

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

LA PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA ÓPTIMA
APLICADA A LA INDUSTRIA FORESTAL INTEGRADA
VERTICALMENTE

por

Felipe MAUTONE GUERRA
Pablo RODRÍGUEZ SOTTO

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO
URUGUAY
2011

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Msc. Adriana Bussoni

Ing. Agr. Carlos Faroppa

Ing. Agr. Roberto Bavosi

20 de junio de 2011

Fecha:

Autor:

Felipe Mautone Guerra

Pablo Rodríguez Sotto

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer en primera instancia a nuestros padres por todo el apoyo brindado durante todos estos años de estudiantes, por habernos dado la oportunidad de poder estudiar. Sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

A nuestra directora y tutora de tesis Ing. Agr. Adriana Bussoni por habernos introducido en este fascinante mundo de la Investigación Operativa, que sin duda nos va a abrir muchas puertas al mundo profesional y académico, muchas gracias.

A nuestro co-director de tesis, Ing. Agr. Carlos Faroppa, cuyas ideas fueron de suma utilidad en la elaboración y planificación de este trabajo.

Al Ing. Agr. Juan Cabris por su colaboración en la generación de las funciones de crecimiento.

Un especial agradecimiento al Ing. Agr. Roberto Bavosi, Ing. Agr. Waldemar Annunziatto, gerentes de Forestal Caja Bancaria, y a los Tec. Ftiales. Mauricio Patrilli y Leonardo Salvatierra, por habernos brindado la valiosa información que permitió que lleváramos adelante esta tesis.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.2 FORESTAL CAJA BANCARIA.....	2
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.1 <u>Objetivos específicos</u>	3
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	5
2.1 EL BOSQUE: MATERIA PRIMA.....	5
2.2 INVESTIGACIÓN OPERATIVA.....	6
2.3 PROGRAMACIÓN LINEAL.....	10
2.3.1 <u>Aspectos específicos de la PL</u>	16
2.3.2 <u>Componentes del modelo</u>	17
2.3.3 <u>Construcción de un modelo matemático</u>	18
2.3.4 <u>Modelos en programación lineal</u>	18
2.3.5 <u>Aplicación de técnicas de optimización en la producción forestal</u>	24
2.3.6 <u>Interpretación de los resultados de un modelo</u>	34
2.4 MODELOS DE PLANIFICACIÓN FORESTAL.....	40
2.4.1 <u>Modelos básicos utilizados en planificación forestal</u>	41
2.5 MÉTODO SIMPLEX EN PROGRAMACIÓN LINEAL.....	43
2.6 VALOR ESPERADO DEL SUELO.....	43
2.7 EL ASERRADERO.....	45
2.7.1 <u>Principales actores de la cadena de la madera</u>	47
2.7.2 <u>Plan estratégico, táctico y operativo</u>	48
2.8 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO (SIG).....	49
2.8.1 <u>Definiciones de un SIG</u>	49
2.8.2 <u>Sistemas de información geográficos en el manejo forestal</u>	50
2.8.3 <u>Integración de los SIG a la PL aplicado al manejo forestal</u>	51
2.9 ASPECTOS SILVICULTURALES.....	52
2.10 ANTECEDENTES SILVICULTURALES DE FORESTAL CAJA BANCARIA.....	53
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	54
3.1 RESUMEN DE LA METODOLOGÍA APLICADA PARA LA GENERACIÓN DE UN PLAN DE MANEJO PARA FORESTAL CAJA BANCARIA.....	54
3.2 ETAPAS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL MODELO MATEMÁTICO.....	55
3.2.1 <u>Obtención de la funciones de crecimiento</u>	55

3.2.2	<u>Cálculo del valor presente líquido de cada régimen (VPLR)</u>	57
3.2.3	<u>Determinación de los regímenes</u>	59
3.2.4	<u>Nomenclatura utilizada en el modelo</u>	60
3.2.5	<u>Variables artificiales</u>	61
3.2.6	<u>Función objetivo (FO)</u>	62
3.2.7	<u>Modelos utilizados y cuerpo de restricciones</u>	63
3.3	<u>UBICACIÓN DE LAS ESPECIES A PLANTAR</u>	65
3.3.1	<u>Productos</u>	65
3.4	<u>PRINCIPALES OBJETIVOS DE LA PLANIFICACIÓN</u>	66
4.	<u>RESULTADOS</u>	67
4.1	<u>SITUACIÓN INICIAL DE FORESTAL CAJA BANCARIA</u>	67
4.1.1	<u>Manejo de plantaciones</u>	67
4.2	<u>RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS MODELOS</u>	68
4.2.1	<u>Modelo Libre</u>	68
4.2.2	<u>Modelo 200-260</u>	81
4.2.3	<u>Modelo de producción constante</u>	91
4.2.4	<u>Modelo desvío de producción</u>	100
4.3	<u>ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE APROVECHADA Y LOS VOLUMENES OBTENIDOS EN LO CUATRO MODELOS</u>	108
4.4	<u>ANÁLISIS DE LA SUSTITUCIÓN DE LA ESPECIE PINUS SP</u>	110
5.	<u>DISCUSIÓN</u>	111
5.1	<u>ANÁLISIS DE LOS VALORES DE LAS FUNCIONES OBJETIVOS</u>	111
5.2	<u>LA META DE PRODUCCIÓN QUE IMPLICA OBTENER 100.000 MCS POR AÑO, ¿ES SUSTENTABLE CON LA ESTRUCTURA ACTUAL?</u>	113
5.3	<u>¿ES POSIBLE OBTENER 60.000 MCS ANUALES, CON LOS DESVÍOS PERMITIDOS?</u>	113
5.4	<u>¿POR QUÉ SE UTILIZAN MÁS PLANTACIONES DEL SUR QUE DE BACACUÁ, EXCEPTO EN EL MODELO LIBRE?</u>	113
6.	<u>CONCLUSIONES</u>	115
7.	<u>RESUMEN</u>	118
8.	<u>SUMMARY</u>	120
9.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	122
10.	<u>ANEXOS</u>	124

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Fórmula matemática general del valor total presente de un conjunto de regímenes.....	8
2. Representación matemática de la restricción correspondiente al área.....	8
3. Representación matemática de las restricciones correspondientes al volumen.....	9
4. Ecuación matemática general, utilizada en programación lineal.....	20
5. Ecuación matemática para el Modelo I.....	22
6. Ecuación matemática para el Modelo II.....	23
7. Ecuación de transporte de madera.....	28
8. Modelo de programación lineal utilizado por Mello et al. (2004).....	33
9. Modelo original de los alimentos escrito en el software de programación.....	36
10. Resultado de la función objetivo.....	36
11. Salidas del modelo.....	37
12. Segundo modelo del ejemplo de los alimentos.....	38
13. Resultados del modelo.....	38
14. Tercer modelo en del ejemplo tratado.....	39

15. Resultados del tercer modelo.....	39
16. Cálculo del VES a través del ingreso neto.....	44
17. Cálculo del VAN.....	44
18. Cálculo del VES utilizando el Valor Actual Neto.....	45
19. Funciones de crecimiento utilizadas en los modelos matemáticos.....	56

Figura No.

1. Esquema de aprovechamiento del árbol.....	58
--	----

Gráfico No.

1. Representación gráfica de las restricciones de alimentos.....	13
2. Determinación de la región factible.....	13
3. Intersección de la región factible con las restricciones.....	14
4. Modelo libre.....	76
5. Modelo 200-260.....	87
6. Modelo de producción de constante.....	97
7. Modelo desvío de producción.....	105

Mapa No.

1. Utilización de las plantaciones disponibles, bajo el régimen del modelo libre.....	80
2. Utilización de las plantaciones disponibles, bajo el régimen del modelo 200-260.....	90
3. Utilización de las plantaciones, bajo el régimen de manejo con el modelo de producción constante.....	99
4. Utilización de las plantaciones disponibles, bajo el régimen modelo desvíos de producción.....	107

Tabla No.

1. Manejo actual realizado a las plantaciones de la especie pinus sp.....	68
2. Manejo realizado a las plantaciones de la especie eucalyptus sp.....	68
3. Regímenes seleccionados correspondientes a los Eucalyptus sp. del modelo libre.....	70
4. Regímenes seleccionados correspondientes a los pinus sp. del modelo libre.....	72
5. Oferta de madera a partir de los resultados del modelo libre.....	74
6. Discriminación del volumen cosechado, según las especies cosechadas en el modelo libre.....	75
7. Hectáreas cosechadas de los regímenes seleccionados en el modelo libre.....	78

8. Regímenes seleccionados correspondientes a los eucalyptus sp. del modelo 200_260.....	82
9. Regímenes seleccionados correspondientes a los pinus sp. del modelo 200_260.....	83
10. Modelo 200-260.....	85
11. Discriminación del volumen cosechado, según las especies cosechadas en el modelo 200_260.....	86
12. Hectáreas cosechadas en los regímenes seleccionados para el modelo 200-260.....	88
13. Regímenes seleccionados correspondientes a los eucalyptus sp. del modelo constante.....	92
14. Regímenes seleccionados correspondientes a los pinus sp. del modelo constante.....	94
15. Modelo de producción constante.....	95
16. Discriminación del volumen cosechado, según las especies cosechadas en el modelo de producción constante.....	96
17. Regímenes seleccionados para el modelo de producción constante.....	98
18. Regímenes seleccionados correspondientes a los eucalyptus sp. del modelo desvíos de producción.....	101
19. Regímenes seleccionados correspondientes a los pinus sp. del modelo desvíos de producción.....	102
20. Modelo desvío de producción.....	103

21. Discriminación del volumen cosechado, según las especies cosechadas en el modelo desvíos de producción.....	104
22. Regímenes seleccionados para el modelo desvío de producción.....	106
23. Comparación entre los cuatro modelos, según el porcentaje de utilización de la tierra.....	108
24. Análisis del total del volumen cosechado y superficie total utilizada, durante el período de planificación.....	108
25. Análisis comparativo entre los diferentes modelos según el rendimiento y superficie utilizada en cada período.....	109
26. Sustitución de pinus sp.....	110
27. Valores de las cuatro funciones objetivos de los modelos.....	111

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la industria forestal es de suma importancia para dar valor agregado a la madera cosechada. Así mismo, este desarrollo permite que se genere mayor cantidad de puestos de trabajo, se desarrolle la tecnología en los procesos de transformación de la madera y se obtenga un efecto multiplicador en la economía.

A través de las plantaciones forestales se obtiene un amplio abanico de productos que pueden ser utilizados por la industria con diversos fines. Si bien la materia prima es la misma, la madera, son varias las industrias que aprovechan dicho producto, transformándolo en varios sub-productos. De esta manera, la madera se encuentra en la industria del papel, aserrado, mueble y últimamente se ha convertido en componente principal como generador de energía renovable. Así mismo, en los últimos años el bosque ha adquirido relevancia en otros aspectos, como ser el recreativo, la protección de los recursos hídricos y edáficos, el secuestro de las emisiones de dióxido de carbono, entre otros.

De esta manera el recurso forestal ha comenzado a tener un papel más relevante, tanto en el área económica financiera, como en otros aspectos de carácter social y ambiental.

En este nuevo escenario, se plantea la posibilidad de implementar técnicas basadas en el uso de modelos matemáticos, como complemento en la administración y manejo en situaciones donde el proceso productivo involucra la utilización de varios recursos, los cuales deben satisfacer más de un objetivo al mismo tiempo. De esta manera se logra cumplir con las metas deseadas, cuando los objetivos perseguidos son conflictivos entre ellos.

Si se toma como ejemplo el caso de una industria forestal, como Forestal Caja Bancaria, la cual cuenta con un aserradero, plantaciones propias y personal, entre otros recursos, a modo de ejemplo se puede tratar de alcanzar un nivel de actividad económica en una industria y a la vez tratar de preservar el medio ambiente, contratar mano de obra local.

Este enfoque se denomina análisis multicriterio, el cual se enmarca dentro de una metodología y técnica de trabajo denominada Investigación Operativa (IO), siendo Field en 1973 el primer investigador y promotor de esta metodología en el área forestal.

El uso de técnicas de IO para solucionar problemas de abastecimiento forestal, ha tenido un desarrollo acelerado a partir de la última década. En el Uruguay los modelos de abastecimiento con múltiples objetivos se han comenzado a aplicar en las industrias del sector forestal, con paquetes de software importados. Sin embargo, en el área académica no se han desarrollado estos modelos para ser aplicados en condiciones locales.

Es importante tener en cuenta que el bosque es un recurso natural, categorizado como destructible-renovable, lo cual implica que la utilización del recurso supone su agotamiento (carácter destructible), al tiempo que por regeneración, natural o artificial (carácter renovable), se recupera el stock forestal (Romero, 1989). Dado este carácter de destructible-renovable es imperioso una correcta planificación de la etapa de cultivo y cosecha ya que la regeneración del recurso se produce en el largo plazo.

1.2 FORESTAL CAJA BANCARIA

Forestal Caja Bancaria se fundó el 14 de mayo de 1925, como un fondo para pensionistas y jubilados de los funcionarios de los bancos públicos del país. Cuentan con un total de 18.000 ha, que se destinan a forestación y ganadería. En lo que a forestación respecta, 10.800 ha se encuentran en el departamento de Paysandú, de las cuales 6.000 ha están en Piedras Coloradas. Así mismo, cuentan con 5.700 ha en El Carmen, departamento de Durazno (CJPB, 2010).

La producción forestal, se basa en la utilización de *Pinus taeda*, *Pinus elliotti*, *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunii*, con diferentes objetivos, siendo el principal la industria del aserrío.

Las especies de *Pinus sp.*, se utilizan para la producción de tablas para aserrío, chips para producción de energía, leña y extracción de resina, mientras

que las especies de *Eucalyptus sp.*, se destinan a la producción de tablas de aserrío, postes, pulpa, leña y chips para la producción de pastas celulósicas.

El último inventario, realizado a fines del 2009, indica un rendimiento promedio tanto para *Pinus sp.* como *Eucalyptus sp.* (monte fustal), en metros cúbicos sólidos (mcs) de 300 mcs ha⁻¹, con una edad de referencia de 20 años para el género *Pinus sp.* y 16 años para el género *Eucalyptus sp.*. En el caso de montes de origen tallar de *Eucalyptus sp.*, el rendimiento promedio fue de 145 mcs ha⁻¹.

Esta materia prima constituye la base de la industria del aserradero, la cual es manejada mediante un Plan de Manejo Forestal, en el que se incluyen los aspectos a tener en cuenta para satisfacer los requisitos de la industria. El consumo anual del aserradero de madera se ubica en el entorno de los 70.000 a 80.000 mcs. Sin embargo, el aserradero tiene un potencial de consumo de 100.000 mcs.

En todos los ámbitos, el social, económico y ambiental, se enfoca el trabajo desde un punto de vista de sostenibilidad. Ello implica una metodología de trabajo, el cual le exige a la empresa ser económicamente rentable, ambientalmente amigable y socialmente beneficiosa.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Demostrar el potencial de aplicación que tiene utilizar técnicas de optimización, como herramientas en la toma de decisiones, en el manejo y la administración de los recursos forestales.

1.3.1 Objetivos específicos

Desarrollar un modelo matemático el cual permita generar una planificación estratégica, aprovechando de manera eficiente la materia prima, con la finalidad de lograr un abastecimiento de volumen constante en el tiempo para el aserradero de Forestal Caja Bancaria.

Establecer el mejor modelo de planificación que permita realizar la sustitución de especies, al tiempo que se debe cumplir con las metas de producción anuales.

Rediseñar la nomenclatura de los rodales, para lograr una simplificación en el manejo y planificación de los mismos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 EL BOSQUE: MATERIA PRIMA

El bosque y las plantaciones, deberían verse como una empresa que genera y gerencia vegetación y vida, o sea una fábrica verde. En dicha fábrica, los recursos que se invierten, capital, energía solar, agua, semillas, animales, entre otros, son continuamente transformados en productos como árboles, espacios de recreación, ecosistemas de vida silvestre, etc. Este aspecto multifacético del bosque, hace que la administración y manejo de este ecosistema se enfoque hacia el relacionamiento equilibrado del mismo con los requerimientos del ser humano (Davis et al., 2001).

De esta manera, los bosques encierran una amplia variedad de beneficios y servicios, los cuales incluyen, producción de agua de calidad y limpia, reservas de energía y minerales, protección del suelo, suministro sustentable de madera, bellezas escénicas y paisajísticas, etc. (Baskent y Keles, 2005). En definitiva el bosque constituye un sistema sumamente complejo que debe ser administrado de manera racional, para el provecho de las generaciones actuales y futuras.

Con el aumento de la población mundial, muchos productos forestales, así como sus servicios, han sido sobreexplotados, excediendo el nivel sustentable. Existe un incremento a nivel mundial de los productos forestales. La sociedad, no ajena a este hecho, esta preocupada por la protección y salvamento de los sistemas forestales, para mantener su productividad en el largo tiempo y su condición natural sana (Baskent y Keles, 2005).

Como resultado de la preocupación mundial por el cuidado y uso responsable de los bosques, sus servicios y productos, surgen nuevos aspectos de tipo legal, técnicas y regulaciones internacionales, que apuntan a resolver estos problemas (Baskent y Keles, 2005).

Dada la complejidad de los sistemas forestales, se propone utilizar la Investigación Operativa como herramienta de trabajo, con el objetivo de facilitar el proceso de toma de decisión.

2.2 INVESTIGACIÓN OPERATIVA

La administración y los planes de manejo de los recursos naturales, entre ellos los bosques y plantaciones forestales, necesitan ser enfocados desde un punto de vista sustentable, bajo restricciones (leyes, decretos, etc.) las cuales asegurarán que el recurso natural no será utilizado más de lo necesario, aprovechándolo de manera eficiente (Bettinger et al., 2009), o sea preservando el recurso. De este modo, se garantiza que tanto las generaciones actuales como las futuras, tendrán iguales oportunidades de disfrutar y aprovechar cualquier recurso natural.

Desde esta perspectiva surge la idea de introducir una herramienta matemática para el manejo, administración y aprovechamiento de los recursos naturales, con un enfoque conservador, al mismo tiempo que eficiente. Se introduce así la Investigación Operativa (IO), como una herramienta dominante e indispensable para la toma de decisiones, con bases fundadas en el modelo matemático (Taha, 2004).

Esta herramienta surgió en la Segunda Guerra Mundial como una técnica que permitió el desembarco de tropas en posiciones estratégicas, ubicación de los radares, entre otras actividades bélicas. Posteriormente comenzó a ser utilizada en el ámbito gubernamental y empresarial para lograr un mejor aprovechamiento de los recursos, asignando éstos a diferentes actividades, con la finalidad de resolver los conflictos de intereses.

Así mismo, en el momento de tomar de decisiones deben tenerse en cuenta otros factores, tales como el comportamiento humano. Así, la IO constituye una base con fundamento objetivo y preciso, la cual complementa y ayuda en la gestión de recursos y solución de problemas de diversa índole.

Además de ser una herramienta, la IO es un arte y una ciencia. Mientras que el modelo matemático constituye la ciencia, el arte implica poder representar (modelar) matemáticamente la situación real lo más preciso posible, para así lograr hallar la solución o cuerpo de soluciones que mejor se adecuen a cada problema.

Lo que se busca es poder representar el mundo real o cualquier sistema real que necesite ser solucionado, mediante un sistema matemático. Esta representación matemática es lo que se denomina modelo matemático. Esto hace que a la hora de querer programar un sistema real, transformándolo en un sistema matemático, la solución del sistema estará en encontrar la solución del modelo (Dantzig, 1998).

Un modelo de IO cuenta con tres componentes principales, a saber: las alternativas o variables de decisión, las cuales conforman, el objetivo y las restricciones (Taha, 2004).

La metodología de trabajo en un caso de IO consiste, de manera general, en determinar las variables de decisión del problema. A partir de éstas, determinar la función objetivo y las restricciones del problema. Generalmente se busca obtener el óptimo del objetivo deseado que puede ser un nivel máximo o mínimo a alcanzar. En la primera categoría pueden estar objetivos como la rentabilidad económica, el mantenimiento de un determinado número de trabajadores, el volumen cosechado. Entre los posibles objetivos a minimizar podemos nombrar el nivel de impacto ambiental, efectos negativos sobre cuencas hídricas, etc.

De esta manera se logra representar el mundo real mediante un modelo matemático, constituyendo una abstracción de dicho mundo, para poder entender el funcionamiento del mismo. Esta abstracción nos permite enfocar los problemas a solucionar y tratar de encontrar las estrategias y medios para alcanzar dichos objetivos. Como resultado, lo que se busca, es tratar de mejorar u optimizar sistemas complejos como los forestales, utilizando recursos escasos, pudiendo asegurar con una adecuada formulación, la perpetuidad del aprovechamiento de dichos recursos. Como contrapartida, dichos modelos son meras abstracciones de la realidad y por lo tanto una aproximación a la misma, lo que implica que la implementación de dichos modelos debe pasar por una etapa de ajuste y de interacción con los ejecutores.

Según ya fuera mencionado, los modelos de IO incluyen la etapa de formulación del modelo teórico y dentro de éste la formulación de la Función Objetivo (FO). La función objetivo es una función que puede ser lineal o no lineal (cuadrática, etc.), la cual ayuda a evaluar la calidad de una solución de un problema. Se utiliza para evaluar el potencial de las diferentes combinaciones de regímenes o manejos propuestos por el centro decisor. Por este motivo es

que se asocian los conceptos de maximización y minimización (Bettinger et al., 2009).

A modo ilustrativo, se escribirá una función objetivo, con sus respectivos regímenes y valores, y con las correspondientes restricciones, aplicado a un grupo de rodales.

Cuadro No. 1. Fórmula matemática general del Valor Total Presente de un conjunto de regímenes.

$$\text{VTP} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M D_{ik} \cdot X_{ik}$$

Siendo:

VTP, valor total presente del conjunto de regímenes

D_{ik} , valor del manejo “i” en el régimen “k”

X_{ik} , superficie tratada con el manejo “i” bajo el régimen “k”.

En el caso de industrias o empresas forestales, se manejan cuatro cuerpos de restricciones, como de mayor importancia, las cuales implican el control del área a ser trabajada, los volúmenes cosechados ó reservados para el futuro, restricciones operacionales y presupuestarias.

Cuadro No. 2. Representación matemática de la restricción correspondiente al área.

Restricción de Área

$$\sum_{k=1}^M X_{ik} \leq A_i \quad \forall_i (i = 1,2,3,..N)$$

Esta restricción indica que la sumatoria de superficies “X” cosechadas con el manejo i bajo el régimen k , debe ser menor o igual al total de la superficie disponible.

Cuadro No. 3. Representación matemática de las restricciones correspondientes al volumen.

Restricción de Volumen	
$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M V_{i k t p} \cdot X_{i k} \geq V_{\text{Min}_{i p}} \quad (t=1,2,3,\dots T)$	$(p= 1,2,3,\dots P)$
$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M V_{i k t p} \cdot X_{i k} \leq V_{\text{Máx}_{i p}} \quad (t=1,2,3,\dots T)$	$(p= 1,2,3,\dots P)$

Estas restricciones obligan al modelo a cumplir con una determinada cantidad de volumen cosechado, tanto mínimo como máximo. Esta restricción de volumen es de suma importancia, ya que permite asegurar la oferta de madera en el tiempo, manteniendo niveles constantes de madera que ingresa a la industria y la que sale del monte.

Como ya se mencionó, existen restricciones de tipo operacional y presupuestario, cuyos coeficientes pueden ser variados. Sin embargo, la lógica en cuanto a la formulación de una inequación de estas restricciones, es similar a las anteriores. Si tomamos el caso de restricciones presupuestarias se debe escribir en el lado izquierdo la sumatoria los costos unitarios de cada proceso productivo, mientras que en el lado derecho se debe poner el total de capital disponible para la ejecución de las diferentes tareas.

Luego de haber elaborado el modelo, el cual está representado por las relaciones matemáticas, se obtiene la solución de éste, que es lo que devuelve el programa o software que se halla utilizado. A posteriori, un grupo

interdisciplinario compuesto por el centro decisor y los involucrados en el problema, se define la mejor manera de llevar a cabo la solución del modelo en el mundo real.

Es importante recordar el hecho de que esta herramienta, es un soporte objetivo para la toma de decisiones. De este modo, siempre se deben considerar, y no pasar por alto, las opiniones de las personas involucradas en las decisiones que serán tomadas. La importancia de dichas opiniones, radican en el hecho de que el programa que modela el sistema, no tiene la capacidad de discriminar beneficios no tangibles, como bienestar de la comunidad local, aspectos paisajísticos, etc., los cuales son medidos o evaluados por las personas.

Se dice que un modelo es factible cuando satisface las restricciones, y óptimo cuando alcanza el mejor valor (máximo o mínimo) de la función objetivo. Además, es importante la precisión o exactitud del modelo, pues de ello depende la calidad de la solución (Taha, 2004).

En la realidad y dada la complejidad de los problemas, es bastante difícil llegar al valor óptimo para cada criterio. Por este motivo, lo que se busca es poder llegar al valor más próximo posible de cada óptimo. Este carácter de flexibilidad, permite que se pueda modelar un sistema cuyas alternativas se encuentren en conflicto, y encontrar la solución óptima. Para realizar esta operación, se generan variables artificiales, desvíos máximos y mínimos que una solución pueda tomar respecto al valor ideal del objetivo determinado y encontrar la solución a más de un problema a la vez.

2.3 PROGRAMACIÓN LINEAL

La Programación Lineal (PL) constituye una de las herramientas más importantes de la IO. Data de la década de 1940, cuando George. B. Dantzig ideó una técnica, posteriormente denominada Programación Lineal, para resolver los problemas cotidianos. Desde esta perspectiva él decía que: “... *Primero se debe reconocer que la mayor parte de los problemas comunes, pueden ser reformulados como un sistema de inecuaciones lineales*”..., citado por Cottle (2006). Posteriormente su siguiente contribución fue cambiar las reglas que estaban establecidas para elegir planes (edictos) por funciones objetivos generales. El concepto de función objetivo, fue utilizado por primera vez en el ámbito militar siendo el ámbito pionero en testear la potencialidad de

esta herramienta, lo que posteriormente permitió el avance hacia aplicaciones civiles. Estos desarrollos junto a la creación del método Simplex, generaron una combinación muy poderosa (Cottle, 2006). Tan así es el poder de la PL que el propio Dantzig dijo: “...*El tremendo poder del método Simplex es una constante sorpresa para mí...*” (Dantzig, 1991).

De esta manera, se puede decir que la PL es una técnica, la cual permite distribuir los recursos, generalmente escasos, eficientemente, para lograr cumplir con los requisitos de manera óptima. Esta herramienta es ampliamente utilizada en varios rubros, como ser la industria, agricultura, transporte, así como también la utilizan instituciones gubernamentales que aplican dicha técnica en la administración pública.

Existen dos maneras de representar matemáticamente un problema de PL. Por un lado se puede representar gráficamente el problema; en este caso se grafican las restricciones y la función objetivo. A partir de las intersecciones de las gráficas se genera una figura geométrica, un polígono. El área que encierra dicho polígono es la región factible, esto es, la zona donde se encuentra la solución del problema. Esto se debe a que todos los puntos que se encuentren en esta área, cumplen con los requisitos del problema. Sin embargo, cuando se busca una solución óptima, que es el objetivo de la PL, se podría tardar mucho tiempo en encontrar aquel punto dentro del polígono que cumpla con el objetivo, dado que existen infinitos puntos. Por este motivo, la metodología para encontrar la solución óptima mediante el método gráfico, consiste en utilizar los vértices del polígono (los cuales cumplen con las restricciones impuestas), junto a las rectas de isocostos de la función objetivo. La solución óptima se encontrará en el punto de contacto entre alguno de los vértices del polígono y alguna de las líneas de isocostos.

A continuación se presenta un ejemplo de Programación Lineal, resuelto mediante el método gráfico, extraído de Chiang (1987).

Situación problema:

¿Cuál es la combinación de dos alimentos (x_1 y x_2) tales que se minimicen los costos?

Datos:

Aporte de cada alimento:

Alimento x1: 10 unidades de Ca, 5 de Proteínas y 2 de Vitamina A

Alimento x2: 4 unidades de Ca, 5 de Proteínas y 6 de Vitamina A

Costos de cada alimento

x1 cuesta 0,6 \$, mientras que el alimento x2 cuesta 1\$

Se pide que la dieta tenga por lo menos 20 unidades de Ca, 20 de proteínas y 12 de Vit.A, tales que los costos sean los mínimos.

En una primera instancia se procede a graficar las tres funciones correspondientes a cada alimento.

Determinación de la función objetivo.

Se pide

Min $0.6 x_1 + x_2$

Sujeto a

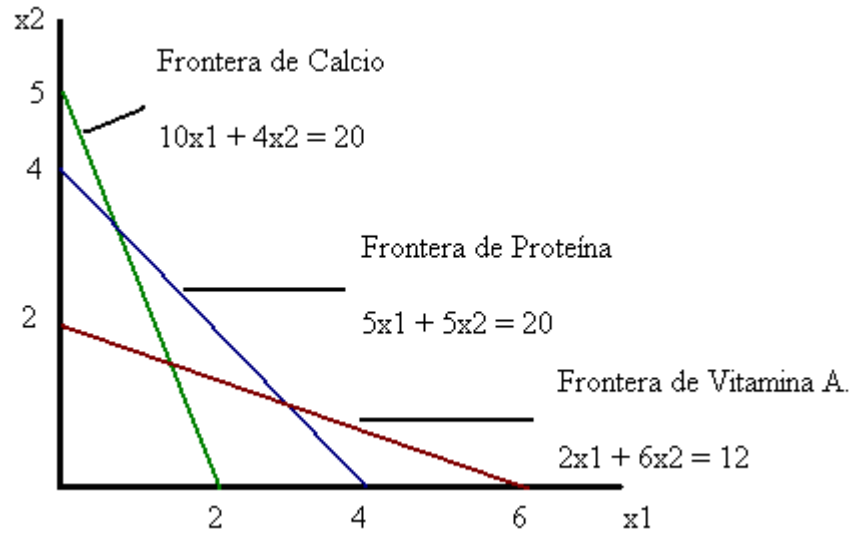
Restricción de Calcio $10 x_1 + 4 x_2 \geq 20$

Restricción de Proteínas $5 x_1 + 5 x_2 \geq 20$

Restricción Vitamina A. $2 x_1 + 6 x_2 \geq 12$

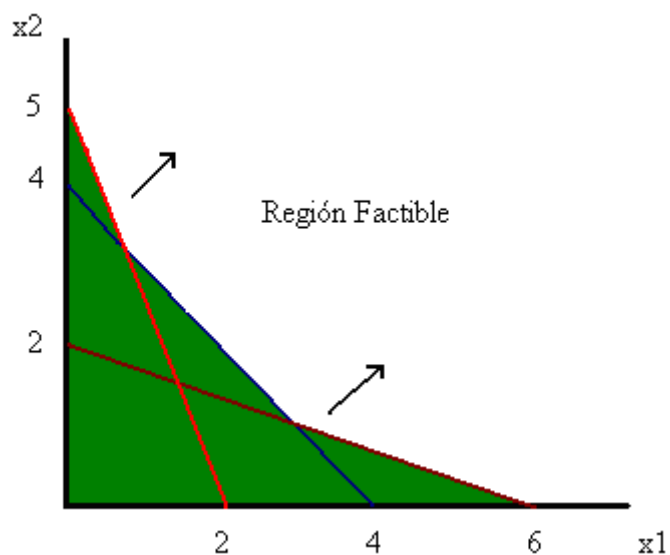
Restricción de no negatividad. $x_1 \text{ y } x_2 \geq 0$

Gráfico No. 1. Representación gráfica de las restricciones de alimentos.



A partir del gráfico anterior y las restricciones, se puede determinar la región factible, aquella donde se encontrará la solución óptima. En este caso, dado que se piden valores mayores o iguales a “x” valor, la región factible se compone por todos aquellos valores que sean mayores a dicho valor, esto implica que sean los que estén del lado derecho de cada gráfica.

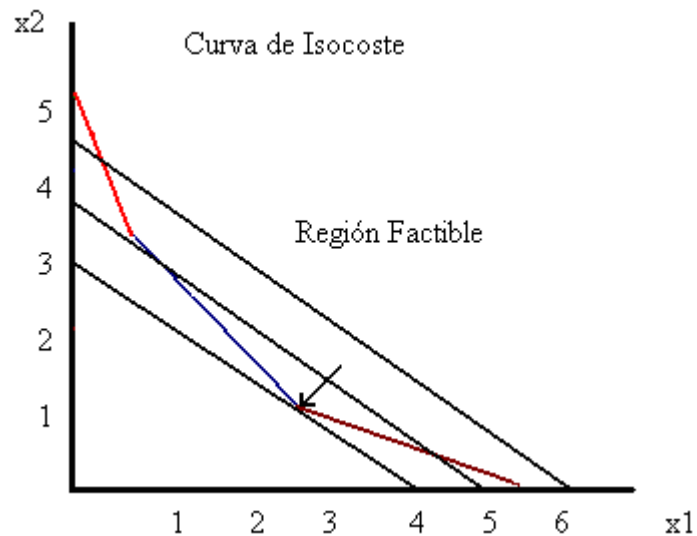
Gráfico No. 2. Determinación de la región factible.



Utilizando el valor de la pendiente de la función objetivo, se grafican varias isocostos. Estas líneas permiten obtener una variedad muy amplia de combinaciones de alimentos que tienen los mismos costos (a medida que me alejo del origen mayor costo), pero que permiten variar la cantidad de un alimento u otro que sea utilizado.

La solución óptima será aquella donde la línea de isocosto intersecte con algún vértice del polígono, como se puede apreciar en el gráfico No 3. En este ejemplo, el menor valor se encuentra en el vértice (3;1) lo que implica que serán utilizadas 3 unidades del alimento x_1 y 1 unidad del alimento x_2 , totalizando un valor de 2.8, el cual sale de sustituir los valores en la función objetivo: $0,6*3 + 1*1 = 2.8$. Cualquier otro vértice que fuera elegido, en vez del 3;1, hubiera dado un valor de función objetivo mayor.

Gráfico No. 3. Intersección de la región factible con las restricciones.



El segundo método, es un sistema algebraico, el cual implica utilizar sistemas de inecuaciones, las cuales se transforman en matrices y se resuelven mediante álgebra de matrices. Este procedimiento también se realiza de forma manual.

Estas dos metodologías son eficientes cuando se trata de resolver problemas con hasta tres variables incógnitas y pocos objetivos, o sea pocos

puntos esquina. Sin embargo, en la vida real, máxime en situaciones forestales, existen más de un objetivo y variables que deben ser modeladas para encontrar la solución óptima, resultando en un número elevado de puntos esquina, lo que llevaría mucho tiempo poder ejecutarlos a todos, haciendo el trabajo largo y tedioso. Por este motivo, se utilizan programas computacionales especiales como el LINDO o el LINGO, ambos de la compañía LINDO Systems®, los cuales permiten enfrentar problemas con múltiples variables de decisión y restricciones al mismo tiempo.

Es importante considerar el hecho de que esta herramienta cumple una función puramente objetiva, y ayuda al centro decisor a tomar la mejor decisión, no constituye un sustituto del gestor (Maness y Norton, 2002).

En un aserradero, como es el caso sobre el cual se basa este estudio, la precisión del modelo permitirá realizar pruebas de recomendación, antes de gastar tiempo y dinero. De esta manera los diferentes esquemas de trabajo o regímenes, serán evaluados por el programa, permitiendo analizar los diferentes escenarios, antes de tomar alguna decisión (Maness y Norton, 2002).

Dado que el mercado de los productos de la industria del aserrado, fluctúan mucho en cuanto a precio y demanda, es importante para este tipo de industrias, tener un inventario del sistema productivo. Esta estrategia permitiría solucionar estos problemas de caída de productos (Maness y Norton, 2002). La capacidad de tener un conocimiento preciso del principal recurso productivo, da la posibilidad de modificar la categoría que debe ser cosechada según las demandas del mercado.

A modo de síntesis de la forma en la que se debería encarar cualquier caso de PL, se puede decir que; al enfrentarse a un caso de PL, se debe considerar un sistema como una descomposición de funciones elementales las que se denominan actividades. Una actividad debe ser visualizada como una caja negra a la cual se le introducen variables, como ser, nivel de uso de una determinada maquinaria, cantidad de mano de obra, nivel de capital requerido, entre otros, de la que salen los productos deseados (Dantzig, 1998).

Como ejemplo de lo anterior, podría imaginarse el caso del aserradero que constituye la actividad, a la cual se le introducen variables como ser, cantidad de trozas a ser procesadas, cantidad de maquinaria, mano de obra,

capital, etc., y de la cual surgen una determinada cantidad de tablas prontas para el secadero, lo que constituye los productos o outputs (del inglés) del modelo.

2.3.1 Aspectos específicos de la PL

Como técnica dentro de la IO, la programación lineal se compone de una función objetivo, una o más restricciones y filas extras las cuales se componen de variables extras. Estas ecuaciones, generalmente inecuaciones, forman la base o fundamento para el método cuantitativo, el cual permite solucionar problemas (Bettinger et al., 2009).

Se considera que los modelos de PL, en su contexto más básico, están controlados por cuatro puntos principales:

1. Proporcionalidad: Cada variable en un problema de PL está asociado a un coeficiente. La contribución de cada producto producido a la función objetivo, es proporcional al número de unidades de cada producto producido.
2. Aditividad: Cada variable en la función objetivo, contribuye de manera independiente a dicha función
3. Divisibilidad: El valor de cada variable en un modelo de PL, se asume como número Real y continuo. Sin embargo, esto no siempre es así, debiéndose tomar valores enteros. Esto puede suceder con el número de trozas, por ejemplo.
4. Seguridad: Se asume que los coeficientes elegidos para cada variable, en el modelo de PL, son conocidos, no existiendo valores que hayan sido elegidos al azar.

Dantzig (1998) comparte los puntos de aditividad y proporcionalidad. Sin embargo, incluye la no negatividad (múltiples actividades positivas son posibles, a diferencia de actividades negativas) y la función objetivo lineal. Esta última, se explica de la siguiente manera: existen, en PL, productos que son especialmente preciados, por su aporte a la matriz de pagos, dándoles mayor importancia. Estos pueden ser capital, ensamblajes completos, tareas terminadas, etc. La contribución de cada actividad a la matriz de pagos será la cantidad de este productopreciado, que entra o sale del sistema. Por lo tanto, si el objetivo fuera el de maximizar ganancias económicas, cualquier actividad

que requiera dinero contribuye negativamente, y aquellas que producen dinero, contribuyen positivamente en las ganancias.

2.3.2 Componentes del modelo

El modelo matemático cuenta con dos componentes principales, a saber; las variables de decisión y las restricciones.

Las variables de decisión están conformadas por números y letras. Es importante tener en mente que ambos caracteres deben ser compatibles.

Es muy común en PL generar variables extra (adicionales), las cuales son utilizadas en las restricciones, para “obligar” al modelo a que cumpla con ciertos requisitos que son necesarios y que de otra manera no cumpliría. Dado que estas variables pueden ser letras y que el lado derecho de las ecuaciones (el resultado esperado) en PL deben ser números, éstas son reformuladas con el signo contrario, del lado izquierdo de la ecuación.

Como ejemplos en la generación de variables adicionales, se pueden citar el caso de volúmenes mínimos ó máximos a ser cosechados en cada período y volúmenes constantes de madera cosechada. Así mismo, se puede pedir al modelo que los volúmenes de cosecha en años sucesivos no decaigan, lo que genera un modelo de abastecimiento de madera con volúmenes iguales o mayores al período anterior.

Existen dos tipos de restricciones que son utilizadas en PL. Restricciones de tipo recursos y otras que están relacionadas con las políticas de cada empresa. Mientras que las de recursos se encargan de asegurar que se utilizará solamente lo necesario de un determinado recurso (presupuesto, personal, maquinarias, tierra, etc.), las restricciones políticas están relacionadas con los planes de manejo, objetivos ó regulaciones que debe seguir el modelo. En este último grupo, se encuentra el mantenimiento económico de la población aledaña a la industria, la protección de los ecosistemas afectados por la misma, el obtener un mínimo de rentabilidad y el mantener los costos en un cierto límite, entre otras (Bettinger et al., 2009).

2.3.3 Construcción de un modelo matemático

En su forma más básica, la construcción de los modelos, están basados en los cuatro supuestos antes mencionados; proporcionalidad, aditividad, divisibilidad y seguridad Dantzig (1998). Los pasos a seguir en la construcción del modelo se pueden agrupar en los siguientes puntos:

Definir la actividad a realizar: consiste en representar el sistema real en funciones matemáticas, cuyas variables están representadas por las actividades, y sus respectivos coeficientes. Es el caso de los diferentes regímenes que serán implementados en el modelo.

Determinar: qué recursos serán consumidos o producidos por las diferentes actividades, y como se miden.

Determinar los coeficientes de entrada-salida: que cantidad de productos serán consumidos en cada actividad, medido desde la unidad. Esta cantidad de coeficientes de entrada-salida, implica el factor de proporcionalidad entre la actividad y el producto que sale.

Determinar lo que sale: como resultado de las diferentes actividades, se podrá estimar el producto total, como ser los metros cúbicos de madera de tablas obtenidas en el proceso de aserrado.

Determinación de las ecuaciones: se debe asignar valores de no-negatividad a las diferentes variables, escribiéndolas en ecuaciones, relacionándolas con los valores que salen o se esperan. Constituye el cuerpo de restricciones.

2.3.4 Modelos en programación lineal

Johnson y Scheurman (1977), establecieron dos modelos para el manejo de montes y/o rodales conocidos como Modelos I y II. Esto surgió como resultado de la complejidad que implica planificar, administrar y gestionar un monte compuesto por varios rodales, que no necesariamente son coetáneos.

- Modelo I. En este modelo cada clase de edad la cual contiene una determinada cantidad de superficie o área, se transforma en un unidad de manejo, manteniéndose de esa manera, como unidad, durante todo el horizonte de planificación. Cada variable de decisión asociada a un régimen mantiene la identidad geográfica en el período de programación.

De esta manera, cada actividad representa un posible régimen, a ser aplicado en la unidad de manejo, con sus respectivas entradas y salidas del modelo. Cada régimen está compuesto por dos elementos: 1) una secuencia de cosecha de regeneración durante el horizonte de planificación y 2) un tratamiento silvícola asociado.

Para este modelo, se necesita una actividad silvicultural para cada regeneración posible durante el horizonte de planificación, con cada unidad de manejo. Estas actividades se identifican con la secuencia de regeneración y con la unidad de manejo a la cual pertenecen.

Se tiene en cuenta la posibilidad de no cosechar como una posible secuencia de cosecha, en situaciones que impliquen dejar una determinada área libre de ser cosechada.

Para cada unidad de manejo se establece una restricción que determina las hectáreas que pueden ser cosechadas, para permitir la posterior regeneración.

Un Modelo tipo I, se escribe de la siguiente manera:

Cuadro No. 4. Ecuación matemática general, utilizada en programación lineal.

$$\text{Max } \sum_{l=1}^U \sum_{q=1}^{R_l} D_{lq} X_{lq}$$

Sujeto a

$$\sum_{q=1}^{R_l} X_{lq} = A_l \quad l=1, \dots, U$$

Donde

x_{lq} = hectáreas de la unidad de manejo l, asignadas a la cosecha de regeneración q

A_l = número de hectáreas en la unidad de manejo l

U = número de unidades de manejo y unidades de clase de edad que contienen hectáreas en el período uno

R_l = número de posibles secuencias de cosecha de regeneración en el horizonte de planificación l

D_{lq} = tasa de descuento asignada a cada secuencia de cosecha de regeneración q

- Modelo II. En este modelo cada clase de edad, la cual contiene una determinada cantidad de hectáreas, forma una unidad de manejo hasta que es cosechada para regeneración. Aquellas hectáreas que sean cosechadas para la regeneración, formarán una nueva clase de edad y unidad de manejo, diferente a la anterior, hasta que se vuelvan a cosechar.

En este modelo cada actividad representa una posible alternativa de manejo para una determinada unidad de manejo, con sus respectivas entradas y salidas del sistema, desde que la unidad se regenera hasta que es cosechada o se

deja como inventario final sin cosechar. En resumen, este modelo permite que en un mismo espacio físico se generen n regímenes posibles.

Los regímenes de manejo en el Modelo II, al igual que el Modelo I, se componen de dos elementos; 1) una cosecha de regeneración en algún punto del horizonte de planificación ó inventario final y 2) tratamiento cultural asociado al régimen.

Se necesitan cuatro actividades para representar las siguientes situaciones: 1) representación de cada cosecha de regeneración para cada clase de edad que exista al comienzo del horizonte de planificación, 2) representación de futuras cosechas de regeneración para cada clase de edad, la cual puede ser considerada para utilizarla de nuevo durante la rotación, 3) aquellas hectáreas que permanezcan sin cosechar, según su clase de edad al comienzo de la planificación, 4) aquellas hectáreas que queden sin cosechar, creadas durante la rotación.

Diferencias y similitudes entre los Modelos I y II

El Modelo I mantiene las unidades de manejo durante todo el horizonte de planificación, mientras que el Modelo II las mantiene intactas hasta que se cosechan para regeneración, y posteriormente se combinan con otras unidades para formar nuevas unidades de manejo.

El mismo concepto se aplica para el espacio físico. Por un lado en el Modelo II, las hectáreas pasan a formar parte de un nuevo manejo, cada vez que son cosechadas. En tanto que el Modelo I, las hectáreas se mantienen en las mismas unidades de manejo durante el horizonte de planificación.

En el Modelo I, para cada clase de edad reconocida en el primer período, se debe definir una actividad para cada secuencia de cosecha de regeneración posible, a través del horizonte de planificación. Mientras que en el Modelo II, una vez que se reconocen las clases de edad en el primer período, se debe definir una actividad por el período que dure esa clase hasta que sea cosechada o se mantenga sin cosechar hasta el final de la planificación.

Ambos modelos necesitan de una restricción de área para cada unidad de manejo. Bajo el supuesto de que existen U clases de edad con una determinada cantidad de hectáreas y hay N períodos, el Modelo I tiene U restricciones de área y el Modelo II tiene $U + N$ restricciones.

Una manera de determinar las actividades que requiere cada modelo, es a través de la siguiente ecuación (Johnson y Scheurman, 1977):

Modelo I

Cuadro No. 5. Ecuación matemática para el modelo I.

$$U \left(\sum_{l=1}^N t_l + 1 \right)$$

Donde

$$t_l = 1 \text{ si } l \leq Z$$

ó

$$t_l = t_{l-1} t_{l-Z} \text{ si } l > Z$$

Siendo

U = número de clases de edad en el período uno, con hectáreas

N = número de períodos en el horizonte de planificación

l = número de períodos hasta el final del horizonte de planificación

Z = período mínimo entre cosechas de regeneración

Número de actividades para el Modelo II

Cuadro No. 6. Ecuación matemática para el modelo II.

Asumiendo que no existe una edad máxima a la cual puede llegar un rodal antes de ser cosechado, se obtiene;

$$\frac{UN + (N - Z + 1)(N - Z) + (U + N)}{2}$$

Existen tres maneras para determinar las variables de decisión en PL (Bettinger et al., 2009).

1) Modelo I: Las variables son generadas a partir de una recolección de la información, de todo el turno, existente sobre los diferentes rodales o estratos. En plantaciones coetáneas, como es el caso de la Caja Bancaria, las variables generalmente incluyen el turno final de cosecha asociado con las salidas y condiciones antes y después de la cosecha. En estos casos se generan un gran número de variables, las cuales determinan los diferentes regímenes que serán utilizados en los estratos durante la rotación.

2) Modelo II: Se basa en la recolección de la información de la historia de un rodal hasta la cosecha final. Al momento de cosecha final, la historia inicial del rodal se pierde, y todas las áreas a ser regeneradas se incluyen en una variable que las cosechará con el mismo período.

De esta manera, mientras que el Modelo I define las variables de decisión a aplicar en un acre (0.4047 hectáreas) durante toda su historia en toda la rotación, el Modelo II define la variable de decisión de un acre a partir de la vida de un rodal en esa superficie, desde plantación a cosecha de ese rodal. En este segundo modelo, esa misma superficie puede pasar a formar parte de otras variables de decisión, antes de que se llegue al final de la rotación (Davis y Johnson, 1987).

Para poder determinar las posteriores variables en el Modelo II, es necesario generar filas de transferencia, en tanto que el Modelo I mantiene las mismas variables. Consecuentemente en Modelo II, al tener más filas, ocupa más espacio. Esto es problemático en algunos programas computacionales, que tienen un límite de variables posibles de introducir. Sin embargo, cuando se reduce demasiado el número de regímenes para que puedan ser utilizados en el programa, puede no encontrarse la solución óptima por falta de opciones de regímenes, en estos casos en Modelo II puede ser útil (Davis y Johnson, 1987).

3) Modelo III: Incluye a los rodales o estratos en una misma clase de edad al comienzo del análisis del plan de manejo, realizándose un seguimiento a estas clases de edad durante el horizonte de planificación. Una vez ocurrida la cosecha final, el estrato regenerado estará compuesto por el área cosechada.

Los dos primeros modelos corresponden a los modelos I y II de Johnson y Scheurman (1977) antes mencionados.

2.3.5 Aplicación de técnicas de optimización en la producción forestal

La optimización es tratada en la literatura científica aplicada a la producción forestal, tanto en las fases de cosecha, transporte, como en la industrial. En un principio fue utilizada en bosques disetáneos y posteriormente en industrias que se abastecen de plantaciones coetáneas, así como en el resto de la cadena forestal.

Floyd (1962) introdujo la técnica de programación lineal, muy utilizada en la época por gobiernos e industrias, como una nueva metodología para la gestión de plantaciones forestales. Como ejemplo, utilizó un caso real de una industria papelería situada en el estado de Florida, Estados Unidos, la cual realizó un contrato de administración de una propiedad, debiendo cumplir con ciertos requisitos.

Por un lado la empresa debía administrar la nueva propiedad como si fuera de ellos, lo que implicaba determinada manera de trabajo. Podía o no cosechar las plantaciones de *Pinus sp.* existente, a cambio de servicios de administración y pagos anuales. Por último, la empresa debía cumplir con una fecha límite para realizar las plantaciones de *Pinus sp.* Se generaron dos

problemas de programación lineal, atendiendo a dos situaciones diferentes. Por un lado, había que cumplir con el objetivo de establecer un calendario de cosecha que permitiera obtener el máximo de volumen posible, sujeto a las restricciones anteriores. En segundo problema, tenía como objetivo lograr una secuencia de cosecha que maximizara el valor presente de la propiedad, considerando una tasa de interés del 5%, teniendo en cuenta los requisitos iniciales.

Field (1973) fue el primer investigador en utilizar la programación lineal en un caso forestal, aplicando la programación por metas. En dicha programación las variables de decisión que son puestas en el modelo, representan los desvíos mínimos que cada variable, con respecto al valor óptimo de dicha variable de decisión, puede tomar.

El ejemplo utilizado en el artículo trata sobre un productor norteamericano forestal, el cual decide comprar 240 há de un campo forestado, con dos propósitos fundamentales. El primer objetivo es el de tener un lugar de recreación para él y su familia, mientras que el segundo componente implica obtener una segunda fuente de ingreso. Además de contar con el campo forestado, el terreno también cuenta con una cabaña, a la cual se le destinará determinada cantidad de tiempo para alquiler.

Así mismo, el propietario del campo tiene ciertos requisitos que desean sean cumplidos. Por un lado necesita un ingreso anual de 2.100 USD por concepto de venta de madera y alquiler de la cabaña. Además, desea que su cabaña quede libre durante un mes en verano para vacacionar con su familia, y una semana en otoño, que es la época de caza. Adicionalmente desea preservar el recurso forestal en el tiempo, restringiendo, para ello, la cantidad de madera que puede ser cosechada anualmente. Por último, por razones de estética y seguridad, establece que durante la estadía de los inquilinos, él y su familia, no se puedan llevar a cabo tareas de cosecha.

Romero (1989) resalta el carácter multipropósito que se le ha otorgado al bosque en las últimas décadas y expone la utilización del análisis multicriterio para resolver un problema forestal, el cual debe cumplir con diversos objetivos aparte del económico, los cuales suelen estar en conflicto.

El problema trata de un bosque de coníferas de 16.000 ha, el cual se divide en tres zonas y por grupos de edades. El propietario del bosque pretende, en un período de 30 años, regular la estructura del mismo, fijando una rotación de 40 años. Se busca lograr una distribución de cuatro grupos de edades con 4.000 ha cada uno, cosechándose un grupo por período (1 período equivale a 10 años).

El enfoque multicriterio agrega dos objetivos más, además de maximizar la producción de madera. El primer objetivo es maximizar el valor de la madera cosechada, mientras que el segundo implica obtener rendimientos iguales de madera cosechada en los tres períodos.

Este procedimiento toma en cuenta los valores óptimos (ideal) que cada variable podría llegar si fuera el único objetivo, así como también se evalúa el peor valor (anti-ideal) que las variables pueden tomar si deben compartir los recursos. De esta manera, las variables de la función objetivo están determinadas por la sumatoria de los desvíos de cada variable de decisión.

Davis et al. (2001) utiliza el ejemplo de un productor forestal, Daniel Pickett, para demostrar las relaciones existentes entre la tierra, vegetación y los rodales forestales. Dicho productor tiene aproximadamente 1.000 há forestadas y está básicamente interesado en el retorno económico resultado de la actividad silvícola. Desea mantener la misma cantidad de madera cosechada en cada década, asegurando una reserva de inventario final tal, que garantice la perpetuidad del recurso forestal en el tiempo.

Así mismo, este productor desea obedecer las leyes, las cuales estipulan que se permita la regeneración luego de la cosecha, el establecimiento de límites de cosecha y planes de manejo para zonas pantanosas o anegadas. Por último, este productor desea producir arces, que sus plantaciones tengan una estructura tal, que le permita a sus hijos salir a explorar los montes, y lograr un manejo ambientalmente eficiente.

Otra potente arista de la PL es el poder para resolver problemas tan complejos como el del transporte, logísticas de camiones y sistemas de cosecha forestal, en donde se tienen que abastecer diversos destinos desde múltiples oferentes o plantaciones. Entre los trabajos mas reconocidos está el de Epstein (1999) en Chile el cual, a través del desarrollo de 3 softwares que utilizan las

técnicas de investigación operativa, logró resolver estos tres problemas, con considerables reducciones en los costos.

Se desarrollaron tres sistemas de optimización que permitieron apoyar la toma de decisiones en la gestión de la cadena logística. El autor explica como el costo de transporte y cosecha, representan los mayores costos en la producción forestal, estableciendo que el costo de transporte representa el 40% de los costos operacionales, mientras que el costo de cosecha supera el 30% de los mismos. Así mismo, establece que los costos referidos a la construcción de caminos ronda el 13% de estos costos. El trabajo se centró en lograr hacer más eficiente estos procesos.

El primer sistema de optimización, ASICAM, relacionado al transporte, debía coordinar el abastecimiento de múltiples destinos, los cuales generaban más de 70 productos, a partir de madera proveniente de más de 50 orígenes distintos. El resultado, fue un programa el cual, mediante un proceso de decisión heurística, logró coordinar el transporte, permitiendo entregar la madera en los diferentes puntos de demanda, como ser industrias, puertos, playas de acopio, etc. Entre otros resultados, se cita el caso de lograr una frecuencia de llegada de camiones constante a una planta de celulosa. Permitiendo un abastecimiento regular de madera sin altibajos, los cuales son muy riesgosos para este tipo de industrias que no paran su funcionamiento.

El segundo caso trata de un sistema de cosecha, OPTICORT, de corto plazo, donde se toman en cuenta los productos, las calidades, así como las características de las trozas, para abastecer determinadas demandas de la industria. El objetivo final es un mayor aprovechamiento del recurso forestal, tratando de cuidar al máximo el patrimonio.

El tercer programa, PLANEX, fue realizado con la finalidad de determinar la mejor ubicación tanto de la caminería así como de la maquinaria para el procesamiento de la madera en el campo. Se generó un programa el cual interactúa con un software de Sistema de Información Geográfico. Como resultado, se establecen las mejores ubicaciones de las máquinas, las dimensiones de los caminos, cuales áreas deben ser cosechadas por tal o cual máquina y la situación de cada camino en particular.

El problema del transporte radica en poder armar y organizar una flota de camiones. Los problemas pueden ser simples, como levantar la madera y seguir hasta destino final, o más complejos como coordinar el tiempo en el cual debe llegar al aserradero. En la industria del aserrado la madera debe procesarse lo más rápido posible posterior a su cosecha, para evitar problemas como rajaduras, o infecciones por hongos en el caso de pinos. Así mismo, el proceso se realiza en menor tiempo cuando la madera está húmeda. De lo contrario debería incurrirse en gastos de humedecimiento, representando un costo extra en el procesamiento de la madera. Se suman complicaciones como el caso de que las playas de acopio representan lugares continuos de carga y descarga de madera, limitando la capacidad de acopio.

Una forma sencilla de escribir matemáticamente este problema de transporte, es la siguiente.

Cuadro No. 7. Ecuación de transporte de madera.

$\text{Min } z = \sum_j c_j x_j$
<p>Sujeto a</p>
$\sum_j x_j = 1, \quad \text{para todo } c \text{ (cada camión tiene una ruta)}$ <p style="text-align: center; margin-left: 100px;">$j \text{ pertenece a } J_c$</p>
$\sum_j a_{ij} x_j \leq s_i, \quad \text{para todo } i \text{ (abastecimiento en los puntos de abastecimiento)}$
$\sum_i d_{kj} x_j = d_k, \quad \text{para todo } k \text{ (demanda y sus puntos de demanda)}$
$x_j \text{ pertenece al intervalo } \{0,1\}, \text{ para todo } j$

En este ejemplo las variables pueden tomar valores de 1, si el viaje j fue realizado, o 0 si no fuera realizado el viaje. Los coeficientes a_{ij} y d_{kj} toman los valores de los volúmenes actuales de madera que se está transportando. J_c indica que rutas están ligadas al tal o cual camión c . El modelo no incluye las filas de espera, como sucede al llegar a la industria. Este tipo de ejemplo

maneja variables que tienen desde 20 a 150 camiones, desde 100 a 500 puntos de carga y de 20 a 100 puntos de descarga, o sea industrias.

Díaz-Balteiro y Romero (2004) muestran un ejemplo de programación por metas en un caso de un bosque en España. Se trata de una forestación pública, “El Pinar”, la cual se encuentra a 1.100 m sobre el nivel del mar, y se compone por tres especies de coníferas. Cuenta con 55 rodales que van desde los 50 hasta los 90 años, ocupando un área de 1.156 ha.

Basándose en los datos de inventario, se generó un plan estratégico en base al Modelo de tipo I de Johnson y Scheurman (1977) antes mencionado. En el mismo, el horizonte de planificación era de 100 años, dividido en períodos de 10 años. La edad de rotación varía de 80 a 140 años, se asume que la cosecha se lleva a cabo en la mitad de cada período, y no se tiene en cuenta el raleo.

Los objetivos son la maximización del Valor Presente Neto, y maximización de obtención de madera aprovechable. Así mismo, se consideraron objetivos relacionados con la conservación de la biodiversidad, las cuales incluyen alternativas de extender la edad de rotación. A las variables de decisión se le agregaron pesos preferenciales. Esto determina que a ciertas variables se le adjudiquen una mayor cantidad de recursos que a otras.

Las restricciones implican controles de volumen, la regulación del inventario final y la captura de carbono. Como resultado, y teniendo en cuenta aquellas alternativas que pudieran incorporar el mayor número de restricciones posibles, se terminaron eligiendo 14 alternativas de manejo posibles.

En su tesis de doctorado, Arce (2000) generó un sistema, SOSFlor, el cual permitió mejorar las operaciones de abastecimiento y transporte forestal, a través de un modelo generado utilizando técnicas de investigación operativa. Para obtener estos resultados, el modelo buscó mejorar el aprovechamiento del residuo forestal, aumento del volumen aprovechado debido a la optimización del suministro de materia prima, reducción de costos de clasificación en el monte por una diferenciación más operacional de los productos forestales que fueran a ser utilizados, o alguna combinación de estos factores.

El sistema fue puesto a prueba en una situación real, utilizando datos de una empresa brasilera, generando cuatro escenarios diferentes. El primer caso testeaba al sistema en la situación real de la empresa, donde se evaluó el volumen y números de trozas por tipo de producto que fueron efectivamente retirados en el período comprendido entre julio de 1998 y agosto de 1999.

El segundo escenario realizaba una optimización conjunta de los rodales en función de la demanda y costos de transporte. El tercer caso optimizaba los rodales en función de la oferta. Por último, el cuarto escenario hacía una maximización individual del valor de cada árbol, realizando una diferenciación desde las partes más valiosas hasta la punta fina (Arce, 2000).

Estraviz et al. (1986) realizaron la planificación para la explotación y manejo de una industria forestal vertical, dedicada a la producción de pasta de celulosa, la cual debió considerar los objetivos y restricciones que caracterizan estos sistemas de producción. En su estudio trabajaron con especies de rápido crecimiento, *Eucalyptus sp.*, utilizando técnicas de programación matemática para la realización del modelo.

Trabajaron con una industria, la cual contaba con plantaciones propias de *Eucalyptus sp.*, con un total de 7.000 hectáreas aproximadamente. El rango de edades de las plantaciones era de 1 a 5 años. Se agruparon los rodales en 21 unidades según criterios de especie, suelo y edad.

La metodología consistió en establecer 20 posibles regímenes de manejo de los cuales, 16 contaban con combinaciones de dos rotaciones, cada una con cortas de 5 u 8 años y 4 regímenes con una única rotación. Se determinó un horizonte de planificación de 20 años. En cuanto al valor que debía tener cada régimen y considerando que para una misma unidad de manejo, algunos regímenes daban resultados económicos más favorables que otros, los autores hicieron la selección de los regímenes en base a aquellos que maximizaran el retorno de las inversiones.

Consideraron, así mismo, que el componente más importante del análisis era la prognosis del crecimiento. Este componente es de suma importancia pues, como se verá en el presente trabajo, es a partir de las funciones de crecimiento que se desarrollan todos los demás valores de cada

régimen, estableciendo el Valor Presente Líquido del Régimen, el cual será explicado en Materiales y Métodos.

Las restricciones del modelo consideraban; un límite mínimo y máximo de producción de volumen; que todas las unidades forestales debían ser administradas integralmente, y por último que la producción anual de madera debía estar sujeta a la producción de celulosa.

Estraviz et al. (2001) realizaron un estudio evaluando el efecto de utilizar herramientas matemáticas en la gestión de plantaciones, utilizando métodos matemáticos de optimización. A través de la generación de un índice, el *igor* (Estraviz et al., 2001), pudieron evaluar y comparar el estado de ordenamiento forestal en que se encontraban dos empresas, las cuales estaban en diferentes momentos de utilización de dichas herramientas. Se incluyó una tercer empresa, la cual no utilizaba estas técnicas de planificación.

Mientras una empresa ha utilizado estas técnicas desde que fueran implementadas en el país en 1980, otra empresa recién da sus primeros pasos en utilizarla, y una tercer empresa no utiliza los métodos matemáticos para optimizar su producción.

Los autores encontraron que, la empresa que venía utilizando los métodos matemáticos de optimización para el ordenamiento forestal, presentaban mayores niveles de ordenamiento forestal, a diferencia de aquellas otras dos empresas que no utilizaban los métodos de optimización, o recién empezaban a utilizarlo.

La importancia de este estudio, radica en el hecho de que la industria brasilera de pasta de celulosa, al 2000, tenía un crecimiento anual aproximado de 4.6% (Estraviz et al., 2001). Dado que pronosticaban estos crecimientos para los años venideros, y manteniendo el concepto de producción sustentable y constante, los autores quisieron demostrar la importancia que tiene el hecho de utilizar herramientas matemáticas para la gestión de montes, las cuales les permitieran, a las empresas, obtener resultados óptimos en sus producciones.

Arce et al. (2001) generaron un interesante sistema de trozado optimizado, considerando las demandas del consumidor y los costos de

transporte. El estudio buscó lograr la optimización en la fase de trozado a nivel de rodal, aunque también se consideraron aspectos de un nivel superior en la organización del monte, o sea la plantación en su conjunto.

Bajo la suposición de que no es deseable generar muchos productos a partir de un mismo rodal, dado que implicaría muchos costos relacionados a la carga y el transporte, los autores establecieron que es necesario determinar qué productos y en qué cantidades se desean obtener de un rodal, previo a la cosecha. Así mismo, consideraron este punto como fundamental para el desarrollo del trabajo.

Generaron dos preguntas que permitieron encarar el problema. La primera hace referencia al tipo de productos, de una lista existente de productos, que podían obtenerse de un determinado rodal, de manera tal de poder maximizar las ganancias totales a partir de los rodales cosechados durante toda la planificación. Mientras que la segunda pregunta hace referencia a la cantidad de árboles, de una determinada clase diamétrica, que debían ser trozados con un determinado patrón de corta, para cumplir con el primer requisito.

Se manejaron dos escenarios de simulación de trozado, el primero orientado a las demandas del cliente, considerando los tipos de productos, sus correspondientes costos de cosecha, y máximo número de productos obtenidos a partir de cada rodal. El segundo escenario, con fines teóricos, buscaba maximizar el trozado, considerando únicamente el abastecimiento de madera y los costos de transporte.

Mello et al. (2004) realizaron el estudio de una empresa que tenía objetivos similares al presente trabajo, al tiempo que buscaron mantener un stock determinado de carbono en sus plantaciones. O sea, el objetivo del trabajo fue el de modelar una planificación forestal estratégica optimizada, buscando maximizar el retorno económico, a lo que se le suma el mantenimiento del carbono en la plantaciones.

El estudio fue realizado en una industria privada en la región centro sur de Paraná, la cual contaba con plantaciones de *Pinus taeda*, de diferentes edades, índices de sitio y áreas.

El siguiente modelo, extraído de Mello et al. (2004), el cual incluye objetivos ambientales estuvo estructurado de la siguiente manera:

Cuadro No. 8. Modelo de programación lineal utilizado por Mello et al. (2004).

<p>Función Objetivo:</p> $\text{Max } Z = \sum_i \sum_j \text{VPL}_{ij} X_{ij}$ <p>Donde:</p> <p>VPL_{ij} = Valor Presente Líquido del régimen i según el manejo j</p> <p>X_{ij} = Número de hectáreas del proyecto i según el régimen de manejo j</p> <p>Restricciones</p> <p>Área: $\sum X_{ij} \leq A_i$ donde $i = 1, 2, 3, \dots, 11$ (11 restricciones de área)</p> <p>Demanda: $\sum \sum V_{ijkl} X_{ij} \geq D_{kl}$</p> <p>$V_{ijkl}$ = Volumen obtenido para el proyecto i, en el régimen de manejo j, en el año k y abastecimiento l (debobinado trono grande, debobinado torno chico ó aserrío)</p> <p>D_{kl} = Demanda en el año k, para el abastecimiento l; ($k = 1, 2, 3, \dots, 21$ y $l = 1, 2$ y 3, totalizando 63 restricciones de demanda.</p>

Las restricciones de carbono se generan con el mismo criterio que las anteriores. Cada hectárea perteneciente a un determinado régimen debe retener, luego de aplicado el régimen, una cantidad mayor o igual al 90% del carbono que retenía esa plantación previo a la intervención.

2.3.6 Interpretación de los resultados de un modelo

Como ha sido mencionado, cuando se formula un problema matemático, se está representando un sistema real, más complejo, el cual necesita ser resuelto. Para poder interpretar los resultados que el software nos brinda, es necesario conocer y entender sus parámetros (Bettinger et al., 2009).

Luego de correr el modelo en el programa utilizado, se obtiene una serie de datos, además del valor de la función objetivo, los cuales deben ser interpretados correctamente, pues corresponde a información sumamente valiosa, que si el decisor sabe manejar, permitirá lograr los objetivos buscados por la empresa que lo ha contratado.

El resultado de la función objetivo si bien debe ser tenido en cuenta, no es más que un valor, que está condicionado por la función, pudiendo ser el máximo valor que una determinada actividad puede lograr, o el mínimo. En sistemas forestales, este valor está generalmente medido en coeficientes monetarios ó de cantidades (volumen de madera, toneladas, litros, kilos, etc.).

Si bien este dato es importante, más aún si se comparan diferentes estrategias a seguir por una empresa, el arte en el manejo de un modelo de PL, radica en poder interpretar correctamente, sacando conclusiones precisas y beneficiosas, los datos que se desprenden posteriormente en el modelo.

Luego de correr el modelo en el programa, se generan 9 valores, los cuales corresponden a los valores que tomaron en la solución del modelo, los componentes del mismo, o sea, la función objetivo, y las restricciones. Dentro de este grupo de valores se incluyen ciertos datos que permiten realizar análisis de sensibilidad. En este trabajo esos datos no fueron tenidos en cuenta para la interpretación y análisis de resultados, dado que corresponden a otro tipo de estudio diferente del buscado en esta tesis.

Uno de los datos que surgen como resultado es el “reduced cost” (del inglés). Este representa la cantidad en la que tendría que aumentar el coeficiente de la variable de decisión para que el programa la tome en cuenta, como parte de la solución. Este valor puede ser cero, cuando la variable está incluida en el modelo. Cuando el valor del reduced cost toma valores distintos de cero, esa

variable no ha sido incluida como parte de la solución y por lo tanto incluirla en el modelo implicaría una solución sub-óptima en términos de valor de la función objetivo.

Otra manera de interpretar el reduced cost, es como una falta impuesta al valor de la función objetivo. De esta manera, si uno obliga al modelo a considerar determinado régimen, que por sí solo no lo consideraría, el valor de la función objetivo se vería disminuido en esa cantidad del reduced cost.

Otros dos valores que son necesarios interpretar correctamente, corresponden al “slack” ó “surplus” (el faltante o sobrante, en español, respectivamente) y “dual prices” (precio dual, en español), ambos hacen referencia al valor de la derecha de la inequación o el RHS (right hand side, del nombre en inglés), en el cuerpo de las restricciones. El primer dato, slack or surplus, indica cuanto del valor que se encuentra en el RHS de la inequación en una determinada restricción, falta o sobra. Cuando la variable es utilizada completamente por el modelo ó no es suficiente, este valor es cero. En cambio, en aquellas situaciones en las que la variable no es completamente utilizada, este valor toma valores mayores a cero.

Es importante considerar que en las situaciones que este valor es cero, esa variable es restrictiva a la solución de nuestro modelo, no permitiendo obtener mejores o mayores valores en la función objetivo, por ejemplo en ganancias económicas. De esta manera uno puede encontrar aquellos regímenes o factores de producción que puedan estar limitando al objetivo.

El precio dual o “dual price” (del inglés) indica cuanto aumenta o disminuye el valor de la función objetivo, en caso de que se aumentara o disminuyera en una unidad la disponibilidad de la restricción o el valor de la denominada RHS. Por ejemplo en cuanto aumentaría el retorno económico, si tengo una hectárea más de árboles pronta para cosechar.

A continuación se escribe la sintaxis utilizada en un software de PL, en este caso se utilizó el LINDO en base al ejemplo presentado en Chiang (1987) ya comentado en la página 35.

Se describe el modelo, su función objetivo, restricciones y respectivos resultados.

Cuadro No. 9. Modelo original de los alimentos escrito en el software de programación.

```
Función Objetivo  
  
Min 0.6 x1 + x2  
  
ST  
  
Calcio) 10 x1 + 4 x2 >= 20  
Proteina) 5 x1 + 5 x2 >= 20  
Vit.A) 2 x1 + 6 x2 >= 12  
  
END
```

Cuadro No. 10. Resultado de la función objetivo.

```
Óptimo hallado en la iteración 2  
  
Valor de la Función Objetivo  
  
1) 2.800000
```

Para este caso, la solución fue encontrada en la iteración número dos. La metodología de trabajo utilizando iteraciones hasta encontrar el óptimo en PL, se denomina Método Simplex, el cual será explicado más adelante. El valor de costo mínimo hallado para la combinación de los alimentos x_1 y x_2 fue 2.8 unidades monetarias. Bajo esta nomenclatura, los puntos corresponden a comas para introducir decimales.

Cuadro No. 11. Salidas del modelo.

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X1	3.000000	0.000000
X2	1.000000	0.000000
ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
CALCIO)	14.000000	0.000000
PROTEINA)	0.000000	-0.080000
VIT.A)	0.000000	-0.100000
NO. ITERATIONS=	2	

Este resultado de mínimo costo se da con la combinación óptima de de 3 unidades del alimento x1 y 1 unidad del alimento x2, como se aprecia en el cuadro No 11. Dado que se busca minimizar los costos, el programa elegirá aquella combinación de alimentos que, cumpliendo con las restricciones impuestas por el modelo, cumplan con el objetivo. En este caso, utilizar 3 unidades del alimento 1 y 1 unidad del alimento 2, permite cumplir con las demandas de Calcio, Proteína y Vitamina A, de la manera más barata posible.

En este caso, dado que el modelo considera a ambos alimentos como parte de la solución, ambos alimentos tienen un reduced cost de cero.

Como ya fuera mencionado el Slack or Surplus, corresponde al valor donde la variable fue insuficiente, se utilizó totalmente, ó sobró. Para el ejemplo planteado, las cantidades de Proteína y Vitamina A de ambos alimentos fueron completamente utilizadas por el modelo, mientras que sobraron 14 unidades de Calcio

El precio dual hace referencia a cuanto se modificaría el valor de la función objetivo, si aumento en una unidad determinada variable. Para el caso del Calcio, como tengo un sobrante de 14 unidades con la combinación de alimentos que el modelo determinó como solución, el valor de la función objetivo no se ve modificado. O sea, no es preciso aumentar la cantidad de calcio. En cambio para las situaciones de Proteína y Vitamina A, aumentar en

una unidad la cantidad, o sea el valor de la RHS de la inecuación, de cada uno de estos productos, me reduce el valor de la función objetivo en 0.08 y 0.1, respectivamente. Dado que se busca en mínimo valor, en este caso, agregar una unidad más de Proteína y Vitamina A, me aumenta el valor de la función objetivo (aumenta el costo).

A continuación se muestra una situación donde el modelo no considera al alimento 2 dado que éste es muy caro de utilizar.

Cuadro No. 12. Segundo modelo del ejemplo de los alimentos.

<p>Función Objetivo</p> <p style="text-align: center;">Min $0.6 x_1 + 2.5 x_2$</p> <p>ST</p> <p>Calcio) $10 x_1 + 4 x_2 \geq 20$ Proteína) $5 x_1 + 5 x_2 \geq 20$ Vit.A) $2 x_1 + 6 x_2 \geq 12$</p> <p>END</p>
--

Cuadro No. 13. Resultados del modelo.

Valor de la Función Objetivo		
1) 3.600000		
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X1	6.000000	0.000000
X2	0.000000	0.700000

En este caso el programa no tiene en cuenta al alimento 2 dado que es muy caro para ser utilizado. Para que el programa tome como parte de solución al alimento 2, éste debería reducir su costo en 0.7 puntos.

Se genera un tercer modelo en el cual se aumenta en una unidad los requisitos de proteína y vitamina, para observar como se modifica el valor de la función objetivo.

Cuadro No. 14. Tercer modelo en del ejemplo tratado.

Función	Min $0.6 x_1 + x_2$
ST	
Calcio)	$10 x_1 + 4 x_2 \geq 20$
Proteína)	$5 x_1 + 5 x_2 \geq 21$
Vit.A)	$2 x_1 + 6 x_2 \geq 13$
END	

Cuadro No. 15. Resultados del tercer modelo.

Valor de la Función Objetivo		
	1)	2.980000
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X1	3.050000	0.000000
X2	1.150000	0.000000
ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
CALCIO)	15.100000	0.000000
PROTEINA)	0.000000	-0.080000
VIT.A)	0.000000	-0.100000
NO. ITERATIONS=	0	

Al aumentar en una unidad los requisitos de Proteína y Vitamina A, el valor de la función aumentó en $0.08 + 1 = 1.08$ unidades, pasando de 2.8 a 2.98, por ende se encareció el costo. Recordar que el objetivo era hallar la combinación de alimentos que minimizara el costo.

2.4 MODELOS DE PLANIFICACIÓN FORESTAL

A la hora de planificar un modelo en una empresa forestal, se deben tener en cuenta varios factores o variables. Independientemente de cual sea el horizonte de planificación, el producto a obtener, como se quiere recibir la madera en el tiempo, o que tipo de productos se buscan recibir del monte, todas las planificaciones forestales cuentan con determinados pasos previos, a saber:

1. Definición del área de planificación: Ubicación de la empresa, composición de los estratos (rodales) en especies y superficie.

2. Cálculo de los crecimientos: Una vez determinado los crecimientos en función de las especies y los suelos, determinar diferentes regímenes silvícolas y que productos obtener.

3. Cálculos económicos y financieros: Determinar costos de producción, cosecha, transporte, mantenimiento, administración, así como tasas de interés y valor de la tierra, con la finalidad de determinar un VES para cada régimen.

Una vez que se han obtenido estos datos, se procederá a formular el modelo matemático, de la siguiente manera:

Determinación del objetivo: Generalmente se determina una función de maximización o minimización según el objetivo, el cual puede ser, cumplir con cuotas de entregas de madera a un aserradero o fábrica de pasta de celulosa, por ejemplo.

Determinación de las restricciones: Si bien en PL, la función objetivo cumple con un requisito o necesidad, muchas veces las restricciones del modelo son objetivos en sí, secundarios o no, que son introducidas en el mismo como

restricciones, dado que la función objetivo no admite más de un objetivo al mismo tiempo.

Formular la matriz del modelo matemático. En ella se representa en la primera fila la función objetivo, seguida de las restricciones del modelo. Esta etapa constituye el aspecto artesanal del trabajo, ya que depende de la aplicación y tiempo dedicado, por parte del programador en representar la realidad del sistema de la mejor manera posible.

Todo modelo tiene, además de la función objetivo, un cuerpo de restricciones propias del sistema. Este es el caso de las restricciones de áreas por ejemplo, las cuales siempre deben estar presentes, pues no se puede cosechar o generar manejos en áreas ficticias. Sin embargo, es a partir del mismo modelo inicial, que se comienzan a generar infinidad de modelos, los cuales varían en el cuerpo de las restricciones con respecto al original, y permiten encontrar soluciones alternativas al primer modelo. Tal es el caso de los modelos que generan desvíos con respecto al modelo original. En dichos modelos, a través de la generación de variables artificiales, se puede flexibilizar las restricciones del modelo original, dándole al programa la posibilidad de encontrar otras soluciones. Este tipo de situaciones es muy frecuente en industrias que tienen una demanda anual constante de madera.

2.4.1 Modelos básicos utilizados en planificación forestal

En planificación forestal, existen cuatro modelos básicos, adicionales o complementarios al modelo original, permitiendo elaborar planes estratégicos de una empresa forestal. Estos modelos están orientados a la parte productiva del monte, o sea a la obtención de la madera. Los demás objetivos, como ser niveles mínimos de contaminación, mantenimiento de un determinado número de trabajadores, etc., se incluyen en el cuerpo de las restricciones.

En el modelo original se busca obtener el máximo o mínimo de producción de madera. En el mismo se deben cumplir las restricciones básicas de área, volumen, flujos de caja y operacionales. Poniendo como ejemplo el caso de una industria, la cual tiene una demanda constante de materia prima, se podría considerar que este modelo es bastante ineficiente hasta impreciso, dado que en situaciones de maximización o minimización rara vez el modelo dará como resultado cosechas constantes anuales, ya que no es óptimo (para el

modelo) realizar esto. Sin embargo, este modelo resulta útil en situaciones de inversiones a largo plazo, donde no es necesario obtener un retorno económico o materia prima todos los años. Tal es el caso de los fondos de previsión social, los cuales tienen las plantaciones y las venden a terceros, una vez que estén prontas para cosechar.

Es a partir de este modelo original que se pueden generar los modelos básicos, los cuales permiten ser más precisos en cuanto a producción y tiempo se refiere. Estos son el resultado de agregar restricciones más rígidas al modelo original. Por ejemplo, se pueden establecer cuotas mínimas ó anuales de producción, así como regular las hectáreas que deben ser mantenidas sin cosechar para ser cosechada años posteriores, etc. El hecho de generar nuevas (o diferentes) restricciones en el modelo original, implica que el valor de la función objetivo resultante, en los modelos básicos, sea menor que el valor de la función objetivo en el modelo original. Esto se explica por el hecho de que en dicha función, las restricciones son más flexibles o no limitan a la función objetivo, pudiendo llegar a valores de maximización o minimización, mayores o menores, respectivamente. En cambio en los modelos básicos, se le exige más al modelo original, disminuyendo la región factible del cuerpo de los soluciones.

A continuación se describen los modelos básicos utilizados en la formulación de planes de manejo forestal:

Cuotas mínimas de producción para el abastecimiento: En este modelo, la modificación de las restricciones se da en el volumen que debe ser cosechado anualmente. Se le exige al mismo generar una solución que permita obtener una cantidad mínima de madera todos los años. Se debe tener en cuenta el hecho de que si la restricción es muy justa, cabe la posibilidad de que el programa no encuentre una solución óptima.

Cuotas constantes de producción: Se crea una variable de volumen adicional, la cual obliga al modelo a cosechar en el período “t” la misma cantidad de madera que en el período “t+1”.

Cuotas crecientes de producción: Se genera una variable de volumen adicional que hace que todos los años se vaya cosechando más cantidad de madera.

Desvíos mínimos en torno a una meta: Como ya fuera mencionado, existen, en la realidad, más de un objetivo que deben ser cumplidos. En estos casos lo que se hace es, una vez establecido el valor óptimo de cada objetivo, se resuelve una función objetivo, cuyas variables de decisión están compuestas por los desvío mínimos posibles de cada valor óptimo.

2.5 MÉTODO SIMPLEX EN PROGRAMACIÓN LINEAL

En la década de 1940, el matemático George. B Dantzig, ideó una técnica matemática, un algoritmo que permitía encontrar el punto esquina que lograba el óptimo deseado para esa función, a la que denominó método Simplex. Este método lo que hace es, luego de definir la región factible y haber encontrado los puntos esquina, mediante búsquedas iterativas, encuentra el óptimo. El programa va pasando de un punto a otro, de un punto esquina a otro, en tanto el valor de la función objetivo siga aumentando o disminuyendo según el objetivo buscado, hasta que en cierto valor se llega al máximo ó mínimo para un determinado modelo.

Este método es selectivo en cuanto a los puntos que elige para sustituir en la función, si bien por norma siempre comienza por el origen. Reduce las opciones de búsqueda a los puntos esquina, minimizando el tiempo tardado en encontrar la solución. Siempre se mueve por los bordes del polígono, y no se detiene en el camino hasta no haber llegado al punto esquina próximo que tiene programado. Dado que los polígonos generados pueden tener formas muy irregulares, lo que conlleva implícito un gran número de puntos esquina, se hace imprescindible el uso de computadoras, las que permiten correr modelos con cientos hasta miles de variables en el menor tiempo posible.

2.6 VALOR ESPERADO DEL SUELO

En 1849 Faustmann, citado por Díaz Balteiro (1997) halló la manera de establecer el precio presente de la tierra forestada a perpetuidad. De esta manera el Valor Esperado del Suelo (VES) constituye el valor presente neto de una inversión forestal, considerando rodales coetáneos desde plantación a cosecha, a través de infinitas rotaciones bajo un mismo manejo (Bettinger et al., 2009).

Esta fórmula es muy utilizada en el cálculo del turno óptimo de un rodal, permitiendo establecer el momento económicamente óptimo de cosecha. Para ello es necesario tener en cuenta la tasa de descuento. Sin embargo, también resulta de suma practicidad a la hora de comparar diferentes regímenes o estrategias de manejo, ya que el valor hallado es a perpetuidad.

Una manera de calcular el VES es la siguiente:

Cuadro No. 16. Cálculo del VES a través del ingreso neto.

$$\text{VES} = \frac{\text{Ingreso Neto}}{((1+i)^R - 1)}$$

El ingreso neto calculado al final de la primer rotación
R = Largo de la rotación
i = representa la tasa de interés utilizada

Otra manera de hallar el VES es a través de la utilización del Valor Actual Neto (VAN) de la actual rotación y asumir que dicho valor el recibido por la empresa al final de cada rotación (Bettinger et al., 2009). Se halla de la siguiente manera:

Cuadro No. 17. Cálculo del VAN.

$$\text{VAN} = \sum \frac{\text{Beneficios Netos}_i}{(1 + i)^n}$$

Este valor representa el valor actual entre los ingresos y egresos que generan una inversión (Arbeletche, 2009).

Cuadro No. 18. Cálculo del VES utilizando el Valor Actual Neto.

$$VES = \frac{VAN ((1+i)^R)}{((1+i)^R - 1)}$$

El numerador representa el valor futuro de los ingresos netos al final de la rotación.

El trabajo realizado tomó en cuenta la segunda fórmula de cálculo del VES, ya que el momento de cosecha fue establecido por los gerentes de la empresa. No obstante ello, se decidió ampliar el rango de edades posibles de cosecha, con la finalidad de generar algunas variables más para ser introducidas en el modelo.

2.7 EL ASERRADERO

Existen trabajos que estudian las industrias forestales y la influencia que éstas tienen en la región donde opera. Existe un equilibrio o balance entre la industria y la población aledaña a ella, que se alcanza una vez que los empresarios hayan tenido en cuenta y asocien su producción y preocupación, por el bienestar con la gente (población) que se verá afectada, tanto negativa como positivamente, frente a la presencia de una industria instalada en las cercanías de sus centros poblados.

Mientras que una industria instalada en las cercanías de un centro poblado, implica oportunidades de trabajo para la población local, sin tener necesidad de migrar hacia las ciudades, la empresa tiene la posibilidad y hasta responsabilidad para con la gente del pueblo de contratarlos y prepararlos según sus necesidades. Se genera, de esta manera, una simbiosis entre la industria y la gente, la cual ha permitido el desarrollo socioeconómico y demográfico de áreas o regiones que de otra manera estarían perdiendo a su población oriunda del lugar.

Forestal Caja Bancaria es un ejemplo de lo expresado anteriormente. Cuando recién se había instalado dicha empresa en Piedras Coloradas, la población apenas superaba las doscientas personas. Hoy día este pueblo cuenta con más de mil personas gracias al impulso que la empresa dio al lugar¹. Ha sido tan grande el impulso que ha recibido la región, que ha pocos años de haberse instalado la empresa, la misma pasó a ser conocida y llamada como **La Capital de la Madera** (Porcile, 2007).

Es necesario tener en cuenta algunos aspectos de las industrias de perfil exportador, como es el caso de Forestal Caja Bancaria.

Al ser dependientes del mercado exportador, este tipo de industrias deben asegurar que tanto sus costos como sus retornos económicos sean competitivos. O sea, deben lograr aumentar o mantener la eficiencia de sus operaciones. Para lograr este objetivo el complejo forestal industrial, debe poder mejorar la integración entre las diferentes partes de la cadena de la madera. Esto se logra a través del uso de técnicas de gestión y administración sofisticadas, las cuales permiten una maximización en el aprovechamiento y uso de la materia prima, logrando una producción sustentable. Es importante mantener siempre la atención en el consumidor (Rönnqvist, 2003).

En un aserradero las trozas de madera son transformadas en tablas, las cuales son posteriormente secadas y reaserradas. La gran mayoría de los aserraderos, producen grandes cantidades de productos estandarizados o siguiendo determinados patrones de corta según las necesidades del consumidor, siendo la minoría los aserraderos que producen pocos volúmenes de productos específicos. Existe un producto secundario en esta industria, que esta compuesto por el aserrín o residuo del proceso de aserrado (Rönnqvist, 2003). En el Uruguay, este tipo de subproductos, se está comenzando utilizar en la generación de energía

A diferencia de las demás industrias que trabajan con la madera bajo una modalidad convergente, el aserradero constituye un modelo de producción divergente (Rönnqvist, 2003).

¹ Bavosi, R. 2010. Com. personal.

Consecuentemente, el aserradero es actor fundamental en el establecimiento del rubro forestal en una zona, región o país, debiendo ser el primer eslabón de la cadena en instalarse.

Previamente a la instalación de industrias que procesan químicamente la madera, el proceso secuencial lógico que un país debería seguir, sería el siguiente; una vez obtenida la materia prima pronta para la cosecha, primero deberían instalarse varios aserraderos, seguidos por las industrias que producen pasta de celulosa¹.

2.7.1 Principales actores de la cadena de la madera

En una industria como la del aserrado, se pueden distinguir los siguientes actores (Rönnqvist, 2003).

- La empresa forestal, con sus propios montes e industria para el procesamiento de la madera. Estas empresas pueden ser tanto privadas como públicas. En el caso bajo estudio, Forestal Caja Bancaria constituye una tercera opción, la cual implica la fusión de los dos casos anteriores, convirtiéndose en una empresa paraestatal.
- Empresas asociadas a la principal, que tienen sus propios montes así como industrias.
- Aserraderos independientes, los cuales no necesariamente cuentan con sus propios montes.
- Empresas independientes sin ningún vínculo con la industria principal.

También se deben incluir los transportistas y cosechadores. La administración puede ser centralizada y descentralizada. Es de suma importancia reconocer la integración y cooperación en la cadena de la madera Rönnqvist (2003). En términos generales, Forestal Caja Bancaria es un caso que cumple con lo descrito anteriormente.

2.7.2 Plan estratégico, táctico y operativo

El plan estratégico implica predicciones de largo plazo, para conocer como se verán afectados aspectos económicos, ecológicos y sociales, y las consecuencias de las diferentes decisiones tomadas (Bettinger et al., 2009). Cuando se tiene una industria como es el caso de la Caja Bancaria, la cual tiene una demanda constante de ciertos productos por parte de sus compradores, una infraestructura que mantener, sueldos que pagar, entre otros, se deben tomar decisiones, y elaborar en consecuencia planes de manejo, que permitan el abastecimiento de materia prima por una duración similar al de la vida útil de la industria.

En esta etapa se indica cual es el camino a seguir por parte de la empresa en el tiempo. Para ello se basa en la utilización de modelos de crecimiento, teniendo en cuenta los diferentes suelos, sus usos, y potenciales rendimientos de las diferentes especies según estos, como soporte fundamental de producción. Es muy común la denominación de estratos, al conjunto de rodales con condiciones similares, para el planteo de los diferentes regímenes a utilizar, según cada estrato (Bettinger et al., 2009).

Típicamente en este tipo de planes, se busca maximizar el retorno económico financiero, el cual se puede medir a través del Valor Presente Neto (VPN). También se puede buscar como objetivo un determinado nivel de cosecha de madera, nivel de rentabilidad, ó tratar de minimizar los impactos ambientales. En tanto que las restricciones se relacionan con la distribución de los diferentes recursos, el uso de la tierra, temas presupuestarios, entre otros (Bettinger et al., 2009). En este estudio, el plan estratégico buscará encontrar aquel conjunto de regímenes que permita cumplir con los objetivos establecidos por la empresa.

La planificación táctica está relacionada con aspectos de manejo en el mediano plazo, generalmente períodos mayores a un año. Se basa en el relacionamiento entre la información geográfica, los rendimientos, las distribuciones de los diferentes estratos, temporal y espacialmente. Una planificación táctica típica sería el esquema de cosecha en los próximos tres años, por ejemplo.

Esta planificación establece la mejor manera de implementar el plan estratégico. La información del plan estratégico es disgregada en esta fase, de manera que se pueda identificar cada actividad y ubicarla en el espacio y tiempo (Bettinger et al., 2009).

El plan operativo se encarga de resolver los aspectos operacionales que suceden en períodos menores a un año. Una vez que el plan táctico estableció los estratos o rodales a ser cosechados, éste último plan se encarga de distribuir los recursos (mano de obra, máquinas, camiones, etc.), establecer calendarios de trabajo, asignar tareas, etc.

2.8 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO (SIG)

2.8.1 Definiciones de un SIG

Existen varias definiciones de un SIG, dependiendo del punto de vista que se lo considere. Una definición global, toma en cuenta el aspecto global y abstracto de la técnica, considerando los objetivos generales del SIG, sin explicar los métodos o funciones específicas que realiza. Estas definiciones tratan el **que** de un SIG.

Existen, así mismo, definiciones funcionales y tecnológicas de los SIG. Las primeras hacen referencia a las tareas que se pueden realizar con esta herramienta, persiguiendo un objetivo definido (comprensión y uso de datos espaciales), permitiendo el almacenamiento, recuperación, análisis, modelado y representación de los datos espaciales. En tanto que las definiciones tecnológicas destacan la utilización de las tecnologías informáticas como medio para lograr el fin último, la comprensión del espacio geográfico.

Los Sistemas de Información Geográfico constituyen un conjunto de herramientas que permiten almacenar, recuperar, analizar, transformar y cartografiar datos espaciales, con la finalidad de lograr ciertos objetivos (Bosque Sendra, 1991).

Un sistema que utiliza una base de datos espaciales para generar respuestas ante preguntas de naturaleza geográfica. Un SIG general puede ser visto como un conjunto de rutinas espaciales especializadas que descansan sobre una base de datos relacional estándar, Goodchild, citado por UDELAR (URUGUAY). FC².

Un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y presentación de datos referenciados espacialmente para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión, National Center for Geographic Information and Analysis, citado por UDELAR (URUGUAY). FC².

Un sistema computarizado para la captura, almacenamiento, recuperación, análisis y presentación de datos espaciales, Cowen, citado por UDELAR (URUGUAY). FC².

Es importante resaltar el hecho de que cualquiera sea la definición, los SIG se basan en una base de datos georeferenciados, a partir de las cuales se puede analizar dicha información, extraer conclusiones y lograr gestionar el área estudiada.

2.8.2 Sistemas de información geográficos en el manejo forestal

La contribución potencial que los sistemas de información geográfico representan para el manejo forestal es enorme. Representan la herramienta ideal para atender los problemas forestales (Franklin, 2001).

A continuación se mencionan dos aspectos de los más relevantes que esta herramienta presenta.

- Agrupar toda la información espacial referenciada en todas las escalas relevantes.
- Utilizar múltiples herramientas por parte de los usuarios, con la finalidad de responder las preguntas generadas.

² UDELAR (URUGUAY). FACULTAD DE CIENCIAS. 2010. Curso de introducción a los sistemas de información geográfico (sin publicar).

A nivel forestal, los SIG son utilizados con las siguientes finalidades.

- Administración de información geográfica, incluyendo la recolección de datos, desarrollo de una base de datos, almacenamiento de datos y
- Análisis de la información geográfica, incluyendo el modelado y extracción de información.

2.8.3 Integración de los SIG a la PL aplicado al manejo forestal

En la administración forestal se deben de tener en cuenta muchos aspectos relacionados con el manejo de las plantaciones, con la finalidad de abastecer a la industria, en el caso de celulosa o madera sólida. Esto supone un conocimiento profundo de las plantaciones, de ahí que las industrias inviertan grandes cantidades de dinero para actualizar de forma periódica sus existencias de madera.

El hecho de que los SIG almacenan la información en planillas de tipo Excel, supone una gran ventaja a la hora de utilizar dicha información y trabajar con ella en la planificación estratégica, táctica y operativa de los montes. Mediante el uso de herramientas brindadas por el software, un usuario con conocimientos básicos en la operativa del sistema, puede determinar la ubicación de los montes que deben ser manejados, así como extraer información específica de cada rodal (densidad, año de plantación, especies, estimaciones de crecimiento, etc.).

Es en esta etapa donde entra la PL como una herramienta en la toma de decisiones. A partir de la información extraída de las tablas del SIG, y con datos de costos y precios, se comienzan a generar las diferentes alternativas de manejo que se tiene para cada rodal según sus características.

Si bien se pueden generar alternativas de manejo operativas, o sea manejo anual, es en la planificación estratégica donde la fusión de ambas herramientas maximiza la capacidad de gestión. Dado que la culminación de un proyecto forestal puede llevar más de un año, consecuencia del gran número de variables que se deben tener en cuenta para la elaboración del modelo, el hecho de poder integrar la información espacial con un herramienta de carácter

decisional permite acortar los tiempo requeridos para encontrar aquella alternativa o alternativas de manejo que mejor se adecue/n a las necesidades de la industria. Esto es particularmente cierto para todas las industrias que deseen instalarse en el país, deseen cambiar su estrategia de manejo, o se vean en la necesidad de eliminar y sustituir determinadas especies, por otras más prometedoras ó por exigencias de mercado.

2.9 ASPECTOS SILVICULTURALES

Las industrias del tipo de aserraderos, como el caso que se estudia en este trabajo, tienen una demanda de materia prima generalmente constante y con criterios cualitativos como diámetros y largos poco flexibles, dado que poseen una infraestructura fija, la cual necesita trozas de determinadas dimensiones para poder funcionar óptimamente. Esto conlleva ciertas implicancias silviculturales que deben ser mencionadas.

En base a esta demanda de productos específicos y en cantidades constantes, es que se busca obtener una plantación estable, donde las diferentes clases de edades y tamaños estén representadas en una determinada proporción, con un ritmo de crecimiento tal, que se logre una producción periódica aproximadamente igual de un producto deseado en tamaño y calidad. De esta manera se logrará una plantación en la que coexisten diferentes grupos de rodales o unidades de manejo con diferentes tamaños y edades, permitiendo proveer a la industria de una masa cosechable constante disponible en el largo tiempo (Davis y Johnson, 1987).

Existen ciertas decisiones que deben ser tenidas en cuenta, con plantaciones coetáneas, cuando se desea formular un plan de manejo.

- Rotación: Es el tiempo transcurrido desde plantación hasta cosecha final. Dado que la edad de los rodales a turno final coincide con la rotación, es de suma importancia asegurar una correcta plantación. Si esto no sucediera así, la edad final de cosecha no coincidiría con la rotación, atrasándose los esquemas de trabajo, y por ende el abastecimiento de materia prima a la industria sería irregular en el tiempo.

- Raleos comerciales: Se debe tener en cuenta las veces que se ingresará, el tiempo de trabajo, así como la cantidad y tipos de árboles que serán raleados, durante el período que dure la rotación.

- Especies que serán utilizadas en la regeneración: Para esto se tendrá en cuenta el material genético existente en el momento, la adaptación de las diferentes especies a los distintos suelos y las necesidades de la industria en estudio.
- Preparación del suelo y método de regeneración.
- Otros tratamiento silvícolas: considerar la posibilidad de realizar raleos precomerciales, fertilizaciones, control de malezas, etc.

2.10 ANTECEDENTES SILVICULTURALES DE FORESTAL CAJA BANCARIA

Actualmente la empresa planta con una densidad de 1.100 árboles por hectárea aproximadamente. El *Pinus sp.* es cosechado a los 20 años, mientras que los *Eucalyptus sp.* son cosechados a los 16 años.

Las podas se comienzan a los 2 años, hasta una altura de 3 m, y al siguiente año se realiza una segunda poda llegando a los 4.5 o 5 m de altura. La idea es de lograr trozas basales libres de nudos hasta los 5mts aproximadamente.

Tanto en *Pinus sp.* como en *Eucalyptus sp.* se realizan dos raleos, variando la edad a la que se aplica este tratamiento según el género. Mientras que en pino el primer raleo se realiza entre los 10-12 años, y el segundo a los 16 años, en eucaliptos el primer raleo se realiza entre los 9-11 años y el segundo entre los 13-14 años de edad, respectivamente. En ambos casos se obtiene una densidad final de 450-500 árboles por hectárea.

Los *Eucalyptus sp.* tienen un rendimiento promedio de 250 mcs, en tanto que los *Pinus sp.* rinden 200 mcs. El destino de lo cosechado, en ambos casos, que representa un 80% va para el aserradero y el restante 20% se destina a la producción de pulpa.

La Caja cuenta con 891 estratos (rodajes), con un rango de superficies que va desde 0,044 hasta 70 hectáreas, con una media de 6,9 hectáreas. Esto genera una situación de planificación complicada y poco eficiente desde el punto de vista de la logística y los tratamientos que cada rodal debe recibir.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 RESUMEN DE LA METODOLOGÍA APLICADA PARA LA GENERACIÓN DE UN PLAN DE MANEJO PARA FORESTAL CAJA BANCARIA

Las fases a seguir en la elaboración del plan de manejo forestal estratégico fueron las siguientes:

a) En una primera etapa se definieron las metas y los objetivos que la empresa tenía en el corto plazo (plan operativo), mediano plazo (plan táctico) y largo plazo (plan estratégico). Para ello se realizaron entrevistas al centro decisor de la empresa. Estas entrevistas fueron abiertas en una primera etapa en donde se visitó la empresa y se realizó una recorrida para conocer en detalle cada etapa de plantación y de industrialización.

b) Se recopiló la información relevante para el modelo matemático, con la finalidad de tener una idea inicial del estado actual del monte. Esta información consistió en obtener datos de volúmenes, superficie ocupada según especie, edad, manejos que la Caja realiza, edades de turno final de cosecha. Se logró obtener datos del inventario realizado en el año 2002.

c) En entrevistas posteriores, realizadas a altos mandos de la empresa, se complementó la información necesaria para la comprensión de la institución en su conjunto y como un sistema el cual está integrado por la parte productiva, la industria y la población con la cual convive la industria.

d) Con todos los datos recolectados, se procedió a generar las diferentes variables de decisión o alternativas que fueron posteriormente incluidas en el modelo matemático, el cual permitió determinar la planificación para la gestión y manejo de una industria.

e) Desarrollo del modelo matemático utilizando técnicas de investigación operativa, buscando generar un plan de manejo y administración de las plantaciones, que permitiera la sustitución de especies, y elaborar un esquema de abastecimiento de madera a un aserradero. Dado que las empresas

deben cumplir con un número elevado de objetivos, la programación por objetivos múltiples es muy utilizada en el terreno de la administración forestal. Sin embargo, otra manera de cumplir con un número elevado de objetivos sin este tipo de programación, consiste en generar una función que cumpla con un objetivo, la cual está restringida por restricciones que cumplen con “n” objetivos buscados o deseados por la empresa. Esta última, fue la metodología utilizada en el presente trabajo.

f) Los resultados obtenidos por el modelo fueron analizados e interpretados.

3.2 ETAPAS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL MODELO MATEMÁTICO

3.2.1 Obtención de la funciones de crecimiento

La primera visita a la Caja Bancaria, se realizó durante el mes de abril del 2010. En esta primera instancia se hizo una presentación de los estudiantes a personal técnico de la empresa, y se obtuvo información básica de la misma. Se recorrieron algunas plantaciones y se visitó el aserradero. Durante la estadía se obtuvo información relacionada con las demandas de madera anuales que tiene el aserradero. Así mismo, se recolectó información sobre aspectos productivos, enfatizando aquellos aspectos relacionados con los regímenes de manejo actuales que tenía la empresa.

La información productiva obtenida, se dividió en dos grandes grupos. Por un lado se obtuvo información agregada a través de un sistema de información geográfico, la cual permitió observar la distribución de las especies plantadas, sus edades y superficies ocupadas.

El segundo grupo de información correspondió a un inventario forestal realizado por la Ing. Agr. Arianna Sorrentino durante el 2002. A partir de esta información, se obtuvieron, con ayuda del profesor Ing. Agr. Juan Cabris, las ecuaciones de crecimiento para las especies utilizadas en la empresa. Las funciones de crecimiento, constituyen el primer paso fundamental en la realización de un plan de manejo forestal. Es a partir de las mismas, que se puede determinar la oferta de madera, o sea el volumen, en los diferentes

períodos de la planificación. Se puede generar, a su vez, una clasificación de esta oferta considerando los diámetros estimados, pudiendo tener datos aproximados de volúmenes según el destino de la madera. Esta información permite realizar la prognosis de crecimiento de cada plantación a lo largo de la planificación.

A continuación se presentan las funciones de crecimiento utilizadas para las especies plantadas en Caja Bancaria.

Cuadro No. 19. Funciones de crecimiento utilizadas en los modelos matemáticos.

Función de crecimiento para las plantaciones del género <i>Eucalyptus sp.</i> en Bacacué:	$277,95 * \text{Ln}(\text{Edad}) - 405,11$
Función de crecimiento para las plantaciones del género <i>Eucalyptus sp.</i> en el Sur	$16,388 * \text{Edad}^{1,0632}$
Función de crecimiento para las plantaciones del género <i>Pinus sp.</i>	$12,107 * \text{Edad}^{1,0631}$

Con respecto a los datos relacionados con aspectos económicos, como ser costos de laboreo, raleos, cosecha y transporte, los mismos se fueron recolectando durante las diferentes entrevistas.

Para poder conocer otros aspectos de la empresa, como ser la visión en cuanto al rumbo que ésta debe tener, se entrevistaron al Ing. Agr. Waldemar Annunziatto, gerente comercial, y al director Ing. Agr. Roberto Bavosi, encargado de la parte silvicultural de Forestal Caja Bancaria. De esta manera, se obtuvo una visión más global de la empresa y su funcionamiento.

3.2.2 Cálculo del valor presente líquido de cada régimen (VPLR)

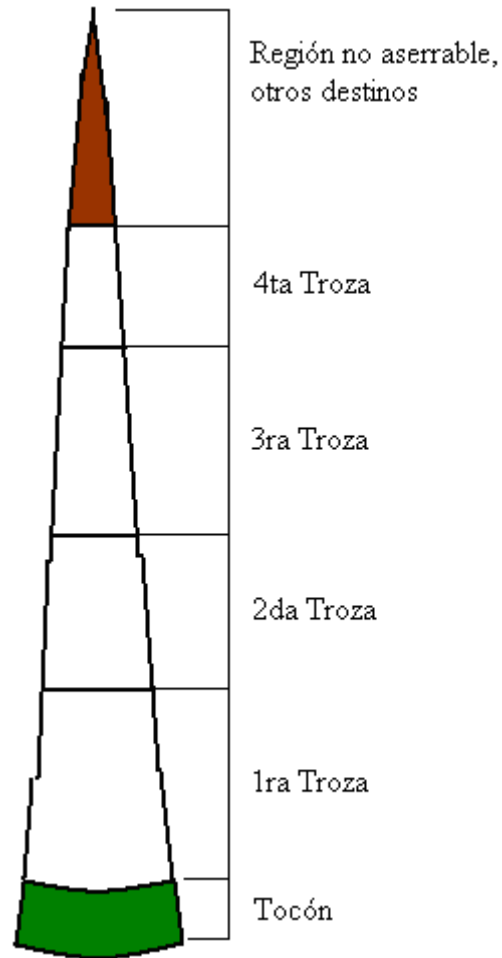
¿Qué es un régimen?

Una manera sencilla de interpretar un régimen, sería considerarlo como una sucesión de manejos preestablecidos en una planificación, realizada sobre una unidad forestal, pudiendo ser un rodal o monte entero, que se caracteriza por ser único e irrepetible.

El VPLR constituye el coeficiente que cada régimen llevará en la función objetivo. Para el cálculo de este valor, el primer paso consistió en calcular el Valor Actual del Régimen, el cual se obtiene mediante la sumatoria de los precios obtenidos por la comercialización del volumen de madera, descontados los costos de producción, ambos valores actualizados al año cero de la planificación. A este valor se le suma el VES, y de esta manera se obtiene el VPLR.

El valor de los costos de producción se denomina Costo Actual del Régimen, y se calcula teniendo en cuenta todos los costos operativos, los cuales incluyen; cosecha (se consideró mecanizada únicamente), poda, raleo, transporte, plantación y mantenimiento de las plantaciones. Se agregaron, así mismo, los costos de administración, los cuales representan costos fijos, por ende están presentes durante toda la rotación. Luego que los datos fueron establecidos en la línea de tiempo de la planificación, se procedió a realizar la actualización de los mismos, llevando todos los costos al año inicial de la planificación. De esta manera se genera, el Costo Actual, el cual representa la sumatoria de los gastos actualizados, que serían necesarios realizar en caso de que el régimen fuera seleccionado. Se tomó el 2011 como año cero para la planificación y elaboración del trabajo.

Figura No. 1. Esquema de aprovechamiento del árbol.



Para determinar la oferta de madera que podía ser aprovechada por el aserradero, y su consiguiente cálculo, se tuvieron en cuenta las tres primeras trozas del árbol, hasta una altura aproximada de 5m. El objetivo es obtener con las dos primeras trozas madera de calidad tipo **clear**, que sería madera totalmente libre de nudos. La tercera troza, a partir de los 5m aproximadamente, puede tener nudos vivos, o sea firmes, los cuales no generan problemas en posteriores etapas como la del secado. La cuarta troza se puede vender dentro de las categorías que se destinan a la producción de pasta de celulosa. El resto del árbol no fue considerado, si bien corresponde a un volumen que tiene otros usos, como la generación de energía para las calderas de las cámaras de secado.

Luego de generar la matriz de costos, se determinaron los Valores Actuales de la madera. Dicho valor se calcula mediante la sumatoria de las diferentes ofertas de madera que cada régimen por separado aporta durante toda la rotación, multiplicados por el precio correspondiente según la categoría, actualizado por una tasa de interés.

El penúltimo paso en el cálculo del valor de cada régimen, implicó calcular el Valor Esperado del Suelo (VES), según fuera explicado . El mismo está conformado por la sumatoria de los valores actuales netos, o sea, la sumatoria de costos y valores, previamente calculados, actualizados por una tasa de interés. El VES permite establecer el valor del suelo calculado a perpetuidad para cada una de las alternativas manejadas. De esta manera, aquellas plantaciones cuyo manejo sea similar, tendrán VES iguales, a su vez diferente de aquellas otras que tengan otro tipo de manejo. Dentro de las plantaciones que comparten el VES, la diferencia entre ellas está en el momento en cual cada estrato tiene madera disponible para ser cosechada, generando un VPLR diferente por régimen.

Posteriormente se determina el Valor Presente Líquido del Régimen, el cual representa la diferencia entre los costos actuales y el valor actual de la madera y se le suma el VES.

3.2.3 Determinación de los regímenes

Tanto para la zona de Bacacué como para el Sur se establecieron diez y ocho posibles regímenes para cada plantación, los cuales se organizaron de la siguiente manera:

- Tres regímenes seguían el modelo utilizado por la Caja, los cuales implicaban realizar un primer raleo a los 9 años, raleando el 41% y un segundo raleo a los 12 años, raleando el 30%. La variante que se decidió introducir, fue la de dar la posibilidad al modelo de realizar la cosecha a los 18, 19 ó 20 años. Así mismo, se estableció que una misma plantación podía ser cosechada, inicialmente, en tres años diferentes, consecutivos. De esta manera, la oferta inicial de madera en el tiempo varía. Estas variantes introducidas, permiten ajustar la extracción de madera, y la consecuente oferta, según las necesidades que el aserradero tuviera proyectadas para cada año. Este sistema da un total de

nueve regímenes posibles para cada plantación, dado que son tres posibles fechas de cosecha inicial, y tres posibles fechas de cosecha final.

- Tres modelos más, fueron diseñados, generando otras alternativas en la oferta de madera para el aserradero. Los mismos consisten en realizar los raleos a los 9 y 12 años, variando el porcentaje de extracción de madera, en este caso se realizaron sacas del 50%, para ambos años. Técnicamente, este manejo es posible de realizar, ya que extracciones del 50% no afectan la estructura del rodal, según fuera explicado por el profesor Ing. Agr. Juan Cabris. Al igual que para los regímenes anteriores, se da la opción de variar la oferta inicial de madera en diferentes períodos en el tiempo, así como la edad de cosecha final, en tres años, 18, 19 ó 20. En este caso también se generan nueve posibles regímenes para cada plantación al igual que el sistema anterior.

3.2.4 Nomenclatura utilizada en el modelo

Se generaron dos sistemas de nomenclaturas con diferentes propósitos. El primer sistema utiliza ocho caracteres para definir un régimen, una letra inicial, seguida de siete números.

- Letra inicial = Se relaciona con la especie y ubicación de la plantación. Puede tener tres letras; la letra “B” hace referencia a los *Eucalyptus sp.* plantados en Bacacué; “S” indica los *Eucalyptus sp.* plantados en el Sur. Para el caso especial de los *Pinus sp.*, se tuvo que agregar una segunda letra, para diferenciar las plantaciones de Bacacué de aquellas correspondientes al Sur. Por lo tanto, aquellas plantaciones de *Pinus sp.* ubicadas en el Sur, llevan la letra “P” únicamente, mientras que a los *Pinus sp.* plantados en Bacacué, se les agrega una “B” delante de la “P”, quedando “PB”, lo que permite diferenciar el origen.
- Segundo carácter = Indica el tipo de raleos que serán aplicados en una la plantación. Puede tomar dos valores; “1” en caso de realizar el régimen que implica un raleo del 41% a los 9 años y un segundo raleo del 30% a los 12 años, ó “2” en caso de que ambos raleos sean del 50%, a las mismas edades que el primer caso.

- Tercer y cuarto caracter = Indican la edad de cosecha al inicio de la planificación. Este carácter puede tomar tres valores; 18, 19 o 20 años, según esté determinado el régimen.
- Quinto y sexto caracter = Hacen referencia a la edad con la cual serán cosechada una determinada plantación según el régimen establecido, y puede tomar los mismos valores que el dato anterior.
- Séptimo y octavo carácter = Corresponden a las últimas dos cifras del año de plantación de una determinada plantación.

A modo de ejemplo, y para su mejor comprensión, se interpreta la nomenclatura de un régimen;

El régimen S2181878 indica:

Régimen 2 = raleo 50% a los 9 años; raleo 50% a los 12 años

	Cosecha final = 18 años
S 2 18 18 78	— Plantación de 1978
	Cosecha inicial = 18 años
Eucalyptus del Sur	

Con la finalidad de simplificar esta nomenclatura, para evitar problemas en la formulación del modelo matemático y facilitar al análisis e interpretación de los resultados del modelo, se generó una segunda nomenclatura, la cual está correlacionada con el primer sistema de nomenclatura.

Se utilizaron las letras, “B”, “P” y “S” para indicar las especies y su ubicación, seguidas de una numeración en orden ascendente, comenzando desde el 1 para cada plantación. Siguiendo con el ejemplo anterior, la manera resumida de escribir ese régimen con el segundo sistema sería **S103**.

Para el caso de los regímenes que llevan la letra “P” adelante, estos hacen referencia a plantaciones que empiezan el período de planificación con *Pinus sp.*, pero que posteriormente, luego de la cosecha inicial, la replantación se realiza con *Eucalyptus sp.* en todos los casos.

3.2.5 Variables artificiales

Estas variables son generadas con la finalidad de poder exigirle al modelo determinados objetivos, que no podrían ser buscados de otra manera.

El procedimiento consiste en utilizar letras que serán introducidas en las restricciones deseadas. Posteriormente, se generan otras restricciones, las cuales comprenden las restricciones de las nuevas variables. Para su mejor comprensión, se muestra el ejemplo utilizado para el modelo de producción constante.

Se generaron 25 variables nuevas, las cuales se introdujeron en el cuerpo de restricciones correspondiente a las restricciones de volumen. Por ejemplo, a la restricción del período 2011, luego de la suma de todas las ofertas de volúmenes de los diferentes regímenes, se le resta V11, y se iguala a cero. Se prosigue de esta manera hasta el año 2036, finalizando con la sumatoria de cada régimen menos V36, igualado a cero.

Por último se generaron unas restricciones las cuales establecían que la resta de dos variables nuevas consecutivas, V11-V12, V12-V13, ..., V35-V36, sea igual a cero. Este cuerpo de restricciones, asegura que todos los años la producción de madera, o sea la cosecha, sea constante.

Si lo que se desea es determinar una cosecha de una determinada superficie, el procedimiento es similar. Luego de introducir las nuevas variables en las restricciones de superficie, se establece el valor que pueden tomar esas nuevas variables, en otro cuerpo de restricciones.

3.2.6 Función objetivo (FO)

La función objetivo constituye la representación matemática del mundo real que se está estudiando. Dado que el software utilizado tratará de encontrar aquella solución que optimice el modelo, es de vital importancia realizar el proceso de modelado con suma cautela y prestando atención a todos los detalles. Pues, en un modelo con numerosas variables y restricciones a utilizar,

se cometen errores de manera frecuente. Si el modelo no es correctamente elaborado, aparecerán soluciones no óptimas o directamente no habrá solución al problema.

Este trabajo estuvo orientado hacia la elaboración de un modelo matemático, de manera de poder generar una planificación estratégica, la cual utilizara la materia prima de manera óptima en el abastecimiento de madera para el aserradero de la empresa.

Para lograr dicho objetivo, la FO se compuso por la sumatoria de los regímenes, multiplicados, cada uno, por sus respectivos VPLR, y se utilizó la función de maximización del software.

Sin embargo, existe otro objetivo determinado por lo gerentes, el cual consideraba el deseo de lograr la sustitución de las plantaciones de género *Pinus* por plantaciones de *Eucalyptus sp.*, en un tiempo aproximado de 26 años. Este objetivo fue establecido en el cuerpo de las restricciones que se detallan más adelante.

Se utilizó el programa LINGO 12.0, versión sin límite en cuanto al número de variables y de restricciones. Para obtener este producto, fue necesario contactar a la empresa LINDO Systems®, para que nos habilitaran una licencia con fines académicos.

3.2.7 Modelos utilizados y cuerpo de restricciones

Llamaremos modelo matemático, al conjunto compuesto por la función objetivo y sus respectivas restricciones.

Se utilizó una única función objetivo, a partir de la cual se generaron cuatro modelos para ser analizados e interpretados. La diferencia entre estos modelos, está en el cuerpo de las restricciones que fueron utilizadas para cada modelo. Básicamente los modelos varían en las áreas y volúmenes posibles de ser cosechados. A su vez, todos los modelos comparten un grupo de restricciones de área. Estas están relacionadas con la cantidad de hectáreas con las cuales cuentan las plantaciones. Es un valor fijo y debe ser utilizado en

todos los modelos, pues no es posible cosechar más hectáreas de las que se tiene.

El primer modelo, al cual llamaremos Modelo Libre, además de presentar las restricciones propias del área disponible para cada régimen, se le introdujeron restricciones de volúmenes holgadas, de manera que el modelo pudiera cosechar anualmente un volumen de madera superior del requerido por el aserradero. Este modelo fue utilizado para estimar la máxima producción, en base a un tope de 100.000 mcs anuales, que se puede obtener de las plantaciones, según la estructura actual de las mismas, observando las producciones anuales y las hectáreas cosechadas. Así mismo, sirvió para testear tanto la función objetivo como las restricciones, buscando posibles errores en la formulación del modelo.

El segundo modelo, Modelo 200_260, considera una restricción de área particular, la cual se coincide con los objetivos de la empresa. Se limitó al modelo a que pudiera cosechar anualmente un rango de hectáreas el cual iba de 200 a 260 hectáreas. Esto se relaciona con el hecho de que la empresa para lograr la sustitución de los *Pinus sp.*, según un estudio de propio de la misma, estimaron que en un período aproximado de 26 años se estaría logrando dicho objetivo. Nosotros aplicamos el criterio de la cantidad de hectáreas cosechadas, como restricción, a la función objetivo, para evaluar que este objetivo pudiera ser logrado. Para lograr este modelo, se debió generar variables ficticias, según ya fuera explicado el procedimiento.

El tercer modelo, Modelo Constante, es una variante del modelo libre, en donde se le exigió al modelo generar una oferta constante de madera en el período de planificación. Al igual que en el segundo modelo, en éste también fueron generadas variables artificiales, las cuales permitieron al modelo hallar la combinación de regímenes que permitiera obtener una oferta constante de madera en toda la planificación.

El cuarto modelo, Modelo Desvíos de Producción, consideró un cuerpo de restricciones el cual tomaba en cuenta un rango de volúmenes que se encontraban en torno al volumen promedio consumido por el aserradero anualmente. Para realizar dicho modelo se generaron unos desvíos de volúmenes máximos y mínimos con respecto a este volumen. El aserradero tiene un consumo anual promedio de 75.000 mcs. El rango utilizado tomaba en cuenta un volumen mínimo de 30.000 mcs y un máximo de 80.000 mcs

anuales. Esta restricción da cierta flexibilidad al modelo, lo que aumenta la probabilidad de encontrar una solución óptima.

3.3 UBICACIÓN DE LAS ESPECIES A PLANTAR

Como objetivo de sustitución, se planteó un esquema de trabajo que permitiera, en el mediano y largo plazo, poder reemplazar aquellos estratos (rodales) que estuvieran plantados con *Pinus sp.*, por especies del género *Eucalyptus sp.*

Los gerentes de la empresa destinarán las zonas más elevadas para *E.grandis*, mientras que las zonas más bajas se plantarán con *E.dunnii*³. El motivo que llevó a decidir plantar en las zonas más bajas la especie *E.dunnii*, posiblemente radique en el hecho de que esta especie es más resistente a las heladas, frente a *E.grandis* el cual, por tener un origen más costero que el anterior, es más susceptible de sufrir daños por dicho factor abiótico.

En relación al reordenamiento de los rodales o estratos, se utilizó la información almacenada bajo el formato que utilizan los sistemas de información geográfico. A partir de dicha información, el trabajo se limitó a reagrupar los rodales y sus nomenclaturas, con la finalidad de cumplir con uno de los objetivos buscados por la empresa, aprovechando que se estaba utilizando esta herramienta. Este procedimiento se llevó a cabo tomando en cuenta las características de cada rodal o estrato, como ser la especie, edad, superficie y ubicación (ver Mapas en el anexo 1).

3.3.1 Productos

Si bien las plantaciones están orientadas al abastecimiento de madera con fines de aserrío, se genera en la mitad del turno aproximadamente, consecuencia de los raleos aplicados a las plantaciones, un producto que no puede ser totalmente aprovechado por el aserradero, dado que sus diámetros son

³ Annunziatto, W.; Bavosi, R. 2010. Com. personal

pequeños para entrar en dicha cadena, constituyendo un problema a la hora de determinar la oferta de madera a lo largo del turno.

Como solución a este problema, el total de lo raleado, un 50% aproximadamente puede ser consumido por el aserradero, en tanto que el resto es permutado a otras empresas que consumen este tipo de productos, por trozas de aserrado, con diámetros mayores a 25 cm⁴.

3.4 PRINCIPALES OBJETIVOS DE LA PLANIFICACIÓN

“Nuestro objetivo es producir madera con una calidad determinada y de manera continua, para poder mantener en funcionamiento la industria”⁵.

Lo que se pretendió con el trabajo fue lograr una oferta continua y constante de madera para el aserradero, como fuera expresado por el Ing. Bavosi. Davis et al. (1987) permiten justificar técnicamente las razones que fundamentan este tipo de filosofías a seguir:

1. Una cosecha anual de aproximadamente el mismo volumen, tamaño, calidad y valor de la madera, permite una planificación económica base y estable.
2. La cosecha actual, así como el crecimiento e ingreso, se obtienen de un monte el cual crece a un ritmo adecuado a las necesidades de demanda.
3. Se logra una administración financiera facilitada.
4. Se obtiene un mejor control de incendios, plagas, insectos y otros problemas, dado que se mantiene al monte con un crecimiento vigoroso, densidad adecuada según la edad y condición edáfica.
5. Existe una oportunidad para correlacionar esta actividad con otras como las recreativas, generación de ecosistemas aptos para la vida silvestre, protección de napas freáticas e investigación, entre otras.
6. Se asegura una continuidad de trabajo, lo que implica una demanda de trabajo constante.

⁴ Annunziatto, W. 2010. Com. personal.

⁵ Bavosi, R. 2010. Com. personal.

4. RESULTADOS

4.1 SITUACIÓN INICIAL DE FORESTAL CAJA BANCARIA

Actualmente el aserradero tiene un consumo anual de 70.000 a 80.000 m³ de madera. Sin embargo, el potencial de consumo del mismo es de 100.000 m³. El abastecimiento de esta demanda de madera se logra a partir de la cosecha anual de unas 250 ha aproximadamente.

La decisión de cual unidad de manejo debe ser cosechada, se basa fundamentalmente en la edad de la unidad de manejo, seguido por características de logística y área de cada unidad, de manera de disminuir el costo de transporte.

4.1.1 Manejo de plantaciones

El esquema de plantación implica dos pasadas de excéntrica, un subsolado de 60 cm., y posteriormente se acamellona la tierra, de manera de elevar el horizonte A. Manejan una densidad inicial de 1.100 arb./ha. Se realiza control de hormigas y malezas utilizando un producto como el Fipronil para las primeras y Glifosato para las segundas.

La poda se comienza en el segundo año, a los 3 m aproximadamente, y al año siguiente se llega a los 4,5 m. El objetivo es tener madera libre de nudos en los primeros 5 m de altura.

Para el caso de *Pinus sp.*, la especie se maneja una rotación de 20 años, teniendo una producción de 200 mcs há, mientras que los *Eucalyptus sp.* llegan con 16 años a turno final, llegando a producciones de 250 mcs ha.

A continuación se presenta es esquema actual de trabajo de Forestal Caja Bancaria para ambas especies utilizadas.

Tabla No. 1. Manejo actual realizado a las plantaciones de la especie *Pinus sp.*

	Plantación	Raleo 1	Raleo 2	Tala Rasa
Edad (años)	0	10 a 12	16	20(puede variar)
Ab/ha	1.100	600	450 -500	0
Vol Total	0			
% Aserrado	0	30	36	80
% chipeado	0	70	64	20

Tabla No. 2. Manejo realizado a las plantaciones de la especie *Eucalyptus sp.*

	Plantación	Raleo 1	Raleo 2	Tala Rasa
Edad	0	9ª 11	13 a 14	16
Ab/ha	1100	600	450	0
Vol Total	0	70	75	250
%Aserrado	0	30	40	80
%chipeado	0	70	60	20

El esquema de plantación actual, obedece a la necesidad que tiene la empresa de lograr la sustitución de especies en un período no mayor a 30 años⁶.

4.2 RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS MODELOS

4.2.1 Modelo libre

Este modelo cuenta con 720 variables (regímenes) y 74 restricciones. En el mismo se buscó determinar la máxima cantidad de madera posible de ser cosechada anualmente, de manera sostenible en el tiempo a lo largo del período de planificación.

Del total de 720 regímenes, el programa seleccionó 41 regímenes como solución óptima del problema. Dado que se trata de maximizar el valor de la FO, cualquier otro régimen que fuera incluido, o sea que se hubiera obligado al programa a tener en cuenta, el valor de la FO hubiera disminuido en el valor

⁶ Annunziatto, W. 2010. Com. personal.

correspondiente al “reduced cost” de ese régimen incluido. Este valor sería el costo de oportunidad interno a la empresa si por alguna razón de planificación se forzara la inclusión de algún régimen no seleccionado.

Considerando las restricciones de área, se observa que el software no utilizó plantaciones de *Pinus sp.* anteriores al año 1990, sucediendo lo mismo con las plantaciones de *Eucalyptus sp.*. La razón que justifica esta opción de no cosechar estas plantaciones más viejas, radica en el hecho de la forma en que fueron elaborados los regímenes. Al haber acotado las opciones de tala rasa a un período máximo de 3 años, la oferta de madera posible de ser obtenida a partir de estas plantaciones se concentraron en un período de tiempo muy reducido como para haber sido seleccionadas por el programa.

Haciendo una evaluación de aquellas restricciones que frenaron de manera más significativa al crecimiento del modelo, se observa que hay cuatro regímenes correspondientes a las plantaciones de *Pinus sp.*, desde PB95 a PB98, que actuaron limitando al modelo. A través de la apreciación del precio dual de estos regímenes, se vio que sus valores superaban los 6.000 dólares por costo unitario. De esta manera, de haber tenido 1 hectárea más de cualquiera de estos regímenes hubiera aumentado el valor de la FO en esos valores. Sucedió algo similar con dos plantaciones de *Eucalyptus sp.*, ES98 y EB96, las cuales fueron las que más detuvieron el crecimiento de la FO por escasez área de estos regímenes. En estos casos el aporte por tener una hectárea más de cualquiera de estos regímenes, aportaba un promedio de 4.000 dólares más a la FO.

Del total de área disponible de plantaciones, el programa optó por dejar 454 hectáreas libres sin cosechar de *Pinus sp.* y 29,71 hectáreas sin cosechar de *Eucalyptus sp.*, durante todo el período de planificación, representado en el Mapa No1.

Las tablas que se muestran a continuación, muestran los regímenes seleccionados por el programa para el Modelo Libre. En el mismo se detalla el manejo que será dado a cada régimen. En las casillas que no aparecen datos, implica que no se realiza ningún manejo a esa plantación. Estas tablas, se repiten, con otros regímenes seleccionados, para los restantes tres modelos, con el mismo objetivo.

Tabla No. 3. Regímenes seleccionados correspondientes a los *Eucalyptus sp.* del modelo libre.

Los mcs cosechados corresponden a madera con destino aserrado. La densidad de plantación inicial es de 1.100 árboles/ha. El primer raleo se realiza a los 9 años y el segundo a los 12 años. Posteriormente se realiza la cosecha.													
Regímenes	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad cosecha. Inicial (años)	Vol. cosechado (mcs)	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad Tala Rasa (años)	Vol. cosechado (mcs)	No. ár/ha cosechados
B40	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	18	148	275
B41	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	18	148	275
B42	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	18	148	275
B43	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	18	148	275
B44	---	---	---	---	---	---	52	550	64	275	18	148	275
B45	---	---	---	---	19	196	52	550	64	275	18	148	275
S6	---	---	---	---	18	166	35	451	31	195	18	166	454
S52	35	451	31	195	19	180	35	451	---	---	---	---	---
S77	---	---	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S78	---	---	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S79	35	451	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S80	35	451	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S81	35	451	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S82	35	451	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S83	35	451	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S94	---	---	---	---	19	180	35	451	31	195	20	195	454
S101	---	---	---	---	20	195	35	451	31	195	20	195	454
S181	43	550	47	550	20	167	43	550	---	---	---	---	---
S182	43	550	47	550	20	167	43	550	---	---	---	---	---

S201	---	---	---	---	20	195	35	451	31	195	18	166	454
------	-----	-----	-----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	-----

Tabla No. 4. Regímenes seleccionados correspondientes a los *Pinus sp.* del modelo libre.

Los mcs cosechados corresponden a madera con destino aserrado. La densidad de plantación inicial es de 1.100 árboles/ha. El primer raleo se realiza a los 9 años y el segundo a los 12 años. Posteriormente se realiza la cosecha.													
Regímenes	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad cosecha. inicial	Vol. cosechado (mcs)	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad Tala Rasa	Vol. cosechado (mcs)	No. ár/ha cosechados
P80	---	---	---	---	22	226	35	451	31	195	20	195	454
P157	---	---	---	---	22	226	43	550	47	275	20	167	275
P181	---	---	14	---	20	123	35	451	31	195	18	165	454
P304	---	---	---	---	20	204	43	550	47	275	18	137	275
P312	---	---	14	---	22	144	43	550	47	275	18	137	275
P319	---	---	14	---	20	123	43	550	47	275	---	---	---
P324	---	---	14	---	20	123	35	451	31	195	18	165	454
P327	---	---	14	---	20	123	35	451	31	195	---	---	---
P328	---	---	---	---	20	204	52	550	64	275	18	148	275
P329	---	---	---	---	21	215	52	550	64	275	18	148	275
P330	---	---	---	---	22	226	52	550	64	275	18	148	275
P333	---	---	14	---	22	144	52	550	64	275	18	148	275
P336	---	---	14	---	22	144	52	550	64	275	18	148	275
P338	---	---	14	---	21	133	52	550	64	275	18	148	275
P340	---	---	14	---	20	123	52	550	64	275	18	148	275
P346	---	---	---	---	20	204	43	550	47	275	19	152	275
P354	---	---	---	---	22	226	43	550	47	275	19	152	275
P358	---	---	14	---	20	123	43	550	47	275	19	152	275
P388	---	---	---	---	20	204	43	550	47	275	20	167	275

P391	---	---	---	---	20	204	43	550	47	275	20	167	275
P394	---	---	---	---	20	204	43	550	47	275	20	167	275

Tabla No. 5. Oferta de madera a partir de los resultados del modelo libre.

Período Planificación	Volumen (mcs)	Superficie (ha)
2011	99.999	804
2012	99.999	763
2013	99999	649
2014	99.999	743
2015	100.000	669
2016	100.001	517
2017	70.954	707
2018	76.835	731
2019	18.214	174
2020	29.289	565
2021	34.688	701
2022	25.547	504
2023	88.799	1180
2024	60.469	972
2025	69.592	1043
2026	57.153	931
2027	50.992	919
2028	49.723	662
2029	100.000	928
2030	78.534	840
2031	100.002	767
2032	100.002	813
2033	69.423	503
2034	37.517	310
2035	92.665	740
2036	74.349	496
TOTAL	1.884.744	18.630

De los 26 años que dura el período de planificación, existen cinco años, entre el 2019 al 2022 y en el 2034, donde se da una oferta de madera substancialmente inferior a la demandada por el aserradero, teniendo en cuenta una demanda anual aproximada de 75.000 mcs.

El conflicto mayor se genera durante el período que va desde el año 19 al 22, dado que son cuatro años en donde las plantaciones no satisfacen las

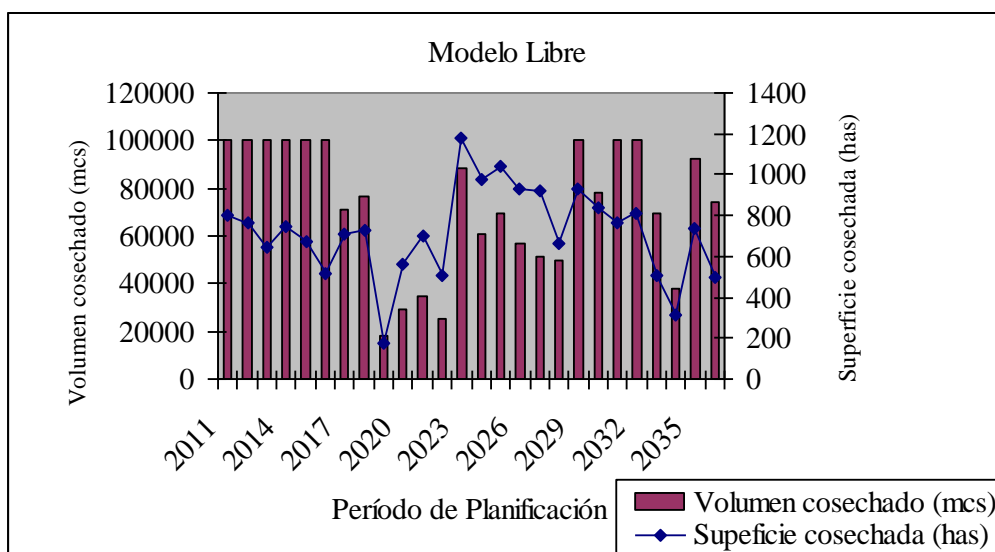
necesidades actuales que tiene el aserradero, limitando, de esta manera, la posibilidad de expansión de la industria. El problema radica en el hecho de que por un período de cuatro años la empresa deberá comprar la materia prima a terceros, suponiendo un gasto extra. En el 2034, se genera una situación similar a la anterior.

Tabla No. 6. Discriminación del volumen cosechado, según las especies cosechadas en el modelo libre.

Período Planificación	Volumen total (mcs)	Volumen (mcs) por especie	
		Pino	Eucalyptus
2011	99.999	35.912	64.087
2012	99.999	30.865	69.134
2013	99.999	60.756	39.243
2014	99.999	78.624	21.375
2015	100.000	96.383	3.617
2016	100.001	95.940	4.061
2017	70.954	52.719	18.235
2018	76.835	58.404	18.431
2019	18.214	14.749	3.465
2020	29.289	0	29.289
2021	34.688	0	34.688
2022	25.547	0	25.547
2023	88.799	20.896	67.903
2024	60.469	1.292	59.177
2025	69.592	0	69.592
2026	57.153	0	57.153
2027	50.992	0	50.992
2028	49.723	0	49.723
2029	100.000	0	100.000
2030	78.534	0	78.534
2031	100.002	0	100.002
2032	100.002	0	100.002
2033	69.423	0	69.423
2034	37.517	0	37.517
2035	92.665	0	92.665
2036	74.349	0	74.349
TOTAL	1.884.744	546.540	1.338.204

Durante el período que va desde el 2013-19 el abastecimiento de madera al aserradero, proviene fundamentalmente de las plantaciones de *Pinus sp.* Luego es el *Eucalyptus sp.* la especie que predomina como oferente de madera.

Gráfico No. 4. Modelo libre.



En el gráfico se puede observar más claramente lo que se vio en las tablas anteriores. Durante el período que va desde el 2019 al 2022 y en el 2034, ocurre una caída en la oferta de madera por parte de las plantaciones.

Ahondando en este tema, el programa muestra los resultados donde se evidencia que no se logra cumplir con los requisitos de volumen deseado de 100.000 mcs anuales durante el período que transcurre entre los años 2017-2028, 2030 y del 2033-2036, obteniendo durante esos años ofertas de madera menores al deseado. En total representan 17 períodos, o sea más de la mitad del período de planificación donde se da una oferta insuficiente de madera, según el objetivo perseguido. Este aspecto en el cual estos períodos no logran cumplir con los volúmenes deseados, esta relacionado con la superficie disponible. Al no haber suficiente superficie plantada, si bien por crecimiento se podría llegar a los niveles de volúmenes deseados, con el sistema de regímenes propuesto faltan hectáreas ocupadas por plantaciones más nuevas. Esto se observa en la solución del programa, donde se ve que determinadas restricciones dan valores de slacks iguales a cero, lo que significa que se ha utilizado el total del área

disponible de esos regímenes y que por lo tanto son limitantes al crecimiento del valor de la FO.

Estos años donde la oferta de madera no alcanza los objetivos deseados, representan una limitante para futuros proyectos de expansión de producción. Esto supone un inconveniente para la situación actual de la empresa, ya que la misma tiene una capacidad de consumir 100.000 mcs de madera anualmente.

Otro aspecto interesante de observar, que se ve mejor en el gráfico No. 1, son las hectáreas cosechadas durante los primeros 5 a 6 períodos, donde con un promedio de unas 700 hectáreas cosechadas se llega a los 100.000 mcs cosechados, mientras que a partir del 2023 se superan las 700 hectáreas cosechadas, la producción se hace irregular y existen años donde el objetivo buscado, de 100.000 mcs año, no es alcanzado.

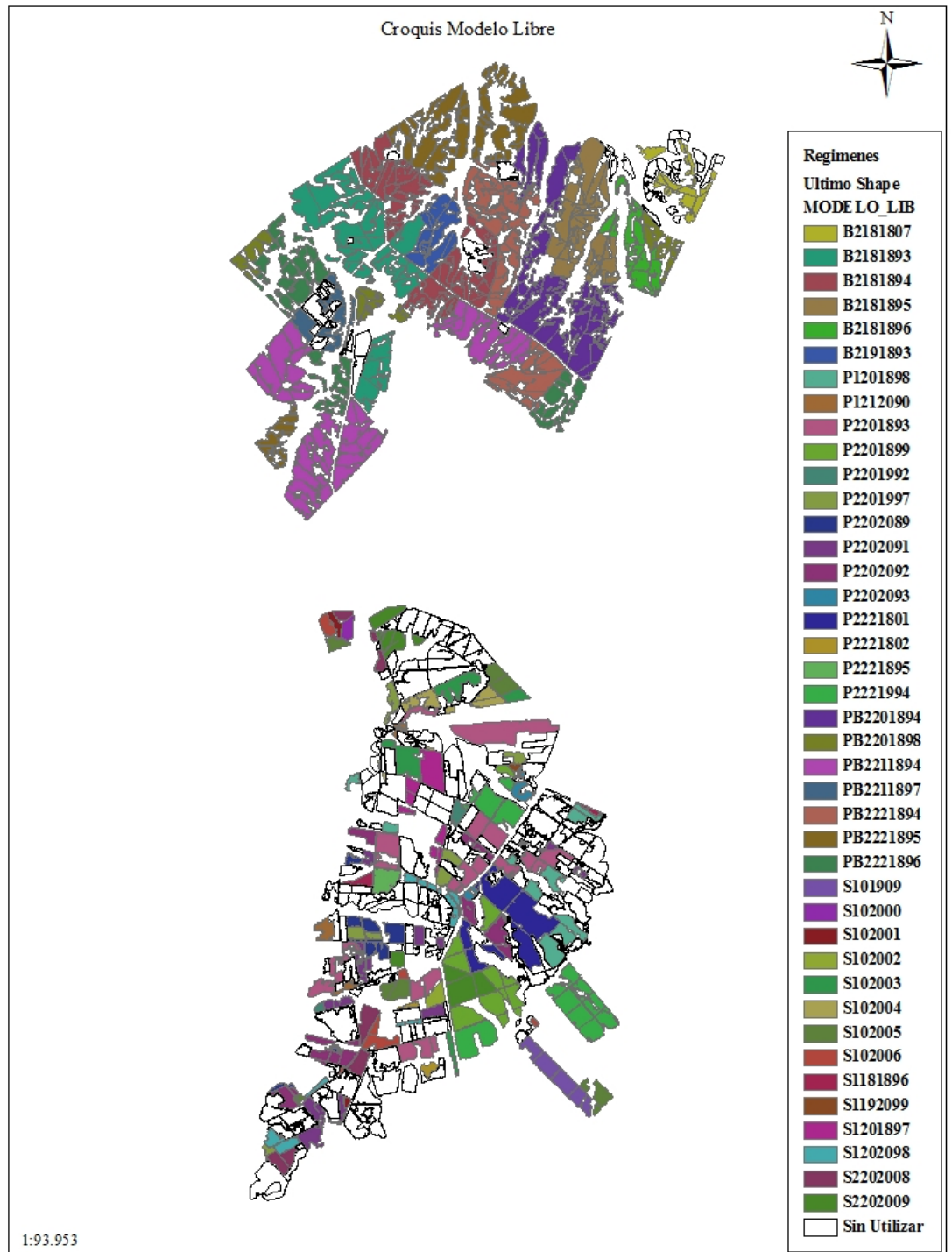
Tabla No. 7. Hectáreas cosechadas de los regímenes seleccionados en el modelo libre.

Régimen	Superficie (ha)	Régimen	Superficie (ha)
B40	342,18	P157	55,96
B41	261,00	P181	91,94
B42	202,00	P304	272,63
B43	86,00	P312	22,16
B44	54,00	P319	120,01
B45	89,82	P324	144,37
S6	14,15	P327	8,93
S52	54,01	P328	370,79
S77	9,75	P329	438,76
S78	9,10	P330	235,68
S79	12,69	P333	279,26
S80	74,47	P336	193,32
S81	39,24	P338	57,00
S82	74,54	P340	92,49
S83	36,23	P346	11,40
S94	2,86	P354	187,71
S101	42,59	P358	52,39
S181	64,76	P388	91,92
S182	151,97	P391	101,75
S201	70,00	P394	16,27
P80	21,48		
TOTAL PINUS		2.866,21	
TOTAL EUCALYPTUS		1.691,34	
TOTAL SUPERFICIE		4.557,55	

En esta tabla se observa el amplio rango de hectáreas que cada régimen tiene. El mismo va desde las 2,86 hectáreas que se le cosechan al régimen S94 a las 370,79 hectáreas que se cosechan del régimen P328. Estas superficies no corresponden en un ciento por ciento a estos regímenes mencionados, sino que éstos son parte de un grupo de regímenes que en su totalidad, tienen estas hectáreas. Lo que el modelo realizó, fue destinar la totalidad de la superficie disponible en un determinado período (compuesto por varios regímenes) a un solo régimen.

Considerando que hay 3.320 hectáreas de *Pinus sp.* en un comienzo, se puede ver como este modelo cosecha 2.866 hectáreas de esas plantaciones, representando el 86% del total de la superficie ocupada por esta especie. Es un dato importante a tener en mente si se considera el objetivo de la sustitución de *Pinus sp.* por *Eucalyptus sp.*

Mapa No. 1. Utilización de las plantaciones disponibles, bajo el régimen del modelo libre.



Del total de las 5.298 hectáreas con las que cuenta la empresa, de aplicarse el modelo libre se estarían utilizando 4.557 hectáreas, lo que representa el 86.01% del total disponible.

4.2.2 Modelo 200-260

El modelo consta de 746 variables y 126 restricciones. Fue diseñado de manera tal que se ajustara al plan de manejo actual que tiene la empresa, el cual busca lograr la sustitución de los pinos en un período aproximado de 26 años lo que según las expectativas de la empresa se lograría con cosechas anuales de 250 hectáreas aproximadamente. En el caso del modelo y con la finalidad de encontrar una solución óptima al problema, se generó un rango de hectáreas posibles de ser cosechadas, lo más ajustado posible a la realidad de la empresa. Este rango fue introducido en las restricciones correspondientes a las variables artificiales agregadas en el modelo.

Del total de 746 variables utilizados en el modelo, el programa seleccionó 40 para hallar la solución óptima. Correspondió al modelo con menor valor en la FO. Esto se explica por la poca flexibilidad en términos de área que se le introdujeron al modelo en las restricciones.

No fueron utilizadas 3.840 hectáreas, lo que representa más de la mitad del área disponible de plantaciones. En el Mapa No. 2 se puede ver como la superficie no utilizada queda sin color, representando una superficie muy significativa del total. Esto sucedió por haber restringido tan fuertemente la cantidad de área que se quería utilizar anualmente, resultando en un uso ineficiente de la tierra aprovechable.

En este modelo fueron las plantaciones de mayor edad de *Pinus sp.* las limitantes al crecimiento de la función. En tanto que sobraron hectáreas de *Pinus sp.* jóvenes, excepto por dos plantaciones de Bacacué de 1997 y 1998, las cuales fueron totalmente utilizadas. Para el caso de los *Eucalyptus sp.*, sus plantaciones no fueron limitantes de la FO, excepto en cuatro plantaciones.

Tabla No. 8. Regímenes seleccionados correspondientes a los *Eucalyptus sp.* del modelo 200_260.

Los mcs cosechados corresponden a madera con destino aserrado. La densidad de plantación inicial es de 1.100 árboles/ha. El primer raleo se realiza a los 9 años y el segundo a los 12 años. Posteriormente se realiza la cosecha.													
Regímenes	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad cosecha. Inicial (años)	Vol. cosechado (mcs)	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad Tala Rasa (años)	Vol. cosechado (mcs)	No. ár/ha cosechados
B18	43	451	42	195	19	195	---	---	---	---	---	---	---
B40	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	18	148	275
B44	52	550	64	275	18	148	275	---	---	---	---	---	---
B45	---	---	---	---	19	196	52	550	64	275	18	148	275
S10	---	---	31	195	18	166	35	451	---	---	---	---	---
S13	35	451	31	195	18	166	35	451	---	---	---	---	---
S17	35	451	31	195	18	166	35	451	---	---	---	---	---
S23	---	---	---	---	19	170	35	451	31	195	18	166	454
S35	---	---	---	---	---	472	35	451	31	195	19	180	454
S36	---	---	---	---	---	457	35	451	31	195	19	180	454
S102	---	---	---	---	20	195	35	451	31	195	20	195	454
S150	43	550	47	47	19	152	43	550	---	---	---	---	---
S179	43	550	47	47	20	167	43	550	---	---	---	---	---
S182	43	550	47	47	20	167	43	550	---	---	---	---	---

Tabla No. 9. Regímenes seleccionados correspondientes a los *Pinus sp.* del modelo 200_260.

Los mcs cosechados corresponden a madera con destino aserrado. La densidad de plantación inicial es de 1.100 árboles/ha. El primer raleo se realiza a los 9 años y el segundo a los 12 años. Posteriormente se realiza la cosecha.										
Regímenes	Vol. 1er. Raleo (mcs)	Edad cose. inicial	Vol. cosechado (mcs)	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/has cosechados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/has cosechados	Edad Tala Rasa	Vol. cosechado (mcs)	No. ár/has cosechados
P57	---	21	337	35	451	31	195	20	195	454
P112	---	---	303	43	550	47	275	19	152	275
P140	---	---	315	43	550	47	275	20	167	
P143	---	---	303	43	550	47	275	20	167	275
P146	---	---	292	43	550	47	275	20	167	275
P149	---	---	270	43	550	47	275	20	167	275
P152	---	---	259	43	550	47	275	20	167	275
P153	---	---	270	43	550	47	275	20	167	275
P156	---	---	259	43	550	47	275	20	167	275
P315	14	22	144	43	550	47	275	18	138	275
P321	14	22	144	43	550	47	275	---	---	275
P322	14	20	123	43	550	47	275	---	---	---
P323	14	21	133	43	550	47	275	---	---	---
P324	14	22	144	43	550	47	275	---	---	---
P327	14	22	144	43	550	47	275	---	---	
P328	---	20	204	52	550	64	275	18	148	---
P329	---	19	215	52	550	64	275	18	148	275
P330	---	20	226	52	550	64	275	18	148	275
P333	14	22	144	52	550	64	275	18	148	275
P336	14	22	144	52	550	64	275	18	148	275
P338	14	21	123	52	550	64	275	18	148	275
P339	14	22	144	52	550	64	275	---	---	275

P341	14	21	133	52	550	64	275	---	---	---
P342	14	22	144	52	550	64	275	---	---	---
P418	---	20	204	52	550	64	275	20	168	---
P419	---	21	215	52	550	64	275	20	168	275

Tabla No. 10. Modelo 200-260.

Período de Planificación	Volumen (mcs)	Superficie (ha)
2011	37.712	260
2012	39.083	260
2013	32.873	260
2014	23.368	200
2015	27.954	200
2016	28.198	200
2017	17.072	200
2018	22.678	200
2019	24.299	200
2020	14.138	200
2021	14.273	202
2022	21.518	228
2023	14.425	260
2024	13.949	260
2025	17.706	266
2026	20.115	260
2027	15.031	260
2028	15.006	260
2029	25.105	260
2030	21.371	260
2031	13.768	260
2032	36.851	260
2033	30.827	237
2034	22.129	200
2035	26.547	200
2036	27.494	200
TOTAL	603.490	6.053

En esta tabla se ve como no siempre cosechando el máximo de superficie determinada en el modelo, se obtienen mayores volúmenes de madera cosechada. Esto sucede por el hecho de que aquellos años donde se cosecha 260 hectáreas como en el año 2024, la oferta de madera proviene en su mayoría de raleos dando volúmenes menores que aquellos años donde se cosecha 200 hectáreas, como en el año 2019, donde, además de obtener madera proveniente de raleos, también se cuenta con madera de talas rasas. Esto

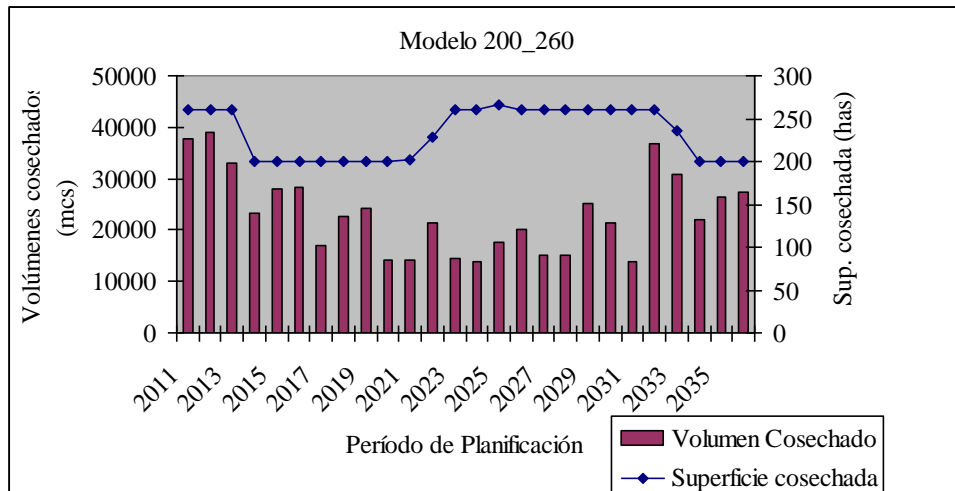
evidencia que existen años donde la superficie cosechada rinde menos metros cúbicos por metro cuadrado.

Tabla No. 11. Discriminación del volumen cosechado, según las especies cosechadas en el modelo 200_260.

Período Planificación	Volumen total (mcs)	Volumen (mcs) por especie	
		Pino	Eucalyptus
2011	37.712	14.610	23.102
2012	39.083	37.025	2.058
2013	32.873	30.027	2.846
2014	23.368	23.368	0
2015	27.954	26.369	1.585
2016	28.198	24.192	4.006
2017	17.072	16.996	76
2018	22.678	20.354	2.324
2019	24.299	18.895	5.404
2020	14.138	6.693	7.445
2021	14.273	7.814	6.459
2022	21.518	10.351	11.167
2023	14.425	125	14.300
2024	13.949	0	13.949
2025	17.706	0	17.706
2026	20.115	0	20.115
2027	15.031	0	15.031
2028	15.006	0	15.006
2029	25.105	0	25.105
2030	21.371	0	21.371
2031	13.768	0	13.768
2032	36.851	0	36.851
2033	30.827	0	30.827
2034	22.129	0	22.129
2035	26.547	0	26.547
2036	27.494	0	27.494
TOTAL	603.490	236.819	366.671

A partir del 2023 y exceptuando el 2024, la madera proviene exclusivamente de las plantaciones de *Eucalyptus sp.*

Gráfico No. 5. Modelo 200-260.



En el gráfico se puede observar como, a pesar de obtener una cosecha relativamente constante, en términos de superficie cosechada, los volúmenes cosechados varían ampliamente desde 13.768 mcs en el 2031 a 39.083 mcs en el 2012. Así mismo, se observa que desde el 2018 hasta el 2032, los volúmenes de madera extraídos son marcadamente menores a los obtenidos en los períodos correspondientes a los extremos de la gráfica.

Desde el punto de vista logístico, saber de antemano la superficie que será trabajada todos los años, permite determinar los requerimientos de maquinaria y personal para las tareas de cosecha, representando una ventaja operativa. Sin embargo la variabilidad de volúmenes cosechados anualmente según el esquema de este modelo, lo hace poco eficiente a la hora de planificar el abastecimiento de madera al aserradero, ya que el volumen cosechado representa la información más importante para la industria.

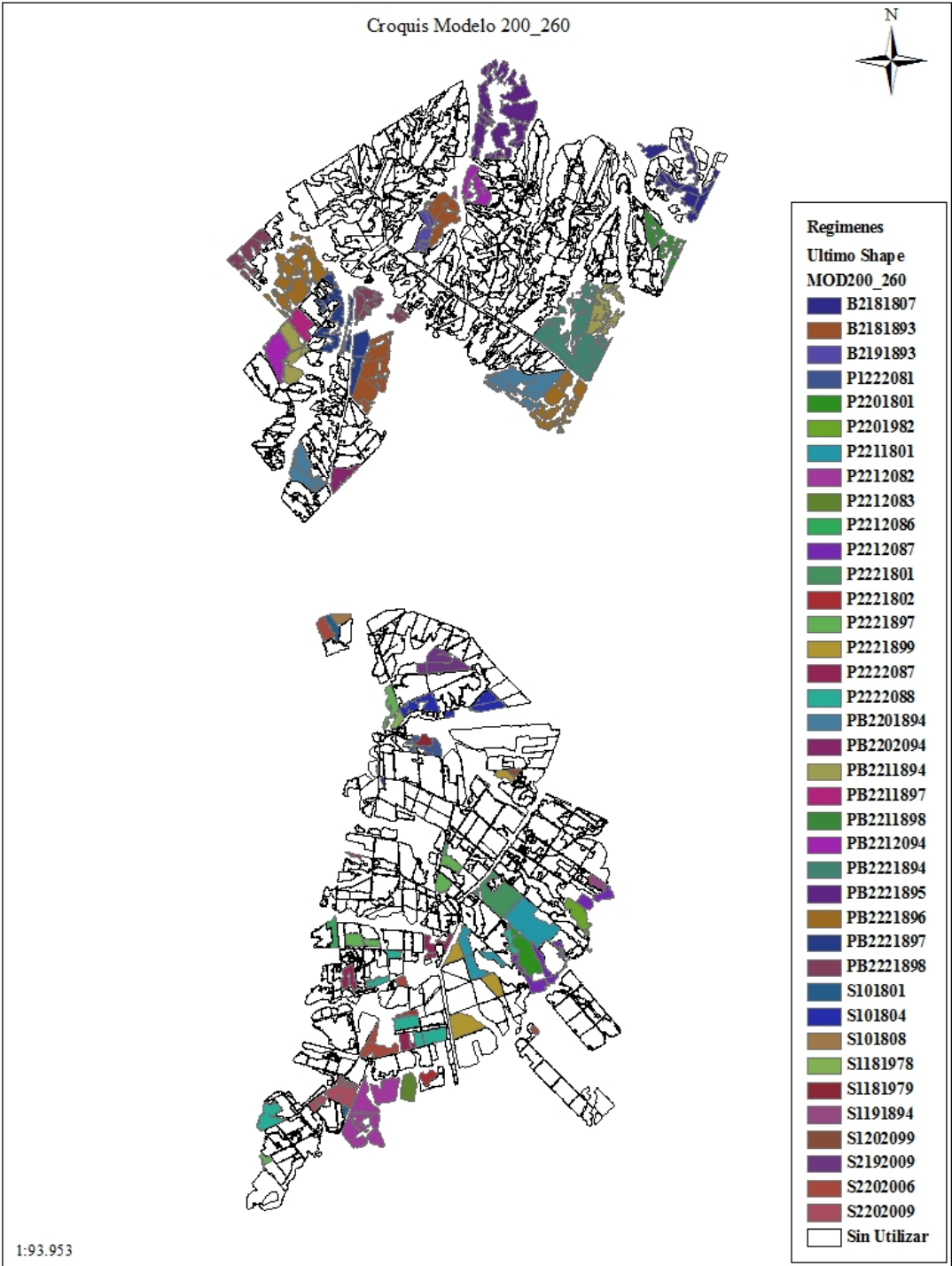
Tabla No. 12. Hectáreas cosechadas en los regímenes seleccionados para el modelo 200-260.

Régimen seleccionado	Superficie (ha)	Régimen seleccionado	Superficie (ha)
B18	5,743241	P152	40,07616
B40	98,42837	P153	31,78061
B44	48,25676	P156	60,9217
B45	10,46969	P315	43,17716
S10	9,0991	P321	44,43048
S13	39,2417	P322	11,25213
S17	2,139549	P323	77,3615
S23	6,4959	P324	0,8672102
S35	4,6122	P327	8,925461
S36	5,7293	P328	91,6322
S102	2,8609	P329	66,95589
S150	7,2417	P330	106,7583
S179	36,2252	P333	108,3796
S182	6,951959	P336	128,2698
P57	12,28263	P338	12,3859
P112	42,85052	P339	44,6153
P140	48,09409	P341	46,24754
P143	9,417892	P342	46,24006
P146	14,4689	P418	15,8802
P149	9,203485	P419	52,38843
TOTAL PINUS		1.174,863148	
TOTAL EUCALYPTUS		283,495569	
TOTAL		1.458,3587	

Se observa un amplio rango de hectáreas cosechadas a los diferentes regímenes. Existen superficies cosechadas desde 0,86 hectáreas, como el régimen P324, a 128 hectáreas correspondientes al régimen P336. Esto y en general para la solución de los modelos se tiene que compatibilizar con un plan de logística de cosecha. En el caso en que el rodal sea contiguo a rodales de superficies mayores a cosechar esto sería operativamente posible. Caso contrario habría que poner dentro del cuerpo de restricciones el permiso a cosechar solo áreas viables operativamente.

En este caso se logra una sustitución de *Pinus sp.* del 35%, lo que representa un nivel bajo de sustitución de la especie para todo el período de planificación.

Mapa No. 2. Utilización de las plantaciones disponibles, bajo el régimen del modelo 200-260.



Este modelo aprovecha un 27.52% del total de la superficie disponible, las cuales dan un total de 1.458 hectáreas de plantaciones. Esto representa una utilización de la superficie 3.6 veces menor que el modelo libre.

4.2.3 Modelo de producción constante

El modelo consta de 746 variables y 99 restricciones. El mismo buscó obtener una producción anual constante de madera a lo largo del período de planificación. Para lograr este objetivo se generaron variables artificiales, según fuera explicado en la sección de materiales y métodos. Cumplir con este objetivo es imprescindible cuando se tiene una industria que funciona de manera continua, y en la cual tener fluctuaciones en el abastecimiento de madera, supone la necesidad de tener que comprar madera a terceros, o parar la producción.

Este modelo permitió observar el comportamiento de la FO bajo una situación casi libre, en la cual se pudo apreciar la cantidad de volumen que se podía extraer de las plantaciones anualmente de manera constante en el tiempo. El hecho de poder saber con cuanta madera cuenta la industria anualmente por un período total de 26 años, le permite al centro decisor poder elaborar una planificación estratégica más precisa.

Se obtuvo una producción anual de 31.460 mcs durante todo el período de planificación. En este caso fueron las plantaciones de *Eucalyptus sp.* del Sur las que tuvieron mayor influencia en limitar el crecimiento de la FO, habiendo restricciones cuyo precio dual alcanza los 20.000 dólares. Lo que significa que, por cada hectárea extra que se hubiera tenido de estas restricciones, por ejemplo la ES99, el valor de la FO hubiera aumentado en 20.000 dólares.

Como se ha observado en los demás modelos, es posible obtener mayores volúmenes de madera. El problema en este caso está en como fueron elaborados los regímenes los cuales afectan directamente la oferta de madera para abastecer al aserradero.

Tabla No.13. Regímenes seleccionados correspondientes a los *Eucalyptus sp.* del modelo constante.

Los mcs cosechados corresponden a madera con destino aserrado. La densidad de plantación inicial es de 1.100 árboles/ha. El primer raleo se realiza a los 9 años y el segundo a los 12 años. Posteriormente se realiza la cosecha.													
Regímenes	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad cosecha. Inicial (años)	Vol. cosechado (mcs)	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad Tala Rasa (años)	Vol. cosechado (mcs)	No. ár/ha cosechados
B40	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	18	148	275
B41	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	18	148	275
B42	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	18	148	275
B44	---	---	---	---	---	---	52	550	64	275	18	148	275
B53	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	19	158	275
B66	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	20	168	275
B67	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	20	168	275
B68	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	20	168	275
S10	---	---	31	195	18	166	35	451	---	---	---	---	---
S11	35	451	31	195	18	166	35	451	---	---	---	---	---
S12	35	451	31	195	18	166	35	451	---	---	---	---	---
S13	35	451	31	195	18	166	35	451	---	---	---	---	---
S15	35	451	31	195	18	166	35	451	---	---	---	---	---
S17	35	451	31	195	18	166	35	451	---	---	---	---	---
S43	---	---	31	195	19	180	35	451	---	---	---	---	---
S46	35	451	31	195	19	180	35	451	---	---	---	---	---
S48	35	451	31	195	19	180	35	451	---	---	---	---	---
S49	35	451	31	195	19	180	35	451	---	---	---	---	---
S81	35	451	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S83	35	451	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S101	---	---	---	---	20	195	35	451	31	195	20	195	454
S102	---	---	---	---	20	195	35	451	31	195	20	195	454

S118	43	550	47	275	18	138	43	550	---	---	---	---	---
S150	43	550	47	275	19	152	43	550	---	---	---	---	---

Tabla No. 14. Regímenes seleccionados correspondientes a los *Pinus sp.* del modelo constante.

Los mcs cosechados corresponden a madera con destino aserrado. La densidad de plantación inicial es de 1.100 árboles/ha. El primer raleo se realiza a los 9 años y el segundo a los 12 años. Posteriormente se realiza la cosecha.													
Regímenes	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad cosecha. Inicial (años)	Vol. cosechado (mcs)	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad Tala Rasa (años)	Vol. cosechado (mcs)	No. ár/ha cosechados
P180	14	---	---	---	22	144	35	451	31	195	---	---	---
P182	14	---	---	---	21	133	35	451	31	195	---	---	---
P183	14	---	---	---	22	144	35	451	31	195	---	---	---
P184	14	---	---	---	20	123	35	451	31	195	---	---	---
P186	14	---	---	---	22	144	35	451	31	195	---	---	---
P188	14	---	---	---	21	133	35	451	31	195	---	---	---
P189	14	---	---	---	22	144	35	451	31	195	---	---	---
P243	14	---	---	---	22	144	42	451	42	195	19	196	454
P285	---	---	---	---	22	226	42	451	42	195	20	206	454
P289	14	---	---	---	20	123	42	451	42	195	20	206	454
P315	14	---	---	---	22	144	43	550	47	275	18	137	275
P327	14	---	---	---	22	144	43	550	47	275	---	---	---
P328	---	---	---	---	20	204	52	550	64	275	18	148	275
P329	---	---	---	---	21	215	52	550	64	275	18	148	275
P332	14	---	---	---	21	133	52	550	64	275	18	148	275
P333	14	---	---	---	22	144	52	550	64	275	18	148	275
P334	14	---	---	---	20	123	52	550	64	275	18	148	275
P336	14	---	---	---	22	144	52	550	64	275	18	148	275
P339	14	---	---	---	22	144	52	550	64	275	---	---	---
P342	14	---	---	---	22	144	52	550	64	275	---	---	---
P419	---	---	---	---	21	215	52	550	64	275	20	168	275

Tabla No. 15. Modelo de producción constante.

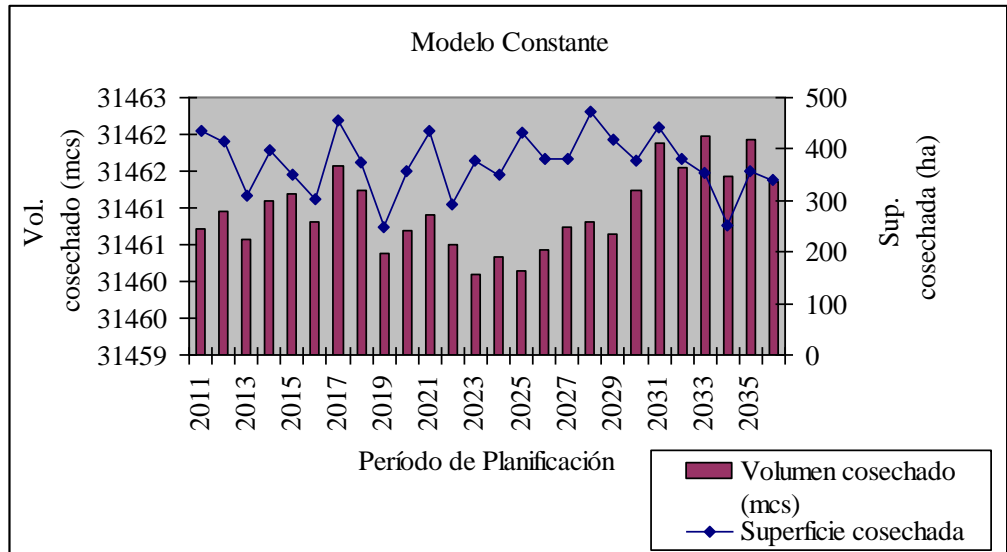
Período de Planificación	Volumen (mcs)	Superficie (ha)
2011	31.461	437
2012	31.461	416
2013	31.461	309
2014	31.461	397
2015	31.461	352
2016	31.461	304
2017	31.462	454
2018	31.461	374
2019	31.460	249
2020	31.461	359
2021	31.461	435
2022	31.460	294
2023	31.460	378
2024	31.460	350
2025	31.460	432
2026	31.460	382
2027	31.461	383
2028	31.461	473
2029	31.461	417
2030	31.461	378
2031	31.462	442
2032	31.462	380
2033	31.462	355
2034	31.461	253
2035	31.462	359
2036	31.461	340
TOTAL	817.985	9.701

Tabla No.16. Discriminación del volumen cosechado, según las especies cosechadas en el modelo de producción constante.

Período Planificación	Volumen total (mcs)	Volumen (mcs) por especie	
		Pino	Eucalyptus
2011	31.461	4.086	27.375
2012	31.461	2.828	28.633
2013	31.461	1.600	29.861
2014	31.461	28.422	3.039
2015	31.461	27.845	3.616
2016	31.461	27.400	4.061
2017	31.462	26.832	4.630
2018	31.461	13.703	17.758
2019	31.460	24.175	7.285
2020	31.461	19.741	11.720
2021	31.461	15.114	16.347
2022	31.460	4.910	26.550
2023	31.460	15.585	15.875
2024	31.460	1.292	30.168
2025	31.460	0	31.460
2026	31.460	0	31.460
2027	31.461	0	31.461
2028	31.461	0	31.461
2029	31.461	0	31.461
2030	31.461	0	31.461
2031	31.462	0	31.462
2032	31.462	0	31.462
2033	31.462	0	31.462
2034	31.461	0	31.461
2035	31.462	0	31.462
2036	31.461	0	31.461
TOTAL	817.985	213.533	604.452

Entre el 2014-2017 y en el 2019, la mayor cantidad de madera proviene de plantaciones de *Pinus sp.*, mientras que los restantes años la oferta de madera proviene de los plantaciones de *Eucalyptus sp.*. Así mismo, se observa que a partir del 2025, se termina con la plantaciones de *Pinus sp.* seleccionadas por el modelo, no quiere decir que se haya terminado con todas las plantaciones de *Pinus sp.*.

Gráfico No. 6. Modelo de producción constante.



Si bien se logró obtener una producción constante en el tiempo, se observa la gran variabilidad de las hectáreas cosechadas en el tiempo, debido al rendimiento por superficie de las diferentes plantaciones.

Se debe considerar, a su vez, que esta producción anual de 30.000 mcs, está muy por debajo de los 70.000 mcs anuales que consume el aserradero.

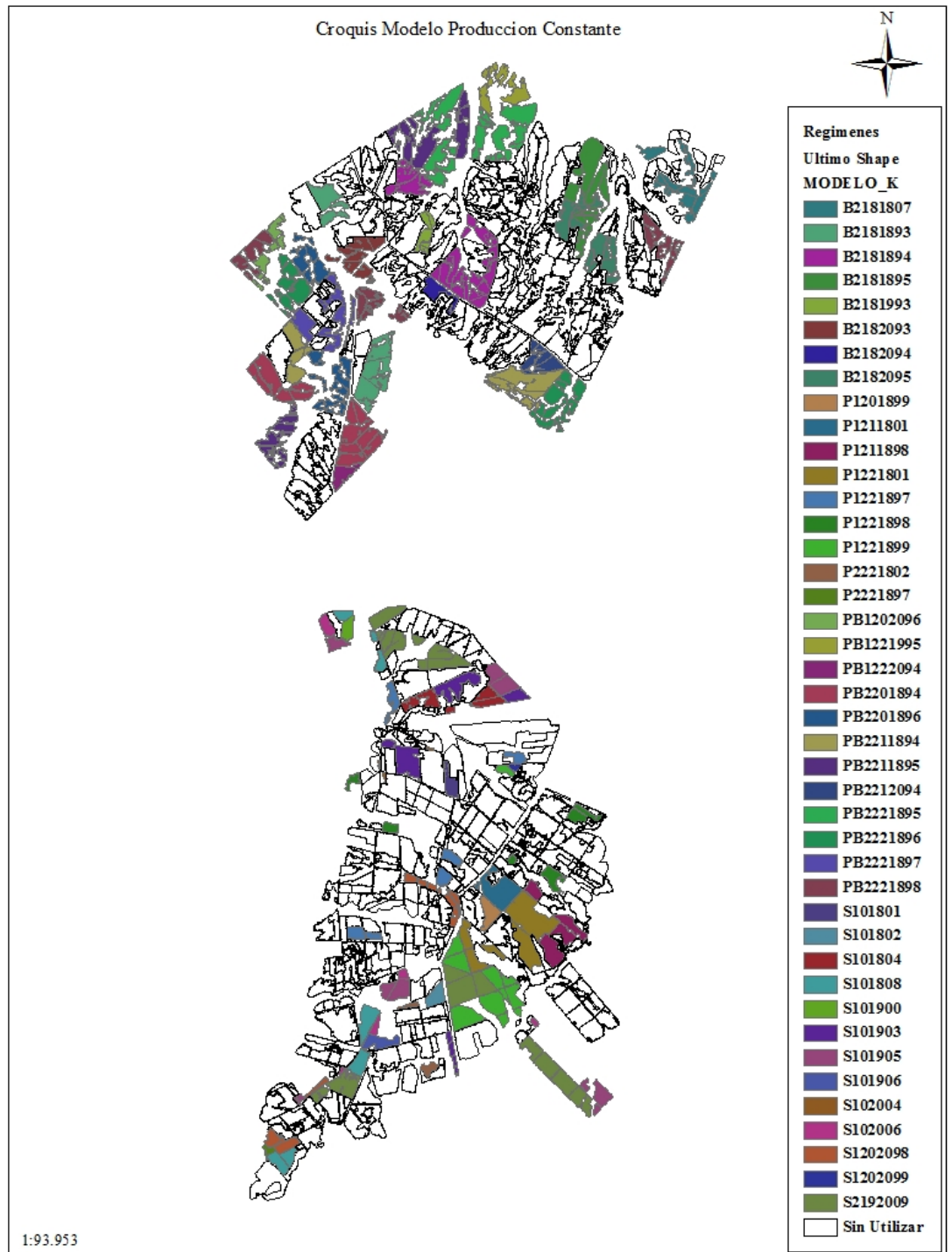
Tabla No. 17. Regímenes seleccionados para el modelo de producción constante.

Regímenes seleccionados	Superficie (ha)	Regímenes seleccionados	Superficie (ha)
B40	97,17	P180	51,18
B41	127,76	P182	48,03
B42	85,08	P183	43,91
B44	54,00	P184	15,59
B53	9,49	P186	104,42
B66	38,12	P188	36,69
B67	10,37	P189	107,68
B68	66,47	P243	33,89
S10	9,10	P285	2,88
S11	12,69	P289	6,88
S12	0,03	P315	1,21
S13	31,38	P327	8,93
S15	0,02	P328	125,63
S17	64,76	P329	92,48
S43	9,75	P332	108,47
S46	74,44	P333	136,90
S48	74,54	P334	92,67
S49	15,44	P336	93,77
S81	7,86	P339	57,00
S83	20,77	P342	92,49
S101	42,59	P419	28,49
S102	2,86		
S118	125,27		
S150	67,36		
TOTAL PINUS		1.289,17	
TOTAL EUCALYPTUS		1.047,30	
TOTAL		2.336,47	

En esta tabla se puede ver como existen regímenes a los cuales se les cosechan 0,02 hectáreas, como el S15, a diferencia de otros regímenes a los que se les cosechan más de 100 hectáreas, caso del B41.

Este modelo cosecha 1.289 hectáreas de *Pinus sp.* durante la rotación, representando el 38% del total de superficie ocupada por la especie.

Mapa No. 3. Utilización de las plantaciones, bajo el régimen de manejo con el modelo de producción constante.



Este modelo utiliza el 44.09% del total de la superficie disponible, lo que da un total de 2.336 hectáreas utilizadas.

4.2.4 Modelo desvío de producción

Este modelo se generó con la finalidad de elaborar un plan de manejo que diera como resultado una oferta de madera similar a la consumida por aserradero. Para ello se acotó la producción de madera a un determinado rango de volúmenes posibles de ser obtenidos en cada período

Este modelo consta de 720 variables y 100 restricciones. Del total de los regímenes pasibles de ser utilizados, se seleccionaron 39 para obtener la solución óptima. Así mismo, del total del área disponible, no se utilizaron 1.057 hectáreas.

Considerando las restricciones de área, se detectó que las plantaciones de *Pinus sp.*, tuvieron una mayor influencia en la limitación del crecimiento de la FO que las plantaciones de *Eucalyptus sp.*. Más precisamente, se vio que el valor del precio sombra de las plantaciones PB95 a PB98 instaladas en Bacacué, superaba los 6.000 dólares, en contraposición con las restantes plantaciones.

Tabla No. 18. Regímenes seleccionados correspondientes a los *Eucalyptus sp.* del modelo desvíos de producción.

Los mcs cosechados corresponden a madera con destino aserrado. La densidad de plantación inicial es de 1.100 árboles/ha. El primer raleo se realiza a los 9 años y el segundo a los 12 años. Posteriormente se realiza la cosecha.													
Regímenes	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad cosecha. Inicial (años)	Vol. cosecha do (mcs)	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad Tala Rasa (años)	Vol. cosecha do (mcs)	No. ár/ha cosechados
B40	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	18	148	275
B41	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	18	148	275
B42	---	---	---	---	18	186	52	550	64	275	18	148	275
B44	52	550	64	275	18	148	---	---	---	---	---	---	---
B45	---	---	---	---	19	196	52	550	64	275	18	148	275
S11	35	451	31	195	18	166	35	451	---	---	---	---	---
S12	35	451	31	195	18	166	35	451	---	---	---	---	---
S44	---	---	31	195	19	180	35	451	---	---	---	---	---
S46	35	451	31	195	19	180	35	451	---	---	---	---	---
S52	35	451	31	195	19	180	35	451	---	---	---	---	---
S77	---	---	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S81	35	451	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S82	35	451	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S83	35	451	31	195	20	195	35	451	---	---	---	---	---
S101	---	---	---	---	20	195	35	451	31	195	20	195	454
S102	---	---	---	---	20	195	35	451	31	195	20	195	454
S181	43	550	47	550	20	167	43	550	---	---	---	---	---
S201	---	---	---	---	20	195	35	451	31	195	18	166	454

Tabla No. 19. Regímenes seleccionados correspondientes a los *Pinus sp.* del modelo desvíos de producción.

Los mcs cosechados corresponden a madera con destino aserrado. La densidad de plantación inicial es de 1.100 árboles/ha. El primer raleo se realiza a los 9 años y el segundo a los 12 años. Posteriormente se realiza la cosecha.													
Regímenes	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad cosecha. Inicial (años)	Vol. cosecha do (mcs)	Vol. 1er. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Vol. 2do. Raleo (mcs)	No. ár/ha raleados	Edad Tala Rasa (años)	Vol. cosechado (mcs)	No. ár/ha cosecha dos
P80	---	---	---	---	22	226	35	451	31	195	20	195	454
P181	14	---	---	---	20	123	35	451	31	195	18	166	454
P304	---	---	---	---	20	204	43	550	47	550	18	138	454
P312	14	---	---	---	22	144	43	550	47	550	18	138	454
P317	14	---	---	---	21	133	43	550	47	550	---	---	---
P318	14	---	---	---	22	144	43	550	47	550	---	---	---
P319	14	---	---	---	20	123	43	550	47	550	---	---	---
P323	14	---	---	---	21	133	43	550	47	550	---	---	---
P324	14	---	---	---	22	144	43	550	47	550	18	138	454
P327	14	---	---	---	22	144	43	550	47	550	---	---	---
P328	---	---	---	---	20	204	52	550	64	275	18	148	275
P329	---	---	---	---	21	215	52	550	64	275	18	148	275
P330	---	---	---	---	22	226	52	550	64	275	18	148	275
P333	14	---	---	---	22	144	52	550	64	275	18	148	275
P336	14	---	---	---	22	144	52	550	64	275	18	148	275
P338	14	---	---	---	21	133	52	550	64	275	18	148	275
P340	14	---	---	---	20	123	52	550	64	275	18	148	275
P349	---	---	---	---	20	204	43	550	47	275	19	152	275
P388	---	---	---	---	20	204	43	550	47	275	20	167	275
P391	---	---	---	---	20	204	43	550	47	275	20	167	275
P405	14	---	---	---	22	144	43	550	47	550	---	---	---

Tabla No. 20. Modelo desvío de producción.

Período de Planificación	Volumen (mcs)	Superficie (ha)
2011	79.999	717
2012	79.999	663
2013	79.999	551
2014	80.000	634
2015	80.000	577
2016	80.001	428
2017	64.515	655
2018	71.526	699
2019	30.000	257
2020	29.999	501
2021	30.000	617
2022	30.000	460
2023	62.981	892
2024	50.103	780
2025	62.081	857
2026	48.408	770
2027	43.899	794
2028	78.159	808
2029	80.000	795
2030	71.112	777
2031	64.657	633
2032	80.001	616
2033	52.983	394
2034	53.063	427
2035	63.237	534
2036	61.503	414
TOTAL	1.608.226	16.252

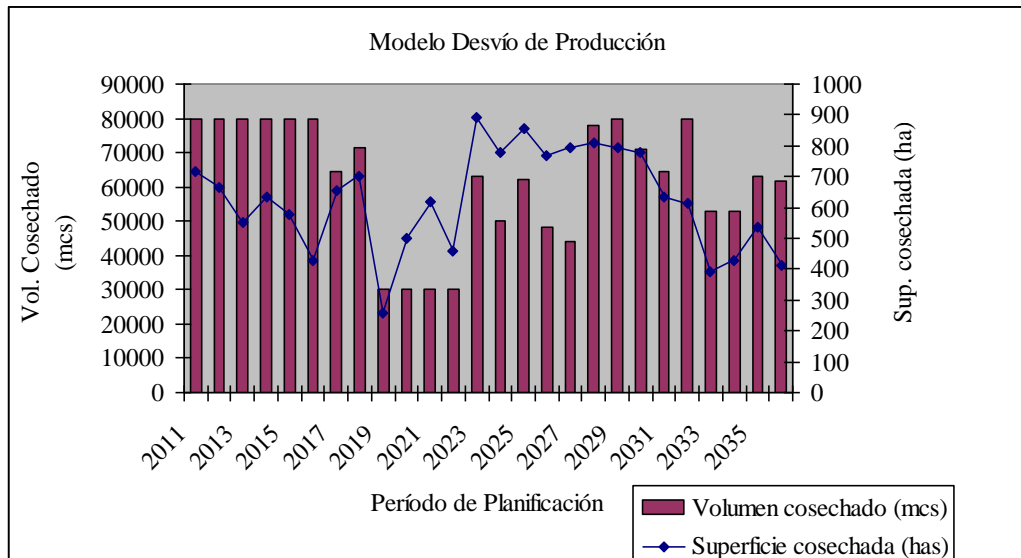
Si bien este modelo cumple con las restricciones establecidas, al igual que en el Modelo Libre, en éste se generan unas caídas importantes de oferta de madera durante el período 2019-22, al tiempo que para lograr obtener un mínimo de 30.000 mcs cosechados, la superficie cosechada anualmente, desde 2020 al 2022, es el doble o más que el 2019.

Tabla No. 21. Discriminación del volumen cosechado, según las especies cosechadas en el modelo desvíos de producción.

Período Planificación	Volumen total (mcs)	Volumen (mcs) por especie	
		Pino	Eucalyptus
2011	79.999	7.118	72.881
2012	79.999	20.158	59.841
2013	79.999	40.756	39.243
2014	80.000	76.960	3.040
2015	80.000	76.384	3.616
2016	80.001	75.940	4.061
2017	64.515	45.740	18.775
2018	71.526	54.793	16.733
2019	30.000	25.978	4.022
2020	29.999	309	29.690
2021	30.000	0	30.000
2022	30.000	2.349	27.651
2023	62.981	1.292	61.689
2024	50.103	0	50.103
2025	62.081	0	62.081
2026	48.408	0	48.408
2027	43.899	0	43.899
2028	78.159	0	78.159
2029	80.000	0	80.000
2030	71.112	0	71.112
2031	64.657	0	64.657
2032	80.001	0	80.001
2033	52.983	0	52.983
2034	53.063	0	53.063
2035	63.237	0	63.237
2036	61.503	0	61.503
TOTAL	1.608.226	427.777	1.180.449

A partir del 2024 el abastecimiento de madera al aserradero, proviene de plantaciones de *Eucalyptus sp.* exclusivamente, habiendo terminado con las plantaciones de *Pinus sp.* para lo regímenes seleccionados del modelo. Sin embargo, quedan plantaciones de esta especie que no fueron tenidas en cuenta por el programa.

Gráfico No. 7. Modelo desvío de producción.



Esta gráfica muestra lo mismo que se vio anteriormente, la caída en los metros cúbicos disponibles durante los años 2019 al 2022. Se observa, así mismo, como durante el período que va desde el 2019 al 2027, el gráfico correspondiente a la superficie cosechada esta por encima del gráfico de volumen cosechado. En cambio durante los períodos 2011-18 y 2028-36, la superficie cosechada tiene un mayor rendimiento por metro cuadrado que lo que ocurre en el centro de la rotación.

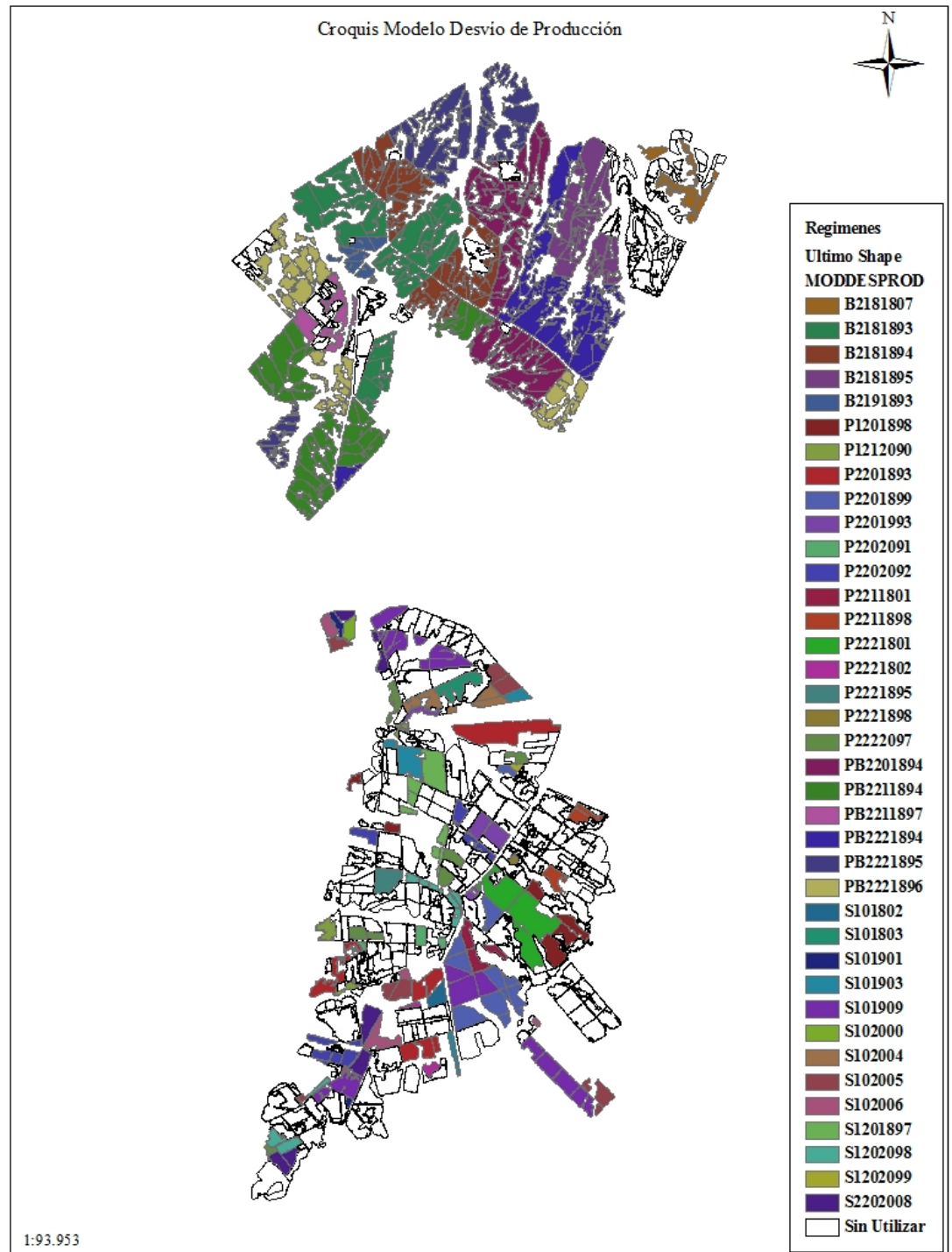
Al igual que en los modelos previamente analizados, en este modelo se observa que durante el período que transcurre entre 2019-2022 si bien se logra cumplir con el requisito mínimo de 30.000 mcs cosechados anualmente, se observa en este período, que la cantidad de madera aportada por el modelo es 2,5 veces menor que la cantidad de madera consumida actualmente por la industria, lo que estaría suponiendo un déficit de abastecimiento bajo las condiciones actuales de consumo por parte de la industria. Esto demuestra que el desvío mínimo impuesto como restricción está muy por debajo de lo que se precisa procesar anualmente. Sin embargo, a través de pruebas realizadas al modelo en el programa, de haber elevado este nivel, la solución no hubiera sido la óptima, debiendo optar por bajar el nivel mínimo para obtener dicha solución.

Tabla No. 22. Regímenes seleccionados para el modelo desvío de producción.

Regímenes seleccionados	Superficie (ha)	Regímenes seleccionados	Superficie (ha)
B40	389,47	P304	149,22
B41	261,00	P312	22,16
B42	202,00	P317	27,25
B44	54,00	P318	2,14
B45	42,53	P319	120,01
S11	12,69	P323	17,55
S12	25,64	P324	126,82
S44	9,10	P327	8,93
S46	48,83	P328	362,67
S52	205,97	P329	346,03
S77	9,75	P330	335,13
S81	39,24	P333	279,26
S82	74,54	P336	193,32
S83	36,23	P338	57,00
S101	42,59	P340	92,49
S102	2,86	P349	42,00
S181	64,76	P388	13,22
S201	70,00	P391	60,86
P80	21,48	P405	52,39
P181	62,55		
TOTAL PINUS		2.392,47	
TOTAL EUCALYPTUS		1.591,19	
TOTAL		3.983,66	

Del total de 3.320 hectáreas de *Pinus sp.* con las que cuenta la empresa, el modelo sustituyó el 72% por *Eucalyptus sp.*. Este modelo junto al modelo Libre, son los que logran las mayores superficies de *Pinus sp.* cosechados. Mientras que el modelo Libre cosechó un total de 2.866,21 hectáreas, el modelo Desvíos de Producción cosechó 2.392,47 hectáreas.

Mapa No. 4. Utilización de las plantaciones disponibles, bajo el régimen modelo desvíos de producción.



Este modelo utiliza 3.984 hectáreas del total aprovechable, lo que representa un 75.20%. Esta alternativa de manejo, es la que más se asemeja al Modelo Libre, con la ventaja de que se tiene una mayor idea del real potencial de madera aprovechable en cada período, dado que se establece un rango de madera que se desea obtener.

4.3 ANALISIS DE LA SUPERFICIE APROVECHADA Y LOS VOLÚMENES OBTENIDOS EN LO CUATRO MODELOS

Tabla No. 23. Comparación entre los cuatro modelos, según el porcentaje de utilización de la tierra.

	Superficie (has)	Utilización
TOTAL	5.298	100,00%
Modelo Libre	4.557	86,01%
Modelo 200_260	1.458	27,52%
Modelo Constante	2.336	44,09%
Modelo Desvío de Producción	3.984	75,20%

En la tabla se puede apreciar como los Modelos 200_260 y Constante hacen una subutilización de las plantaciones, dejando más de la mitad del área ocupada por plantaciones intacta, si bien las soluciones de ambos modelos fueron óptimas. En cambio los Modelos Libre y Desvíos de Producción hacen un mejor aprovechamiento de las plantaciones, y eso se vio reflejado en los valores de las funciones objetivo, siendo estos dos últimos modelos, los que alcanzaron los mayores valores de dicha función.

Tabla No. 24. Análisis del total del volumen cosechado y superficie total utilizada, durante el período de planificación.

TOTAL PERÍODO DE PLANIFICACIÓN	Volumen (mcs)	Superficie (ha)
Modelo Libre	1.884.744	18.630
200_260	603.490	6.053
Constante	817.985	9.701
Desvíos de Producción	1.608.226	16.252

Los valores observados, representan el total acumulado durante todo el período de planificación. A partir de la tabla se puede observar lo que se viene dando desde los resultados con respecto a los cuatros modelos. Se ve como los Modelos Libre y Desvíos de Producción tienen los mayores niveles de volúmenes producidos durante todo el período de planificación, así como también representan los modelos que aprovechan más superficie, a diferencia de los otros dos modelos. Esto implica mayores valores en las funciones objetivos, que se verán más adelante.

Tabla No. 25. Análisis comparativo entre los diferentes modelos según el rendimiento y superficie utilizada en cada período.

Período Planificación	Libre		200_260		Desvío de Producción		Constante	
	Cosecha (mcs)	Sup. (has)	Cosecha (mcs)	Sup. (has)	Cosecha (mcs)	Sup. (has)	Cosecha (mcs)	Sup. (has)
2011	99999	804	37712	260	79999	717	31461	437
2012	99999	763	39083	260	79999	663	31461	416
2013	99999	649	32873	260	79999	551	31461	309
2014	99999	743	23368	200	80000	634	31461	397
2015	100000	669	27954	200	80000	577	31461	352
2016	100001	517	28198	200	80001	428	31461	304
2017	70954	707	17072	200	64515	655	31462	454
2018	76835	731	22678	200	71526	699	31461	374
2019	18214	174	24299	200	30000	257	31460	249
2020	29289	565	14138	200	29999	501	31461	359
2021	34688	701	14273	202	30000	617	31461	435
2022	25547	504	21518	228	30000	460	31460	294
2023	88799	1180	14425	260	62981	892	31460	378
2024	60469	972	13949	260	50103	780	31460	350
2025	69592	1043	17706	266	62081	857	31460	432
2026	57153	931	20115	260	48408	770	31460	382
2027	50992	919	15031	260	43899	794	31461	383
2028	49723	662	15006	260	78159	808	31461	473
2029	100000	928	25105	260	80000	795	31461	417
2030	78534	840	21371	260	71112	777	31461	378
2031	100002	767	13768	260	64657	633	31462	442
2032	100002	813	36851	260	80001	616	31462	380
2033	69423	503	30827	237	52983	394	31462	355
2034	37517	310	22129	200	53063	427	31461	253

2035	92665	740	26547	200	63237	534	31462	359
2036	74349	496	27494	200	61503	414	31461	340
Promedio	72490	717	23211	233	61855	625	31461	373

A partir de la tabla anterior se puede decir que el Modelo Libre es el que más se ajusta a las necesidades actuales de la empresa, si bien existe un período de años donde la oferta de madera es aproximadamente la mitad de lo necesario. A este modelo le sigue, en términos de volumen promedio el Modelo de Desvíos de Producción. Los otros dos modelos están muy por debajo del volumen requerido.

Se considera que se debería seguir trabajando sobre los modelos Libre y Desvíos de Producción, para lograr hacer más precisa la FO, tratando de lograr alcanzar las metas deseadas. Para ello es imprescindible dedicarle más tiempo a los regímenes, tratándolos de manera individual.

4.4 ANÁLISIS DE LA SUSTITUCIÓN DE LA ESPECIE *PINUS SP*

Tabla No. 26. Sustitución de *Pinus sp.*

Superficie Total ocupada por <i>Pinus sp.</i>	Hectáreas	%
	3.320	100
Sustitución de la especie <i>Pinus sp.</i> por <i>Eucalyptus sp.</i>		
Modelo Libre	2.866	86,3
Modelo 200_260	1.174	35,4
Modelo Constante	1.289	38,8
Modelo Desvíos de Producción	2.392	75,2

En esta tabla se puede observar en cuanto se logró el objetivo deseado de sustituir al *Pinus sp.* por *Eucalyptus sp.*. Si bien no se logra la sustitución total de la especie, se ve que los modelo Libre y Desvíos de Producción alcanzan valores interesantes de cosecha de *Pinus sp.*. Consecuentemente se puede establecer que, realizando un ajuste a estos modelos, se podría llegar a la sustitución total en el largo de la rotación estipulada.

5. DISCUSIÓN

Es necesario recordar y aclarar que durante el procedimiento matemático del método Simplex y sus iteraciones, el sistema busca encontrar aquella combinación de recursos, en este caso regímenes, que permitan encontrar la solución óptima del problema. Esto no implica que siempre se deban elegir los regímenes con mayor valor presente líquido.

5.1 ANALISIS DE LOS VALORES DE LAS FUNCIONES OBJETIVOS

Tabla No. 27. Valores de las cuatro funciones objetivos de los modelos.

	Modelo Libre	Modelo 200_260	Modelo Producción Constante	Modelo Desvíos de Producción
Valor de la FO (U\$S)	27.576.170	8.951.564	11.380.860	24.210.970

A medida que el modelo se va acotando con más restricciones, disminuyendo el número de soluciones óptimas, es esperable que el valor de la FO vaya disminuyendo. Como se puede observar en la tabla comparativa entre los diferentes modelos, el modelo que restringe el área más fuertemente, Modelo 200_260, fue el que dio el valor más bajo de FO. En contraposición, el Modelo Libre, permitió obtener el mayor valor de la FO ya que, como su nombre lo indica, la función objetivo no estuvo fuertemente limitada, excepto por el volumen máximo al cual se deseaba llegar.

El Modelo de Producción Constante es el segundo modelo que da el valor más bajo de FO, ya que sus restricciones obligan al modelo a obtener una oferta de madera constante en el tiempo, siendo poco flexibles con el mismo. Esto está relacionado con el hecho de que existe, en los cuatro modelos, una caída de oferta de madera en el período 2019-22, llegando a valores mínimos de 30.000 mcs aproximadamente. Como resultado y para obtener oferta constante, el programa tuvo que disminuir la cosecha de madera de los restantes períodos al menor nivel de volumen posible de cosechar. Esto implicó que el abastecimiento de madera cayera más de la mitad de lo que consume

anualmente el aserradero, lo que condujo a una disminución en el valor de la FO como puede ser apreciado en la tabla.

Para el caso del Modelo de Desvíos de Producción, se estableció un rango de volumen deseado anualmente. Este modelo es el que más se acerca el Modelo Libre ya que hay madera disponible para ser cosechada. Sin embargo, no se llega a los valores del Modelo Libre porque este modelo tiene un techo de producción de 80.000 mcs anual, en contraposición con el Modelo Libre que tiene un techo de 100.000 mcs anuales.

Tomando en cuenta los valores de los cuatro modelos, se optaría por realizar el manejo establecido en el Modelo Libre, seguido por el de Desvío de Producción, Producción Constante y por último se optaría por el Modelo 200_260. Sin embargo, y dependiendo de lo objetivos buscados, el Modelo Libre no es el que más se adecua a las necesidades de una industria como el aserradero. Por un lado, permite estimar la mayor cantidad de madera que se puede obtener de las plantaciones anualmente, lo que representa una ventaja cuando se desea calcular el potencial de producción de las plantaciones integrando la capacidad de consumo de la industria. Por otro lado, este tipo de modelos no permite generar una planificación que conduzca a una extracción de madera constante en el tiempo. Para lograr este objetivo es necesario restringir al modelo, como fuera realizado en el modelo 200_260.

Si bien la cantidad de madera a extraer está en función del consumo de la industria, a partir de restringir las hectáreas a ser cosechadas anualmente se tiene idea de la maquinaria y personal que se va a necesitar para dicha tarea a la hora de planificar. No obstante ello, hablando en términos productivos, es preferible ajustar los modelos en función del volumen deseado, ya que no todos los suelos permiten los mismos crecimientos a los árboles. Por este motivo, y en función de la demanda de la industria el modelo Desvíos de Producción se ajusta más a las necesidades de la empresa que el modelo 200_260.

Se debe aclarar que este retorno económico por la inversión realizada se obtiene durante toda la planificación, por lo que para estimar el valor obtenido anualmente, al valor de la FO habría que dividirlo por el largo de la rotación, en este caso 26 años.

5.2 LA META DE PRODUCCIÓN QUE IMPLICA OBTENER 100.000 MCS POR AÑO, ¿ES SUSTENTABLE CON LA ESTRUCTURA ACTUAL?

Tomando como referencia el modelo Libre, al cual se le pidió una maximización en la FO, con un techo de producción de 100.000 mcs anuales, se pudo observar que, tal cual se presentan los regímenes, no es posible obtener esta cantidad de madera anualmente.

Para lograr este objetivo es necesario tratar de manera independiente a cada plantación, con la finalidad de determinar el esquema productivo que permita obtener la mayor cantidad de madera posible de cada plantación, durante el período de planificación. Sin embargo, teniendo en cuenta que son 720 regímenes a manejar, es recomendable tratar de juntar aquellas plantaciones que sean homogéneas en cuanto a especie, ubicación y edad, buscando disminuir el número de regímenes, para facilitar el trabajo y evitar errores.

5.3 ¿ES POSIBLE OBTENER 60.000 MCS ANUALES, CON LOS DESVÍOS PERMITIDOS?

Considerando el modelo de Desvíos de Producción, se ve que se puede llegar fácilmente a producir 60.000 mcs anuales. No obstante ello, hay que tener en cuenta los períodos en que la oferta de madera llega a niveles tan bajos como 30.000 mcs anuales. Para salvar este inconveniente es necesario reestructurar algunos regímenes de manera tal que, aquellos años donde el volumen cosechado es muy superior a los 60.000 mcs, tal es el caso de los primeros 6 años del período de planificación, no se coseche toda esa madera. De este modo, se guarda madera para esos años donde el volumen aportado por las plantaciones no alcanzaba para abastecer al aserradero.

5.4 ¿POR QUÉ SE UTILIZAN MÁS PLANTACIONES DEL SUR QUE DE BACACUÁ, EXCEPTO EN EL MODELO LIBRE?

Para responder esta pregunta, es necesario tener en cuenta el paso previo a la formulación de los modelos, la funciones de crecimiento. Observando dichas funciones, y comparando edades similares, se puede ver

como aquellas plantaciones correspondientes a Bacacué tienen mayores crecimientos que las plantaciones del Sur.

Para poder compensar la falta de crecimiento con los objetivos buscados, es lógico que se tenga que utilizar más hectáreas de plantaciones, para obtener los volúmenes de madera deseados, que es lo que sucede en el Sur. A medida que uno le exige más al modelo, o sea más restricciones, haciendo un modelo menos flexible, el programa debe seleccionar aquellos regímenes que aporten más en todos los sentidos. Teniendo en cuenta que las plantaciones de Bacacué tienen mejores crecimientos, es lógico pensar que se utilicen regímenes que den más beneficio en aquellos modelos menos flexibles.

Así mismo se debe tener presente que hay más plantaciones en el Sur que en Bacacué. Por otro lado, Bacacué cuenta con plantaciones, tanto de *Pinus sp.* como de *Eucalyptus sp.*, más jóvenes que el Sur, siendo plantaciones que no están disponibles para ser cosechadas aún.

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo demostró que la Programación Lineal, aplicada al rubro forestal, es una herramienta fundamental en la toma de decisiones y en el análisis de situaciones en las cuales se maneja gran cantidad de información. En una empresa forestal de mediana a gran envergadura esta herramienta ayuda a elaborar los planes estratégicos de la misma, permitiendo realizar ajustes periódicos de los objetivos de manera sencilla. Quedó evidenciada la capacidad que tiene esta herramienta en manejar y procesar un volumen de información importante, el cual considera tanto aspectos técnicos, económicos como productivos, obteniendo resultados óptimos según los requisitos establecidos. Esto demuestra el potencial de la herramienta, ya que establecer objetivos de diverso índole, como mantener un cierto nivel de empleo o metas ambientales entre otras, constituye parte de la planificación forestal moderna.

Por otro lado, esta técnica permite la simplificación en el análisis de los datos, producto de la manera en que se presenta el resultado del modelo. Procesando estos datos y, obteniendo gráficos y tablas, se logra una mayor comprensión del problema analizado. Esto es importante cuando se comparan diferentes regímenes así como planificaciones. Así mismo, la estructura de los resultados permite encontrar los problemas, a través de sus respectivos coeficientes, que pueda tener el sistema, identificando aquellos regímenes que estén generando estos conflictos. Esto se logra a través del estudio de los valores del precio sombra, el slack or surplus, y el reduced cost.

Desde el punto de vista de la optimización, esta herramienta presenta varias ventajas. Una de ellas es el aspecto de utilizar eficientemente los recursos con los cuales cuenta la empresa para producir, evitando un gasto innecesario de los mismos. Por otro lado se logran soluciones objetivas y óptimas, libre de toda influencia que pueda existir por determinados decisores. No obstante ello, se pueden incluir las preferencias de los decisores a través de técnicas avanzadas como la programación compromiso.

Considerando a la Programación Lineal como herramienta para la planificación, ésta puede ser aplicada en cualquier etapa en el proceso productivo de la cadena forestal, desde que se planta el monte, hasta la etapa de comercialización de la madera, y tanto a nivel operativo, táctico como estratégico.

Así mismo, esta herramienta permite simplificar la planificación a dos niveles, el macro y el micro. En el primer caso, se pueden generar los pasos a seguir por una empresa que busca determinados objetivos, elaborando una planificación estratégica. A nivel micro, esta técnica permite evaluar un modelo a nivel interno, y detectar posibles errores en el sistema. La simplificación está dada por el hecho de que, una vez formulado el modelo, en caso de existir modificaciones en los regímenes, restricciones u objetivos que se deseen realizar en las matrices, se hace más fácil el proceso de sustitución. Posteriormente se vuelve a correr el modelo, obteniendo nuevos resultados. Esta ventaja permite evaluar diferentes escenarios, o sea planificaciones, en un tiempo muy reducido. Este trabajo es un ejemplo de ello, en donde se evaluaron cuatro situaciones distintas.

Sin embargo, todas estas ventajas antes mencionadas son en vano si no se tiene información precisa. La confiabilidad y precisión de los datos, constituyen el punto de partida para la generación de un modelo eficiente y viable. Por lo tanto, es imprescindible que se cuente con información lo más acercada a la realidad de todos los componentes del sistema tales como, datos de inventario, precios y costos de producción, así como información anexa que pueda ayudar en la elaboración del modelo.

Con los modelos planteados, se observó que no se pudo sustituir totalmente las plantaciones de *Pinus sp.*, ya que el programa seleccionaba plantaciones más jóvenes de esta especie, dejando intactas las plantaciones más viejas. Sin embargo, también se observó que a partir del año 2024 aproximadamente, las plantaciones de *Pinus sp.* seleccionadas en sus respectivos regímenes, para todos los modelos, no abastecieron más al aserradero. Consecuentemente un porcentaje de estas plantaciones fueron efectivamente sustituidas por plantaciones de *Eucalyptus sp.*

Paralelamente, se observó que los modelos Libre y Desvíos de Producción lograron altos porcentajes de sustitución de *Pinus sp.*, lo que deja una puerta abierta a seguir trabajando con estos modelos para lograr este objetivo de manera completa. Probablemente se deba trabajar con algunos regímenes para que sean utilizados por el programa y se logre el objetivo en el tiempo deseado.

Por último, se plantea la necesidad de elegir un único modelo y seguir trabajando con él hasta hacerlo lo más preciso posible. Esta recomendación se

da por el hecho que son 720 regímenes que habría que analizar individualmente, los cuales tienen una gran variabilidad entre ellos, tanto en edad como en superficie, haciendo engorrosa el análisis de los mismos. Se recomienda trabajar con el Modelo Libre, pues es el que da los valores de volúmenes mayores, así como el valor más alto de la FO.

7. RESUMEN

La generación de múltiples productos a partir de plantaciones forestales comerciales en el Uruguay, se asocia con la calidad del manejo silvícola y su posterior transformación en la industria, condicionada por nuevos conceptos sociales, ambientales y productivos. Con el objetivo de lograr cumplir con estas nuevas demandas, surge la necesidad de emplear técnicas integradoras y optimizadoras que sean soporte y herramienta en la toma de decisiones. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el potencial de aplicación de la Investigación Operativa en una industria forestal nacional, integrada verticalmente. Se trabajó en un predio de la empresa la cual cuenta con plantaciones de *Pinus sp.* y *Eucalyptus sp.*, con una superficie de 5.300 ha, las cuales abastecen al aserradero ubicado en el mismo predio. Se obtuvieron funciones de crecimiento para *Pinus sp.* y *Eucalyptus sp.*, las cuales permitieron proyectar volumen por especie en 347 estratos disponibles en el horizonte de planificación. Se generaron 720 regímenes silviculturales los cuales constituyeron un modelo matemático cuya Función Objetivo (FO) buscó maximizar los beneficios en un horizonte de planificación de 26 años. Se generaron entre 100 y 126 restricciones relacionadas con el control de volumen y superficie. A partir de un modelo base, denominado Modelo Libre (ML), se modelaron variantes del mismo obteniendo en total tres modelos más: Modelo 200_260 (M200_260), Modelo de Producción Constante (MPC) y Modelo con Desvíos de Producción (MDP). Los modelos ML y MDP son los que generan los mayores valores de FO, 27.576.170 y 24.210.970 USD, respectivamente, así como mayores volúmenes de abastecimiento de madera a la industria, en tanto que el M200_260 genera los menores ingresos durante el período de planificación, 8.951.564 USD. Así mismo, los modelos ML y MDP emplean mayor superficie en producción con una utilización del 86 % y 75%, respectivamente. El ML, logra un promedio de abastecimiento anual de 72.500 metros cúbicos sólidos (mcs), con un coeficiente de variación (CV) del 38%, en tanto que el MDP presenta un promedio de abastecimiento de 61.800 mcs con un CV menor del 29%. Una característica común a los cuatro modelos es que los regímenes de *Pinus sp.* son incluidos en la solución los primeros 13 años de la planificación, posteriormente no son seleccionados por el programa. Como consecuencia no se logra sustituir las plantaciones de *Pinus sp.* de manera completa. Sin embargo, el ML cosecha 2.866 hectáreas, de las 3.320 ocupadas por esta especie, lo que representa el 86%. Cabe destacar el hecho de que en todos los modelos, se cosechan los rodales más jóvenes de esta especie, en tanto en las plantaciones más viejas, de 30 años o mayor edad, no son tenidas en cuenta para las soluciones. Se observa que en la matriz de oferta de madera de todos los modelos, se generan períodos de déficit de madera, como materia prima, la cual habría que complementar con compras fuera de la empresa o

generar una mayor flexibilidad de los regímenes incluidos, lo que permitiría una mejor distribución del abastecimiento de madera en el tiempo. La Investigación Operativa, aplicada a la toma de decisiones y planificación forestal, es una herramienta que debe ser tenida en cuenta por aquellas empresas que deseen planificar y optimizar el uso de sus recursos. Así mismo, se debe seguir generando conocimiento académico nacional en esta área, dado el gran potencial que la misma tiene para la gestión de recursos escasos.

Palabras clave: Investigación operativa; Programación lineal;
Planificación estratégica.

8. SUMMARY

The generation of multiple products from commercial forestry plantations in Uruguay, is associated with the quality of forest management and its subsequent transformation in the industry, rueleed by new social, environmental and productive concepts. With the goal of meeting these new demands, arrouses the need to employ integrating and optimizers techniques that are background and tools for making decisions. The aim of this study was to evaluate the potential applicability of Operational Research at a national forest industry, vertically integrated The worked was held on a company that has *Pinus sp.* and *Eucalyptus sp.* plantations, with an approximate area of 5,300 hectares, which supplies the sawmill of the same company. Growth functions were obtained for *Pinus sp.* and *Eucalyptus sp.*, which allowed us to project volume by species in 347 available stands on the planning horizon. 720 silvicultural regimes were generated which provided a mathematical model whose Objective Function (OF) seeks to maximize profits in a planning horizon of 26 years. Between 100 and 126 restrictions were generated related to volume and surface control. From a basic model model, called Modelo Libre (ML), we formulated variations of the same, resulting in three more models: Model 200_260 (M200_260), Constant Production Model (CPM) and Deviation in Production Model (MDP). ML and MDP models are the ones that produce the highest values of OF, 27.576.170 y 24.210.970 USD, respectevly, and wood supply to industry as well, whereas M200_260 generates the lowest income during the planification, 8.951.564 USD . Moreover, the ML and MDP models were the ones that used more planted area with a capacity utilization of 86% and 75% , respectively. The ML, had an average annual supply of 72,500 cubic meters solid (cms), with a coefficient of variation (CV) of 38% while the MDP has an average yield of 61,800 mcs with a lower CV , 29%. A common feature of the four models is that the regimes of *Pinus sp.* were selected during the first 13 years of the planification, afterwards they are not selected for the program. Consequently, is not possible to substitute *Pinus sp.* for *Eucalyptus sp.*, considering it was one of our objectives. However, ML did clearcut 2.866 hectares, from an overall of 3.320 that were occupied by this species, which represents the 86% of the total. It should be noted that, in all four models, only the young plantations of *Pinus sp.* were selected for clearcut, leaving old stands, those of 30 years or older, out of the solutions. It was noted that in the timber supply matrix, in all four models, there is a wood deficit in some periods, which will have to be overcome by purchasing wood outside the company or generate more flexibility in the schemes included, allowing a better distribution of the supply of wood over time. Operations Research applied to the decision-making and forest planning is a tool that should be taken into consideration by those companies who wish to plan and optimize the use of their resources.

Furhtermore, national academic knowledge in this area should continue its development, given the great potential it has for the management of scarce resources.

Keywords: Operative research; Linear programming; Strategic planification.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. ARBELETCHE, P. 2009. Decisiones financieras. In: Alvarez, J.; Falcao, O. eds. Manual de gestión de empresas agropecuarias. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 117-144.
2. ARCE, J, E. mayo del 2000. Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte. Tesis de Doctorado en Ciencias Forestales. Curitiba, Brasil. Universidade Federal do Paraná. 125 p.
3. _____.; CELSO, C.; SANQUETTE, C, R.; FILHO, A, F. 2001. A forest-level bucking optimization system that considers customer's demand and transportation costs. Forest Science. 48 (3): 492-503.
4. BASKENT, E. Z.; KELES, S. 2005. Developing alternative wood harvesting strategies with linear programming in preparing forest management plans. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 30: 67-79.
5. BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. 2009. Forest management and planning. San Diego, Elsevier. 342 p.
6. BOSQUE SENDRA, J. 1997. Sistemas de información geográfica. 2ª ed. Madrid, Rialp. 451 p.
7. CAJA DE JUBILACIONES Y PENSIONES BANCARIAS (CJPB). 2010. Página inicial. (en línea). Montevideo. Consultado 13 ago. 2010. Disponible en <http://www.forestalbancaria.com.uy/>
8. CHIANG, A. 1987. Métodos fundamentales de economía matemática. 3ª ed. Santiago de Chile, McGraw-Hill. 805 p.
9. COTTLE, R. W. 2006. George B. Dantzig; a legendary life in mathematical programming. Mathematical Programming. Ser A 105: 1-8.
10. DANTZIG, G. B. 1998. Linear programming and extensions. 11th. ed. New Jersey, Princeton University Press. 627 p.
11. DAVIS, L. S.; JOHNSON, K, N. 1987. Forest management. 3rd. ed. New York, McGraw-Hill. 790 p.
12. _____.; _____.; BETTINGER, P. S.; HOWARD. T. E. 2001. Forest management; to sustain ecological, economic, and social values. 4th. ed. New York, McGraw-Hill. 804 p.
13. DIAZ BALTEIRO, L. 1997. Turno forestal económicamente óptimo; una revisión. Economía Agraria. no. 180: 181-224.

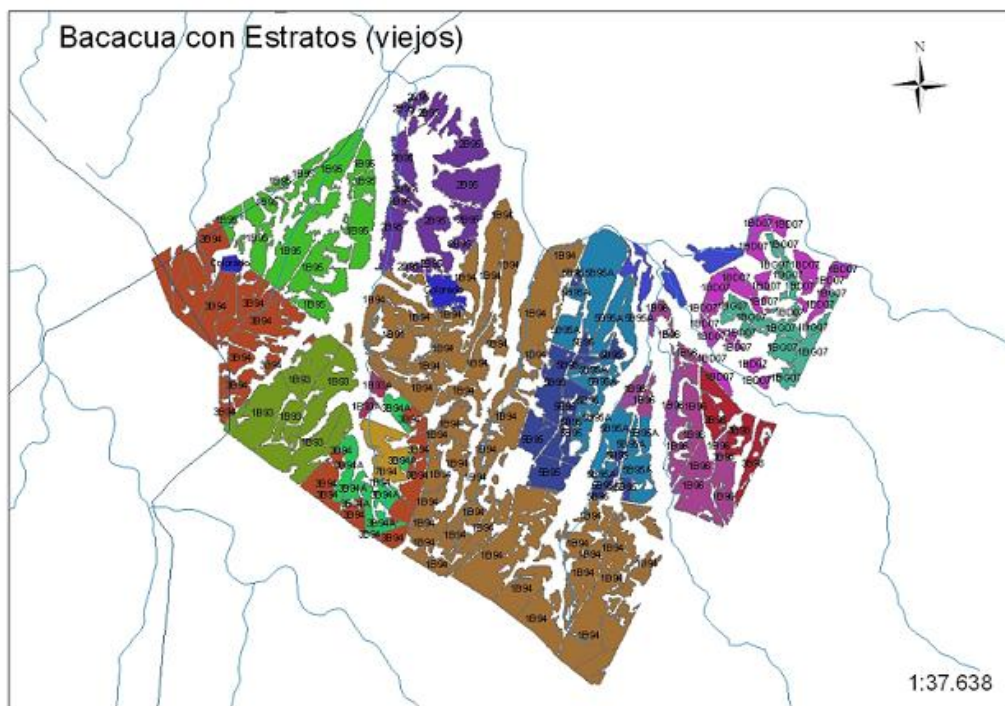
14. EPSTEIN, R.; WEINTRAUB, A.; CATALAN, J. 2001. Un caso exitoso; sistemas de optimización de transporte y cosecha en la industria forestal. IPEF. 14(34): 107-119.
15. ESTRAVIZ, RODRIGUEZ, L. C.; MONTANHESE DE LIMA, A. B. N. P.; CUNHA BUENO, A.; MARTINI, E. L. 1986. Programação linear no planejamento florestal; uma aplicação prática. In: Congreso Florestal Brasileiro (5o., 1986, Pernambuco). Trabalhos apresentados. s.n.t. pp. 163-168.
16. _____.; AMARAL, T, M. 2001. Ordenamento sustentável das florestas de eucaliptos plantadas para a produção de celulose no Brasil. IPEF. 14(34):150-158.
17. FLOYD, H, C. 1962. Linear programming the management of a forest property. Journal of Forestry. 63: 276-279.
18. FRANKLIN, S. E. 2001. Remote sensing for sustainable forest management. Boca Ratón, FL, Lewis Publishers. 407 p.
19. JOHNSON, N. K; SCHEURMAN, H. L. 1977. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives- discussion and synthesis. Forest Science. 18 (1): s.p.
20. MANESS, T.C.; NORTON, S.E. 2002. Multiple period combined optimization approach to forest production planning. Scandinavian Journal of Forest Research. no. 17: 460-471.
21. MELLO, A. A.; CARNIERI, C.; ARCE, J, E.; SANQUETTA, C, R. 2004. Planejamento florestal visando à maximização dos lucros e a manutenção do estoque de carbono. Cerne, Lavras. 11(3): 205-217.
22. PALANDER, T. 1999. A hierarchical participatory methodology for tactical decision-making based on decision-analytic model for balacing timber stock. Scandinavian Journal of Forest Research. no. 14:567-580.
23. PORCILE, J. F. 2007. Crónicas del desarrollo forestal del Uruguay. Montevideo, Fin de Siglo. 155 p.
24. RÖNNQVIST, M. 2003. Optimization in forestry. Mathematical Programming. Ser B 97: 267-284.
25. ROMERO, C. 1989. Modelos de planificación forestal; una aproximación desde el análisis multicriterio. Revista de Estudios Agro-Sociales. no 147: 71-92.
26. TAHA, H. A. 2004. Investigación de operaciones. 7ª. ed. Mexico, Pearson Education. 848 p.

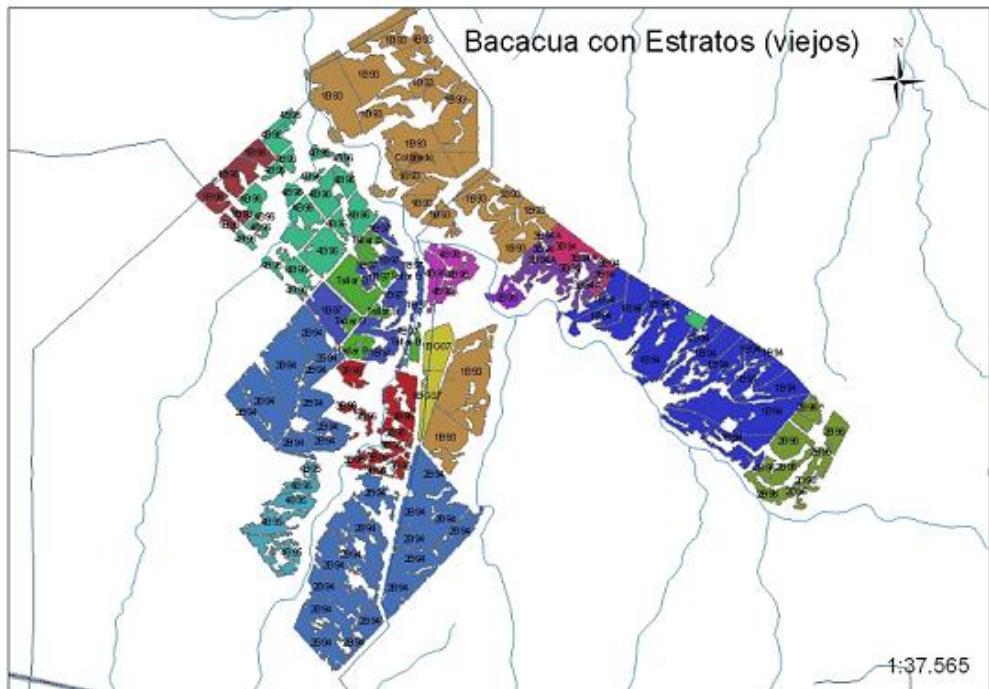
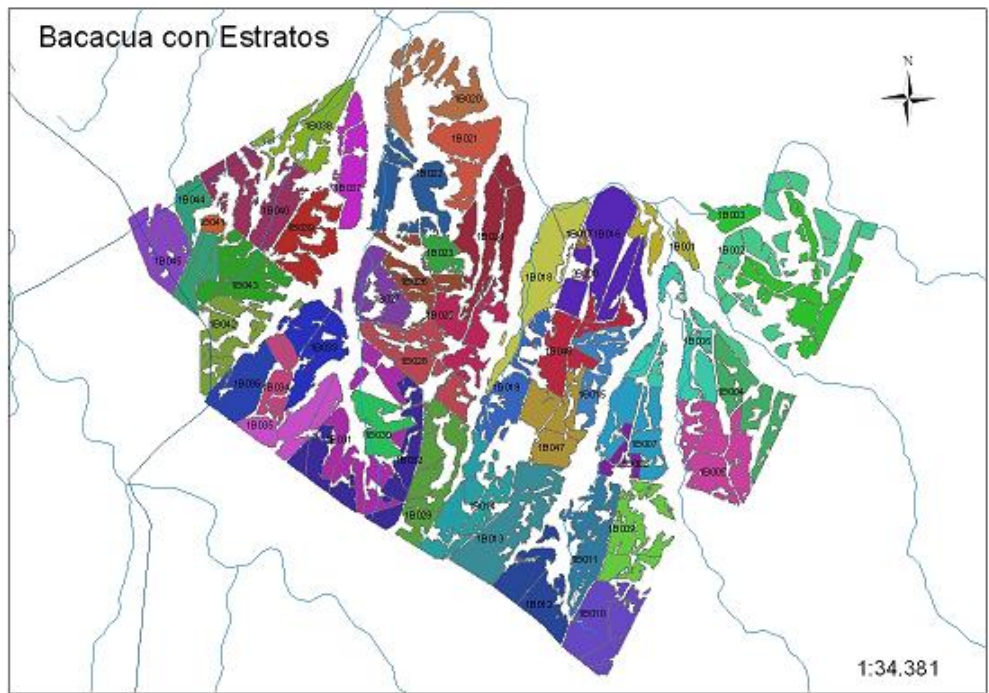
10. ANEXOS

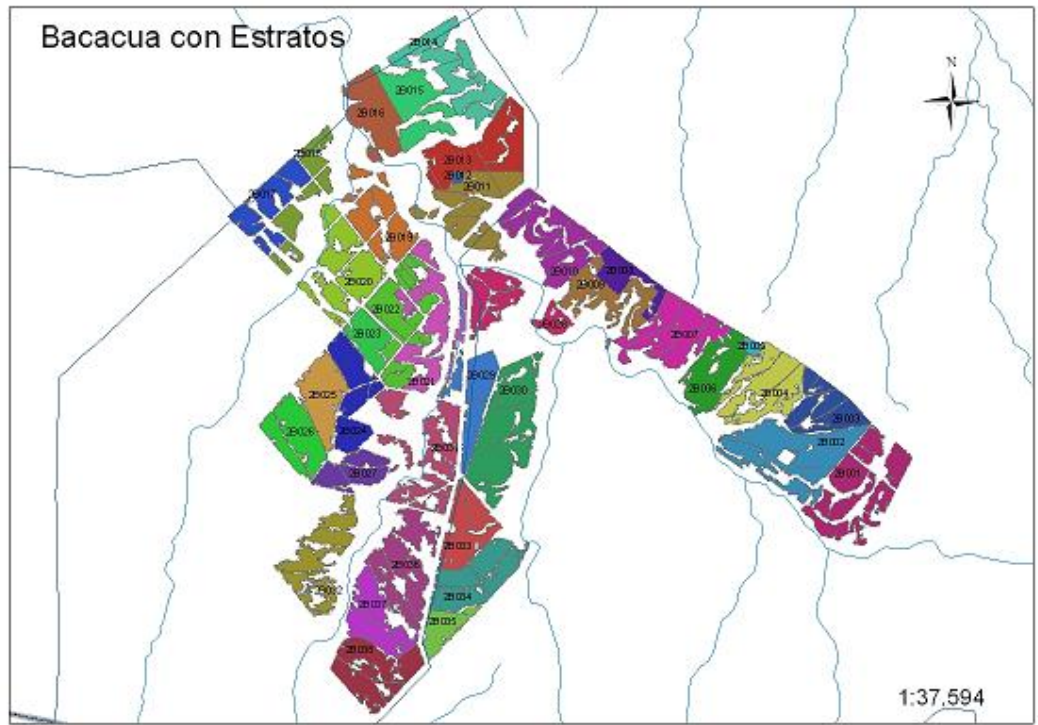
1. NUEVA DISTRIBUCIÓN Y NOMENCLATURA DE LOS ESTRATOS.

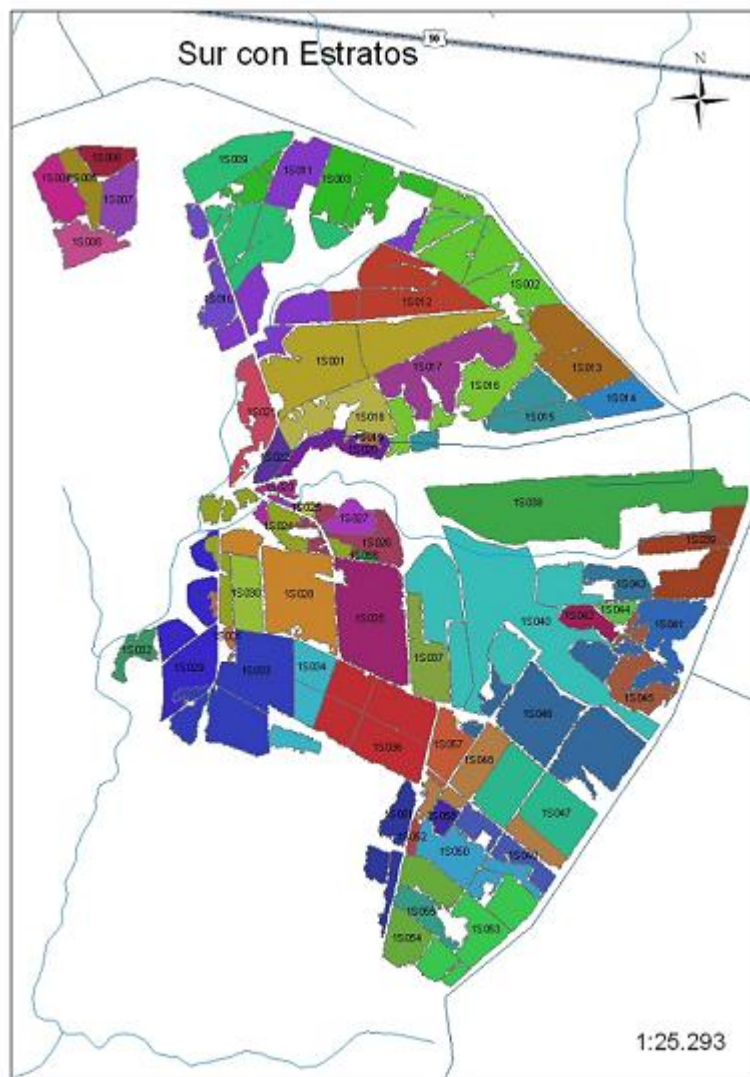
Los mapas se presentan de a pares, el primero hace referencia a la distribución actual de los estratos en la empresa, y seguidamente se presenta la misma superficie con la nomenclatura nueva.

Bacacué fue dividido en dos, mientras que el Sur se dividió en tres. De esta manera hay 4 mapas correspondientes a Bacacué y 6 mapas correspondientes al Sur.

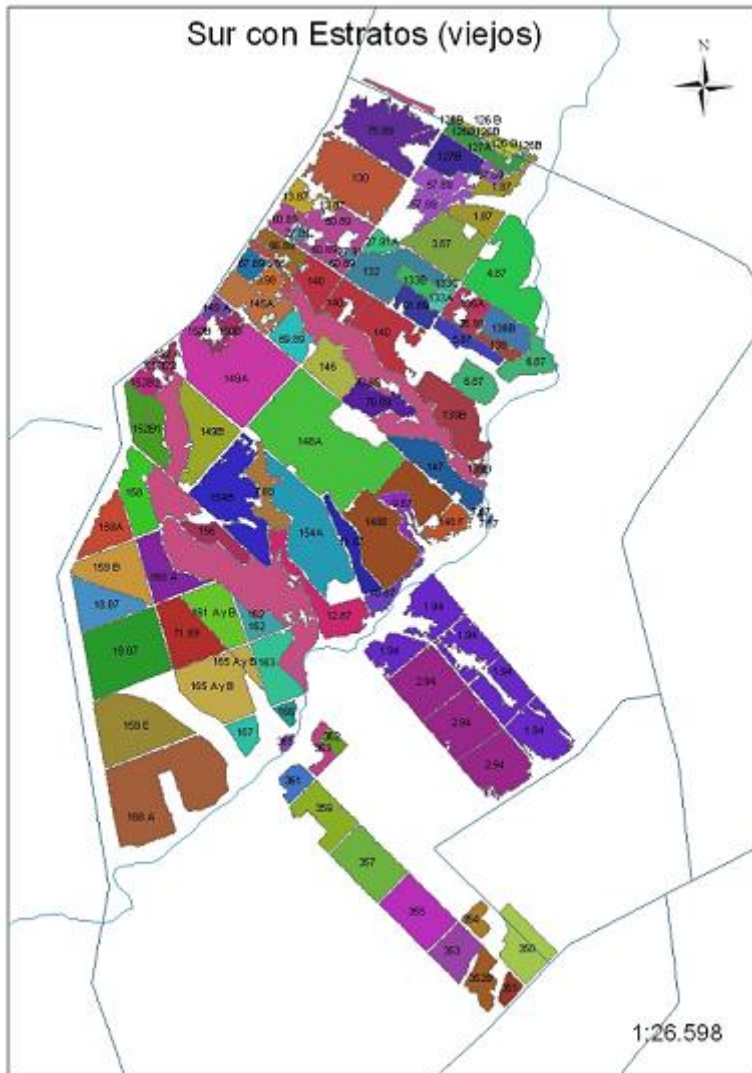






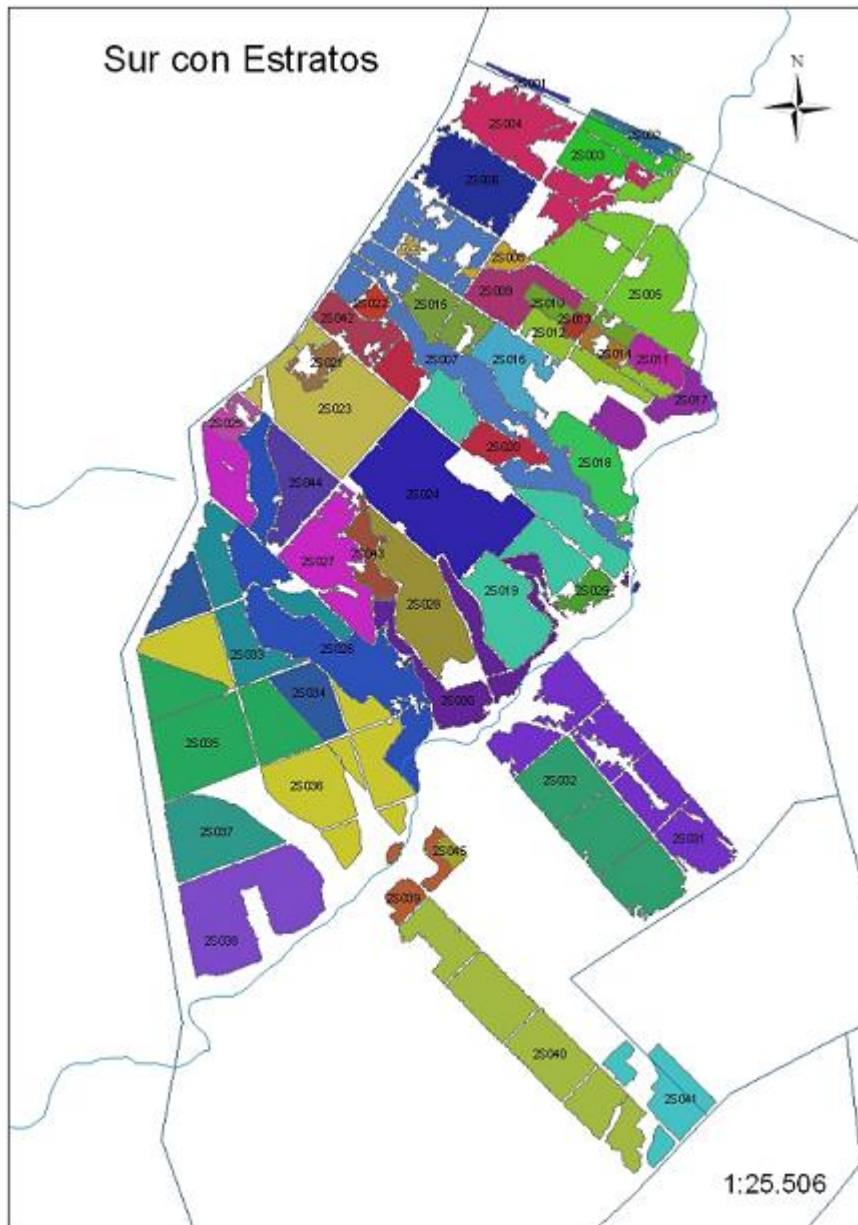


Sur con Estratos (viejos)

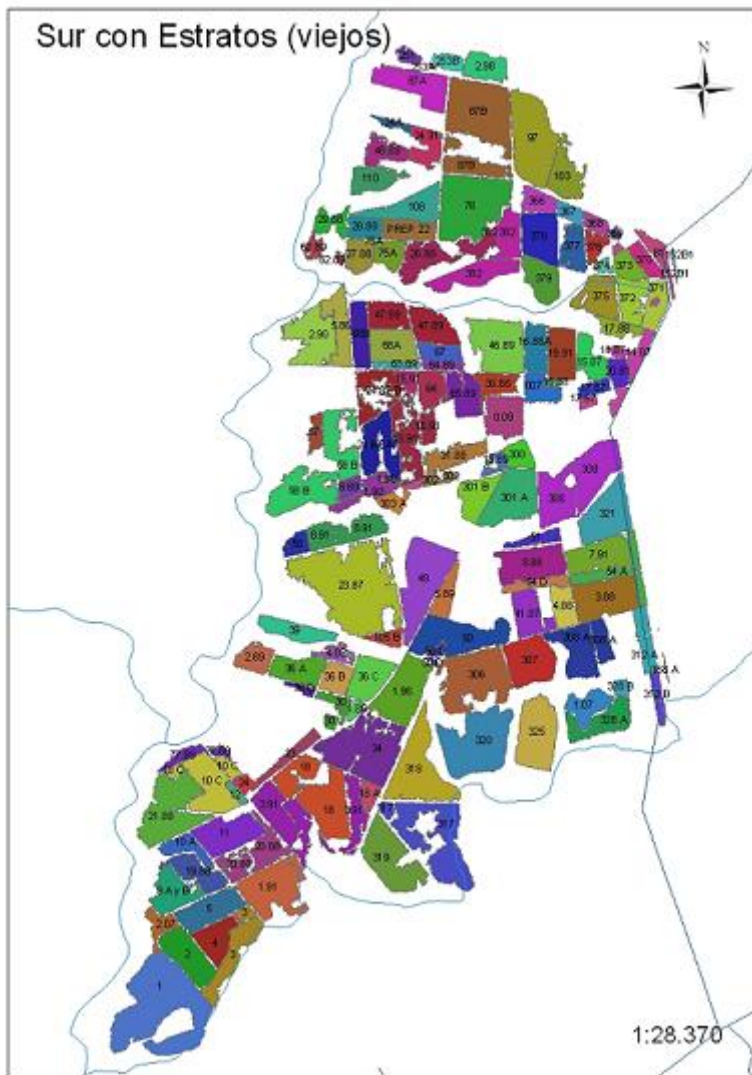


1:26.598

Sur con Estratos



Sur con Estratos (viejos)



Sur con Estratos

