por volumen (\$/m<sup>3</sup> ssc) para cada escenario  $i$ . Corresponde al costo incurrido en establecer el bosque y manejarlo.

$\text{Cos}_i$ = Corresponde al costo de cosechar el escenario  $i$ . Varía en función del tipo de equipo que tenga asociado el escenario.

$\text{Trans}_i$ = Costo de transportar de los productos generados en el escenario  $i$  hasta el centro de consumo.

$\text{Cam}_i$ = Costo de construcción de caminos para el escenario  $i$ . En este caso se dispuso del costo de construcción por predio, asumiéndose este valor para el escenario perteneciente al predio respectivo.

$r$ = Tasa de descuento

$\alpha_i$ = Superficie del escenario  $i$  que pertenece al área sensible.

$\beta_i$ = Volumen del escenario  $i$  en m<sup>3</sup> ssc.

$\text{Cap}$ = Volumen máximo de transporte vía fluvial

$\text{CosMin}$ = Mínimo volumen mensual asignado a equipos de cosecha mecanizados

## 4 Resultados

Para exponer los resultados en orden a la complejidad de los análisis se dividirán en las siguientes etapas:

- Modelo I, que corresponde a la implementación del modelo en su expresión más básica. Considerando sólo restricciones de adyacencia y sobre la cosecha en áreas sensibles.
- Modelo II, en este caso además de las restricciones que operan en el Modelo I se incluyen restricciones de índole operativas asociadas a regulación de cosecha por equipos y temporadas.
- Modelo III, corresponde a la incorporación de además de restricciones mencionadas para el Modelo I y II de la penalización de la Función Objetivo.

En todas las etapas de implementación mencionadas el enfoque de solución fue a través del método denominado ramificación y acotamiento (Branch and Bound). Todas las formulaciones fueron implementadas en What's Best para Excel 2010, con un equipo equipado con procesador Intel Core de 2,5 GHz. y 4 MB en RAM.

### 4.1 Modelo I

Corresponde al modelo de programación de cosecha incluyendo sólo restricciones de adyacencia y de intervención en áreas sensibles. La implementación del modelo en What'sBest! se resume en 725 variables de decisión y 2.325 restricciones.

### Cuadro 7. Implementación del Modelo I

CLASSIFICATION DATA	Current
Numerics	285378
Variables	220126
Adjustables	725
Constraints	2325
Integers/Binaries	725/0
Nonlinears	0
Coefficients	442218

El tiempo de resolución de este modelo fue de 18 segundos y le tomó 248 pasos y 78.123 intentos llegar a la solución óptima.

### Cuadro 8. Información de solución modelo básico

MODEL TYPE:	Mixed Integer / Linear
<b>SOLUTION STATUS:</b>	<b>GLOBALLY OPTIMAL</b>
OBJECTIVE VALUE:	1885.4265444932
DIRECTION:	Maximize
SOLVER TYPE:	Branch-and-Bound
TRIES:	78123
INFEASIBILITY:	3.9790393202566e-013
BEST OBJECTIVE BOUND:	1885.4265444932
STEPS:	248
ACTIVE:	0
SOLUTION TIME:	0 Hours 0 Minutes 18 Seconds

El modelo cosechó un 96% del volumen disponible distribuyéndolo en los cinco períodos. Para cosechar este volumen requirió intervenir 141 escenarios de un total de 145 (97% de los escenarios).

**Cuadro 9. Distribución anual del volumen cosechado con el Modelo I**

Periodo	Volumen por tipo de equipo de cosecha (M3 ssc)				%
	SKHU	T500	SKGR	Total	
1	61.980	20.718	20.430	103.127	34%
2	26.577	1.869	8.491	36.936	12%
3	41.158	18.789	5.122	65.069	22%
4	19.505	14.040	0	33.545	11%
5	32.218	9.771	19.632	61.621	21%
Total	181.437	65.187	53.675	300.299	100%

La cosecha se concentró principalmente en el período 1, por el efecto de aplicar una tasa de descuento a los márgenes de cada escenario cosechado.

En términos de superficie, el modelo cosecha un 96% de la superficie planificada, respondiendo a una distribución anual similar a la del volumen.

**Cuadro 10. Distribución anual de la superficie con el Modelo I**

Periodo	Superficie por tipo de equipo de cosecha (Has)				%
	SKHU	T500	SKGR	Total	
1	155	47	40	242	34%
2	65	4	20	90	12%
3	98	50	10	158	22%
4	47	35	0	82	11%
5	81	26	42	149	21%
Total	446	161	113	720	100%

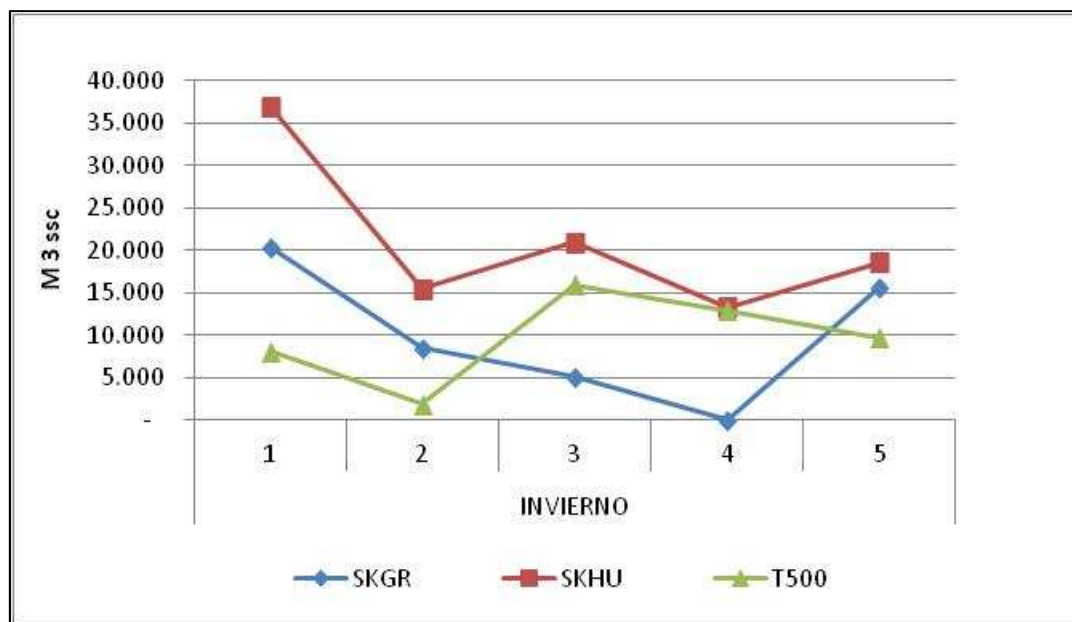
Las cosechas por temporadas fueron distribuidas sin ninguna restricción sobre la temporada ni sobre los equipos, originando el siguiente resultado.

**Cuadro 11. Distribución del volumen de cosecha por temporada con el Modelo I (m3 ssc)**

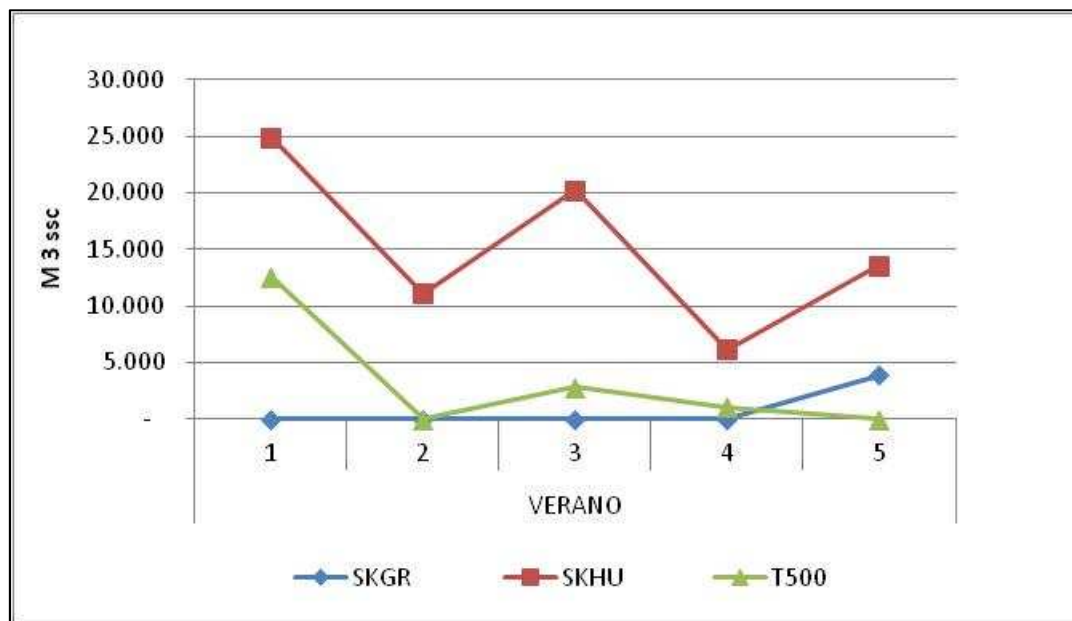
Temporada	Periodo	SKGR	SKHU	T500	Total
INVIERNO	1	20.430	37.067	8.089	65.586
	2	8.491	15.474	1.869	25.833
	3	5.122	20.913	15.976	42.011
	4	-	13.312	12.966	26.278
	5	15.717	18.615	9.771	44.103
Total INVIERNO		49.760	105.381	48.671	203.812
VERANO	1	-	24.913	12.629	37.541
	2	-	11.103	-	11.103
	3	-	20.244	2.813	23.058
	4	-	6.193	1.074	7.267
	5	3.915	13.603	-	17.518
Total VERANO		3.915	76.056	16.516	96.486
Total general		53.675	181.437	65.187	300.299

Además es posible observar una oscilación de volumen de cosecha a partir del período 2, esto debido a que en el primer período no tiene restricción de período de exclusión.

**Gráfico 1. Oscilación de volumen de cosecha temporada invierno con el Modelo I**



**Gráfico 2. Oscilación de volumen de cosecha temporada verano con el Modelo I**

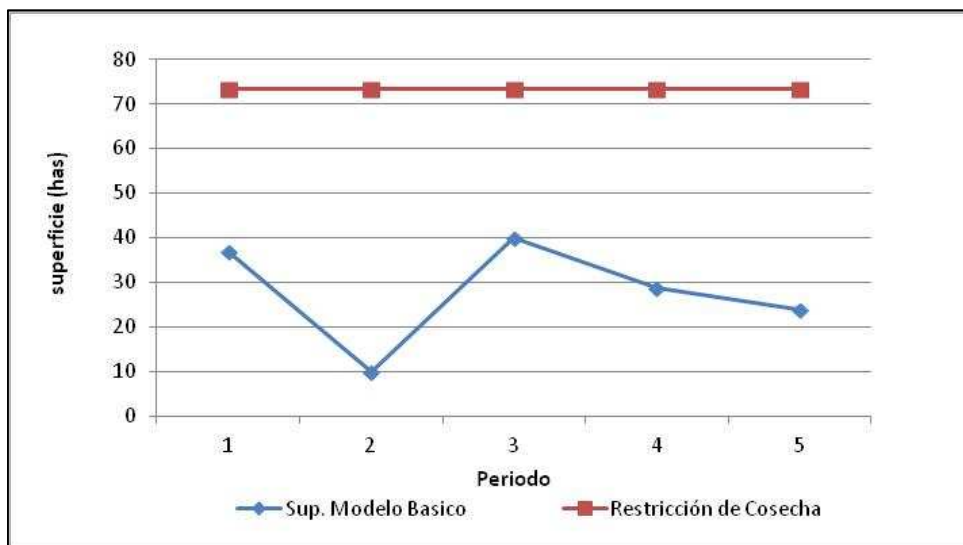


La intervención de áreas sensibles no representó una exigencia importante al momento de obtener una solución del modelo. Lo que se verifica en la superficie cosechada en áreas sensibles por período.

**Cuadro 12. Superficie programada en áreas sensibles con el Modelo I**

Periodo	Sup. Intervenida (has)	% Intervenido
1	36,9	25%
2	9,8	7%
3	40,0	27%
4	28,6	19%
5	23,9	16%
Total	139,2	22% <sup>5</sup>

**Gráfico 3. Oscilación de volumen de cosecha en áreas sensibles con el Modelo I**



Al examinar las áreas visibles que son programadas para la cosecha se observa que un 55,1% de la superficie programada considera intervenir áreas visibles. Se observa una tendencia creciente en la intervención de estos sectores.

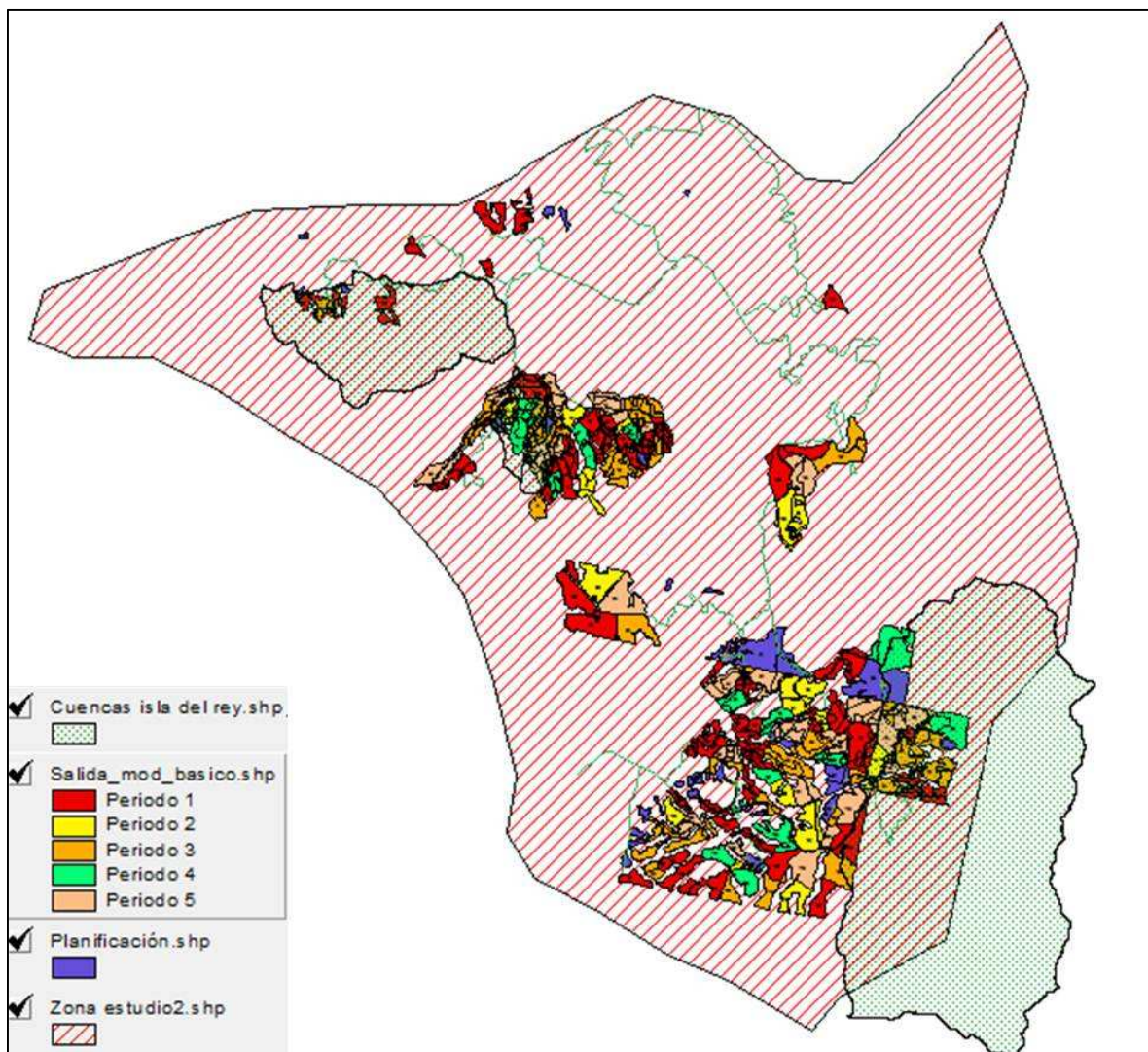
**Cuadro 13. Intervención de áreas visibles con el Modelo I (has)**

Periodo	Sup. Visible Programada	Sup. Programada	% de Sup. Programada en Áreas Visibles
1	114,7	242,3	47,3%
2	49,3	89,6	55,1%
3	95,1	157,7	60,3%
4	55,4	82,0	67,6%
5	82,4	148,9	55,4%
Total	397,0	720,4	55,1%

<sup>5</sup> Corresponde al promedio ponderado del porcentaje intervenido. Se pondera por la superficie intervenida anualmente.



**Ilustración 10: Resultado de programación de cosecha Modelo I**



#### **4.2 Modelo II**

Este modelo contempla además de las restricciones del modelo básico agregar restricciones propias de la operación forestal. En este caso, se incluyeron restricciones de transporte fluvial y temporada que limitan la cosecha a una cota máxima. Además se incluyó una restricción sobre el equipo de cosecha mecanizado, exigiéndole un mínimo para asignar por período.

La implementación del modelo indica que a nivel de restricciones aumentan a 2.332. Se tardó 1 minutos 37 segundos en encontrar la solución. Aumentó el número de pasos a 10.813 y también el de intentos a 373.777.

**Cuadro 14. Implementación del Modelo II**

CLASSIFICATION DATA	Current
Numerics	285035
Variables	220435
Adjustables	725
Constraints	2332
Integers/Binaries	725/0
Nonlinears	0
Coefficients	443269

**Cuadro 15. Información de solución Modelo II**

MODEL TYPE:	Mixed Integer / Linear
<b>SOLUTION STATUS:</b>	<b>GLOBALLY OPTIMAL</b>
OBJECTIVE VALUE:	1842.5905305592
DIRECTION:	Maximize
SOLVER TYPE:	Branch-and-Bound
TRIES:	374777
INFEASIBILITY:	3.6379788070917e-012
BEST OBJECTIVE BOUND:	1842.5905305592
STEPS:	10813
ACTIVE:	0
SOLUTION TIME:	0 Hours 1 Minutes 37 Seconds

El modelo cosechó un 95,3% del volumen disponible distribuyéndolo en los cinco períodos. Para cosechar este volumen requirió intervenir 140 escenarios de un total de 145 (96,6% de los escenarios).

**Cuadro 16. Distribución anual del volumen cosechado con el Modelo II**

Periodo	Volumen por tipo de equipo de cosecha (M3 ssc)				%
	SKHU	T500	SKGR	Total	
1	55.776	12.915	18.336	87.028	29%
2	21.664	8.863	5.674	36.201	12%
3	28.486	18.382	19.317	66.185	22%
4	26.752	19.007	0	45.759	15%
5	45.349	7.257	10.347	62.954	21%
Total	178.027	66.424	53.675	298.126	100%

Si bien, el mayor porcentaje de cosecha se concentra en el período 1, al regular el volumen por equipo y temporada se aprecia un efecto de normalizar el volumen cosechado por periodo.

Al observar el efecto de las regulaciones impuestas en la superficie cosechada se comprueba que tiene el mismo efecto que sobre el volumen. Se cosechó un 95,2% de la superficie.

**Cuadro 17. Distribución anual de la superficie con el Modelo II**

Periodo	Superficie por tipo de equipo de cosecha (Has)				%
	SKHU	T500	SKGR	Total	
1	137	31	40	209	29%
2	58	20	11	89	12%
3	70	49	38	157	22%
4	62	45	0	107	15%
5	110	19	23	153	21%
Total	437	164	113	714	100%

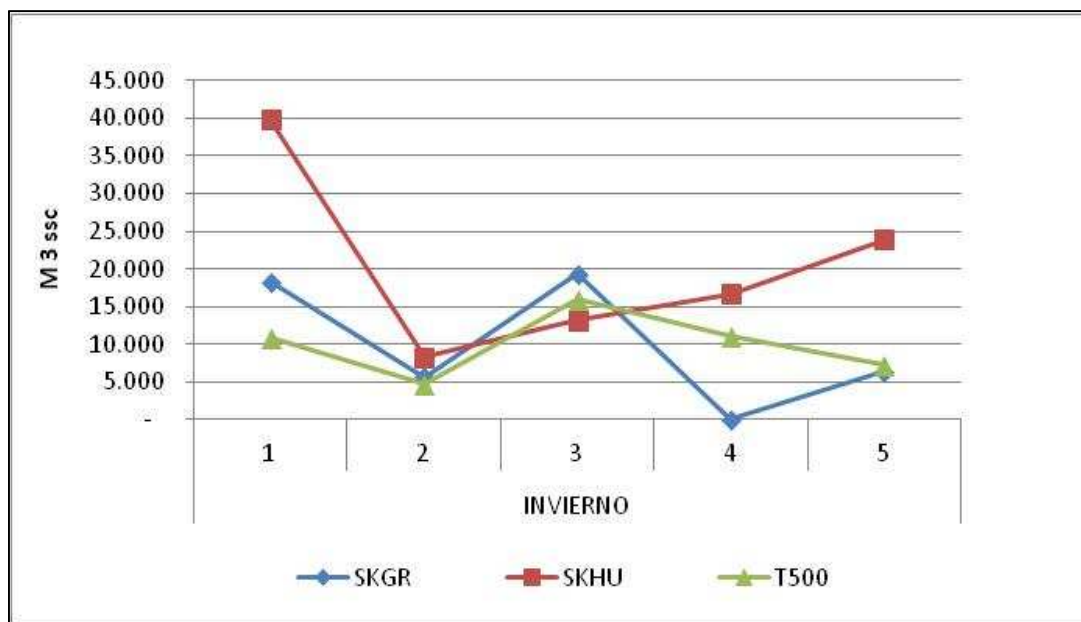
Al observar la distribución del volumen programado por temporada se puede concluir que el verano no supera la cota dada (18.000 m<sup>3</sup>), excepto en el último período, que se liberó intencionalmente para poder obtener una solución factible en un tiempo razonable. Respecto al volumen de cosecha por tipo de equipo, específicamente los mecanizados (SKGR), los períodos 1 y 2 fueron regulados exigiéndole al modelo que cosechara más de 18.000 m<sup>3</sup> para este equipo en particular. Se regularon los períodos 1 y 3 dado que restringir los períodos 1 y 2 genera infactibilidad. Esto se debe a que las superficies de SKGR son continuas y no es posible encontrar combinación de escenarios disjuntos que sumen el mínimo exigido.

**Cuadro 18. Distribución del volumen de cosecha por temporada con el Modelo II (m<sup>3</sup> ssc)**

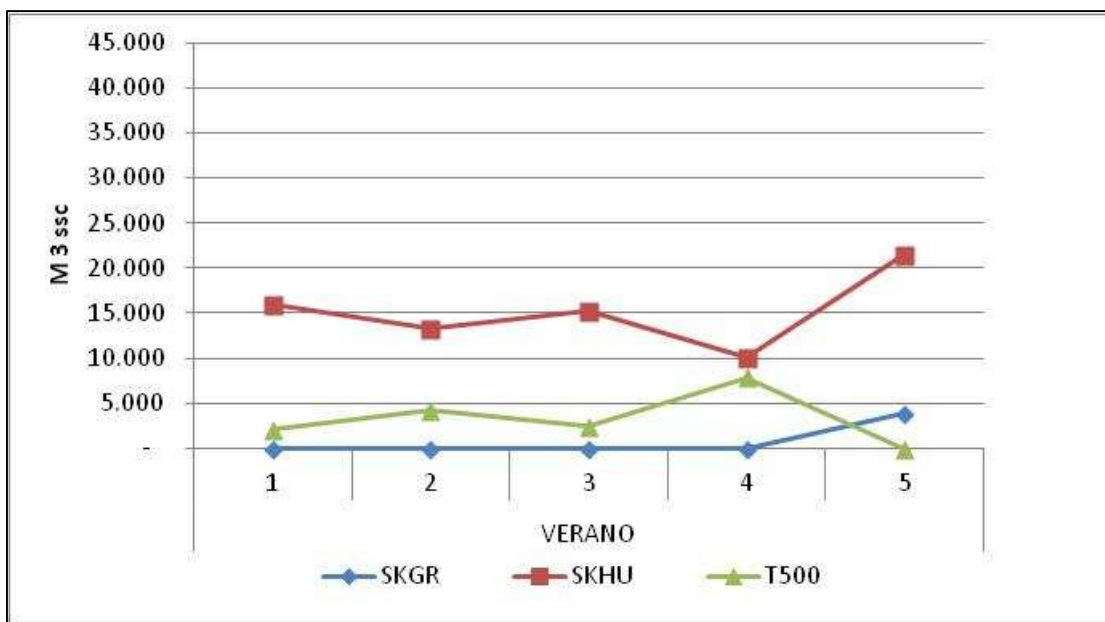
Temporada	Periodo	SKGR	SKHU	T500	Total
INVIERNO	1	18.336	39.831	10.880	69.047
	2	5.674	8.329	4.679	18.682
	3	19.317	13.163	15.976	48.455
	4	-	16.702	11.116	27.819
	5	6.433	23.947	7.257	37.636
Total INVIERNO		49.760	101.971	49.908	201.639
VERANO	1	-	15.945	2.036	17.981
	2	-	13.335	4.183	17.519
	3	-	15.323	2.406	17.730
	4	-	10.050	7.890	17.940
	5	3.915	21.402	-	25.317
Total VERANO		3.915	76.056	16.516	96.486
Total general		53.675	178.027	66.424	298.126

La oscilación de volumen cosechado que caracterizó al Modelo I no es tan fuerte en el Modelo II. Además en el verano casi no existe oscilación por lo que tiende a estabilizarse la cosecha.

**Gráfico 4. Oscilación de volumen de cosecha temporada invierno con el Modelo II**



**Gráfico 5. Oscilación de volumen de cosecha temporada verano con el Modelo II**

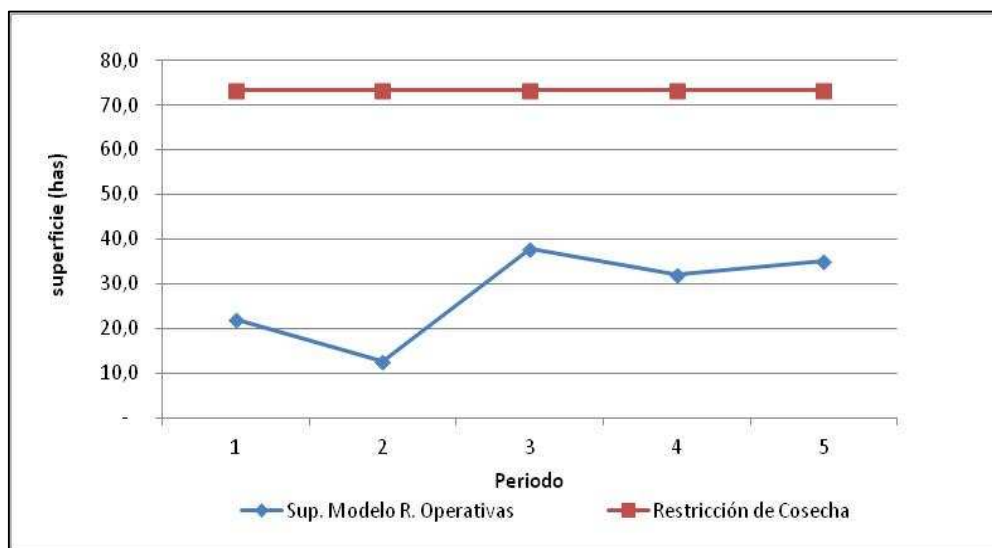


Al igual que en el caso del Modelo I, la intervención de áreas sensibles no representa una restricción fuerte al momento de buscar la solución óptima al problema. Existe una oscilación entre el primer y segundo período en torno a las 20 hectáreas para pasar a partir del tercer período a moverse en torno a las 35 hectáreas.

**Cuadro 19. Superficie programada en áreas sensibles con el Modelo II**

Periodo	Sup. Intervenido en Áreas Sensible (has)	% Intervenido
1	22,0	15%
2	12,5	8%
3	37,7	26%
4	32,0	22%
5	35,0	24%
Total	139,2	21% <sup>6</sup>

**Gráfico 6. Oscilación de volumen de cosecha en áreas sensibles con el Modelo II**



En el caso del Modelo II, la superficie programada que es visible corresponde a un 54,7%, mostrando poca variabilidad en cada periodo.

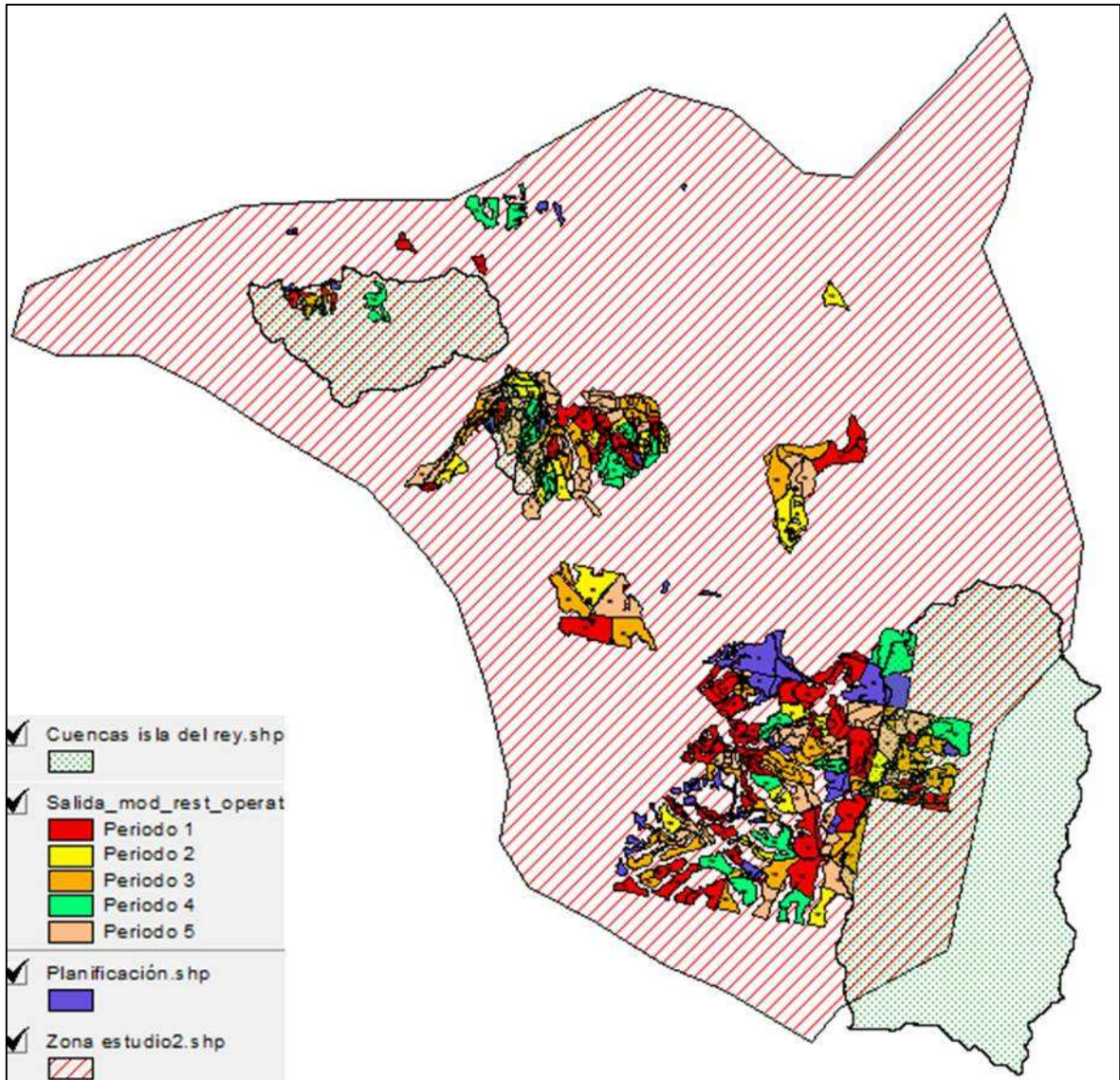
**Cuadro 20. Intervención de áreas visibles con el Modelo II (has)**

Periodo	Sup. Visible Programada	Sup. Programada	% de Sup. Programada en Áreas Visibles
1	110,5	208,6	53,0%
2	47,8	88,8	53,9%
3	89,5	156,9	57,1%
4	62,6	106,9	58,5%
5	80,1	152,7	52,5%
Total	390,6	714,0	54,7%

<sup>6</sup> Corresponde al promedio ponderado del porcentaje intervenido. Se pondera por la superficie intervenida anualmente.



**Ilustración 11. Resultado de programación de cosecha Modelo II**



### 4.3 Modelo III

Para este caso, además de agregarle las restricciones operativas se modificó la función objetivo incorporándole una penalización en el beneficio neto de cada escenario. Esta penalización corresponde a una disminución del margen, proporcional al porcentaje de visibilidad de cada escenario de cosecha. Por ejemplo, si el escenario  $i$  tiene asociado un 60% de su superficie visible, entonces su beneficio neto penalizado será el 60% del beneficio neto original.

La implementación del modelo a nivel de número de restricciones no cambió, manteniéndose las 2.332. El tiempo de resolución fue de 1 minutos y 33 segundos.

### Cuadro 21. Información de solución Modelo III

MODEL TYPE:	Mixed Integer / Linear
<b>SOLUTION STATUS:</b>	<b>GLOBALLY OPTIMAL</b>
OBJECTIVE VALUE:	792.99651261664
DIRECTION:	Maximize
SOLVER TYPE:	Branch-and-Bound
TRIES:	557841
INFEASIBILITY:	2.0463630789891e-012
BEST OBJECTIVE BOUND:	792.99651261664
STEPS:	13176
ACTIVE:	0
SOLUTION TIME:	0 Hours 1 Minutes 33 Seconds

A nivel de volumen cosechado, a diferencia del Modelo II, se programa un 91,9% del volumen disponible, utilizando para ello 127 escenarios que representan el 87,5% del total.

### Cuadro 22. Distribución anual del volumen cosechado con el Modelo III

Periodo	Volumen por tipo de equipo de cosecha (M3 ssc)				%
	SKHU	T500	SKGR	Total	
1	47.587	19.270	18.336	85.194	30%
2	17.651	12.434	9.589	39.674	14%
3	27.442	18.396	19.317	65.155	23%
4	34.959	6.098	0	41.056	14%
5	42.616	7.518	6.433	56.567	20%
Total	170.255	63.716	53.675	287.646	100%

De acuerdo a los resultados se observa que se mantiene la oscilación en los volúmenes cosechados anualmente al igual que en los Modelos I y II. A nivel de superficie, la superficie intervenida baja a un 92,1% mostrando una oscilación similar a la del volumen.

**Cuadro 23. Distribución anual de la superficie con el Modelo III**

Periodo	Superficie por tipo de equipo de cosecha (Has)				%
	SKHU	T500	SKGR	Total	
1	115	48	40	203	29%
2	44	27	22	92	13%
3	70	48	38	157	23%
4	85	15	0	100	14%
5	106	20	12	138	20%
Total	420	157	113	690	100%

En cuanto a la cosecha por temporadas, al igual que en los modelos anteriores, existe una amplia variación del volumen cosechado. También explicadas por las continuidades de superficies de equipos planificados. Al igual que en el caso del Modelo II, se regularon los equipos mecanizados en los periodos 1 y 2 solamente, esto para evitar infactibilidad del problema.

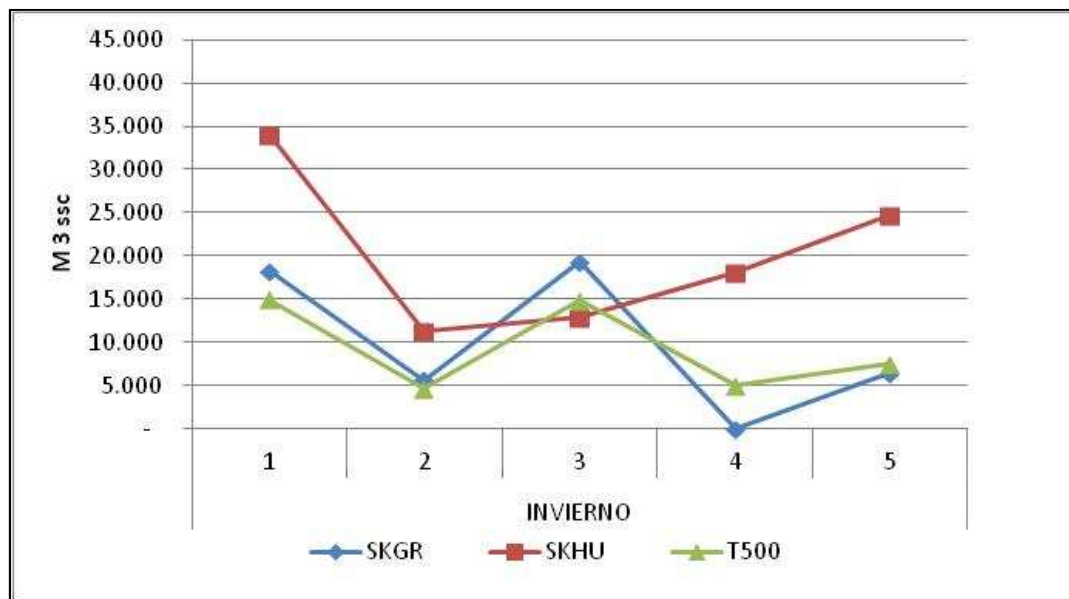
**Cuadro 24. Distribución del volumen de cosecha por temporada con el Modelo III (m3 ssc)**

Temporada	Periodo	SKGR	SKHU	T500	Total
INVIERNO	1	18.336	33.967	14.968	67.272
	2	5.674	11.379	4.679	21.733
	3	19.317	12.900	14.961	47.177
	4	-	18.110	5.074	23.184
	5	6.433	24.746	7.518	38.697
Total INVIERNO		49.760	101.103	47.201	198.063
VERANO	1	-	13.620	4.302	17.922
	2	3.915	6.272	7.755	17.942
	3	-	14.542	3.436	17.977
	4	-	16.849	1.024	17.872
	5	-	17.869	-	17.869
Total VERANO		3.915	69.152	16.516	89.582
Total general		53.675	170.255	63.716	287.646

Las variaciones de volumen cosechado por tipo de equipo y periodo no muestran variaciones importantes respecto al Modelo II. A nivel del total cosechado, los equipos SKHU y T500 si registran una baja en el volumen programado respecto al Modelo II.

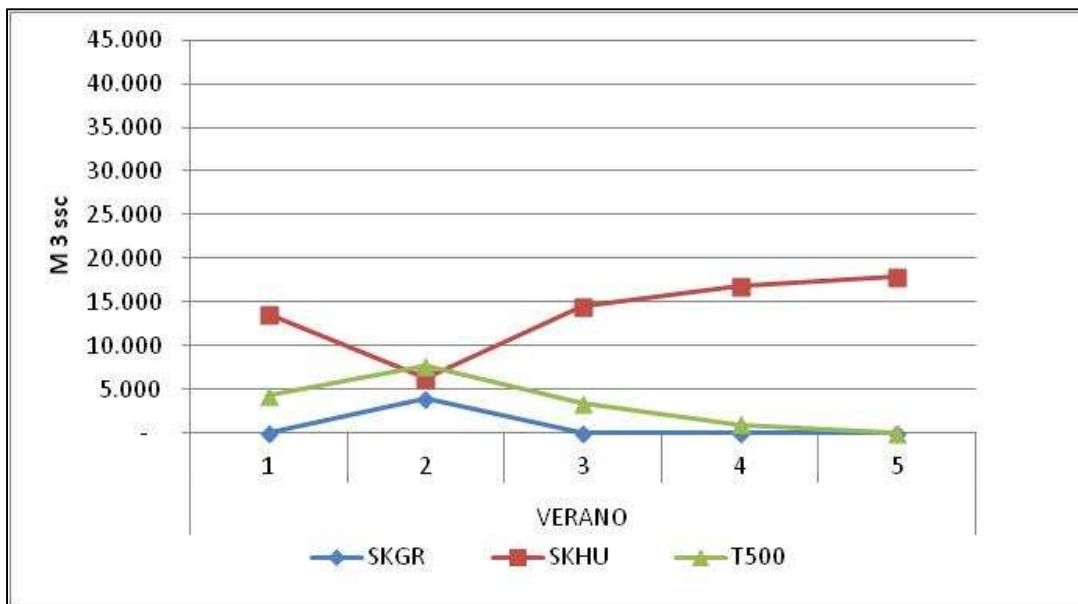


**Gráfico 7. Oscilación de volumen de cosecha temporada invierno con el Modelo III**



Para el caso del volumen programado para verano, al comparar con el Modelo II, el tipo de equipo SKHU registra una tendencia creciente a partir del periodo 2 a diferencia del Modelo II donde todos los equipos tenían un comportamiento más irregular.

**Gráfico 8. Oscilación de volumen de cosecha temporada verano con el Modelo III**

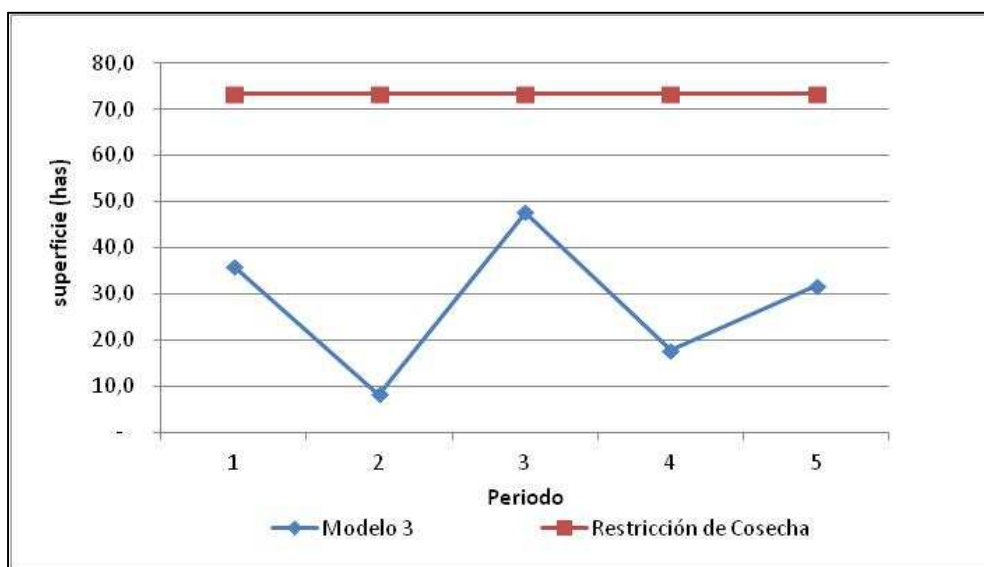


Para el caso de la superficie intervenida en las zonas denominadas sensibles, se verificó un aumento de esta superficie cosechada, representado en promedio para los tres periodos un 24% de superficie programada dentro de las zonas sensibles. En el periodo 3, se registra el punto más alto de intervención en este tipo de zonas, llegando a un 32%.

**Cuadro 25. Superficie programada en áreas sensibles con el Modelo III**

Periodo	Sup. Intervenida en Áreas Sensible (has)	% Intervenido
1	35,9	24%
2	8,2	6%
3	47,7	32%
4	17,7	12%
5	31,7	22%
Total	141,3	24%

**Gráfico 9. Oscilación de volumen de cosecha en áreas sensibles con el Modelo III**

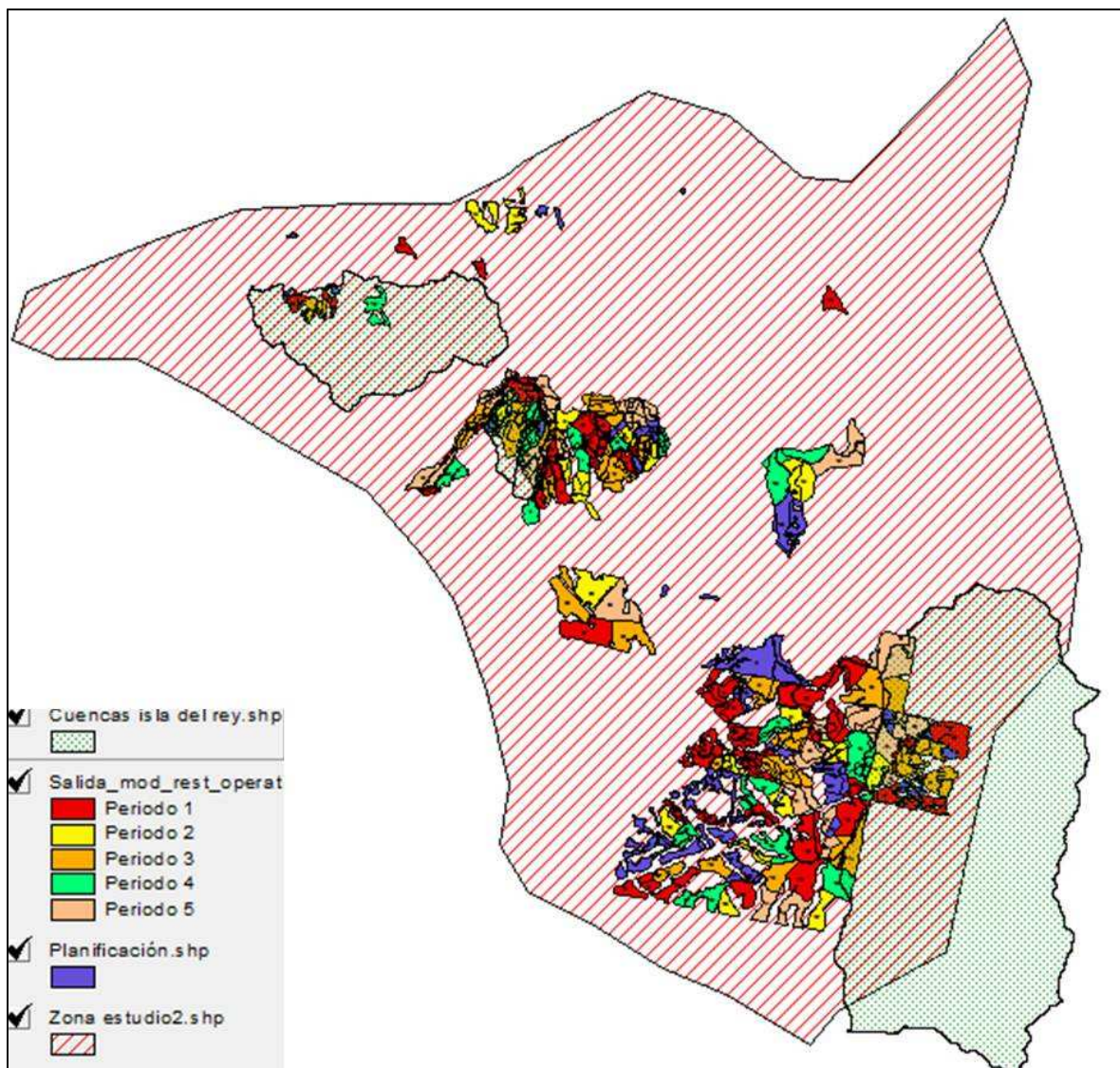


La superficie visible programada en esta versión del modelo alcanza el 53,4 para la suma de todos los periodos, un aspecto destacable es que la variabilidad es mayor en este modelo respecto de los otros dos implementados.

**Cuadro 26. Intervención de áreas visibles con el Modelo III (has)**

Periodo	Sup. Visible Programada	Sup. Programada	% de Sup. Programada en Áreas Visibles
1	109,2	203,0	53,8%
2	37,6	92,5	40,7%
3	85,2	157,0	54,2%
4	60,7	99,7	60,9%
5	75,8	138,2	54,8%
Total	368,5	690,4	53,4%

**Ilustración 12. Resultado de programación de cosecha Modelo III**



#### **4.4 Resultados Comparativos**

De manera de poder comparar cada uno de los modelos y sus efectos sobre la superficie programada y el impacto generado se presenta el siguiente cuadro que resume los resultados obtenidos.

**Cuadro 27. Comparación de los resultados obtenidos para los tres modelos implementados**

Periodo	Sup. Programada (has)			Sup. Visible Programada (has)			Sup Sensible Programada (has)		
	Modelo I	Modelo II	Modelo III	Modelo I	Modelo II	Modelo III	Modelo I	Modelo II	Modelo III
1	242,3	208,6	203,0	114,7	110,5	109,2	36,9	22,0	35,9
2	89,6	88,8	92,5	49,3	47,8	37,6	9,8	12,5	8,2
3	157,7	156,9	157,0	95,1	89,5	85,2	40,0	37,7	47,7
4	82,0	106,9	99,7	55,4	62,6	60,7	28,6	32,0	17,7
5	148,9	152,7	138,2	82,4	80,1	75,8	23,9	35,0	31,7
Total (has)	720,4	714,0	690,4	397,0	390,6	368,5	139,2	139,2	141,3

Al comparar cada uno de los modelos, es posible observar el efecto de las regulaciones operativas y sobre todo las regulaciones orientadas a la penalización de la cosecha en zonas visibles.

En términos del impacto económico de las regulaciones, el Modelo II no genera un impacto significativo en los resultados económicos a nivel de la función objetivo. Sin embargo, el Modelo III impacta severamente en este ámbito, bajando el margen esperado en un 50,2% respecto del Modelo I.

**Cuadro 28. Variación del margen esperado**

Modelo	Variación Margen Esperado <sup>7</sup>
Modelo I	100,0%
Modelo II	99,7%
Modelo III	50,2%

Un aspecto importante de analizar consiste en la superficie promedio programada por el modelo. Si bien el tamaño de las unidades de cosecha (escenarios) fue determinada a priori para el presente estudio y no se incluyeron restricciones para regular la extensión de cosecha, es interesante ver el comportamiento de este parámetro dentro de los resultados.

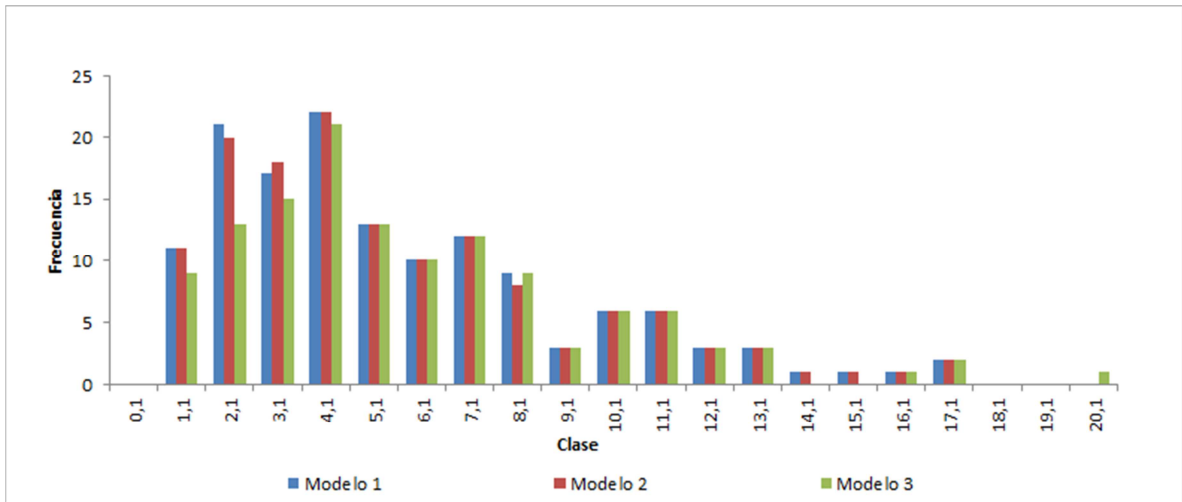
**Cuadro 29. Estadística de superficie programada (has)**

Estadístico	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Min	0,2	0,2	0,5
Max	16,7	16,7	19,7
Promedio	5,1	5,1	5,4
Desv. Estand	3,7	3,7	3,7

De acuerdo a los resultados de cada modelo implementado, no existen grandes variaciones en los tamaños de las superficies programadas para cosecha, siendo cercanas a las 5 hectáreas como promedio.

<sup>7</sup> Se considera como base (100%) el resultado de la función objetivo del Modelo I.

**Ilustración 13. Histograma de distribución de tamaño de superficies programadas según modelo implementado**



## 4.5 Implementación y puesta en práctica

### 4.5.1 Aspectos generales de la implementación

Tal como se planteó en la descripción del problema, el uso de técnicas de programación entera surge de momento que la organización donde se desarrolla el presente trabajo ve que su actividad productiva de cosecha forestal se desarrolla en zonas especialmente sensibles respecto de los impactos visuales y ambientales en general. Si bien en algunas situaciones puntuales se pueden generar soluciones manuales, no resulta trivial asegurar que se cumpla con una serie de restricciones de índole operativa, como por ejemplo cotas máximas de transporte fluvial, regulación de cosecha por tipo de faenas y temporadas. Siendo estas restricciones muy importantes en el ámbito productivo de la actividad forestal y lo que en definitiva impacta severamente en la gestión de cumplimiento a los clientes.

La salida del modelo desarrollado permite ser rápidamente visualizada en sistemas de información geográfica, permitiendo de esta manera al planificador etiquetar los escenarios de cosecha de acuerdo a la temporalidad que le indica el modelo e incluirlos en los sistemas oficiales de la organización.

**Cuadro 30. Salida del resultado del modelo**

Escenario	Tipo	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
1	T500	0	1	0	0	0
2	SKHU	0	0	1	0	0
3	SKHU	0	1	0	0	0
4	SKHU	0	0	0	1	0
5	SKHU	0	0	0	1	0
6	SKHU	1	0	0	0	0
7	SKHU	0	0	0	1	0
8	SKHU	0	1	0	0	0
9	SKHU	1	0	0	0	0
10	SKHU	0	0	1	0	0

**4.5.2 Uso y Mejoras de la solución entregada por el modelo**

Si bien, el modelo entrega una solución exacta, es factible que el planificador desee modificar la solución por distintos motivos (cambios en la planificación base, problemas legales, etc). En el caso del presente proyecto, la solución fue modificada en base a una actualización de la planificación base utilizada. Esto generó cambios en el programa generado por el modelo que como resultado implica un cumplimiento del plan propuesto por el modelo de un 89% al compararlo con la planificación final de la zona de estudio realizada por el planificador.

**Cuadro 31. Superficie final planificada para la zona de estudio (has)**

Temporada	Periodo	SKGR	SKHU	T500	Total general
INVIERNO	1	41,01	79,30	34,48	154,78
	2	10,96	33,01	12,01	55,98
	3	36,51	61,56	38,19	136,26
	4		34,69	14,73	49,42
	5	8,85	77,11	39,29	125,25
Total INVIERNO		97,33	285,66	138,70	521,70
VERANO	1	8,72	54,92	25,70	89,34
	2		16,45	5,66	22,12
	3	1,98	58,54	5,06	65,58
	4		38,49	2,49	40,98
	5		34,88		34,88
Total VERANO		10,70	203,28	38,92	252,90
Total general		108,03	488,94	177,62	774,59

**Cuadro 32. Comparación de los resultados del Modelo III con la planificación final**

Temporada	Periodo	SKGR	SKHU	T500	Total
INVIERNO	1	99%	100%	108%	101%
	2	100%	86%	80%	87%
	3	105%	51%	104%	80%
	4	0%	120%	82%	109%
	5	140%	76%	51%	73%
Total INVIERNO		105%	84%	85%	88%
VERANO	1	0%	64%	42%	52%
	2	0%	96%	301%	197%
	3	0%	66%	171%	72%
	4	0%	113%	100%	112%
	5	0%	136%	0%	136%
Total VERANO		100%	89%	100%	91%
Total general		104%	86%	89%	89%

Una vez aceptada la solución como un programa formal de cosecha, esta secuencia de intervención se hizo pública a las partes interesadas. En primer lugar fue mostrado al Gerente y posteriormente a las comunidades locales y empresarios turísticos, los que mostraron aceptación frente a un programa de cosecha que estaba considerando aspectos como la belleza escénica y la protección de los recursos hídricos de la zona.

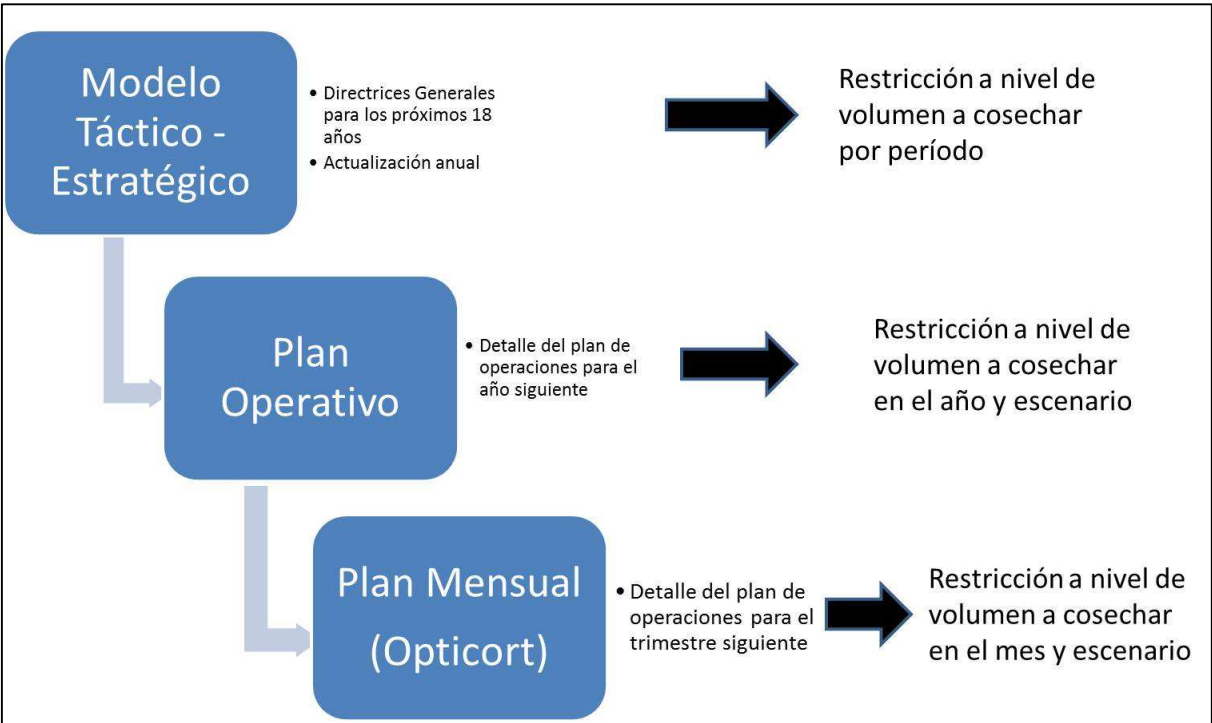
#### 4.5.3 Implementación propuesta

Hoy en día la planificación de producción funciona de acuerdo a un esquema bien definido que puede ser descrito por un proceso que va de lo general a lo específico (ver ilustración 14). En una primera instancia existe un marco estratégico que lo define, el denominado Modelo Táctico. Este paso genera las principales directrices de la empresa en términos de cosecha y abastecimiento a clientes en un horizonte de planificación de 18 años, siendo el primer año del modelo el que tiene menor incertidumbre y contra el cual se desarrolla el Plan Presupuestario del año siguiente. Este Plan Presupuestario se denomina Plan Operativo y es el que refleja la planificación de la gestión de la empresa para el año siguiente. En este plan se especifican los lugares donde se cosechara y como esta cosecha cubrirá la demanda de los clientes. Posteriormente, y ya en ejecución el Plan Operativo, se generan planificaciones de producción que son de carácter mensual y con horizonte trimestral las que son realizadas a un nivel de detalle bastante alto y que reflejan en gran medida la realidad de la operación. En las dos últimas etapas, la herramienta utilizada es el Sistema Opticort, que optimiza la producción asegurando maximizar el resultado operacional de la empresa pero cumpliendo con una serie de restricciones del proceso de producción.

Para alimentar todas las etapas antes descritas, es necesario especificar que volumen de madera está disponible en cada etapa. Esto quiere decir que rodales están en edad de cosecha en cada período de tiempo. Es en esta instancia donde es factible utilizar los resultados del modelo presentado en este trabajo. Específicamente, el modelo es capaz de indicar que escenarios son los que se deben cosechar en un horizonte de planeación dado, con esta información es posible acotar la cantidad de volumen que el modelo táctico cosecha de él (los) predios en cuestión. Con esta información incluida, la

siguiente etapa que es el Plan Operativo debería incorporar este tipo de regulaciones. Finalmente, en el plan mensual, el programa es de directa aplicación.

**Ilustración 14. Propuesta de Implementación del Modelo**





## 5 Comentarios y Conclusiones

De acuerdo a lo expuesto en este documento se puede concluir y comentar lo siguiente:

- Actualmente, la actividad forestal está sometida a múltiples regulaciones en el ámbito ambiental y social. Uno de los principales focos de atención sobre la actividad, es la intervención de grandes extensiones continuas de bosques, en este sentido, el desarrollo presentado anteriormente, representa una aplicación práctica de métodos sofisticados de modelación matemática en la programación real de una cosecha forestal en un horizonte de 5 años, incorporando aspectos de continuidad de cosecha.
- Además, permite establecer una pauta metodológica de aplicación de la herramienta en una empresa forestal, incluyendo los resultados del modelo en la planificación estratégica, táctica y operativa.
- De esta forma, contar con este tipo de herramientas, abre la posibilidad de incorporar estos resultados en operativos llegando incluso a restringir las unidades específicas de cosecha (escenario).
- El modelo es susceptible de ser mejorado incluyendo para cada escenario el detalle del volumen ofertado, especificando aún más el tipo de producto y rangos de diámetro de manera de asegurar el cumplimiento de la demanda con menor grado de incertidumbre.
- La salida del modelo puede ser válida como herramienta de programación de equipos.
- Existe la posibilidad de regular aún más los equipos, por ejemplo: Incorporar restricciones de cosecha de tipo SKHU máxima permitida en zonas sensibles y favorecer las cosechas con torres de madereo, las que impactan menos sobre el suelo.
- En este caso se trabajó con 5 predios, lo que da pie a pensar en modelos más extensivos que permitan programar cosecha a nivel de cuencas o comunidades o sitios de interés.
- Una manera de regular la superficie promedio cosechada podría consistir en penalizar en función de la superficie de cada escenario, esto también debería ayudar a mejorar el resultado ambiental de la operación.
- El efecto de la penalización no es muy alto en términos del programa de cosecha generado, esto porque la superficie planificada tiene un alto porcentaje de superficie visible (55%).
- De manera de mejorar los resultados sobre el paisaje se podría implementar este mismo modelo agrupando escenarios (cluster). Esto abre la posibilidad de reducir el

número de variables y al mismo tiempo programar la cosecha en zonas más extensas.

- A diferencia de otras iniciativas de solución al problema de cosecha con restricciones de adyacencia, la que se presenta está basada en la planificación de cosecha, lo que hace que esta herramienta se transforme en una herramienta de generación de programas de cosecha para una zona en particular.
- La salida del modelo representa una salida directa a los Sistemas de Información Geográfica que hoy operan en la empresa donde se desarrolló el proyecto, esto representa una ventaja dado que facilita la tarea de etiquetar y visualizar gráficamente el resultado del modelo por el planificador.

## 6 Bibliografía

BOSTON, K. BETTINGER, P. 2002. Combining Tabu Search and Genetic Algorithm Heuristic Techniques to Solve Spatial Harvest Scheduling Problems. *Forest Science* 48: 35-58.

CHILE. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2011. Ley 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Ley Orgánica de Superintendencia del Medio Ambiente. Diciembre 2011. 122p.

CONESA, V. 1997. Guía Metodológica para la Evaluación de Impacto Ambiental. Ediciones Mundi-Prensa. 3ed. Madrid. 407p.

DUNN, M. 1974. Landscape Evaluation Techniques: An Appraisal and Review of the Literature. Centre for Urban and Regional Studies, University of Birmingham.S/P.

EPSTEIN R., 1989. Integrando Elementos de Especialización en la Planeación Forestal. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Industrial y al Grado de Magíster en Ingeniería Industrial. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 116p.

FAO, 1995. Impacto Ambiental de las Prácticas de Cosecha Forestal y Construcción de Caminos en Bosques Nativos Siempreverdes de la X Región de Chile. En Línea. <http://www.fao.org/docrep/V9727S/V9727S00.htm> Consulta: 10 de noviembre 2012.

FORESTAL VALDIVIA S.A., 2009. Prescripciones Técnicas de Planificación de Cosecha Forestal. Forestal Valdivia S.A. Valdivia, Chile.

GAYOSO, J., ACUÑA, M. 1999. Guía de Conservación de Paisaje. Proyecto Certificación del Manejo Forestal en las Regiones Octava, Décima y Duodécima. Programa de Producción Forestal y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral. Infor. Valdivia. Chile. 29p.

GOYCOOLEA, M., MURRAY, A., BARAHONA, F., EPSTEIN, R., WEINTRAUB, A. 2004. Harvest Scheduling to Maximum Area Restrictions: Exploring Exact Approaches. *Operation Research* 53(3): 490-500.

GOYCOOLEA M., MURRAY, A., VIELMA, J., WEINTRAUB, A. 2009. Evaluating Approaches for Solving the Area Restriction Model in Harvest Scheduling. *Forest Science* 55(2): 149-165.

MARTINS, I., CONSTANTINO, M., BORGES, J., 1999. Forest Management Models With Spatial Structure Constraints. Working Paper 2/99. Centro de Investigación Operacional, Universidad de Lisboa. Lisboa, Portugal.

MARTINS, I., CONSTANTINO, M., BORGES, J., 2000. A Column Generation Approach for Solving a Non-Temporal Forest Harvest Models With Spatial Structure Constraints.

Technical Report del Centro de Investigación Operacional, Universidad de Lisboa. Lisboa, Portugal.

McDILL, M.E., S. A. RABIN, J. BRAZE. 2002. Harvest Scheduling With Area-Based Adjacency Constraints. *Forest Science*. 48(4): 631-642.

TRONCOSO, J., PALMA C., IBACACHE X. 2000. Las Consideraciones Ambientales en la Planificación de Cosecha Forestal: Un Análisis Usando Programación Entera. *Bosque* 21(2): 13-26.

VIELMA, J.P., MURRAY, A. T., RYAN D., WEINTRAUB, A., 2003. Improved Solutions Techniques for Multiperiod Area-Based Harvest Scheduling Problems. En: *Systems Analysis in Forest Resources: Proceedings of the 2003 Symposium*. General Technical Report. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Portland Oregon. EEUU.

WOLSEY, L. A. 1998. *Integer Programming*. Nueva York. Jhon Wiley & Sons, Inc. 266p.

## **Anexos**

### **Anexo A**

Para la determinación de los escenarios visibles el proyecto contempló las siguientes etapas:

#### 1. Visita a terreno para determinar sectores con riqueza paisajística

Para desarrollar esta etapa se visitó la zona de estudio con la finalidad de determinar qué sectores representaban un alto valor en términos de paisaje. Para esto se utilizó el criterio de las rutas seguidas por la mayoría de los turistas y que sectores de la Isla son visibles.

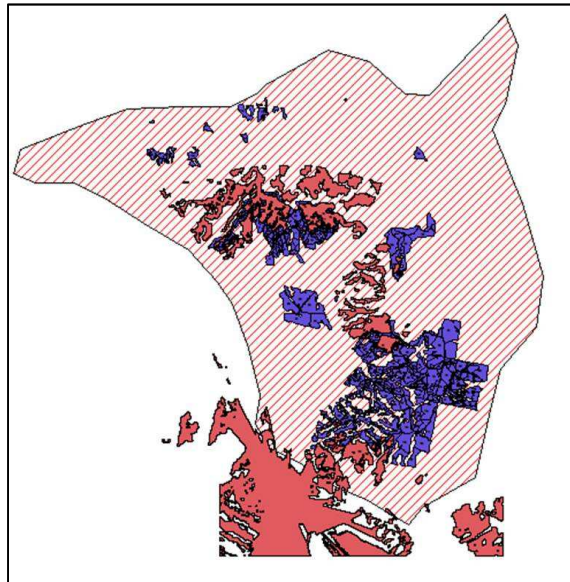
#### 2. Toma de coordenadas UTM de los puntos clave para la observación del paisaje

Finalizada la etapa anterior, fue necesario tomar los puntos desde los cuales instalaríamos a nuestro "Observador" de manera de saber cuáles eran sus puntos de observación. Con la ayuda de equipos GPS se obtuvieron las coordenadas UTM, necesarias para las etapas posteriores del levantamiento de información.

#### 3. Procesamiento de la información de terreno en oficina

Teniendo definidos los puntos de observación, se procedió a desarrollar el trabajo de oficina que tuvo por objetivo generar una cobertura en formato shape (leíble por Arc View) que representara lo que el observador ve desde los puntos elegidos. Para esto se utilizó el software Global Mapper y un modelo de elevación de la zona de estudio. Con ayuda del software, se obtuvo como resultado una cobertura que representa las zonas visibles de cada punto de observación. Posteriormente con ayuda de las herramientas de geoprocésamiento de ArcView se interseccionaron los sectores visibles con la planificación lo que generó una cobertura de las zonas planificadas visibles. Con esto se pudo calcular la proporción de visibilidad de cada escenario para de esta manera ingresarla al modelo como parámetro.

**Ilustración 15. Sectores Visibles de la Zona de Estudio para un punto de observación en particular (Sector Sur de la Isla del Rey)**



- Zonas Visibles
- Zonas Planificadas