
MODELO PRELIMINAR PARA LA PLANIFICACIÓN DEL APROVECHAMIENTO EN PLANTACIONES FORESTALES INDUSTRIALES EN VENEZUELA

RAMÓN CHIARI LÓPEZ, OMAR E. CARRERO G., MAURICIO JEREZ, MARÍA ALEJANDRA QUINTERO M. y JURGEN STOCK

RESUMEN

Se desarrolló un modelo preliminar para la planificación de las actividades de aprovechamiento en plantaciones forestales para la producción de pulpa, el cual permite obtener secuencias óptimas de corta que minimizan los costos totales de aprovechamiento. El objetivo principal fue identificar la importancia relativa que los factores técnicos y financieros considerados tienen en la determinación de secuencias óptimas de corta en un sistema de plantaciones forestales compuesto por rodales de diferentes especies, edades, extensión y accesibilidad. El modelo, llamado "Ospino", fue planteado bajo los principios de programación entera binaria. Se generaron secuencias óptimas de corta bajo diferentes escenarios basados en un caso real. Los escenarios incluyeron la planificación de secuencias de corta con hasta 300

rodales simultáneamente durante un período de planificación de siete años y, los resultados fueron evaluados en función de la edad de corta, rendimiento en pulpa, superficie a cortar por año, cuota anual a cumplir, y costos unitarios y totales. Bajo las asunciones del modelo, se encontró que los factores que más influyeron en la planificación óptima de la cosecha fueron el incremento medio anual en volumen ($m^3 \cdot ha^{-1} / año$) estimado para las plantaciones y la superficie (ha) de los rodales. El modelo Ospino es uno de los primeros intentos en Venezuela para desarrollar un sistema de optimización de cosechas basado en técnicas de programación matemática adaptado a las condiciones del manejo forestal de plantaciones en el país.

 Un problema específico de gran interés en el manejo forestal es la planificación óptima de la cosecha (Romero, 1989). La planificación de la cosecha, también llamada planificación de cortas o planificación del aprovechamiento, consiste en determinar cuándo, dónde y cuánta madera cortar para satisfacer los objetivos de la empresa productora, ha-

ciendo un uso adecuado de los recursos disponibles. Buongiorno y Gilles (1987) señalan que mediante estos planes se pueden controlar variables como el volumen de inventario, tasas de crecimiento, flujo de caja, valor actual neto y retorno sobre la inversión. Así, una adecuada planificación del aprovechamiento puede conducir a un aumento en la rentabilidad de las empresas forestales.

Uno de los criterios para decidir el momento de aprovechar una plantación forestal con fines productivos es hacerlo en el momento en que alcanza su máxima rentabilidad (turno óptimo financiero de aprovechamiento). En muchas ocasiones, cortar en el momento "adecuado" no es factible, ya sea por restricciones de capacidad, limitaciones económicas u otros

PALABRAS CLAVE / Planificación del Aprovechamiento / Plantaciones Forestales / Programación Entera Binaria /

Recibido: 02/04/2008. Modificado: 08/09/2008. Aceptado: 17/09/2008.

Ramón Chiari López. Ingeniero Forestal, Instituto Tecnológico, Costa Rica. M.Sc. en Manejo de Bosques, Universidad de Los Andes (ULA), Venezuela. Ingeniero Forestal, Institución Nacional del Ambiente, Panamá. e-mail: rjchiari@hotmail.com

Omar E. Carrero G. Ingeniero Forestal y M.Sc. en Economía, ULA, Venezuela. Profesor, ULA, Venezuela. Dirección: Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA, Mérida 5101, Venezuela. e-mail: neto@ula.ve

Mauricio Jerez. Ingeniero Forestal y M.Sc. en Estadística Aplicada, ULA, Venezuela. Ph.D. en Manejo Ecológico de Bosques, Louisiana State University, EEUU. Profesor, ULA, Venezuela. e-mail: jerez@ula.ve, mjerez@cantv.net

María Alejandra Quintero M. Ingeniero de Sistemas y M.Sc. en Estadística Aplicada, ULA, Venezuela. Profesora, ULA, Venezuela. e-mail: mariaq@ula.ve

Jurgen Stock. Ingeniero Forestal y M.Sc. en Manejo de Bosques, ULA, Venezuela. Gerente de Investigación, Smurfitkappa Cartón de Venezuela. e-mail: jurgen.stock@smurfitkappa.com.ve

aspectos que puedan tenerse en consideración. Son muchos los factores (biológicos, ambientales, financieros, operativos, etc.) que deben tomarse en cuenta en el proceso de planificación forestal, lo que hace que la toma de decisiones sea un problema complejo.

Los problemas complejos de planificación forestal pueden enfrentarse mediante el uso de técnicas de modelado que permitan identificar los factores principales que los definen y representarlos de forma tal que permitan desarrollar sistemas para la selección de las alternativas más adecuadas para resolverlos, a la vez que proporcionen a los planificadores información pertinente para lograr una mejor comprensión de los efectos que puede generar cualquier decisión que tomen. Para tal fin, la planificación forestal ha utilizado técnicas de modelado basadas en métodos cuantitativos y sistemas de apoyo a decisiones, destacándose los modelos de investigación de operaciones, específicamente aquellos basados en la programación matemática (García, 1990).

Entre las técnicas de programación matemática, la programación lineal es la más utilizada y exitosa en la resolución de problemas de planificación forestal (Weintraub, 1975; Bell, 1977; Vincent, 1993; Díaz y Prieto, 1999; Boyland, 2002). La programación lineal ha sido empleada desde la década de los 60 para solucionar problemas de planificación forestal, siendo pioneros los trabajos de Curtis (1962), Leak (1964), Loucks (1964), Kidd *et al.* (1966), Liittschwager *et al.* (1967), y Nautiyal y Pearse (1967). Los primeros modelos para la planificación de cortas basados en programación lineal fueron TIMBER RAM (Navon, 1971) y MAXMILLION (Ware y Clutter, 1971), desarrollados por el Servicio Forestal de EEUU y por la Universidad de Georgia, respectivamente. Ambos sistemas sirvieron de prototipo para versiones posteriores que intentaron adaptarse a los cambios de la industria forestal estadounidense, como por ejemplo FORPLAN (Bradley, 1991) y SPECTRUM (Reynolds, 2005).

En la planificación forestal también se ha utilizado la programación entera, la programación entera mixta y la programación entera binaria, que son técnicas derivadas de la programación lineal. La programación entera se usa cuando las variables de decisión deben tomar valores enteros; si se requiere que solo algunas de las variables sean enteras, se habla de programación entera mixta; en los casos en que las variables deben ser ceros o unos se tie-

ne un problema de programación entera binaria. Estas técnicas de modelado se han empleado para abordar distintos problemas inherentes a la planificación forestal, ya que con frecuencia se manejan situaciones donde las variables de decisión deben ser enteras.

En la mayoría de las aplicaciones de la programación lineal y sus variantes se busca el diseño de un plan de cortas que maximice los beneficios del bosque, expresados como el valor actual neto (VAN), o que minimice los costos. Los trabajos de Macmillan y Fairthweather (1988), Burger y Jamnick (1995), Andalaft *et al.* (2003), y Baskent y Keles (2006) son buenos ejemplos de este tipo de modelos. En otras investigaciones se ha planteado otras funciones objetivo tales como el modelo de Thompson *et al.* (1973) que aplica la programación lineal para maximizar el volumen de madera obtenido en las cosechas y el modelo de Williamson y Niehuwenhius (1993) que busca minimizar la distancia de transporte de productos forestales.

Algunos países de América Latina han comenzado a utilizar modelos de planificación forestal. El caso de mayor avance es el de Chile, donde a partir de 1988 se empezó a implementar modelos de programación matemática para apoyar la toma de decisiones, generando un incremento considerable en las ganancias anuales de las empresas forestales y, además, ganancias cualitativas en la productividad gerencial, mejor calidad de vida de los trabajadores y una reducción del daño ambiental en algunas áreas (Weintraub y Bare, 1996; Epstein *et al.* 1999). En Brasil, también se han llevado a cabo estudios referentes al desarrollo de modelos de programación matemática aplicados a la planificación forestal, tales como los de Rodrigues *et al.* (2003, 2004a, 2004b, 2006), quienes han comparado distintas estrategias de modelado y diferentes enfoques de solución a los problemas de planificación de cortas basados en programación entera.

A pesar de la aplicabilidad que han tenido los modelos de programación matemática como apoyo en los procesos de planificación forestal, en Venezuela no se ha desarrollado este tipo de herramienta. Sin embargo, existe la necesidad de su utilización, por lo que se han importado sistemas desarrollados en otros países para su puesta en práctica. Así por ejemplo, la empresa Terranova de Venezuela S.A utiliza el programa computacional "Austral" que permite, entre otros aspectos, determinar: la disponibilidad en el largo plazo

de madera aserrable y pulpable de acuerdo a intervenciones silviculturales actuales y futuras (Smartwood, 2004). Asimismo, la empresa emplea el sistema ASICAM, desarrollado en Chile, para optimizar las actividades de transporte de madera y mejorar el rendimiento de carga de los camiones (Díaz, 2002). No obstante, la aplicación de modelos desarrollados en otros países presenta dificultades tales como altos costos de adquisición y la adecuación de los modelos a los requerimientos y condiciones específicas del sector nacional. Esta situación hace evidente la importancia de desarrollar modelos de planificación que se adapten eficazmente a las necesidades y requerimientos de la industria forestal nacional.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo preliminar de planificación del aprovechamiento para plantaciones forestales venezolanas, con la finalidad de determinar la importancia relativa de los factores que más influyen en la determinación de las secuencias óptimas de corta. Se generaron secuencias óptimas de corta bajo diferentes situaciones basadas en un caso real. El modelo es una alternativa que puede contribuir como complemento de utilidad al criterio y experiencia de los profesionales del campo forestal y personas encargadas de la toma de decisiones, aspectos que facilitarían la planificación a largo plazo y la obtención de resultados más confiables.

Materiales y Métodos

El problema

Los datos necesarios para realizar este estudio los facilitó la División Forestal de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Venezuela, S.A. ubicada en los Llanos Occidentales de Venezuela. Se trata de plantaciones de Eucalipto (*Eucalyptus urophylla*, *E. grandis*, *E. xurograndis*), pino caribe (*Pinus caribaea*) y gmelina (*Gmelina arborea*) establecidas con fines de producción de pulpa.

El problema consiste en cómo planificar un sistema de cortas para una unidad de producción forestal que permita abastecer de madera en forma continua a una planta de pulpa para la producción de cartón, de manera tal que los costos de aprovechamiento y transporte sean mínimos.

Se considera que la unidad de producción forestal está conformada por cierto número de fincas de superficie variable. Un porcentaje de la superficie de cada finca es destinado a

plantaciones forestales, las cuales se establecen en unidades llamadas rodales. A su vez, cada rodal se subdivide en lotes. Cada lote está compuesto por una especie forestal que puede coincidir o no en especie, edad, crecimiento, áreas y edad de corta con los otros lotes presentes en los rodales de las fincas. Además, la madera debe ser transportada desde las distintas fincas hasta la planta de procesamiento de pulpa para papel. En el modelo se toma en cuenta que el aprovechamiento anual del volumen de madera existente y disponible puede realizarse en una o varias fincas simultáneamente, y que la cantidad

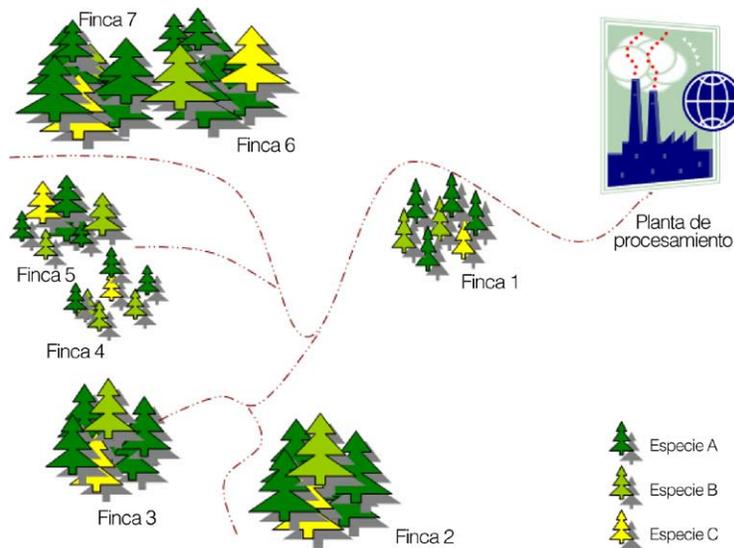


Figura 1. Esquema del sistema de desarrollo del modelo de planificación de aprovechamiento.

disponible de madera para cada año estará condicionada a la ubicación y la especie que se desee aprovechar (Figura 1). Asimismo, se desea lograr la mayor concentración de las operaciones en fincas cercanas con el objetivo de minimizar los costos de aprovechamiento. El volumen anual a aprovechar será determinado de acuerdo a las necesidades de materia prima de la planta. Este requerimiento puede ser un volumen variable cada año, lo cual puede afectar la secuencia óptima de corta de las plantaciones. En cuanto a los costos operacionales, se considerarán los costos de aprovechamiento de la plantación, los costos de transporte hasta la planta y el costo de oportunidad, referido al gasto en que se incurre al cortar un determinado lote en un año diferente al considerado como el turno óptimo.

Análisis del sistema asociado al modelo

Para el análisis del sistema asociado se procedió a la aplicación parcial de la metodología MEDSI (metodología estructurada para el desarrollo de sistemas de información) propuesta por Montilva (1992) para el desarrollo de sistemas de información en organizaciones de cualquier tipo. Esta metodología se actualizó mediante la aplicación de los principios y formalismos del lenguaje unificado de modelado (UML; Booch *et al.*, 2000; Núñez, 2003).

La aplicación parcial de esta metodología hizo posible definir y justificar el desarrollo del modelo y las actividades y requerimientos de información necesarios para reali-

zarlo; analizar el contexto donde se enmarca el modelo mediante el estudio del ambiente, la estructura y los procesos involucrados; y definir los requerimientos de los usuarios potenciales, para lo cual se hicieron cuestionarios, entrevistas y reuniones con el personal de la empresa. Estas actividades permitieron definir los datos de entrada, los supuestos de funcionamiento, las variables de decisión y las restricciones, para luego formular el modelo matemático.

El modelo matemático

El modelo fue planteado utilizando el enfoque de programación lineal entera binaria. La función objetivo consistió en minimizar el costo total de aprovechamiento $Z(\$)$:

$$\text{Min} Z = \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ k=1}}^{i=n, j=m, k=p} C_{ijk} X_{ijk} \quad \text{para } i=1, 2, 3, \dots, n, j=1, 2, 3, \dots, m \text{ y } k=1, 2, 3, \dots, p$$

donde C_{ijk} : costo total (costo de cosecha + costo de oportunidad + costo de transporte) del rodal i de la especie j en el año k (\$), y X_{ijk} : variable binaria (0,1) que indica si el rodal i de la especie j se cortará o no en el año k .

El costo de cosecha es el costo de cortar el rodal i de la especie j en el año k . Se incluyó el costo de todas las actividades relacionadas con la corta del rodal hasta colocar la madera en el patio de carga para ser transportada en camiones hasta la planta de procesamiento. Se asumió que los costos unitarios de cosecha son fijos durante el período de planificación evaluado.

El costo de transporte es el costo de transportar el volumen de madera proveniente del rodal i de la especie j en el año k hasta la planta de procesamiento. Este costo incluyó todas las actividades involucradas en el transporte desde el patio de carga hasta la planta de procesamiento. Se asumió que los costos unitarios de transporte son fijos durante el período de planificación evaluado.

El costo de oportunidad representa el dinero que dejaría de ganar el propietario al cortar en un año distinto del año óptimo de cosecha. Se calculó utilizando el enfoque de comparación de alternativas financieras, donde este costo

es igual a la diferencia entre el máximo valor esperado del suelo (VES_{\max}) y el valor esperado del suelo para una edad de corta determinada (VES_j). El costo de oportunidad es calculado utilizando la ecuación

$$CO_j = (VES_{\max}) - (VES_j)$$

donde CO_j : costo de oportunidad (\$), VES_{\max} : máximo valor esperado del suelo (\$), y VES_j : valor esperado del suelo (\$) para una edad de corta j . Tanto para VES_{\max} como para VES_j se considera que una vez terminado el período de planificación se repetirá nuevamente el mismo esquema de aprovechamiento. Se incluye el VES, el cual representa el valor actual de los beneficios netos de la presente rotación y de todas las siguientes; y de esta forma se comparan alternativas con vidas infinitas. Los valores de VES_{\max} y VES_j se calcularon utilizando la ecuación

$$VES = \frac{\sum_{r=0}^n (I_r - C_r)(1+i)^{-r}}{(1+i)^n - 1}$$

donde VES: valor esperado del suelo (\$), I_r : ingreso en un año r cualquiera (\$), C_r : costo en un año r cualquiera (\$), i : tasa alternativa del capital, y n : edad de rotación (años).

La función objetivo está sujeta a las siguientes restricciones:

Restricción 1. La sumatoria del volumen anual extraído en todos los rodales a explotar debe ser igual o mayor a la cuota establecida para cumplir con las necesidades de materia prima de la planta de procesamiento,

$$\sum_{\substack{i=n \\ j=m \\ k=p}} B_{ijk} X_{ijk} \geq b_j$$

donde B_{ijk} : volumen total (m^3) presente en el rodal i de la especie j en el año k , y b_j : cuota anual fijada para la especie j . Se asume que esta cuota anual será igual para todos los años del período de corta que se evalúa y diferente para cada especie, cuando sea el caso.

Restricción 2. Un rodal solo puede ser cortado una vez durante cada período de planificación considerado

$$\sum_{\substack{i=n \\ j=m \\ k=p}} X_{ijk} \leq 1$$

Adicionalmente a la función objetivo y sus respectivas restricciones se asumió lo siguiente: a) La amplitud del período de planificación a evaluar es de siete años. b) En cada año se consideran aquellos lotes cuya edad es igual o mayor a la edad mínima y menor o igual a la edad máxima considerada para ser procesada en la planta, estando determinadas las edades mínima y máxima permisibles para el aprovechamiento de un lote por los valores sobre edades máximas y razones tecnológicas y financieras, de acuerdo a los objetivos a cumplir. c) Los costos de cosecha son diferentes para cada especie. d) El incremento medio anual máximo es de siete años para eucalipto y gmelina, y de 15 años para pino, dado que estas edades son consideradas óptimas para la corta en el área de estudio. e) El incremento medio anual del volumen (IMA) disminuye en forma constante un 5% por año después que la plantación sobrepasa la edad de IMA máximo. f) Para cada especie se usó un factor de conversión de metros cúbicos a toneladas tomando en cuenta la densidad de la madera, dado que los requerimientos de consumo por la planta de pulpa vienen dados en toneladas métricas, mientras que usualmente la cosecha se expresa en m^3 ; los valores utilizados fueron $0,8\text{ton}\cdot\text{m}^{-3}$ para eucalipto, $0,65\text{ton}\cdot\text{m}^{-3}$ para gmelina y $0,68\text{ton}\cdot\text{m}^{-3}$ para pino. g) Para determinar el costo de oportunidad se asumió que el crecimiento (IMA) es igual para todos los lotes de una misma especie, mientras que los costos de transporte y cosecha se calcularon según el IMA para cada lote/especie. h) Las fincas cortadas en un período de planificación deben ser plantadas inmediatamente al inicio de la siguiente temporada de plantación.

El modelo fue resuelto utilizando el módulo SAS/OR® (*Operation Research Module*) del software SAS® versión 8.0, el cual posee procedimientos (LP® *procedure*) para resolver problemas de programación lineal (SAS, 2004).

Implementación del modelo

El modelo fue implementado en un programa computacional que consta de dos módulos. El módulo I, que constituye la interfaz de entrada de datos y salida de resultados, se desarrolló en Microsoft Excel® 2002. El Módulo II fue desarrollado en SAS/OR® e importa los datos formateados por el Módulo I para ser utilizados por el procedimiento LP®, el cual calcula la solución óptima utilizando la técnica de programación lineal conocida como ramificación y acotamiento (SAS, 2004). La solución óptima es exportada nuevamente al módulo I para producir archivos con salidas numéricas en hoja de cálculo (Figura 2).

A fin de simplificar la programación y reducir los tiempos de cálculo se establecieron las siguientes restricciones para el programa: a) Solo se procesan lotes cuya superficie y volumen no sean mayores que los determinados durante la corrida inicial del modelo, es decir, si el mayor lote considerado inicialmente es de 1000ha, en planificaciones futuras no podrán tenerse lotes con superficie mayor. b) A fin de reducir el tiempo de computación, no se consideraron lotes menores a 50ha; la superficie acumulada de todos los lotes <50ha en el proyecto fue de solo $\approx 228\text{ha}$, lo cual se consideró despreciable para los objetivos perseguidos frente a las $\approx 20000\text{ha}$ de plantaciones. c) La capacidad de procesamiento del modelo se limita a un máximo de tres especies, 40 fincas y 300 lotes de plantación. d) Los costos de transporte se consideran para cada especie por unidad de volumen.

Análisis de escenarios

Al encontrar la solución de un problema de programación lineal solo se ha dado un primer paso en el análisis para la toma de decisiones, ya que también es importante determinar cuán sensible es la solución a los cambios en los supuestos y factores exógenos (Bonini *et al.*, 2002). Para determinar la sensibilidad del modelo se probaron seis escenarios. El escenario de referencia (testigo) corresponde a los datos

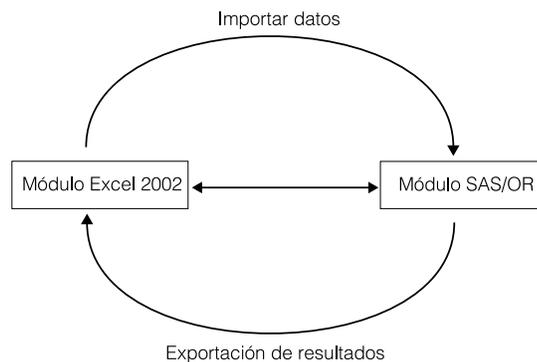


Figura 2. Esquema del funcionamiento general del modelo Ospino.

reales recabados en campo, aunque en esta descripción los datos y relaciones utilizados no se corresponden directamente a los reales, por tratarse de información confidencial. Como ejemplo se tomó una unidad hipotética de producción conformada por 20 lotes con un período de planificación de siete años. Cada lote tiene un costo de transporte y un costo de cosecha asignados según la distancia de la planta, el tipo de terreno y la especie. El incremento medio anual del volumen (IMA) se calculó para cada especie/finca y la cuota anual requerida por la planta fue de 90000 toneladas por año para todo el período de planificación.

Escenario 1 - Testigo. Para este escenario se asumió que a) el costo de cosecha en cada lote es siempre el mismo, ya sea la cosecha manual o semi-mecanizada; b) la tasa de interés es del 8%; c) los incrementos medios anuales del volumen y la superficie de los lotes son calculados sin error; y d) los costos de transporte desde un lote a la planta son independientes de la distancia.

Escenario 2 - Tipo de cosecha. En este escenario se evaluó cómo los costos diferenciales pueden afectar la secuencia óptima de cosecha. Se asumió que 10 de las 20 fincas consideradas pueden cortarse en forma manual y el grupo restante en forma semi-mecanizada, habiendo un diferencial de costo entre ambas modalidades de aprovechamiento. En la práctica, esta división puede deberse a condiciones topográficas y a razones sociales, entre otras. Se asumió que el método semi-mecanizado tiene un costo 15% menor que el manual.

Escenario 3 - Tasa de interés. Se evaluó el efecto de variación en la tasa de interés (0, 4, 8, 10, 11 y 12%) sobre la secuencia óptima. Debido a la estructura del modelo, el efecto principal de la

tasa de interés es la actualización de los ingresos y costos futuros.

Escenario 4 - IMA. Se evaluó el efecto de variaciones en el incremento medio anual (IMA) sobre la secuencia óptima original. El IMA es un valor que depende no solo del crecimiento de las plantaciones, el cual puede aumentar o disminuir de acuerdo a variaciones ambien-

tales, prácticas de manejo y material vegetal usado, sino que también depende de la precisión de las técnicas de inventario utilizadas, ya que estos valores se obtienen a partir de técnicas de muestreo sujetas a errores de diversa naturaleza.

Escenario 5 - Área de las fincas. Se evaluó el efecto de variaciones en el

cálculo de la superficie estimada para cada finca sobre la secuencia óptima original de corta.

Escenario 6 - Costo de transporte. Se consideraron tres categorías de costos de transporte según la distancia de cada lote en relación con la planta de procesamiento (distancia corta, media y larga). Se probaron diferenciales entre cada categoría de hasta $\pm 20\%$.

TABLA I
RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CORRIDA DEL MODELO
CON LOS VALORES ORIGINALES (ESCENARIO TESTIGO)

Periodo de planificación	Finca	Edad (años)	Área (ha)	Dist (km)	Costo Total (miles USD)	Cuota anual (ton)	Costo unitario (USD/ton)	Rend. (ton/ha)
1	7	7	305	0	339,07	29017	11,7	81
	20	9	528	24	719,53	61586	11,7	117
		8,0*	833**	12*	1058,60**	90603**	11,7*	109*
2	19	10	528	0	732,56	64627	11,3	122
	8	7	507	25	338,14	31260	10,8	62
		8,5*	1035**	12,5*	1070,70**	95887**	11,2*	93*
3	10	6	276	64	204,65	22501	9,1	82
	18	11	528	50	743,26	66908	11,1	127
		8,5*	804**	57,0*	947,91**	89409**	10,6*	111*
4	14	7	385	17	480,47	51783	9,3	134
	7	6	340	8	263,26	27722	9,5	82
	2	10	78	14	126,05	12697	9,9	163
		8,0*	803**	13,0*	869,77**	92202**	9,4*	115*
5	14	9	310	15	427,91	48259	8,9	156
	1	10	245	6	410,23	45022	9,1	184
		9,5*	556**	10,5*	838,14**	93282**	9,0*	168*
6	12	7	154	34	171,16	21532	8,0	140
	17	6	336	50	446,98	51579	8,7	154
	11	8	171	74	126,05	17722	7,1	103
		7,0*	661**	52,7*	744,19**	90833**	8,2*	137*
7	3	8	315	54	426,05	57502	7,4	182
	7	8	134	10	103,26	13878	7,4	103
	11	8	175	63	119,07	18052	6,6	103
		8,0*	624**	42,3*	648,37**	89432**	7,3*	143*
Promedio		8,2	759	28,6	882,52	91664	9,6	121
Total			5316		6177,67	641648		

* promedio, ** total.

TABLA II
PROMEDIO DE LAS VARIABLES EVALUADAS PARA EL ESCENARIO
TIPO DE COSECHA Y EL ESCENARIO TESTIGO

Finca	Período de planificación						
	1	2	3	4	5	6	7
		18	19	20	14	15	12
	2	8	9	6	1	10	3
	13			11		16	7

Las fincas en sombra no estaban presentes en el escenario original

TABLA III
SECUENCIA ÓPTIMA DE CORTA PARA EL ESCENARIO TIPO DE COSECHA

Escenario	Edad (años)	Área (ha)	Costo total (USD)	Cuota anual (ton)	Costo unitario (USD/ton)	Rendimiento (ton/ha)
Testigo	8,2	759	882539	91664	9,6	102,6
Tipo de cosecha	7,9	752	847557	92016	9,2	104,0

Resultados y Discusión

Secuencia óptima de corta

La Tabla I presenta los resultados obtenidos de la corrida del modelo a partir de los valores iniciales suministrados, así como también los valores promedio y totales para la edad de la finca seleccionada, distancia de desplazamiento, costos unitarios, área, cuota anual y rendimiento por período de planificación.

Escenario 2 - Tipo de cosecha

La secuencia óptima obtenida cuando se hizo una diferenciación por método de corta fue distinta a la encontrada para el escenario testigo. En la Tabla II se observa que en los períodos 1, 3, 4 y 7 se incluyen fincas diferentes a las seleccionadas en la secuencia original. Se puede asumir que estos cambios se deben principalmente a las variaciones sobre los costos de cosecha y a las características de cada finca, es decir, al volumen que cada finca puede aportar para cumplir con la cuota anual, debido a que en esos cuatro años los cambios se producen sobre fincas con igual método de cosecha, como en el período 1, donde se indica cortar las fincas 2, 13 y 18, mientras que en el escenario original se indicaba cortar las fincas 5 y 20. Al realizar este cambio durante el primer año del período de planificación, se originan modificaciones en la selección de las fincas a cortar en los siguientes períodos.

En la Tabla III se puede notar que la utilización de dos métodos de cosecha favorece la productividad de las fincas. Los valores promedio de costo total y unitario fueron inferiores para el escenario tipo de cosecha, pero esta situación era prevista debido a la disminución de los costos de cosecha en este escenario. En cuanto a la edad, área de la finca y rendimiento, los valores obtenidos indican que al utilizar dos métodos de cosecha (con los diferentes costos planteados en este trabajo) se puede obtener un mejor aprovechamiento de

TABLA IV
PROMEDIO DE LAS VARIABLES EVALUADAS PARA
EL ESCENARIO ÁREA DE LAS FINCAS

Tasa de interés	Edad (años)	Área (ha)	Diferencia costo total promedio (USD)	Cuota anual (ton)	Costo unitario (USD/ton)	Rendimiento (ton/ha)
0%	8,2	759	0	91664	12,8	102,6
4%	8,2	759	163656	91664	11,1	102,6
8% *	8,2	759	294234	91664	9,63	102,6
10%	8,2	759	349722	91664	9,02	102,6
11%	7,9	752	375405	92016	8,71	104,0
12%	7,9	752	399948	92016	8,44	104,0

* Valor de la tasa de interés utilizado en el escenario testigo
Los valores en sombra corresponden a escenarios donde se producen cambios en la secuencia óptima de corta en relación a la secuencia original (escenario testigo)

los recursos; así por ejemplo en el caso de la edad, el valor promedio fue 0,3 años menor que en el escenario original. En lo que respecta al área de las fincas, la diferencia es de 7,0ha a favor del escenario tipo de cosecha, mientras que la productividad es mejor en este escenario ya que aumenta en aproximadamente 1,7ton·ha⁻¹, cantidad que es considerable tomando en cuenta el área que se cosecha anualmente.

Escenario 3 - Tasa de interés

Al utilizar tasas de interés entre 0 y 10% no se producen cambios sobre la secuencia de corta original, que fue calculada con una tasa de interés de 8%. Con una tasa de interés de 11% ocurren cambios en comparación con la secuencia óptima original. Al igual que en el escenario tipo de cosecha, se puede afirmar que los cambios

obedecen principalmente a las características de cada finca y en este caso también al efecto de la tasa de interés, que provoca la disminución de los costos, debido a que éstos son actualizados al año cero del período de planificación, motivo por el cual se observa una disminución en el costo promedio total en función del aumento de la tasa de interés. Al variar la secuencia se observó también una disminución de la edad promedio de corta y un aumento del rendimiento. En la Tabla IV se presentan los valores de las variables en estudio para las diferentes tasas de interés evaluadas.

Escenarios 4 y 5 - IMA y área de las fincas

Las variables más sensibles para el caso en estudio fueron el IMA y el área de las fincas, ya que con

rangos de variación muy pequeños ($\pm 1\%$) se produjeron cambios en la secuencia de corta. La alta sensibilidad del modelo a estas dos variables se debe a que tienen alta influencia en el valor de cada coeficiente tecnológico, los cuales están sujetos a la restricción impuesta de cuota anual. La combinación de valores altos de cuotas anuales y una cantidad pequeña de lotes para seleccionar cada año implica que pequeños cambios en los coeficientes tecnológicos provocan cambios en la secuencia óptima de corta. En las Tablas V y VI se muestran los valores promedio de las diferentes variables evaluadas obtenidos para el escenario testigo y los escenarios de incremento medio anual (IMA) y área de las fincas.

Escenario 6 - Costo de transporte

Cuando se trabajó con los grupos de transporte 1 y 3 la secuencia óptima de corta no varió hasta aplicar un aumento del 20%; para el grupo de transporte 2 la secuencia óptima varió al disminuir el costo en un 20%. Los grupos 1 y 3 presentaron cambios en la secuencia con una disminución del 6% y el grupo 2 con un aumento del 3% sobre el valor del costo original. Cuando se aumentaron los costos de transporte, el valor más bajo con el cual se alteró la secuencia original lo presentó el grupo 2, que muestra una modificación en la secuencia óptima al aumentar hasta el 3%, pero hay que destacar que 13 de las 20 fincas evaluadas se ubican en este grupo. Por esta razón, es de esperar que un aumento tan pequeño pueda producir estos cambios, en comparación con los otros grupos donde un aumento hasta del 20% no afectó la secuencia. La disminución del 6% en el grupo 1 y el aumento del 3% del grupo 2 podrían traer como consecuencia el mejoramiento de la productividad (Tabla VII). En promedio, la edad se reduce en 0,3 años, el rendimiento aumenta en 1,7ton·ha⁻¹ y el área necesaria es menor en 7,0ha. En cambio, con una disminución del 6% en el grupo de transporte 3 se presenta una situación contradictoria, ya que se esperaba que una disminución en los costos mejorase los resultados; pero en este caso, los valores del área y el rendimiento son menos atractivos que los del escenario testigo.

Conclusiones

La elaboración del modelo Ospino es un avance en el campo de las técnicas cuantitativas para el ma-

TABLA V
PROMEDIO DE LAS VARIABLES EVALUADAS PARA EL ESCENARIO IMA

Escenario	Edad (años)	Área (ha)	Diferencia costo total promedio (USD)	Cuota anual (ton)	Costo Unitario (USD/ton)	Rendimiento (ton/ha)
+1%	8,3	809	4520	90835	9,7	95,4
0% *	8,2	759	0	91664	9,6	102,6
-1%	8,3	808	2174	90181	9,8	94,8

*Escenario testigo. Los valores en sombra corresponden a escenarios donde se producen cambios en la secuencia óptima de corta en relación a la secuencia original (escenario testigo)

TABLA IV
PROMEDIO DE LAS VARIABLES EVALUADAS PARA
DIFERENTES TASAS DE INTERÉS

Escenario	Edad (años)	Área (ha)	Diferencia costo total promedio (USD)	Cuota anual (ton)	Costo unitario (USD/ton)	Rendimiento (ton/ha)
+1%	8,3	817	4237	90835	9,7	94,5
0% *	8,2	759	0	91664	9,6	102,6
-1%	8,3	800	2500	90181	9,8	95,8

*Escenario testigo. Los valores en sombra corresponden a escenarios donde se producen cambios en la secuencia óptima de corta en relación a la secuencia original (escenario testigo)

TABLA VII
PROMEDIO DE LAS VARIABLES EVALUADAS PARA EL ESCENARIO
DE COSTOS DE TRANSPORTE Y EL ESCENARIO TESTIGO

Grupo de transporte	Escenario	Edad (años)	Área (ha)	Diferencia costo total promedio (USD)	Cuota Anual (ton)	Costo Unitario (USD/ton)	Rendimiento (ton/ha)
	Testigo	8,2	759	0	91664	9,6	102,6
1	+20%	8,2	759	-4942	91664	9,7	102,6
	-20%	7,9	752	6579	92016	9,5	104,0
	-10%	7,9	752	3018	92016	9,6	104,0
	-8%	7,9	752	2306	92016	9,6	104,0
	-6%	7,9	752	1593	92016	9	104,0
	-5%	8,2	759	1235	91664	9,6	102,6
2	+20%	8,2	808	-56979	90579	10,4	95,2
	-20%	8,2	759	67566	91664	8,9	102,6
	+5%	7,9	752	-16331	92016	9,8	104,0
	+3%	7,9	752	-10016	92016	9,7	104,0
	+2%	8,2	759	-6757	91664	9,7	102,6
3	+20%	8,2	759	-6316	91664	9,7	102,6
	-20%	8,2	808	14506	90579	9,6	95,2
	-10%	8,2	808	5617	90579	9,7	95,2
	-8%	8,2	808	3840	90579	9,7	95,2
	-6%	8,2	808	2062	90579	9,7	95,2
	-5%	8,2	759	1579	91664	9,6	102,6

Los valores en sombra corresponden a escenarios donde se producen cambios en la secuencia óptima de corta en relación a la secuencia original (escenario testigo).

nejo de plantaciones forestales en Venezuela, ya que hasta el momento no se habían hecho intentos de desarrollar una herramienta de este tipo en el país y la planificación de cosechas, con muy escasas excepciones, se ha venido haciendo de manera empírica. El desarrollo del modelo ha permitido demostrar a empresas y profesionales forestales la potencialidad de estas metodologías para la comprensión de variables e interrelaciones relevantes para la toma de decisiones, que permitan a mejorar la planificación y ejecución de cosechas en plantaciones forestales a gran escala.

Los valores del incremento medio anual y superficie de cada lote fueron las variables más sensibles del modelo en el caso de estudio. Dado que pequeñas variaciones en estas variables originan cambios en la secuencia óptima obtenida, se infiere que es necesario determinar de una forma precisa el valor de las mismas para que las secuencias generadas permitan efectivamente representar el óptimo para la toma de decisiones adecuadas en las operaciones de la empresa.

Los costos de transporte deben ser evaluados independientemente, debido a que todos los grupos no se comportan de igual forma. Por tal razón, se hace necesario que se estimen los costos por grupo y no en forma global, ya que así se puede incurrir en errores que pueden generar secuencias óptimas falsas.

Una de las mayores limitaciones para el uso estos modelos es la falta de información precisa sobre una serie de variables que pueden ser importantes para la determinación de secuencias óptimas de corta.

Recomendaciones

El modelo Ospino debe ser programado bajo un ambiente de base datos que permita el almacenamiento de mayor cantidad de datos y una mayor seguridad.

Al definir los costos de cosecha se debe diferenciar entre los costos de cosecha manual y semi-mecanizada, ya que de acuerdo a lo observado en el escenario tipo de cosecha, al hacer esta consideración los resultados pueden ser diferentes a los obtenidos cuando se toma un costo de cosecha general. Adicionalmente, se recomienda que los costos de cosecha sean calculados para cada finca y no para cada especie, ya que la secuencia óptima puede cambiar en relación con la obtenida inicialmente.

REFERENCIAS

Andalaft N, Andalaft P, Guignard M, Magendzo A, Wainer A, Weintraub A (2003) A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and Lagrangean relaxation. *Oper. Res.* 51: 613-628.

Baskent EZ, Keles S (2006) Developing alternative wood harvesting strategies with linear programming in preparing forest management plans. *Turk. J. Agric. For.* 30: 67-79.

Bell E (1977) Mathematical programming in forestry. *J. For.* 75: 317-319.

Bonini C, Hausman W, Bierman H (2002) *Análisis Cuantitativo para los Negocios*. 9ª ed. McGraw Hill Interamericana. Bogotá, Colombia. 530 pp.

Booch G, Rumbaugh J, Jacobson I (2000) *El Lenguaje Unificado de Modelado*. Addison Wesley Iberoamericana. Madrid, España. 432 pp.

Boylard M (2002) *Simulation and Optimization in Harvest Scheduling Models*. University of British Columbia. Vancouver, Canada. 10 pp.

Bradley GA (1991) Natural resource land management planning using large-scale linear programs: the USDA Forest Service experience with FORPLAN. *Oper. Res.* 39: 13-27.

Buongiorno J, Gilles JK (1987) *Forest Management and Economics. A Primer in Quantitative Methods*. Macmillan. Nueva York, EEUU. 287 pp.

Burger DH, Jamnick MS (1995) Using linear programming to make wood procurement and distribution decisions. *For. Chron.* 71: 89-96.

Curtis F (1962) Linear programming the management of a forest property. *J. For.* 60: 611-616.

Díaz D (2002) *Implementación del Sistema de Programación Lineal ASICAM 2.5 para la Optimización de Operaciones de Transporte Forestal en Terranova de Venezuela*, S.A. Informe. Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 42 pp.

Díaz L, Prieto A (1999) Modelos de planificación forestal basados en la programación lineal. Aplicación al monte "Pinar de Navafría" (Segovia). *Sist. Recur. For.* 8: 63-92.

Epstein R, Serón J, Weintraub A (1999) El uso de sistemas de investigación de operaciones en las industrias forestales chilenas. *Ing. Sist.* 13: 5-31.

García O (1990) Linear programming and related approaches in forest planning. *New Zeal. J. For. Sci.* 20: 307-331.

Karlsson J, Ronnqvist M, Bergström J (2004) An optimization model for annual harvest planning. *Can. J. For. Res.* 34: 1747-1754.

Kidd WE, Thompson EF, Hoepner PH (1966) Forest regulation by linear programming - a case study. *J. For.* 64: 611-613.

Leak WB (1964) Estimating maximum allowable timber yields by linear programming. *USDA Forest Service. Paper NE-17*. 9 pp.

Liittschwager JM, Tchong TH (1967) Solution of a large scale forest scheduling problem by linear programming decomposition. *J. For.* 65: 644-646.

Loucks DP (1964) The development of an optimal program for sustained-yield management. *J. For.* 62: 484-490.

Macmillan C, Fairweather E (1988) An Application of Linear Programming for Short-Term Harvest Scheduling. *North. J. Appl. For.* 5: 145-148.

- Montilva J (1992) *Desarrollo de Sistemas de Información*. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 262 pp.
- Nautiyal JC, Pearse PH (1967) Optimizing the conversion to sustained-yield – a programming solution. *For. Sci.* 13: 131-139.
- Navon D (1971) Timber RAM a long range planning method for commercial timber lands under multiple - use management. *USDA Forest Service. Paper PSW-70*. 22 pp.
- Núñez J (2003) *Modelado de Objetos con UML*. Universidad Politécnica de Valencia, España www.dsic.upv.es/~uml/ (Cons. 05/06/2004).
- Reynolds KM (2005) Integrated decision support for sustainable forest management in the United States: fact or fiction? *Comp. Electr. Agric.* 49: 6-23.
- Rodrigues FL, Leite HG, Santos HN, de Souza AL (2003) Solução de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando Busca Tabu. *Árbore* 27: 701-713.
- Rodrigues FL, Leite HG, Santos HN, de Souza AL, Silva GF (2004 a) Metaheurística algoritmo genético para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. *Árbore* 28: 233-245.
- Rodrigues FL, Leite HG, Santos HN, de Souza AL, Silva GF (2004b) Metaheurística simulada annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. *Árbore* 28: 247-256.
- Rodrigues FL, Silva GF, Leite HG, Santos HN, Xavier AC, Pezzopane JEM (2006) Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento. *Árvore* 30: 769-778.
- Romero C (1989) Modelos de planificación forestal: una aproximación desde el análisis multicriterio. *Rev. Est. Agro-Soc.* 147: 71-92.
- SAS (2004) *SAS/OR 9.1 User's Guide*. SAS Institute Inc. Cary, NC, EEUU. 168 pp.
- Smartwood (2004) *Resumen Público de Certificación de Terranova de Venezuela S.A.* www.rainforest-alliance.org/forestry/documents/terranovafmpubsum04.pdf. (Cons. 20/05/2006).
- Thompson EF, Halterman BG, Lyon TJ, Miller RL (1973) Integrating timber and wildlife management planning. *For. Chron.* 49: 247-250.
- Vincent L (1993) *Métodos Cuantitativos de Planificación Silvicultural*. Tomo I. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 237 pp.
- Ware G, Clutter J (1971) A mathematical programming system for the management of industrial forests. *For. Sci.* 17: 428-445.
- Weintraub A (1975) Modelos matemáticos en planificación forestal. *Ing. Sist.* 1: 39-60.
- Weintraub A, Bare B (1996) New issues in forest land management from an Operations Research perspective. *Interfaces* 26: 9-25.
- Williansom G, Niehuwenhuis M (1993) Integrated timber allocation and transportation in Ireland. *J. For. Eng.* 5: 7-15.

PRELIMINARY HARVEST PLANNING MODEL FOR INDUSTRIAL FOREST PLANTATIONS IN VENEZUELA

Ramón Chiari L., Omar E. Carrero G., Mauricio Jerez, María Alejandra Quintero M. and Jurgen Stock

SUMMARY

A preliminary harvest planning model was developed for pulpwood forest plantations in order to obtain optimal harvest sequences that minimize operation costs. The primary target was to identify the relative importance of the technical and financial factors considered to influence the determination of optimal harvest sequences on a forest plantation system that includes stands with a range of species, ages, area and accessibility. The model, called "Ospino", was developed under the principles of binary integer programming. Optimal harvest sequences were generated under different scenarios based on an actual case. The scenarios included the planning of harvest sequences for up to 300 stands simultaneously during a plan-

ning term of seven years. The results were evaluated on the basis of age at harvest, pulpwood yield, annual cutting area, annual volume requirements, and unitary and total costs. Under the model assumptions the factors that influenced more markedly the determination of the optimal sequences were the estimated mean annual volume increment ($m^3 \cdot ha^{-1}$ per year) and the measured area for each stand (ha). The Ospino model is one of the first attempts in Venezuela to develop a system for harvest planning based on mathematical programming techniques adapted to the conditions of plantation forest management in the country.

MODELO PRELIMINAR PARA A PLANIFICAÇÃO DO APROVEITAMENTO EM PLANTAÇÕES FLORESTAIS INDUSTRIAIS NA VENEZUELA

Ramón Chiari L., Omar E. Carrero G., Mauricio Jerez, María Alejandra Quintero M. e Jurgen Stock

RESUMO

Desenvolveu-se um modelo preliminar para a planificação das atividades de desbaste nos plantações florestais para a produção de polpa, o qual permite obter seqüências ótimas de corta que minimizam os custos totais de desbaste. O objetivo principal foi identificar a importância relativa dos fatores técnicos e financeiros considerados têm na determinação das seqüências ótimas de corta num sistema de plantações florestais composto por stands de diferentes espécies, idades, extensão e acessibilidade. O modelo chamado "Ospino" foi concebido baixo os princípios da programação inteira binária. Geraram-se seqüências ótimas de corta com ate 300 stands simultaneamente por um período de planejamento de sete anos y os

resultados foram avaliados em função da idade de corta, rendimento em polpa, superfície a cortar por ano, quota anual a cumprir, custos unitários e totais. Baixo os supostos do modelo encontrou-se que os fatores que mais influenciam num planejamento ótimo do desbaste foram o incremento médio anual volumétrico ($m^3 \cdot ha^{-1}$ por ano) estimado para as plantações e a superfície (ha) dos stands. O modelo Ospino e um dos primeiros intentos na Venezuela para desenvolver um sistema de otimização dos desbastes baseado nas técnicas da programação matemático adaptado as condições de manejo florestal de plantações no paese.