

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE MANEJO DE RECURSOS FORESTALES**

**DESARROLLO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO
DE RECURSOS PARA EL COMBATE DE INCENDIOS FORESTALES**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

Ramón Benito Granada Musa

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Guillermo Julio A.	6.5
Prof. Consejero Sr. Patricio Pedernera A.	7.0
Prof. Consejero Sr. Miguel Castillo S.	6.6

SANTIAGO-CHILE

2004

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN

SUMMARY

1.- INTRODUCCION	1
2.- REVISION BIBLIOGRAFICA.....	2
2.1 Conceptos y alcances del despacho.....	2
2.1.1 Sistemas de Despacho	3
2.1.2 Normas de Despacho.....	4
2.1.3 Módulo de despacho del Sistema KITRAL.....	5
2.1.4 Criterios de despacho	9
2.1.4.1 Ataque masivo o golpe único.....	9
2.1.4.2 Tiempo de arribo.....	9
2.1.4.3 Número de unidades despachadas	9
2.1.4.4 Incendios simultáneos	10
2.1.4.5 Cobertura total de los focos reportados.....	10
2.1.5 Clasificación de los incendios para el despacho.....	10
2.2 Antecedentes sobre modelos de asignación de recursos	11
2.3 Antecedentes sobre Modelos de Despacho	13
3.- MATERIAL Y MÉTODO.....	15
3.1 Objetivos:.....	15
3.1.1 General.....	15
3.1.2 Específicos:	15
3.2 Material	15
3.2.1 Delimitación de la zona de trabajo	16
3.2.2 Fuentes de Información.....	17
3.2.2.1 Información cartográfica de apoyo.....	17
3.2.2.2 Entrevista a expertos	18
3.2.2.3 Software de apoyo	18
3.3 Método.....	19
3.3.1 Recolección de antecedentes	19
3.3.1.1 Caracterización preliminar de un incendio forestal modelo	19
3.3.1.2 Información utilizada:	20
3.3.2 Procesamiento de información:.....	21
3.3.3 Caracterización del modelo	21
3.3.4 Formulación del modelo	23
3.4 Procesamiento de datos para la prueba del modelo	26
3.4.1. Estimación de tiempos de arribo	28
3.4.2 Valoración del patrimonio	29

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1 Modelo.....	30
4.1.1 Modelo matemático	30
4.1.2 Solución del Modelo	31
4.2. Discusión	32
4.2.1 Recursos de combate	33
4.2.2 Valoración del Patrimonio.	33
4.2.3 Normas de despacho.	34
4.3.4 Tratamiento de la información.....	34
4.3.5 Estimación de tiempos	34
4.3.6 Investigación futura	35
5.- CONCLUSIONES	36
6.-BIBLIOGRAFIA	37
APÉNDICE I.....	39
ANEXO 1.....	46
ANEXO 2.....	47
ANEXO 3.....	50

INDICE DE TABLAS

TABLA 1.	Grados de conflictividad	6
TABLA 2.	Tipos de línea de control	7
TABLA 3.	Rendimiento de recursos de combate expresado en N° de hombres.	7
TABLA 4.	Opciones de Despacho	8
TABLA 5.	incendios seleccionados.....	26
TABLA 6.	Identificación de los modelos de combustibles presentes en el borde del modelo de propagación del incendio.....	26
TABLA 7.	Información de las fichas de incendio SPB	27
TABLA 8.	Comparación entre los valores obtenidos de las fichas de incendio y del tipo de combustibles de la cobertura del Sistema KITRAL.	27
TABLA 9.	Resumen de tiempos promedios de arribo de los recursos de la SPB (min) en 10 temporadas.....	28
TABLA 10.	Resumen de tiempos promedio de combate de recursos de la SPB (min)..	29

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	Modelo matemático general de los problemas de asignación.....	12
FIGURA 2.	Mapa de ubicación de la zona de trabajo.....	16
FIGURA 3.	Predios bajo la protección de la Sociedad de Protección del BioBío	17
FIGURA 4.	Modelo matemático	24
FIGURA 5.	Modelo matemático para varios modelos de combustibles.....	25
FIGURA 6.	Modelo final	30

RESUMEN

Con el presente estudio se cumple el propósito de proponer un instrumento que facilite la decisión de asignación de recursos para el combate de los incendios forestales que están siendo reportados a una central de operaciones de manejo del fuego. Para tales efectos se plantea el desarrollo de un modelo de optimización basado en una programación lineal entera, cuya función objetivo es minimizar el costo del control del incendio en un tiempo de operaciones predeterminado.

Las restricciones del modelo se definieron considerando dos fuentes. En primer lugar, las referencias bibliográficas sobre modelos análogos y, en segundo termino, los resultados de entrevistas a despachadores de programas de manejo del fuego de la VIII región, realizadas en el transcurso de la temporada 1999-2000. Del análisis de esos antecedentes se determinó considerar como restricciones al rendimiento en construcción de líneas de los diferentes tipos de recursos utilizados en el combate y, también, al período efectivo de la operación de control de incendio, descontados los tiempos de traslado de las unidades de supresión. Por otra parte, se estimó importante incorporar el costo de la operación de combate derivada de la decisión de despacho como otra restricción al modelo, dado que ese valor debiera, en lo posible, ser inferior al del patrimonio bajo protección.

En la prueba del modelo se comprobó que sus resultados son coherentes, cuando se compara la solución de recursos a utilizar que entrega con la que efectivamente se aplica en casos reales. Sin embargo, la validación estadística no fue posible realizarla porque la información obtenida fue insuficiente, producto de la descalificación de una importante cantidad de antecedentes por su baja confiabilidad.

Palabras Clave: programación lineal entera, despacho, incendio

SUMMARY

The purpose of this study is to propose an instrument that can aid the resources-allocation decision for the combat of the forest fires being reported to particular fire station. To achieve this goal, I propose the development of an optimization model based on integer linear programming, whose primary objective is to diminish the cost of fire control in pre-determined time of operations.

The restrictions of the model were defined by two main sources. Firstly, by the bibliographical references of analogous models, and secondly, by the results obtained from interviews to fire operations dispatchers of the VIII region (1999-2000). From these sources, I consider the different types of equipment and resources used in forest fire combat to be *restrictions* to both the fire-line construction performance, and to the overall fire control time, without considering the suppression units transport time. Moreover, I considered important to include the overall cost of the station's dispatch decision as another restriction to the model, since that cost should be when possible, inferior to the one of the patrimony being protected.

In testing the model I verified that its results are coherent with those obtained from past real-life events. However, the available data was not strong enough to run a robust statistical validation of the model.

Key Words: whole lineal programming, dispatch, forest fire

1.- INTRODUCCION

Los daños causados por incendios forestales en Chile provocan permanentemente cuantiosas pérdidas económicas y ambientales. Para su combate se han diseñado e implementado nuevas tecnologías y una cantidad considerable de recursos; sin embargo, con frecuencia no se logran los resultados esperados, lo que conduce a la necesidad de analizar el tema para determinar cuáles son los problemas que llevan a esta situación.

El despacho es un aspecto fundamental en los resultados del combate, porque se refiere a la decisión sobre asignación de recursos que una central de operaciones debe tomar para el control de un incendio que ha sido detectado. Desde que se reporta un nuevo foco hasta que se emite la orden de despacho, no deben transcurrir más de unos pocos minutos, porque el tiempo de traslado y ataque de las brigadas y otros medios pasa a ser de vital importancia, en la efectividad del combate. Se debe tener en cuenta que la dificultad de extinguir un incendio se incrementa en términos exponenciales en relación al tiempo transcurrido desde su inicio.

Es por estas razones que el despacho adquiere una enorme importancia en la tarea del combate de los incendios forestales, ya que es en esta etapa, tanto por la oportunidad de la decisión como por la calidad de la misma, donde se define en gran medida el curso que seguirá el siniestro y la efectividad de la supresión.

Al respecto, como punto de partida de análisis, se considera pertinente formular las siguientes preguntas:

¿Se puede afirmar que el despachador toma la mejor decisión de movilización de recursos para el combate, considerando todos los factores involucrados en los pocos minutos que transcurren desde el reporte de detección?

¿Es posible establecer estándares en el rendimiento del desplazamiento y la ejecución del combate para unidades y equipos de diferentes organizaciones de control de incendios?

¿Qué otros factores, diferentes a los tradicionalmente considerados, debieran incluirse en la toma de decisiones para el despacho?

¿Existen factores sociales o de una naturaleza distinta a la estrictamente técnica, que podrían influir al momento de tomar una decisión del despacho?

A través del presente trabajo se lleva a efecto un análisis del problema antes descrito, con el objetivo de desarrollar una herramienta que facilite la toma de decisiones oportunas y eficientes para el despacho y, en consecuencia, contribuya a disminuir las significativas pérdidas que ocasionan los incendios forestales.

2.- REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Conceptos y alcances del despacho

Según Julio (1999), el despacho es la función referida a la toma de decisiones de asignación de recursos para el combate, aunque también puede incluir algunos aspectos de la presupresión (la detección, por ejemplo). Por tal razón, en la ejecución del despacho cabe identificar dos actividades básicas y generales:

- Programar diariamente la localización de recursos móviles para la detección y combate (en las primeras horas de la mañana), a modo de definir la posición de alerta (stand by), de acuerdo al pronóstico de la distribución espacial del grado de peligro para la jornada que se inicia, en la zona bajo protección.
- Decidir e instruir la movilización de personal y equipos, con el fin de controlar los incendios forestales que estén siendo reportados a la central de operaciones, basándose en la información existente, los recursos disponibles y de acuerdo a las instrucciones establecidas en el plan operativo de manejo del fuego.

El despacho constituye, por lo tanto, una función que debe ser cumplida a través de procesos eminentemente analíticos, que permiten fundamentar las decisiones en la evaluación de los antecedentes que permanentemente se reporten a la central de operaciones, en el uso del sistema de información para el manejo del fuego y, en la observancia estricta del sistema de instrucciones vigente, particularmente en los aspectos relativos a las pautas y criterios de despacho establecidos (Julio, 1999).

Su ejecución requiere manejar información actualizada, referida a una gran cantidad de antecedentes, entre los cuales se destacan los siguientes:

- a) Características del área bajo protección, en cuanto a su topografía, vegetación, agentes de riesgo, infraestructuras, prioridades de protección y, en general, los aspectos relativos a la ocurrencia, propagación de incendios y condiciones existentes que determinen el comportamiento del fuego.
- b) Disponibilidad de recursos para el combate, incluyendo la capacidad e implementación de las brigadas y sus respectivos estándares de movilización y rendimientos.
- c) Condiciones meteorológicas del momento, grado de peligro en los diferentes sectores del área bajo protección y, otros factores que pueden afectar al comportamiento del fuego y el desarrollo de los incendios forestales que se están iniciando o se pueden originar en períodos próximos.
- d) Nivel de ocurrencia y localización exacta de incendios existentes en toda la zona bajo la cobertura de la central de operaciones, como así también, la identificación de los sectores con una alta probabilidad de inicio de incendios en el transcurso del día.

- e) Carga de trabajo requerida para la supresión en un momento dado, tanto específica (para cada incendio) como total (conjunto de incendios en desarrollo), y criterios e instrucciones necesarias para definir la asignación de los recursos disponibles.

Es decir, en el despacho no sólo se debe tener presente los problemas en un momento dado y la capacidad existente para controlarlos, sino que también todos aquellos otros que pueden surgir en los períodos inmediatamente posteriores, a fin de mantener un estado de alerta permanente, con la reserva correspondiente de recursos para afrontar nuevas situaciones conflictivas.

Cuando el nivel de ocurrencia es bajo, o en los casos en que la cobertura de recursos para el combate es suficiente, la función de despacho se simplifica, porque puede bastar solo una instrucción para ordenar la movilización correspondiente, no siendo necesario entrar a un análisis detallado de antecedentes para respaldar la decisión.

Por el contrario, en períodos críticos, debidos a la ocurrencia de incendios simultáneos o por una insuficiencia de medios disponibles para abordar todos los problemas presentes, el despacho se complica, porque se hace necesario analizar cuidadosamente cada caso, a fin de establecer una adecuada jerarquización en la asignación de recursos para el combate. En situaciones de emergencia, el despachador debe ser apoyado por el jefe de operaciones o el jefe mismo del programa de manejo del fuego. Ello, especialmente cuando es necesario recurrir al apoyo de recursos extraordinarios, de otras regiones o empresas. En este caso, la función no se altera, sino más bien cambia el nivel de responsabilidad en la asignación de recursos para el combate.

2.1.1 Sistemas de Despacho

En las operaciones de un programa de manejo del fuego, especialmente las correspondientes al combate, deben en lo posible evitarse las subjetividades. En ello, es conveniente la simulación anticipada de las diferentes situaciones que potencialmente pueden suceder, con el fin de prever y preparar las acciones adecuadas para resolverlas (Julio, 1999).

En el proceso recién descrito, conocido bajo el término de "decisiones programadas", adquiere una gran importancia el sistema de despacho, que corresponde a la modalidad empleada para la asignación de recursos. En tal sentido, cabe señalar:

- a. **Despacho Simple.** Que corresponde a un sistema basado exclusivamente en la competencia del despachador, quién, al recibir el reporte que informa una situación determinada, revisa los antecedentes respectivos y toma la decisión de asignar recursos para resolverla, de acuerdo a su criterio o apreciación personal.
- b. **Despacho Automático.** En este caso, la información relativa a los problemas que están ocurriendo o que potencialmente pueden originarse, está almacenada en un computador, que a su vez emite las diferentes decisiones de asignación de recursos. La decisión se asume en forma completamente automatizada y, en la práctica, el computador es el que ejerce la función de despachador.

- c. **Despacho Semiautomático.** Que es similar al anterior, pero que difiere en el sentido que la solución emitida por el computador (o pautas establecidas previamente) sólo posee el carácter de sugerencia, correspondiéndole al despachador asumir la decisión definitiva, en la que aplica criterios, experiencias y otras apreciaciones que son difíciles de almacenar en un computador. Es una combinación de los sistemas anteriores y, constituye la modalidad que se ha estado imponiendo en los últimos tiempos, principalmente en los países del hemisferio norte, como Estados Unidos y Canadá.

La automatización del despacho, que puede diseñarse a base de sistemas expertos, sea parcial o total, cumple los objetivos de programar las decisiones y de liberar al máximo la responsabilidad y subjetividad del despachador. Sin embargo, la confiabilidad de las decisiones asumidas con el apoyo de este sistema está dada en gran medida por la amplitud de la base de conocimientos almacenada, la consistencia de las reglas de inferencia que se definan, el diseño de los módulos evaluador y despachador, y así mismo, la calidad y amenidad del subsistema de consultas (interfaz con el usuario).

2.1.2 Normas de Despacho

Constituyen las reglas y criterios que se establecen para la ejecución del despacho, en lo que respecta a las referencias que deben considerarse en las decisiones de asignación de recursos para la presupresión y combate. Las principales, según lo señalado por Julio (1999) son:

- Delimitación de sectores prioritarios de protección.
- Cobertura y capacidades de las unidades e infraestructura disponibles para la presupresión y el combate.
- Restricciones en el empleo de recursos terrestres y aéreos.
- Bases para la coordinación de operaciones conjuntas con unidades de otras instituciones.
- Asignación de recursos en situaciones de incendios simultáneos.
- Esquemas de organización para el combate de incendios mayores o de magnitud.

2.1.3 Módulo de despacho del Sistema KITRAL

El Sistema KITRAL sobre Prognosis y Gestión en Control de Incendios Forestales, desarrollado por la Universidad de Chile, INTEC-Chile e Instituto Forestal (Julio et al, 1995), contempla un Módulo de Despacho, mediante el cual es posible sustentar la toma de decisiones para la asignación de recursos en operaciones de combate. Las referencias principales del Módulo se describen a continuación.

El sistema consiste esencialmente en una pauta para la estimación de los recursos requeridos para el combate de un incendio forestal que está siendo reportado a la central de operaciones. Esta pauta se basa en un proceso de cálculos que entrega como resultado las diferentes opciones de tipos y cantidades de recursos a movilizar, entre las cuales el despachador debe escoger aquella que aprecie como la más adecuada para las condiciones del caso presente, tendiendo aspectos tales como los medios efectivamente disponibles y la capacidad existente para controlar la propagación del incendio en un tiempo objetivo determinado.

El esquema de cálculo utiliza la información que entrega el simulador de incendios del Sistema KITRAL, en lo que respecta a los modelos de combustibles que serán afectados y al perímetro del incendio para tiempos objetivos dados a contar del momento de inicio del fuego (Julio, 1999).

El diseño funcional del Sistema KITRAL, esta basado en la determinación de las principales variables del comportamiento del fuego, como son la velocidad y el modelo de propagación.

El procedimiento consiste, en primer lugar, en estimar el esfuerzo de construcción de la línea basado exclusivamente en el trabajo de combatientes terrestres, de acuerdo a sus rendimientos por modelo de combustible y tipo de línea (en cuanto a su ancho). Para ello debe conocerse el Tiempo de Inicio del Incendio (TI), el Tiempo de Comienzo del Ataque (TA) y el Tiempo Objetivo de Control (TO).

El Tiempo de Inicio del Incendio debe ser definido por el agente detector, de acuerdo al tamaño del incendio en su descubrimiento y localización, el modelo de combustible afectado y las condiciones ambientales en el sector del foco. En cambio, el Tiempo de Comienzo del Ataque, debe ser estimado por el despachador en la central de operaciones, basándose en los tiempos de traslado de los recursos disponibles para el combate al lugar del incendio. El tiempo objetivo de Control, también debe ser definido en la central de operaciones, apoyándose para ese efecto en la simulación del incendio reportado, específicamente en la información de las longitudes que alcanzar el perímetro del fuego en diferentes momentos futuros.

La cantidad de hombres requeridos para el control del incendio en un tiempo objetivo dado, constituye el *índice básico para la construcción de líneas* (IB), ello bajo el supuesto que la operación se basa exclusivamente con combatientes terrestres equipados con herramientas manuales. Sin embargo, esta cantidad puede ser parcialmente reemplazada por otros recursos alternativos para el combate, como es el caso de Camiones Cisterna, Tractores, Aviones y Helicópteros, los que también poseen sus respectivos estándares de rendimiento en el establecimiento de líneas.

La función para el cálculo de IB, propuesta por Julio (1999), es:

$$IB = \frac{P}{RND * TD}$$

Donde:

IB = índice básico para la construcción de líneas.

P = Perímetro de la línea respectiva en el TO (m).

RND = Rendimiento en construcción de líneas (m/Hombre/h).

TD = Tiempo disponible para el control del Incendio (h).

Los rendimientos en la construcción de líneas, ya sea de combatientes terrestres o de medios alternativos, también depende del ancho de la línea que se requiera establecer, y ello, a su vez, es una decisión que también requiere ser definida, para lo cual se debe considerar el grado de conflictividad que observe el comportamiento del fuego en los frentes potenciales de propagación del incendio.

El grado de conflictividad en los frentes de propagación, se califica de acuerdo al nivel potencial de intensidad calórica, lo que conforma un antecedente que también puede ser provisto por el simulador de incendios.

Debe tenerse presente que el grado de conflictividad varía a lo largo de los frentes de propagación. Por ejemplo, los mayores niveles de intensidad calórica normalmente se ubican en la cabeza del incendio, que por lo general corresponde al sector con mayores velocidades de propagación del fuego. Por el contrario, los de menor conflictividad se observan en la cola del incendio, en la mayoría de los casos.

A continuación en las tablas 1, 2 y 3 se presentan antecedentes publicados por Julio (1999) referidos a grados de conflictividad de incendios, tipos de líneas de control y equivalencias en el rendimiento de diferentes tipos de recursos.

Tabla 1. Grados de conflictividad

Grado de Conflictividad	Intens. Calórica (kcal/m/seg)
Bajo	< 500
Medio	500 – 1000
Alto	> 1000

El ancho de las líneas de control para detener la propagación del incendio, va a depender del grado de conflictividad de este.

Tabla 2. Tipos de línea de control

Tipo de Línea	Ancho (m)
A	< 1,1
B	1,1 – 3,0
C	3,1 - 5,0

Las equivalencias propuestas en rendimiento, que están dadas considerando el trabajo de un hombre durante una hora son las siguientes:

Tabla 3. Rendimiento de recursos de combate expresado en N° de hombres.

Recurso de Combate	Clave	N° hombres equivalentes
Combatiente	HMB	1
Camión Cisterna con Agua	CCA	10
Camión Cisterna con Químicos	CCQ	15
Helicóptero Pequeño con Agua	HPA	5
Helicóptero Mediano con Agua	HMA	20
Helicóptero Grande con Agua	HGA	25
Helicóptero con Químicos	HQ	30
Avión Pequeño Agua (<1000 lts)	APA	15
Avión Mediano Agua (1000-3000 lts)	AMA	25
Avión Grande Agua (>3000 lts)	AGA	35
Tractor Pequeño (Pala < 3 mts)	TR1	19
Tractor Mediano (Pala 3-4 mts)	TR2	29
Tractor Grande (Pala > 4 mts)	TR3	49

La explicación del proceso de determinación de los recursos a movilizar se describe sobre la base del ejemplo de un incendio de baja conflictividad, desarrollado por Julio (1999), que afecta a un solo modelo de combustible, con un Tiempo Objetivo de 1 hora y un Índice Básico de 24 combatientes. Al tiempo de utilización de los recursos debe agregarse 0,5 horas de desmovilización y regreso a las bases. Además, debe indicarse que la máxima capacidad de transporte de un móvil es de 15 combatientes.

Para el presente caso, de acuerdo a los recursos disponibles para el combate y sus respectivas capacidades, resultaron 30 opciones de despacho, que corresponden a un mismo número de combinaciones de elementos de acuerdo a las reglas establecidas en el procedimiento de cálculo, y que se exponen en el Cuadro 4. Es importante recordar la restricción referida a una cantidad mínima de combatientes terrestres que, para incendios de conflictividad baja, es de 8 hombres.

Tabla 4. Opciones de Despacho

Opción	Tipos y Cantidades de Recursos								
	HMB	CCA	CCQ	HLA	HLQ	APA	APQ	TR1	TR2
1	24	-	-	-	-	-	-	-	-
2	21	1	-	-	-	-	-	-	-
3	14	1	1	-	-	-	-	-	-
4	10	1	1	1	-	-	-	-	-
5	10	1	1	-	-	1	-	-	-
6	8	1	-	1	1	-	-	-	-
7	13	1	-	1	-	1	-	-	-
8	8	1	-	1	-	-	1	-	-
9	18	2	-	-	-	-	-	-	-
10	11	2	-	1	-	-	-	-	-
11	14	2	-	1	-	1	-	-	-
12	9	2	-	-	-	1	-	-	-
13	9	2	-	-	1	-	-	-	-
14	9	2	-	-	-	-	1	-	-
15	13	-	1	-	-	-	-	-	-
16	9	-	1	1	-	1	-	-	-
17	8	-	1	-	1	-	-	-	-
18	13	-	1	-	-	1	-	-	-
19	8	-	1	-	-	--	1	-	-
20	20	-	-	1	-	-	-	-	-
21	11	-	-	1	1	-	-	-	-
22	16	-	-	1	-	1	-	-	-
23	11	-	-	1	-	-	1	-	-
24	15	-	-	-	1	-	-	-	-
25	11	-	-	-	1	1	-	-	-
26	20	-	-	-	-	1	-	-	-
27	11	-	-	-	-	1	1	-	-
28	15	-	-	-	-	-	1	-	-
29	14	-	-	-	-	-	-	1	-
30	9	-	-	-	-	-	-	-	1

Es importante señalar que la decisión definitiva de recursos a movilizar debe ser asumida por el despachador, después de analizar las opciones propuestas por la pauta, y teniendo presente las otras eventuales situaciones contingentes que también deben ser manejadas por la central de operaciones, como así también el costo operacional que puede significar cada una de estas posibilidades de despacho.

Se observa en la tabla 4 que ninguna de las opciones propuestas incluye al Tractor Grande (TR3), el que se encontraba entre los recursos disponibles para el despacho. La razón de ello es que su rendimiento equivalente en el Tiempo Disponible es de 26 hombres, lo que significa que, de incluirse como opción, este elemento se estaría aprovechando parcialmente, dada la restricción de una cantidad no inferior a ocho combatientes que se estipula que debe estar asignada a la operación. Una de las reglas

del sistema es descartar todas aquellas combinaciones que impliquen una cuota de recursos superior al equivalente de 24 personas (Índice Básico).

Cabe señalar que en cálculo de las opciones, se considera la utilización en el nivel de máxima productividad de los recursos disponibles. Esto es importante tenerlo presente en el caso de los tractores, porque sus rendimientos varían según el tipo de línea que se debe construir (lo que no ocurrió en el presente caso, porque el requerimiento era de una línea de un metro de ancho en el 100 % del perímetro del incendio).

Finalmente cabe señalar que la decisión de despacho es sumamente compleja, porque involucra muchas variables y, generalmente, con demasiadas opciones, algunas de las cuales son difíciles de identificar o cuantificar directamente por parte del despachador. Por tal razón, el módulo maneja la información internamente, desplegando por pantalla solamente la que esté resultando como la más eficiente económicamente.

2.1.4 Criterios de despacho

Los criterios que a continuación se describen son los tradicionalmente ocupados por la mayoría de las empresas forestales y CONAF (Forestal Celco, 1986; Forestal Arauco, 1984). Su descripción ayudará a comprender mejor el esquema y la distribución de recursos que se emplean.

2.1.4.1 Ataque masivo o golpe único

El despacho se basa, como planteamiento general en que, para cualquier foco, debe aplicarse el “ataque masivo o golpe único”, que consiste en despachar todos los recursos que sean necesarios para garantizar el control y total extinción de un incendio, en el primer ataque, y aún cuando éste se encuentre en estado incipiente.

Este criterio, que es aplicado preferentemente por empresas forestales, se emplea independiente del tamaño del foco y del combustible afectado, y se basa principalmente en el hecho que para las empresas un incendio puede causar un daño enorme en el patrimonio si no es sofocado en sus momentos iniciales.

2.1.4.2 Tiempo de arribo

El despacho de unidades de combate se efectúa esencialmente en función del tiempo de arribo de los recursos disponibles, con lo cual, de acuerdo a la localización del incendio, se procede a despachar a las unidades que representen el menor tiempo de traslado al siniestro, independiente del tamaño de la unidad o medio de movilización utilizado.

Esta información debe estar registrada por unidad en el plano de operaciones diarias (cobertura de las brigadas), al igual que las vías de acceso que existan para el desplazamiento hacia los potenciales puntos de ocurrencia.

2.1.4.3 Número de unidades despachadas

Como norma de seguridad, las empresas forestales (Forestal Celco, 1986; Forestal Arauco, 1984) despachan, a todos los focos reportados, por lo menos dos unidades simultáneamente en distintos medios de movilización (helicóptero y camioneta por

ejemplo), las que se definen de acuerdo al criterio de menor tiempo de llegada antes mencionado.

Sin embargo, mediante el reporte de la unidad que arribe primero, se confirma la movilización o desmovilización de la segunda unidad, o se activa el despacho de nuevas unidades de combate.

2.1.4.4 Incendios simultáneos

Ante la eventual ocurrencia de incendios simultáneos, el criterio de asignación de recursos se basa en la prioridad de protección de los sectores afectados por la propagación del fuego. Las prioridades de protección, que se determinan como un resultado combinado de los análisis de riesgo, peligro y daño potencial, deben estar registradas o almacenadas en el sistema de información de la central de operaciones, y deben representar antecedentes cuyo acceso y disponibilidad oportuna por parte del despachador requiere necesariamente estar previsto. (Forestal Arauco, 1989)

2.1.4.5 Cobertura total de los focos reportados

Ante la misma situación descrita anteriormente, los programas de manejo del fuego de las principales empresas forestales establecen que el despacho debe considerar la cobertura de todos los focos que se presenten, para lo cual se contempla la movilización de supervisores, personal de contratistas, recursos de CONAF y de empresas en convenio, como de cualquier otro medio que permita mantener una suficiente atención a los problemas presentes.

2.1.5 Clasificación de los incendios para el despacho

Forestal Arauco (1984) clasifica los incendios, con el objetivo de priorizar el despacho de recursos para el combate, de acuerdo a los siguientes criterios:

- a. **Incendios que amenazan vidas humanas y casas:** En estos casos se deben despachar todas las unidades que sean necesarias, independiente de la ocupación de las personas o propiedad de las habitaciones.
- b. **Incendio en predios de la empresa, o amenazando a bosques de otras empresas en convenio:** Se deben despachar todos los recursos, a objeto de lograr un rápido control y completa extinción del siniestro.
- c. **Incendios fuera de predios de empresas, sin amenaza para éstos:** En esta situación se debe reportar el foco a CONAF y combatirlo a solicitud de ésta. Si CONAF no solicita el combate, el despachador debe analizar la situación de ocurrencia en empresas, disponibilidad de unidades y despachar una unidad terrestre si las condiciones lo permiten.
- d. **Otros incendios:** En esta situación el despachador debe emplear un criterio práctico para resolver la situación e informar de ello al jefe del programa. Debe tenerse presente que aquellos predios indicados en los convenios de colaboración se consideran como propios de empresas, para los efectos de detección,

despacho y combate de los incendios, reportes que se deberán informar en el acto a la empresa en convenio correspondiente.

2.2 Antecedentes sobre modelos de asignación de recursos

El uso de modelos de programación matemática, en particular modelos de programación lineal, en alguna de las etapas del combate y la presupresión han sido considerados desde hace bastante tiempo, con el objetivo fundamental de disminuir o hacer más eficiente el uso de los recursos, y con ello los costos de los programas de manejo del fuego.

Al respecto, son varias las experiencias que han empleado modelos de este tipo, para resolver problemas de transporte y asignación, que son considerados como una forma particular de la programación lineal (programación lineal entera), debido a la naturaleza de las variables de decisión que se emplean en estos casos. Los modelos de este tipo consideran una restricción, que obliga a que dichas variables sólo puedan tomar valores enteros, para modelar situaciones del mundo real, donde la naturaleza física de los procesos que son modelados impide que se pueda tener valores fraccionarios como resultado (Prawda, 1993).

Dentro de esta familia de problemas, los relativos al transporte y a la asignación son considerados como un caso particular de los problemas enteros, y se han empleado para resolver una gran cantidad de situaciones comunes.

Las primeras referencias a este respecto se remontan al año 1781, Cuando el matemático francés Gaspard Monge describe el problema de la construcción y abastecimiento de las fortificaciones militares de Napoleón. Para resolver esto usó el método de “cortar y llenar”, es decir, ir abasteciendo las distintas trincheras desde los depósitos de material existente. Formalmente este tipo de problemas aparece en 1941 cuando F.L. Hitchcock publica una solución analítica para éste, aunque su desarrollo se produce a finales de los años 40, cuando Koopmans realiza su tesis doctoral sobre los embarques de la marina holandesa (Ramón Sala, 2002).

El problema consiste en suministrar una cierta cantidad de recursos desde M orígenes a N destinos. La capacidad de oferta de cada origen i ($i=1, 2, 3, \dots, m$) es a_i ($a_i > 0$), mientras que la demanda de cada destino J ($j=1, \dots, n$) es b_j , ($b_j > 0$).

El costo de enviar una unidad de producto del origen i al destino j es C_{ij}

Entonces es necesario determinar cuántas unidades de producto deben enviarse desde el origen i al destino j , de forma que se minimice el costo total de envío, garantizando la demanda de los destinos y no excediendo la capacidad de los orígenes.

Matemáticamente el problema se plantea como:

$$\begin{array}{l} \text{Min} \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \\ \text{s.a.} : \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b, j = 1, 2, \dots, n \\ X_{ij} \geq 0; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

Figura 1. Modelo matemático general de los problemas de asignación.

En este tipo de problemas, el primer conjunto de restricciones ($\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a$) indica que los envíos totales de cada uno de los i orígenes no puede exceder la cantidad de producto disponible de cada uno de ellos.

El segundo conjunto de restricciones ($\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b$) indica que la cantidad recibida por cada destino j no puede ser inferior a la demanda del mismo.

Para que este problema tenga solución se debe cumplir que la suma de las disponibilidades en los orígenes debe ser mayor o igual que la suma de las demandas de los destinos. En caso contrario no se podrían satisfacer todas las necesidades (Prawda 1993)

El despacho puede ser representado consecuentemente, por un problema de asignación, donde la cantidad de recursos de combate requerida para controlar un incendio particular (demanda), debe ser igualada por los recursos que dispone el programa de protección (oferta) para su control.

2.3 Antecedentes sobre Modelos de Despacho

El tema del despacho ha sido abordado de diversas formas, sin embargo la tendencia actual está orientando a su aplicación apoyada por modelos de optimización, como así también cabe destacar a las referencias sobre el empleo de sistemas expertos y de simulación.

Los modelos de optimización han sido en su mayoría desarrollados en el hemisferio norte, (EEUU, Canadá), con los cuales se han obtenido resultados confiables, considerando la cantidad de recursos y esquemas que estos países poseen para el combate del fuego.

Estos modelos consideran como entrada los resultados que proporcionan los simuladores de incendios (inicialmente basados en el Sistema Behave, Andrews 1986) los cuales proporcionan parámetros tales como la velocidad de propagación, la intensidad calórica, la longitud del perímetro, etc., que son los datos que emplean para poder estimar la cantidad de recursos que se necesitan según un tiempo objetivo de control dado (Kourtz, 1989).

Dentro de estos modelos destacan algunos que han enfocado el problema desde el punto de los recursos para el combate, utilizando tanto modelos de programación lineal, como también algunos de orientación de tiempo

Donovan y Rideout (2002) definen un modelo destinado a calcular la organización de recursos más eficiente, y en qué períodos debe ser despachada para un incendio en particular, con el objetivo de construir una línea de contención a un mínimo costo. Este modelo fue planteado como un modelo de programación lineal entera, ya que las unidades de recursos son indivisibles.

Su función objetivo busca minimizar la suma de los costos relacionados al control del fuego y los daños que presumiblemente se originaran, y además se agrega una variable temporal a la organización de recursos para la solución del problema.

Si el incendio es contenido en un período dado, entonces el perímetro final será menor al de un incendio que es contenido en un tiempo mayor. Por esto los valores para la contención pueden ser completados solo en un período, el cual es asumido como resultado en el control del incendio.

Este modelo proporciona fundamentos teóricos para el manejo del fuego, permitiendo especificar para cada recurso desplegado, el mínimo valor en combate.

Hof, *et al* (2000) proponen un modelo de optimización espacial en la aproximación al combate de incendios (o posibles combustibles), basado en la orientación de tiempos. El área bajo protección se divide en celdas y los tiempos de ignición de las "áreas protegidas" son demorados lo más posible aplicando tratamientos que tengan un efecto retardante en la propagación del fuego a otras celdas. Las variables de este modelo registran los tiempos de entrada y salida de la cabeza del incendio y cuenta las fuentes de ignición más cercanas en cada celda.

La función objetivo de este modelo es maximizar el tiempo en que la celda cercana será quemada, es decir, se determina la forma en que se puede contar con la mayor cantidad de tiempo para controlar el incendio con la menor superficie afectada posible.

Los parámetros del incendio pueden ser aportados por un simulador como el BEHAVE, el cual puede predecir el comportamiento que tendrá el incendio, para determinar el sentido de avance y por ende su la velocidad y el modelo de propagación del fuego.

Por otra parte, el desarrollo de sistemas expertos permitió contar con valiosa ayuda en la toma de decisiones para el despacho, lo que ha contribuido de manera importante en la solución de los problemas de asignación de recursos. Al respecto, la toma de decisiones basada principalmente en la experiencia, no asegura una distribución adecuada de los recursos, de modo que los sistemas expertos contribuyen a eliminar la subjetividad en estas decisiones, facilitando una asignación de recursos adecuada y racional para un siniestro dado.(Martell, 1984).

En Chile, Valencia (1991) propone un esquema lógico experto para el apoyo al despacho basado en tres módulos principales: despachador, de simultaneidades y de evaluación de incendios, donde cada uno de ellos interactúa con los demás, para entregar una sugerencia de despacho basada en la base del conocimiento construida para el sistema. Los principales componentes del sistema experto propuesto son:

- Módulo despachador: el funcionamiento de este módulo está basado en la definición del índice de posible ocurrencia, el cual determina las características de los incendios, tanto en su comportamiento como propagación. Los valores de entrada que considera este módulo son los parámetros meteorológicos.
- Módulo de simultaneidad: básicamente se refiere a la ocurrencia múltiple de focos y la escasez de recursos. Su principio son los árboles de decisión, y al momento de encontrarse sin recursos necesarios para combatir el efectivamente el incendio, opera activando el modulo de evaluación para discriminar la prioridad de los predios para el combate.
- Módulo de evaluación de incendios: está basado en el análisis del incendio, tomando como única variable el valor del predio amenazado, para la ocurrencia múltiple. Su fundamento es una base de datos de todos los predios bajo protección y sus características de prioridad de protección, existencia de plantaciones, edad de las plantaciones, entre otros.

3.- MATERIAL Y MÉTODO

El procedimiento empleado para el diseño del modelo de despacho, constó básicamente de dos etapas. La primera de ellas consistió en profundizar conocimientos sobre el tema y recolectar información directamente sobre el problema del despacho, para lo cual se revisó la bibliografía existente, junto a la observación durante cuatro meses sobre el funcionamiento de una central de incendios forestales, (temporada 1999-2000). Además se efectuaron diversas sesiones de trabajo los despachadores de la VIII región (CONAF¹ y Empresas), para así, en base a su experiencia, conocer cuáles eran las variables que ellos consideraban críticas al momento de tomar la decisión para asignar recursos al evento. La segunda etapa consistió en procesar y analizar la información recolectada, además de la simulación de incendios en el Sistema KITRAL para determinar las variables del modelo y cuantificar la validez de los pronósticos para algunos de los eventos involucrados en el proceso.

3.1 Objetivos:

3.1.1 General

Desarrollar un modelo que permita optimizar las decisiones de despacho de recursos para el combate de incendios forestales.

3.1.2 Específicos:

- Conocer y caracterizar los factores determinantes en las decisiones de despacho.
- Proponer un esquema operacional que permita la racionalización del uso de recursos disponibles para el combate de los incendios.

3.2 Material

Para el desarrollo del modelo de la memoria de título se seleccionó una zona de trabajo que cumpliera con el requisito de disponer de antecedentes confiables respecto al tema a tratar, tanto sobre los antecedentes a considerar en la prueba del modelo como también respecto a los datos requeridos para la ejecución del despacho mismo.

Para la validación del modelo se consideró la información proporcionada por el Sistema KITRAL y por los eventos ocurridos en la temporada 1995-1996, en el patrimonio de la sociedad de Protección del BíoBío (SPB)².

¹ Corporación Nacional Forestal.

² La Sociedad de Protección del BíoBío es un convenio firmado por acuerdo de las empresas Forestal Celco S.A., Forestal BíoBío S.A. y Sociedad Forestal Millalemu S.A.,

3.2.1 Delimitación de la zona de trabajo

Se utilizó la misma zona piloto³ del Sistema KITAL, principalmente por su característica de poseer información validada y confiable de incendios, tipos de combustibles y otros. Esta zona comprende un área aproximada de 1.650.000 ha, y se encuentra ubicada en el sector noroeste de la VIII Región

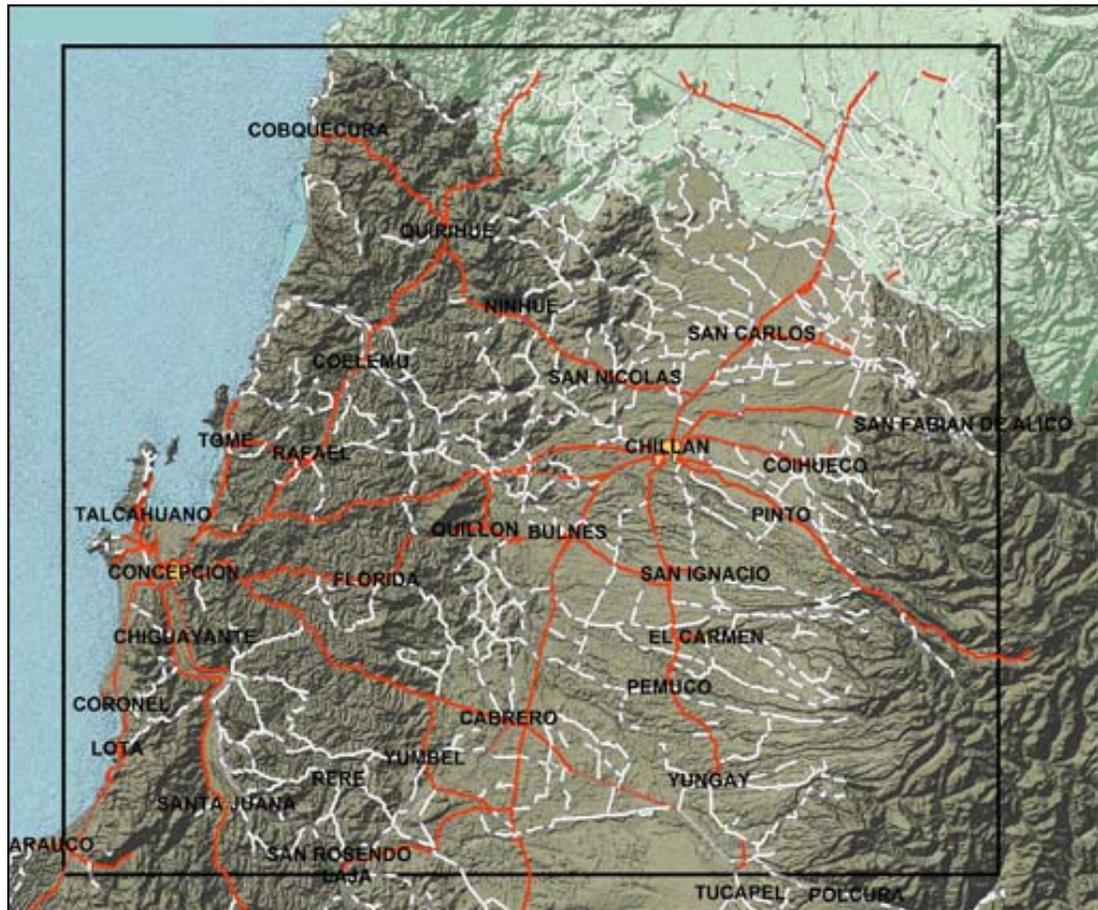


Figura 2. Mapa de ubicación de la zona de trabajo

3.2.1.1 Descripción del patrimonio

La Sociedad de Protección del BioBío poseía durante la temporada 1999/2000 bajo su tuición un patrimonio de aproximadamente 153.000 hectáreas de plantaciones, pertenecientes a las empresas asociadas (Forestal Celco, Forestal Millalemu y Forestal BioBío), con una distribución que se expone en la figura 3.

³ La zona piloto del Sistema KITAL es aquella que se delimitó para la primera toma de datos durante la temporada 1994/1995. Posteriormente la zona piloto fue ampliada a la extensión actual en la temporada 1996/1997.

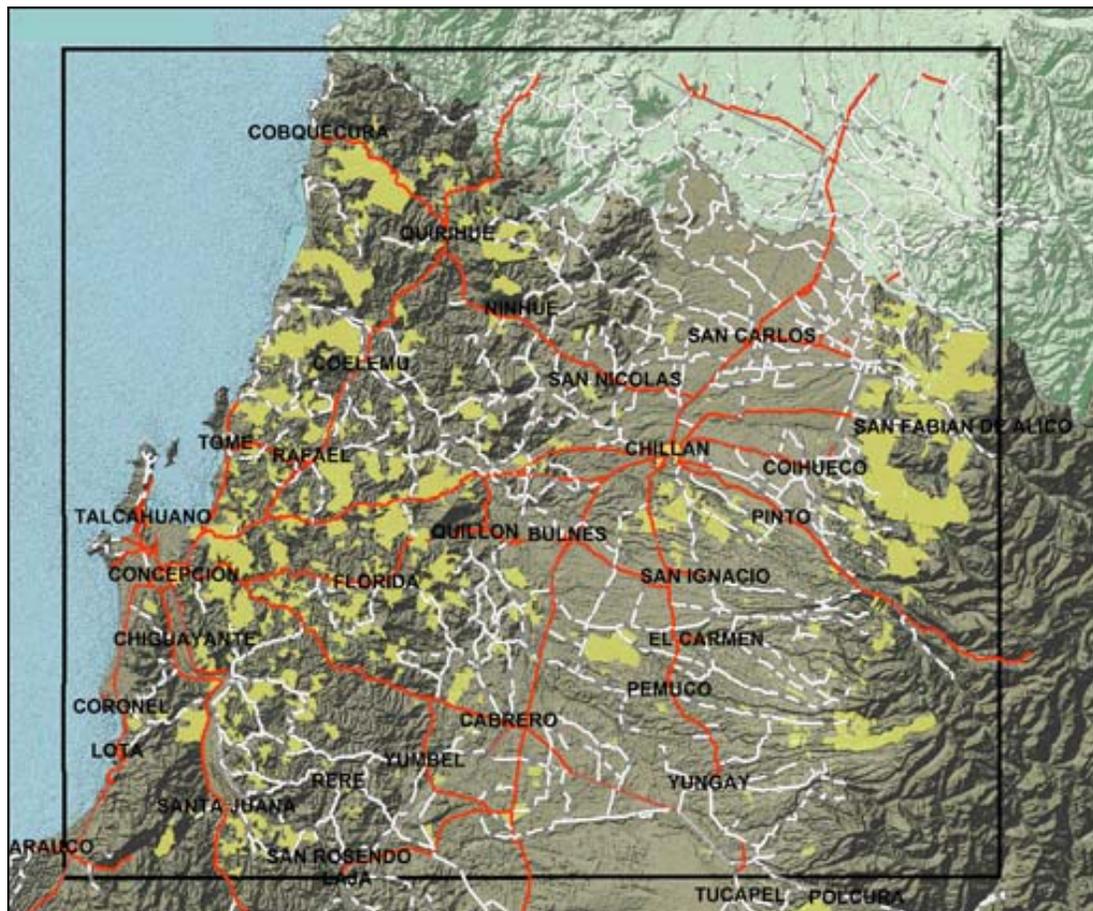


Figura 3. Predios bajo la protección de la Sociedad de Protección del BioBío

3.2.2 Fuentes de Información

3.2.2.1 Información cartográfica de apoyo

La cartografía de apoyo, para la obtención de información referente al combustible presente en el borde de los incendios seleccionados para la validación del modelo, provino principalmente de tres fuentes de datos.

Bases cartográficas del Sistema KITRAL (Julio et al, 1995):

- Modelo de Combustibles: archivo de tipos forestales en formato raster con una resolución de 25x25 (m)
- Red de caminos del IGM escala 1:50.000

Cartografía de la SPB:

- Límites prediales.
- Red de caminos.
- Ciudades.

Cartografía generada para la memoria:

- Zona de trabajo: polígono que delimita la zona de trabajo.
- Mapas de distancias: generado para poder calcular los tiempos de desplazamiento.
- Georreferenciación de recursos.
- Incendios utilizados por Castillo (1997) para validar el simulador de incendios del Sistema KITRAL.

3.2.2.2 Entrevista a expertos

Debido a la escasez de información bibliográfica acerca del despacho, se realizó una entrevista a la totalidad (18) de los despachadores que trabajaban en la VIII región durante la temporada 1999/2000, tanto de empresas privadas como de CONAF, con el objeto de conocer las variables, condiciones y otros factores que ellos consideraban habitualmente al momento de tomar la decisión de despacho. La entrevista se estructuró en base a un cuestionario escrito de siete preguntas que se transcriben a continuación:

1. ¿Cree Usted que el tiempo destinado a tomar la decisión de despacho, desde que se reportado un nuevo foco, es suficiente?
2. ¿Qué factores Usted generalmente considera, en la función de despacho?
3. ¿Qué factores distintos a los que Usted generalmente considera, cree necesarios de incorporar a la función de despacho?
4. ¿Que factores o criterios aparte de los estrictamente técnicos cree Usted influyen la función de despacho?
5. ¿Qué información cree usted imprescindible conocer al momento de tomar la decisión de despacho?
6. ¿Cómo es la relación que la entidad en que Usted se desempeña, mantiene con otras entidades relacionadas con el combate de incendios forestales?
7. ¿Existe alguna otra pregunta o tema referente a la decisión de despacho necesaria considerar que no está presente en este cuestionario?

Las respuestas a estas preguntas se presentan en el apéndice I.

3.2.2.3 Software de apoyo

El procesamiento de la información fue apoyado utilizando softwares de cálculo y de SIG. Para el procesamiento de datos geográficos se utilizaron los softwares Idrisi y Arcview 3.2, principalmente en la georreferenciación e intersección datos. Como software de calculo se usaron Microsoft Excel y LINDO, preferentemente en la obtención de promedios y en las corridas del modelo.

3.3 Método

El desarrollo del modelo se basa principalmente en la identificación de las variables y restricciones críticas a considerar para el despacho. De los análisis de antecedentes y del trabajo en conjunto con los despachadores se definieron algunas variables y restricciones críticas que actualmente se están considerando en el despacho, y otras que son necesarias incluir en el modelo. Además se simularon incendios de características simples en el simulador de incendios del Sistema KITRAL, con el objetivo de evaluar el comportamiento de las variables y restricciones.

El problema bajo análisis planteó básicamente la necesidad de conocer cuál era la mejor combinación de recursos a asignar para el control de un incendio en un tiempo determinado, a un mínimo costo.

La obtención de esta información supuso que es posible conocer cuál era el comportamiento, forma y ubicación del incendio en todo momento, para ello fue indispensable la utilización de un simulador de incendios como el Sistema KITRAL.

3.3.1 Recolección de antecedentes

Los antecedentes sobre la ubicación, cantidad y tipo de recursos para el combate de incendios, además de la información correspondiente al despacho y las variables que se consideran comúnmente para la ejecución de esta actividad, fueron obtenidas directamente por el autor de la presente Memoria de Título, mediante observaciones del funcionamiento de la Sociedad de Protección del BioBío (SPB) durante cuatro meses, en el transcurso de la temporada de incendios 1999/2000. También se utilizó la información que proporcionan los módulos y bases de datos incluidos en el Sistema KITRAL, referentes a las variables y parámetros de los incendios a simular, como también los rendimientos estimados de los recursos para el combate.

Previamente, se ejecutó un proceso de validación de los datos, con el propósito de verificar la calidad de la información, considerando: su fuente; la forma de captura, la ubicación geográfica, método de generación (en el caso de los modelos digitales de terreno y mapas de combustibles) y la herramienta utilizada en el procesamiento (Software).

3.3.1.1 Caracterización preliminar de un incendio forestal modelo

En la definición de las variables a considerar para cualquier incendio, se simuló incendios sencillos en el Sistema KITRAL, con los cuales se extrajeron los parámetros necesarios para efectuar el análisis del despacho, y definir las variables determinantes en la formulación de un modelo, (posición del recurso de combate, costo de utilización, capacidad de supresión, tiempo de traslado, prioridades de protección, características del incendio, tiempo de combate, riesgo de nuevos incendios, entre otras).

Con posterioridad, se simuló nuevos incendios, aumentando el grado de complejidad (variados tipos y condiciones de focos, con distintas clases de combustibles, diversas situaciones topográficas, etc.), probando y ajustando el modelo, de manera de facilitar la prueba de sus respuestas en situaciones diferentes.

3.3.1.2 Información utilizada:

Los antecedentes requeridos se obtuvieron de las siguientes fuentes:

Entrevista: A los despachadores de la VIII región (tanto CONAF como de la SPB), con el fin de conocer la información que normalmente era considerada en las decisiones de despacho, y también sobre otros antecedentes adicionales relevantes basados en la experiencia adquirida en el ejercicio de esta función.

Modelo de combustibles del Sistema KITRAL⁴: Clasificación de tipos forestales que posee el Sistema KITRAL para las simulaciones de los incendios, a fin de poder determinar el modelo de combustible existente en el borde del incendio y así estimar, en base al rendimiento de los distintos recursos, el tiempo empleado en combate para el control del incendio.

Incendios forestales: Se utilizaron las bases de datos de incendios disponibles en el Laboratorio de Incendios Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile, que se caracterizan por contar con información confiable y validada.

Fichas de incendio de la SPB (1994/1995): Registros de los incendios seleccionados, donde constan los recursos utilizados en el control, sus tiempos de arribo y utilización.

Tablas de rendimientos y equivalencias: estándares de productividad de construcción de barreras contra el fuego para los distintos modelos de combustibles y equivalencias en combate de los distintos tipos de recursos, disponibles en el Sistema KITRAL.

Un supuesto importante es que las unidades de combate (brigadas, carros cisterna, tractores y otras) poseen una similar productividad (o estandarización) en la extinción de incendios, de acuerdo a la estructura y tamaño de los programas de manejo del fuego, y de acuerdo con los estándares utilizados en el Sistema KITRAL.

Por su parte, las limitaciones encontradas para el desarrollo del estudio, se mencionan a continuación:

- Escasa bibliografía en el tema, lo que dificultó la obtención de antecedentes sobre el desarrollo de sistemas de despacho.
- Diferencias importantes en la cantidad y calidad de recursos entre el sector público y privado.
- Se constató una importante falencia de personal especializado en el tema del despacho, ya que en Chile esta función es asumido, en la práctica, sólo por operadores de centrales de operaciones, no existiendo interacción con profesionales de otras áreas.

⁴Caracterización y clasificación de los modelos de combustibles para Chile desarrollada principalmente por la Universidad de Chile, Universidad Austral y el Instituto Forestal, con el apoyo del FONDEF.

3.3.2 Procesamiento de información:

La selección de variables se realizó considerando, en primer lugar, una agrupación de las respuestas recurrentes en la entrevista y, luego, ordenándolas de acuerdo a su asociación o área.

3.3.3 Caracterización del modelo

En la definición del modelo fue necesario precisar cuáles eran las variables involucradas al proceso. En el diseño se analizó la información recogida de los despachadores y la recopilada en la central de incendios. Posteriormente se procesó información de incendios para confirmar la validez y coherencia del modelo.

Como resultado de las entrevistas se pudo apreciar el tipo de información que habitualmente es considerada para la decisión de despacho; la que está referida a:

- *Tiempo atmosférico:* Las condiciones meteorológicas presentes en el área al momento de aviso de un nuevo foco.
- *Combustible y topografía:* Tipo de combustible y su continuidad. La topografía está referida a las características del terreno, principalmente por la accesibilidad de los recursos.
- *Ocurrencia:* De incendios forestales en el área, tanto propia como ajena.
- *Recursos:* Tiempos de arribo y la ubicación de los medios de combate al momento del evento, como así también la seguridad aplicada en la operación.
- *Ubicación de los predios:* La alarma de un nuevo foco para comprobar la existencia de predios bajo amenaza.
- *Fuentes de información:* Origen y tipo de información requerida para tomar la decisión de despacho, como también las características del foco y su evolución en los primeros minutos.
- *Valorización de predios:* Valor del predio afectado y su grado de amenaza, como también la prioridad de protección del sector.

Adicionalmente, se dedujo que otros factores se incluyen indirectamente en la decisión de despacho, los que esencialmente consisten en:

- *Comportamiento del fuego:* Dirección y velocidad de propagación del incendio en el o los modelos de combustible presentes en el lugar.
- *Información de apoyo:* Caminos de acceso, fuente de combate cercano al incendio, fuentes de agua, conocimiento de la topografía, etc.
- *Procedimientos:* Reforzar y mejorar los procedimientos existentes, simplificar los reportes, mantener los canales de comunicación despejados, y despachar sin tantas consultas de la central al torrero.

- *Ambiente de trabajo:* Tranquilidad para tomar las decisiones de despacho e informar a las jefaturas una vez efectuado.

El despacho, es asimilable a un problema de asignación de recursos, ya que su propósito básico es definir la cantidad de recursos que se requiere para poder controlar un incendio determinado en un tiempo dado. Por lo tanto la función objetivo definida fue la de minimizar el costo de combate para cada evento en un período.

El problema bajo análisis, por las características que posee, puede ser planteado como un modelo de programación lineal (entera, entera binaria, dinámica u otra), o también por simulación. Sin embargo, a partir de los análisis y resultados obtenidos de los procesos anteriores se cuenta con la suficiente base para definir el tipo modelo (de optimización o simulación).

Se supuso que es factible desarrollar un modelo matemático de optimización, además de esperar que las posibles variaciones meteorológicas puedan ser modeladas como variables aleatorias.

Para el desarrollo del modelo se asumió las siguientes premisas:

- Las equivalencias y los estándares de rendimientos propuestos por Julio (1995) son aplicables.
- Los helicópteros, además de transportar al personal, pueden realizar lanzamientos de agua o sustancias químicas.
- Los resultados obtenidos en la modelación de la propagación de incendios, realizada con el sistema KITRAL, y la información contenida en las fichas de incendios son válidos.
- Todas las brigadas poseen un rendimiento estándar en la construcción de líneas de control
- El ancho de la línea de control que se utiliza para la simulación es suficiente para controlar el incendio (0.5 –1.5 m).

La información procesada de la entrevista a los despachadores, muestra que los factores que se consideran al momento de tomar la decisión de despacho comprenden dos áreas; la primera de ellas incluye aspectos propios del comportamiento del fuego, y la segunda, aspectos atribuibles a la función de despacho propiamente tal.

Aspectos	Asociación
• Factor atmosférico	Comportamiento del fuego
• Combustible y topografía	Comportamiento del fuego
• Ocurrencia	Despacho
• Recursos	Despacho
• Ubicación de los predios	Despacho
• Fuente de información	Despacho
• Valorización de predios	Despacho

3.3.4 Formulación del modelo

El problema bajo análisis se puede calificar como una variación de los modelos de transporte y asignación, ya que consiste en asignar una determinada cantidad de recursos necesarios para controlar un incendio, lo cual sería un destino. Tradicionalmente estos modelos han sido formulados como problemas de programación lineal entera, ya que las variables deben asumir valores enteros, dada la imposibilidad de ocupar fracciones de recursos.

Para el caso particular del modelo de despacho, el problema tendría una estructura similar, ya que el objetivo principal consiste en determinar qué tipo y cantidad de recursos se deben asignar a un incendio para su control, a un mínimo costo.

El modelo debe contener restricciones propias del comportamiento del fuego que permitan relacionar al evento con los recursos; además deben estar presentes las restricciones propias de los procedimientos de despacho de cada entidad.

Para efectos de la formulación del modelo, se supuso que los recursos deben circundar completo el incendio, y que debiese incluir por lo menos las siguientes restricciones:

- La velocidad con que los recursos de combate construyen la línea de control, debe ser mayor que la velocidad de incremento del perímetro del incendio.
- La longitud de la barrera de control debe ser mayor que el perímetro del incendio para lograr su control.
- El tiempo requerido por las brigadas para construir la línea de control, menos el tiempo que demoran los recursos que se incorporan posteriormente, debe ser menor que el tiempo objetivo de control
- El costo de combate, debe ser menor que el valor del patrimonio a proteger bajo amenaza

- La cantidad asignada de un recurso, debe ser menor o igual que la cantidad total disponible del mismo.
- A cada evento debe acudir a lo menos una unidad de recurso.

Como el problema consiste en minimizar el costo de combate, la expresión matemática queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \text{Min } T \sum_{i=1}^n C_i R_i \\ \text{Restricciones:} & \\ & \sum_{i=1}^n R_i R_{nd_i} \geq T_{cp} \\ & \sum_{i=1}^n T_{ci} R_{nd_i} R_i \geq LP \\ & \left(\frac{LP}{R_{nd_i}} - T_{ai} \right) R_i - \sum_{i=2}^n \left(\frac{LP}{R_{nd_i}} - T_{ai} \right) R_i \leq T \\ & T \sum_{i=1}^n C_i R_i \geq CP \\ & R_i \leq CDR_i \\ & R_i \geq 1 \end{aligned}$$

Figura 4. Modelo matemático

Donde:

- T: Tiempo objetivo de Control
 Ci: Costo de utilizar el recurso i una hora
 Ri: Cantidad a utilizar del recurso i
 Rndi: Rendimiento en construcción del líneas del recurso i
 Tcp: Tasa de crecimiento del perímetro
 Tci: Tiempo de combate del recurso i
 LP: Longitud del perímetro
 CP: Costo o valor del patrimonio
 CDRi: Cantidad disponible del recurso i
 Tai: Tiempo de arribo del recurso i

Si bien este modelo cumple con las restricciones mencionadas anteriormente, es válido sólo para un modelo de combustible presente en la zona del incendio, lo que no corresponde a la mayoría de los casos. Por esto fue necesario ajustar el modelo anterior para un escenario de varios modelos de combustibles, lo que quedaría expresado matemáticamente de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } T \sum_{i=1}^n C_i R_i \\
 & \text{s.a:} \\
 & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{R_i R_{ndij}}{m} \geq T_{cp} \\
 & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{c_i} \left(\frac{R_{ndij} R_i}{m} \right) \geq LP \\
 & \sum_{j=1}^m \left(\frac{LP}{R_{ndij}} - T_{a_i} \right) R_i - \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{LP}{R_{ndij}} - T_{a_i} \right) R_i \leq T \\
 & T \sum_{i=1}^n C_i R_i \geq CP \\
 & R_i \leq CDR_i \\
 & R_i \geq 1
 \end{aligned}$$

Figura 5. Modelo matemático para varios modelos de combustibles.

Donde:

- T: Tiempo objetivo de Control.
- C_i: Costo de utilizar el recurso *i* una hora.
- R_i: Cantidad a utilizar del recurso *i*.
- R_{ndij}: Rendimiento en construcción del líneas del recurso *i* en el modelo de combustible *j*.
- T_{cp}: Tasa de crecimiento del perímetro
- T_{c_i}: Tiempo de combate del recurso *i*
- LP: Perímetro
- CP: Costo o valor del patrimonio.
- CDR_i: Cantidad disponible del recurso *i*.
- T_{a_i}: Tiempo de arribo del recurso *i*.
- m: Cantidad de modelos de combustibles

La estimación de parámetros se realiza con información que proporciona el Sistema KITRAL (respecto a los parámetros de incendio, como son la superficie, perímetro y velocidad de avance).

Los valores de costos y recursos son los utilizados por la SPB.

3.4 Procesamiento de datos para la prueba del modelo

Con el objetivo de minimizar las fuentes de error se seleccionaron incendios validados en el Sistema KITRAL para poder obtener de ellos los parámetros entrada para el modelo. Los incendios seleccionados fueron los utilizados por Castillo (1997) en su trabajo de validación del mismo simulador de incendios.

Tabla 5. incendios seleccionados.

Nombre	hora inicio	hora término	Duración (min)	Sup (ha)
El Molino	20:26	21:55	89	0,44
El Quillay	10:40	12:18	98	0,94
La Montaña y los toronjiles	7:00	9:06	126	9,32
Loma colorada lote 2	19:50	20:25	35	1,19
Loma colorada lote 3	16:03	17:22	79	1,19
Redolino 1	19:54	21:25	91	1,94
San José de Pichago	16:51	18:40	109	0,81
Tomeco	13:24	14:33	64	0,01
Trecacura grande H-B	15:33	16:36	63	6,88
Zorzal blanco 2	17:08	18:00	52	2,38

Para determinar el tipo de combustible presente en el perímetro del incendio se realizó una intersección entre los polígonos que representan los incendios seleccionados y la cobertura que representa el modelo de combustibles del Sistema KITRAL. De este procedimiento se obtuvo como resultado la siguiente tabla, con la cual se pudo estimar los tiempos que los recursos emplean en cada uno de ellos.

Tabla 6. Identificación de los modelos de combustibles presentes en el borde del modelo de propagación del incendio.

Incendio	Longitudes (m) por modelos de combustibles ⁵							
	PCH1	PCH2	PCH4	MT03	PL02	PL03	PL04	URBANO
El molino	0	0	0	0	0	0	0	9375
El Quillay	0	0	0	0	0	7500	0	0
La Montaña y los Toronjiles	0	0	0	0	0	0	23750	0
Lomas coloradas lote 2	26250	0	0	0	0	0	0	0
Lomas coloradas lote 3	0	16250	0	0	0	0	49375	0
Redolino 1	2500	0	0	1250	0	0	0	0
San Jose de Pichago	0	0	0	5000	0	0	7500	0
Tomeco	0	68125	0	0	625	0	0	0
Trecacura grande H-B	0	0	0	20625	0	0	0	0
Zorzal blanco 2	0	0	13125	0	0	0	0	0

⁵ Ver anexo 3

Para poder comparar los resultados que entrega el modelo con valores reales, se revisó cada ficha de incendio con el objeto de conocer los valores de tipos de combustibles registrados en ellas y los tiempos de cada evento. Estos datos se registraron en la siguiente tabla.

Tabla 7. Información de las fichas de incendio SPB

Incendio	Modelo de combustible	Duración del incendio (min.)
el Molino	PL09-MT03	89
El Quillay	ninguno	98
La Montaña y los Toronjiles	MT04	126
Loma colorada Lote 2	PCH02-PL02	35
Loma Colorada lote 3	PCH02	79
Redolino 1	PCH02	91
San Jose de Pichago	MT03	109
Trecacura grande H-B	ninguno	63
Zorzal Blanco 2	ninguno	52

Posteriormente se realizó una comparación entre los registros de tipos de combustibles de las fichas de incendio y los valores obtenidos del proceso de intersección descrito anteriormente, apreciándose una notoria diferencia entre los tipos de combustibles registrados para cada evento. Con estos resultados, sólo fue posible utilizar dos incendios (Lomas Coloradas lote 3 y San José de Pichago) para probar el modelo.

Como metodológicamente se necesita conocer el combustible presente en el perímetro del incendio en el momento dado, se tomó la decisión de asumir que los valores obtenidos de la intersección de los incendios y el modelo de combustibles eran correctos.

Tabla 8. Comparación entre los valores obtenidos de las fichas de incendio y del tipo de combustibles de la cobertura del Sistema KITRAL.

Incendios	Fichas de Incendios	Resultado intersección
El Molino	PL09-MT3	Urbano
El Quillay	Ninguno	PL3
La Montaña y los toronjiles	MT04	PL04
Lomas Coloradas lote 2	PCH02-PL02	PCH1
Lomas Coloradas lote 3	PCH02	PCH02-PL04
Redolino 1	PCH02	PCH1-MT03
San José de Pichago	MT03	MT03-PL04
Tomeco ⁶		PCH02-PL02
Trecacura Grande H-B	Ninguno	MT03
zorzal blanco 2	Ninguno	PCH04

⁶ No se encontró la ficha de este incendio en la base de datos la temporada 1994/1995 de la SPB.

3.4.1. Estimación de tiempos de arribo

Una variable esencial para el modelo es el tiempo disponible de cada recurso en la operación de combate, porque determina su rendimiento en la construcción de líneas y el costo que ello implica.

Dado el tiempo objetivo de control del evento, una forma sencilla de determinar el tiempo de combate es conocer el tiempo de arribo, ya que los recursos antes de llegar a combatir a un evento emplean un determinado tiempo en desplazamiento.

Bajo este supuesto se tendrían la siguiente definición de tiempos para los recursos:

$$T=TC+TA$$

Donde:

- T = tiempo objetivo de control.
- TC = tiempo de combate.
- TA = tiempo de arribo.

Al conocer la ubicación de los recursos y de los incendios, teóricamente es posible calcular los tiempos de desplazamiento que emplearía cada recurso en llegar al evento. Esto en el caso de los recursos aéreos sería sencillo, ya que el tiempo se calcula dividiendo la distancia por la velocidad, pero para el caso de los recursos terrestres es necesario emplear algoritmos un poco más complejos que consideren las posibles rutas de acceso, la velocidad de desplazamiento según el tipo de carpeta de rodado, etc.

Como el objetivo central de esta memoria está acotado al desarrollo de un modelo de despacho para la asignación de recursos, se estimaron los tiempos de arribo para efectos de cálculo, utilizando los promedios de toda la información existente, desde las temporadas 1991-1992 hasta 1999-2000 (esta última considerada hasta el 5 de marzo).

En este análisis se consideró el tiempo en que cada recurso salía de su base o posición de stand by hasta la llegada al incendio, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 9. Resumen de tiempos promedios de arribo de los recursos de la SPB (min) en 10 temporadas

Recurso de combate	Promedios por temporadas y total									
	91-92	92-93	93-94	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00*	Tiempo Promedio
Airtractor (AT)								12	13	12
Brigada (BR)		35	33	22	27	39	32	35	33	32
Camión Cisterna (CC)		62	59	43	44	58	48	62	62	55
Dromader (AP)		8	7	18	13	9	10	14	13	11
Guardabosque			18	26	25	21	25	25	25	23
Helicóptero (HC)	13	14	17	16	17	16	15	14	12	15

Del mismo modo descrito anteriormente, y solo como información de referencia se calculó el tiempo de combate promedio para cada tipo de recurso.

Tabla 10. Resumen de tiempos promedio de combate de recursos de la SPB (min).

Recurso de combate	Temporada									Tiempo Promedio
	91-92	92-93	93-94	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00*	
Airtractor (AT)								21	22	21
Brigada (BR)		165	136	117	155	143	119	165	135	142
Camión Cisterna (CC)		226	190	163	224	190	139	202	252	198
Dromader (AP)		63	129	35	130	85	54	47	28	71
Guardabosque			136	164	217	181	145	177	205	175
Helicóptero (HC)	59	95	83	102	108	112	74	76	56	85

* Hasta el 05/03/2000

3.4.2 Valoración del patrimonio

En los supuestos del modelo se establece que el costo de combate debe ser inferior que el valor del patrimonio a proteger.

Esta restricción implica la necesidad de contar con una valoración económica del patrimonio bajo protección que permita discriminar si el costo de los recursos que están siendo asignados no supera este valor. Sin embargo, por la imposibilidad de obtener la señalada información, la información no pudo ser finalmente considerada.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Modelo

La función obtenida plantea una solución al problema desde el punto de vista de minimizar los recursos de combate para un incendio determinado, y por ende sus costos.

La función objetivo del modelo es minimizar la sumatoria de recursos multiplicados por su costo, que se emplean en la presupesión de un incendio en un tiempo objetivo dado.

Como restricciones se tiene que el rendimiento conjunto de todos los recursos empleados en cada modelo de combustible debe ser mayor que la tasa de crecimiento del perímetro. Además se establece como restricción que la suma de tramos de las línea de control (o barreras) construidas por cada recurso participante debe circunscribir el incendio. También se establece como restricción que los tiempos de trabajo de los recursos empleados debe ser menor que el tiempo objetivo de control.

Una ultima restricción establece que el costo de los recursos empleados en cada despacho, debe ser menor que la valoración económica del patrimonio bajo protección.

4.1.1 Modelo matemático

El modelo queda expresado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \text{Min } T \sum_{i=1}^n C_i R_i \\ & \text{s.a:} \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{R_i R_{nd_{ij}}}{m} \geq T_{cp} \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ci} \left(\frac{R_{nd_{ij}} R_i}{m} \right) \geq LP \\ & \sum_{j=1}^m \left(\frac{LP}{R_{nd_{ij}}} - T_{ai} \right) R_i - \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{LP}{R_{nd_{ij}}} - T_{ai} \right) R_i \leq T \\ & T \sum_{i=1}^n C_i R_i \geq CP \\ & R_i \leq CDR_i \\ & R_i \geq 1 \end{aligned}$$

Figura 6. Modelo final

Donde:

- T: Tiempo objetivo de Control.
- C_i : Costo de utilizar el recurso i una hora.
- R_i : Cantidad a utilizar del recurso i .
- Rnd_{ij} : Rendimiento en construcción del líneas del recurso i en el modelo de combustible j .
- Tcp : Tasa de crecimiento del perímetro
- Tc_i : Tiempo de combate del recurso i
- LP: Perímetro
- CP: Costo o valor del patrimonio.
- CDR $_i$: Cantidad disponible del recurso i .
- Ta_i : Tiempo de arribo del recurso i .
- m: Modelos de combustibles

4.1.2 Solución del Modelo

Como se puede observar en los siguientes ejemplos, el modelo entrega resultados coherentes en la comparación de valores simulados con los empleados en la realidad.

Para el incendio Lomas Coloradas, una corrida del modelo entrega un valor de 82.7 UF (después de 17 iteraciones) para la función objetivo y la siguiente cantidad de recursos asignados:

Variable	Valor entregado	Costo del recurso
BR	3	1
CC	0	3
HG	0	70
HC	1	46.7
AP	1	33
AT	0	74

Al comparar estos resultados con los obtenidos en la realidad, se observa :

	Recursos Reales	Recursos Simulado
	3 brigadas (BR)	3 brigadas (BR)
	2 Air Tractor (AT)	1 Dromader (AP)
	1 Bell 205 (HC)	1 Bell 205 (HC)
	1 CA3 (CC)	
Costo (UF)	200.7	82.7

Para el incendio San José de Pichago, una corrida del modelo entrega un valor de 35 UF (después de 18 iteraciones) para la función objetivo y la siguiente cantidad de recursos asignados:

Variable	Valor entregado	Costo del recurso
BR	2	1
CC	0	3
HG	0	70
HC	0	46.7
AP	1	33
AT	0	74

Al comparar estos resultados con los recursos empleados en la realidad, se observa:

	Recursos Reales	Recursos Simulados
	1 brigada (BR)	2 brigadas (BR)
	1 Bell 205 (HC)	1 dromader (AP)
	1 AC1 (AT)	
Costo (UF)	121.7	35

4.2. Discusión

Si bien el desarrollo de un modelo de optimización es factible tanto teórica como matemáticamente, la insuficiencia de datos impide su validación estadística por el momento.

Al comparar los resultados obtenidos anteriormente se aprecia un ahorro importante para estos los casos de los incendios Lomas coloradas lote 3 y San José de Pichago (58.8% y 71.2 % respectivamente), debido principalmente a los costos de los tipos de recursos utilizados.

La solución del problema por medio de un modelo de programación lineal entera permite cuantificar caso a caso la combinación de recursos de menor costo para el combate de un incendio, considerando como obligatorio el uso de un simulador que permita obtener los parámetros necesarios a considerar en las restricciones.

Es importante tener presente diversos aspectos que inciden directamente en la eficiencia del combate, particularmente relacionados con la decisión de despacho, como es el adecuado conocimiento de las capacidades y costos operacionales de los recursos a movilizar, la valoración del patrimonio a proteger, la conveniencia de contar y cumplir con las normas requeridas para la función, la disponibilidad de bases de datos completas y confiables, como así también, el registro exacto de los tiempos ejecución de la movilización , primer ataque y control del incendio.

4.2.1 Recursos de combate

El tipo y eficiencia de los recursos empleados en Chile, de acuerdo a las características de su territorio, los lugares de ocurrencia de incendio, y la ubicación de los recursos, son preponderantes en los resultados de un modelo de este tipo.

Si bien es cierto que actualmente se tiene acceso a sofisticados y diversos medios de combate, es necesario evaluar la idoneidad de estos en el territorio nacional.

El uso de aviones, puede ser eficaz en algunas ocasiones, pero implica un costo reducible en los programas de manejo del fuego, ya que algunas zonas del país cuentan con una muy buena red vial de acceso, y como los incendios son en su mayoría provocados por el hombre, los focos de estos están relativamente cerca de los caminos, y se podría por ejemplo cambiar algunas horas de uso por recursos aéreos por una mayor dotación y distribución de brigadas. (el costo de una hora de vuelo, equivale a entre 36 y 74 veces la de una hora de combate de una brigada, dependiendo del tipo de recurso aéreo empleado).

Debido a la diferencia que se apreció en los ejemplos utilizados para la prueba del modelo, se realizó un análisis de eficiencia de los distintos tipos de recursos, el cual se presenta en el anexo 2

4.2.2 Valoración del Patrimonio.

Un aspecto importante dentro del desarrollo de esta memoria y que requiere un mayor análisis posterior, es el tema de la valoración del patrimonio. Si bien para el caso de las plantaciones se pueden obtener valores de acuerdo al régimen silvicultural establecido, no es tan sencillo para otros tipos de combustibles o para zonas de alto valor social.

Por ejemplo para una plantación de pino radiata, al evaluar el costo del patrimonio con un régimen silvicultural común (ver anexo 1), como un proyecto, se constata que para plantaciones de un año, se podría gastar como máximo por un vez, un valor de \$1.716.681 por hectárea, mientras que para plantaciones de 22 años el monto asciende \$8.641.488 por hectárea.

En el caso de los pastizales, matorrales o bosque nativo, no se dispone de herramientas suficientemente confiables para su valoración económica. Por otra parte, cuando un incendio amenaza vidas humanas, podría optarse a estimar la potencial pérdida en un monto infinito, pero no sucede lo mismo cuando se encuentran en riesgo valores sociales como el Cerro Caracol en Concepción o el Parque Metropolitano de Santiago, por citar algunos ejemplos. Entonces, ante sistemas de combate basados en el golpe único o ataque masivo, utilizados por las empresas forestales, no siempre se tiene claridad si el valor del recurso bajo protección justifica el elevado gasto que ellos significan.

Lo anterior también es válido para el patrimonio público, como ocurre con las unidades del SNASPE, cuya valoración es indispensable para determinar las asignaciones presupuestarias recomendables para asegurar un adecuado nivel de protección.

4.2.3 Normas de despacho.

Es importante mencionar, que el despacho esta basado tradicionalmente en la experiencia y conocimiento que poseen los despachadores, ya que éstos indirectamente tratan de inferir el comportamiento que tendrá un incendio, en cuanto a su velocidad y forma de propagación, siendo que en Chile existen herramientas como el Sistema KITRAL que permite obtener estos parámetros directamente.

No es parte de este trabajo evaluar o no la validez de ciertas herramientas, pero metodológicamente, para la asignación de recursos a cualquier evento se debería contar con una estimación más precisa.

Si bien la evaluación del posible comportamiento de un incendio es inferida por el despachador, y una mejor aproximación se obtiene con el reporte al momento del arribo del primer recurso, estas evaluaciones son realizadas por personas, que en el caso de no contar con la experiencia suficiente, puede en un primer momento, significar la pérdida de un tiempo valioso que afecte al éxito del control de un incendio.

Actualmente el despacho cuenta con varios sistemas de apoyo, basados en sistemas de información geográfica, que desde el punto de vista del evento, sólo permiten conocer el combustible amenazado y la ubicación de los recursos. Si bien estas innovaciones tecnológicas significan un avance, podrían incorporarse otros desarrollos que permitan evitar las subjetividades en la evaluación de los incendios.

No caben dudas que el despacho, aún cuando técnicamente esté bien diseñado, y se encuentre apoyado por instrumentos modernos para la toma de decisiones, su ejecución puede llegar a ser ineficiente si intervienen acciones o actores que no se ajusten a lo estipulado en las correspondientes normas establecidas para esta función.

4.3.4 Tratamiento de la información

Las diferencias que se detectaron al comparar los modelos de combustibles registrados en las fichas de incendios y los obtenidos de la intersección entre la cobertura digital de los incendios y el modelo de combustibles del Sistema KITRAL, puede producirse por un mal registro en la ficha de incendios o porque la identificación de tipos de combustibles presenta errores en ciertas zonas. Esto descalificó una importante cantidad de datos, por lo tanto es recomendable que estos antecedentes sean revisados con rigurosidad para futuros estudios en el tema.

4.3.5 Estimación de tiempos

Al igual que en el punto anterior, la función de despacho será eficiente en la medida que se posea un adecuado conocimiento del valor y rendimiento de cada uno de los tipos de recursos disponibles para el combate, como así también respecto a los tiempos que estos requieren para desplazarse y ejecutar las operaciones a que estén destinados. En estos aspectos, el uso de sistemas de información geográfica pueden constituir un valioso apoyo a la toma de decisiones.

4.3.6 Investigación futura

En el desarrollo del modelo, y tal como se ha señalado anteriormente, se constató diversos problemas con la información requerida. Por un lado no se contó con determinados antecedentes (rendimiento de recursos para el combate, por ejemplo), lo que llevó al empleo de supuestos y, en otros casos, llevo a la decisión de no considerar alguna restricción formulada originalmente (valoración económica). Por otra parte, diversos antecedentes utilizados comprobaron una baja confiabilidad (información sobre modelos de combustibles, lo que condujo a la necesidad de eliminar la mayoría de los incendios seleccionados para la prueba del modelo.

Lo anterior refleja la conveniencia de establecer un programa de investigación en el tema de despacho, que apunte a resolver lo señalado precedentemente, además de velar por el perfeccionamiento permanente de los instrumentos de apoyo a la toma de decisiones, como es el propuesto en este trabajo.

5.- CONCLUSIONES

- El modelo construido entrega valores coherentes sobre la asignación de recursos para el combate de un incendio minimizando los costos.
- Una de las variables claves en el desarrollo del modelo es la valoración del patrimonio amenazado, ya que con ella se podría determinar si se justifica combatir el incendio.
- Los tipos y costos de recursos para el combate tienen una fuerte influencia en los resultados que pueda entregar el modelo.
- La eficiencia de los resultados de la aplicación del modelo no será posible si no se observa un estricto cumplimiento de las normas de despacho establecidas por el correspondiente programa de manejo del fuego.
- Aún cuando se utilicen instrumentos modernos para apoyar al despacho, como podría ser el caso del modelo construido en el presente trabajo, es indispensable disponer de personal competente y debidamente capacitado en la ejecución de esta delicada función.
- Se estima altamente recomendable continuar los estudios de optimización del despacho iniciado en esta Memoria de Título, por cuanto son diversos los supuestos que requerirán ser validados, además de la necesidad de completar el conocimiento e información sobre diversos aspectos requeridos para asegurar el correcto desenvolvimiento de la función de despacho.

6.-BIBLIOGRAFIA

Andrews, P. 1986 BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system-BURN subsystem, part 1, Gen. Tech. Rep. INT-194. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 130p.

Castillo, M.1997. Método de validación para el simulador de incendios forestales del Sistema KITRAL, Memoria, Ingeniería Forestal, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 122 p.

Donovan and Rideout, 2002. An Integer Programming Model to Optimize Resource Allocation For Wildfire Containment, forest Science 49, 2003. pag. 331-335.

Forestal Arauco Ltda.1981. Instructivo nº 2 "Plan de Salida", Departamento de Manejo, Programa de protección. 7p.

Forestal Arauco Ltda.1983. Instructivo nº 9 "Regulación de actividades según el grado de peligro", Unidad de protección. 5p.

Forestal Arauco Ltda.,1984. Instructivo nº 10 "Criterios para el despacho de recursos de combate", Unidad de protección. 4p.

Forestal Celco Ltda.,1986. Despacho. Gerencia, Constitución Chile, 11p.

González, R.; Zanotti, I.; Viveros, P.; Kottow, D.,1995. Implementación de un simulador de expansión de incendios forestales. Proyecto FONDEF FI-13.Universidad de Chile, INTEC-CHILE, INFOR. En Actas del Taller internacional sobre prognosis y gestión en control de incendios forestales. Santiago de Chile 8-10 de noviembre de 1995. pag.210-214,259 p.

Hof, Omi, Bevers and Laven, 2000. A Timing-Oriented Approach to Spatial Allocation of Fire Management Effort, Forest Science 46,2000, pag. 442-451.

Julio, G.1999, Fundamentos del Manejo del Fuego, Publicación Dpto. Manejo de Recursos Forestales, Universidad de Chile, Santiago de Chile. 325 p.

Julio, G. Castillo, E., Pedernera, P., 1995. Modelación de combustibles, en Actas del Taller Internacional sobre Prognosis y Gestión en control de incendios Forestales, Santiago de Chile. 8-10 de noviembre de 1995., pag 111-127.

Julio, G. Pedernera, P.,Castillo, E., 1995. Diseño Funcional del Simulador de incendios forestales, en Actas del Taller Internacional sobre Prognosis y Gestión en Control de Incendios Forestales, Santiago de Chile. 8-10 de noviembre de 1995., pag 182-204.

Kourtz, P.,1989 Two dynamic programming algorithms for forest fire resource dispatching, Canadian Journal of Forest Research, Canadá, 7p

Martell, D.L. , Drysdale, R.J., Doan G.E y Boychuk, D. 1984, An evaluation of forest fire initial attack resources. Interfaces 14(5) ,pag. 20-32.

Pedernera, P., Julio, G.,Castillo, E., 1995, Modelo de optimización para el diseño de sistemas de torres de detección de incendios forestales, en Actas del Taller Internacional sobre Prognosis y gestión en Control de Incendios Forestales, Santiago de Chile. 8-10 de noviembre de 1995., pag 129-138.

Pradwa, J. 1993, Métodos y modelos de investigación de operaciones. Limusa editores, Mexico, 1961 p.

Valencia, R.1991, Esquema lógico de un sistema experto para el apoyo del despacho de recursos a la supresión de incendios forestales, Memoria, Ingeniería Forestal Universidad de Chile, Santiago de Chile, 103 p.

Sala, R. 2002, Decisiones de optimización, Editorial Tirant, España 406 p.

APÉNDICE I

Cuestionario Respuestas Procesados

Esta entrevista se aplicó a 18 despachadores de la VIII región, pertenecientes tanto a empresas privadas como a CONAF.

Las respuestas fueron agrupadas y clasificadas de acuerdo a la similitud entre ellas como así también el número de repeticiones. (Expresado entre paréntesis).

De esta entrevista se pudo obtener la siguiente información; que se describe a continuación en la forma textual que fue expresada.

Preguntas:

1. ¿Cree usted que el tiempo destinado a tomar la decisión de despacho, desde que han reportado un nuevo foco es suficiente?

Sí

- Sí, siempre que considere todas las variables y permita una evaluación optimizando todas las variables.
- Sí (3)
- Si, yo creo que es suficiente, para enfrentar y dilucidar la situación de despacho de la unidad respectiva, mejor ubicada y con menor tiempo de respuesta a la ubicación del foco.

2-3 minutos

- El tiempo de despacho optimo son 2 a 3 minutos, tiempo en el cual se decide la asignación de recursos, sin embargo hay veces que este puede exceder, lo cual no implica que haya sido malo.
- El criterio utilizado en función del tiempo es distinto en cada despacho, por lo tanto es suficiente cuando la información recibida es confiable y fidedigna dependiendo del medio de reporte.
- Cuando la información es poco clara es necesario usar mayor tiempo en tomar una decisión sobre todo cuando los costos pueden ser mayores.
- Debería ser entre 30 segundos y 3 minutos dependiendo de la información recibida.
- El tiempo de decisión de despacho depende mucho de la información que las torres entreguen, si tenemos 2 torres con un buen corte y características del foco, el despacho puede tomar menos de un minuto.
- El tiempo ideal sería 1,5 minutos.
- Entendemos por tiempo destinado 2 minutos como máximo, el cual es suficiente para efectuar un despacho.

Depende

- El tiempo destinado al despacho y a la toma de decisiones va a depender del despachador, de la experiencia que este tenga, además es fundamental el equipo de trabajo, que de seguridad y que esa seguridad se pueda transmitir a los recursos del sistema.
- Sería suficiente si se contara con todos los antecedentes necesarios para el despacho, como por ejemplo: corte de las torres, características del humo, viento, temperatura, combustible, amenaza de predios, acceso terrestre; ya que en la mayoría de los casos solo se cuenta con el reporte de grados para el reporte de una o dos torres solamente.
- Debiera ser siempre lo suficiente para que las pautas de despacho se cumplan en función a los requerimientos de cada programa y capacidad del despachador.
- Nunca es suficiente, generalmente la información de reportes es la mínima, como por ejemplo siempre lo único claro es la coloración del humo; ahora enviar tales o cuales recursos es más corazonada e instinto.
- Siempre el primer despacho se hace con el mínimo de información.;
- El tiempo posterior a un reporte de un nuevo foco va a ser suficiente, mientras el despachador conozca la zona y la ubicación clara de los recursos

2. ¿Qué factores Usted generalmente considera, en la función de despacho?

Tiempo atmosférico

- Condiciones meteorológicas o climáticas (9)
- Condiciones climáticas del sector

Combustible y topografía

- Tipo de topografía y combustible (3).
- El conocimiento del terreno (topografía).
- Combustible afectado y su continuidad (3).

Ocurrencia

- Ocurrencia en el área (propia como de otras entidades) (3).
- Índice de posible ocurrencia, no dejar sectores descubiertos.
- Prioridad de sectores en base a la ocurrencia, convenios y sectores de importancia para la ciudadanía.
- Ocurrencia y nivel de alerta del día.

Valorización de predios

- Valor de la amenaza.
- Priorización de valores de predios (2).
- Predios amenazados (2).
- Que tipo de prioridad tiene el sector donde se ubica el foco.

Ubicación de los predios

- Cercanía al predio (2),
- Ubicación del foco
- Conocimiento de la ubicación de predios

Fuente de información

- Que la fuente de detección sea fidedigna (2).
- Tipo de información recibida, Evolución en 30seg, 1minuto, 1,5 minutos.
- Características del foco.
- Claridad en recibir y entregar información por radio.
- Grado de capacitación o conocimiento de los predios por parte de la persona que detecta un foco.
- Evaluación visual de la fuente informante.
- Qué cantidad de recursos se le asignaran al foco y que tipo.
- Quien reporta el foco; Torres, centrales personal técnico, bomberos o particulares. Es determinante el tipo de información que entregan estas diferentes fuentes.
- Comunicación con otras instituciones (carabineros, bomberos y otras empresas forestales).
- Atención (estar atento).
- Rapidez.
- Decisión Acertada,
- Actitud.
- Concentración.

Recursos

- Tiempos de arribo de las unidades (6).
- Ubicación de los recursos y la seguridad de estos para combatir (2).
- Accesos (2).
- Disponibilidad de recursos (2).

3. ¿Qué factores distintos a los que usted generalmente considera, creé necesarios de incorporar a la función de despacho?

Valoración del patrimonio

- Valoración del recurso.
- Valor económico del patrimonio amenazado, para no sobrepasar los costos de protección o combate.

Comportamiento del fuego

- Avance y propagación del combustible.
- Condiciones meteorológicas.

Información de apoyo

- La utilización de fuentes de apoyo.

- Conocimiento de caminos de acceso a un R-20 por parte de recursos terrestres externas al sistema de protección (cuadrillas contratistas, supervisores, etc.)
- Apoyo con SIG,
- Si bien es cierto que los incendios son 7 meses (desde octubre a abril) los otros 5 meses dedicarlos de lleno a conocimientos de terreno, como preocupación de vías de acceso, topografías, fuentes de agua potenciales, conocer en sus quehaceres a los guardabosques.
- Mejorar los sistemas de información meteorológica, personal de apoyo (faenas), conocer cada una de las torres(sus coberturas, limitaciones y si realmente están bien ubicadas).
- Poder tener preestablecido el tiempo de respuesta de las unidades a sectores específicos, para tener un rango de tiempo de respuesta.

Ambiente de trabajo

- Tranquilidad para tomar una buena decisión.
- Entregar información y despachar recursos en forma prioritaria, y luego dar información de la situación a la jefatura y supervisores en general.

Procedimientos

- Más que incorporar hay factores que se deben mejorar o reforzar, como por ejemplo la central se debe regir por un formato más breve de reporte y que el despacho no dependa de los innumerables consultas adicionales que realiza la central al torrero.
- Mantener libres los canales de emergencia (personal contratista y otros)

4. ¿Qué agentes o criterios aparte de los estrictamente técnicos influyen la función de despacho?

Presiones

- Personas innecesarias en la central, muchos mandos, todos quieren dar su opinión.
- Situaciones de estrés o excesiva presión por parte de algunas jefaturas(3)
- Influencia de terceras decisiones.
- La obligación de informar oportunamente a la jefatura lo que está aconteciendo en el momento, aparte de perder mucho tiempo por lo general cuestionan, o te instruyen que hacer.
- Propongo que la jefatura se integre masivamente al sistema e integrarla a la central (una escucha permanente y apoyar las determinaciones, pero no cuestionarlas en el momento).
- Pérdida de tiempo y concentración en avisar jefes o supervisores cada vez que ocurre un siniestro.

Capacitación del personal

- Conocimiento del personal, su experiencia en detección y combate, la experiencia del torrero, la forma que el torrero reporta el foco ya dice algo.
- Capacitación y capacidad del despachador.
- Capacidad de conocimiento espacial de la zona.
- Capacidad de reacción personal.
- Manejo de crisis y relaciones humanas.
- Estados de ánimo o psicológicos de los despachadores (bajo condiciones normales), y de estrés (cuando las exigencias en el despacho son excesivas).
- Comunicación dentro del equipo de despacho,
- Condición Psicológica del despachador,
- Condición emocional y física del despachador,
- Actitud hacia el trabajo (positiva),
- Comunicación con otros equipos de despacho,
- Compromiso con el despacho,
- Interpretación errada o equívoca de los antecedentes que se entregan o reciben al momento del despacho.

Patrimonio

- Capacidad de accesibilidad.
- Conocimiento del terreno.
- Valor amenazado, amenaza (superficie)

Otros

- Malas comunicaciones,
- El conocimiento de los recursos, sus propiedades térmicas, velocidad, comportamiento del fuego, disponibilidad de recursos (cantidad, equipamiento, operatividad), costo despacho recursos aéreo.
- Poder interactuar con las brigadas en terreno para conocer sus necesidades y sus ideas e inquietudes.

5. ¿Qué información cree imprescindible conocer al momento de tomar la decisión del despacho?

Patrimonio

- Accesos (2).
- Información de riesgos vecinales.
- Valorización del predio (2).
- Patrimonio (materias relacionadas con la condición de tiempo-comportamiento del fuego),
- Ubicación del foco (5).
- Peligro o amenaza directa, es decir información confiable es lo mejor para una buena decisión.
- Distancia a los predios,

- Continuidad de combustible,
- Topografías.
- Ubicación del foco lo mas preciso posible, para el acceso de las unidades,
- Cual es la superficie y que amenaza.

Comportamiento del Fuego

- Saber si es incendio, quema u otra sin peligro.
- Meteorológicas (3).
- Características, viento.
- Tamaño y características del foco.
- Proyección del incendio (2).
- Características de la columna de humo (intensidad, color).
- Tipos de combustible (2).

Recursos

- Ubicación de recursos (4).
- Rango horario.
- Claridad de la ubicación del primer recurso a despachar.
- Ubicación de las brigadas y stand by.
- Ubicación de recursos empresas.

Ocurrencia

- Ocurrencia histórica en la zona.

6. ¿Cómo es la relación que la entidad en que usted se desempeña mantiene con otras entidades relacionadas con el combate de incendios forestales?

Buena

- Buena (creo que la empresa sobresale por las buenas relaciones).
- Buena, incluso es un aglutinador de todas las entidades, buscando un bien común, un solo objetivo: el combate oportuno evitando daños a todos.
- Buena, pero en momentos de emergencia, cada una de ellas se preocupa de sus propios intereses sin pensar en una solución común (estrategias de combate ante altas superficies).
- Buena.
- Buena, pero podría mejorarse aun más si existiera una mayor coordinación entre las centrales de despacho y una abierta disposición por parte de los responsables que manejan los procedimientos de los programas de manejo del fuego.
- Relativamente buena, aunque hay empresas que son muy reservadas con su información, aun cuando los incendios forestales se sabe donde empieza, pero no donde termina.
- Esta relación inter-empresa se ha intentado en numerosas ocasiones, pero debido a los criterios de despacho e intereses diferentes no es posible o a veces a media.

- Es buena, pero podría ser mejor con respecto a las comunicaciones y traspaso de información, solo con una empresa, existen diferencias en la coordinación o despacho de los recursos a los incendios, esta empresa actúa en forma muy independiente. Lo cual es diferente al tipo de accionar que se tiene con las demás empresas, en general.
- En términos generales buena, no obstante por un problema de índole económico, mucha información no es entregada o llega muy tarde, lo que podría mejorarse para realizar un trabajo más en equipo entre todas las empresas “ser más operativos y aumentar la eficiencia”.
- Entre empresas forestales siempre hay buena comunicación, pero hay dos excepciones:
 - CONAF: su personal de combate trabaja 8 hrs. hayan controlado o no un incendio.
 - Forestal Mininco es una empresa monopólica tanto en lo forestal como en recursos (tramitan enormemente la prestación de sus recursos y al final no los facilitan).

Excelente

- Con transparencia y apoyo mutuo.

Optima

- Buena relación tanto en el flujo de información como en las faenas de supresión y combate de incendios.

7. ¿Existe alguna otra pregunta o tema referente a la decisión de despacho necesario considerar que no está presente en este cuestionario?

- En el tiempo que llevo en incendios no he visto 2 incendios iguales. Existen incendios parecidos pero esos no presentan un peligro real.
- Son aquellas ocurrencias, en las que no se cuenta con una buena información de detección y va a depender también del criterio que se utilice.
- Si las condiciones y entorno donde se desarrolla esta actividad es la adecuada
- Para mí personalmente las empresas forestales tienen su programa de incendios por medio año y no se preocupan de este personal experimentado en darle continuidad en otras labores del rubro forestal. Pienso que con dedicación el panorama para estos temporeros se arreglaría a otras perspectivas.
- Crear un una instancia en donde los despachadores de todas las empresas puedan Reunirse para conocer, intercambiar experiencias y poder discutir temas de interés.
- Este tipo de reuniones enfocado solo a despachadores y jefes o coordinadores de centrales.

ANEXO 1

Valoración del patrimonio

Uno de los principales inconvenientes que presenta el estudio es la valoración que debe hacerse del patrimonio. Para esto se propone evaluarlo como proyecto, y considerar el gasto de combate como uno de los componentes de la estructura de costos.

Bajo éste supuesto, evaluando el siguiente régimen silvicultural se obtiene lo siguiente (valores por hectárea):

Régimen:
Plantación de Pino insigne con una rotación a 22 años
3 podas, 2 raleos
productos : pulpa y aserrable
Tasa de descuento 8%

Gasto máximo en combate para plantaciones de un año: \$ 1.716.681

Gasto máximo en combate para plantaciones de 22 años: \$ 8.641.488

Como se puede apreciar estos valores no son despreciables, sobre todo para plantaciones jóvenes. Por lo tanto dependerá de la extensión del predio amenazado el esfuerzo que se aplique en su control.

ANEXO 2

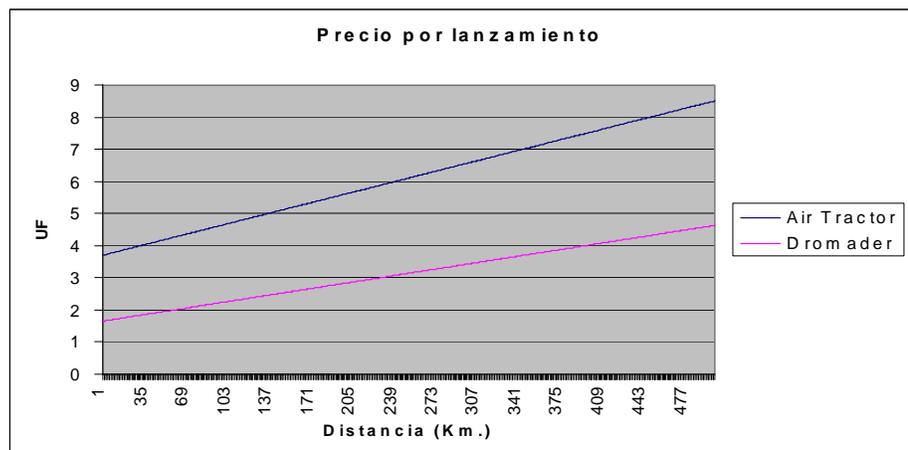
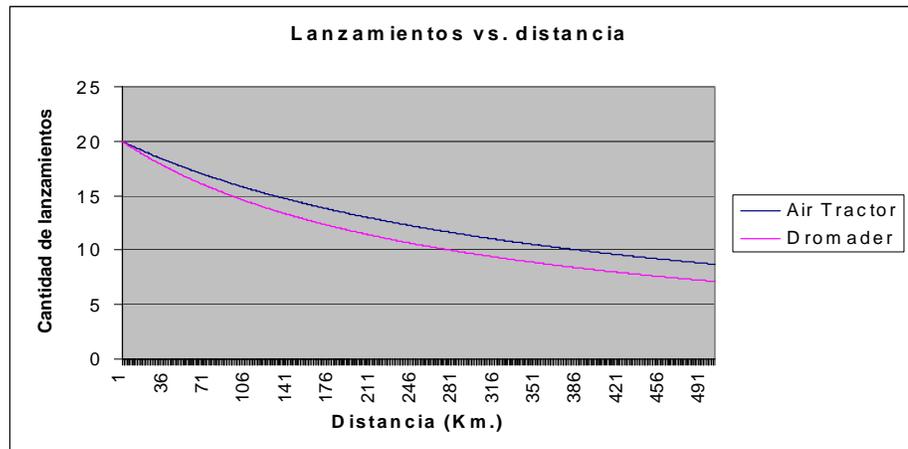
Análisis de recursos

Como el modelo entrega preferencias por un tipo de recursos fue necesario realizar un análisis de eficiencia y eficacia que se presenta a continuación:

Se comparó la diferencia entre el Dromader y el Air tractor:

	Velocidad máxima	Costo (hora)	Tiempo aterrizaje, carguío y despegue
Air tractor	Millas/hora :185 Km./hora : 257.48	74 U.F	3 minutos
Dromader	Millas/hora : 115 Km./hora : 185.06	33 U.F	3 minutos
Distancia Km. (*)	1-33	34-180	181-500
Dif. Lanzamientos	0	1	2

* Considerando el mismo punto de origen y destino



También se realizó un análisis de eficiencia considerando todos los tipos de recursos que posee la SPB. Para esto se usó como indicador lo siguiente:

$$\frac{\text{Equivalencia} * F}{\text{Costo}}$$

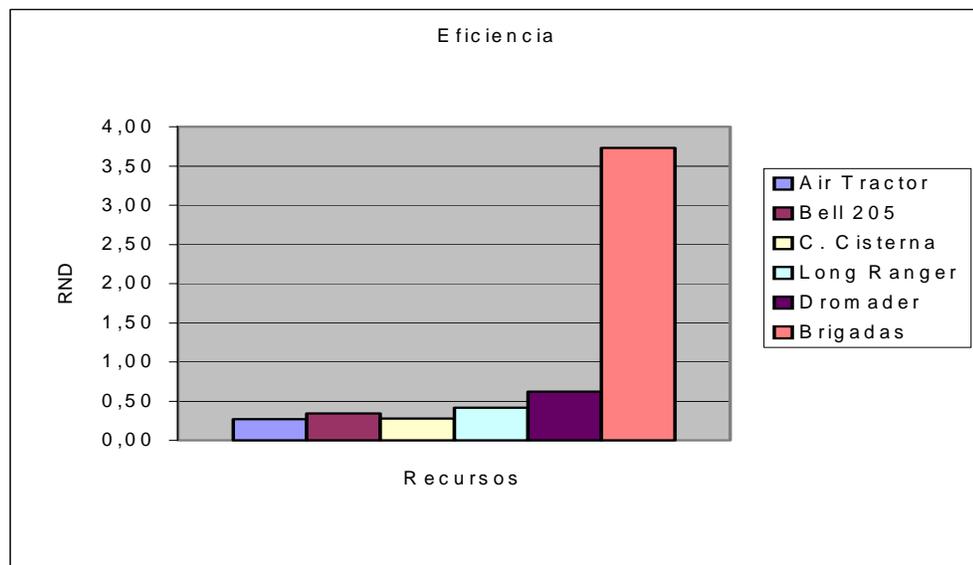
Donde:

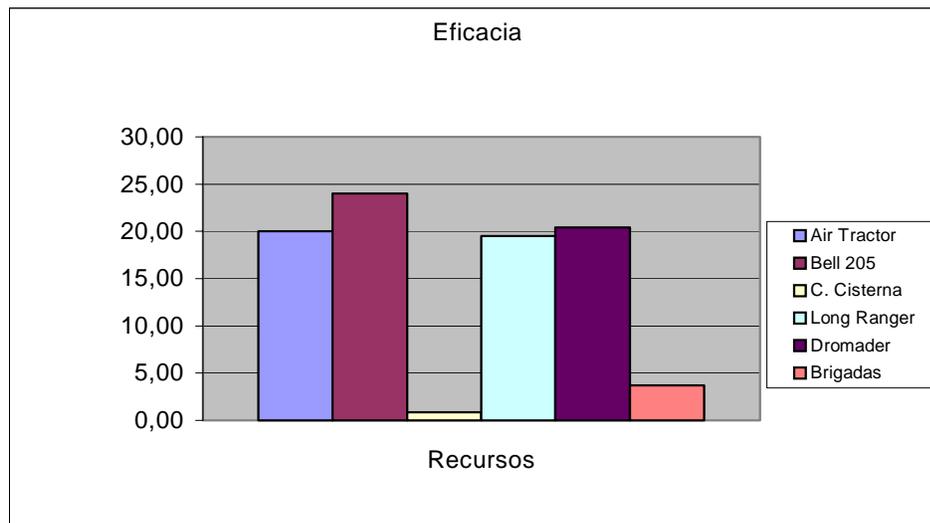
Equivalencia: Propuesta por Julio (1995)

F: (T-Ta)/60

Costo: Utilizar el recurso una hora

Recursos	Personas	Equivalencia	Costo hora(uf)	Disponibilidad	T.arribo	Factor	Eficiencia	Eficacia
Air Tractor		25	74,00	1	0:12	0,80000	0,27027	20,00
Bell 205	12	32	70,00	1	0:15	0,75000	0,34286	24,00
C. Cisterna	4	10	3,00	2	0:55	0,08333	0,27778	0,83
Long Ranger	6	26	46,70	1	0:15	0,75000	0,41756	19,50
Dromader		25	33,00	1	0:11	0,81667	0,61869	20,42
Brigadas	8	8	1,000	9	0:32	0,46667	3,73333	3,73





Como se puede observar de los análisis anteriores las brigadas tienen el mejor indicador de eficiencia, seguidas de lejos por el avión Dromedario y los helicópteros. En cambio sí se considera la eficacia, se puede observar que el recurso que posee un más alto estándar es el helicóptero Bell 205, seguido de cerca por el avión Dromedario. Bajo estos resultados vale la pena preguntarse que tipo de recursos son los más adecuados para el patrimonio que está bajo protección, ya que si existe una buena red caminera, tal vez se podría optar por una combinación de recursos que incluya más terrestres y menos aéreos (o menos horas de contrato).

ANEXO 3**Claves de combustibles forestales**

CLAVE	VEGETACION
PCH1	PASTIZALES ZONA HUMEDA DENSOS
PCH2	PASTIZALES ZONA HUMEDA RALOS
PCH3	PASTIZALES ZONA ARIDA DENSOS
PCH4	PASTIZALES ZONA ARIDA RALOS
PCH5	OTRAS HERBACEAS Y CULTIVOS
MT1	MATORRALES ZONA ARIDA DENSOS
MT2	MATORRALES ZONA ARIDA RALOS
MT3	MATORRALES ZONA HUMEDA DENSO
MT4	MATORRALES ZONA HUMEDA RALOS
MT5	PREDOMINANCIA QUILA Y COLIGUE
MT6	PREDOMINANCIA ULEX Y ESPINO
MT7	RENOVALES TIPO FORESTAL NO SIEMPRE VERDE
MT8	RENOVALES TIPO FORESTAL SIEMPRE VERDE
BN1	PREDOMINANCIA ALERCE
BN2	PREDOMINANCIA ARAUCARIA
BN3	BOSQUE NATIVO DENSO
BN4	BOSQUE NATIVO DENSIDAD MEDIA
BN5	BOSQUE NATIVO RALO
PL1	PINO 0-3 AÑOS SIN MANEJO
PL2	PINO 4-11 AÑOS SIN MANEJO
PL3	PINO 12-17 AÑOS SIN MANEJO
PL4	PINO ADULTO SIN MANEJO
PL5	PINO 4-11 AÑOS CON MANEJO
PL6	PINO 12-17 AÑOS CON MANEJO
PL7	PINO ADULTO CON MANEJO
PL8	EUCALIPTO 0-3 AÑOS
PL9	EUCALIPTO 4-10 AÑOS
PL10	EUCALIPTO ADULTO
PL11	PLANTACIONES MIXTAS Y LATIFOLIADAS
DX1	DESECHO PLANTACION
DX2	DESECHO BOSQUE NATIVO
SV1	CUERPOS DE AGUA
SV2	CASCOS URBANOS
SV3	SUELOS DESNUDOS