

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**OPTIMIZACIÓN DE UN MODELO DE REGULACIÓN DE BOSQUES EN R  
PROJECT COMO HERRAMIENTA DE DECISIÓN EN MANEJO  
FORESTAL**

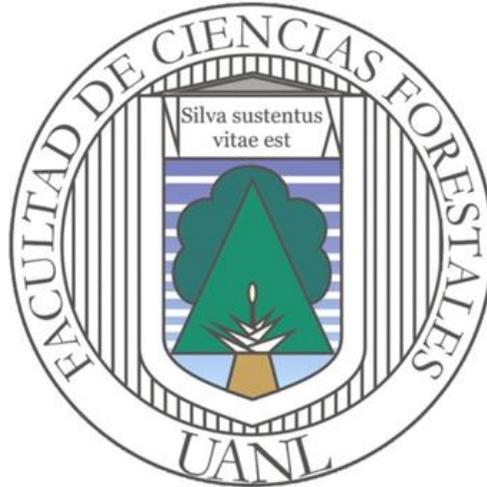
**POR**

**OLIVIA SÁNCHEZ HERNÁNDEZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
DE MAestrÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**DICIEMBRE, 2014**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**OPTIMIZACIÓN DE UN MODELO DE REGULACIÓN DE BOSQUES EN R  
PROJECT COMO HERRAMIENTA DE DECISIÓN EN MANEJO  
FORESTAL**

**POR**

**OLIVIA SÁNCHEZ HERNÁNDEZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
DE MAestrÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**DICIEMBRE, 2014**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

OPTIMIZACIÓN DE UN MODELO DE REGULACIÓN DE BOSQUES EN R PROJECT

COMO HERRAMIENTA DE DECISIÓN EN MANEJO FORESTAL

**TESIS**

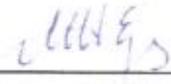
**Para obtener el grado de:**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

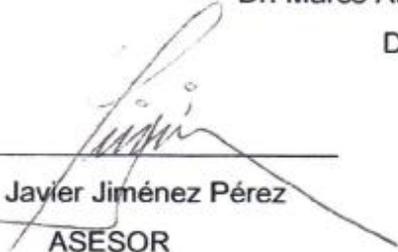
**Presentada por:**

**OLIVIA SÁNCHEZ HERNÁNDEZ**

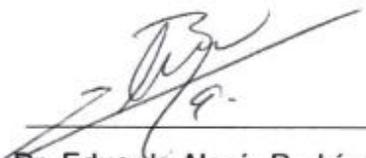
**COMITÉ DE TESIS**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Marco Aurelio González Tagle

**DIRECTOR**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Javier Jiménez Pérez

**ASESOR**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Eduardo Alanís Rodríguez

**ASESOR**

*Linares, Nuevo León*

*Diciembre 2014*

# CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	4
ANTECEDENTES .....	6
Generalidades.....	6
Regulación forestal .....	7
Software R Project .....	9
Programación lineal .....	10
OBJETIVOS .....	12
Objetivo general .....	12
Objetivos específicos.....	12
MATERIALES Y MÉTODOS .....	13
Descripción del área de estudio.....	13
Descripción de la especie <i>Pinus cooperi</i> .....	15
Preprocesamiento .....	16
Procesamiento.....	17
RESULTADOS .....	23
Rutina de ensayo .....	23
Rutina Ejido La Victoria.....	32
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	38
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	39
REFERENCIAS .....	40

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de predecir el crecimiento y la producción de los árboles y las masas forestales, así como su respuesta a las prácticas silvícolas, ha sido uno de los objetivos fundamentales de la investigación forestal, ya que la clave para una correcta gestión radica en un profundo conocimiento de los procesos de desarrollo de las especies forestales.

En este sentido, los modelos de crecimiento y producción son herramientas muy valiosas para los silvicultores y gestores forestales, al permitir predecir el desarrollo de los árboles y/o las masas forestales y, por tanto, facilitar la selección de las mejores alternativas de gestión en función de unos objetivos fijados de antemano, anticipándose a las consecuencias que una determinada acción puede tener sobre el sistema forestal.

Particularmente la modelización forestal se rige por dos principios fundamentales: un conocimiento exhaustivo del sistema que se pretende modelar y un establecimiento previo, y con la mayor exactitud posible, de los objetivos concretos que se pretende alcanzar (Robinson y Hamann, 2010).

Los manejadores forestales se enfrentan a retos complejos, donde una toma de decisión no bien fundamentada puede tener graves consecuencias a un alto precio. Estas decisiones generalmente se basan en información generada a lo largo del tiempo dentro de la historia del manejo forestal del área. Pero en ocasiones no se encuentra con la información necesaria y se requieren de otras herramientas para tomar las decisiones sobre el manejo (Rivera, 2012). Una de estas herramientas las ofrece el software estadístico "R Project" que es de libre acceso y permite integrar una serie de variables y funciones útiles para la modelación y simulación de las actividades realizadas en un bosque.

Para la industria forestal el desarrollo sostenible se ha convertido en una de las máximas prioridades. La regulación de los bosques es una de las prácticas de gestión

forestal sostenible que se aplica en diversos sistemas forestales en el mundo (Gadow, 2001). Es la pauta para la planeación de la producción; en ésta se organiza y controla la masa forestal para obtener un rendimiento sostenido de las tierras forestales. La finalidad de la regulación es buscar el equilibrio entre el crecimiento y la producción del bosque.

Es tarea del manejador forestal encargado elaborar el programa de cortas que se ejecutarán en el terreno con base en las consideraciones pertinentes sobre planeación silvícola y de extracción, así como en el ordenamiento de cada tipo de rodal dentro del área forestal.

Con el uso del paquete GLPKAPI (GNU Linear Programming Kit) el manejador podrá resolver problemas de programación lineal, programación integrada mixta y otros problemas relacionados en la planificación y optimización forestal (Makhorin, 2009).

En México las condiciones para el desarrollo forestal no han sido propicias. La carencia de una cultura forestal a nivel nacional, ha dado como resultado el mal aprovechamiento de los recursos forestales. Sin embargo, haciendo uso de esta cultura forestal local se pretende comprobar el uso y confiabilidad de herramientas estadísticas que permitan llevar el manejo forestal sostenible de lo regional a lo nacional. Se parte del supuesto que la aplicación del software R como herramienta de regulación de los bosques genera resultados biológicamente factibles que permiten tomar decisiones estadísticamente fundamentadas para el manejo de los rodales. México cuenta con los recursos físicos y humanos necesarios para convertir la actividad forestal en una alternativa de desarrollo preponderante.

# ANTECEDENTES

## Generalidades

El desarrollo sostenible se ha convertido en una de las máximas prioridades a nivel mundial. Definido en 1988 como aquel desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (Brundtland, 1988). Para ello, la industria forestal debe alcanzar un equilibrio general entre los aspectos ambientales, sociales y económicos. El reto es doble: este sector debe mejorar sus resultados medioambientales de forma continua, al tiempo que debe incrementar su competitividad, lo que le permitirá crear empleos y generar productos con valor agregado (González, 2000).

La formulación de métodos de desarrollo sostenible exige armonizar las actividades humanas con los aspectos biológicos y físicos de los ecosistemas forestales. Las actividades del hombre y los ecosistemas forestales, así como la interacción entre ambos, son dinámicos y cambian en el espacio y el tiempo. Por consiguiente, la práctica de un desarrollo forestal sostenible exige vigilar ambos sistemas y su interacción, lo cual implica toda una serie de consideraciones ecológicas, socioeconómicas, técnicas y políticas.

Tomando en cuenta la necesidad de atender la demanda actual y la responsabilidad ética para con las generaciones futuras, Maini en 1989 definió que el desarrollo sostenible de tierras forestales y de sus múltiples valores económicos y ambientales implica mantener indefinidamente, sin mengua inaceptable, tanto la capacidad para producir y renovarse, como las especies y la diversidad ecológica de los ecosistemas forestales.

El umbral de aceptabilidad de la mengua quedará determinado por decisiones de personas, instituciones y naciones encargadas del manejo forestal, así como de toda la comunidad internacional, basadas en los conocimientos de los principios de la

ecología y de los imperativos socioeconómicos. Lo que sea aceptable bajo determinadas condiciones socioeconómicas y ecológicas será inadmisibles bajo otro conjunto de condiciones. Por consiguiente, para decidir habrá que compensar los riesgos de la acción con los costos de la inacción (Maini, 1990).

Los manejadores forestales hacen uso de diferentes herramientas en la toma de decisiones, como son los modelos de crecimiento, los cuales son abstracciones simplificadas de la realidad, en la que solamente se reproducen algunas propiedades del objeto o sistema original, que entonces queda representado por otro objeto o sistema de menor complejidad (Rivero, 2012).

Particularmente la modelización forestal se rige por dos principios fundamentales: un conocimiento exhaustivo del sistema que se pretende modelar y un establecimiento previo, y con la mayor exactitud posible, de los objetivos concretos que se pretende alcanzar. Los elementos que incluyen los modelos se expresan como un conjunto de ecuaciones matemáticas relacionadas de un modo coherente (Robinson y Hamann, 2010).

La simulación de los bosques es un tema complejo. Dependiendo del nivel de resolución requerido en el análisis el proceso puede ser tan simple como resuelto por una sola ecuación, o requerir el desarrollo de diversas librerías y programas de simulación trabajando en conjunto para generar el resultado más confiable en la toma de decisiones sobre planes de manejo forestal. Aunque este trabajo se enfoque en el uso de R Project para un caso de regulación forestal, el software puede además generar diversas tablas de simulación, proyecciones y posibles condiciones futuras de los bosques.

## **Regulación forestal**

La política forestal actual basa su instrumentación en un modelo de aprovechamiento sostenible del potencial sectorial disponible, considerando que el 72% del territorio nacional es de aptitud forestal y que existen unos 56,8 millones de

hectáreas arboladas (FAO). Si bien la regulación forestal es una técnica aplicada a nivel mundial para lograr la sostenibilidad de los bosques el panorama nacional ha sufrido varios cambios.

La Ley Forestal de 1926 establecía el carácter inalienable de los bosques comunales y requería que los aprovechamientos forestales fueran exclusivamente desarrollados por cooperativas ejidales. Sin embargo, las dotaciones forestales no se acompañaron de apoyo técnico y financiero, por lo que eran empresas privadas las que realizaban las operaciones forestales. En esta época se adaptaron y aplicaron métodos europeos de regulación forestal.

De 1944 a 1973 se empezó a aplicar el Método Mexicano de Ordenación de Montes, que consiste en la conversión de masas sobre-maduras en bosques de alta productividad, recuperación del volumen inicial, cortas de selección, intensidad de corta preestablecida, diámetro mínimo de corta, posibilidad en base al interés compuesto, y remoción dirigida principalmente sobre arbolado senil, decrepito, dañado y mal conformado.

Con las modificaciones a la Ley Forestal de 1986 (reglamentada en 1988) se inicia un nuevo proceso incorporando medidas para mitigar los impactos ambientales del manejo forestal. Bajo este esquema, en 1990 se establece el Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola, aplicable a condiciones de bosque regular o irregular, ampliando la participación del sector social en la producción forestal.

En 1993, como resultado del reconocimiento de la experiencia en el manejo de bosques, se otorgaron los primeros certificados de ordenación forestal sostenible, alcanzando a la fecha unas 112.000 ha certificadas en todo el país y alrededor de otro 1 millón de ha en proceso.

El manejo forestal en México, como una actividad que pretende proporcionar eficientemente bienes y servicios, así como la conservación del recurso mismo, se encuentra en un estado de atraso significativo. Esto obedece, parcialmente, a las

técnicas tradicionales que se han utilizado en la formulación de los planes de manejo (Talavera, 2002).

Se ha mencionado que los procedimientos tradicionales de regulación forestal se caracterizan por basarse en la consecución de un bosque meta (bosque normal), así como en el mantenimiento de la estructura que se asume necesaria para los objetivos de manejo, sin dar flexibilidad al administrador para un manejo inteligente de las estructuras del recurso sujeto a aprovechamiento (Clutter et al, 1983; Rivero, 1984).

En la actualidad cada vez se utilizan más los sistemas mixtos dentro de un mismo predio, es decir se usan sistemas de ordenación de bosque regular e irregular, de acuerdo con las condiciones de los rodales.

La tendencia es a combinar el aprovechamiento de recursos maderables y no maderables en un mismo predio, así como a incorporar la protección y uso de servicios ambientales.

## **Software R Project**

R es un conjunto integrado de programas para manipulación de datos, cálculo y gráficos. Entre otras características dispone de: almacenamiento y manipulación efectiva de datos; operadores para cálculo sobre variables indexadas, en particular matrices; una amplia, coherente e integrada colección de herramientas para análisis de datos; posibilidades gráficas para análisis de datos, que funcionan directamente sobre pantalla o impresora; y un lenguaje de programación bien desarrollado, simple y efectivo, que incluye condicionales, ciclos, funciones recursivas y posibilidad de entradas y salidas.

R es en gran parte un vehículo para el desarrollo de nuevos métodos de análisis interactivo de datos. Como tal es muy dinámico y las diferentes versiones no siempre son totalmente compatibles con las anteriores. Aunque R puede entenderse como un lenguaje de programación, los programas escritos en R deben considerarse esencialmente efímeros.

R es un código abierto, con lenguaje GNU para programación estadística que tiene intérpretes para varias plataformas informáticas, en particular Unix, Windows y Mac OSX, en 32 bits y 64 bits (Desarrollo R Core Team, 2010). R es libre, flexible y de gran alcance, y rápidamente ha hecho incursiones en diversos aspectos de la actividad estadística, incluidas las que se refieren a la silvicultura.

Muchas técnicas estadísticas, desde las clásicas hasta la última metodología, están incluidas en el entorno base de R y otras se acompañan en forma de bibliotecas (paquetes) disponibles a través de Internet en CRAN (<http://www.r-project.org>). Como lo es la biblioteca glpkAPI utilizada para resolver un problema de regulación forestal por programación lineal.

Las aplicaciones de R en manejo forestales son variadas, desde el trabajo básico con bases de datos, análisis de muestras, métodos de estimación de intervalos, muestreos de un nivel, jerárquicos y usando información adicional, así como predicción y mapeo de datos espaciales y métodos de maximización de datos incompletos; hasta modelos de predicción y simulación de desarrollo.

## **Programación lineal**

La programación lineal es una de las técnicas comprendida prioritariamente en el marco de la Investigación de Operaciones. Usualmente se le concibe como una herramienta que permite la asignación de recursos escasos entre las actividades competitivas para un óptimo, sujetándose a un conjunto de restricciones (Hillier, 1997).

Matemáticamente la programación lineal es el análisis de problemas en los que se pretende maximizar (o de restricciones minimizar) una función lineal caracterizada por un cierto número de variables, sujetas éstas a un conjunto en la forma de desigualdades lineales (Thierauf, 1975).

Las aplicaciones de la programación lineal con mayor frecuencia en actividades forestales se refieren a las áreas de aprovechamiento maderable, manejo de fauna silvestre, regulación y abastecimiento forestal, ubicación de plantas y procesos de

industrialización y distribución de productos, así como en análisis regionales dentro de otras áreas (Kidd, Thompson y Hoepner, 1966; Martin y Sendak, 1971, citado por Reygadas, 1988; Duerr, 1982; Clutter, 1983). En cuanto a aprovechamientos forestales maderables se le ha utilizado en todas las fases del manejo, desde el mejoramiento de árboles y reforestación hasta la regulación de masas forestales (Leuschner, 1984; Dykstra, 1984; Davis y Johnson, 1987; Bongiorno y Gilles, 1987; Gadow y Bredenkamp, 1992; Hof, 1993).

En México el uso del modelo de programación lineal en problemas de regulación de bosques es actualmente reducido, sobresaliendo en este aspecto los trabajos de Rivero (1984) sobre un modelo para la regulación de la corta en bosques coetáneos, el cual pretende maximizar ganancias netas actualizadas y volumen, bajo un esquema de rendimiento sostenido, teniendo como variable de decisión la superficie de las unidades de corta del área de estudio. Arreola (1998) aportó un modelo de regulación forestal para *Pinus pseudostrobus* en el estado de Nuevo León, mediante el cual se representa el manejo adecuado de una área boscosa, al mismo tiempo que se influye en la toma de decisiones en el aprovechamiento de la masa maderable. Y Talavera (2002) que formuló un modelo para obtener la alternativa óptima de regulación forestal en un bosque de pino en el sur de Nuevo León, bajo criterios de maximización volumétrica y económica mediante el diseño de diversos regímenes de manejo a partir de diversas estrategias de tratamiento de densidad, bajo un criterio del óptimo económico y volumétrico.

# OBJETIVOS

## Objetivo general

Generar un calendario de cosecha de cuerdo al método de regulación de bosques mediante la creación de rutinas empleando el software estadístico "R Project", de tal manera que funcione como herramienta de decisión en el manejo forestal.

## Objetivos específicos

- 1.- El manejo de programación lineal para generar la simulación del problema
- 2.- El análisis y ajuste del modelo en su solución a la función objetivo.
- 3.- El desarrollo de un manual que contenga la rutina con el software R para la repetición y aplicación del modelo en la toma de decisiones de manejo forestal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La base de datos utilizada para la simulación de este modelo proviene de 80 sitios de *Pinus cooperi*, localizados en el Ejido La Victoria, municipio de Pueblo Nuevo en el Estado de Durango. Se cuenta con el registro de la edad (años), altura dominante (m), diámetro medio (cm), diámetro cuadrático, área basal (m<sup>2</sup>), altura media (m) y volumen (m<sup>3</sup>).

La metodología se divide en dos etapas generales: pre-procesamiento y procesamiento las cuales se abordarán más adelante.

### Descripción del área de estudio

El Ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango, es un núcleo agrario dotado por resolución presidencial el 18 de Mayo de 1961, que en 1994 se inscribió al Programa de Certificación de Derechos Ejidales (PROCEDE) realizándose el levantamiento topográfico del ejido y actualizando el padrón de derechos ejidales. En 1997 se entregó a la asamblea general del Ejido La Victoria la delimitación, destino y asignación de las tierras de uso común, asentamiento humano y reconocimiento de derechos ejidales con 102 beneficiarios de 10,810.20 ha de las cuales 10,638.90 son tierras de uso común, cubiertas casi en su totalidad por bosques de pino-encino.

Ubicado en la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental, específicamente en la sub-provincia Gran Meseta y Cañones Duranguenses. En la Zona Biogeográfica denominada "Bosque de coníferas y encinos de la sierra madre Occidental". El ejido se encuentra en una zona que conforma una importante región forestal del estado de Durango conocida como El Salto, donde se encuentran más de 60 predios forestales con autorización de aprovechamiento forestal que pertenecen al municipio de Pueblo Nuevo, Dgo. La masa forestal es continua, interrumpida ocasionalmente por pequeños parajes donde se establecen rancherías y pequeños poblados donde se practican actividades agropecuarias. Las principales especies de pino son *Pinus cooperii*, *P. durangensis*, *P. engelmannii*, *P. teocote*, *P. herrerae*, *P. leiophylla* y *P. ayacahuite*. Las

especies más representativas de encinos son *Quercus sideroxylla*, *Q. durifolia*, *Q. rugosa* y *Q. candicans*. Existen otras coníferas como *Juniperus* spp., *Cupressus* sp. *Pseudotsuga* sp. y *Abies* sp. y dentro de las latifoliadas se encuentran especies de los géneros *Arbutus* y *Alnus*. En el estrato inferior de los bosques, la manzanita (*Arctostaphylos pungens*) y la encinilla (*Quercus striatula*) se distribuyen con diferentes densidades combinadas con varias especies de gramíneas y herbáceas (Silva, 2006).

Los bosques de esta región, incluidos los de La Victoria, son de gran importancia hidrológica (Región hidrológica No.11), ya que en esta zona se capta el agua que desemboca en el Río Presidio, que desemboca en la costa del Pacífico y aporta agua a algunos distritos de riego, humedales y ciudades en el estado de Sinaloa.

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificada por García (1987), se clasifica en las partes altas clima C(E)(W2) caracterizándose como semifrío, subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual entre 5 y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2; y en las estribaciones medias clima C(W2), templado, subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C, precipitación del mes más seco alrededor de los 40 mm y un porcentaje de precipitación invernal mayor a 10.2.

La presencia de las lluvias se concentra en los meses de Julio a Septiembre con una precipitación promedio de 1,000 mm por año, mientras que la temperatura promedio anual es de 10.9°C.

En el área forestal del estado habitan 236,000 personas, que representan un 42% de la población rural. El municipio Pueblo Nuevo, al que el ejido La Victoria pertenece, tiene una población total de 43,858 habitantes, el 54% de ella habita en localidades rurales.

De acuerdo al Censo de Población de 2000, el sector primario absorbía al 38% de la población económicamente activa (PEA); el sector secundario al 35.4% y el sector terciario al 25%. Un 35% de la población ocupada realiza actividades agroforestales y pecuarias. La principal actividad económica de la región es el aprovechamiento de los recursos forestales, que genera alrededor de 3,873 empleos directos.

### **Descripción de la especie *Pinus cooperi***

*Pinus cooperi* var. *ornelasi* Blanco, árbol generalmente de 20 a 30 metros de altura que puede alcanzar hasta 35 metros, por 40 a 75 cm de diámetro; con una copa redonda y densa, ramas inclinadas hacia abajo de color moreno rojizo, frecuentemente con tinte azulado en sus partes tiernas y corteza de color café cenizo algo rugosa con fisuras poco profundas y placas anchas y alargadas, de 2 a 3.5 cm de espesor (Martínez, 1992). Su madera es de buena calidad, de color amarillento, propia para carpintería y toda clase de construcciones. Su nombre común es "albacarrote" (Upalia, 2002).

Ocurre en la Sierra Madre Occidental desde la parte sur del estado de Chihuahua hasta la parte centro del estado de Durango, en un rango altitudinal de los 2,000 a 2,800 msnm. Se desarrolla preferentemente en sitios de pendientes suaves o zenitales, generalmente en las faldas de cerros y orillas de llanos. Puede encontrarse en terrenos húmedos y profundos (Martínez, 1992).

Conforme aumenta la pendiente en los lomeríos, *P. cooperi* es substituído por *P. teocote*, *P. leiophylla* y *P. durangensis*. Comúnmente se encuentra formando masas puras, sin embargo, en ocasiones se encuentra asociado con *Quercus sideroxyla*, *Juniperus deppeana* y en ocasiones con *Pinus leiophylla* (Márquez, 1994).

## Preprocesamiento

Como se menciona al inicio del presente capítulo la metodología se divide en dos etapas. La primera etapa consiste en construir la matriz del problema que se requiere resolver, es decir, la regulación del bosque.

Se asume que el plan de manejo es cubrir  $T$  periodos de planeación. El largo de cada periodo es  $\ell$  años, y el largo del horizonte de planeación es  $|T|$ , donde  $T * \ell = |T|$ .

El polígono  $A \subset \mathbb{R}^2$  representa un bosque de un área limitada, medido en hectáreas, denotado por  $\Lambda(A)$ . El polígono  $A$  es dividido en rodales  $A_b$ , definidos únicamente por  $B = \{1, \dots, b, \dots, A\}$ . El área total de cada rodal lo indica  $\lambda(A_b)$ , donde,  $\cup A_b = A (A_b \subset \mathbb{R}^2)$  y  $\cap A_b = \emptyset \forall b \in B$ .

La matriz de condiciones futuras del bosque será representada por  $Y = A * T$  para cada rodal  $A_b$  para cada periodo  $\ell \in T$ . Y  $A_b^x$  representa las variables de decisión para cada rodal  $A_b$ , donde  $x$  es un vector de longitud de  $T$ . Los elementos  $T$  de  $A_b^x$  representan el área cosechada de  $A_b$  sobre el horizonte de planeación.

Teniendo en cuenta esto la formulación general de la optimización del problema se expresa:

$$x^* = \arg \max_{x \in \ell} \{f | (x) \in \mathbb{R} | g(x) \geq 0, h(x) = 0\}$$

Donde el objetivo es obtener los argumentos de  $x^*$  en la máxima función de  $f$ , cuando ésta junto con  $g$  y  $h$  son parámetros lineales, la ecuación se puede expresar como un problema de programación lineal.

La rutina se genera con el lenguaje estándar de programación en R e inicia con la asignación de las variables  $A$ ,  $T$ ,  $l$ , y  $P$ , así como las superficies para cada rodal  $SR$ , mediante el signo de asignación  $<-$ , el  $\#$  indica notas aclaratorias, el  $>$  indica el inicio de una línea de instrucciones y el  $+$  la continuación de la instrucción.

```
> A <- #número de rodales
> T <- #periodos de intervención
> l <- #ciclo de corta
> P <-T*l #horizonte de planeación
> SR <- c( #ha1,ha2,...)
```

Posteriormente se importa la base de datos a R mediante la función 'read.table' la cual debe estar en formato .txt, y se le asigna un nombre en este caso Archivorendimiento.

```
> Archivo rendimiento <-read.table
+ ("../../datos.txt", header=TRUE)
```

Previamente se realizaron los cálculos necesarios con la base de datos mencionada para obtener un objeto resultante en 4 columnas: la identificación del rodal, el periodo de planeación, la edad del rodal, y el rendimiento en volumen por hectárea.

La matriz resultante deberá de tener el número de líneas que defina las restricciones del área (número de rodales, A), el número de restricciones de tiempo (periodos de intervención, T) y el número de columnas variables de decisión (restricciones de área por restricciones de tiempo); matriz = (A+T) x (A\*T).

## Procesamiento

En la siguiente etapa de procesamiento se realizan las siguientes actividades 1) cargar el paquete 'glpkAPI' en el software R, 2) generar la función objetivo en el 'glpkAPI', 3) agregar las variables de decisión (cosechar el número de rodales en el número de periodos de intervención), 4) agregar las variables de restricción (superficie disponible y superficie de cosecha deseada), 5) resolver el problema, 6) aplicación del modelo para situaciones específicas y finalmente 7) archivar la rutina de manera digital.

*Cargar el paquete GLPKAPI.*

Existen varias formas de instalar un paquete en R, si ya se ha trabajado con dicho paquete.

```
> library(glpkAPI)
```

De lo contrario la función inicial sería:

```
> install.packages("glpkAPI")
```

*Generar función objetivo*

Se crea y asigna un nombre a la función que crea el objeto problema, en este caso "Archivoproblema":

```
> Archivoproblema<-initProbGLPK()  
> setProbName(Archivoproblema,  
+ "PROBLEMA")
```

Automáticamente 'glpkAPI' minimizará la función objetivo por lo que se debe indicar lo contrario mediante 'GLP\_MAX'.

```
> setObjDirGLPK(Archivoproblema,  
+ GLP_MAX)
```

Para este problema la función objetivo es:

$$f = A_b^V t \forall t \in T, b \in B$$

Donde el rendimiento total es igual a la suma del producto del rendimiento por rodal  $A_b^V t$ , cosechado en un periodo  $t$ , sobre un bosque  $A$ .

*Agregar variables de decisión*

Las variables de decisión se agregan en columnas con la función 'addColsGLPK'.

```
> addColsGLPK (Archivoproblema,  
+ nrow (Archivorendimiento))
```

Para generar los nombres de las columnas se utiliza la función 'paste' en las columnas del rodal y periodo de la base de datos.

```
> Archivorendimiento$dv <-paste (
+ ("a", Archivorendimiento$rodal,
+ Archivorendimiento$periodo, sep="")
> head(Archivorendimiento)
> for ( t in 1:nrow
+ (Archivorendimiento))
+ {label <-Archivorendimiento[t,]$dv
+ setColNameGLPK (Archivoproblema,
+ t, label ) }
```

Se establecen los límites de las variables de decisión, función 'setColBndGLPK'.

```
> for (t in 1:nrow
+ (Archivorendimiento))
+ {setColBndGLPK (Archivoproblema, t,
+ GLP_LO, 0.0, 0.0 ) }
```

Se ajustan los coeficientes de la función objetivo usando 'setObjCoefGLPK', fijando para el periodo  $t$  un valor de 0.0.

```
> for(t in 1:nrow
+ (Archivorendimiento))
+ {setObjCoefGLPK(Archivoproblema, t,
+ Archivorendimiento[t,]$volumen ) }
```

#### *Agregar variables de restricción*

Las restricciones del problema pueden ser de dos tipos, restricciones físicas como terreno disponible, vías de comunicación y acceso, equipo y herramientas; y restricciones políticas como coberturas de riesgo o límites de aperturas (Bettinger et al., 2009).

Las restricciones físicas incluidas en este problema son superficie total y superficie total de cosecha con el propósito de generar una restricción política de controlar los aprovechamientos para que la superficie en todos los periodos iguale al total de superficie del bosque.

El modelo matemático de las restricciones del área de cosecha se expresa:

$$\sum_t A_b^{X_t} \leq \lambda(A_b) \forall b \in B$$

Donde  $A_b^{X_t}$  es el total de superficie disponible en  $b$  rodales cosechados en  $t$  periodos y  $\lambda(A_b)$  es el total de superficie disponible en rodal  $b$ .

Usando la función 'addRowsGLPK' se agregan las restricciones de superficie de cosecha para cada rodal.

```
> addRowsGLPK(Archivo problema,  
+ length(SR ) )
```

Se crea una matriz que contenga los coeficientes de cada variable usando  $I \otimes 1$ , donde  $I$  es una matriz  $A * A$ ,  $1$  es un vector de longitud  $P$  (número de periodos), y  $\otimes$  es el producto de Kronecker.

```
> Restricciónsuperficie <-t(kronecker  
+ (diag(length(SR)),as.matrix(rep (1,  
+ #número periodos intervención))))  
> val <-rep(1,#periodos intervención)
```

A la matriz resultante se le asignan los nombres de las restricciones, los límites de las mismas y los respectivos coeficientes con las funciones 'setRowNameGLPK', 'setRowBndGLPK', 'setMatRowGLPK'.

```
> for(i in 1:length(SR)){  
+ idx<-rep(0, #periodos intervención)  
+ id <- 1  
+ for(j in 1:ncol  
+ (Restricciónsuperficie)) {  
+ if(Restricciónsuperficie[i,j]!=0.0)  
+ {idx[id] <- j  
+ id <- id + 1 } }  
+ setRowNameGLPK(Archivoproblema,  
+ i, paste("s", i, sep="" ) )  
+ setRowBndGLPK(Archivoproblema, i,  
+ GLP_UP, 0.0, SR [i] )  
+ setMatRowGLPK(Archivo problema, i,  
+ length(val), idx, val ) }
```

De acuerdo al objetivo de cosecha del plan de manejo se crea un vector que contenga dicho valor y el tiempo de ciclo de corta, y se agrega a las restricciones. El objetivo de cosecha anual estará determinado por:

$$\sum_j a_{ij} = \frac{\Lambda(\mathcal{A})}{r} * \ell$$

```
> Cosechaobjetivo<-rep (#sup.cosecha,
+ #periodos intervención )
> addRowsGLPK (Archivoproblema,
+ length (Cosechaobjetivo ) )
> val <- rep(1,#rodales)
> for(i in 1:length(Cosechaobjetivo))
+ {idx <- as.numeric(rownames(subset
+ (Archivorendimiento,periodo == i)))
+ setRowNameGLPK(Archivoproblema,
+ i+length (Cosechaobjetivo), paste
+ ("tac", i, sep="" ) )
+ setRowBndGLPK(Archivoproblema,
+ i+length (Cosechaobjetivo), GLP_FX,
+ Cosechaobjetivo [i],
+ Cosechaobjetivo [i] )
+ setMatRowGLPK(Archivoproblema,
+ i+length (Cosechaobjetivo),
+ length(val), idx, val ) }
```

Con lo que se genera la matriz completa para resolver el problema;  $(A+T)$  x  $(A^*T)$ .

#### *Solución del problema*

La función que genera la solución de la matriz diseñada para el problema es 'solveSimplexGLPK',

```
> solveSimplexGLPK(Archivoproblema)
```

#### *Aplicación del modelo para situaciones específicas*

Para extraer el valor de la función objetivo se aplica la función 'getObjValGLPK'; usando el paquete FAWR y la función 'get.col.report' se obtiene el número de hectáreas

cosechadas en cada rodal para cada periodo; en el caso de querer extraer la superficie de cosecha para todos los periodos se crea una matriz  $T * A$  representando el número de periodos y de rodales; este reporte también proporciona información sobre cuánto debe cambiar la función objetivo antes de que las variables de decisión encuentren una solución óptima.

Similar a este reporte se puede obtener con 'get.row.report' los valores de las limitaciones utilizadas en la solución, límite inferior y superior de las restricciones, y la disposición a pagar por la capacidad de cosechar una hectárea adicional de tierra (Davis *et al.*, 2001).

#### *Archivar la rutina*

Al estar conforme con el modelo y las soluciones obtenidas para el problema planteado el siguiente paso es guardar la rutina para futuras repeticiones en formato MPS o XLP, 'writeMPSGLPK' o 'writeLPGLPK'.

# RESULTADOS

## Rutina de ensayo

Se muestran los resultados obtenidos de la modelación y la rutina completa realizada en R Project con los datos de un ejemplo proporcionado por el paquete GLPK para la familiarización de las funciones y metodologías utilizadas.

Para este problema se construye un calendario de cosecha que maximice el volumen aprovechado en 6 periodos de 10 años en un bosque de 8400 hectáreas dividido en 8 rodales. El horizonte de planeación corresponde a 60 años y el tamaño de la matriz del problema resulta en 14 X 48.

```
#Rutina de ensayo: regulación de bosques, base de datos Leuschner,
1990.
#Fecha de creación 25/01/14
#Por: Olivia Sánchez

#Inicia etapa de pre-procesamiento
A <- 8
T <- 6
l <- 10
P <- T * l
stand.acres <- c(5000,5000,5000,5000,30000,20000,12000,2000)
leusch.ylds <- read.table("D:/Mis documentos/R/win-
library/3.1/FAWR/resources/data/leuschner.txt", header=TRUE)

#INICIA 2 ETAPA: PROCESAMIENTO
#Cargar paquete en R project
library(glpkAPI)

## using GLPK version 4.47

#Generar función objetivo
leusch.lp <- initProbGLPK()
setProbNameGLPK(leusch.lp, "leuschner")
setObjDirGLPK(leusch.lp, GLP_MAX)

#Agregar variables de decisión
addColsGLPK(leusch.lp, nrow( leusch.ylds ))

## [1] 1

leusch.ylds$dv <- paste("a",
                        leusch.ylds$stand,
                        leusch.ylds$period,
```

```

                                sep="")
head(leusch.ylds) #chechar matriz creada

##   stand period age  vol  dv
## 1     1      1   30  3.2 a11
## 2     1      2   40  6.1 a12
## 3     1      3   50  8.3 a13
## 4     1      4   60 10.1 a14
## 5     1      5   70 11.6 a15
## 6     1      6   80 12.9 a16

#etiquetar variables
for( t in 1:nrow(leusch.ylds)) {
  label <- leusch.ylds[t,]$dv
  setColNameGLPK(leusch.lp, t, label)
}

#establecer límites de variables
for(t in 1:nrow(leusch.ylds)) {
  setColBndGLPK(leusch.lp, t, GLP_LO, 0.0, 0.0)
}

#establecer coeficientes de matriz
for(t in 1:nrow( leusch.ylds)) {
  setObjCoefGLPK(leusch.lp, t, leusch.ylds[t,]$vol)
}

#Agregar variables de restricción
addRowsGLPK(leusch.lp, length(stand.acres))

## [1] 1

acre.consts <- t( kronecker(diag(length(stand.acres)),
                             as.matrix( rep(1,6))))

val <- rep(1, 6)
for(i in 1:length(stand.acres)) {
  idx <- rep(0, 6)
  id <- 1
  for(j in 1:ncol(acre.consts)) {
    if(acre.consts[i,j] != 0.0) {
      idx[id] <- j
      id <- id + 1
    }
  }
}

#etiquetar restricciones
setRowNameGLPK(leusch.lp, i, paste("s", i, sep=""))
#establecer límites de las variables de restricción
setRowBndGLPK(leusch.lp, i, GLP_UP, 0.0,
              stand.acres[i])
#establecer coeficientes de restricción
setMatRowGLPK(leusch.lp, i, length(val), idx, val)
}

```

```

#chechar matriz creada
getNumRowsGLPK(leusch.lp)

## [1] 8

getNumColsGLPK(leusch.lp)

## [1] 48

#agregar más variables, etiquetar, limitar y establecer coeficientes
target.acres <- rep(14000, 6)
addRowsGLPK(leusch.lp, length(target.acres))

## [1] 9

val <- rep(1,8) ## a vector of 8 ones.
for(i in 1:length(target.acres)) {
  idx <-
    as.numeric(rownames(subset(leusch.ylds, period == i)))
  setRowNameGLPK(leusch.lp,
                 i + length(stand.acres),
                 paste("tac", i, sep=""))
  setRowBndGLPK(leusch.lp,
                i + length(stand.acres),
                GLP_FX,
                target.acres[i],
                target.acres[i])
  setMatRowGLPK(leusch.lp,
                i + length(stand.acres),
                length(val),
                idx,
                val)
}

#chechar matriz final
getNumRowsGLPK(leusch.lp)

## [1] 14

getNumColsGLPK(leusch.lp)

## [1] 48

#Solución del problema
solveSimplexGLPK(leusch.lp)

## [1] 0

#Extracción de resultados
leusch.obj <- getObjValGLPK(leusch.lp)
leusch.obj

## [1] 1224600

```

El objeto "bosque.obj" contiene el valor máximo de la función objetivo que resultó en un rendimiento en volumen total de  $1224600 \times 10^3 \text{ m}^3$ .

### Reporte de resultados

```
#Crear función de reporte de columnas y filas
get.row.report <- function( lp ) {
  nrows <- getNumRowsGLPK( lp ) #obtener número de filas
  #construir la tabla para filas
  r <- NULL
  for( i in 1:nrows ) {
    r <- rbind( r,
      as.data.frame( cbind( getRowNameGLPK( lp, i ),
        getRowStatGLPK( lp, i ),
        getRowPrimGLPK( lp, i ),
        getRowLowBndGLPK( lp, i ),
        getRowUppBndGLPK( lp, i ),
        getRowDualGLPK( lp, i ),
return_codeGLPK(getRowTypeGLPK(lp,i))
          ) ) ) }

  names(r) <- c("name","status","prim","lb","ub","dual","strerr" )
  rownames( r ) <- 1:nrows
  r}
get.col.report <- function( lp ) {
  ncols <- getNumColsGLPK( lp )
  #construir la tabla para columnas
  c <- NULL
  for( i in 1:ncols ) {
    c <- rbind( c,
      as.data.frame( cbind( I(getColNameGLPK( lp, i )),
        I(getColStatGLPK( lp, i )),
        I(getColPrimGLPK( lp, i )),
        I(getColLowBndGLPK( lp, i )),
        I(getColUppBndGLPK( lp, i )),
        I(getColDualGLPK( lp, i )),
        I(getCbindGLPK( lp, i )),
        I(getColTypeGLPK( lp, i )),
          ) ) ) }

  names(c) <-
c("name","status","activity","lb","ub","dual","b_ind","type" )
  rownames( c ) <- 1:ncols
  c}

#Generar reporte de columnas
leusch.col.rpt <- get.col.report(leusch.lp)
leusch.col.rpt
```

##	name	status	activity	lb	ub
dual	b_ind				
## 1	a11	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
4.8	0				
## 2	a12	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
2.9	0				
## 3	a13	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
1.7	0				
## 4	a14	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
0.9	0				
## 5	a15	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
0.3000000000000002	0				
## 6	a16	1	5000	0	1.79769313486232e+308
0	14				
## 7	a21	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
3.1	0				
## 8	a22	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
1.9	0				
## 9	a23	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
1.1	0				
## 10	a24	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
0.6000000000000001	0				
## 11	a25	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
0.2	0				
## 12	a26	1	5000	0	1.79769313486232e+308
0	2				
## 13	a31	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
1.9	0				
## 14	a32	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
1.1	0				
## 15	a33	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
0.6000000000000001	0				
## 16	a34	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
0.2999999999999999	0				
## 17	a35	1	1000	0	1.79769313486232e+308
0	3				
## 18	a36	1	4000	0	1.79769313486232e+308
0	9				
## 19	a41	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
1.1	0				
## 20	a42	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
0.6000000000000001	0				
## 21	a43	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
0.5999999999999999	0				
## 22	a44	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
0.09999999999999991	0				
## 23	a45	1	5000	0	1.79769313486232e+308
0	4				
## 24	a46	2	0	0	1.79769313486232e+308 -
0.09999999999999991	0				

## 25	a51	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.5000000000000002		0			
## 26	a52	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.5		0			
## 27	a53	1	8000	0	1.79769313486232e+308	
	0	11				
## 28	a54	1	14000	0	1.79769313486232e+308	
	0	5				
## 29	a55	1	8000	0	1.79769313486232e+308	
	0	10				
## 30	a56	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.1000000000000001		0			
## 31	a61	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.2		0			
## 32	a62	1	14000	0	1.79769313486232e+308	
	0	12				
## 33	a63	1	6000	0	1.79769313486232e+308	
	0	13				
## 34	a64	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.0999999999999991		0			
## 35	a65	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.1000000000000001		0			
## 36	a66	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.299999999999999		0			
## 37	a71	1	12000	0	1.79769313486232e+308	
	0	1				
## 38	a72	1	0	0	1.79769313486232e+308	
	0	7				
## 39	a73	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.0999999999999991		0			
## 40	a74	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.2		0			
## 41	a75	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.299999999999999		0			
## 42	a76	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.6000000000000001		0			
## 43	a81	1	2000	0	1.79769313486232e+308	
	0	8				
## 44	a82	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.0999999999999991		0			
## 45	a83	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.2		0			
## 46	a84	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.399999999999999		0			
## 47	a85	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.6000000000000001		0			
## 48	a86	2	0	0	1.79769313486232e+308	-
	0.8999999999999996		0			
##	type					
## 1	2					

##	2	2
##	3	2
##	4	2
##	5	2
##	6	2
##	7	2
##	8	2
##	9	2
##	10	2
##	11	2
##	12	2
##	13	2
##	14	2
##	15	2
##	16	2
##	17	2
##	18	2
##	19	2
##	20	2
##	21	2
##	22	2
##	23	2
##	24	2
##	25	2
##	26	2
##	27	2
##	28	2
##	29	2
##	30	2
##	31	2
##	32	2
##	33	2
##	34	2
##	35	2
##	36	2
##	37	2
##	38	2
##	39	2
##	40	2
##	41	2
##	42	2
##	43	2
##	44	2
##	45	2
##	46	2
##	47	2
##	48	2

El reporte de resultados para las columnas contiene información sobre reducción de costos o valor dual, el cual indica las unidades que la función objetivo debe cambiar para que dicha variable de decisión se considere en la solución óptima del problema.

Ofrece información para las variables con valor cero, en este caso para el rodal 1 en el periodo 1 (a11), el valor dual (-4.8) significa que el rendimiento por hectárea del rodal 1 debe aumentar de 3.2 a  $8.0 \times 10^3 \text{m}^3$  para ser cosechado en el periodo 1.

```
leusch.col.rpt[1,]
##   name status activity lb                ub dual b_ind type
## 1  a11      2         0  0 1.79769313486232e+308 -4.8    0    2
ac.per <- matrix (as.numeric (as.matrix (I
(leusch.col.rpt$activity))), 6, 8)
ac.per
##      [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6] [,7] [,8]
## [1,]    0    0    0    0    0    0 12000 2000
## [2,]    0    0    0    0    0 14000    0    0
## [3,]    0    0    0    0 8000  6000    0    0
## [4,]    0    0    0    0 14000    0    0    0
## [5,]    0    0 1000 5000 8000    0    0    0
## [6,] 5000 5000 4000    0    0    0    0    0
```

El objeto “ac.per” contiene la superficie de cosecha para cada periodo de intervención en cada uno de los rodales que constituyen el bosque; así las filas representan los periodos de intervención y las columnas los diferentes rodales.

Por ejemplo: la columna que encabeza el número 5, indica que dicho rodal será intervenido en el periodo 3 con una superficie de cosecha de 8000 ha, en el siguiente periodo, 4, la intervención será de 14000 ha y una última en el periodo 5 con 8000 ha.

```
rowSums (ac.per)
## [1] 14000 14000 14000 14000 14000 14000
```

La suma de los valores de cada columna del objeto creado anteriormente comprueba que la regulación del bosque por superficie sea correcta, obedeciendo a las variables de restricción.

```
vol.cut.a <- c(199.4,197.4,203.4,211.4,217.6,195.4)
```

Se refiere al aprovechamiento en volumen para cada periodo, obtenido del producto de la superficie de cosecha y el rendimiento por hectárea de cada rodal.

```
#Generar reporte de filas
```

```
leusch.row.rpt<-get.row.report(leusch.lp)
```

```
leusch.row.rpt
```

```
##      name status  prim                lb    ub dual
## 1    s1      1  5000 -1.79769313486232e+308  5000    0
## 2    s2      3  5000 -1.79769313486232e+308  5000  1.2
## 3    s3      3  5000 -1.79769313486232e+308  5000  2.2
## 4    s4      3  5000 -1.79769313486232e+308  5000  3.2
## 5    s5      3 30000 -1.79769313486232e+308 30000  4.1
## 6    s6      3 20000 -1.79769313486232e+308 20000  5.1
## 7    s7      3 12000 -1.79769313486232e+308 12000  6.1
## 8    s8      3  2000 -1.79769313486232e+308  2000  7.1
## 9   tac1     5 14000                14000 14000    8
## 10  tac2     5 14000                14000 14000    9
## 11  tac3     5 14000                14000 14000   10
## 12  tac4     5 14000                14000 14000   11
## 13  tac5     5 14000                14000 14000  11.9
## 14  tac6     5 14000                14000 14000  12.9
##
##                strerr
## 1  ill-conditioned matrix
## 2  ill-conditioned matrix
## 3  ill-conditioned matrix
## 4  ill-conditioned matrix
## 5  ill-conditioned matrix
## 6  ill-conditioned matrix
## 7  ill-conditioned matrix
## 8  ill-conditioned matrix
## 9                solver failed
## 10               solver failed
## 11               solver failed
## 12               solver failed
## 13               solver failed
## 14               solver failed
```

El segundo reporte generado para las filas, presenta los valores de holgura (lb) que presentan las restricciones indicadas que no se utilizan en la solución óptima del problema, los valores de cero indican que la fila está limitando la solución, en este caso debido a la restricción de superficie de cosecha máximo que se indicó, por lo que todos los valores de holgura deben ser cero. Los valores del excedente (ub) definen el total de superficie posible que puede ser cosechada en cada rodal. El valor de sombra

(dual) es el máximo de la función objetivo que soporta al agregar una unidad mas de restricción, en este caso representaría la voluntad de pagar por la capacidad para cosechar una unidad de superficie adicional de bosque.

```
leusch.row.rpt[1,]
##   name status prim          lb   ub dual
strerr
## 1   s1      1 5000 -1.79769313486232e+308 5000   0 ill-conditioned
matrix
```

Por ejemplo en el caso del rodal 1 (s1) necesita aumentar su incremento a 12.9m<sup>3</sup> según su valor dual para considerarse en la función objetivo y ser cosechado en el primer periodo.

```
#Archivar la rutina en format .xlp
writeLPGLPK (leusch.lp, "Bosque Ensayo.xlp")
## [1] 0
```

## Rutina Ejido La Victoria

Se presenta la rutina en R Project que resuelve el problema de regulación del bosque de *Pinus cooperi* en el Ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango.

El horizonte de planeación a cubrir es de 50 años con una matriz de problema de 10X25.

```
#Problema de regulación de bosques
#Pinus cooperi Ejido La Victoria
#Pueblo Nuevo, Dgo #12.10.14

#INICIA ETAPA DE PRE-PROCESAMIENTO
A <- 5 #cantidad de rodales
T <- 5 #ciclos de corta
l <- 10 #horizonte de planeación en años
P <- T * l #turno fijado en 50 años
rodal.es.ha <- c(2616.4,2197.8,2930.4,314,314) #superficie de cada rodal
cooperi.rdmt <- read.table("D:/Mis documentos/oly/TESIS/3
SEMINARIO/COOPERI.txt",
                          header = TRUE) #rendimiento de pinus cooperi
```

en ej. La victoria

```
head(cooperi.rdmt) #corroborar datos de la tabla
```

```
##   RODAL PERIODO EDAD   VOL
## 1     1       1   20 0.0906
## 2     1       2   30 0.1727
## 3     1       3   40 0.2350
## 4     1       4   50 0.2860
## 5     1       5   60 0.3284
## 6     2       1   30 0.1727
```

*#INICIA 2 ETAPA: PROCESAMIENTO*

```
library(glpkAPI) #Cargar paquete glpkapi
```

```
cooperi.lp <- initProbGLPK() #Crear el problema a resolver de programación lineal
```

```
setProbNameGLPK(cooperi.lp, "LAVICTORIA") #Asignar nombre al problema creado
```

```
setObjDirGLPK(cooperi.lp, GLP_MAX) #indicar maximizar la función objetivo ya que se minimiza por default
```

```
#Agregar variables de decisión
```

```
#numero de rodales 5 y ciclos de corta 5
```

```
addColsGLPK(cooperi.lp, nrow( cooperi.rdmt ))
```

```
## [1] 1
```

*#creación de columna dv que indica la intervencion de cada rodal en cada periodo*

```
cooperi.rdmt$dv <- paste("a",
                        cooperi.rdmt$RODAL,
                        cooperi.rdmt$PERIODO,
                        sep="")
```

*#corroborar datos de tabla*

```
head(cooperi.rdmt)
```

```
##   RODAL PERIODO EDAD   VOL dv
## 1     1       1   20 0.0906 a11
## 2     1       2   30 0.1727 a12
## 3     1       3   40 0.2350 a13
## 4     1       4   50 0.2860 a14
## 5     1       5   60 0.3284 a15
## 6     2       1   30 0.1727 a21
```

```
for( t in 1:nrow(cooperi.rdmt)) { #asignar nombres a las columnas
```

```
  label <- cooperi.rdmt[t,]$dv
  setColNameGLPK(cooperi.lp, t, label)
}
```

```
for(t in 1:nrow(cooperi.rdmt)) { #establecer límites de las variables de decisión
```

```
  setColBndGLPK(cooperi.lp, t, GLP_LO, 0.0, 0.0)
```

```

}
for(t in 1:nrow( cooperi.rdmt)) { #establecer Los coeficientes de La
función objetivo
  setObjCoefGLPK(cooperi.lp, t, cooperi.rdmt[t,]$VOL)
}
addRowsGLPK(cooperi.lp, length(rodiales.ha)) #Agregar restricciones de
superficies del rodal

## [1] 1

ha.restric <- t( kronecker(diag(length(rodiales.ha)), #Crear La matriz
as.matrix( rep(1,5))))

val <- rep(1, 5)
for(i in 1:length(rodiales.ha)) {
  idx <- rep(0, 5)
  id <- 1
  for(j in 1:ncol(ha.restric)) {
    if(ha.restric[i,j] != 0.0) {
      idx[id] <- j
      id <- id + 1
    }
  }
  setRowNameGLPK(cooperi.lp, i, paste("s", i, sep=""))
  setRowBndGLPK(cooperi.lp, i, GLP_UP, 0.0,
                rodiales.ha[i])
  setMatRowGLPK(cooperi.lp, i, length(val), idx, val)
}
getNumRowsGLPK(cooperi.lp)

## [1] 5

getNumColsGLPK(cooperi.lp)

## [1] 25

ha.objetivo <- rep(1674.5, 5) #establecer objetivo de cosecha
8372.48/50=167.45x10=1674.5
addRowsGLPK(cooperi.lp, length(ha.objetivo)) #agregar restricciones de
total de superficie disponible

## [1] 6

val <- rep(1,5) ## a vector of 5 rodiales
for(i in 1:length(ha.objetivo)) {
  idx <-
    as.numeric(rownames(subset(cooperi.rdmt, PERIODO == i)))
  setRowNameGLPK(cooperi.lp,
                 i + length(rodiales.ha),
                 paste("tac", i, sep="") )
  setRowBndGLPK(cooperi.lp,
                 i + length(rodiales.ha),
                 GLP_FX,

```

```

        ha.objetivo[i],
        ha.objetivo[i])
    setMatRowGLPK(cooperi.lp,
        i + length(rodales.ha),
        length(val),
        idx,
        val)
}
getNumRowsGLPK(cooperi.lp) #10
## [1] 10

getNumColsGLPK(cooperi.lp) #25
## [1] 25

#Resolver problema
solveSimplexGLPK(cooperi.lp)

## [1] 0

#Extraer solución
cooperi.obj<-getObjValGLPK(cooperi.lp)
cooperi.obj
## [1] 2465.421

```

El resultado del objeto es el valor máximo de la ecuación planteada, que para el caso del *Pinus cooperi* en el Ejido La Victoria resulta en un rendimiento total en volumen de  $2465.421 \times 10^3 \text{ m}^3$ .

```

#Generar reporte de resultados
cooperi.col.rpt<-get.col.report(cooperi.lp)
ac.per <-matrix(as.numeric(as.matrix(I(cooperi.col.rpt$activity))),
    5, 5)
ac.per

##      [,1] [,2] [,3] [,4] [,5]
## [1,]  0.0  0.0 1046.5  314  314
## [2,]  0.0  0.0 1674.5   0   0
## [3,]  0.0 1465.1  209.4   0   0
## [4,] 941.8 732.7   0.0   0   0
## [5,] 1674.5  0.0   0.0   0   0

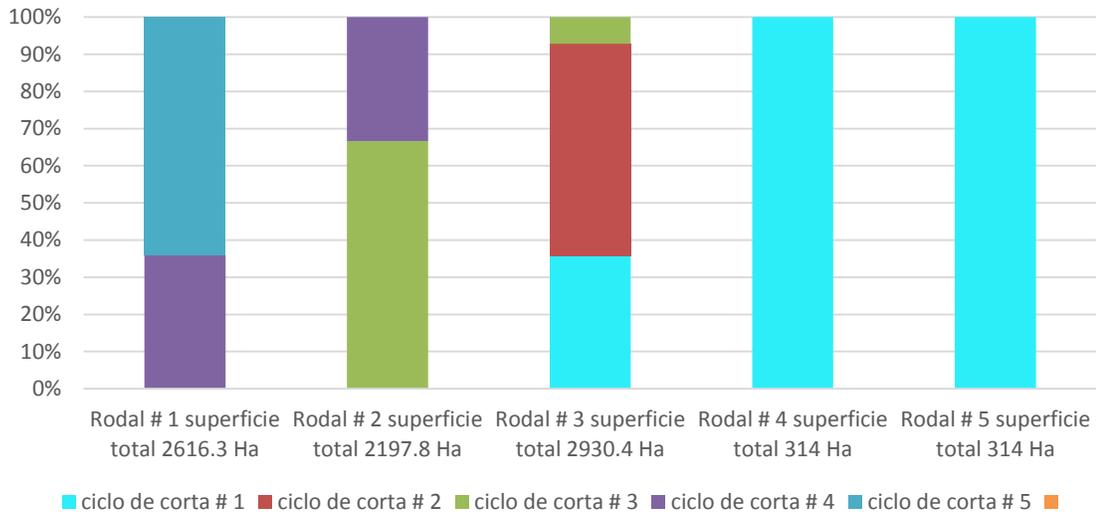
```

De esta manera se ha generado el calendario de cosecha para el Ejido La Victoria. El objeto creado nuevamente “ac.per” contiene la superficie de cosecha para cada periodo de intervención en cada uno de los rodales que constituyen el bosque;

así las filas representan los periodos de intervención y las columnas los diferentes rodales.

En la figura se presentan las superficies a aprovechar en cada periodo de acuerdo al modelo de rendimiento sostenido antes descrito.

**Superficie aprovechada por rodal en cada ciclo de corta**



```

cooperi.row.rpt<-get.row.report(cooperi.lp)
cooperi.row.rpt

##      name status  prim          lb      ub
dual
## 1     s1      1 2616.3 -1.79769313486232e+308 2616.4
0
## 2     s2      3 2197.8 -1.79769313486232e+308 2197.8
0.0424
## 3     s3      3 2930.4 -1.79769313486232e+308 2930.4
0.08480000000000001
## 4     s4      3   314 -1.79769313486232e+308   314
0.1358
## 5     s5      3   314 -1.79769313486232e+308   314
0.1782
## 6   tac1     5 1674.5          1674.5 1674.5
0.1502
## 7   tac2     5 1674.5          1674.5 1674.5
0.2012
## 8   tac3     5 1674.5          1674.5 1674.5
0.2436
## 9   tac4     5 1674.5          1674.5 1674.5
0.286

```

```
## 10 tac5      5 1674.5          1674.5 1674.5
0.3284
##
##          strerr
## 1 ill-conditioned matrix
## 2 ill-conditioned matrix
## 3 ill-conditioned matrix
## 4 ill-conditioned matrix
## 5 ill-conditioned matrix
## 6          solver failed
## 7          solver failed
## 8          solver failed
## 9          solver failed
## 10         solver failed
```

El reporte para las filas muestra los valores de holgura (lb), los valores de excedente (ub) y los valores de sombra duales (dual). En el caso del rodal 2 (s2) necesita aumentar su rendimiento en volumen a  $0.04\text{m}^3$  según su valor dual para considerarse en la función objetivo y ser cosechado en el primer periodo.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados para la rutina de ensayo obedecieron a las variables de decisión y restricción creadas en la matriz del problema de regulación de bosques. Los reportes extraídos mostraron los límites establecidos para ambos tipos de variables y las opciones a considerar en el manejo forestal, demostrando la adaptabilidad del modelo a cada situación y proporcionando información para la toma de decisiones en un plan de manejo forestal.

En el caso de la solución para el Ejido La Victoria, el rendimiento máximo total obtenido de 2 465 421 m<sup>3</sup> se relaciona con los registros de aprovechamiento anual de su plan de manejo forestal que oscilan en los 37 000 m<sup>3</sup> con una producción anual estimada en 22 000 m<sup>3</sup> (Smartwood, 2013).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La programación lineal cuenta con una amplia aplicación como herramienta de solución en manejo forestal. A través de la creación de matrices en R Project es posible examinar diversos problemas de planificación forestal, por lo que se alienta al manejador al uso de las técnicas descritas en el presente trabajo.

Los planes de manejo forestal son particulares de cada bosque, por lo que la rutina creada en el software es adaptable a cada una de estas características específicas, el encargado del manejo puede aumentar o disminuir las variables de decisión y restricción como mejor le convenga y de esta manera crear una matriz específica para cada problema de regulación forestal.

La simulación de los bosques en R Project pretende otorgar herramientas confiables de decisión a los manejadores del recurso forestal a través de la aplicación de la presente rutina creada para casos específicos.

El uso de esta rutina permite a regiones carentes de registros históricos desarrollar planes de manejo forestal e impulsar su industria.

## REFERENCIAS

- Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Estudios FAO Montes 22/2, Roma, Italia.
- Arreola, M. 1998. Desarrollo de un modelo de regulación forestal en un bosque de clima templado empleando programación lineal. Tesis Maestría. FCF-UANL. Nuevo León, México. 50 p.
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P., Grebner, D. L. 2009. Forest Management and Planning. Ed. Elsevier. New York, E.U.
- Brundtland, G.H. 1988. Nuestro futuro común. Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo. Ed. Alianza. Madrid, España.
- Buongiorno, J., Gilles, J. K. 1987. Forest Management and economics. Macmillan. New York, E.U. 285 p.
- Cano, C. 1988. El sistema de manejo regular en los bosques de México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 221 p.
- Clutter, J. L., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Blister, G. H., Bailey, R. L. 1983. Timber management: A quantitative approach. Ed. John Wiley & Sons. New York, E.U. 333 p.
- Davis, L. S., Johnson, K. N. 1987. Forest management. Third ed. McGraw-Hill. New York, E.U. 790 p.
- Davis, K. 1966. Forest management. Regulation and valuation. 2nd. Ed. McGraw-Hill. Nueva York, E.U. 519 p.
- Davis, L. S., Johnson, K. N., Bettinger, P. S., Howard, T. E. 2001. Forest Management, 4th Edition. McGraw-Hill Series in Forest Resources. McGraw-Hill, New York.

- Duerr, W., Teeguarden, D., Christiansen, N., Guttenberg, S. 1982. Forest resource management. Decision-making principles and cases. O.S.U. Corvallis. 612 p.
- Dykstra, D. 1984. Mathematical programming for natural resource management. McGraw-Hill. Nueva York, E.U. 298 p.
- FAO. 2005. Situación de los bosques del mundo. Dirección de información de la FAO. 6ª. Edición. Roma, Italia
- Gadow; K. V., Bredenkamp, B. 1992. Forest management. Académica. Pretoria. 151 p.
- Gadow, K.V. 1996. Modelling growth in managed forests-realism and limits of lumping. Sci. Total Environ. 167-177, 183p.
- Gadow, K.V. 2001. Orientation and control in CCF systems. Continuous Cover Forestry: Assesment, Analysis, Scenarios. International IUFRO Conference 2001, Göttingen. Kluwer, Dordrecht. 211-217 p.
- García, O. 1988. Growth modeling-a(re)view.N. Z. For 33(3), 14-17 p.
- García, O. 1994. The state-space approach in growth modelling. Can. J. For. Res. 24, 1894-1903.
- González, M.A. 2000. Desarrollo sostenible, medio ambiente, y energía. Boletín de información técnica AITIM, 204, marzo-abril 2000: 56-62 p.
- HILLIER, F. S.; Lieberman, G. J. 1997. Introducción a la investigación de operaciones. McGraw-Hill. Mexico. 998 p
- Hof, J. G. 1993. Coactive forest management. Academic Press. San Diego. 189 p.
- INEGI. 2005. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. II Censo de población y vivienda por localidad. Disco Compacto. México.

- KIDD , W. E. Jr. E. F. THOMPSON and P. H. HOEPNER. 1966. Forest regulation by Linear Programming : a case study. Universität Göttingen. Journal of Forestry. 64 (9): 611 -613 p.
- Kozak, A., Kozak, R.A. 2003. Does cross validation provide additional information in the evaluation of regression models? Can. J. For. Res. 33, 976-987 p.
- Leuschner, W. 1984. Introduction to forest resource management. Wiley. Nueva York, E.U. 298 p.
- Leuschner, W. 1990. Forest regulation, harvest scheduling, and planning techniques. Wiley. Nueva York, E.U. 281 p.
- Maini, J.S. 1989. Sustainable development and the Canadian forest sector. Informe debatido en el Consejo Canadiense de Ministros de Montes el 16 de octubre de 1989 en Niagara Falls. Ottawa Forestry Canada.
- Maini, J.S. 1990. Sustainable development and the Canadian forest sector. Forest. Chron. 66(4): 346-349 p.
- Makhorin, A. 2008. GNU Linear Programming Kit Reference Manual Version 4.34. Draft Edition. Boston, E.U. 179 p.
- Makhorin, A. 2009. GNU linear programming kit 4.9. GNU Software Foundation. <http://www.gnu.org/software/glpk/glpk.html>.
- Martínez, M. 1992. Los Pinos Mexicanos. 3a. Ed. Ediciones Botas, México, D.F. 361 p.
- Márquez, M.A. 1994. Unidades de vegetación de un bosque templado frío de San Dimas, Durango. Memorias del Simposio y II Reunión Nacional de Silvicultura y Manejo de Recursos Forestales. 14 p.

- Myers, R.H. 1990. Classical and modern regression with applications. 2<sup>nd</sup> edition. Duxbury Press, Belmont, California.
- Peña, D. 2002. Regresión y diseño de experimentos. Alianza Editorial, Madrid.
- Reygadas, D. D. 1988: Determinación de un plan de cortas óptimo para *Pinus hartwegii* Lindl, utilizando programación lineal. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. 168 p.
- Rivero, B. 1984. Modelo para la regulación de la corta en bosques coetáneos de clima templado - frío. Tesis Ing. Arg. Esp. En Bosques. U.A.CH. Chapingo , México. 115 p.
- Rivero, B. 2012. Un esquema integrado para la administración de recursos de contención de incendios forestales desde un enfoque estocástico. Universidad Autónoma de Nuevo León. 131 p.
- Rivero, B., Zepeda, B. 1990. Principios básicos de regulación forestal. Serie de Apoyo Académico No. 42. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 262 p.
- Robinson, A., Hamann, J. 2010. Forest Analytics with R. Springer Science and Business Media. Nueva York, E.U. 355 p.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. México. Ed Limusa. 432 p.
- Silva F., R. 2006. Estudio para el Fortalecimiento de las Actividades Productivas en la Empresa Forestal Ejidal "La Victoria", Municipio Pueblo Nuevo, Dgo. Informe final. CONAFOR-PROCYMAF II. Durango, México. 29 p.
- Speidel, G. 1972. Planung im Forstbetrieb. Paul Parey. Hamburgo, Alemania. 267 p.

Talavera, S. 2002. Desarrollo de un modelo de programación lineal para el manejo de ecosistemas forestales. Tesis Maestría, FCF-UANL, Nuevo León, México. 82 p.

Thierauf, R.J., Klekamp, R.C. 1975. Decision - Making Through Operations Research. 2nd. Ed. New York. John Willey & Sons. 650p.

Upalia, B. 2002. Índice de Sitio para *Pinus cooperi* var. Ornelasi y *Pinus durangensis* en el ejido La Ciudad, P.N., Dgo. Tesis de Ingeniería. Instituto Tecnológico de El Salto. El Salto, P.N. Durango, México.

Williams, M. 1981. Decision-making in forest management. Research Studies Press. Chichester. 143 p.