



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

“PROPUESTA PARA LA ASIGNACIÓN DE EQUIPOS EN UN SISTEMA DE COSECHA FORESTAL, INCORPORANDO ESCENARIOS DE VARIABILIDAD. CASO DE ESTUDIO: FORESTAL MASISA S.A.”

POR: JAIME GUILLERMO CASTILLO PINCHEIRA

PROYECTO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS

PROFESOR GUÍA: **Dr. CRISTIAN PALMA INFANTE**

Diciembre, 2016
Concepción, Chile



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

“PROPUESTA PARA LA ASIGNACIÓN DE EQUIPOS EN UN SISTEMA DE COSECHA FORESTAL, INCORPORANDO ESCENARIOS DE VARIABILIDAD. CASO DE ESTUDIO: FORESTAL MASISA S.A.”

POR: JAIME GUILLERMO CASTILLO PINCHEIRA

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

PROFESOR GUÍA: DR. CRISTIAN PALMA INFANTE

PROFESOR INTEGRANTE 1: DR. PABLO GONZALEZ BREVIS

PROFESOR INTEGRANTE 2: MG. ALEJANDRA BASUALTO JAMES

Para completar las exigencias del Grado de Magíster en Ingeniería Industrial y de Sistemas

Diciembre, 2016
Concepción, Chile

A mis hijos: Alonso y María Paz.

A mi esposa, Lorena.

A mis Padres: Omar y Sonia.

*Las razones y el convencimiento, por
las que hay que seguir avanzando...*

A Dios y a Santa Rita de Casia....

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este proyecto de grado, que por diversas circunstancias se alargó en su desarrollo, más de lo que debía. Quisiera expresar mis agradecimientos a todos quienes han contribuido, a que pueda materializar este anhelo. Sin duda, fueron muchas y muchos, los que desde diversas dimensiones de mi vida me ayudaron y orientaron, para llegar a este final.

En primer término, agradecer a la Universidad del Desarrollo, a mis profesores y a sus directivos, por las oportunidades que me brindaron, para poder terminar este proyecto. A las coordinadoras académicas, Paloma Schell en un principio y luego a Valesca Muñoz, que siempre fueron una fuente inagotable de comprensión y apoyo.

Agradecer también, a mis colegas de trabajo en la UC Temuco, por su paciencia y apoyo.

A mi familia, por las veces que no pude acompañarlos, o estar con ellos, porque debía estudiar o viajar.

A mi suegra, por su apoyo y por el empujoncito necesario que me brindó en el inicio del postgrado.

Finalmente, a mi Profesor Guía, Dr. Cristian Palma, por su agudeza, fineza y profesionalismo en la revisión de cada avance de este documento. Una gran lección de maestro a discípulo, en la parte final de este programa.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes Generales.....	1
1.2 Definición del Problema.....	2
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo General.....	4
2.2 Objetivos Específicos	4
3. ALCANCES DEL PROYECTO.....	5
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
4.1 Cosecha Forestal.....	6
4.2 Planificación de la Producción Forestal	7
4.3 Modelos para la Optimización en Cosecha Forestal.....	8
4.4 Modelos de Optimización con Simulación.....	9
5. METODOLOGÍA	12
5.1 Antecedentes Generales.....	12
5.2 Área de Estudio.....	13
5.3 Descripción del Sistema de Cosecha Forestal en Estudio	13

5.4 Descripción de las Operaciones y Equipos del Sistema Estudiado	16
5.4.1 Subsistema Transporte Menor o Madereo	16
5.4.2 Subsistema Ordenamiento y Clasificación.....	16
5.4.3 Subsistema Procesamiento (Desrame)	16
5.4.5 Subsistema Transporte	16
5.5 Estudio de Productividad del Sistema de Cosecha Forestal	17
5.5.1 Tamaño de la Muestra	17
5.6 Calculo de Productividad.....	18
5.7 Determinación de la Variabilidad de la Producción	18
5.8 Costos Horarios de las Maquinarias y Equipos Utilizados.....	19
5.9 Formulación Matemática del Modelo de Asignación.....	20
5.9.1 Nomenclatura utilizada	21
5.9.2 Variables de decisión	21
5.9.3 Constantes	21
5.10 Modelo para Asignación de Maquinaria y Equipos	22
5.11 Simulación de Escenarios	24
5.11.1 Escenarios de Variabilidad.....	24
6. RESULTADOS.....	26
6.1 Productividad de Máquinas y Equipos	26
6.2 Ajuste de Funciones de Probabilidad	26
6.2.1 Torres De Madereo.	26
6.2.2 Procesador	28
6.2.3 Trineumáticos asociados a Torres	29
6.2.4 Cargador Frontal en Etapa Descarga.....	30
6.2.5 Trineumáticos en Cancha de Trozado.....	31
6.2.6 Cargador Frontal Etapa de Carga.....	32
6.2.7 Motosierras en Trozado.....	33
6.2.8 Subsistema Transporte	34
6.3 Resultados de Asignación del Modelo de Programación Lineal Entera.....	37

6.4 Análisis del Efecto de la Variabilidad en el Sistema.....	39
6.6 Evaluación de Costos de la Propuesta	42
7. CONCLUSIONES	46
8. BIBLIOGRAFÍA	47
9. Anexos	52
Anexo 1: Especificaciones Técnicas de la Maquinaria del Sistema.....	52
Anexo 2: Datos de entrada para la simulación de los escenarios	56
Anexo 3: Costos unitarios de producción.....	56
Anexo 4: Rutinas para resolver el problema de PLE, en software Lingo.....	57
Anexo 5: Cálculo de costo total y unitario por escenario de demanda.....	59

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla1: Costo fijo de Maquinaria Forestal.....	19
Tabla2: Costos Variable o de Operación, de la Maquinaria.	20
Tabla3: Productividad de la maquinaria y equipos del sistema en estudio.....	26
Tabla4: Estadísticas de la regresión, para el tiempo total, en función de la distancia de transporte.....	34
Tabla5: Validez de los coeficientes de la función de tiempos variables para el transporte peerles.	35
Tabla6: Parámetros de las distribuciones probabilísticas ajustadas para la productividad de los subsistemas, donde Media= media de productividad, D. Estan= Desviación Estándar; A y B = parámetros de distribución.	36
Tabla7: Cantidad de máquinas en el sistema de cosecha, según el modelo de asignación, para 3 metas de producción mensual.	37
Tabla8: Holguras que arroja el modelo para los escenarios de demanda mínima.	38
Tabla9: Producción total en m ³ de los escenarios de demanda mínima ejecutados en la simulación.	39
Tabla10: Resumen de los parámetros estadísticos de los escenarios de demanda mínima en m ³	40
Tabla11: Producción de máquinas por escenarios de demanda mínima en m ³	41
Tabla12: Porcentaje de utilización de las máquinas asignadas, para cada escenario.....	42
Tabla13: Costo de Producción, determinado en base a la simulación, para cada escenario de demanda.....	43
Tabla14: Análisis de Varianza, para costos unitarios de producción, escenarios 2 y 3...44	

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1: Esquema de la metodología usada en el proyecto de grado	13
Figura 2: Operaciones del sistema con Central de Trozado, estudiado en este proyecto.	15
Figura 3: Comparación entre la distribución normal teórica (curva amarilla), con los datos de la Torre Urus I (barras azules).	27
Figura 4: Comparación entre la distribución normal teórica (curva amarilla), con los datos de la Torre Urus III (barras azules).....	28
Figura 5: Comparación entre la distribución normal teórica (curva amarilla), con los datos del Procesador (barras azules).	29
Figura 6: Comparación entre la distribución normal teórica (curva amarilla), con los datos Trineumático en etapa de madereo (barras azules).....	30
Figura 7: Comparación entre la distribución weibull teórica (línea amarilla), con los datos de cargador frontal en etapa de descarga en cancha (barras azules).....	31
Figura 8: Comparación entre la distribución weibull teórica (línea amarilla), con los datos de trineumático en cancha de trozado (barras azules).	32
Figura 9: Comparación entre la distribución normal teórica (línea amarilla), con los datos de Cargador Frontal en etapa de carga en central de trozado (barras azules).....	33
Figura 10: Comparación entre la distribución normal teórica (línea amarilla), con los datos de Cuadrilla de Motosierristas realizando trozado en central de trozado (barras azules).	34

RESUMEN

La actividad forestal productiva, ocupa un importante lugar en nuestra economía. De acuerdo a las cifras entregadas por INFOR (2014), las exportaciones sobrepasaron por primera vez la barrera de los seis mil millones de dólares, representando un 8,8% del total de exportaciones del país.

Las operaciones de producción de madera representan un 70% o más del total del costo de formar un metro cúbico de madera; de ese total solamente las operaciones de cosecha contribuyen con más de un 30% a dicho costo (Umaña, 2014). El alto impacto en el costo total, de la asignación de sistemas de cosecha, hace necesario estudiar mecanismos y herramientas matemáticas, que ayuden a los profesionales que planifican, a tomar mejores decisiones.

En ese sentido, el presente proyecto plantea una propuesta para asignar máquinas a una línea de producción forestal, que se basa en una solución inicial con un modelo de programación lineal entera (PLE), que considera como principal restricción el cumplimiento de 3 escenarios de demanda. Estos escenarios fueron simulados, y analizados, en cuanto a su producción y costo. Para ello se ajustaron funciones de distribución de probabilidad a las producciones de las máquinas, y se obtuvieron réplicas para evidenciar el efecto de la variabilidad.

Como resultado se puede mencionar que para el caso en estudio, la variabilidad de las producciones de las maquinarias en el sistema, no fue significativo. En tanto, para el costo unitario de producción, la variabilidad aportó a que no existen diferencias entre los escenarios 2 y 3.

Finalmente, la propuesta presentada para asignar maquinaria, concluye que es factible complementar la asignación de maquinaria al sistema de producción, del modelo programación lineal entera, con simulación de eventos discretos, para generar mayor y mejor información a los tomadores de decisiones.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales

La actividad forestal, ocupa un importante lugar en nuestra economía. De acuerdo a las cifras entregadas, por INFOR (2014), las exportaciones sobrepasaron por primera vez la barrera de los seis mil millones de dólares, lo que representa un 6,7% de incremento respecto del año 2013, representando un 8,8% del total de exportaciones del país.

Estos niveles de demanda, hacen necesario una actividad productiva a gran escala, en la que la cosecha anual de madera, se eleva por sobre los 42 millones de metros cúbicos de trozas, de los cuales el 98% aproximadamente, proviene de plantaciones de Pino radiata (INFOR, 2014).

Este gran volumen de producción de madera, ha obligado a las empresas y empresarios forestales a aumentar los niveles de mecanización y de productividad de las actividades de cosecha y transporte. Esto se ha traducido en grandes inversiones de máquinas y equipos de trabajo, que necesitan una serie de condiciones de bosques y suelo para su mejor desempeño, lo que complejiza la labor de asignación de ellos.

Las operaciones de producción de madera (cosecha forestal, caminos y transporte) representan un 70% o más del total del costo de formar un metro cúbico de madera; de ese total solamente las operaciones de cosecha contribuyen con más de un 30% (Umaña, 2014).

El alto impacto en el costo de las decisiones de la asignación de los equipos de cosecha, así como, su productividad en la cadena logística, hace necesario considerar mecanismos y herramientas que permitan a los profesionales que planifican y asignan los equipos, aproximarse lo más posible al comportamiento de los sistemas planificados, con la finalidad de que la asignación permita cumplir con los objetivos de la demanda, de manera productiva, segura y eficiente.

Mac Donagh et al (2014) plantea que la diferencia entre los costos de una faena de cosecha bien planificada, con otra no planificada, puede superar el 40%.

En atención a lo expuesto, se hace necesario estudiar y desarrollar modelos que ayuden al planificador, a encontrar el óptimo de máquinas y equipos en las operaciones del sistema de cosecha forestal, que permita cumplir con las metas de producción, dentro

de los días planificados, con un máximo aprovechamiento de los equipos y por ende al mínimo costo.

En este proyecto de grado, se pretende buscar una solución al problema de asignación de equipos (número de equipos por subsistema) en un sistema de cosecha forestal con central de trozado en predio, en función de una demanda determinada por metas de producción, que considere la variabilidad de los rendimientos de las máquinas y equipos.

1.2 Definición del Problema

Los sistemas de cosecha forestal están compuestos por una serie de operaciones, que al interactuar, logran transformar los árboles que componen los bosques en bienes útiles para el aprovechamiento de la sociedad.

Estas operaciones que en el sistema en estudio comienzan con el derribamiento y preparación de los árboles en el bosque para su extracción (subsistema preparación de la madera), continúan con la extracción de la madera desde el bosque, hacia un lugar de acopio u orilla de camino (subsistema madereo); y para luego ser procesados (desramados) (subsistema procesamiento), y posteriormente, puedan ser cargados y transportados (subsistema transporte), a un destino final, o a un nuevo lugar de proceso (central de trozado); son desarrolladas por poderosas máquinas y/o equipos, que poseen altos costos de operación, y que por ende requieren de una gran inversión, que fácilmente puede sobrepasar el millón de dólares (Umaña, 2014).

La demanda de madera que debe surtir el sistema de cosecha, hace necesario, que en los distintos subsistemas deban existir una o más máquinas en actividades de producción, para lograr una línea balanceada, que sea capaz de cumplir eficientemente con los requerimientos del subsistema siguiente.

En el caso de estudio, la asignación de máquinas y equipos de cosecha forestal se realiza en función de la experiencia del profesional responsable, sin considerar que la productividad de las máquinas y/o equipos de producción, no son siempre iguales. Por el contrario, pueden existir, diversos elementos dentro de las operaciones, que contribuyen a la variabilidad de la productividad y que hacen que el sistema de cosecha forestal que se analizó en este estudio, haya presentado los siguientes problemas:

a.- Sub utilización de maquinarias y equipos: dentro de la línea de producción se configuran equipos que tienen una baja utilización, que puede ser causada porque el subsistema precedente no está aportando lo que se tenía previsto, o porque con esa meta de producción no se requiere de más equipos, provocando un aumento del costo de producción unitario.

b.- Desbalances de línea, esto se da principalmente porque los subsistemas no son capaces de procesar la productividad del subsistema precedente, esto hace que no se cumpla con la productividad planificada y por tanto un aumento del costo unitario de producción en aquellas máquinas que deben esperar materia prima para procesar.

c.- Ajuste de tarifas con empresas de servicios, por no cumplimiento de metas de producción; esto complica el pago de compromisos financieros y operacionales, por parte de las empresas de servicios y aumenta el costo de producción.

d.- Aumento del trabajo en progreso o inventarios de proceso, generando inconvenientes en el desplazamiento de los equipos, en las canchas de trozado, o alrededor de los equipos, o en los caminos.

e.- Incumplimiento de plazos de abastecimiento; que lleva a no cumplir con la programación de abastecimiento solicitada por los clientes finales, incurriendo en el pago de multas, pérdida de contratos y no cumplimiento de metas con los transportistas y clientes.

f.- Incumplimiento del Plan Anual de Producción, lo que hace que queden retazos de bosques sin cosechar, aumentando costos de producción total y unitario, o que las inversiones realizadas como la construcción de caminos, canchas no tengan la retribución esperada.

Este proyecto de grado propone mejorar la productividad y eficiencia del sistema de producción en estudio, determinando la cantidad de máquinas o equipos que se requieren por subsistema, para cumplir una demanda, incorporando en la solución la variabilidad de las tarifas medias de producción; se estudia una línea de cosecha forestal con central de trozado en predio, en la empresa Forestal Masisa.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Mejorar la eficiencia de los sistemas de cosecha forestal, incorporando el efecto de la variabilidad de la productividad de los subsistemas, en la configuración del sistema de producción en estudio. Caso de estudio: Forestal Masisa.

2.2 Objetivos Específicos

1. Ajustar funciones de probabilidad que permitan predecir la productividad y variabilidad, de máquinas y equipos, que están interviniendo en los sistemas de cosecha forestal, de Forestal Masisa.
2. Diseñar un modelo de asignación de equipos de cosecha, que incorpore las metas de producción, y el comportamiento probabilístico del rendimiento de las máquinas y balance de líneas.
3. Analizar escenarios y examinar el efecto de la probabilidad (variabilidad) del sistema de producción, considerando la asignación en relación a metas productivas, porcentaje de utilización, y costos de las soluciones.

3. ALCANCES DEL PROYECTO

Este proyecto pretende aportar a los profesionales que trabajan en el área de planificación y en el área de producción de Forestal Masisa, así como a sus gerentes, una herramienta que en base al análisis de las operaciones de su realidad productiva, les permita tomar decisiones de asignación de recursos, mejorar las negociaciones con las empresas de servicios que interactúan en este sistema, cumplir eficientemente con los compromisos de entrega, dimensionar de mejor forma el almacenamiento, disminuir costos de producción, aumentar la rentabilidad del negocio, etc. Asimismo, aportará al control y mejor desarrollo de la actividad productiva y es perfectamente extrapolable, a empresas o particulares que tengan situaciones similares.

Abarca una parte de la planificación operacional de la cosecha forestal en Forestal Masisa; lo que se propone es una forma de asignar equipos a los sistemas de cosecha, considerando un modelo matemático determinístico, como solución inicial, para posteriormente, analizar el comportamiento del sistema incorporando escenarios probabilísticos de variabilidad de las productividades de los subsistemas, con el fin de tener una mejor aproximación al desempeño del sistema de cosecha en estudio en situaciones, que pueden ser optimistas, o pesimistas, respecto de la solución inicial.

Se analizó un sistema de cosecha que se utiliza en zonas con pendiente, y que está asociado a la extracción con torres de madereo; denominado multimáquina, y que incorpora una central de trozado en predio, con un transporte interno realizado por camiones peerles. Quedan fuera del estudio otras configuraciones, como la extracción con Skidders, Forwarders, u otras, así como otras especies arbóreas como Eucalipto, Nativos, etc.

Finalmente, el período de planificación considerado para la solución implementada es mensual. En este proyecto, no se contempla evaluar la implementación del modelo en las actividades de la empresa.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Cosecha Forestal

La Producción Forestal, también denominada Cosecha Forestal, es una actividad económica que consiste en la tala de árboles de bosques con el objetivo de obtener el máximo beneficio y aprovechamiento económico de éstos. Se obtienen productos finales para los cuales el bosque fue establecido y manejado.

La cosecha forestal es una de las actividades de mayor impacto en el ciclo productivo forestal, determinando en gran medida los costos finales de los distintos productos puestos en las industrias (Mac Donagh et al 2014). Urra (1999) menciona que la cosecha forestal es una de las actividades de mayor importancia, debido a la multiplicidad de factores y etapas que tiene, entre ellas el madereo y el transporte constituyen alrededor del 75% de los costos de producción.

La producción forestal ha tenido un desarrollo extraordinario en los últimos años, gracias a la incorporación de maquinarias con tecnología de vanguardia. Esta maquinaria no sólo ha permitido aumentar la productividad sino también la seguridad en las operaciones (Acuña et al, 2011).

Una de las primeras etapas de la cosecha forestal se relaciona con la selección adecuada de la maquinaria o asignación de recursos de producción a utilizar en un área de cosecha. Esto implica seleccionar los sistemas de cosecha más eficientes para ser aplicados en relación a las características del terreno y las dimensiones del bosque, debido a que la subutilización de recursos representa a la empresa un alto costo financiero puesto que las instalaciones no utilizadas requieren mantenimiento, se deterioran, y posiblemente queden obsoletas antes de generar alguna renta a la empresa, provocando una disminución de la producción de madera. (Bossi, 2007).

Las operaciones de cosecha han proporcionado muchas aplicaciones de investigación de operaciones importantes. El proceso de recolección incorpora decisiones en las áreas de la cosecha, corte transversal de árboles para obtener productos demandados por la longitud y el diámetro, la forma de localizar maquinaria de recolección, la forma de construir y mantener caminos para trasladar la producción, y la forma de distribuir son aspectos a tomar en consideración en la producción o cosecha forestal (Weintraub et al, 2007).

4.2 Planificación de la Producción Forestal

La planificación forestal es el proceso de recopilación y análisis de información disponible y relevante para la posterior toma de decisiones, orientando la dirección a seguir y considerando factores que pueden disminuir la productividad en la empresa.

La planificación de la cosecha es la etapa previa, antes de ejecutar cualquier acción posterior. Ésta incluye la recopilación de información, su análisis, la toma de decisiones y la confección del programa. Los objetivos de la planificación, pueden estar dirigidos a mejorar la productividad de la cosecha, las utilidades, la calidad de los productos, la seguridad en el trabajo y a minimizar el impacto al medio ambiente (Sapunar, 1999).

Según Troncoso (1996) citado por Rojas (2004) la toma de decisiones en la planificación de la cosecha forestal es una tarea muy compleja considerando la gran cantidad de variables que van a intervenir en las operaciones. Por ello, es imprescindible incorporar herramientas de tipo cuantitativo que entreguen estándares para dichas variables y con las cuales facilitar el trabajo del planificador.

La planificación de la producción forestal, es un proceso donde intervienen múltiples variables que influyen en su desarrollo, muchas de estas afectan principalmente al rendimiento de las máquinas, trabajadores, los procesos continuos y discontinuos, etc. deben tomarse en cuenta los ingresos que se producen por la venta de madera y los costos involucrados, tales como los costos de establecimiento, costos de mantenimiento, costo de efectuar una corta y costo de transportar la madera aprovechada. Este es un proceso complejo que apunta generalmente a la maximización de la cantidad y calidad de la producción y los servicios forestales (Lawrence et al., 2000, citado por Kaloudis et al, 2010).

Los esfuerzos se centran en generar sistemas de planificación forestal eficientes, debido a los niveles de inversión, necesarios para la ejecución de las faenas operativas de cosecha, producto de la gran magnitud y alta mecanización que éstas representan, hacen especialmente relevante los procesos de organización y planificación con fin de aumentar beneficios o disminuir costos en la planificación de la producción forestal (Palma y Troncoso, 2001).

En este sentido, la Planificación Operativa establece la programación detallada de las actividades de corto plazo (como la definición de esquemas de trozado, maquinaria requerida por unidad de cosecha, contratación de faenas, transporte de productos), a realizar de acuerdo con los compromisos y restricciones que afectan en forma inmediata a la empresa, teniendo predeterminadas las condiciones de producción (Morales y Weintraub, 1989).

Con el afán de encontrar mejoras en los procesos productivos en cosechas forestales los encargados de la planificación poseen una gran responsabilidad, una decisión errada puede lograr que altas inversiones no generen el beneficio esperado, por esta razón la importancia de esta fase previa a los procesos productivos, como referencia puede señalarse que la diferencia en costos entre una operación de cosecha planificada y no planificada podría llegar al 40% (Mac Donagh et al, 2014).

Los elevados costos de un sistema de cosecha altamente mecanizado hacen necesario llevar a cabo una mejor planificación de las operaciones y de esta forma mantener óptima su capacidad de producción. La información proporcionada por la aplicación permite a la empresa forestal hacer un mejor uso de los equipos de cosecha y mejorar la rentabilidad del negocio (Barrios, 2008).

Cuando se planifica una faena de producción o cosecha forestal, es necesario encontrar respuesta a dos interrogantes básicas ¿Cuál es el sistema más adecuado? Y ¿Cuáles son los equipos y / o máquinas que producirán una mayor economía de las operaciones?

4.3 Modelos para la Optimización en Cosecha Forestal

En situaciones donde existe un problema determinado por un estado inicial hasta un estado final deseado, una variedad de posibles acciones que emprender, y un entorno sobre el que se ejercen estas acciones se está ante un problema de toma de decisiones.

La toma de decisiones se ha tornado muy exigente y compleja, lo que ha derivado a su vez a la necesidad de disponer de tecnologías poderosas y sofisticadas para responder en forma oportuna y eficaz a las demandas del desarrollo (Pedernera et al, 2002). Las herramientas en base a programación matemática permiten resolver problemas complejos que involucran cientos, incluso miles de casos, en las áreas de gestión y una

amplia gama de preocupaciones. Estas preocupaciones potenciales incluyen rendimientos sostenidos de productos.

El tener un sistema productivo desbalanceado provoca inconvenientes de operación como acumulación de materiales, máquinas subutilizadas, deficiencias en calidad de productos obtenidos, entre otros. Los sistemas de cosecha no escapan de esta problemática, por lo que es de interés mantener la operación de los mismos lo más fluida posible (Aracena et al, 2007). Ya lo había advertido, Conway (1982) que citaba que la ausencia de planes operativos de cosecha en las operaciones genera subutilización de los recursos productivos y excesivos costos.

Palma y Troncoso (2001) proponen un modelo de optimización multi-periodo de equipos en faenas de cosecha forestal como herramienta de apoyo al proceso de toma de decisiones, con el fin de aumentar el rendimiento de las faenas y optimizar los sistemas productivos.

Karlsson et al (2003) desarrollan un modelo de programación entera mixta (MIP), para solucionar un problema de planificación de corto plazo, que incluye el diseño y asignación de equipos de cosecha forestal, para una compañía sueca. Lo que se resuelve, tiene que ver con asignar determinadas áreas de aprovechamiento, y en determinada secuencia, a los equipos disponibles.

Aracena et al (2007), proponen balancear sistemas de cosecha forestal, utilizando simulación de eventos discretos, con muy buenos resultados. Para efectos de predicción, también concluyen que la simulación le ha permitido realizar pruebas que en la práctica serían demasiado costosas e incluso imposibles de realizar.

Weintraub et al (2007) proponen una aplicación de programación estocástica en un problema de gestión forestal, dicho problema corresponde al de planificar la explotación de un bosque destinado a la producción de madera y la construcción de los caminos de acceso necesarios para llevar a cabo tal explotación considerando un comportamiento estocástico del precio de venta.

4.4 Modelos de Optimización con Simulación

La simulación surge como la evolución del modelo de Montecarlo, y se basa en la aplicación de modelos matemáticos y estadísticos, por medio de herramientas informáticas (Ceballos, et al 2013). La simulación permite diseñar un modelo

representativo de la realidad, permitiendo experimentar, comprender algún comportamiento, o bien, evaluar nuevas estrategias de funcionamiento (Rodríguez y Quezada, 2009).

El análisis de Monte Carlo es la técnica más utilizada para realizar corridas de simulación probabilística de cualquier sistema que contenga variables inciertas, de cualquier forma el resultado es una distribución de probabilidad para la variable en cuestión (Morales et al, 2005, citado por Domínguez, 2007).

En la optimización vía simulación se combina la simulación y la optimización, para permitir la optimización de modelos que contienen ciertos valores inciertos.

El problema de optimización consiste en determinar los valores de los parámetros de entrada con el fin de optimizar las salidas de un modelo generado por simulaciones de computadora. En tal modelo, la función objetivo (funciones objetivos, en caso de problemas multicriterio) y algunas restricciones son respuestas que pueden solamente ser evaluadas por simulaciones de computadora y que podrían además tomar un tiempo prolongado en ejecutarse (Acosta, 2012).

Randhawa et al. (1992) y Eliasson (1999) citado por Aracena et al (2007) señalan que un modelo de simulación puede ser considerado como una versión de laboratorio del sistema con el cual es posible experimentar bajo condiciones controladas. Las condiciones de laboratorio posibilitan estudios difícilmente practicables en terreno, por las condiciones del entorno, y recursos temporales y monetarios requeridos.

La optimización y la simulación por separado son herramientas utilizadas para tomar decisiones en muchos procesos productivos. Capitalizando en las fortalezas de ambas disciplinas, es deseable conjuntar estos dos métodos, para tomar mejores decisiones. El área que se ha encargado de realizar esta conjunción se denomina optimización vía simulación (Rojas et al. 2012).

La simulación de eventos discretos ha ocupado un lugar muy importante en la evaluación de toma de decisiones, la optimización por su parte ha representado ser una herramienta útil para buscar soluciones que mejoren el desempeño de los sistemas. Sin embargo estos dos puntos de vista han sido desarrollados de forma separada. No obstante, el surgimiento de nuevas aplicaciones a sistemas cada vez más complejos ha creado la necesidad de combinar ambas técnicas (Pérez et al, 2005).

De acuerdo a April et al. (2004) citado por Acosta (2012), el procedimiento de optimización utiliza las salidas del simulador midiendo las entradas que se introducirán en el modelo, con base a las entradas actuales y anteriores, el procedimiento de optimización decide un nuevo conjunto de valores de entrada; el proceso continúa hasta que un criterio de terminación adecuado se satisface.

Uno de los componentes más importantes de la simulación son las entidades, ya que en ellas se manifiestan los cambios dentro del sistema. Adicionalmente, al poseer flujos de entrada y de salida, son capaces de interactuar con otras entidades, sometándose a diversos procesos y actividades en función del tiempo (García, 2014).

Optimización y simulación representan campos complementarios, pueden coayudar a la mejora de sistemas complejos (Pérez et al, 2005). En otras palabras, la optimización vía simulación puede ser vista como un problema de optimización en el cual la función objetivo solamente puede ser evaluada a través de un modelo de simulación (Azadivar, 1999 citado por Olguín, 2008).

Contreras et al (2010), utiliza herramientas de optimización estocástica, mediante simulación y metodología de superficie de respuesta, en un caso real del ámbito logístico portuario donde define los requerimientos de equipamiento necesarios (grúas portacontenedores y camiones) que permitan el cumplimiento de estándares de utilización y eficiencia del proceso de carga y descarga de contenedores al menor costo de inversión posible.

Boutrico et al (2001) aplican la metodología de optimización vía simulación con algoritmo genético en la empresa chilena Codelco, con el fin de encontrar una solución óptima o cercana a lo óptimo para el modelo correspondiente al patio de manejo de materiales y productos de la faena de Chuquicamata.

Otras investigaciones han usado modelos de simulación para seleccionar sistemas de cosecha adecuados a las condiciones de un rodal, dado que ellos afectan significativamente la eficiencia operacional de un sistema (Mc Donagh et al., 2004 citado por Aracena et al 2007).

Como se aprecia, los problemas de asignación de máquinas y equipos son convenientemente resueltos, utilizando modelos determinísticos y/o probabilísticos, o una combinación de ambos.

5. METODOLOGÍA

5.1 Antecedentes Generales

La propuesta de mejora que se presenta en este proyecto contempló, en una primera etapa, conocer los antecedentes del sistema de producción en estudio; se analizaron sus subsistemas, las variables que inciden en la productividad, sus restricciones de operación, etc. Posteriormente, se desarrollaron estudios de tiempo a las maquinarias y equipos de los subsistemas, se determinaron los rendimientos promedios y totales de producción, y se analizó la variabilidad de las producciones. Para los fines de simular el comportamiento de la variabilidad de los rendimientos, se ajustaron funciones de distribución de probabilidad. Paralelamente, se recopilaron antecedentes de costos fijos y variables de las maquinarias y equipos del sistema; con esta información se determinaron costos horarios, y costos por unidad de producción. Con los antecedentes de los costos de producción se planteó, un modelo de asignación de utilizando programación lineal entera, que minimiza el costo total del sistema de producción, y que tiene como principal restricción el cumplimiento escenarios de producción mensual mínima (6.000 m³, 8.000 m³ y 10.000 m³). Finalmente, y con el fin de incorporar el efecto de la variabilidad, se simuló la asignación óptima, para cada escenario de producción mensual mínima. Se evaluó el comportamiento de la producción, la utilización de los equipos, costos de producción, entre otros. Un esquema de lo expuesto se presenta en la Figura 1.

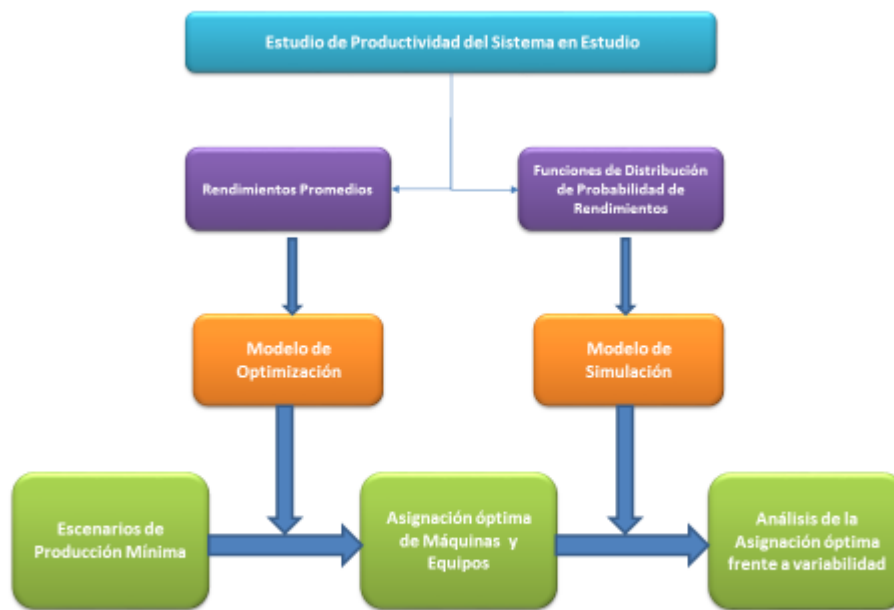


Figura 1: Esquema de la metodología usada en el proyecto de grado

5.2 Área de Estudio

Los datos con los cuales, se desarrolló el presente proyecto de grado, fueron tomados en faenas de cosecha forestal de pino insigne adulto, en período estival, que se desarrollaron en el predio “Nueva Etruria” ubicado en la comuna de Pitrufquen, región de la Araucanía, propiedad de la empresa forestal Masisa S.A., en predios con pendiente inclinada (>35%).

5.3 Descripción del Sistema de Cosecha Forestal en Estudio

El sistema en estudio denominado multimáquina con central de trozado en predio, pretende maximizar el transporte dentro del predio al realizar el transporte interno en poderosos camiones peerles, que pueden llevar más carga que un camión tronquero normal, aproximadamente 10 a 12 m³ más por viaje. Con ello se disminuye el costo de transporte interno, que tiene un recorrido promedio, de 12 km aproximadamente. Para este sistema se necesitan 10 tipos de operaciones ejecutadas por distinta maquinaria.

Este sistema comienza con el subsistema “Preparación de la Madera”, que consiste en el derribo de los árboles, y las operaciones necesarias para su extracción desde el bosque por las torres de madereo. Sin embargo, este subsistema no se consideró en este estudio, por no representar una restricción. Con posterioridad a la “Preparación de la Madera” viene el subsistema madereo o transporte menor, en donde los árboles cosechados son extraídos desde el bosque por torres de madereo, mediante cables aéreos. La secuencia la continua el subsistema clasificación y ordenamiento, que es desarrollado por trineumáticos que toman los árboles que quedan bajo las torres de madereo, y los trasladan, a una zona de apilado o almacenamiento (cancha), luego viene el subsistema procesamiento donde se desraman los árboles cosechados extraídos con un “Procesador”; posteriormente un camión grúa, carga los fustes desramados en camiones tipo peerles los cuales los trasladan (subsistema transporte intermedio), hacia una cancha o central de trozado, que como se mencionó, en promedio se encuentra a unos 12 km, de las zonas de cosecha. En la central o cancha de trozado la descarga de los fustes de los camiones peerles se realiza con un cargador frontal; trineumáticos ordenan la madera para que los motosierristas realicen el proceso de trozado, los mismos trineumáticos ordenan y clasifican los trozos por diámetro y largo, para que luego, el mismo cargador frontal realice la carga de los trozos en camiones tronqueros, los que conducen los productos a destino final. Las máquinas poseen especificaciones técnicas como: potencia, capacidad productiva, y otras que determinan en un gran porcentaje su capacidad productiva y las condiciones que necesita para ello (ver Anexo 1). En la Figura 2, se aprecian los subsistemas, operaciones y máquinas que componen el sistema.



Figura 2: Operaciones del sistema con Central de Trozado, estudiado en este proyecto.

5.4 Descripción de las Operaciones y Equipos del Sistema Estudiado

El detalle de las operaciones de los sistemas de cosecha forestal y los equipos utilizados en los subsistemas, que fueron estudiadas en este proyecto de grado se presenta a continuación.

5.4.1 Subsistema Transporte Menor o Madereo

Valdebenito (1994) citado por Bossi (1997) define el madereo o transporte menor como el proceso mediante el cual se transportan árboles, fustes o trozas desde el bosque hasta las canchas de acumulación de madera o bordes de camino.

Torre de Madereo: Máquina utilizada para realizar el proceso de madereo con pendiente del terreno superior a 35%, las faenas con torres se caracterizan por tener una organización relativamente compleja. En el caso de estudio existe disponibilidad de 2 torres cuyos modelos son: Urus I con carro wyser, y Urus III con carro Koller.

5.4.2 Subsistema Ordenamiento y Clasificación

Secuencialmente, posterior a la acumulación de madera a los costados de la torre, se realizan las operaciones de clasificación y ordenamiento. En esta operación, el trineumático, extrae los árboles que son arrastrados por las torres, y los traslada a una zona de proceso.

5.4.3 Subsistema Procesamiento (Desrame)

En este subsistema, el “Procesador”, realiza el desrame de los árboles. El “Procesador” es una máquina tipo excavadora que actúa como portante, a los que se les ha adaptado un cabezal harvester (en vez de cuchara).

5.4.5 Subsistema Transporte

Este Subsistema, contempla las operaciones necesarias para cargar y transportar la madera, desde las faenas hasta la central de trozado, y/o hasta destino final.

Transporte Intermedio: Se entiende por Transporte Intermedio el traslado de los fustes desde los lugares de cosecha a la central de trozado. Para este estudio, se

utilizaron camiones tipo “Peerless”, que pueden transportar un volumen mayor de madera, dentro de predio.

Carga y Descarga: Los camiones “Peerles” son cargados por un camión grúa en el sector de cosecha y un cargador frontal lo descarga en la central de trozado. La carga de los camiones “tronqueros”, que llevan la madera a destino final es realizada por el cargador frontal.

Transporte Mayor: Se entiende por transporte mayor el traslado de las trozas desde la central de trozado en predio, hasta las fábricas o plantas procesadoras.

5.5 Estudio de Productividad del Sistema de Cosecha Forestal

Para conocer la productividad del sistema, se realizó un estudio de tiempo continuo, que consiste en medir el tiempo que demora la maquinaria y/o elementos del sistema, en ejecutar el ciclo de trabajo, a través de un cronometraje continuo que registra el tiempo total en cada operación realizada en forma secuencial, incluyendo los tiempos improductivos y suplementarios (Domínguez, 1997).

En base a esta metodología, se definieron y seleccionaron los límites del sistema, considerando el inicio desde la extracción con torres de madereo, de los árboles recién cortados (madereo), hasta el carguío para el transporte mayor. De esta forma, cada operación en la que interviene una maquina o equipo representa un elemento del sistema.

El estudio de tiempos se desarrolló de forma individual para cada maquinaria y equipo. En cada caso, se midió y registró el tiempo de las operaciones productivas (expresado en minutos), y las detenciones implicadas durante todo el proceso. Para los vehículos de transporte se midió la distancia promedio de recorrido, y la velocidad promedio de desplazamiento tanto para el viaje cargado como para el viaje vacío.

La identificación de los elementos del ciclo del trabajo, se realizó en la primera etapa del estudio, de la cual se obtuvo como resultado un formulario para, registrar los datos.

5.5.1 Tamaño de la Muestra

La muestra corresponde al período de trabajo comprendido entre el 27 de diciembre de 2013, y al 14 de abril de 2014; en dicho período la población de datos de los distintos

subsistemas fue censada. El tamaño específico de muestra para cada subsistema se detalla más adelante, en los cálculos de productividad.

5.6 Calculo de Productividad

La productividad de cada máquina utilizada en el proceso de cosecha se obtiene considerando su tiempo normal de trabajo y es tratada de manera separada. La productividad, es la relación de los tiempos normales, excluyendo eventos indeseables, con los volúmenes extraídos, expresado en m³/h (Arrollo, 2005).

5.7 Determinación de la Variabilidad de la Producción

Uno de las consideraciones más importantes para este proyecto, consiste en poder incorporar la variabilidad de producción en la asignación de los equipos. Para incorporar esta variabilidad, en el modelo de simulación, se ajustaron funciones de distribución de probabilidad, para las operaciones de los sistemas en estudio.

El ajuste de las funciones de distribución, para las operaciones se realizó con una herramienta estadística del software @risk (versión demo), empleando el método de “máxima verosimilitud”, como estimador para calcular los parámetros de las distribuciones. Este método selecciona como estimador aquel valor del parámetro que tiene la propiedad de maximizar el valor de la probabilidad de la muestra aleatoria observada, es decir, el método consiste en encontrar el valor del parámetro que maximiza la función de verosimilitud.

Para la bondad de ajuste, se utiliza los test de Kolmogoronov Smirnov (K-S), que es una prueba no paramétrica que determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad, se basa en la comparación entre las funciones de distribución acumulativa observadas en muestra empírica y la distribución propuesta bajo hipótesis nula, y el test de Anderson-Darling que se utiliza para comprobar si una muestra de datos procede de una población con una distribución específica, es una modificación al test K-S, pero con mayor peso en las colas (Carranza, 2010).

5.8 Costos Horarios de las Maquinarias y Equipos Utilizados

Un parámetro de entrada importante para el modelo son los costos, para el caso de este estudio, los costos son estimados, y considerados como datos.

Los costos considerados en este estudio se presentan a continuación, y se diferencian entre costos fijos y variables. El costo fijo, involucra el costo del operario, depreciación, seguros, impuestos, almacenamiento, y costo anual equivalente entre otros, un resumen se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Costo fijo de Maquinaria Forestal.

Maquinaria	Modelo.	Costos fijos (\$/H)
Torres de Madereo	URUS I	21.493
	URUS III	22.555
Trineumático	Tecfor	8.576
Cargador Frontal	Komatsu PC300HD	34.059
Grúa Forestal	Tigercat 220D	12.550
Procesador	Thunderbird-1236DL	29.780
Procesador Trozando	Waratah HTH622B instalado en excavadora SDLG6250	36.824
Motosierra	HUSQVARNA	5.800

Fuente: Elaboración propia en base a datos entregados por Masisa (2016).

El costo variable o de operación, está constituido por el costo de combustible, aceites, lubricantes, filtros, reposiciones, reparaciones y mantención, los valores totales se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2: Costos Variable o de Operación, de la Maquinaria.

Maquinaria	Modelo.	(\$/H)
Torres de madereo	URUS I	10.015
	URUR III	11.069
Trineumático	Tecfor	7.969
Cargador Frontal	Komatsu PC300HD	28.752
Grúa Forestal	Tigercat 220D	13.679
Procesador	Thunderbird-1236DL	23.329
Procesador Trozando	Waratah HTH622B instalado en excavadora SDLG6250	26.449
Motosierra	HUSQVARNA	2.459

Fuente: Elaboración propia en base a datos entregados por Masisa (2016).

5.9 Formulación Matemática del Modelo de Asignación

El modelo de asignación consta de 2 procesos, En primer término un modelo de Programación Lineal Entera (PLE), que arroja una solución (asignación) inicial, y en segundo término, esta solución es simulada, utilizando las funciones de distribución de probabilidad que fueron ajustadas, para visualizar el efecto de la variabilidad.

Los parámetros de entrada del modelo de PLE, fueron las productividades de las máquinas, costos horarios, y demanda de producción mínima mensual. Se establecieron 3 escenarios de producción mínima, basado en los requerimientos mensuales que se tienen para este tipo de sistema de producción en la empresa que se desarrolló el estudio, y que corresponden a 6.000, 8.000 y 10.000 m³ mensuales de madera. Los costos establecidos en la función objetivo están en términos de costo unitario de producción. Las variables a utilizar son del tipo entero.

El cargador frontal realiza 2 funciones; descarga los camiones peerles, del transporte interno, dedicando 25% de su jornada aproximadamente y carga los camiones

tronqueros, (camión y carro) con un 75% de dedicación. Esto fue determinado en el estudio de tiempo. La principal restricción en el modelo de PLE, es cumplir con la demanda, al mínimo costo.

5.9.1 Nomenclatura utilizada

Subíndices

i = Tipo de máquina = { 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9 }

1. Torre de madereo Urus I.
2. Torre de madereo Urus III.
3. Trineumáticos de madereo.
4. Procesador.
5. Camión Peerles.
6. Cargador Frontal en Etapa de Descarga de Camiones Peerles.
7. Cargador Frontal en Etapa de Carga de Camiones Tronqueros.
8. Motosierrista de Trozado
9. Trineumático Etapa Trozado.

m = Actividad del cargador frontal = { 1; 2 }

1. Etapa de Descarga.
2. Etapa de Carga.

5.9.2 Variables de decisión

X_i = Cantidad de máquinas a asignar tipo i .

5.9.3 Constantes

C_i = Costo unitario de producción de máquina i (\$/m³).

R_i = Rendimiento de maquinaria del tipo i (m³/h)

D = Demanda de producción mínima para el período (m³).

NH = Horas efectivas de trabajo en el período (h).

T = Días hábiles período de planificación.

P_m = Porcentaje de Jornada Cargador Frontal dedicado a actividad m.

5.10 Modelo para Asignación de Maquinaria y Equipos

Para la asignación de máquinas y equipos, se propone un modelo de programación lineal entera (PLE).

Minimizar Z:

$$\sum_{i=1}^9 (C_i * X_i)$$

Restricciones.

Restricciones de producción de Torres.

La producción mínima requerida de las torres de maderero que puede ser en conjunto (si el modelo selecciona los 2 tipos) o individual (si el modelo selecciona una de las 2), debe ser mayor o igual a la demanda para el periodo de planificación dado.

$$\sum_{i=1}^2 X_i * R_i * NH * T \geq D$$

Restricción de Trineumáticos por Torre

La operación contempla, que siempre se debe asignar un trineumático, por cada torre de maderero que se encuentre en operación.

$$\sum_{i=1}^2 X_i = X_3$$

Restricciones de producción de Cargador Frontal por actividad.

El cargador frontal, es una máquina que realiza 2 actividades en el sistema de producción estudiado, un 75% de su jornada efectiva, descarga los camiones Peerles que vienen de las zonas de cosecha, y un 25% de su jornada lo usa para cargar los

camiones tronqueros, que llevan la madera procesada a destino final. La producción mínima requerida para cada una de las actividades debe ser mayor o igual a la demanda para el periodo de planificación dado.

$$X_6 * R_6 * NH * T * P_1 \geq D$$

$$X_7 * R_7 * NH * T * P_2 \geq D$$

Restricciones de producción de Procesador.

La producción mínima requerida para el procesador debe ser mayor o igual a la demanda para el periodo de planificación.

$$X_4 * R_4 * NH * T \geq D$$

Restricciones de producción de Camiones Peerless.

La producción mínima requerida para el transporte intermedio (Camiones tipo Peerles) debe ser mayor o igual a la demanda para el periodo de planificación.

$$X_5 * R_5 * NH * T \geq D$$

Restricciones de producción de Motosierristas en Central de Trozado.

La producción mínima requerida para los motosierristas, debe ser mayor o igual a la demanda para el periodo de planificación.

$$X_8 * R_8 * NH * T \geq D$$

Restricciones de producción de Trineumáticos en Central de Trozado.

La producción mínima requerida para trineumáticos en la central de trozado, debe ser mayor o igual a la demanda para el periodo de planificación.

$$X_9 * R_9 * NH * T \geq D$$

Restricción de no Negatividad

Las variables de decisión pueden tomar solo valores enteros mayores o iguales a 0, de esta manera se restringe el modelo matemático a valores no negativos.

El problema fue programado y resuelto, con el software LINGO versión DEMO (ver Anexo 4).

5.11 Simulación de Escenarios

Como se mencionó anteriormente, para incorporar la variabilidad, a la productividad de las máquinas y equipos, se simularon las asignaciones (soluciones iniciales) del modelo PLE, utilizando la herramienta SIMIO 7.0 versión docente.

El modelo simulado comienza en la producción de la torre madereo (no se considera el volteo, ni las operaciones anteriores), y termina con el carguío del transporte mayor, en la central de trozado. Las operaciones o estaciones intermedias se consideran como servidores de proceso.

Las unidades que se transforman o entidades, corresponde a los árboles volteados, que se van procesando y pasando etapas hasta la etapa de carguío del transporte mayor, y se expresan en m³.

El modelo de simulación se programó mediante la siguiente secuencia de actividades:

1. Diseño del layout del sistema, definición de los servidores y secuencias del sistema, productividades, y función de distribución de probabilidad.
2. Conexión de las entidades y sus trayectorias.
3. Programación de la estructura interna, utilizando los datos productividad y de distribución ajustada, obtenidas anteriormente.
4. Integración de los recursos adicionales, si corresponde.
5. Definición de las entidades y movimiento en la línea de producción.
6. Especificación del tiempo de simulación y del número de iteraciones.
7. Obtención de réplicas, para experimentos.

5.11.1 Escenarios de Variabilidad

Una vez definido el modelo, y con el fin de apreciar los efectos de las variaciones de la productividad (en función de las distribuciones de probabilidad ajustadas) de las máquinas y equipos en el sistema, se simularon 3 escenarios para los sistemas en

estudio: el primer escenario, se modeló con la asignación de número de máquinas y equipos por subsistema que entregó el modelo de optimización para la demanda de 6.000 m³, en tanto el segundo escenario, ocupó como base la configuración máquinas y equipos para la demanda de 8.000 m³. El tercer escenario, ocupó como base la configuración de máquinas y equipos para la demanda de 10.000 m³.

Los escenarios se detallan, a continuación.

Escenario 1: Consideró simular el comportamiento de la producción del sistema para la demanda de 6.000 m³, se tomó de la base asignación óptima (número de máquinas), que arrojó el modelo de programación lineal entera, para dicha demanda, y la distribución de probabilidad ajustada para el tiempo que necesitó una máquina para realizar un ciclo productivo.

Escenario 2: Consideró simular el comportamiento de la producción del sistema para la demanda de 8.000 m³, se tomó de la base asignación óptima (número de máquinas), que arrojó el modelo de programación lineal entera, para dicha demanda, y la distribución de probabilidad ajustada para el tiempo que necesitó una máquina para realizar un ciclo productivo.

Escenario 3: Consideró simular el comportamiento de la producción del sistema para la demanda de 10.000 m³, se tomó de la base asignación óptima (número de máquinas), que arrojó el modelo de programación lineal entera, para dicha demanda, y la distribución de probabilidad ajustada para el tiempo que necesitó una máquina para realizar un ciclo productivo.

Cada escenario de demanda mínima, se simuló 180 h continuas, que corresponden a un mes de trabajo (8,18 horas por jornada por 22 días), como si fuese una línea de producción continua y se replicó 100 veces.

Posterior a la simulación de los escenarios, se analizó las variables de eficiencia y eficacia, como la producción total, la utilización de las maquinarias que componen los sistemas, elementos restrictivos, inventarios en progreso, y se aplicó análisis de varianza, para evidenciar diferencias.

6. RESULTADOS

6.1 Productividad de Máquinas y Equipos

En la Tabla 3, se muestra la productividad de las máquinas y equipos, de acuerdo al estudio de tiempos realizado en las faenas, en términos de metros cúbicos de madera procesados por hora (m^3/h). Esta productividad excluye los eventos indeseables y tiempos considerados improductivos. Se aprecia que las productividades de los equipos son variadas, para un tipo de proceso que se diseña como una línea de producción continua, por lo que se hace necesario configurar máquinas adicionales en los subsistemas, para mantener un balance que permita abastecer al sistema y alcanzar las metas de producción demandadas. Asimismo, los modelos de torres evidencian una disparidad, lo que representa una restricción importante al sistema, pues son las encargadas de abastecer a todo el proceso (primeras en la secuencia).

Tabla 3: Productividad de la maquinaria y equipos del sistema en estudio.

Maquinaria Forestal.	Productividad (m^3/h).
Torre Urus I	14,82
Torre Urus III	23,28
Procesador	71,67
Trineumático en Torres	36,04
Cargador Frontal Etapa de descarga	127,40
Trineumático en Cancha de Trozado	22,69
Cargador Frontal Etapa Carga	59,54
Motosierra	46,75
Transporte Intermedio (Peerless)	16,99
Transporte Mayor	16,21

Fuente: Elaboración propia (2016).

6.2 Ajuste de Funciones de Probabilidad

6.2.1 Torres De Madereo.

Al momento de realizar el estudio el sistema tenía 2 modelos de Torres de Madereo: Urus I con carro Koller y Urus III carro Koller, cada una con productividades y características distintas.

Se analizaron 510 ciclos productivos realizados por los distintos modelos de Torres. El ajuste planteó la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para Distribución Normal, que prueba las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula (H0): Los datos provienen de una distribución normal.

Hipótesis Alternativa (HA): Los datos provienen de una distribución no normal.

Para los 2 modelos de torres, se puede decir, que no existe evidencia suficiente como para rechazar la hipótesis nula, es decir, los datos siguen una distribución normal, los parámetros se muestran en la Tabla 6.

En las Figuras 3 y 4 se puede apreciar gráficamente los resultados de la prueba de bondad de ajuste, y la concordancia de la distribución de los datos con la curva de distribución normal.

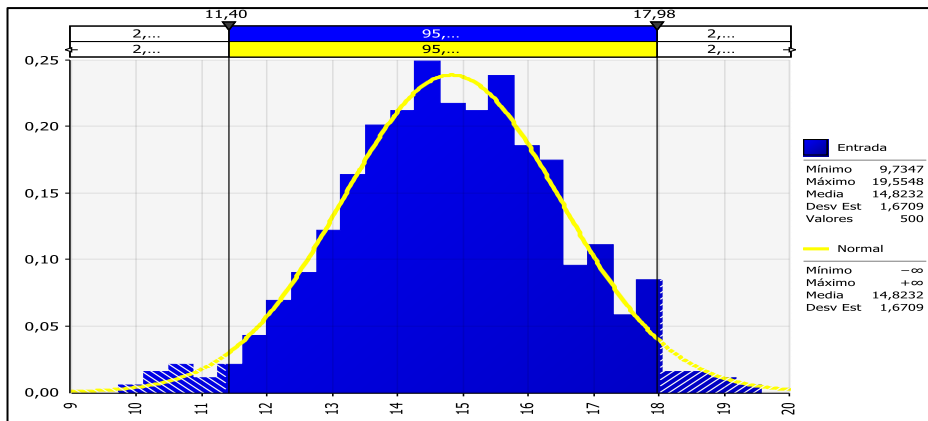


Figura 3: Comparación entre la distribución normal teórica (curva amarilla), con los datos de la Torre Urus I (barras azules).

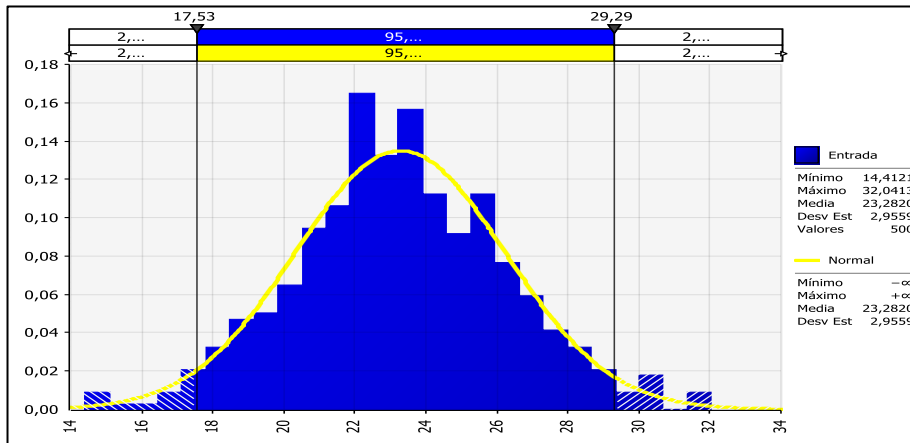


Figura 4: Comparación entre la distribución normal teórica (curva amarilla), con los datos de la Torre Urus III (barras azules).

6.2.2 Procesador

Se analizaron 660 ciclos productivos realizados por el Procesador. El ajuste, indicó que la distribución normal, se adapta de mejor forma a los datos.

El resultado es una Discrepancia de 0.0329 y P-valor $0,08273 > 0,05$, por lo que no existe evidencia suficiente como para rechazar la hipótesis nula. En la Figura 5, se puede apreciar gráficamente la concordancia de la distribución de los datos al contrastarlo con una curva normal. Sus parámetros se pueden apreciar en la Tabla 6.

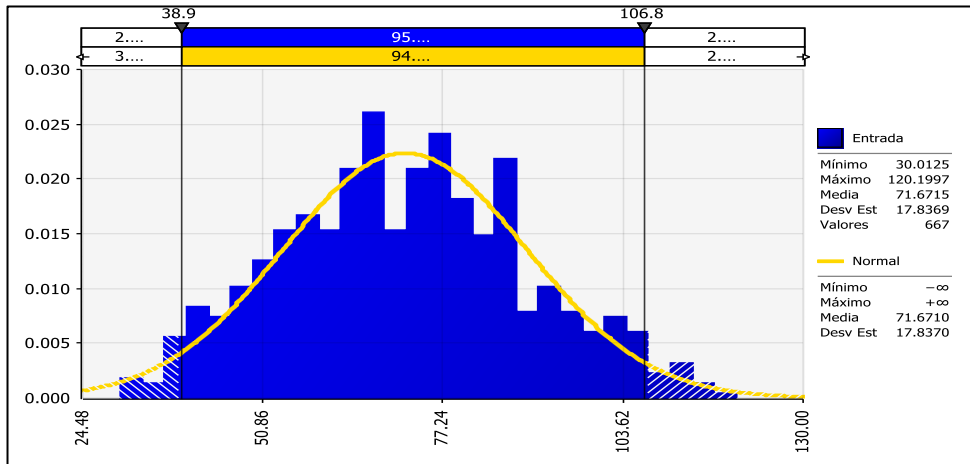


Figura 5: Comparación entre la distribución normal teórica (curva amarilla), con los datos del Procesador (barras azules).

6.2.3 Trineumáticos asociados a Torres

Se analizaron 388 ciclos productivos realizados por el Trineumático en etapa de Madereo.

El resultado es una Discrepancia de 0.0391 y P-valor $0,1596 > 0,05$, por lo que no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula, por lo que se ajustó a una distribución normal.

En la Figura 6, se puede apreciar gráficamente, los resultados de la prueba de bondad de ajuste, y la concordancia de la distribución de los datos al contrastarlo con una curva normal. Sus parámetros se pueden apreciar en la Tabla 6.

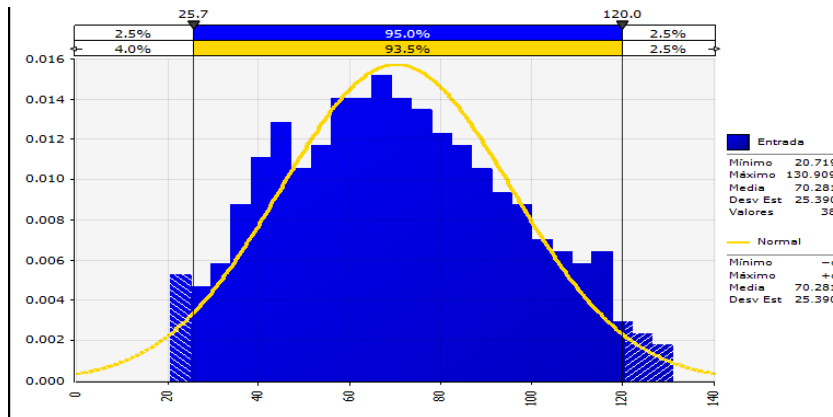


Figura 6: Comparación entre la distribución normal teórica (curva amarilla), con los datos Trineumático en etapa de madereo (barras azules).

6.2.4 Cargador Frontal en Etapa Descarga

Se analizaron 158 ciclos productivos realizados en la Descarga en Etapa Cancha de trozado. El resultado es una discrepancia de 0.0455 y P-valor $0,895 > 0,05$, no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula por lo que se afirma que Los valores de productividad en distintos ciclos de Descarga en Etapa Cancha de Trozado se ajustan a una distribución Weibull.

En la Figura 7, se puede apreciar gráficamente, los resultados de la prueba de bondad de ajuste, y la concordancia de la distribución de los datos con una curva de distribución Weibull. Sus parámetros se pueden apreciar en la Tabla 6.

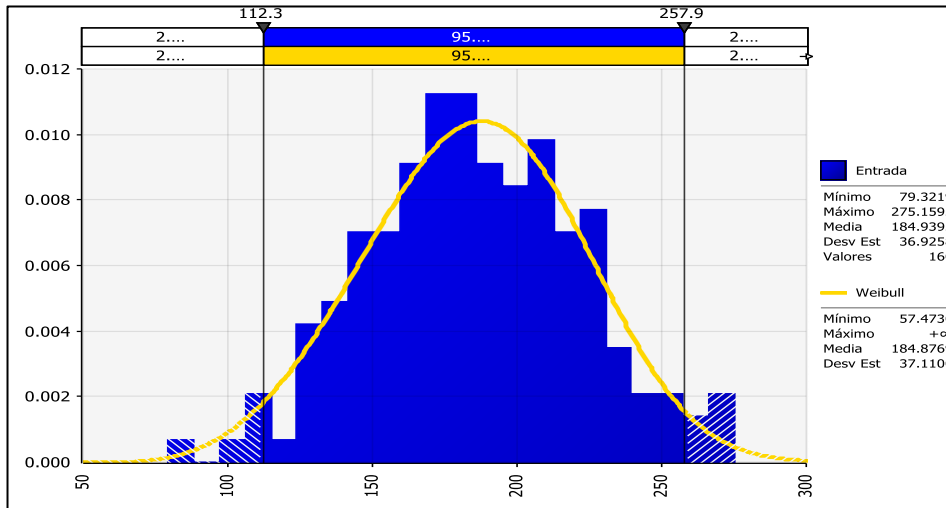


Figura 7: Comparación entre la distribución Weibull teórica (línea amarilla), con los datos de cargador frontal en etapa de descarga en cancha (barras azules).

6.2.5 Trineumáticos en Cancha de Trozado

Se analizaron 161 ciclos productivos realizados por el Trineumático en Etapa Cancha de Trozado, obteniendo productividad en cada uno de ellos.

Luego de realizar la prueba Kolmogorov-Smirnov cuyo resultado es una Discrepancia de 0,0546 y P-valor $0,7508 > 0,05$, no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula por lo que se afirma que los valores de productividad en distintos ciclos del Trineumático en Etapa Cancha de Trozado se ajustan a una distribución Weibull. Sus parámetros se pueden apreciar en la Tabla 6.

En la Figura 8, se puede apreciar gráficamente los resultados de la bondad de ajuste, y la concordancia de los datos con una distribución Weibull.

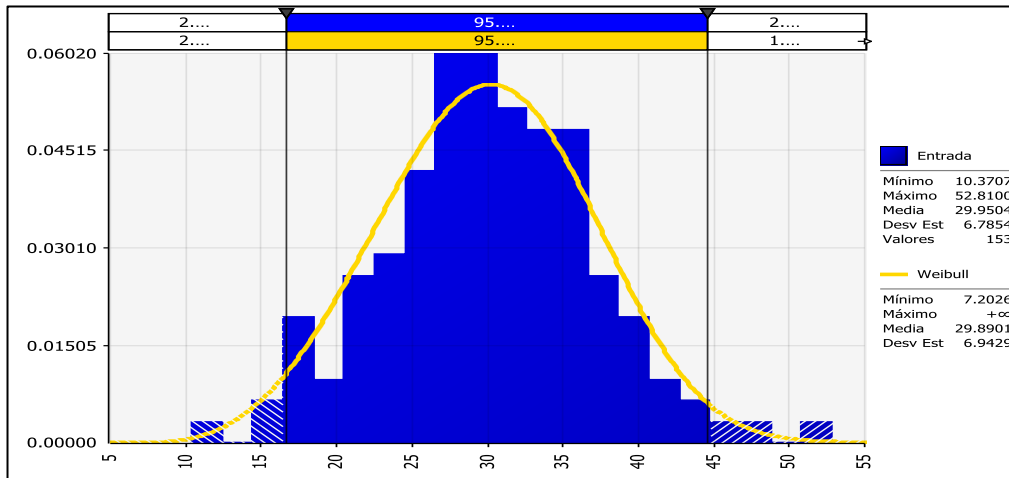


Figura 8: Comparación entre la distribución Weibull teórica (línea amarilla), con los datos de trineumático en cancha de trozado (barras azules).

6.2.6 Cargador Frontal Etapa de Carga

Se analizaron 220 ciclos productivos realizados por el Cargador Frontal Etapa Carga, obteniendo productividad en cada uno de ellos.

El resultado es una Discrepancia de 0,0063 y P-valor $0,856 > 0,05$, por lo que no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula por lo que se afirma que los valores de productividad en distintos ciclos del Cargador Frontal Etapa Cancha se ajustan a una distribución normal.

En la Figura 9, se puede apreciar gráficamente, los resultados de la prueba de bondad de ajuste, y la concordancia de la distribución de los datos con una curva de distribución normal. Sus parámetros se pueden apreciar en la Tabla 6.

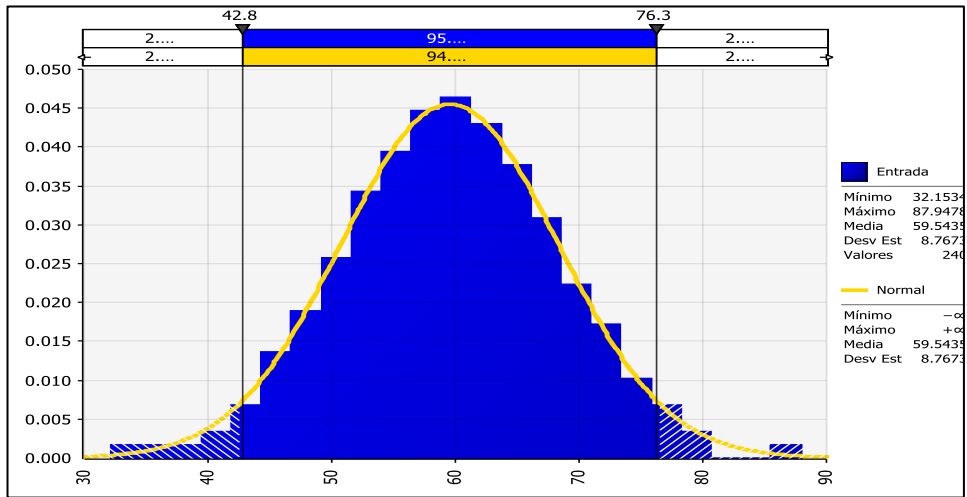


Figura 9: Comparación entre la distribución normal teórica (línea amarilla), con los datos de Cargador Frontal en etapa de carga en central de trozado (barras azules).

6.2.7 Motosierras en Trozado

Se analizaron 150 ciclos productivos realizados por los Motosierristas. El resultado es una Discrepancia de 0,084 y P-valor $0,341 > 0,05$, por lo que no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula por lo que se afirma que, se ajusta a una distribución normal.

En la Figura 10, se puede apreciar gráficamente, los resultados de la bondad de ajuste, y la concordancia con una curva de distribución normal. Sus parámetros se pueden apreciar en la Tabla 6.

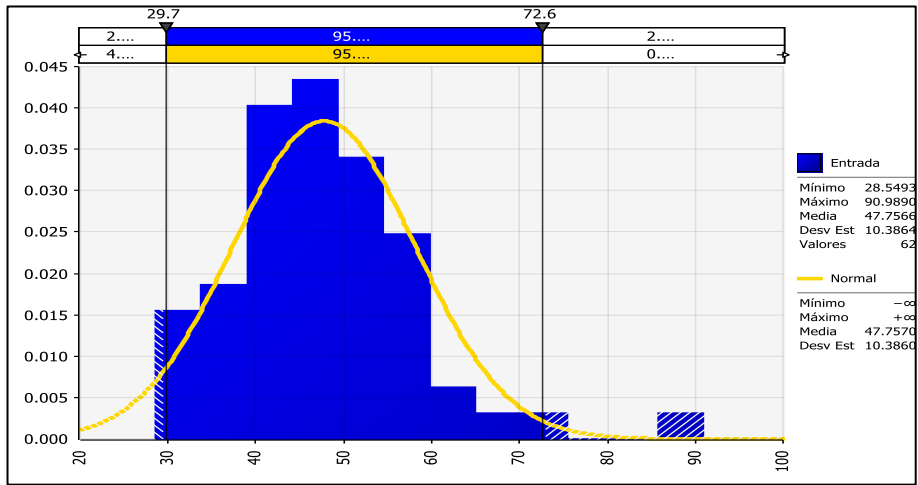


Figura 10: Comparación entre la distribución normal teórica (línea amarilla), con los datos de Motosierristas realizando trozado en central de trozado (barras azules).

6.2.8 Subsistema Transporte

Transporte Intermedio (Camiones Peerles)

Para efectos de determinar a productividad del transporte intermedio, se realizó un estudio de tiempo continuo. Tanto las tarifas como, la productividad de este subsistema están influenciadas por la distancia de transporte, por lo que se construyó un modelo de regresión para estimar los tiempos totales en función de esta distancia. Los estadígrafos y la validación del modelo de regresión, se muestran en la Tabla 4 y 5:

Tabla 4: Estadísticas de la regresión, para el tiempo total, en función de la distancia de transporte.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,950
Coefficiente de determinación R ²	0,903
R ² ajustado	0,899
Error típico	0,126
Observaciones	24

Fuente: Elaboración propia (2016).

Tabla 5: Validez de los coeficientes de la función de tiempos variables para el transporte peerles.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	0,18036935	0,07981483	2,25984775	0,03407235
Dist. del transporte	0,08379116	0,00583358	14,3635969	1,1714E-12

Fuente: Elaboración propia (2016).

De esta forma la función de tiempo total considerando los tiempos fijos (1,4 h), que corresponden a los tiempos en las estaciones terminales (carga y descarga), queda (sin demoras):

$$\text{Tiempo total (h)} = 1,4 + (0,18 + 0,084 * Dt)$$

Dónde:

Dt= Distancia de transporte en km.

La distancia promedio de transporte interno en el estudio, para los camiones peerles, fue de 10 km, la carga promedio de 40 m³, por viaje, y su velocidad media de desplazamiento de 10 km/h.

Tabla 6: Parámetros de las distribuciones probabilísticas ajustadas para la productividad de los subsistemas, donde Media= media de productividad, D. Estan= Desviación Estándar; A y B = parámetros de distribución.

Maquinaria Forestal.	Distribución Ajustada	Parámetros (m³/H).
Torre MI-00337	Normal	Media= 14,82
		D. Estan= 1,67
Torre TG-00109	Normal	Media= 23,28
		D. Estan= 2,95
Procesador sistema con central de trozado	Normal	Media= 71,67
		D. Estan= 17,83
Trineumático de Madero	Normal	Media= 36,01
		D. Están= 12,6
Cargador Frontal Etapa de descarga	Weibull	A= 3,83
		B= 140,89
Trineumático Etapa Cancha de Trozado	Weibull	A= 3,6328
		B= 25,165
Cargador Frontal Etapa Carga	Normal	Media= 59,54
		D. Estan= 8,76
Motosierra	Normal	Media= 47,75
		D. Estan= 10,38

Fuente: Elaboración propia (2016).

En general, la función de probabilidad, que se ajustó mejor, para la gran mayoría de las maquinarias y equipos del sistema de producción, fue la distribución Normal, solo 2 de las 8 máquinas se ajustaron a una distribución de Weibull.

6.3 Resultados de Asignación del Modelo de Programación Lineal Entera

En la Tabla 7, se muestra la asignación que realizó el modelo, para las 3 demandas mínimas de producción mensual que debe surtir el sistema. Esto nos permite ver el comportamiento en el costo, respecto del incremento de la producción, y por lo tanto los efectos de modificar la configuración. La primera meta que se probó fue de 6.000 m³, y el costo de la solución que arrojó el modelo fue de 9.585 pesos por metro cúbico; la segunda meta fue de 8.000 m³, y el costo de la solución que arrojó el modelo fue de 11.767 pesos por metro cúbico y la tercera meta de producción fue de 10.000 m³, y el costo de la solución que arrojó el modelo fue de 16.005 pesos por metro cúbico. Con estos datos, es posible afirmar que a medida que crece la necesidad de producción, el costo por unidad de producción, también crece. Este aumento del costo unitario, se debió a la necesidad de aumentar máquinas (en algunos subsistemas), para cumplir con la demanda de producción.

Tabla 7: Cantidad de máquinas en el sistema de cosecha, según el modelo de asignación, para 3 metas de producción mensual.

Maquinaria	6.000 m³	8.000 m³	10.000 m³
Torre Urus III	1	2	2
Torre Urus I	1	0	1
Trineumático en Torres	2	2	3
Procesador	1	1	1
Transporte Intermedio (Peerless)	2	3	4
Cargador Frontal Etapa de descarga	1	1	2
Cargador Frontal Etapa Carga	2	2	2
Motosierristas	1	1	2
Trineumático en Cancha de Trozado	2	2	3

Fuente: Elaboración propia (2016).

Este crecimiento en maquinaria, que permitió cumplir con la demanda, generó grandes “holguras”, quedando capacidad productiva sin ocupar, y por lo tanto un aumento de los costos al tener que mantener máquinas en la operación, con una baja utilización. En la Tabla 8, se muestran las holguras o capacidad productiva sobrante, según el modelo.

Tabla 8: Holguras que arroja el modelo para los escenarios de demanda mínima.

Maquinaria	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Torre Urus III	852	985	1.042
Torre Urus I	0	0	0
Trineumáticos en Torres	6.971	11.457	9.457
Procesador	6.903	4.705	2.903
Transporte Intermedio (Peerless)	118	3.359	2.237
Cargador Frontal etapa de descarga	2.030	773	6.061
Cargador Frontal etapa carga	5463	860	1.463
Motosierristas	2.053	53	6.106
Trineumáticos en cancha de trozado	2.170	2.736	2.255

Fuente: Elaboración propia (2016).

Como se aprecia en la Tabla 8, aun cuando las holguras entre las metas de producción de 6.000 m³ y 8.000 m³, parecen semejantes e incluso mejora el aprovechamiento de la maquinaria en la meta de 8.000 m³, la incorporación de un nuevo camión peerless (ver Tabla7), para cumplir con la meta de producción de 8.000 m³, aumentó el costo de producción, aun cuando la utilización de ese recurso, sea baja, de acuerdo a la holgura que evidencia. En cuanto a la diferencia del costo de la solución, para la meta de producción de 10.000 m³, esta radica principalmente, en la incorporación de un nuevo cargador frontal, en la central de trozado, y una nueva cuadrilla de motosierristas, que como en el caso anterior, permitió cumplir con la restricción, pero su utilización en el sistema, es más bien baja. Se incorporan además una nueva torre, y trineumáticos. Asimismo, se aprecia que la maquinaria más restrictiva del sistema de cosecha en estudio, son las torres de madereo (subsistema madereo), para las 3 metas de producción, su holgura es baja, e incluso la torres Urus I, no tiene holgura en el escenario de 6.000 m³ y 10.000 m³, por lo tanto se debe tener especial cuidado en mantener su operación, para no comprometer la meta de producción del sistema. Para el escenario de 8.000 m³, el elemento más restrictivo fue la cuadrilla de motosierristas, que prácticamente no tiene holgura, en segundo lugar, los trineumáticos de la central de trozado, que ordenan y clasifican, para el carguío del transporte mayor. Por el contrario, los trineumáticos que acompañan a las torres, no representan ninguna limitación para el sistema, así como el procesador. Otras maquinarias, como el cargador frontal y los camiones peerless, poseen una restricción intermedia, y va a estar determinada por la meta productiva que se proponga.

6.4 Análisis del Efecto de la Variabilidad en el Sistema

Como se menciona en la metodología, el efecto de la variabilidad se analizó, simulando la configuración que arrojó el modelo de PLE, para los escenarios de demanda mínima. Para la formulación del modelo, cada maquinaria se consideró un servidor en la línea de producción, y su productividad se expresó de acuerdo a una función de distribución probabilidad. El transporte intermedio (Camiones Peerless) se trató como un “vehículo”, que debe recorrer una distancia, de 10 km, con una velocidad media de 10 km/h y con una capacidad máxima de carga de 40 m³. Las entidades que se transforman en el modelo, corresponden a un árbol, cuyo volumen aproximado corresponde a 1 m³ de madera sólida.

En la Tabla 9, se aprecia el resultado de la simulación de los escenarios, las entidades que “ingresaron”, son las que aportan las torres, de acuerdo a su función de probabilidad y corresponden al primer elemento del sistema, y las unidades que salieron, son las que pasaron por todos los servidores del proceso, hasta su salida. En los 3 escenarios, las unidades que ingresaron probabilísticamente, son más que las demanda el escenario, lo que es coincidente con las holguras, que se visualizan en la Tabla 8, sin embargo, en la simulación esta “holgura” es menor, salvo en el escenario 3 (de mayor demanda), donde hay coincidencia en las unidades. Asimismo, se observa que el escenario 2, donde se simuló la configuración, para producir 8.000 m³, no cumplió con la demanda de producción mínima requerida. En el Anexo 2, se muestran los datos de entrada para el modelo.

Tabla 9: Producción total en m³ de los escenarios de demanda mínima ejecutados en la simulación.

Item	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Ingresaron al sistema	6.463	8.322	11.056
Salieron del Sistema (procesados)	6.341	7.888	10.800
Inventario (quedaron sin procesar)	122	434	256
Inventario en porcentaje %	2%	5%	2%

Fuente: Elaboración propia (2016).

Luego de la simulación, se realizó un experimento, donde los escenarios de demanda de producción mensual mínima, fueron replicados 100 veces. Un resumen de los parámetros estadísticos observados, se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10: Resumen de los parámetros estadísticos de los escenarios de demanda mínima en m³.

Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Media	6.307	7.902	10.821
Error típico	2,77	1,20	3,88
Mediana	6.311	7.903	10.812
Moda	6.315	7.899	10.804
Desviación estándar	27,67	11,84	38,03
Coefficiente de Variación	0,44%	0,15%	0,35%
Curtosis	-0,59	2,50	0,93
Coefficiente de asimetría	0,01	-1,16	0,93
Rango	122	68	194
Valor Mínimo	6.250	7.857	10.750
Valor Máximo	6.372	7.925	10.944
Cuenta	100	98	96
Límite Confidencial Superior (95%)	6.312	7.904	10.829
Límite Confidencial Inferior (95%)	6.302	7.900	10.814
Error absoluto	5,49	2,37	7,71

Fuente: Elaboración propia (2016).

Como se aprecia en la Tabla 10, el escenario 1 y 3, cumplen siempre con la demanda mínima requerida; incluso la réplica de menor producción (valor mínimo) para ambos escenarios, sobrepasa lo que se pedía a la configuración. Sin embargo, el escenario 2 no llegó a cumplir con lo requerido para la configuración, en ninguna de las réplicas, ni siquiera en la que se obtuvo la más alta producción (valor máximo). El coeficiente de asimetría, nos indica que en el escenario 1, la concentración de los valores de producción es simétrica, en tanto en el escenario 2 tienden a concentrarse a la izquierda de la media, es decir, existen más réplicas donde la producción es menor que la media, a diferencia del escenario 3 donde asimetría es positiva.

En cuanto a la variabilidad de los escenarios, se puede observar que es bastante baja, el coeficiente de variación, es inferior al 1%, para los 3 escenarios, lo que habla de una muestra uniforme, el error típico (error estándar de estimación para la media), es bajo, y por lo tanto el error absoluto es prácticamente inexistente, por lo que, los límites confidenciales tienen un rango muy acotado. A la luz de estos datos, se puede afirmar que el comportamiento probabilístico de la producción de la maquinaria, no afectó de manera significativa, el cumplimiento de la demanda de producción mínima solicitada para cada escenario. Una explicación a este resultado, podría ser el hecho, que el estudio de productividad consideró solo los tiempos efectivos (productivos), para el cálculo de la productividad y ajuste de las curvas de distribución de probabilidad, eliminándose el aporte a la variabilidad, de los tiempos muertos o improductivos. Esto homogenizó la muestra, y por lo tanto hizo que en la simulación no se evidenciara como significativo el aporte de la variabilidad.

Sin embargo, a pesar de que el aporte de la variabilidad no fue significativo, para el cumplimiento de las demandas de producción mínimas, la asignación de equipos del escenario 2 no logro cumplir con lo que se pedía. Como se aprecia en la Tabla 11, la producción de máquinas y equipos, por escenario de demanda mínima (producto de la asignación del modelo de PLE), necesita que exista una holgura de producción para cada máquina componente del sistema, pues a medida que se avanza en el proceso, queda materia prima sin procesar. En ese ámbito, el escenario 2 fue el menos eficaz con un 95% de producción procesada totalmente, en tanto el escenario 1 y 3, procesaron un 98%.

Tabla 111: Producción de máquinas por escenarios de demanda mínima en m³.

Maquinaria	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Torres	6.463	8.322	11.056
Trineumáticos en Torres	6.450	8.319	11.053
Procesador	6.450	8.318	11.050
Transporte Intermedio	6.374	8.200	10.960
Cargador Frontal etapa de descarga	6.374	8.200	10.836
Motosierristas	6.360	7.938	10.812
Trineumático en cancha de trozado	6.349	7.893	10.805
Cargador Frontal etapa carga	6.341	7.888	10.800

Fuente: Elaboración propia (2016).

Asimismo, se puede apreciar que en el escenario 2 los motosierristas, fueron un elemento restrictivo importante, pues no alcanzaron a procesar lo requerido, para cumplir con la demanda mínima.

Otro aspecto importante, a considerar en la asignación o configuración de los sistemas de producción, y que es posible apreciar en la simulación, es la utilización de las máquinas y equipos dentro de las horas de trabajo programadas. En ese sentido, en la Tabla 12, se puede visualizar, el porcentaje de tiempo en que las máquinas y equipos del sistema están en actividad productiva. La configuración del escenario 2, es la que tiene un mayor porcentaje de utilización, sin embargo, tiene 3 maquinarias, con sobre 90%, de utilización, los motosierristas llegaron a un 98%, coincidiendo esto con su aspecto restrictivo recién mencionado, y donde pudiese estar la explicación, del porque en la simulación el escenario no cumple con la demanda requerida (8.000 m³), aun cuando la asignación hecha por el modelo, afirma que puede hacerlo, aunque la holgura es baja. El Transporte intermedio se repite como restrictivo para todos los escenarios, debiendo poner especial atención a su continuidad, para poder cumplir con las demandas requeridas.

Tabla 122: Porcentaje de utilización de las máquinas asignadas, para cada escenario.

Maquinaria	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Torres			
Trineumáticos en Torres	51%	64%	57%
Procesador	50%	65%	86%
Transporte Intermedio	97%	92%	94%
Cargador Frontal etapa de descarga	27%	35%	23%
Motosierristas	78%	98%	66%
Trineumático en cancha de trozado	77%	95%	86%
Cargador Frontal etapa carga	30%	37%	50%
Promedio de Utilización	59%	69%	66%

Fuente: Elaboración propia (2016).

6.6 Evaluación de Costos de la Propuesta

Una de las ventajas de la simulación, es que permite examinar la actividad productiva, más a fondo, y con ello tener un mejor control de los costos en las que esta incurre. Conocer las horas de operación, de los equipos permite calcular los costos variables, de manera más precisa y otorga una base confiable para la estimación de los costos

unitarios y totales de producción. Para el cálculo del costo unitario por escenario, primero se determinó el costo total de producción, en base a los costos horarios totales. El costo fijo total (CF Total), se determinó, multiplicando el costo fijo horario, por las horas de trabajo al mes (180), para el costo variable total, en primer término, se obtuvieron las horas de operación mensual, multiplicando el porcentaje de utilización de las máquinas (obtenido de la simulación), por las horas de trabajo al mes (180), y luego por el costo variable horario. Para el costo unitario se dividió el costo total, por las unidades producidas por el sistema en la simulación (ver Anexo 5), Un resumen se muestra en la Tabla 13.

Tabla 133: Costo de Producción, determinado en base a la simulación, para cada escenario de demanda.

Maquinaria	Costo Total 1	Costo Total 2	Costo Total 3
Torre de madereo Urus III	6.052.264	12.104.528	12.104.528
Torre de madereo Urus I	5.671.480	-	5.671.480
Trineumáticos en Torres	4.550.443	4.923.407	7.083.871
Procesador	7.460.002	8.089.880	8.971.709
Transporte Intermedio (Peerless)	14.363.428	21.109.010	28.377.950
Cargador Frontal Etapa de descarga	7.527.899	7.941.934	14.641.763
Motosierristas	1.389.248	1.477.781	2.672.255
Trineumáticos en Cancha de Trozado	5.296.371	5.812.783	8.331.866
Cargador Frontal Etapa Carga	13.240.330	13.828.216	14.920.004
Costo total (\$)	65.551.465	75.287.540	102.775.426
Producción m³ (simulada)	6.341	7.888	10.800
Costo Unitario de Prod (\$/m3)	10.338	9.545	9.516

Fuente: Elaboración propia (2016).

En la Tabla 13, se observa que el costo unitario de producción, es mayor para el escenario 1 que es de menor demanda, esto puede estar relacionado con que este escenario, es también el que presentó el menor porcentaje de utilización de las máquinas. En tanto los escenarios 2 y 3, presentaron costos unitarios similares. Para evidenciar diferencias, entre los costos de producción unitarios de los escenarios 2 y 3, se tomó una muestra de 29 réplicas al azar, a las que se les determinó su costo unitario de producción, y posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (Anova), con una confiabilidad del 95 %, los resultados se muestran en la Tabla 14.

Tabla 144: Análisis de Varianza, para costos unitarios de producción, escenarios 2 y 3.

Grupos	Cuenta	Promedio	Varianza	F	Valor P	Valor crítico para F
Escenario 2	29	9.529	544	0,057	0,813	4,013
Escenario 3	29	9.530	129			

Fuente: Elaboración propia (2016).

El análisis de varianza, nos muestra que no existe diferencia en los costos de producción unitarios, entre los escenarios 2 y 3. Este resultado, es muy significativo respecto de la problemática en estudio, ratifica la propuesta de complementar los métodos para la asignación de maquinaria, y aunque el aporte de la variabilidad siguió siendo pequeño, fue suficiente, para influir en este resultado.

Luego de realizado, los análisis, se puede afirmar que el sistema de producción en estudio tendría su mejor desempeño, en el escenario 3, es decir, con una demanda de 10.000 m³. Esto porque, en el escenario 1, la baja utilización de la maquinaria, hace que el costo unitario sea muy alto, en tanto en el escenario 2, aunque la utilización es un tanto mayor que en el escenario 3, existen 3 maquinarias, que se encuentran con una utilización demasiado alta, como el caso de los motosierristas que necesitan un 98%. Para el caso del transporte es posible tener utilidades más altas, pues en la práctica se pueden ampliar horarios, establecer turnos, trabajar de noche, etc.

El modelo de asignación (PLE, y simulación), permite visualizar que los escenarios 2 y 3, son los más eficientes, por lo que se podría sugerir que no es conveniente asignar este sistema de producción, para demandas mensuales, menores a 8.000 m³ mensuales, por el contrario, el modelo es más eficiente en el escenario 3 (10.000 m³ mensuales), y tienes menos riesgo en su desempeño, debido a que la utilización máxima la tiene el transporte, que es perfectamente ampliable en su desempeño, a diferencia del escenario 2, donde incorporar nuevos equipos, para no saturar la utilización de los motosierristas por ejemplo, aumentarían el costo unitario.

Eliminar del estudio eventos indeseables, o improductivos, para fijarse solo en la capacidad efectiva de las máquinas y su productividad, redujo la variabilidad, y no

permitió, que no se observasen grandes diferencias entre los escenarios probados en términos de producción del sistema. La principal fortaleza de la simulación está en ser una versión de laboratorio del sistema real, en el cual es posible experimentar bajo condiciones controladas (Aracena et al, 2007).

Como menciona Pérez et al (2005), la optimización y simulación son complementarias, y en este caso como en otros, ayudan a la mejora de sistemas complejos, ambas disciplinas capitalizan fortalezas, para la toma de decisiones, y es muy deseable que estos métodos se complementen (Rojas et al, 2012).

En el caso analizado, el aporte probabilístico, de los rendimientos de la maquinaria, que fueron simulados, no cambió o no puso en contraposición, la asignación que había realizado, el modelo de PLE, salvo en el escenario, 2 que aunque ingresaban al sistema un poco más de la demanda mínima requerida, esta no alcanzaba a procesarse en su totalidad. El principal aporte de la probabilidad y la simulación, se observó en la posibilidad de complementar la asignación del modelo de PLE, investigando el comportamiento del sistema en su secuencia y operación, para determinar el costo unitario de producción.

Finalmente, la problemática que se estudió, apuntó a lograr una forma de asignación que mejore la eficiencia del sistema de producción, contrastando los resultados de la asignación se puede afirmar, que esta forma de asignar asegura una mayor eficiencia de las máquinas y equipos que componen la línea de producción, debido a que es posible configurar el sistema, considerando aparte de los aspectos relacionados con cumplir con la demanda mensual requerida, otros que se obtienen al simular, como la utilización de las máquinas y equipos, las unidades producidas, cuellos de botella, tiempos requeridos, etc. Que de la forma que hoy se realiza, no se podrían considerar a la hora de planificar y constituyen los problemas que se mencionaron en el capítulo correspondiente.

7. CONCLUSIONES

1.- En relación a la propuesta, se puede mencionar que el modelo de asignación, y la simulación, son complementarias y otorgan información valiosa a los planificadores, para mejorar la eficiencia en la asignación de equipos y máquinas, visualizando de antemano, las posibles restricciones, los porcentajes de utilización de la maquinaria, y manejar opciones de mejora para cumplir con los requerimientos o eliminar restricciones.

2.- Para el caso en estudio, el aporte de la variabilidad en las funciones de producción de las máquinas presentes en el sistema, no fue relevante como para cambiar la asignación del modelo determinista.

3.- Respecto de los costos del sistema, la simulación permite visualizar, las horas de operación efectiva de las máquinas (utilización); con esto es posible separar los costos fijos, de los variables, por lo que se convierte en un aporte para los planificadores a la hora de estudiar los costos de la producción, y/o la negociación de tarifas con empresas contratistas.

4.- Para el caso en estudio, la propuesta de asignación, consignó al escenario 3, como el más eficiente, para el sistema de producción en estudio, debido a que arrojó un costo unitario producción similar al escenario 2, pero con una producción mayor. Por el contrario, el escenario 1 fue el más ineficiente.

5.- Respecto del método propuesto, y en comparación a lo revisado en la bibliografía respecto de modelos de asignación, se puede mencionar que esta propuesta, permite flexibilidad para la planificación, pudiendo probar escenarios distintos que otorguen confiabilidad al cumplimiento de plazos y efectividad en el cálculo de los costos.

6.- En relación a los escenarios probados, se puede mencionar que en términos de asignación, tanto el escenario 1 y como el 3, respondieron a la demanda requerida, en tanto la asignación para el escenario 2, no alcanzó a cumplir la demanda mínima.

7.- El modelo determinista, basado en programación lineal entera, es una solución sencilla, para asignar equipos, cuando las restricciones que se plantean tienen que ver solo con el cumplimiento de una demanda.

8.- Es conveniente seguir profundizando en estudios de este tipo, explorando herramientas de **optimización vía simulación**, y con ello aproximarse de mejor forma a las dimensiones reales de los sistemas. Otro elemento que se debe estudiar es la secuencia de las operaciones; eso permitiría comparar distintos sistemas, y sus configuraciones.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ACOSTA, M. (2012). Estudios de metamodelos en optimización vía simulación (EN LINEA) Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/2492/1/1080224759.pdf> (Recuperado el 17 de mayo del 2015).
2. ACUÑA, E., DRAKE. F., Y GARCIA, M. (2011). Una Aplicación de Apoyo a la Toma de Decisiones para el Costeo de Maquinarias de Cosecha Forestal. (EN LINEA) Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48818717020> (Recuperado el 8 de septiembre del 2015).
3. ARACENA,P., AEDO D, Y LANDEROS R. (2007). Balanceo de un sistema de cosecha mecanizado utilizando simulación de eventos discretos (EN LINEA) Disponible en:
http://www.academia.edu/6906911/BALANCEO_DE_UN_SISTEMA_DE_COSECHA_MECANIZADO_UTILIZANDO_SIMULACION_DE_EVENTOS_DISCRETOS_BALANCING_A_MECHANIZED_HARVESTING_SYSTEM_USING_DISCRETE_EVENT_SIMULATION (recuperado el 7 de septiembre del 2015).
4. ARROLLO, C. (2005). Evaluación técnica y modelamiento de procesador en cosecha de Pinus radiata en la X Región (EN LINEA) Disponible en:
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/fifa779e/doc/fifa779e.pdf> (Recuperado el 13 de julio del 2015).
5. BARRIOS, A., LOPEZ, A., NIETO, V. (2008). influencia del diámetro medio del rodal y las distancias medias de extracción en los costos de un sistema de cosecha en bosques de Eucalyptus globulus en la zona central de chile. (EN LINEA) Disponible en:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012007392008000100006&script=sci_arttext (Recuperado el 8 de septiembre del 2015).
6. BOSSI, P. (2007). Estudio de tiempo y rendimiento en torres de madereo en predio ranchillo, séptima región (EN LINEA) Disponible en:
http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/bossi_p/html/index-frames.html (Recuperado el 13 de julio del 2015).

7. BOUTRICO, G., HENRÍQUEZ, F., BAESLER, F., Y RAMÍREZ, M. (2001). Optimización en Simulación vía Inteligencia Artificial: Aplicación a un Problema de Manejo de Materiales. (EN LINEA) Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=29901003> (Recuperado el 9 de septiembre del 2015).
8. CÁNDANO, F. (2009). Aprovechamiento forestal de impacto reducido experiencias en la investigación y la capacitación en operaciones forestales en cuba (En LINEA) Disponible en: <http://biblioteca1.infor.cl:81/DATAFILES/25180-2.pdf> (Recuperado el 12 de Junio del 2015).
9. CEBALLOS CARILLOS, J. A., FERNÁNDEZ LEDESMA, J. D, Y RESTREPO NÚÑEZ. E. D. (2013). Aplicación de un modelo de simulación discreta en el sector del servicio automotor. Revista Ingeniería Industrial, 1(1), 51-61.
10. CONTRERAS, M., BAESLER, F., MALDONADO, L. (2010). Optimización de las operaciones portuarias mediante simulación y metodología de superficie respuesta. Revista de Ingeniería Industrial, U Bio Bio, Año 9 N° 2: 73-92.
11. CONWAY, S. (1982). Logging Practices: Principles of timber harvesting systems. Miller Freeman Publications, San Francisco, USA, 432 p.
12. CARRANZA (2010). Uso de Statfit. Apuntes.
13. DOMINGUEZ, J. A. (1997). Dirección de operaciones: aspectos estratégicos en la producción y los servicios. McGraw-Hill.
14. DOMÍNGUEZ, L. (2007). Aplicación del análisis de riesgo a la terminación de obras de proyectos petroleros. (EN LINEA) Disponible en: <file:///C:/Users/ALBERTO.ALBERT/Desktop/simulacion%20de%20montecarlo.pdf> (Recuperado el 14 de junio del 2015).
15. GARCÍA, J. (2014). Análisis e implementación de algoritmos evolutivos para la optimización de simulaciones en ingeniería civil. (EN LINEA) Disponible en: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1401/1401.5054.pdf> (Recuperado el 8 de septiembre del 2015).

16. GORDILLO, C. (2008). Aplicación de métodos de optimización y simulación en un problema de asignación de un aeropuerto. (EN LINEA) Disponible en:
https://books.google.cl/books?id=hk3R9dLQw6AC&pg=PT8&lpg=PT8&dq=Aplicaci%C3%B3n+de+m%C3%A9todos+de+optimizaci%C3%B3n+y+simulaci%C3%B3n+en+un+problema+de+asignaci%C3%B3n+de+un+aeropuerto&source=bl&ots=cZS0FqJtm2&sig=TVg5Y_ZXNnzjAvFc-SoZQNrdaU&hl=es-419&sa=X&ved=0CCUQ6AEwAWoVChMIgMjequHoxwIVSAuQCh0uIAyt#v=onepage&q=Aplicaci%C3%B3n%20de%20m%C3%A9todos%20de%20optimizaci%C3%B3n%20y%20simulaci%C3%B3n%20en%20un%20problema%20de%20asignaci%C3%B3n%20de%20un%20aeropuerto&f=false (Recuperado el 8 de septiembre del 2015).
17. INFOR (2014). Anuario forestal 2014 (EN LINEA) Disponible en:
<http://wef.infor.cl/publicaciones/anuario/2014/Anuario2014.pdf> (Recuperado el 14 de julio del 2015).
18. KALOUDIS, S., YIALOURIS, C., LORENTZOS, N., KARTERIS, M., SIDERIDIS, A. (2010). Forest management planning expert system for wildfire damage reduction. (EN LINEA) Disponible en:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169909001501> (Recuperado el 7 de septiembre del 2015).
19. KARLSSON, J., RONNQUIST, M. (2003). Short-term harvest planning including scheduling of harvest crews. *International Transactions in Operational Research*, 10 (2003), 413-431.
20. LIN R, SIR M, PASUPATHY K. (2012). Multi-objetive simulation optimization using data envelopment analysis and genetic algorithm: specific apliccation to determining optimal resource levels in surgical services. (EN LINEA) Disponible en:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048312002174> (Recuperado el 17 de julio del 2015).
21. MORALES, R., WEINTRAUB, A. (1989). El enfoque jerárquico en la planificación forestal. *Actas II Taller de Producción Forestal*, Fundación Chile, Concepción, Chile.

22. OLGUIN, J. (2008). Algoritmo para la Optimización de Parámetros Continuos Vía Simulación Basado en un Algoritmo Genético Híbrido. (EN LINEA) Disponible en: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/1448> (Recuperado el 8 de septiembre del 2015).
23. MAC DONAGH, M., HILDT, E., MARTINEZ, M.S., MULAWKA, J., VALDES, M., FERTL, L. (2014). Sistema de apoyo a la planificación de la cosecha forestal. System support for planning of forest harvesting (EN LINEA) Disponible en: http://www.academia.edu/7192987/SISTEMA_DE_APOYO_A_LA_PLANIFICACION_DE_LA_COSECHA_FORESTAL (Recuperado el 7 de septiembre del 2015).
24. PALMA, C., TRONCOSO, J. (2001). Asignación óptima de equipos en faenas de cosecha forestal. [EN LINEA] Disponible en: <http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v22n1/art07.pdf> [Recuperado el 19 de abril del 2015].
25. PEDERNERA, P., CASTILLO, M., Y JULIO, G. (2002). Diseño e implementación de herramientas computacionales para la prevención y combate de incendios forestales (en línea) Disponible en: <http://linfor.forestaluchile.cl/wp-content/uploads/2014/03/ID-04-2002-Herramientas-comp-para-el-combate-de-incendios.pdf> (Recuperado el 15 de junio del 2015).
26. PÉREZ, T., MONTOYA, D., TREMANTE, P Y DÍAZ, R. (2005) ¿Optimización por Simulación o Optimización para la Simulación? Disponible en: http://www.researchgate.net/profile/Ebert_Brea/publication/265165060_Optimizacin_por_Simulacin_u_Optimizacin_para_la_Simulacin/links/540229cd0cf2bba34c1b7d69.pdf (Recuperado el 19 de julio del 2015).
27. RODRIGUEZ, J., QUESADA, M. R. (2009). La simulación computarizada como herramienta didáctica de amplias posibilidades. Cecam. Recuperado el 12 de Abril de 2015.
28. ROJAS, J. (2004). Cambio en la localización de caminos y determinación de los costos totales de cosecha. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Talca, Chile.

29. ROJAS, S., PÉREZ, E., VILLARREAL, M., Y CABRERA, M. (2012).
Comparación de dos estrategias para utilizar meta modelo en optimización vía simulación (EN LINEA) Disponible en:
https://www.google.cl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fingenierias.uanl.mx%2F54%2F54_comparacion.pdf&ei=GtROVf7cGpXLsAS68IBQ&usg=AFQjCNHB2klkfGoiE6HXAqck9eqz3IFhw (Recuperado el 9 de Mayo del 2015).
30. RIVERA, S. (2007). Evaluación técnica y económica de un plan de cosecha en una faena de pinus radiata d. (don). A tala rasa, mediante torres de madero en la décima región (EN LINEA) Disponible en:
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/fifr6211e/doc/fifr6211e.pdf> (Recuperado el 13 de junio del 2015).
31. SAPAG, N. (2011). Capítulo 13 . Proyectos de Inversión, Formulación y Evaluación. Editorial Peerson, Chile. (Pag 453).
32. SAPUNAR, P., MANSILLA, B., FUENTEALBA, G. (1999). Sistema cartográfico de apoyo a la planificación y habilitación de la cosecha forestal. Actas VIII Taller de Producción Forestal, Concepción, Chile.
33. UMAÑA, J. (2014). Documento “Manejo Forestal, en Forestal Masisa”, circulación restringida, en charla para Empresas Eagon, Lautaro, Chile.
34. URRRA, G. (1999). Estudio de tiempo, rendimiento y costo para los equipos de maderero mecanizado: loggers dream y skidder. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Talca, Chile
35. WEINTRAUB, A., EPSTEIN, R., KARLSSON, J., RONNQUIST, M. (2007). Harvest operational models in forestry (EN LINEA) Disponible en:
http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-0-387-71815-6_18#page-1
(Recuperado el 7 de septiembre del 2015).

9. ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones Técnicas de la Maquinaria del Sistema

Especificaciones Técnicas para Maquinaria Presente en Producción o Cosecha Forestal.		
Maquinaria.	Modelo.	Especificaciones Técnicas.
Torre	URUS I	<ul style="list-style-type: none">• 300 m rango de trabajo.• Motor Deutz 4 cilindros 47 Kw/ 63 Hp.• Transmisión automática Allison at 545.• Control accionado Tambores-Hidráulicos.• Velocidad de cables línea principal 3,5 m/s a plena carga.• Velocidad de cables línea retorno 6 m/s.• Altura del mástil 9,5 m, accionamiento hidráulico.• Motor Diésel.
	URUR III	<ul style="list-style-type: none">• 600 m rango de trabajo.• Motor Cummins 173 Hp a 2500 Rpm Modelo 6BTA 5,9.• Transmisión automática Allison MT-643.• Velocidad tambor en línea principal 3,2 m/s.• Velocidad tambor línea retorno 10 m/s.

		<ul style="list-style-type: none"> • Altura del mástil 12 m, accionamiento hidráulico. • Motor Diésel.
Carro	Koller	<ul style="list-style-type: none"> • Carga útil 2500 Kg. • Diámetro cable aéreo 18-28 mm. • Diámetro cable tracción 10-14 mm. • Peso propio 2600 Kg. • Utilizado para madereo aéreo.
Trineumatico	Tecfor	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia 66 Hp @ 2300 Rpm. • Carga nominal de 2,2 toneladas. • Peso 4,8 toneladas. • Velocidad 0-13 Km/H. • Motor Diésel. • Garra mono cilíndrica tipo bypass fabricada en acero T1.
Cargador Frontal	Komatsu PC300HD	<ul style="list-style-type: none"> • Motor SAAGD107E-1 125Kw 167 Hp. • Sistema de control de tracción variable. • HST controlada electrónicamente con sistema de control de cambios de marcha variable. • Enfriamiento del radiador hidráulico. • Garra Tronquera Sigu 1 m² de capacidad, Bigote recto, Mezcla aceros alta

		<p>resistencia con antibrasivos, soldaduras y protecciones antifricción.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Combustible Diésel.
Grúa Forestal	Tigercat 220D	<ul style="list-style-type: none"> • Motor Cummins QSB 4,5 Nivel 3 119 KW (160 Hp) @ 2200 Rpm. • Sistema Hidráulico. • Alcance 8,5 m. • Enfriamiento con ventilador de alto flujo. • Combustible Diésel.
Procesador	Thunderbird-1236DL	<ul style="list-style-type: none"> • Cabina de entrada lateral con elevador. • Vigilancia e seguridad integrada. • Potencia 210 Hp. • Combustible Diésel. • Pasarelas integrales.
Procesador Trozando.	Waratah HTH622B instalado en excavadora SDLG6250	<p>Cabezal Waratah.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peso 2120 Kg. • Sistema de corte espada con conducción hidrostática. • Tensionado automático de cadena. • Capacidad de corte 752 mm. • Velocidad producción 5,3 m/s.

		<ul style="list-style-type: none"> • Sistema hidráulico presión 4641 Psi. • Flujo mínimo 371 lt/ min. <p>Excavadora SDLG 6250.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Jaula cabina Fops/Rops (certificada). • Parabrisas frontal de policarbonato lexan de 19 mm. • Ventanas laterales de 10 mm. • Protecciones metálicas sobre motor. • Combustible Diésel.
Motosierra	HUSQVARNA	<ul style="list-style-type: none"> • Motor de 2 tiempos. • Potencia 5,3 caballos. • Largo de espada 24 pulgadas. • El paso de la cadena es de 3/8. • Cuenta con 2 empuñadoras que permite el agarre firme y un manejo fácil de los ángulos de corte. • Uso forestal • Combustible Diésel.

Anexo 2: Datos de entrada para la simulación de los escenarios

	Prod (m3/h)	desv.estan	CV %	Prod (min/m3)	desv (min/m3)
Torres Urus III	23,28	2,95	13	2,58	0,33
Torres Urus I	14,82	1,67	11		
Tri Torres	36,00	12,60	35	1,67	0,58
Procesador	71,70	17,83	25	0,84	0,21
peerless	17,00			3,53	0,00
Frontal Desc	127,40	20,00	16	0,47	0,07
Motosierr	45,00	10,38	23	1,33	0,31
Tri Central	23,00	3,45	15	2,61	0,39
Frontal Carga	60,00	9,00	15	1,00	0,15

Anexo 3: Costos unitarios de producción

Máquina	CF (h)	CV (h)	CT (h)	Prod (m3/h)	CU (\$/m3)
Torre Urus III	21.493	10.015	31.508	14,8	2.126
Torre Urus I	22.555	11.069	33.624	23,3	1.444
TRINEUM Torres	8.576	7.969	16.545	69,8	237
PROCESAD	29.780	23.329	53.109	71,7	741
Transp Intermedio	16.547	10.125	26.672	17,0	1.569
Carg Frontal Descarga	34.059	28.752	62.811	131,0	479
MOTO	5.400	2.459	7.859	44,7	176
TRINEUM Central	6.500	4.500	11.000	22,7	485
Carg Frontal Carga	14.134	5.234	19.368	42,5	456

Anexo 4: Rutinas para resolver el problema de PLE, en software Lingo.

Para la Demanda de 6.000 m3

```
min = 2126*x1 + 1444*x2 + 235*x3 + 741*x4 + 1500*x5 + 428*x6 + 143*x7 +  
172*x8 + 459*x9;
```

```
(23.28*8.18*22)*x1 + (14.8*8.18*22)*x2 >= 6000;
```

```
x1+x2 = x3;
```

```
(36.04*8.18*22)*x3 >= 6000;
```

```
(71.7*8.18*22)*x4 >= 6000;
```

```
(17*8.18*22)*x5 >= 6000;
```

```
(59.5*8.18*22*0.75)*x6 >= 6000;
```

```
(127.4*8.18*22*0.25)*x7 >= 6000;
```

```
(44.75*8.18*22)*x8 >= 6000;
```

```
(22.7*8.18*22)*x9 >= 6000;
```

```
@gin(x1);@gin(x2);@gin(x3);@gin(x4);@gin(x5);@gin(x6);@gin(x7);@gin(x8);@gin(x9);
```

END

Para la Demanda de 8.000 m3

```
min = 2126*x1 + 1444*x2 + 235*x3 + 741*x4 + 1500*x5 + 428*x6 + 143*x7 +  
172*x8 + 459*x9;
```

```
(23.28*8.18*22)*x1 + (14.8*8.18*22)*x2 >= 8000;
```

```
x1+x2 = x3;
```

```
(36.04*8.18*22)*x3 >= 8000;
```

```
(71.7*8.18*22)*x4 >= 8000;
```

```
(17*8.18*22)*x5 >= 8000;
```

```
(59.5*8.18*22*0.75)*x6 >= 8000;
```

```
(127.4*8.18*22*0.25)*x7 >= 8000;
```

```
(44.75*8.18*22)*x8 >= 8000;
```

$$(22.7*8.18*22)*x9 \geq 8000;$$

@gin(x1);@gin(x2);@gin(x3);@gin(x4);@gin(x5);@gin(x6);@gin(x7);@gin(x8);@gin(x9);

END

Para la Demanda de 10.000 m3.

$$\text{min} = 2126*x1 + 1444*x2 + 235*x3 + 741*x4 + 1500*x5 + 428*x6 + 143*x7 + 172*x8 + 459*x9;$$

$$(23.28*8.18*22)*x1 + (14.8*8.18*22)*x2 \geq 10000;$$

$$x1+x2 = x3;$$

$$(36.04*8.18*22)*x3 \geq 10000;$$

$$(71.7*8.18*22)*x4 \geq 10000;$$

$$(17*8.18*22)*x5 \geq 10000;$$

$$(59.5*8.18*22*0.75)*x6 \geq 10000;$$

$$(127.4*8.18*22*0.25)*x7 \geq 10000;$$

$$(44.75*8.18*22)*x8 \geq 10000;$$

$$(22.7*8.18*22)*x9 \geq 10000;$$

@gin(x1);@gin(x2);@gin(x3);@gin(x4);@gin(x5);@gin(x6);@gin(x7);@gin(x8);@gin(x9);

END

Anexo 5: Cuadros con cálculo de costo total y unitario por escenario de demanda.

Escenario 1: Demanda mínima de 6.000 m³.

Maquinaria	Cantidad	CF hora	CV hora	h operación	CF Totales	CV Totales	Costo Total
Torre de madero Urus III	1	22.555	11.069	180,0	4.059.880	1.992.384	6.052.264
Torre de madero Urus I	1	21.493	10.015	180,0	3.868.795	1.802.685	5.671.480
Trineumaticos en Torres	2	8.576	7.969	91,8	3.087.276	1.463.167	4.550.443
Procesador	1	29.780	23.329	90,0	5.360.410	2.099.592	7.460.002
Transporte Intermedio (Peerless)	2	24.230	16.153	174,6	8.722.800	5.640.628	14.363.428
Cargador Frontal Etapa de descarga	1	34.059	28.752	48,6	6.130.531	1.397.368	7.527.899
Motosierristas	1	5.800	2.459	140,4	1.043.967	345.281	1.389.248
Trineumáticos en Cancha de Trozados	2	8.576	7.969	138,6	3.087.276	2.209.095	5.296.371
Cargador Frontal Etapa Carga	2	29.780	23.329	54,0	10.720.819	2.519.511	13.240.330
Costo total (\$)							65.551.465
Costo Unitario de Prod (\$/m3)							10.338

Escenario 2: Demanda mínima de 8.000 m³.

Maquinaria	Cantidad	CF hora	CV hora	h operación	CF Totales	CV Totales	Costo Total
Torres de Madero Urus III	2	22.555	11.069	180,0	8.119.759	3.984.769	12.104.528
Trineumaticos en Torres	2	8.576	7.969	115,2	3.087.276	1.836.131	4.923.407
Procesador	1	29.780	23.329	117,0	5.360.410	2.729.470	8.089.880
Transporte Intermedio (Peerless)	3	24.230	16.153	165,6	13.084.200	8.024.810	21.109.010
Cargador Frontal Etapa de descarga	1	34.059	28.752	63,0	6.130.531	1.811.402	7.941.934
Motosierristas	1	5.800	2.459	176,4	1.043.967	433.814	1.477.781
Trineumáticos en Cancha de Trozados	2	8.576	7.969	171,0	3.087.276	2.725.507	5.812.783
Cargador Frontal Etapa Carga	2	29.780	23.329	66,6	10.720.819	3.107.397	13.828.216
Costo total (\$)							75.287.540
Costo Unitario de Prod (\$/m3)							9.545

Escenario 3: Demanda mínima de 10.000 m³.

Maquinaria	Cantidad	CF hora	CV hora	Hr operación	CF Totales	CV Totales	Costo Total
Torre de madero Urus III	2	22.555	11.069	180,0	8.119.759	3.984.769	12.104.528
Torre de madero Urus I	1	21.493	10.015	180,0	3.868.795	1.802.685	5.671.480
Trineumaticos en Torres	3	8.576	7.969	102,6	4.630.914	2.452.957	7.083.871
Procesador	1	29.780	23.329	154,8	5.360.410	3.611.299	8.971.709
Transporte Intermedio (Peerless)	4	24.230	16.153	169,2	17.445.600	10.932.350	28.377.950
Cargador Frontal Etapa de descarga	2	34.059	28.752	41,4	12.261.063	2.380.700	14.641.763
Motosierristas	2	5.800	2.459	118,8	2.087.934	584.321	2.672.255
Trineumáticos en Cancha de Trozados	3	8.576	7.969	154,8	4.630.914	3.700.952	8.331.866
Cargador Frontal Etapa Carga	2	29.780	23.329	90,0	10.720.819	4.199.185	14.920.004
Costo total (\$)							102.775.426
Costo Unitario de Prod (\$/m3)							9.516