



# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

**Rafael Caballero**  
**Universidad de Málaga**

**Valladolid, 30 de marzo de 2017**



# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

**Amparo León**  
**Trinidad Gómez**  
**Mónica Hernández**  
**Julián Molina**  
**Rafael Caballero**

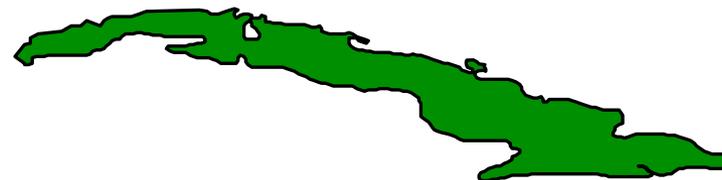
**Valladolid, 30 de marzo de 2017**

## ÍNDICE

- **Introducción**
- **Modelo Lineal**
- **Modelo Fraccional**
- **Modelo no Lineal**
- **Eficiencia**
- **Conclusiones**

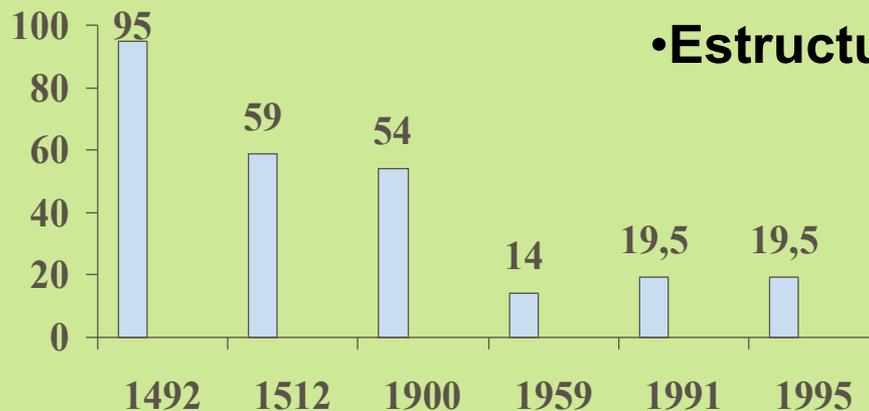
## INTRODUCCIÓN

La ordenación y planificación de una plantación pura de *Pinus Caribaea* mediante un modelo de Programación por Metas



**REALIDAD BAJO ESTUDIO:**

- Explotación indiscriminada en el pasado
- Estructura de edades en desequilibrio



# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

*Unidad Silvícola San Juan y Martínez de la Empresa Forestal Integral Pinar del Río (Cuba)*

I  
N  
T  
R  
O  
D  
U  
C  
C  
I  
Ó  
N

<i>Clases de edad</i>		<i>Area (ha.)</i>				
Clase	Años	Indice de Sitio				Total
		1	2	3	4	
1	0-5	0,0	32,2	33,5	30,6	96,3
2	6-10	0,0	344,6	236,8	78,9	660,3
3	11-15	198,0	405,9	266,7	130,5	1001,1
4	16-20	188,0	79,0	102,0	174,4	543,4
5	21-25	83,2	759,6	692,4	148,0	1683,2
	Total	469,2	1621,3	1331,4	562,4	3984,3

Talar en la edad del turno 

**Hoy: 267.101,44 m<sup>3</sup>**

**En cuatro quinquenios: 19.898 m<sup>3</sup>  
(7,22% de los ingresos actuales)**

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

**Objetivo:** *Alcanzar un bosque equilibrado por edades al finalizar la planificación, sin olvidar los roles fundamentales del bosque (económico, ecológico,...)*

## Objetivos/Premisas para la modelización:

- ✓ *La producción de madera debe ser tal que no se degrade el bosque, para cada unidad de tiempo (periodos,  $p$ ) en que se divide el horizonte temporal ( $T$ ).*
- ✓ *El área cubierta por cada clase de edad debe ser aproximadamente la misma al finalizar el horizonte de planificación.*
- ✓ *Evitar, siempre que sea posible, aplicar tala rasa en edades tempranas.*
- ✓ *El Valor Actualizado Neto (VAN) debe superar ciertos umbrales a lo largo de la planificación.*



# Modelo Lineal

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## MODELO LINEAL (M.L.)

Situación Inicial  $S^0$

$$S^0 = \begin{pmatrix} s_{11}^0 & s_{12}^0 & \dots & s_{1I}^0 \\ s_{21}^0 & s_{22}^0 & \dots & s_{2I}^0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{H1}^0 & s_{H2}^0 & \dots & s_{HI}^0 \\ S_{*1}^0 & S_{*2}^0 & \dots & S_{*I}^0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \longrightarrow S_{1-}^0 \\ \longrightarrow S_{2-}^0 \\ \dots \\ \longrightarrow S_{H-}^0 \end{matrix} \quad \dots \quad S^p = (S_{hi}^p)$$

### Variables de Decisión:

$x_{hijp}$ : Hectáreas del índice de sitio  $h$  ( $h=1,2,\dots, H$ ), clase de edad  $i$  ( $i=1,2,\dots, I$ ), que reciben el tratamiento  $j$  ( $j=1,2,\dots, J$ ), en el periodo  $p$  ( $p=1,2,\dots, P$ ).

$$N = \{(i, j) / \text{tratamiento } j, \text{ clase de edad } i\}$$

$$N(i) = \{j / (i, j) \in N(i)\}$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## Evolución temporal:

$$S_{h1}^p = \sum_{i=1}^I x_{hiJp}$$

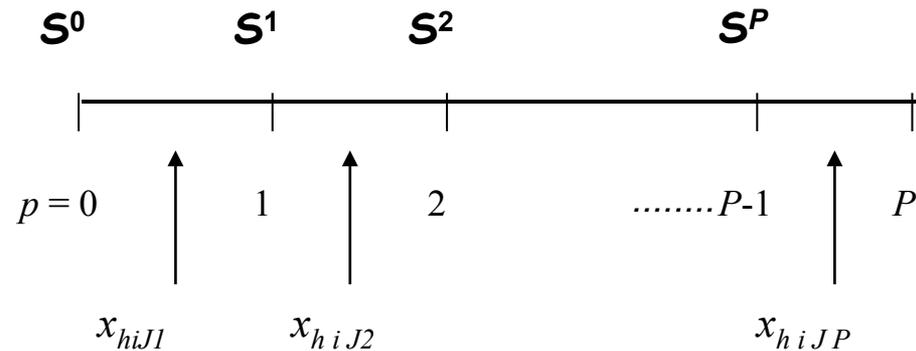
$$S_{h2}^p = S_{h1}^{p-1} - x_{h1Jp}$$

.....

$$S_{hi}^p = S_{h(i-1)}^{(p-1)} - x_{h(i-1)Jp}$$

.....

$$S_{hI}^p = S_{h(I-1)}^{(p-1)} - x_{h(I-1)Jp} + S_{hI}^{(p-1)} - x_{hIJp}$$



# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## RESTRICCIONES por periodo $p$ ( $p = 1, 2, \dots, P$ ):

M  
O  
D  
E  
L  
O

- *Disponibilidad por clase de edad e índice de sitio:*

$$\sum_{j \in N(i)} x_{hi j p} \leq S_{hi}^{(p-1)} \quad h = 1, 2, \dots, H; \quad i = 1, \dots, I$$

- *Disponibilidad por clase de edad:*

$$\sum_{h=1}^H \sum_{j \in N(i)} x_{hi j p} \leq S_{*i}^{(p-1)} \quad i = 1, \dots, I$$

- *Disponibilidad por índice de sitio:*

$$\sum_{(i,j) \in N} x_{hi j p} \leq S_{h-}^{(p-1)} \quad h = 1, \dots, H$$

L  
I  
N  
E  
A  
L

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

M  
O  
D  
E  
L  
O

- *Control del límite inferior de la superficie de tala:*

$$\sum_{i=1}^I x_{hiJp} \geq 0,9Se_h^p \quad h = 1,2,\dots,H$$

L  
I  
N  
E  
A  
L

- *Control del límite inferior del VAN :*

$$\sum_{h=1}^H \sum_{(i,j) \in N} VAN_{hijp} x_{hijp} \geq 0,9VAN^p$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

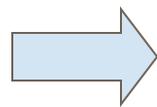
## METAS del periodo $p$ ( $p = 1, 2, \dots, P$ ):

- *Nivel 1: Metas para la conservación de la superficie de equilibrio*

$$\sum_{i=1}^I x_{hiJp} \leq Se_h^p \quad h = 1, \dots, H \quad \begin{array}{l} H \text{ metas} \\ \text{(por periodo)} \end{array}$$

$Se_h^p$  : Superficie a regenerar de equilibrio, índice de sitio  $h$ , periodo  $p$

(Q<sub>1</sub>): 
$$\sum_{i=1}^I x_{hiJp} + n_{1hp} - p_{1hp} = Se_h^p \quad h = 1, \dots, H$$



Variable de  
desviación no  
deseada:

$$\sum_{h=1}^H p_{1hp}$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

M  
O  
D  
E  
L  
O

L  
I  
N  
E  
A  
L

## ■ Nivel 2: Control de volumen

$$\sum_{h=1}^H \sum_{(i,j) \in N} v_{hijp} x_{hijp} \leq V_p$$

1 meta  
(por periodo)

$v_{hijp}$ : Volumen por hectárea cosechada en índice  $h$ , edad  $i$ , tratamiento  $j$  y periodo  $p$ .

$V_p$ : Volumen cosechable en periodo  $p$ .

$$(Q_2): \sum_{h=1}^H \sum_{(i,j) \in N} v_{hijp} x_{hijp} + n_2^p - p_2^p = V_p \quad \Rightarrow \quad p_{2p}$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

- *Niveles 3 y 4: Control de la edad de tala rasa*

**(Q<sub>3</sub>):** 
$$\sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{I-2} x_{hiJp} + n_{3p} - p_{3p} = 0 \quad \Rightarrow \quad p_{3p} \quad \begin{array}{l} 1 \text{ meta} \\ \text{(por periodo)} \end{array}$$
  
No talar por debajo de clase edad I-2

**(Q<sub>4</sub>):** 
$$\sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{I-1} x_{hiJp} + n_{4p} - p_{4p} = 0 \quad \Rightarrow \quad p_{4p} \quad \begin{array}{l} 1 \text{ meta} \\ \text{(por periodo)} \end{array}$$
  
No talar por debajo de clase edad I-1

- *Nivel 5: Valor Actualizado Neto*

$$\sum_{h=1}^H \sum_{(i,j) \in N} VAN_{hijp} x_{hijp} \geq VAN^p \quad \begin{array}{l} 1 \text{ meta} \\ \text{(por periodo)} \end{array}$$

**(Q<sub>5</sub>):** 
$$\sum_{h=1}^H \sum_{(i,j) \in N} VAN_{hijp} x_{hijp} + n_{5p} - p_{5p} = VAN^p \quad \Rightarrow \quad n_{5p}$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

M  
O  
D  
E  
L  
O  
  
L  
I  
N  
E  
A  
L

$$\text{Lexmin} (h^1, \dots, h^P) =$$
$$= \left( \left\{ \sum_{h=1}^H p_{1h1}, p_{21}, p_{31}, p_{41}, n_{51} \right\}, \dots, \left\{ \sum_{h=1}^H p_{1hp}, p_{2p}, p_{3p}, p_{4p}, n_{5p} \right\} \right)$$

**Sujeto a:**

*Restricciones*

*Metas*

$$x_{hijp} \geq 0 \quad h = 1, \dots, H; i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; p = 1, \dots, P$$

$$n_{1h}^p, p_{1h}^p, n_2^p, p_2^p, n_3^p, p_3^p, n_4^p, p_4^p, n_5^p, p_5^p \geq 0$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## DATOS

Unidad “*San Juan y Martínez*”: 3.984.3 ha.

$H = 4$ ,  $I = 5$ ,  $j = 1,2,3,4$ ,  $T = 25$ ,  $P = 5$ .

$$S_{*i}^0 = (96,3 \quad 660,3 \quad 1001,1 \quad 543,4 \quad 1683,2)$$

$$S_{h*}^0 = (469,2 \quad 1621,3 \quad 1331,4 \quad 562,4)$$

$$V_p = 138.328 \text{ m}^3, \quad VAN_{1,2} = 790.000, \quad VAN_{3,4,5} = 760.000$$

$$Se_h^p = Se_h^0 = \frac{5}{25} S_h^0 \quad h = 1,2,3,4$$

**160 variables de decisión**

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## Muestra de Soluciones M.L.:

Total superficie talada y VAN obtenido en las soluciones del modelo lineal:

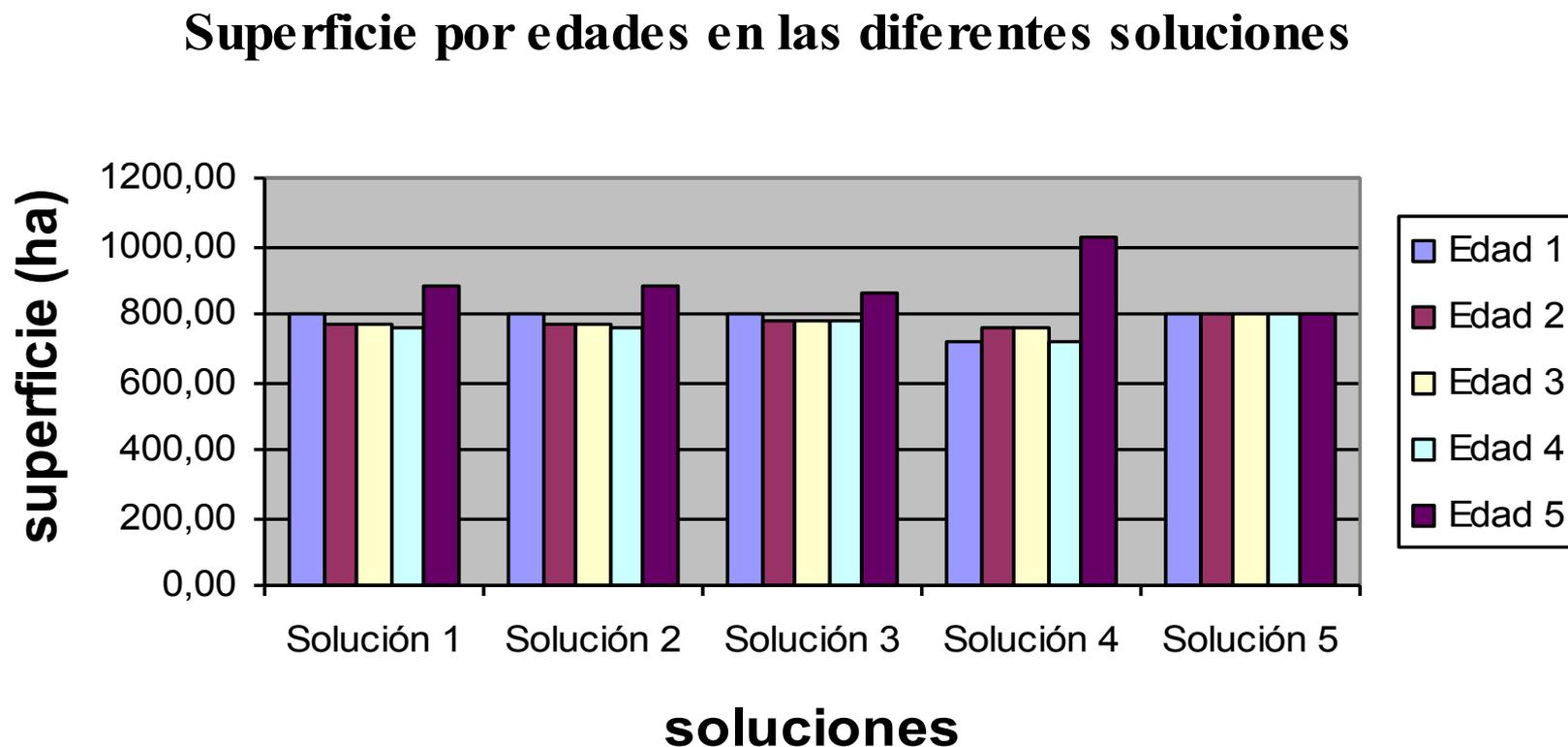
Solución	Solución Equilibrada	VAN total (Pesos)
<b>1</b>	<b>No</b>	<b>4.046.854</b>
<b>2</b>	<b>No</b>	<b>4.051.451</b>
<b>3</b>	<b>No</b>	<b>4.032.764</b>
<b>4</b>	<b>No</b>	<b>4.141.592</b>
<b>5</b>	<b>Sí</b>	<b>3.960.636</b>

M  
O  
D  
E  
L  
O

L  
I  
N  
E  
A  
L

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

Superficie por edad al finalizar el horizonte de planificación:



**Problema:** No todas las soluciones están equilibradas.



# Modelo Fraccional

## MODELO FRACCIONAL (M.F.)

**Objetivo:** Modificar la modelización para obtener soluciones que verifiquen los niveles de aspiración y sean equilibradas

- *Nivel de prioridad 1: Metas para la superficie de equilibrio*
- *Nivel de prioridad 2: Metas para control de volumen*
- ***Nivel de prioridad 3: Meta fraccional para lograr el equilibrio de edades.***
- *Nivel de prioridad 4: Metas para el control de la edad de tala (No talar por debajo de clase edad I-2)*
- *Nivel de prioridad 5: Metas para el control del VAN*

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## Nueva restricción:

- *Control de la cota superior de la superficie disponible a talar en el grupo de edad I-1:*

$$x_{h(I-1)J}^p \leq \alpha S_{h(I-1)}^{(p-1)} \quad h = 1, 2, \dots, H;$$
$$p = 1, 2, \dots, P$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## MODELO FRACCIONAL (M.F.)

- *Nivel 3: Alcanzar una estructura equilibrada por grupos de edad*



**Meta Fraccional:** Estabilización del ratio entre el grupo de edad 1 y el grupo de edad  $I$

$$\frac{S_1^p}{S_I^p} \cong \frac{1}{P} p \quad \text{donde:} \quad \left\{ \begin{array}{l} S_1^p = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I x_{hiJp} \\ S_I^p = \sum_{h=1}^H (S_{h(I-1)}^{(p-1)} - x_{h(I-1)Jp} + S_{hI}^{(p-1)} - x_{hIJp}) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{1 meta} \\ \text{(por periodo)} \end{array}$$

(Q<sub>3</sub>):  $\frac{S_1^p}{S_I^p} + n_{3p} - p_{3p} = \frac{1}{P} p \quad \Rightarrow \quad n_{3p}$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

M  
O  
D  
E  
L  
O

F  
R  
A  
C  
C  
I  
O  
N  
A  
L

## Meta Fraccional: Cómo Resolver

$$\frac{f_i(x)}{g_i(x)} \geq u_i \quad i = 1, \dots, k$$
$$x \in X$$

$$\min \quad h(n_i, p_i)$$

$$s.a \quad Ax \leq b$$

$$\frac{f_i(x)}{g_i(x)} + n_i - p_i = u_i \quad i = 1, \dots, k$$

$$x, n_i, p_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, k$$

(P1)

**La dificultad:** Restricciones no lineales debidas a las funciones objetivo.

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

M  
O  
D  
E  
L  
O

F  
R  
A  
C  
C  
I  
O  
N  
A  
L

$$\min h(n_i', p_i')$$

$$s.a \quad x \in X$$

(P2)

$$f_i(x) - g_i(x) \cdot u_i + n_i' - p_i' = 0$$

$$n_i', p_i' \geq 0 \quad i = 1, \dots, k$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

$$\mathbf{Lexmin} \left( h^1, \dots, h^P \right) =$$

$$= \left( \left\{ \sum_{h=1}^H p_{1h1}, p_{21}, n_{31}, p_{41}, n_{51} \right\}, \dots, \left\{ \sum_{h=1}^H p_{1hp}, p_{2p}, n_{3p}, p_{4p}, n_{5p} \right\} \right)$$

**Sujeto a:**

*Restricciones*

*Metas*

$$x_{hijp} \geq 0 \quad h = 1, \dots, H; i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J, p = 1, \dots, P$$

$$n_{1h}^p, p_{1h}^p, n_2^p, p_2^p, n_3^p, p_3^p, n_4^p, p_4^p, n_5^p, p_5^p \geq 0$$

**Proposición:** Todas las soluciones que verifican los niveles de aspiración del modelo (fraccional) propuesto alcanzan una distribución equilibrada de grupos de edad al final del horizonte

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## DATOS

Unidad “*San Juan y Martínez*”: 3.984.3 ha.

$H = 4$ ,  $I = 5$ ,  $j = 1,2,3,4$ ,  $T = 25$ ,  $P = 5$ .

$$S_i^0 = (96,3 \quad 660,3 \quad 1001,1 \quad 543,4 \quad 1683,2)$$

$$S_h^0 = (469,2 \quad 1621,3 \quad 1331,4 \quad 562,4)$$

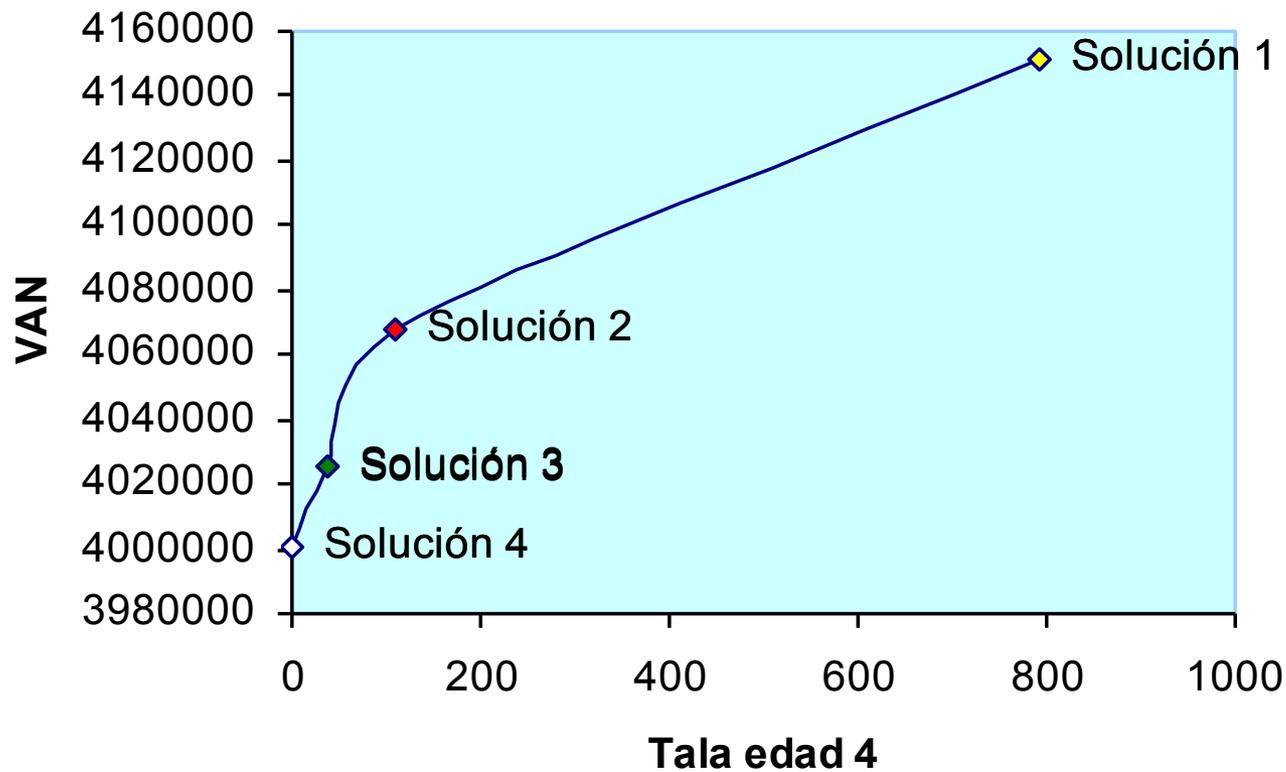
$$V_p = 138.328 \text{ m}^3, \quad VAN_{1,2} = 790.000, \quad VAN_{3,4,5} = 760.000$$

$$Se_h^p = Se_h^0 = \frac{5}{25} S_h^0 \quad h = 1,2,3,4$$

**160 variables de decisión**

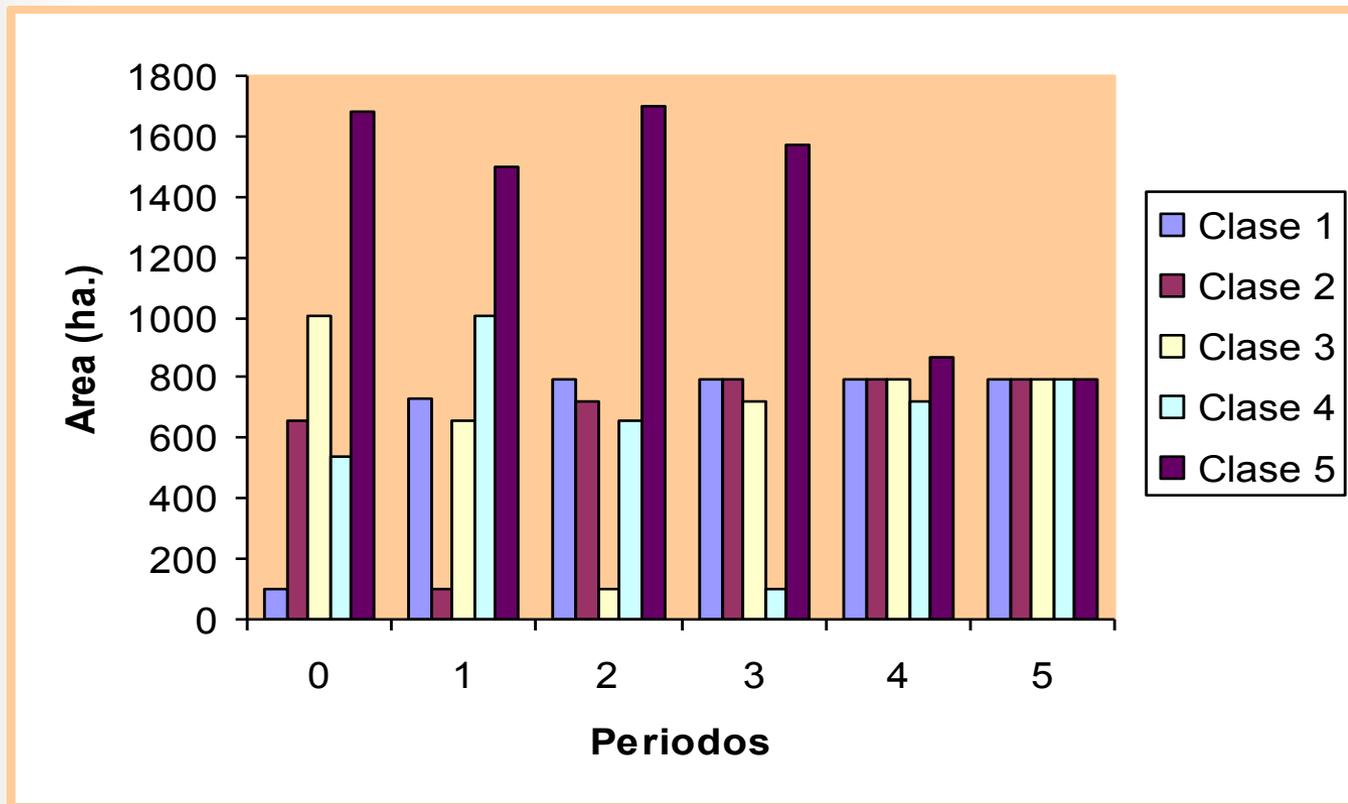
# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## Comparación de soluciones MF:



# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## Hectáreas de cada clase de edad por periodos:





Modelo Entero Mixto

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## MODELO ENTERO MIXTO (M.E.M.)

### OTRO MARCO DE ESTUDIO:

Empresa Forestal Integral Macurije (Minadora)

3.347,7 ha. de *Pinus Caribaea*

Planificación por bloques: 305 bloques

<i>Superficie(ha.)</i>	<i>Índice de Sitio</i>				
<i>Years</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>Total</i>
<i>0-5</i>	9.1	0	0	54.2	<b>63.3</b>
<i>6-10</i>	55.7	54.8	72.2	0	<b>182.7</b>
<i>11-15</i>	4.6	21.4	0	0	<b>26</b>
<i>16-20</i>	0	30.6	12.0	0	<b>42.6</b>
<i>21-25</i>	14.4	412.9	142	12.2	<b>581.5</b>
<i>&gt; 25</i>	93.9	1495.6	676.5	185.6	<b>2451.6</b>
<b>Total</b>	<b>177.7</b>	<b>2015.3</b>	<b>902.7</b>	<b>252.0</b>	<b>3,347.7</b>

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## *Planificación por bloques*



**Variables binarias:**

$$x_r = \begin{cases} 1 & \text{si el bloque } r \text{ se } tala \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

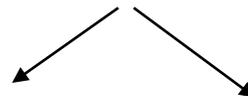


**Protección medioambiental**

**Limitar el área contigua a talar,  $S^*$  ha.**

(maximum opening size)

### *Restricciones de adyacencia*



**URM (Unit Restriction Model):**  
*Dos bloques adyacentes no se pueden talar*

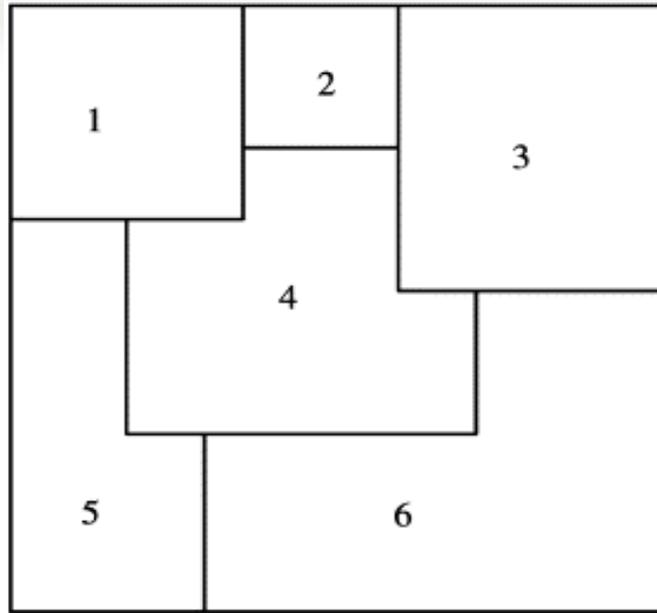
**ARM (Area Restriction Model):**  
*Dos bloques adyacentes se pueden talar siempre que no superen  $S^*$  ha.*

**Unidades con extensión apropiadas. Bloques definidos a priori**

**Unidades de manejo sustancialmente más pequeñas que  $S^*$ . Bloques definidos a posteriori**

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

M  
O  
D  
E  
L  
O  
  
N  
O  
  
L  
I  
N  
E  
A  
L



**URM (Unit Restriction Model):**

$$x_1 + x_2 \leq 1$$

$$x_1 + x_5 \leq 1$$

$$x_1 + x_4 \leq 1$$

$$x_i + x_j \leq 1 \quad i, j \text{ adyacentes}$$

**ARM (Area Restriction Model):**

grupos de adyacencias,  $C_1, C_2, \dots, C_K$

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq 2$$

$$\sum_{r \in C_k} x_r \leq |C_k| - 1 \quad k = 1, 2, \dots, K;$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

Problemas de adyacencia

*Modelo URM*

algoritmos  
exactos

*Modelo ARM*

*(maximum opening size)*

algoritmos metaheurísticos

M  
O  
D  
E  
L  
O  
  
N  
O  
  
L  
I  
N  
E  
A  
L

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## *Consideraciones previas*

✓ Un bosque  $F$  dividido en diferentes unidades (bloques) ( $r = 1, 2, \dots, R$ )

$$r \cap s = \phi, \quad \forall r, s, \dots, R / r \neq s, \quad \bigcup_{r=1}^R r \subseteq F$$

✓  $S(r)$  = superficie del bloque  $r$  ( $r = 1, 2, \dots, R$ ) medida en hectáreas.

✓  $E(r, t)$  = edad del bloque  $r$  (expresada en años) en el momento “ $t$ ” de la planificación.  $E(r, t) = 1, 2, \dots, N$  (edad idónea de tala rasa  $N^* < N$ ).

✓  $IS(r)$  = índice de sitio del bloque  $r$ .  $IS(r) = 1, 2, \dots, H$ .

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

- ✓  $K$  grupos de adyacencias,  $C_1, C_2, \dots, C_K$ ,
- cada  $C_i$  está compuesto por dos o mas bloques contiguos
- $C_i$  son bloques contiguos cuya superficie unida supera el umbral permitido  $S^*$  ( maximum opening size)

## Variables de Decisión:

$$x_{rjt} = \begin{cases} 1 & \text{si al bloque } r \text{ se le aplica tratamiento } j \text{ en el año } t \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

El subíndice  $j$  depende de  $E(r, t)$ :

$$A(E(r, t)) = \{j / j \text{ es el tratamiento asociado a } E(r, t)\}$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## Evolución temporal:

$$E(r, t) = (E(r, t - 1) + 1)(1 - x_{rJt}) + x_{rJt}$$

## RESTRICCIONES por año $t$ ( $t = 1, 2, \dots, T$ ):

- *Un bloque ya talado no se puede volver a talar hasta que hayan transcurrido  $\eta$  años :*

$$\sum_{s=t}^{t+\eta} x_{rJs} \leq 1 \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad t = 1, 2, \dots, T - \eta$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

- *No se pueden talar simultáneamente bloques de un mismo conjunto de adyacencias hasta que hayan pasado  $g$  años :*

$$\sum_{r \in C_k} \sum_{s=t}^{t+g-1} x_{rJs} \leq |C_k| - 1 \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad t = 1, 2, \dots, T - g$$

- *Restricciones relativas a los tratamientos :*

$$x_{rjt} = 0 \quad \text{si} \quad j \notin A(E(r, t))$$

- *Cotas inferiores para la superficie talada y el VAN :*

$$\sum_{r=1}^R S(r) x_{rJt} \geq \tau S e^t \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j \in A(E(r, t))} NPV_{rjt} x_{rjt} \geq \mu NPV^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad 0 \leq \mu \leq 1$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## METAS del año $t$ ( $t = 1, 2, \dots, T$ ):

- *Nivel 1: Metas para la conservación de la superficie de equilibrio ( $Se^t$ ) (igual que en los modelos anteriores):*

$$\sum_{r=1}^R S(r)x_{rJt} + n_1^t - p_1^t = Se^t$$

$$f^1 = \sum_{t=1}^T p_1^t$$

- *Nivel 2: Control de volumen*

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j \in A(E(r,t))} v_{rjt} x_{rjt} + n_2^t - p_2^t = V^t$$

$$f^2 = \sum_{t=1}^T p_2^t$$

- *Nivel 3 : No talar árboles jóvenes*

$$\sum_{r / E(r,t-1) < n^*} (S(r)x_{rJt}) + n_3^t - p_3^t = 0$$

$$f^3 = \sum_{t=1}^T p_3^t$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

- *Nivel 4 : Alcanzar una estructura equilibrada por grupos de edad (a definir, adaptando la de M.F.):*

$$\frac{S_1^t}{S_I^t} + n_4^t - p_4^t = \frac{t}{T}$$

$$f^4 = \sum_{t=1}^T n_4^t$$

Superficie de clase de edad  $i$ :

$$S_i^t = \sum_{r / E(r,t)=im}^{E(r,t)=im} S(r) \quad i = 1, 2, \dots, I - 1$$

$$S_I^t = \sum_{r / E(r,t) > N^* - m} S(r)$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

- *Nivel 5 : Reducir de forma progresiva el número de rodales maduros (meta no lineal):*

$$\sum_{r/E(r,t) > N^*} (S(r)(1 - x_{rjt}) + n_5^t - p_5^t) = \alpha \left(1 - \frac{t}{T}\right) \left(\sum_{r/E(r,t-1) > N^*} S(r)\right) \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$f^5 = \sum_{t=1}^T p_5^t$$

- *Nivel 6 : Superar un cierto umbral para el VAN*

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j \in A(E(r,t))} NPV_{rjt} x_{rjt} + n_6^t - p_6^t = NPV^t$$

$$f^6 = \sum_{t=1}^T n_6^t$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

M  
O  
D  
E  
L  
O  
  
N  
O  
  
L  
I  
N  
E  
A  
L

$$\textit{Lexmin} \quad \left\{ \sum_{t=1}^T p_1^t, \sum_{t=1}^T p_2^t, \sum_{t=1}^T p_3^t, \sum_{t=1}^T n_4^t, \sum_{t=1}^T p_5^t, \sum_{t=1}^T n_6^t \right\}$$

Sujeto a:

*Restricciones*

*Metas*

$$x_{rjt} \in \{0, 1\} \quad r = 1, \dots, R; j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T$$

$$n_1^t, p_1^t, n_2^t, p_2^t, n_3^t, p_3^t, n_4^t, p_4^t, n_5^t, p_5^t, n_6^t, p_6^t \geq 0 \quad t = 1, \dots, T$$

**Proposición:** Todas las soluciones que verifican los niveles de aspiración del modelo (no lineal binario) propuesto alcanzan una distribución equilibrada de grupos de edad al final del horizonte

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## DATOS

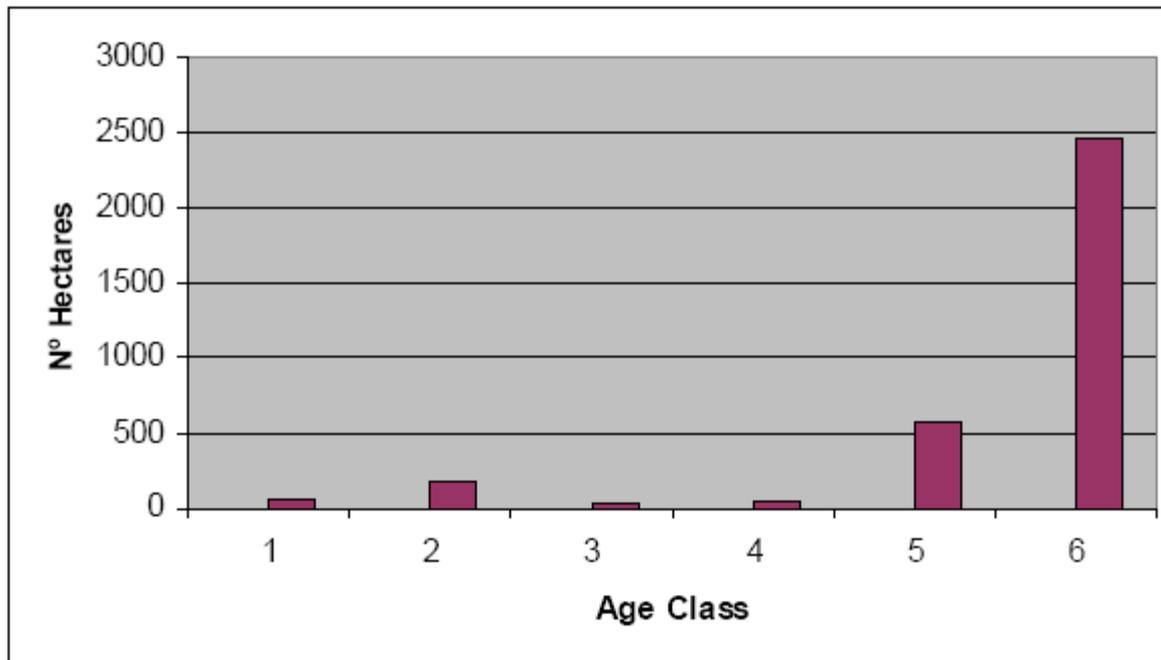
*Empresa Forestal Integral (EFI) Macurije*  
*Unidad de manejo “Minadora”*

- ✓ 3 347.7 ha de *pinus caribaea*
- ✓ 305 bloques (rodales)
- ✓ Edad de rotación 30 años ( $N^*=30$ )
- ✓ Índices de sitio 4 ( $H=4$ )
- ✓ 103 conjuntos adyacentes
- ✓ 4 Tratamientos posibles
- ✓ 36600 variables de decisión binarias
- ✓  $\eta, g, \tau, \mu$ , definidos por el centro decisor

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

M  
O  
D  
E  
L  
O  
  
N  
O  
  
L  
I  
N  
E  
A  
L

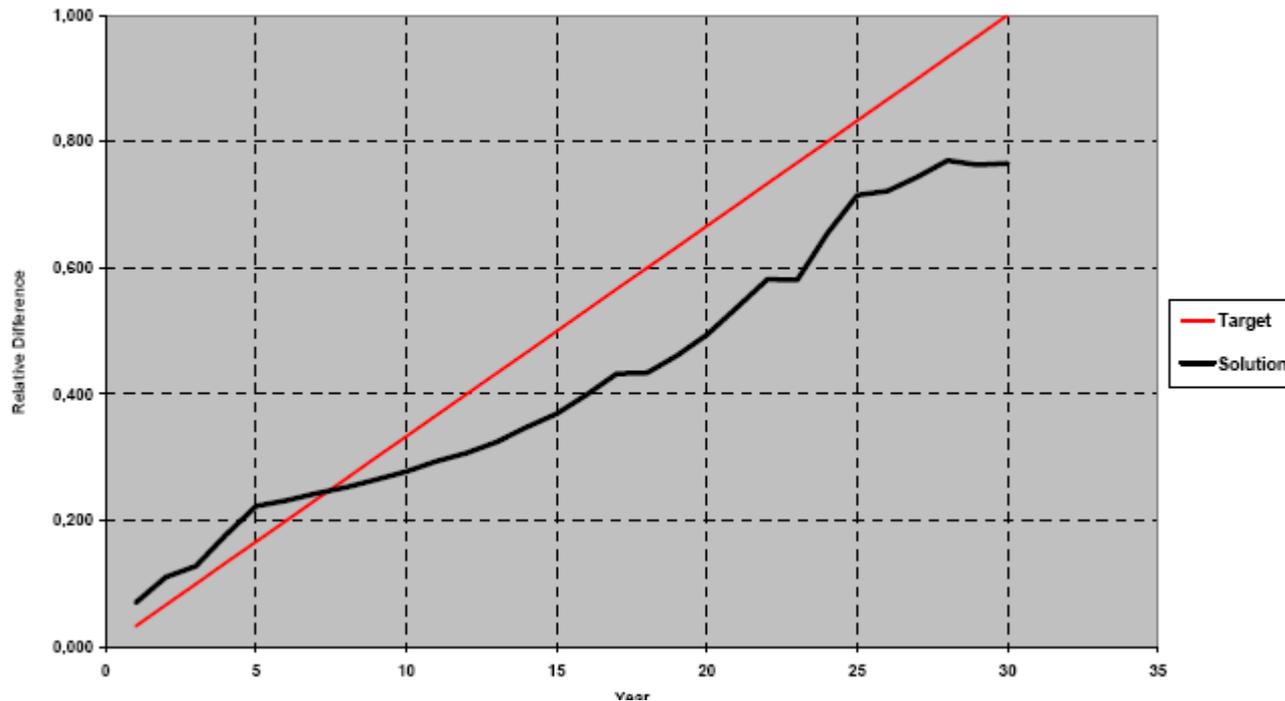
## *Área por clases de edad inicial*



# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

MODELO  
NO  
LINEAL

*Diferencia relativa entre el área cubierta por rodales del primer y último grupo de edad*



# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

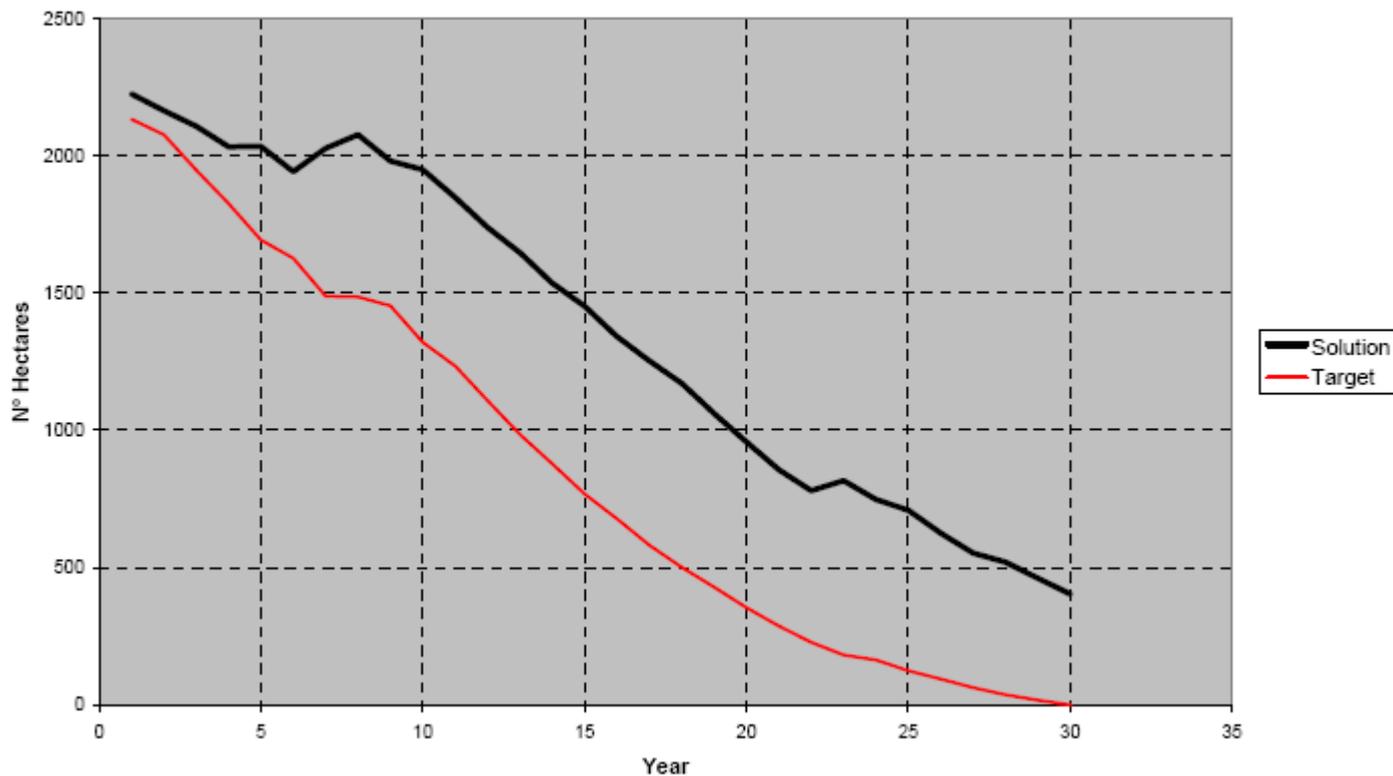
## *Área por clase de edad final*



# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

M  
O  
D  
E  
L  
O  
  
N  
O  
  
L  
I  
N  
E  
A  
L

## Superficie ocupada por rodales mayores de 30 años

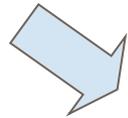


# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

## Nueva meta:

- *Nivel 7: El carbono neto acumulado en la plantación ha de superar un cierto umbral  $C$  (una meta para todo el horizonte temporal)*

$$\sum_{r=1}^R \gamma (v_{rJT} - v_{rJ0}) + \sum_{t=1}^T \gamma \left( \sum_{r=1}^R \sum_{j \in A(E(r,t))} x_{rjt} v_{rjt} (1 - \beta_{rjt}) \right) + n_7 - p_7 = C$$



$$f^7 = n_7$$

$\gamma$ : proporción de carbono fijado en la biomasa.

$\beta_{rjt}$ : proporción del carbono fijado que es emitido a la atmósfera durante el tratamiento  $j$  a la unidad  $r$  en el año  $t$ .

$C$ : Nivel de aspiración para el carbono neto acumulado.

## PROBLEMA A RESOLVER

$$\text{LexMin } f = (f^1, \dots, f^7)$$

Sujeto a: *Restricciones*  
*Metas*

$$x_{rjt} \in \{0, 1\} \quad r = 1, \dots, R; j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T$$

$$n_1^t, p_1^t, n_2^t, p_2^t, n_3^t, p_3^t, n_4^t, p_4^t, n_5^t, p_5^t, n_6^t, p_6^t, n_7, p_7 \geq 0 \quad t = 1, \dots, T$$

*Se sigue verificando que las soluciones factibles que satisfacen las metas conllevan una **distribución equilibrada** de la plantación por grupos de edad.*

## APLICACIÓN

**Datos:** *Empresa Forestal Integral “Macurije”*: 3,347.7 ha.

$$R = 305, K = 103, H = 4, J = 4, T = 30, N^* = 30$$

**Niveles de Aspiración:**

$$Se^t = Se^0 = \frac{1}{30} 3,347.7 = 111.6 \text{ ha.}$$

$$V^t = 34,869 \text{ m}^3$$

$$NPV^t = 124,000 \text{ pesos}$$

$$C = 319,408 \text{ tons}$$

**Parámetros en las metas:**

$$n^* = 15, m = 5$$

**Parámetros restricciones:**

$$\eta = 20, g = 1, \tau = 0.75, \mu = 0.5$$

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

M  
O  
D  
E  
L  
O

$f^1$	$f^2$	$f^3$	$f^4$	$f^5$	$f^6$	$f^7$
0	0	0	2.3526	14,318	663,748	60,291

N  
O

L  
I  
N  
E  
A  
L

*f1: Conservación superficie equilibrio*

*f2: Control volumen*

*f3: No talar árboles jóvenes*

*f4: Alcanzar una distribución equilibrada*

*f5 : Reducir árboles viejos (has.)*

*f6: Valor presente neto(cuban pesos)*

*f7: Carbono neto capturado(tons.)*

**Metas que se alcanzan**

# Planificación Forestal bajo criterios múltiples



## EFICIENCIA

Las metas logradas se incorporan a las restricciones

Las metas no alcanzadas se transforman en objetivos a optimizar

## EFICIENCIA: PROBLEMA A RESOLVER

$$\text{Max } f_1 = \frac{S_1^T}{S_I^T}$$

$$\text{Min } f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{r/E(r,t) > N^*} (S(r)(E(r,t) - N^*))$$

$$\text{Max } f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R \sum_{j \in A(E(r,t))} NPV_{rjt} x_{rjt}$$

$$\text{Max } f_4 = \sum_{r=1}^R \gamma(v_{rJT} - v_{rJ0}) + \sum_{t=1}^T \gamma \left( \sum_{r=1}^R \sum_{j \in A(E(r,t))} x_{rjt} v_{rjt} (1 - \beta_{rjt}) \right)$$



## Resultados

**Datos:** “Macurije”: 3.347,7 ha.

$$R = 305, K = 103,$$

$$H = 4, J = 4, T = 30, N^* = 30, n^* = 20, m = 5$$

**Cotas:**

$$Se^t = Se^0 = \frac{1}{30} 3347.7 = 111.6 \text{ ha.}$$

$$V_t = 34,869 \text{ m}^3$$

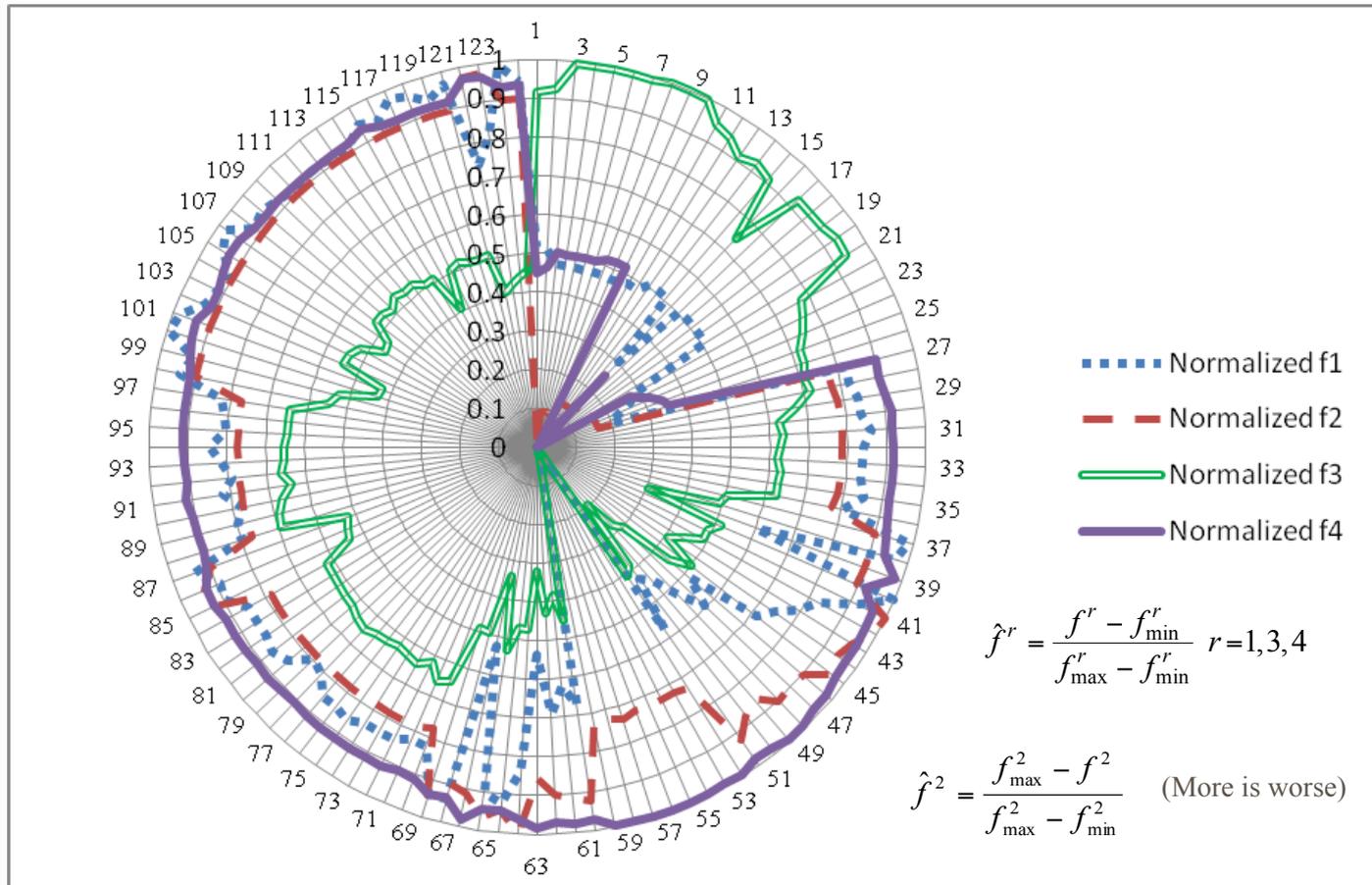
**Parámetros:**  $\eta = 20, g = 1, \tau = 0.75$



## Resultados

### Objetivos

E  
F  
I  
C  
I  
E  
N  
C  
I  
A





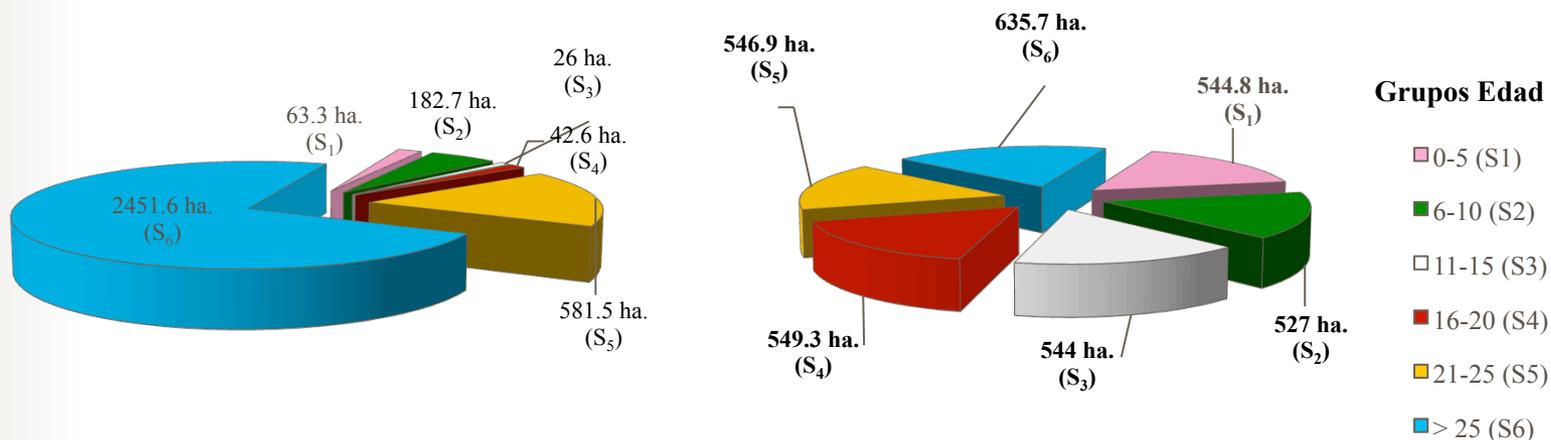
## Matriz de Pagos

	$f_1$	$f_2$ (has.)	$f_3$ (pesos)	$f_4$ (tons.)
$x^1$	<b>0.857</b>	145.7	3,053,000	280,962
$x^2$	0.835	<b>109.8</b>	3,047,790	282,689
$x^3$	0.718	466.2	<b>3,154,150</b>	264,424
$x^4$	0.593	206.3	2,945,610	<b>284,295</b>
<i>range</i>	<b>0.264</b>	<b>356.4</b>	<b>208,540</b>	<b>19,871</b>

Sol n° 40

## Solution 40

OBJ 1. Situación inicial y final por clases de edad



# CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ Los modelos multiobjetivo permiten flexibilizar la búsqueda de soluciones.
- ✓ Dependiendo de lo que deseemos encontrar, algunos enfoques pueden ser mejores que otros, además nos permite aprender del problema.
- ✓ En estos modelos su resolución suele ser la parte más compleja y, finalmente, debería concluirse con una determinación de la solución elegida mediante un método interactivo.
- ✓ El último modelo es el más complejo de resolución, dado su carácter multiobjetivo, no lineal y el elevado número de variables.



# Planificación Forestal bajo criterios múltiples

**Amparo León**  
**Trinidad Gómez**  
**Mónica Hernández**  
**Julián Molina**  
**Rafael Caballero**

**Valladolid, 30 de marzo de 2017**