

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.

Multicriteria 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 pág.

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

Se minimiza la distancia de las 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 mas 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,
 - Criterio 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 satisficentes
- **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-

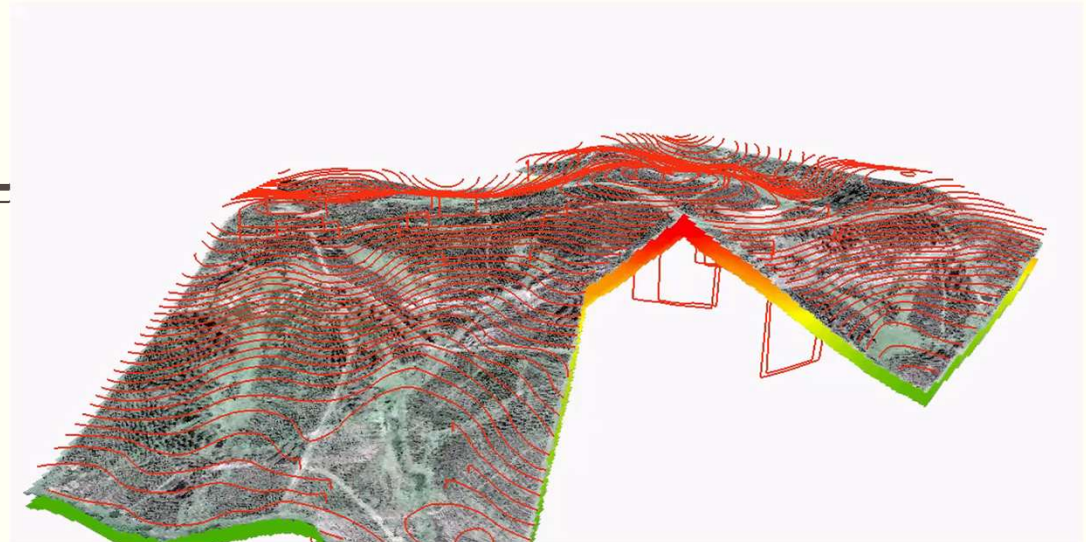
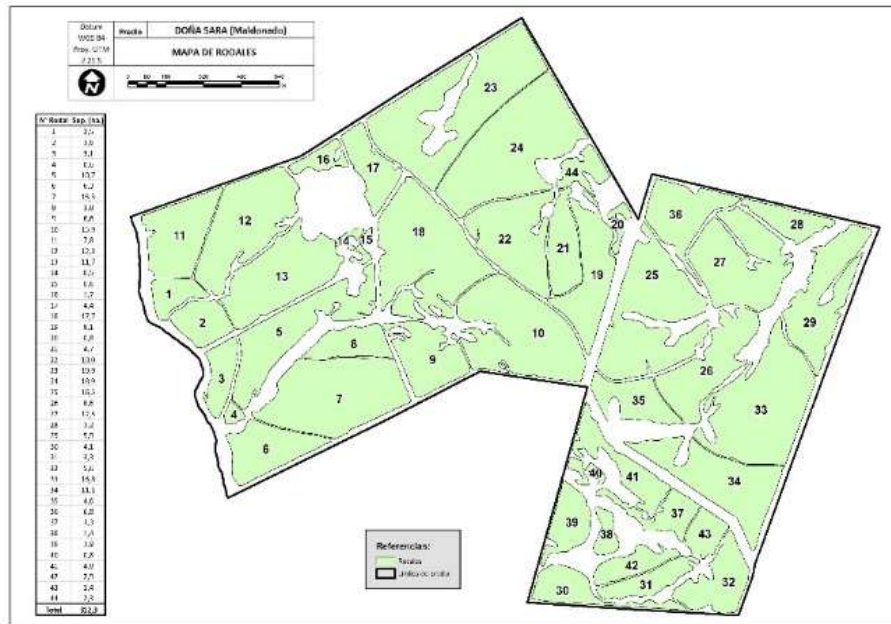
Supuestos:

- 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 Cría-Recría
Stock

ganadero

Toros

Vacas de cría

Terneras

Terneros

Vaq. 1 año

Vaq.1 -2 años

Vaq. > 2 años

Novillos 1-2 años

Carga ganadera(UG/ha) 0,78

3

100

40

40

33

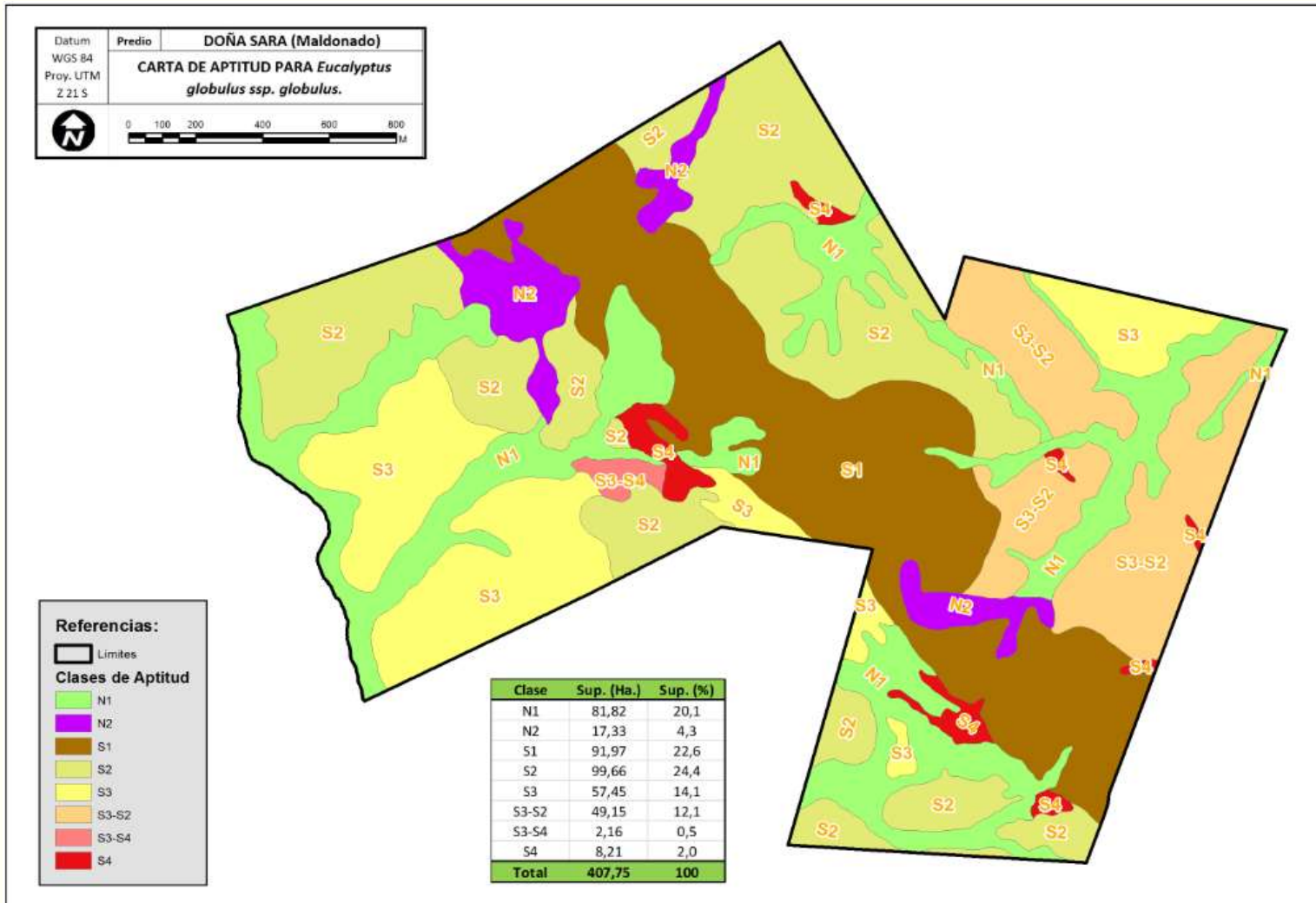
33

33

30

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

Carga ganadera en áreas libres



lo

→ 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,
 - Criterio preferencial (preemptive criteria)
 - Valor Ideal alcanzado,
 - Valor Anti-ideal alcanzado (Nadir Value).
- 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 satisficentes
 - 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)
- $\sum_l^L x_l = G_l \quad \forall l \in L$ L área de pastoreo
- $\sum_{k,j}^{K,J} x_{kj} = A_k \quad \forall k \in K$ K área de rodales

$$\sum_{l, k, j}^{L, K, J} NPV_{cl} (x_l + x_{kj}) + n_{NPV_c} - p_{NPV_c} = \alpha_c NPV_c^* \quad \text{Valor presente ganadero}$$

Metas

$$\sum_{k, j}^{K, J} NPV_{f_{kj}} x_{kj} + n_{NPV_f} - p_{NPV_f} = \alpha_f NPV_f^* \quad \text{Valor presente forestal}$$

$$\sum_{k, j, t}^{K, J, T} (B_{f_{kj}t} - B_{f_{kj}t-1}) x_{kj} - \sum_{k, j, t}^{K, J, T} C_{H_{kj}t} x_{kj} - \sum_t^T C_{e_t} (x_l + x_{kj}) + n_{CB} - p_{CB} = \alpha_{CB} CB^* \quad \text{Balance de carbono}$$

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

Variables de desvío Ej. $n_{NPV_c}, etc.$

Parámetros L, K, J, T, α_i

$$\sum_{k, j, t}^{K, J, T} V_{kj} x_{kj} + p_h - n_h = \alpha_H H^* \quad \text{Vol. cosechado}$$

$$\sum_{k, j, t}^{K, J, T} I_{f_{kj}t} x_{kj} + I_{C_t} (x_{l_t} + x_{k_{jt}}) = I_t$$

$$I_{t+1} - I_t + n_{tI} - p_{tI} = 0, \quad t = 1, \dots, T-1 \quad \text{Ingresos anuales}$$

$$H_{a+1} - H_a + n_{Ht} - p_{Ht} = 0$$

Cosecha regulada por período

$$\sum_{k, j}^{K, J} (X_{kj} V_f) + n_{Vf} - p_{Vf} = \alpha_{Vf} V_f^*$$

Madera en pie al final del período

$$\sum_{k, j}^{K, J} X_{kj} + n_A - p_A = \alpha_{AC} X_{AC}$$

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	410.518	456.198
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	13.090	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	Sumatoria da 1
Targets	0,70	0,63	0,53	0,55	0,41	0,49	

Se plantean 3 Modelos

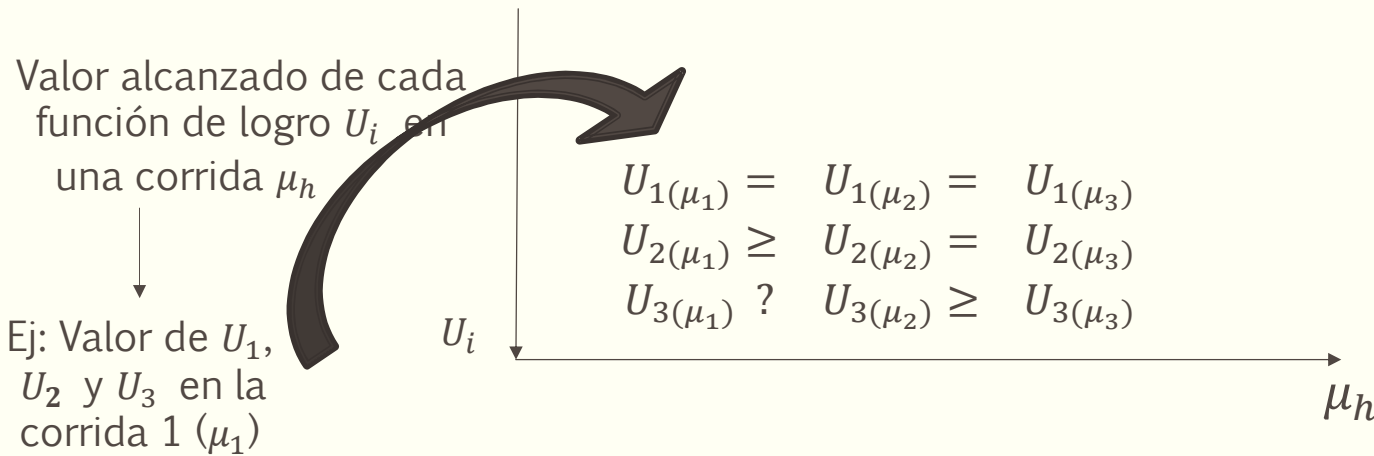
Desvíos considerados en cada modelo

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 $U_3(\mu_1)$

$$\blacksquare U_i(\mu_i) \leq U_i(\mu_h) \quad \forall h; \forall i$$

$$\blacksquare U_i(\mu_i) = U_i(\mu_h) \quad \forall h > i$$

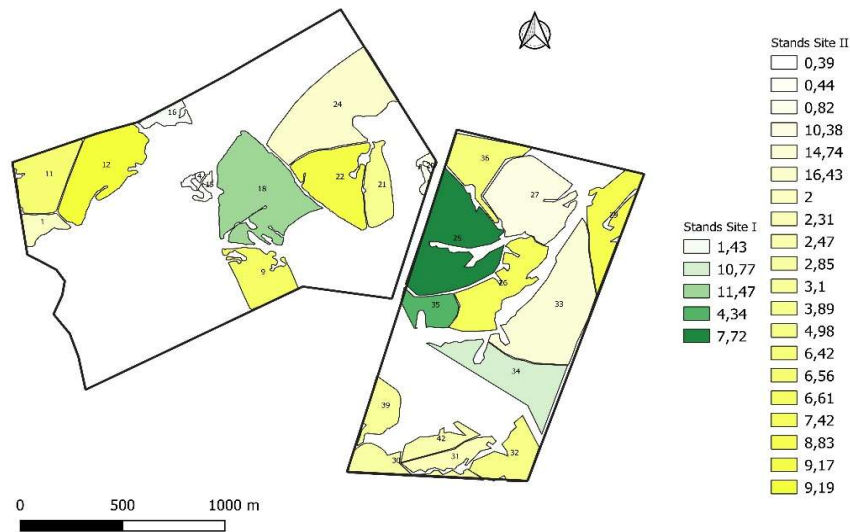
Por lo tanto en cada función (U_i) y corrida (μ_h) el sub-conjunto debe tener un valor de desvío menor o igual al de la etapa anterior

En cada nivel de logro $U_{i(\mu_h)}$ el nivel de utilidad alcanzado en el subconjunto satisfaciente 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



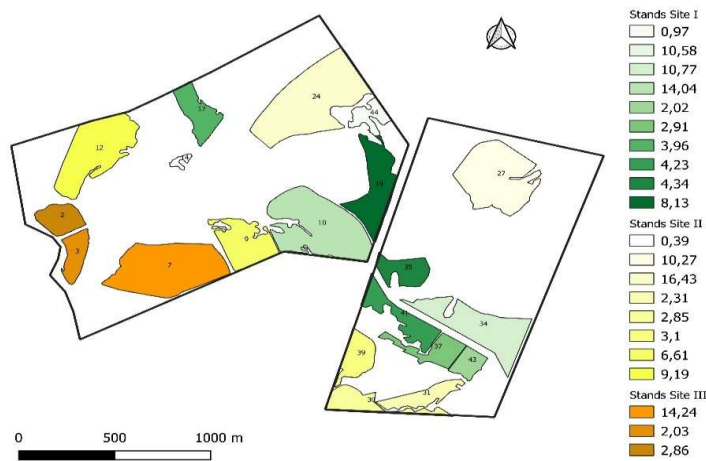
M_1 El 77% del área forestada (119/155), se realiza en sitio II (20 rodales)
Se foresta el 57% del potencial (270 ha)

M_2 Modelo Ganadero

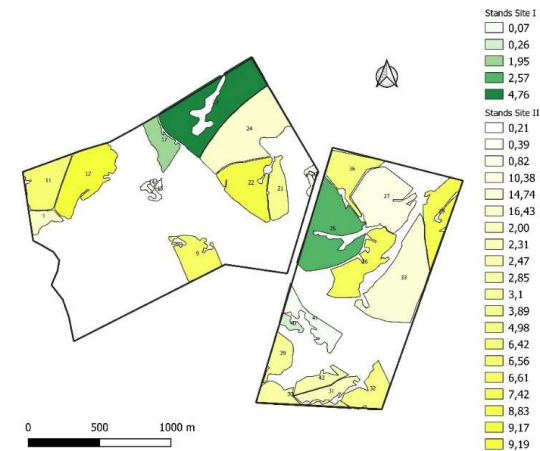
Criteria	$U_1(n_{NPV_c})$	$U_2(n_{NP_f}, n_t I, p_t I, n_h)$	$U_3(n_{CB}, n_{Ht}, p_{Ht}, n_A, p_A, n_{Vf}, p_{Vf})$
NPV Cattle	317.307	317.307	317.307
NPV Forest	260.440	483.711	483.711
Deviation Annual Incomes (US\$)	1.087.767	1.764.601	1.764.601
Wood Volume harvested (m ³)	70.790	83.943	83.943
Deviation 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

	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

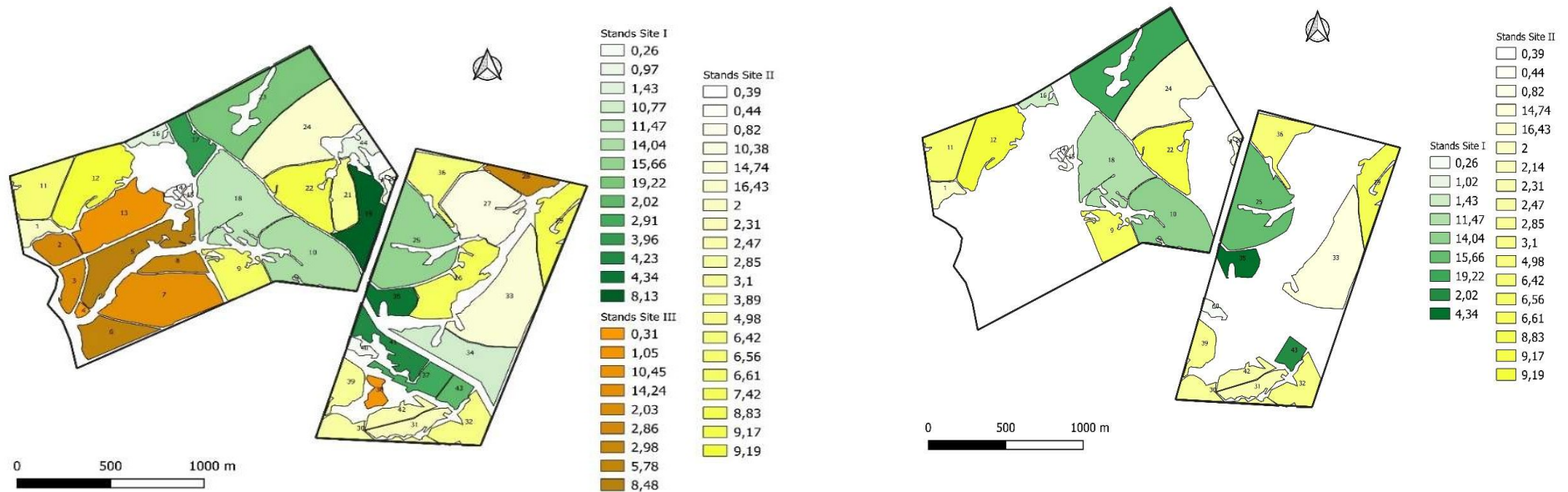
$$\begin{aligned}
 U_1(\mu_1) &= U_1(\mu_2) = U_1(\mu_3) \\
 U_2(\mu_1) &\geq U_2(\mu_2) = U_2(\mu_3) \\
 U_3(\mu_1) &? U_3(\mu_2) \geq U_3(\mu_3)
 \end{aligned}$$

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 m^3)

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 Regulación (ha)	275	341	352	377
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 (m³)	1.608	3.531 / 502	5.435 / 0
Biomasa fin período Site II (m³)	0	1.682 / 13	4.076 / 0
Biomasa fin período Site III (m³)	0	586 / 0	548 / 0
Total Biomasa fin período (m³)	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

→ 41%

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 gadero 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!

