

Toma de decisiones aplicando Técnicas de optimización Multicriterio en la Producción FORESTAL

Ing. Agr. (Dra.) Adriana Bussoni

Facultad de Agronomía – Departamento Forestal

Curso Modelos de optimización para aplicaciones forestales

Facultad de Ingeniería

Centro Universitario de Tacuarembó

5 de Diciembre 2025

Temario

- I) Introducción – Aplicación de optimización en la producción forestal
 - Multicriterio – Multiobjetivo/ Lexicographic Goal Programming
- II) Estudio de caso -Modelos integrados de largo plazo
- III) Análisis y Discusión

Enfoques de optimización para resolver problemas productivos

- Área de producción: Sostenibilidad forestal,
- Problemas de abastecimiento y logística
- Decisiones Forestales y Toma de decisiones Multicriterio (MCDM) Toma de Decisiones grupales o Group Decision Making (GDM). Primeros trabajos en 1990 (Kangas, 1994)
 - Planificación de cosecha
 - Planificación de cosecha extendido/Control de Área/Control de Volumen/Abastecimiento
 - Forestación sustentable
 - Servicios ecosistémicos y Bio-diversidad
 - Planificación Regional
 - Industria Forestal
 - Riesgo e Incertidumbre
-

Aspecto mas buscados en planificación en las forestaciones en el HN vs HS

HN

- Bosques disetáneos –coetáneos y búsqueda de biodiversidad,
- Optimización del árbol / Optimización de un conjunto de rodales,
- El problema de la adyacencia,
- Búsqueda de determinada estructura etaria al final del período con el objetivo de mantener una estructura disetána y biodiversidad.

HS

- Plantaciones coetáneas en diferentes sitios forestales/ edades/ especies /objetivos productivos,
- Optimización de un conjunto de rodales,
- Búsqueda de unificar la cosecha de rodales adyacentes,
- Búsqueda de determinada estructura etaria al final del período con el objetivo por ej. de mantener una provisión de madera luego del período de planificación.

Multcriteria Decision Making -MCDM

- Análisis Multicriterio es una herramienta analítica en los procesos de ingeniería de Sistemas (Romero C., 1996)
- Su desarrollo se impulsó por las limitaciones de la PL clásica,
- Los centros decisores toman sus decisiones en base a varios criterios y objetivos que suelen estar en conflicto entre sí.
- Los objetivos pueden estar en conflicto
- Se debe elegir entre diferentes alternativas
- Las diferentes alternativas se deben evaluar con diferentes criterios
- Romero C. 1996. Análisis de las decisiones multicriterio. Isdefe, Madrid, 115 págs.

Conceptos previos

- **Objetivos** Los objetivos representan direcciones de mejora de los atributos (+ del atributo es mejor (Max) o - es mejor (Min))
- **Criterios**
- **Atributo** : Se debe poder medir independiente de los deseos del centro decisor (ej. Costo y peso de un contenedor)
 - Se debe poder expresar como función de la variable de decisión
- **Nivel de aspiración**: nivel aceptable de logro del atributo
- **Meta**: la combinación de un atributo con un nivel de aspiración. Pueden también pensarse como restricciones “blandas”
- **Atributo +Variables Desviación (n, p) = Nivel de Aspiración**

Multi Criteria Decision Making (MCDM)

- Ampliamente usada en el campo de la forestación
- Nivel del Rodal , nivel de la plantación. Aplicado a la resolución de planificación estratégica forestal
- Regulación de flujo de madera
- Por ej. Un objetivo puede ser la sostenibilidad, establecemos los atributos o las métricas para medir la sostenibilidad.
- En general las técnicas difieren en como ponderar los objetivos y las formas de obtener los conjuntos

Multiple Criteria Decision Making (MCDM): algunos enfoques

- *Multi-Objective Programming (MOP)*

Se optimiza varios objetivos, en general en conflicto, la solución sería un conjunto eficiente (Ej. un conjunto Pareto óptimo), o un conjunto de soluciones eficientes o Pareto óptimas

- *Goal Programming (GP)* Programación por metas

Lógica satisfactoria: Se establecen metas que representan un nivel de logro aceptable para cada criterio. Función de logro (achievement function) Z .

Se minimiza la distancia de los niveles de variables al nivel de aspiración. Es un método que incorpora las preferencias del tomador de decisiones (TD)

Lexicographic Goal Programming: las metas se ordenan en niveles jerárquicos

- *Compromise Programming (CP)*, se llega a la solución eficiente más cercana al punto ideal o Nadir (Zeleny, 1973). Se deben establecer las “distancias” y normalizar los objetivos
- *Group Decision Making Techniques* → Analytic Hierarchy Process (AHP): las preferencias de los decisores se representan de a pares y se ordenan de manera jerárquica. Se obtiene un ranking de alternativas que se ponderan.



Conceptos previos



Atributo Valor que puede medirse y enfrenta el Centro Decisor (CD),

▪ Objetivo Dirección de mejora de los atributos (+ es Mejor ó - es Mejor),

Target o Nivel de aspiración Nivel aceptable de logro para el atributo,

▪ Meta combinación de atributo y target,

Criteria Atributo, objetivo o meta relevante para el problema,

Criterio preferencial (preemptive criteria)

▪ Valor Ideal alcanzado,

▪ Valor Anti-ideal alcanzado (Nadir Value).

▪ **Función de logro U :** Valor alcanzado de un conjunto de metas en un cierto nivel de prioridad

▪ Goal Programming = Programación por Metas / Desvíos de las metas (n, p) /

▪ Meta (puede o no ser alcanzado) \neq Restricción (debe cumplirse) RHS

▪ Conjuntos satisfacientes

▪ **Modelo por metas Lexicográfico (LGP)** (orden o jerarquía)

Sistemas Silvopastoriles y Optimización multicriterio: Modelos integrados de largo plazo



Los **Sistemas Silvopastoriles (SSP)** producen madera, carne y servicios ambientales que complementan la producción, mejoran el retorno económico y mitigan la emisión de GHG

- Objetivo: Evaluar la integración de largo plazo de la producción forestal y producción de carne, para alcanzar beneficios productivos, económicos y ambientales.

II.- M&M

- El modelo
- Estudio de caso con forestación y ganadería.

Modelo de planificación de largo plazo 30 años-

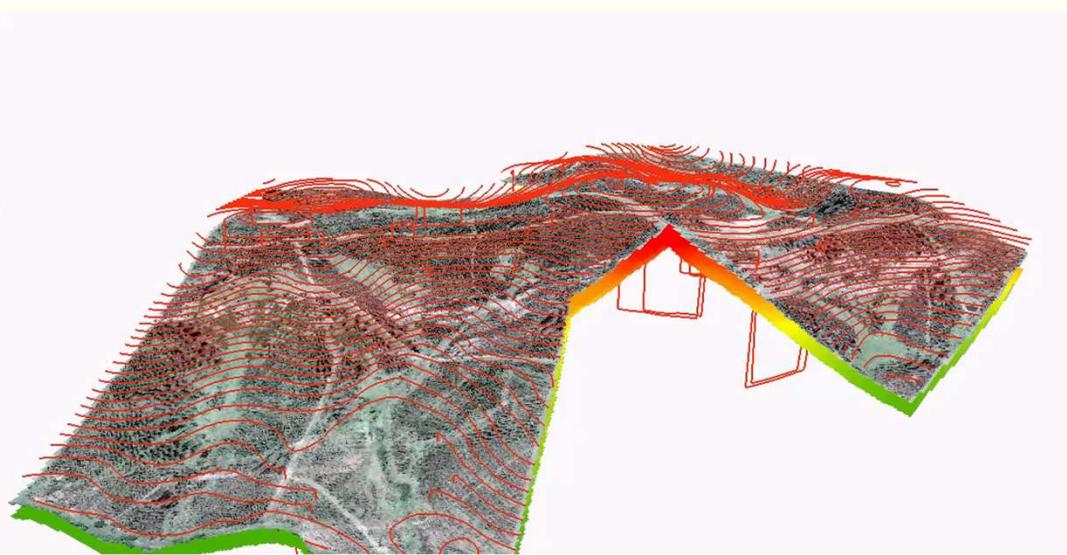
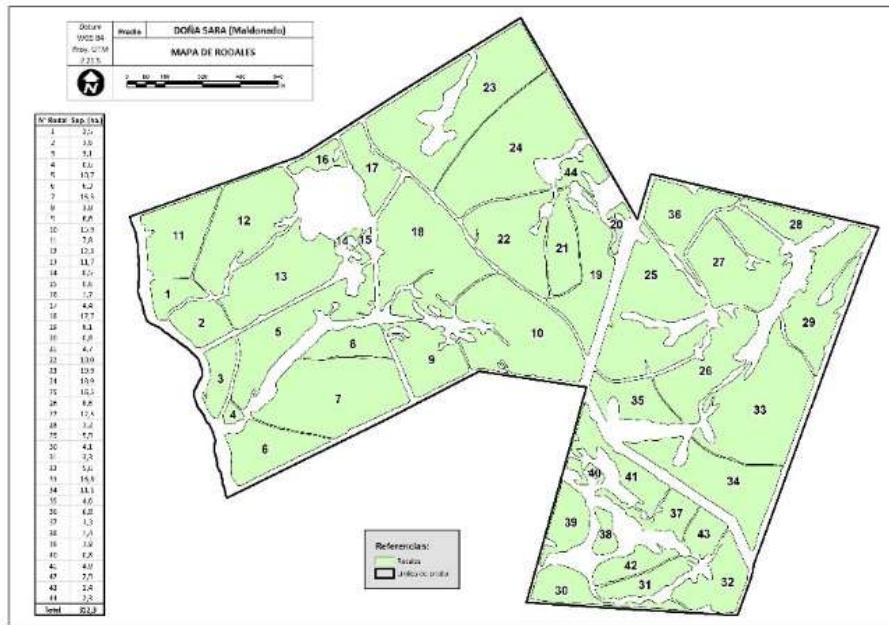
Supuestos:

- No \exists cambios en la productividad del suelo (forestación ganadería),
- Se cuantifica la biomasa aérea,
- El suelo esta en un balance neutro de carbono entre emisión y fijación del carbono orgánico (SOC),
- No se considera la biomasa de raíces,
- No se realiza un análisis de sensibilidad o probabilístico.



Estudio de caso

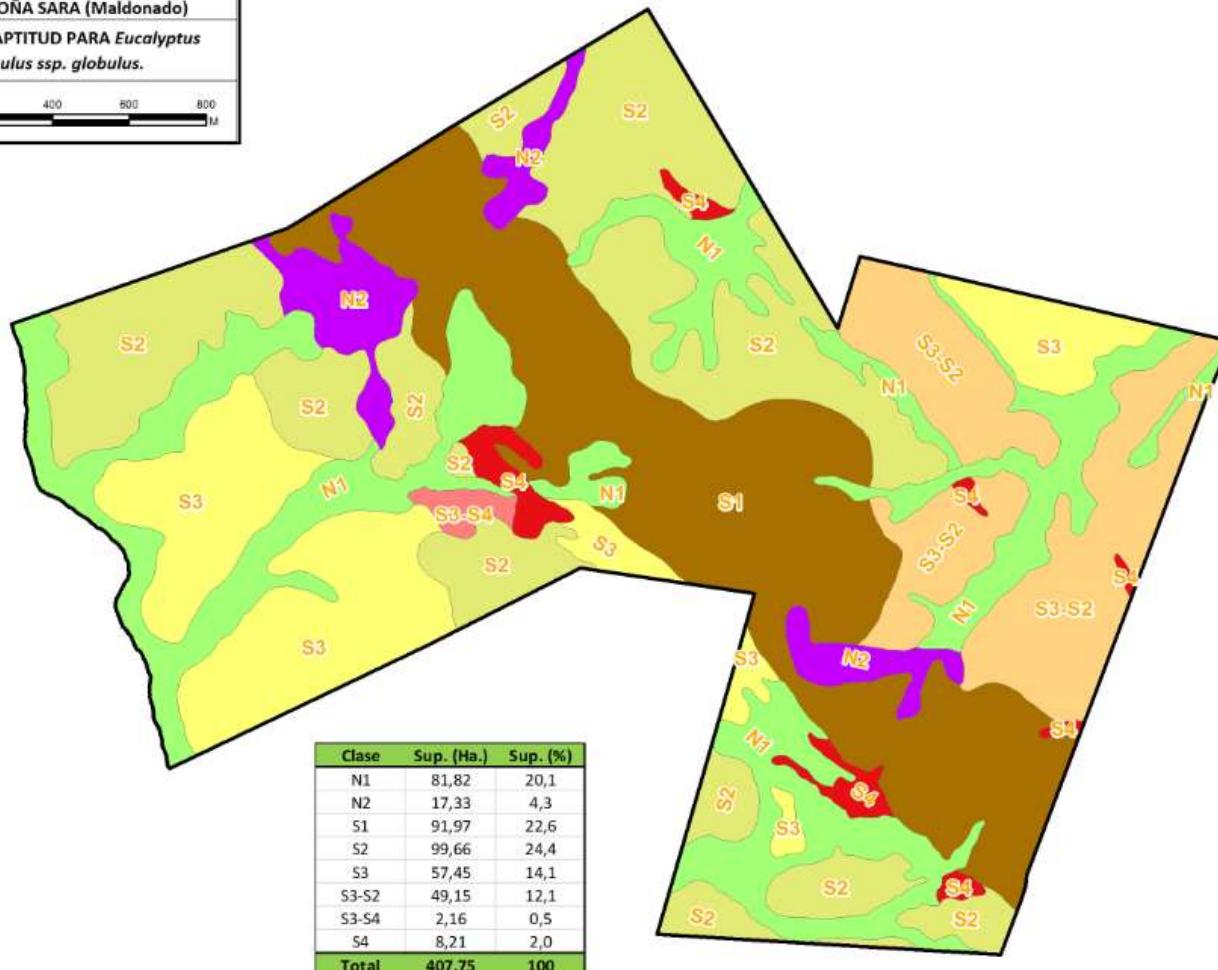
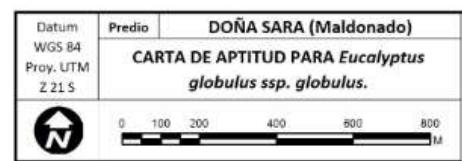
44 Rodales forestables



Modelo ganadero	Cría-Recría Stock
Toros	3
Vacas de cría	100
Terneras	40
Terneros	40
Vaq. 1 año	33
Vaq. 1-2 años	33
Vaq. > 2 años	33
Novillos 1-2 años	30
Carga ganadera(UG/ha)	0,78

Se retienen vientres y se venden terneros y novillos de 1-2 años

Carga ganadera en áreas libres



10

→ Área solo ganadera

Área que puede ser
Forestal, Ganadera
ó Mixta

→ Área solo conservación

e 1-2 años

Conceptos previos

- Atributo Valor que puede medirse y enfrenta el Centro Decisor (CD),
 - Objetivo Dirección de mejora de los atributos (+ es Mejor ó – es Mejor),
 - Target o Nivel de aspiración Nivel aceptable de logro para el atributo, $f(x) + n - p = \text{Target}$
 - Meta combinación de atributo y target,
 - Criterio Atributo, objetivo o meta relevante para el problema,
 - Valor Ideal alcanzado,
 - Valor Anti-ideal alcanzado (Nadir Value).
- Criterio preferencial (preemptive criteria)
- } Distancia que se utiliza en la normalización
- **Función de logro U : Valor alcanzado de un conjunto de target en un cierto nivel de prioridad**
 - Goal Programming = Programación por Metas / Desvíos de las metas (n, p) /
 - Meta (puede o no ser alcanzado) \neq Restricción (debe cumplirse) RHS
 - Conjuntos satisfacientes
 - Modelo por metas Lexicográfico (LGP) (orden o jerarquía)

Programación por metas lexicográfico

- Las Funciones objetivo son el conjunto de minimización de desvíos no deseados en un mismo nivel de prioridad (U_i), por ej:
- $U_{1(\mu_2)}$ sería la función de logro obtenida en la prioridad 1 (U_1) cuando se optimiza el segundo nivel (μ_2),
- Cada nivel de prioridad está compuesto por un conjunto de metas,
- Cada meta esta ponderada (de acuerdo a un centro decisor) de acuerdo al procesamiento de encuestas realizadas a productores e IC,
- $U_{i(\mu_h)}$ Función de logro (achievement function) en cada nivel jerárquico (μ_h), es la sumatoria de las desviaciones estandarizadas con respecto a los target.

Criterios preferenciales (Preemptive criteria)

- NPV ganadería,
 - NPV forestación,
 - Balance de Carbono,
 - Ingresos anuales homogéneos,
 - Volumen cosechado,
 - Biomasa forestal en pie al final del periodo
 - Control de cosecha entre períodos,
 - Estructura de edades balanceadas.
- 
- BOSQUE NORMAL

Modelo

- $\min Z = \sum_{i=1}^p (w_i^- d_i^- + w_i^+ d_i^+)$
- *st*
- Restricciones endógenas (áreas de pastoreo y rodales)
- $\sum_l^L x_l = G_l \quad \forall l \in \textcolor{violet}{L}$ $\textcolor{violet}{L}$ área de pastoreo
- $\sum_{k,j}^{K,J} x_{kj} = A_k \quad \forall k \in \textcolor{violet}{K}$ $\textcolor{violet}{K}$ área de rodales

$$\sum_{l k j}^{L K J} N P V_{c l} (x_l + x_{kj}) + \mathbf{n}_{N P V_c} - p_{N P V_c} = \alpha_c N P V_c^* \quad \text{Valor presente ganadero}$$

Metas

$$\sum_{k j}^{K J} N P V_{f k j} x_{k j} + \mathbf{n}_{N P V_f} - p_{N P V_f} = \alpha_f N P V_f^* \quad \text{Valor presente forestal}$$

$$\sum_{k j t}^{K J T} (B f_{k j t} - B f_{k j t-1}) x_{k j t} - \sum_{k j t}^{K J T} C H_{k j t} x_{k j t} - \sum_t^T C e_t (x_l + x_{kj}) + \mathbf{n}_{C B} - p_{C B} = \alpha_{C B} C B^* \quad \text{Balance de carbono}$$

- $\sum_{k j t}^{K J T} V_{k j t} X_{k j} + p_h - \mathbf{n}_h = \alpha_h H^*$ Vol. cosechado

Variables: $x_b, x_{kj}, V_f, \text{etc.}$

Variables de desvío Ej. $\mathbf{n}_{N P V_c}$, etc.

Parámetros L, K, J, T, α_i

- $\sum_{k j t}^{K J T} I_{f k j t} x_{k j t} + I_{C t} (x_{l t} + x_{k j t}) = I_t$

- $I_{t+1} - I_t + \mathbf{n}_t I - \mathbf{p}_t I = 0, \quad t = 1, \dots, T-1$ Ingresos anuales

- $H_{a+1} - H_a + \mathbf{n}_{Ht} - p_{Ht} = 0$ Cosecha regulada por período

- $\sum_{k j}^{K J} (X_{k j} V_f) + \mathbf{n}_{Vf} - \mathbf{p}_{Vf} = \alpha_{Vf} V_f^*$ Madera en pie al final del período

- $\sum_{k j}^{K J} X_{k j} + \mathbf{n}_A - \mathbf{p}_A = \alpha_{AC} X_{AC}$ Control Área forestal final

Resultados-Matriz de Pay off

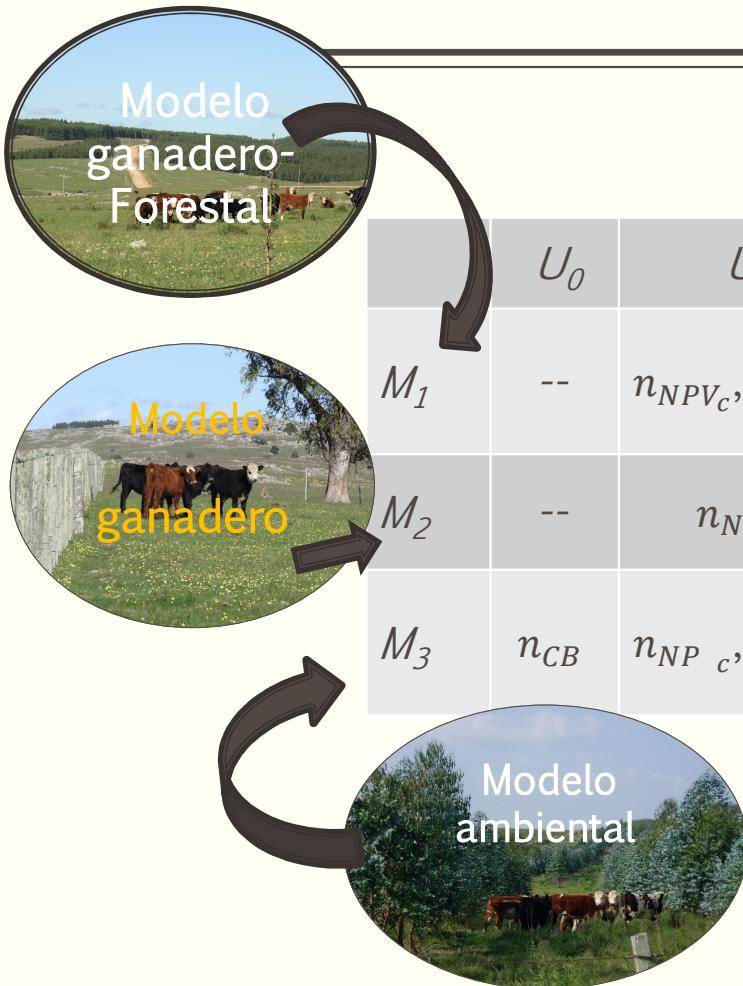
Criterios	VAN Forestal (US\$)	VAN Ganadero (US\$)	Madera (m ³)	Balance Carbono (ton CO ₂ -e)	Desvío Regulación Edad Forestal (ha)	Desvío Inventario Forestal Final (m ³)	Desvío cosecha regular (m ³ /año)	Desvío Ingresos anuales (US\$)
VAN Forestal (US\$)	883.456	0	821.934	537.836	300.396	128.085	110.518	156.198
VAN Ganadero (US\$)	101.053	411.001	102.595	98.687	108.312	124.412	144.295	277.210
Madera (m ³)	154.548	0	171.129	103.952	80.225	87.051	105.000	105.781
Balance Carbono (ton CO ₂ -e)	5.895	-32.561	38.376	63.413	12.435	40.684	17.433	6.501
Desvío Regulación Edad Forestal (ha)	221	270	270	539	0	408	56	70
Desvío Inventario Forestal Final (m ³)	3.905	0	0	46.725	13.145	0	14.301	13.851
Desvío cosecha regular (m ³ /año)	175.412	0	221.343	158.455	127.808	121.248	13.900	17.664
Desvío Ingresos anuales (US\$)	2.625.234	0	3.329.435	2.408.027	1.928.111	1.842.701	216.118	204.464

Resultados encuestas

	Livestock profitability	Forest profitability	Interannual income	Harvest wood	GHG Balance	Normal Forest
Assigned importance order	1	1/2	2	2	3	3
Preferred assignment values (or assigned weights)	0,35	0,22	0,17	0,08	0,051	0,047
Targets	0,70	0,63	0,53	0,55	0,41	0,49

Se plantean 3 Modelos

Desvíos considerados en cada modelo

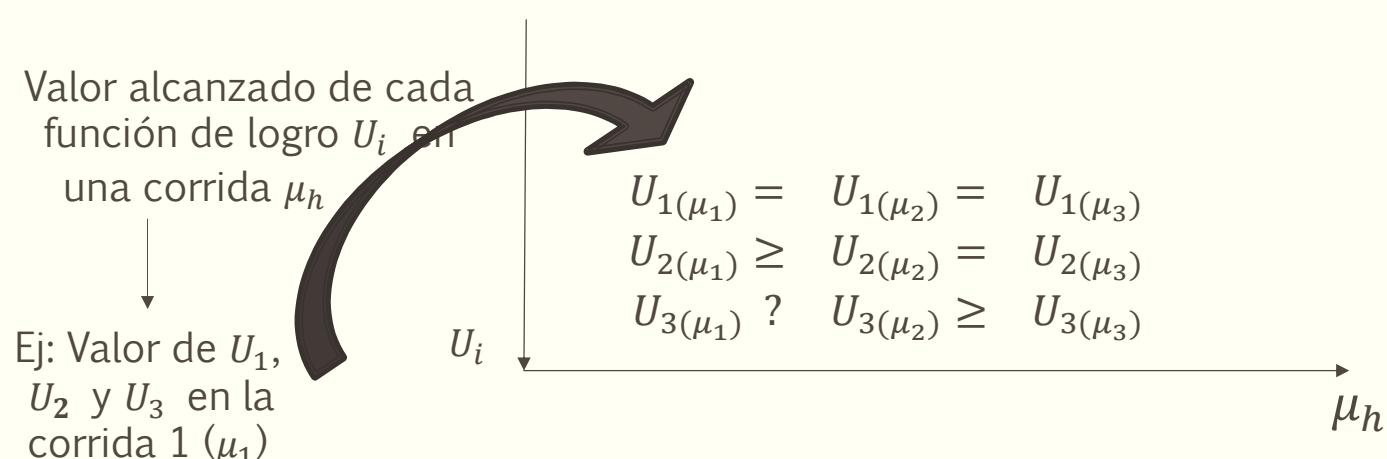


Se plantean 3 Modelos

	U_0	U_1	U_2	U_3
M_1	--	n_{NPV_c}, n_{NPV_f}	$n_t I, p_t I, n_h$	$n_{CB}, n_{Ht}, p_{Ht}, n_A, p_A, n_{Vf}, p_{Vf}$
M_2	--	n_{NPV_c}	$n_{NPV_f}, n_t I, p_t I, n_h$	$n_{CB}, n_{Ht}, p_{Ht}, n_A, p_A, n_{Vf}, p_{Vf}$
M_3	n_{CB}	n_{NP_c}, n_{NP_f}	$n_{Ht}, p_{Ht}, n_A, p_A, n_{Vf}, p_{Vf}$	--

Todos los criterios son normalizados a partir de la matriz de Pay off, ponderados y jerarquizados a partir de las encuestas

U suma de desvíos ponderados



U_i representa los valores de desvío en orden jerárquico como expresado por Romero and Rehman (2003)

$U_i(\mu_h)$

$U_3(\mu_2)$ puede ser cualquier valor con respecto a $U_3(\mu_1)$

- $U_i(\mu_i) \leq U_i(\mu_h) \quad \forall h; \forall i$
- $U_i(\mu_i) = U_i(\mu_h) \quad \forall h > i$

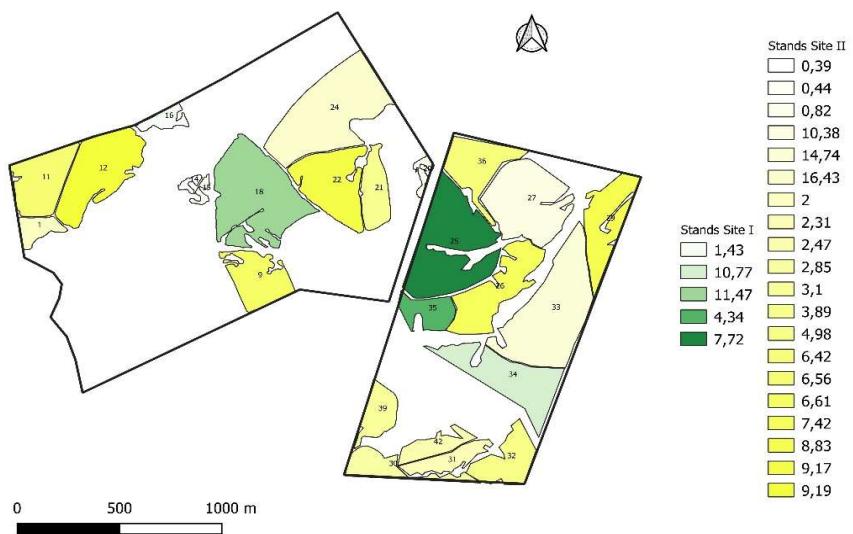
Por lo tanto en cada función (U_i) y corrida (μ_h) el sub-conjunto debe tener un valor de desvío menor o igual al de la etapa anterior

En cada nivel de logro $U_i(\mu_h)$ el nivel de utilidad alcanzado en el subconjunto satisfactorio U_i en la etapa de optimización jerárquica μ_h

M_1 Modelo Ganadero Forestal

Criteria	$U_1 (n_{NPV_c}, n_{NPV_f})$	$U_2 (n_t I, p_t I, n_h)$	$U_3 (n_{CB}, n_{Ht}, p_{Ht}, n_A, p_A, n_{Vf}, p_{Vf})$	=
NPV Cattle (US\$)	302.935	302.935	302.935	
NPV Forest (US\$)	556.578	556.578	556.578	
Deviation Annual Incomes (US\$)	2.310.732	2.310.653	2.310.653	
Wood Volume harvested (m ³)	95.762	95.762	95.762	
Deviation Forest Age (Regulation) (ha)	341	341	341	
Deviation Ending forest Inventory (m ³)	7.392	7.392	7.392	
Deviation Even flow timber (m ³ /yr)	154.276	154.274	154.274	
Carbon Balance (ton CO _{2-e})	-17.492,5	-17.492,5	-17.492,5	

Uso de los Recursos- M_1 Modelo ganadero Forestal



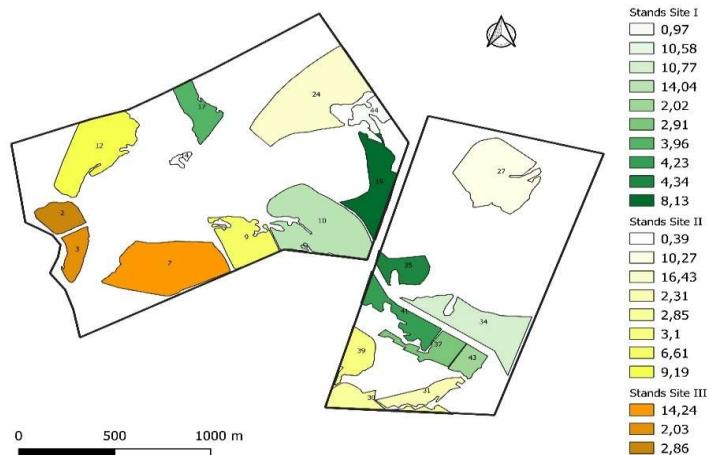
M₁ El 77% del área forestada (119/155), se realiza en sitio II (20 rodales)
Se foresta el 57% del potencial (270 ha)

M_2 Modelo Ganadero

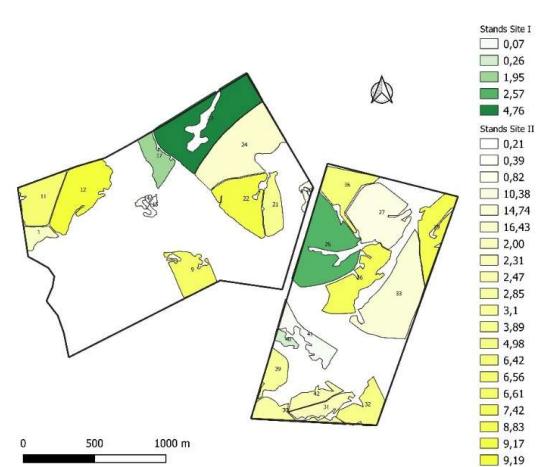
Criteria	$U_1(n_{NPV_c})$	U_2 ($n_{NP_f}, n_t I, p_t I, n_h$)	U_3 ($n_{CB}, n_{Ht}, p_{Ht}, n_A, p_A, n_{Vf}, p_{Vf}$)
NPV Cattle	317.307	317.307	317.307
NPV Forest	260.440	483.711	483.711
Deviation Annual Incomes (US\$)	1.087.767	1.764.601	1.764.601
Wood Volume harvested (m ³)	70.790	83.943	83.943
Deviation of Forest and Cattle Final Area control (ha)	297	352	352
Deviation Ending forest Inventory (m ³)	4.263	8.485	8.485
Deviation Even flow timber (m ³ /yr)	72.092	118.641	118.641
Carbon Balance (ton CO ₂ -e)	-12.741	-20.160	-20.160

Uso de los Recursos- M_2 Modelo ganadero

M_2-U_1 Se foresta 132 ha y el 47% en sitio I
Modelo con mayor cantidad de ganado: 7669-8004 UG.



M_2-U_2 Se re-distribuye en rodales de calidad intermedia (Sitio II, 90% del área)



M_3 Modelo ambiental

$$\begin{array}{lll}
 U_{1(\mu_1)} = U_{1(\mu_2)} = U_{1(\mu_3)} \\
 U_{2(\mu_1)} \geq U_{2(\mu_2)} = U_{2(\mu_3)} \\
 U_{3(\mu_1)} ? \quad U_{3(\mu_2)} \geq U_{3(\mu_3)}
 \end{array}$$

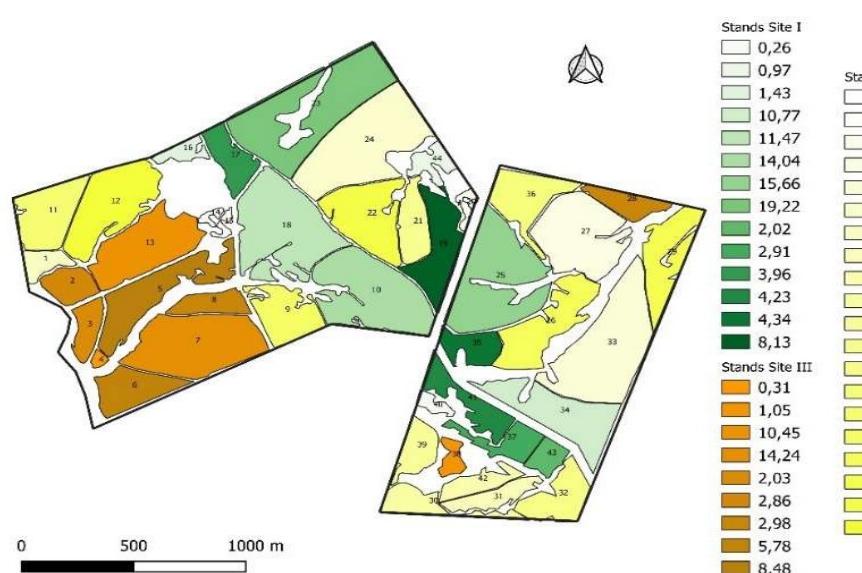
	μ_1	μ_2	μ_3
U_0	0	0	0
U_1	1.004.310	274.317	274.317
U_2	294.434	408.756	408.755

Criteria	U_0 (n_{CB})	U_1 (n_{NP_c} , n_{NPV_f})	U_2 (n_{Ht} , p_{Ht} , n_A , p_A , n_{Vf} , p_{Vf})
NPV Cattle	227.210	292.698	292.698
NPV Forest	641.562	556.578	556.578
Deviation Annual Incomes (US\$)	2.132.883	2.369.579	2.369.577
Wood Volume harvested	147.076	109.719	109.719
Deviation of Forest and Cattle Final Area control (ha)	170	377	377
Deviation Ending forest Inventory (m ³)	5.693	9.000	9.000
Deviation Even flow timber (m ³ /yr)	144.821	158.298	158.298
Carbon Balance (ton CO ₂ -e)	6.788	6.788	6.788

$M_{\mathcal{F}} U_0$ Es el de mayor ocupación del territorio forestal 270 ha.
 Luego en la segunda corrida μ_2 reconfigura con 168 ha y selecciona solo régimen fustal. Sitio I y II sacrifica la meta de biomasa en pie al final (0 m³)

Balance + en base a la mayor ocupación forestal en un primer momento y luego en base a sacrificar la biomasa final

UG: 6223-7533



Criterio	Target	Valor Alcanzado M_1	Valor Alcanzado M_2	Valor Alcanzado M_3
Ganadero NPV (US\$)	317.307	302.935	317.307	292.698
Forestal NPV (US\$)	556.578	556.578	483.711	556.578
Wood (m ³)	94.121	95.762	83.943	109.719
Balance de Carbono (Mg CO ₂ -e)	6.788	-17.493	-20.160	6.788
Desvio Edad Forestal	275	341	352	377
Regulación (ha)				
Desvio Inventario Forestal Final (m ³)	23.830	7.392	8.485	9.000
Desvio Flujo continuo (madera) (m ³ /año)	112.885	154.274	118.641	158.298
Desvio Ingresos Anuales (US\$)	1.764.601	2.310.653	1.764.601	2.369.577

Resultados comparados

- ❖ Se puede alcanzar parcialmente los target de los modelos integrados. El target ambiental debe estar en el primer nivel de jerarquía

Uso de Recursos	M_1 (Ganadero - Forestal) (n_{NPV_c} , n_{NPV_f})	M_2 (Ganadero) (n_{NPV_c})	M_3 (Ambiental) (n_{CB})
Ganado en área forestable (ha)	115	137	0 / 101
Ganado en cortafuegos (ha)	32	32	32
Ganado en área ganadera (N1)	89	89	89
Total Área ganadera (ha)	236	258	121 / 222
Área forestal (ha)	155	132,2 / 132,7 *	270 / 168
Site I – FC (ha)	0	62 / 0	69
Site I – C (ha)	36	0 / 14	31 / 0
Site II – FC (ha)	119	45,6 / 118	95 / 99,5
Site II – C (ha)	0	5,6 / 0,7	24 / 0
Site III – FC (ha)	0	2 / 0	34 / 0
Site III – C (ha)	0	17 / 0	18 / 0
Biomasa fin período Site I (m ³)	1.608	3.531 / 502	5.435 / 0
Biomasa fin período Site II (m ³)	0	1.682 / 13	4.076 / 0
Biomasa fin período Site III (m ³)	0	586 / 0	548 / 0
Total Biomasa fin período (m ³)	1.608	5.799 / 515	10.559 / 0
LU _T	7.765	7.669 / 8.004	6.223 / 7.533

Diferente uso de los recursos
según el modelo

Los Sistemas Integrados Madera Ganado son potencialmente más estables económica y financieramente frente a los sistemas puros.

Los resultados de los modelos en M_1 y M_2 , pueden demostrar mayor retorno financiero combinando las dos producciones, con fuertes desvíos en la meta de regularidad en los ingresos netos anuales.

Los Sistemas Integrados son más productivos y mejoran el desempeño ambiental frente a los sistemas puros.

El condicionante para demostrar la mejora en el desempeño ambiental sería posicionar la meta en un nivel jerárquico superior en la toma de decisiones.

-
-
- La **LGP (Programación por metas lexicográfica)** es un enfoque que permite integrar las preferencias de los productores, incorporando la función de logro en un contexto de racionalidad limitada, como señala Romero & Rehman (2003) citando la teoría de Simon (1955).
 - El resultado es altamente sensible al orden y ponderación en que se establezcan las metas.

Discusión II

- La gran cantidad de datos de campo, entrevistas y modelos presentados, sintetizan una compleja información biofísica, productiva y económica.
- Es posible plantear una ingeniería productiva-ambiental en donde se produzca de una manera que integre estos criterios.
- Se pueden plantear modelos con plantaciones mas escalonadas, con otras especies, que permitirían obtener modelos con mayor potencial productivo y ambiental.

Discusión III

- Los resultados de los modelos en M_1 y M_2 , pueden demostrar mayor retorno financiero combinando las dos producciones.
- Los resultados muestran que los Sistemas Integrados (M_1) en donde se prioriza ambas producciones en el primer nivel son mas productivos que el sistema gandero M_2 y mejoran los indicadores de balance de carbono (-17.492 vs. -20.160) si bien siguen siendo negativos.
- Se podría desarrollar y aplicar para procesos de planificación y monitoreo de producción de carne con bajas emisiones o balance positivo,
- La segunda hipótesis H2 en la estabilidad económica no se pudo comprobar: se presentan fuertes desvíos en la meta de regularidad de los ingresos netos anuales.



Muchas gracias por su
atención!

