



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

PRODUCCIÓN GANADERA Y FORESTAL

Modelos de integración productiva y ambiental

Adriana Teresa BUSSONI GUITART

Doctorado en Ciencias Agrarias
opción Ciencias Sociales

Mayo 2021

PRODUCCIÓN GANADERA Y FORESTAL
Modelos de integración productiva y
ambiental

Adriana Teresa BUSSONI GUITART

Doctorado en Ciencias Agrarias
opción Ciencias Sociales

Mayo 2021

Tesis aprobada por el tribunal integrado por el Ing. Ftal. (*PhD*) Pablo Peri, el Ing. Sist. (*PhD*) Héctor Cancela, la Lic. Ec. (*PhD*) Virginia Morales Olmos, el 21 de mayo de 2021. Autor: Ing. Agr. (*MSc*) Adriana Teresa Bussoni Guitart. Director: Ing. Agr. (*PhD*) Jorge Álvarez Giambruno, Co-director: Ing. Agr. (*PhD*) Gustavo Ferreira Mattos.

Dedico este trabajo en memoria de mis padres Juan y Carmen

A mi hermosa abuela Clara

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer el apoyo de la institución académica Facultad de Agronomía UDELAR por haberme dado la oportunidad de continuar mis estudios, a mi tutor Jorge Álvarez quien dedicó muchas horas de su tiempo a este trabajo y acompañó en todo el proceso, a mi co-tutor Gustavo Ferreira por su dedicación y consejo, por los intercambios en ideas, a los dos por la orientación y el tiempo dedicado. Al INIA por haber financiado el proyecto FPTA 300 que permitió concretar el trabajo de campo, obtener los insumos para poder realizar los capítulos de esta tesis y la oportunidad de obtener valiosa experiencia. A la ANII por el apoyo financiero POS_NAC_2012_1_9318.

Muy especialmente a mi tribunal de seguimiento de tesis, el Ing. Agr. (*PhD*) Valentin Picasso por su continuo apoyo, ayuda, intercambio de ideas e inspiración. Al Ing. Ftal (*PhD*) Frederick Cabbage por lo valiosos aportes, por compartir con generosidad toda su experiencia en el sector de la economía forestal internacional; también por la amistad que me brindan y la camaradería a ambos.

Fundamentalmente, al Ing. Agr. (*PhD*) Luis Díaz Balteiro, profesor de la Universidad Politécnica de Madrid y referente principal en los temas de optimización multicriterio, con quien aprendí programación lexicográfica y quien destinó muchas horas a este proceso, le estoy sumamente agradecida.

A mis compañeros de Facultad, sobre todo a la Ing. Agr. (*MSc.*) Mariana Boscana, Ing. Agr. (*MSc.*) Carolina Munka, Ing. Agr. (*MSc.*) Fabián Varela, y Méd. Vet. (*PhD.*) Eduardo Llanos por todas las horas compartidas, el trabajo de campo, las mateadas, el compañerismo y todo lo que se creció y aprendió en este tiempo. Muy especialmente a la Ing. Agr. (*PhD.*) Margarita Alconada por toda su dedicación y aporte en la interpretación de paisaje, los aspectos de suelo y aguas subterráneas, por todo su apoyo y amistad de toda una vida y acompañar en el camino. Al Ing. Agr. Juan Cabris por su permanente colaboración y aporte en todos los trabajos, su talento y generosidad, a la Ing. Agr. Graciela Romero por todo lo que aprendí en los trabajos de campo durante la carrera, a los dos por la amistad. A la gente de la Comisión Nacional

de Fomento Rural, Ing. Agr. Gustavo Cabrera, Lujan, a Mario Costa que ya no está, y a su Comisión Directiva, todo mi agradecimiento. Al Ing. Agr. Marcello Rachetti por todos los proyectos realizados que permitieron crecer y ganar en comprensión de los productores familiares que conforman el entramado productivo del país, el valor cualitativo de lo aprendido y haber construido un valioso equipo de trabajo con los productores; a ellos también mi agradecimiento.

También y muy especialmente, a mis compañeros de Gestión de Empresas y del Departamento de Ciencias Sociales por todos estos años compartidos.

A los productores que nos apoyaron en esta última etapa, Ing. Agr. Martín Pérez del Castillo, Ing. Agr. Ricardo García e Ing. Agr. Ignacio López que nos dieron la confianza y la generosidad de abrir sus porteras, pudimos compartir con sus familias y amigos, brindaron su experiencia y nos permitió conocer y avanzar en temas tan complejos como la producción integrada. También a las empresas forestales que nos apoyaron en todo este camino, Redalco S.A. e Iberpapel S.A.

En especial y, por último, a mis hijas Ana Clara y Juana Inés por estar y ser parte de mi vida. A mi hermano Alejandro por ser mi sostén, apoyo y contención a la distancia en estos tiempos de pandemia. A Ruben por haber estado en el camino.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN.....	X
.	
SUMMARY.....	XI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. ANTECEDENTES	3
1.1.1. <u>Relevancia de la producción forestal y ganadera</u>	6
1.1.2. <u>Sistemas agroforestales</u>	9
1.1.3. <u>Ambiente y forestación</u>	11
1.2. OBJETIVOS	13
1.2.1. <u>Objetivo general</u>	13
1.2.2. <u>Objetivos específicos</u>	13
1.2.3. <u>Hipótesis</u>	14
1.3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	14
2. <u>DIVERSAS ESTRATEGIAS PARA LA INTEGRACIÓN DE LA PRODUCCIÓN FORESTAL Y GANADERA</u>	16
2.1. RESUMEN	16
2.2. SUMMARY	17
2.3. INTRODUCCIÓN	18
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.4.1. <u>Criterio para la base depurada</u>	25
2.4.2. <u>Descripción de la población objeto de estudio</u>	30
2.5. RESULTADOS	31

2.5.1. <u>Características de los grupos</u>	41
2.5.1.1. Grupo 1.- Ganaderos invernadores.....	41
2.5.1.2. Grupo 2.- Ganaderos arrendatarios criadores y de ciclo completo.....	42
2.5.1.3. Grupo 3.- Ganaderos de ciclo completo.....	43
2.5.1.4. Grupo 4.- Ganaderos criadores.....	43
2.5.1.5. Grupo 5.- Forestales medianos a grandes.....	44
2.5.1.6. Grupo 6.- Forestales integrados verticalmente.....	45
2.5.1.7. Grupo 7.- Forestales que integran ganadería.....	45
2.6. ANÁLISIS.....	46
2.7. CONCLUSIONES.....	55
2.8. BIBLIOGRAFÍA.....	56
3. <u>SISTEMAS SILVOPASTORILES Y OPTIMIZACIÓN</u>	
<u>MULTICRITERIO: RESULTADOS ECONÓMICOS Y BALANCE</u>	
<u>DE CARBONO</u>	62
3.1. RESUMEN.....	62
3.2. SUMMARY.....	63
3.3. INTRODUCCIÓN.....	64
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	67
3.4.1. <u>Modelo de optimización</u>	68
3.4.2. <u>Criterios del modelo</u>	69
3.4.3. <u>Restricciones y Metas del modelo</u>	70
3.4.4. <u>Metas</u>	71
3.4.4.1. Valor presente de la producción ganadera.....	72
3.4.4.2. Valor presente de la producción forestal.....	72
3.4.4.3. Balance de carbono	72
3.4.4.4. Ingresos anuales.....	73
3.4.4.5. Volumen de madera cosechada en todo el período.....	74
3.4.4.6. Madera en pie al final del período de planificación.....	74
3.4.4.7. Volumen de cosecha regulada por periodo.....	75
3.4.4.8. Control de área forestal final.....	76

3.4.5. <u>Encuestas</u>	76
3.4.6. <u>Estudio de caso</u>	79
3.4.6.1. Parcelas permanentes y crecimiento.....	79
3.4.6.2. Cálculo de alimentación energética animal y emisiones de CO ₂ e.....	82
3.4.7. <u>Cálculo de carbono en el sistema biomasa forestal</u>	84
3.4.8. <u>Valoración de los regímenes forestales</u>	85
3.5. RESULTADOS.....	87
3.5.1. <u>Resultado de las encuestas</u>	91
3.5.2. <u>Resultados de los modelos</u>	92
3.5.3. <u>Uso de los recursos en los modelos</u>	100
3.6. DISCUSIÓN.....	106
3.7. CONCLUSIONES.....	111
3.8. BIBLIOGRAFÍA.....	112
4. <u>DISCUSIÓN GENERAL</u>	119
4.1. LINEAMIENTOS FUTUROS.....	123
4.2.	127
BIBLIOGRAFÍA.....	
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	128
6. <u>ANEXOS</u>	135
6.1. COEFICIENTES Y ECUACIONES.....	135
6.1.1. <u>Cálculo de green house gases (GHG), emisión de metano y óxido nitroso</u>	139
6.1.2. <u>Cálculo de GHG, N</u>	140
6.1.3. <u>Emisión de GHG en ganadería</u>	141
6.2. ENTREVISTA A PRODUCTORES.....	145

6.3. DIVERSAS ESTRATEGIAS PARA INTEGRAR LA PRODUCCIÓN GANADERA Y FORESTAL.....	155
6.4. SISTEMAS SILVOPASTORILES Y OPTIMIZACIÓN MULTICRITERIO PARA RESULTADOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES.....	167

RESUMEN

Los sistemas silvopastoriles pueden constituirse en una herramienta de desarrollo siendo una forma de producción en donde se integra en un mismo espacio la actividad ganadera y forestal. A pesar que en Uruguay la actividad forestal ha evolucionado de forma sostenida de la mano de la inversión extranjera, la integración con la actividad ganadera ha sido paulatina; los aspectos productivos y económicos y las formas de integración han sido escasamente estudiados. El estudio de las mejores formas de integración en un mismo espacio puede mejorar aspectos de competitividad de ambos rubros. En base al Censo Agropecuario 2011, se realiza un agrupamiento que deriva en 4 s grupos ganaderos y tres forestales. Se contrasta el uso de los recursos y la estructura productiva y social. Los establecimientos ganaderos forestan un 21% del área, con diferentes estrategias productivas. En un segundo trabajo, se estructura un modelo de decisión multicriterio de largo plazo, teniendo en cuenta las preferencias de una muestra de productores ganaderos. Esto deriva en tres modelos productivos y ambientales con resultados en función de las metas a priorizar. Cuando se prioriza la producción ganadera se consiguen los mejores retornos de esta actividad con los peores resultados en la meta ambiental de balance de carbono. El criterio ambiental debe ser considerado en niveles de jerarquía superior para llegar a valores de balance positivo. Esto permite asimismo cuantificar las distancias para obtener modelos productivos integrados y sustentables. Los modelos propuestos y sus resultados pueden contribuir a la cuantificación de los conflictos productivos y ambientales y comprender en un horizonte temporal de largo plazo las ventajas y desventajas de las diferentes formas de integración. El desarrollo integral futuro de ambas actividades depende del

conocimiento que se genere sobre la mejora de la competitividad de producciones integradas; en ese sentido este trabajo intenta una contribución que permita identificar y evaluar los diferentes modelos de integración.

Palabras clave: grupos silvopastoriles, forestación, ganadería, metas ambientales, competitividad.

LIVESTOCK AND FOREST PRODUCTION Models of productive and environmental integration

SUMMARY

Silvopastoral systems can become a development tool, being a form of production where livestock and forestry activities are integrated in the same space. Although forestry activity in Uruguay has evolved steadily with foreign investment, integration with livestock activity has been gradual; the productive and economic aspects and the forms of integration have been scarcely studied. The study of the best forms of integration in the same space can improve competitiveness aspects of both areas. Based on the 2011 agricultural census, a grouping is made that results in four livestock groups and three forestry groups. The use of resources and the productive and social structure are contrasted. Livestock farms forest 21% of the area, with different productive strategies. In a second work, a long-term multi-criteria decision model is structured, taking into account the preferences of a sample of livestock producers. This results in three production and environmental models with results based on the goals to prioritize. When livestock production is prioritized, the best returns from this activity are obtained with the worst results in the environmental goal of carbon balance. The environmental criterion must be considered at higher hierarchical levels in order to achieve positive balance values. This also allows quantifying distances to obtain integrated and sustainable production models. Proposed models and their results can contribute to the quantification of the productive and environmental conflicts and to understanding the advantages and disadvantages of the different integration models, in long term. The future comprehensive development of both activities depends on the knowledge generated about improving the competitiveness of integrated productions. Therefore, this study attempts a contribution that allows identifying and evaluating the different integration models.

Keywords: silvopastoral groups, afforestation, cattle raising, environmental goals, competitiveness.

1. **INTRODUCCIÓN**

La actividad forestal en Uruguay, se ha desarrollado de manera pujante desde la década del 2000 cuando se implementa la segunda ley forestal (Uruguay. Poder Legislativo. 1988); sin embargo la incorporación de esta actividad en predios agropecuarios no integrados a la industria forestal, fue relativamente escaso en sus comienzos.

El mayor crecimiento productivo del sector forestal se logró a partir de las inversiones extranjeras directas que en un período de 27 años plantaron las bases del moderno sector en Uruguay, pasando de 200 mil hectáreas en el año 2000 (FAO, 2010) a poco más de 1 millón de hectáreas en la actualidad (MGAP, 2019a). La incorporación de forestación en predios ganaderos fue bastante más lenta con un impulso moderado al inicio al que luego sobrevino un período de estancamiento. En los últimos años productores no integrados han incorporado montes en acuerdo con la industria de celulosa en montes densos y rotaciones cortas.

La actividad forestal en predios ganaderos tiene el objetivo de incrementar los ingresos de los productores, abastecer de manera complementaria las industrias del sector y brindar servicios ambientales. Una diversificación del rubro ganadero, incorporando actividades que tiendan a optimizar el uso del suelo y aumenten los ingresos de esos predios, sería beneficioso para la producción agropecuaria nacional. Sin embargo, esta integración no estaría exenta de algunos desafíos: los suelos de mayor aptitud forestal se sitúan en zonas de ganadería de cría con baja productividad natural, especialmente durante el período invernal. Existe un escaso conocimiento de la producción conjunta de madera y carne en cuanto a las mejores prácticas de manejo en ambos procesos productivos, las interacciones entre ambas actividades, la sustentabilidad económica y ambiental de estos sistemas y las externalidades que se generan.

Los cultivos forestales han sido cuestionados en el Uruguay, tanto desde el punto de vista ambiental como social; se les atribuye un uso intensivo de los recursos naturales, el mayor uso del agua (Silveira et al., 2006) y los cambios en las condiciones del suelo en plantaciones comerciales (Delgado et al., 2006); en otras regiones del

planeta, la actividad ganadera ha sido criticada por sus impactos negativos sobre el suelo, el clima y la biodiversidad (Steinfeld et al., 2006).

Desde el punto de vista social la incorporación de la actividad forestal, ha determinado el desplazamiento parcial de la actividad ganadera, así como la venta de predios que otrora fueran establecimientos familiares y pasaron a ser propiedad de empresas forestadoras, lo que determinó un quiebre en la forma de tenencia y la historia rural del país: Uruguay fue durante 200 años tierra de criadores de ganado y ovejas, hasta fines de la década de los 80, el cambio más importante en la producción ganadera fue la incorporación de pasturas mejoradas (Lovell, 1981), asociado a sistemas agrícola ganaderos, lo que permitió incrementar la eficiencia productiva (Barrán y Nahum, 1984), y reducir la erosión del suelo con la rotación de cultivos y pasturas a mediados de los 60 (Durán y García Préchac, 2007). A partir de los años 2000, la incorporación de la forestación y el aumento de superficie de cereales y oleaginosas, resulta en el cambio más importante en la historia rural. La superficie forestada aumenta de 30.000 ha en el año 1980 a 970.000 ha en el año 2012 (DIEA, 2013). Los cultivos agrícolas que se habían mantenido en un área de 300 mil ha entre la década de los 90 y 2000 (DIEA, 2005) pasan a ocupar más de 1.100 mil ha (MGAP, 2011) con un cambio en el uso del suelo hacia sistemas de producción agrícola intensivo; se estima que cerca del 50% del área agrícola se realizó bajo la forma de agricultura continua en la campaña 2005-2006 (Arbeletche et al., 2010). Por un lado, se señala la mayor intensidad de uso del recurso suelo, el parcial abandono de las prácticas de rotación agricultura y ganadería y los efectos negativos que se desencadenan (Pérez Bidegain et al., 2011), como procesos erosivos que se evidencian inclusive en ensayos con siembra directa, sin incorporación de rastrojo. La evolución desde una combinación de producciones (cultivo-ganadería) hacia una especialización (cultivo) es más rentable en el corto plazo, pero podría desencadenar pérdida de recursos naturales y disminución de la rentabilidad a largo plazo. Sin embargo, la combinación de cultivos como el forestal con la producción ganadera, podría provocar sinergias que mejoren la sustentabilidad del sistema de producción.

1.1. ANTECEDENTES

Con la aparición de la actividad forestal, surgen nuevos actores como los productores ganaderos pastoreantes con o sin tierra propia y la figura del contratista forestal lo que plantea un escenario productivo con formas de organización diferentes y más complejas.

Una forma de integración de ambas producciones son los Sistemas Silvopastoriles (SSP), combinación de plantas leñosas perennes como árboles y arbustos, en asociación con plantas herbáceas (cultivos, pastos) y ganadería, en una disposición espacial, una rotación o ambas cosas, en las que generalmente hay interacciones ecológicas y económicas entre los árboles y otros componentes del sistema (Smith et al., 2013). Los SSP son diseñados con el objetivo deliberado de que permanezca durante un período de tiempo extendido del ciclo, la presencia de ambos componentes ganado y árboles, por lo que necesariamente en casos de alta densidad inicial se deben realizar raleos, con la finalidad de mantener la producción de forraje bajo dosel, a medida que la cobertura de copa arbórea aumenta y optimizar la obtención de madera de calidad. Para el caso de Uruguay, son escasas y recientes las experiencias de diseños de silvopastoreo, siendo en la amplia mayoría de los casos, situaciones de montes en crecimiento con altas densidades de plantación, conducido hasta el final de la rotación. El aprovechamiento de pastoreo bajo dosel, por parte del ganado se produce hasta el cierre de copa con una disminución de la oferta de forraje. No existe un diseño y una planificación de manejo a priori, que tenga como objetivo conducir en forma conjunta ambas producciones. Por lo tanto, se define al sistema integrado de madera y ganado (SIMG), como aquellas formas de producción que combinan ambos rubros, abarcando diferentes densidades iniciales y finales de cosecha forestal, por lo que el ganado puede estar una parte o todo el ciclo del cultivo. Los SIMG estarían comprendidas como una forma de los Sistemas Agropecuarios ya que presentan en su conjunto una base común de recursos naturales y productivos, patrones empresariales y limitaciones familiares similares; y para los cuales serían apropiadas estrategias de desarrollo e intervenciones también similares (FAO, 2010). Una unidad del SIMG tiene dos centros decisores el productor de madera y el productor de ganado, si bien

pueden ser la misma figura. A su vez un mismo productor de madera puede albergar varios pastoreantes, lo que puede implicar varios centros decisores, de acuerdo al tipo de contrato realizado con el productor de madera.

El SIMG resultaría en sinergias desde el punto de vista ambiental: la ganadería basada en pasturas tendería a mejorar el balance de N y P y tanto el monte como la pastura fijarían C, mitigando los efectos de las emisiones de metano y óxido nitroso de los animales. Poseen ventajas desde el punto de vista de los servicios ecosistémicos ya que podrían ayudar a disminuir muchos de los impactos negativos de la agricultura, por ejemplo, mediante la conservación de la calidad de suelo, agua y aire, la conservación de la biodiversidad, la reducción del uso de insumos mediante un reciclaje de nutrientes más eficiente y modificando el clima local y global (Smith et al., 2013). Los servicios ecosistémicos contribuyen tanto en forma directa como indirecta al bienestar humano, pudiendo agruparse en a) *Servicios de Aprovechamiento* como provisión de alimentos, agua, fibras; b) *Servicios de Soporte* como el reciclaje de nutrientes y formación de suelo; c) *Servicios de Regulación* como regulación en la calidad y cantidad de agua y mitigación del cambio climático y d) *Servicios Culturales* como la recreación y el paisaje (MEA, 2005).

Si bien los sistemas integrados son una práctica prometedora para brindar servicios de regulación como el secuestro carbono y proporcionar numerosos beneficios ambientales y económicos, es necesario investigar el manejo de los sitios agroforestales, obtener estimaciones precisas y desarrollar políticas y directrices para recomendar prácticas que satisfagan las expectativas de los productores (Udawatta y Shibu, 2012). Existen una serie de impactos económicos que deberían ser identificados y cuantificados, ya que ésta es una de las razones más importantes para la implementación de los SIMG por parte de los productores (Benavides et al., 2009).

Una modificación de largo plazo en el uso del suelo, como sería la forestación en establecimientos ganaderos con campo natural, plantea la pregunta si estos cambios pueden ser sustentables desde el punto de vista económico, ambiental y social. La sustentabilidad es un concepto amplio que abarca esas tres dimensiones, y se define como la capacidad de mantener un stock de recursos naturales iguales a lo largo del

tiempo, de manera que las futuras generaciones recibirán la misma capacidad productiva. Este concepto conocido como Sustentabilidad Débil, fue planteado tempranamente por la economía neoclásica (Hartwick, 1977; Solow, 1974), se considera posible una cierta tasa de sustitución entre capital natural (KN) y capital creado por el hombre (KF). Posteriormente se incorpora la dimensión social, a partir del informe Brundtland en 1987 (WCOD, 1987).

Un ejemplo de KN y concepto de sustentabilidad son los planes de uso de suelo para cultivos anuales (MGAP, 2019b) y la pérdida de suelo que se tolera por la aplicación de las prácticas agronómicas en dichos cultivos, por lo que implícitamente se asume una cierta tasa de reemplazo de KN por KF. En la actividad forestal existen criterios e indicadores de sustentabilidad, al cual Uruguay se ha adaptado a partir de normas internacionales y las presiones para incluir aspectos ambientales y sociales a las exigencias de certificación (MGAP, 2004; UNIT, 2014), lo que se ha transformado en la condición para acceder a los mercados internacionales (Siiskonen, 2013). Los criterios son amplios y cubren aspectos de diversidad biológica, mantenimiento de la producción de los ecosistemas forestales, conservación del recurso suelo y agua y mantenimiento de los beneficios socioeconómicos de largo plazo para cubrir las necesidades de las sociedades (UNIT, 2014). En el Uruguay, los sistemas de ganadería extensiva se señalan como sustentables ambientalmente pero poco sustentables socialmente (Chiappe, 2008). El análisis de la sustentabilidad social puede ser predial o territorial estando fuertemente condicionada por la competitividad del sistema (Tommasino et al., 2007), por lo que se puede deducir que está relacionado con los resultados técnicos y económico-financieros de los predios, que componen la sustentabilidad económica. Sin embargo la sustentabilidad no es un concepto estático y puede evolucionar como lo hacen las sociedades (Bettinger et al., 2009) por lo que no es una tarea menor determinar las necesidades de futuras generaciones.

A los efectos del presente estudio la sustentabilidad del sistema de producción integrado ganado madera, es la resultante de mantener la capacidad productiva en una o más combinaciones que resulten en una rentabilidad promedio en el mediano a largo plazo, con una tasa de reinversión que amortice los activos, que admita la innovación

de futuros procesos, que conserve niveles adecuados de parámetros ambientales del suelo, del agua y balance de gases efecto invernadero, finalmente que los actores sociales de este sistema logren una calidad de vida que les permita el bienestar para permanecer en el mismo.

1.1.1. Relevancia de la producción forestal y ganadera

En la última década ha habido una expansión de la frontera agrícola a escala global, teniendo como causa el impulso de la demanda internacional de alimentos, acompañada por procesos de innovación tecnológica. Se estima que de 11.000 millones de hectáreas de potencial productivo la mayor reserva de área agrícola, unos 450 millones de ha, se encuentran principalmente en Sudamérica y en la Sabana africana (Lambin y Meyfroidt, 2011).

En el Uruguay la producción forestal y agrícola ganadera ha crecido al igual que el resto de la economía; realizando importantes aportes en la generación de empleo y producto, innovación en la organización de la producción y en mejoramiento genético. Esta transformación ha resultado en una mayor generación de riqueza del sector y paralelamente ha puesto en la agenda de los tomadores de decisión la preocupación sobre la intensidad del uso de los recursos naturales.

La contribución del sector primario uruguayo al PBI nacional pasó del 6,2% al 12,4% en el período comprendido entre los años 2000-2011, para luego estar en niveles cercanos al 8% en el 2017 y 2018 (DIEA, 2019, DIEA, 2012, Saez, 2009). Para el año 2018 la producción silvícola aportó alrededor del 11% del sector primario, ocupando el 5,8% del territorio. El aporte de la ganadería al producto bruto agropecuario también creció en términos absolutos, perdiendo participación en términos relativos: del 53 % entre los años 2005 - 2008 se reduce al 49% en el año 2018 (DIEA, 2019, DIEA, 2012). Esta se podría explicar por un cambio en el paradigma productivo, el Uruguay deja de ser el país ganadero y pasa a ser el país agrícola, ganadero y forestal. El uso del suelo agropecuario ha acompañado este cambio, actualmente de un total de 16 millones de ha, la superficie dedicada a la ganadería, ocupa el 73% del área, con 24.800 establecimientos ganaderos familiares (DIEA, 2012). Fácilmente se puede inferir que

éste es el grupo social agrario más importante y de mayor impacto en las políticas públicas a aplicar en el sector.

En el Uruguay, áreas consideradas de producción ganadera a principios de la década anterior, pasan a ser agrícola ganaderas (Pérez-Bidegain et al., 2001). Para que esto ocurriera se conjugaron varios factores; por un lado el mejoramiento genético que permite la obtención de cultivares de cereales y oleaginosas resistentes a condiciones ambientales menos favorables, la disminución del costo de agroquímicos, el aumento de la demanda y la innovación en maquinaria agrícola (Gasparri y Grau, 2009; Reca et al., 2010; Woeste et al., 2010). Todo este conjunto, aplicado en grandes escalas de producción, deriva en la obtención de costos marginales decrecientes y un aumento de la competitividad del sector, lo que significó un cambio en la intensidad de uso de los recursos naturales.

Esta intensificación se constata también en la región reflejada en la composición relativa y el valor de sus exportaciones. El Mercosur incrementó las exportaciones de materias primas agrícolas de un 27% en 1998 a un 39% en el año 2010; en particular Uruguay incrementa en mayor proporción estos guarismos, de un 58% del valor exportado en 1985 pasa al 77% en el año 2010 (Paolino y Hill, 2011). Por lo tanto, Uruguay es un país que depende de manera significativa de la calidad y la disponibilidad de sus recursos naturales para la generación de valor actual y futuro.

La producción forestal se ha desarrollado en el territorio nacional en los últimos 20 años, ocupando alrededor de 1 millón de ha, lo que, sumado a la expansión agrícola, ha resultado en que la producción ganadera de base familiar, la más extendida en el territorio, enfrente menor disponibilidad de área para desarrollarse. En los hechos las dos producciones se han ido integrando con diferentes combinaciones: por un lado, los ganaderos remiten parte de su rodeo a la forestación, en otros casos y en menor proporción se combinan en un mismo espacio ganadería con forestación en predios de productores.

Los SSP diversifican los ingresos de los productores, aseguran mayor biodiversidad y proveen servicios ecológicos como la captura de carbono atmosférico, la conservación de fuentes de agua (Ibrahim et al., 2006).

Los cambios en los sistemas de producción de clima templado a templado cálido, discrepa de la de países situados en climas tropicales. En estos últimos la ganadería se desarrolla en suelos desforestados, provoca erosión y pérdida de servicios ambientales. En los neotrópicos los cambios de uso del suelo, pasando de tierras desforestadas a producción ganadera se calcula de 49-90% (Ibrahim et al., 2006). Por lo tanto, en esta situación los SSP se visualizan como una alternativa de sustentar el recurso natural suelo en la producción ganadera. La preocupación en este tipo de sistemas se evidencia en la abundante bibliografía en la materia.

En base a lo expuesto, una adecuada integración también permitiría amortiguar eventos climáticos y de mercado adversos y actuaría como un regulador de ambas producciones. La producción forestal es una actividad de retorno financiero de mediano a largo plazo, teniendo que hacer frente durante varios períodos a gastos de mantenimiento de cortafuegos, manejo y salarios, entre otros. Los SIMG permitirían aumentar la liquidez de las empresas, así como una mejor integración social y territorial con las producciones tradicionales. Una forma de expansión de la forestación y la ganadería se podría facilitar a partir de un adecuado conocimiento de la producción integrada o complementaria de ambos rubros, lo que posibilitaría que el sistema fuera menos vulnerable a las fluctuaciones de mercado internacional. Los sistemas de producción conjunta ganadero-forestal, originan interacciones productivas, económicas y ambientales, las cuales deben ser profundamente conocidas y cuantificadas. La falta de una evaluación integrada, dificulta la combinación de los rubros de manera sustentable e impide una gestión económica ambiental de mediano a largo plazo.

Los SIMG pueden constituirse en la nueva estrategia de producción sustentable tanto desde el punto de vista social y productivo, como ambiental. El grado de integración está enmarcado en las posibilidades productivas de ambos rubros, como la escala de producción, el tipo de suelos, entre otros. Un análisis profundo de estos

sistemas, de los costos y beneficios productivos y ambientales, posibilitará generar herramientas de decisión que permitan evaluar de manera más precisa las combinaciones adecuadas de los rubros, en un mismo predio o en un mismo territorio.

1.1.2. Sistemas agroforestales

Los Sistemas Agroforestales están formados por la combinación de especies leñosas con cultivos agrícolas o ganado, éstos últimos denominados Sistemas Silvopastoriles, en alguna forma de arreglo espacial o secuencia temporal (Nair, 1993). Existe una amplia variedad de combinaciones de actividades de ganado con árboles que pueden ser considerados SSP, de acuerdo a la escala de plantación y el énfasis en la producción de madera o servicios y ganado. Tomando el enfoque de Nuberg et al., (2009), se puede mencionar las plantaciones de protección cuando se realizan en pequeñas escalas y escasa producción de madera comercial, destinadas a la protección para la biodiversidad y protección de riveras de cauces de agua. En una mayor escala y productividad se sitúan las plantaciones en predios de productores independientes de la industria forestal. Le siguen las plantaciones que se realizan mediante contratos de producción entre la industria y productores independientes; finalmente las plantaciones de mayor escala de producción se realizan en tierras propias de empresas industriales integradas.

Alguno de los sistemas forestales relevados en el Uruguay por Boscana et al. (2019) integran en diferente proporción el ganado en la forestación (Cuadro 1); a mayor densidad inicial de plantación, el tiempo de permanencia del ganado es menor, debido a un sombreado temprano del tapiz.

Cuadro 1.- Algunos ejemplos de sistemas silvopastoriles en el Uruguay.

	Marco de Plantación (m)*	Densidad inicial (árb/ha)	Especies	Objetivos de producción
Líneas simples	4 x 2,3 ¹	1.100	<i>Eucalyptus dunnii</i> ,	Madera para pulpa (MP) MP y leña
	6 x 1,5	1.100	<i>Eucalyptus grandis</i> ,	
	6 x 3	555	<i>Eucalyptus globulus</i> ,	
	6 x 2,5	667	<i>E. globulus subsp maidenni</i>	
Líneas dobles + Callejones	(2) ² (2 x 2) + 8 ³	1.000		MP
	(2) (3 x 2) + 15	555	<i>E. globulus</i>	Madera sólido (MS): aserrado o debobinado.
	(2) (4 x 4) + 16	250	<i>Eucalyptus dunnii</i>	
	(2) (5 x 5) + 20	160	<i>E. grandis</i>	
	(2) (5 x 3,2) + 20	250		
Líneas triples + Callejones	(3) (2 x 2) + 20	620	<i>E. dunnii</i>	MP
	(3) (3 x 2) + 18	476	<i>E. grandis</i>	MS

Fuente: Boscana et al (2019); ¹Distancia entre plantas, ²Número de filas entre callejón, ³Ancho callejones

La producción ganadera se combina con la producción forestal, dependiendo de factores como los objetivos productivos, especie forestal, densidad, tipo de suelos, raza y tipo de animal, entre otros. Los SSP presentan varios desafíos para ser implementados, como la incertidumbre del proceso productivo, la rentabilidad, la productividad y los efectos de la competencia que se establecen con los cultivos y pasturas. Por otro lado, son sistemas poco flexibles dado que el ciclo del cultivo forestal es de largo plazo, difícil de establecer en superficies pequeñas y altos costos de implantación en bajas escalas de producción. El reto más importante en la gestión de SSP es el desarrollo de formas de producción que sean lo suficientemente rentables para asegurar el interés de los productores (Nuberg et al., 2009), que no se produzca una pérdida de valor de los recursos naturales y se generen derrames positivos en la sociedad. Sin embargo, presentan una serie de ventajas: en una adecuada combinación de los rubros, permitirían una mayor estabilidad económica y ambiental y una mejora en el nivel de vida de las comunidades circundantes. Entre los productos y servicios que pueden proveer los árboles se destacan la obtención de madera, leña, postes y en

ciertas especies forestales como las leguminosas proveen forraje al ganado. Los árboles brindan servicios de conservación de suelos, aumento de fertilidad, mejora de microclima, mayor captura de carbono, estabilización de cuencas, protección de la biodiversidad, recuperación de tierras degradadas y control de malezas (Zomer et al., 2009). En particular los SSP se visualizan como una alternativa de sustentar el recurso natural suelo en la producción ganadera, sobre todo en zonas en donde la ganadería se desarrolla en áreas desforestadas, como ocurre frecuentemente en países de clima tropical y subtropical. Las proyecciones de sustitución de tierras con bosques a tierras ganaderas son del orden del 49-90% (Ibrahim et al., 2006).

1.1.3. Ambiente y forestación

La preocupación de la sociedad uruguaya sobre las consecuencias medioambientales de la forestación sobre los recursos naturales, ha sido planteada desde los inicios de la década de los 90. Los estudios en proceso requieren una serie de años para poder evaluar las implicancias en todo el ciclo del cultivo y en sucesivos ciclos forestales. Sin embargo, existen una serie de trabajos encaminados con resultados parciales. Los trabajos en micro cuencas forestales, comenzaron en el año 2000, en donde se midieron diferentes parámetros como la escurrentía, el nivel de napa freática, el grado de erosión del suelo, en áreas con presencia de forestación y comparando los mismos con áreas de pasturas naturales, en micro cuencas forestadas y con pastizales naturales, en la zona de Piedras Coloradas, departamento de Paysandú, (Silveira et al., 2006) y en la cuenca alta del Río Tacuarembó. También en la cuenca del río Tacuarembó, estancia el Cerro, la Universidad de Carolina del Norte llevó adelante un estudio de cuencas apareadas a partir del año 2000. En esta cuenca el trabajo de Von Stackelberg (2005) encuentra que la reducción de agua de escurrentía fue de 15-18 % en pasturas naturales contra 23-27% en el área plantada con *Pinus taeda*. El trabajo de Delgado et al. (2006) da como resultado una mayor evapotranspiración en plantaciones de eucalipto que en pastizal natural. En general la retención o aporte de agua en un territorio depende de las condiciones edáficas y

precipitación (Lima de Paula y Brito Zakia, 2006), siendo su ciclo estudiado en otros países con amplias zonas forestadas como Brasil.

La adopción de la forestación por parte de productores ganaderos, así como la diversificación ha sido analizada en numerosos trabajos, cuantificando las ventajas financieras de incorporar la actividad forestal (Clason, 1995; Grado et al., 2001; Kurtz, 2000). En Uruguay, se evaluó la combinación de ganado pastoreado en áreas de campo natural en bajos, asociado a plantaciones comerciales de *Eucalyptus grandis* en el Departamento de Paysandú (Simeone y Caorsi, 2009) en donde los ganaderos remiten su ganado a la forestación.

Categorías de cría vacuna fueron pastoreadas en plantaciones de *Pinus taeda* de 8-9 años de edad, en el Departamento de Tacuarembó; el lote de terneras pastoreadas en campo natural con forestación registró mayor ganancia de peso en primavera-verano y menor pérdida en otoño invierno, con respecto al lote pastoreado solo a campo natural (Amaya García y Rivas de los Santos, 2012). El efecto de nutrientes en suelos forestados sobre campo natural ha sido estudiado en los últimos 10 años por la comunidad científica de la región; se destacan los trabajos conducidos por el departamento de Suelos y Agua de Facultad de Agronomía que aportan valiosa información sobre la evolución de nutrientes, materia orgánica y agua (Prieto, 2011), así como estudios hidrológicos en cuencas forestadas que resultan en una reducción en la descarga hidrológica de la cuenca, sobre todo en años de niveles de precipitación por debajo del promedio (Silveira et al., 2016).

Una de las preocupaciones manifestada por productores rurales es el efecto de los árboles sobre el tapiz forrajero durante el cultivo forestal. Existen pocos trabajos que investigue las especies forrajeras a lo largo de la evolución de la plantación. En un estudio en Uruguay (Huertas et al., 2020) encuentra mayor presencia de algunas forrajeras de verano como *Paspalum dilatatum* y *Paspalum notatum* en campo abierto con respecto al forraje bajo dosel, mientras que para *Trifolium polymorphum* se encontró mayor frecuencia bajo monte (23,53) con respecto a campo abierto (11,1). Esta situación cambia durante el verano, con mayor frecuencia de algunas forrajeras bajo dosel arbóreo. En cuanto al índice de diversidad de forrajeras este resultó

levemente superior bajo dosel (1,69), comparado con campo abierto (1,55). Se puede decir que no existen resultados concluyentes en cuanto a la diversidad forrajera en ambas situaciones.

La información sobre aspectos ambientales y económicos condiciona la incorporación de la forestación en predios ganaderos en el Uruguay (Bussoni et al., 2015). El trabajo encuentra que la preocupación de los productores sobre la disponibilidad de agua, la mayor presencia de fauna en zonas ovejeras y la futura reconversión del suelo, son importantes barreras que operan en la integración de los rubros.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

El presente trabajo tuvo como objetivo contribuir al desarrollo social, económico y ambiental de los territorios capaces de albergar los sistemas integrados, como alternativa productiva a los sistemas puros.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Caracterizar los principales Sistemas Integrados Madera Ganado existentes en el país y sus arreglos organizacionales.
- b) Integrar variables económica-productivas en modelos de decisión.
- c) Estimar los efectos ambientales en los Sistemas Integrados basado en información empírica e información secundaria.
- d) Identificar niveles de integración sustentables y evaluar el desempeño frente a los sistemas de producción puros.

1.2.3. Hipótesis

Este trabajo examina la evolución de ambos rubros productivos y analiza la sustentabilidad desde el punto de vista de los productores ganaderos y forestales.

Las hipótesis que guiaron este trabajo fueron las siguientes:

- a) Es posible identificar grupos de productores según diferentes estrategias productivas de integración forestación y ganado.
- b) Los Sistemas Integrados Madera Ganado son potencialmente más estables económica y financieramente frente a los sistemas puros.
- c) Los Sistemas Integrados son más productivos y mejoran el desempeño ambiental frente a los sistemas puros.

1.3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El trabajo se desarrolla en los siguientes tres capítulos, el Capítulo 2 versa sobre las formas de organización productiva, el uso de los recursos y las posibles estrategias productivas por grupos de productores que integran la ganadería y la forestación en una unidad productiva. El artículo publicado sobre esta parte del trabajo se encuentra en los Anexos.

Luego, el siguiente capítulo y en base a un estudio de caso, desarrolla un modelo multicriterio. Es importante señalar que este capítulo se basa en los resultados obtenidos a partir de un proyecto INIA FPTA300 que dio los recursos para poder instalar un ensayo en uno de los predios y poder hacer un seguimiento riguroso y evaluación de medidas de producción forestal y forrajero. Esta etapa dio los insumos necesarios para construir un modelo de optimización multicriterio, que permite obtener subconjuntos que sean compatibles con las metas del tomador de decisiones en base a encuestas realizadas. Se establecen los criterios y la jerarquía en un proceso que incorpore el aspecto productivo y ambiental. Un segundo artículo publicado en base a esta parte de la investigación se encuentra disponible en los Anexos.

De esta manera se va desde una visión amplia de territorio que integra ambas producciones y analiza la evolución de ambas producciones, los cambios en las principales variables productivas, a un estudio basado en un caso real, pero combina algunos elementos de los grupos ganaderos. Esto se plasma en un modelo de largo plazo que da como resultado la evolución de sus variables productivas, económico financieras y la meta ambiental.

Finalmente, en el último capítulo, se realiza una discusión general de los principales resultados y conclusiones del trabajo y se plantean posibles líneas de trabajo a partir de estos resultados.

2. DIVERSAS ESTRATEGIAS PARA LA INTEGRACIÓN DE LA PRODUCCIÓN FORESTAL Y GANADERA

2.1. RESUMEN

Los cambios globales en el uso de la tierra y el incremento de las plantaciones forestales han reducido el área ganadera en el Uruguay, con la aparición de sistemas silvopastoriles como una forma de poder integrar en el territorio ambas actividades. Este trabajo busca cuantificar estos nuevos sistemas e identificar la diversidad de patrones de integración de la forestación y la producción ganadera. El trabajo se basó en los microdatos del Censo General Agropecuario 2011, aplicando el análisis de Escalamiento Multidimensional (MDS). Se trabajó sobre las variables de tenencia y uso de la tierra, sistema ganadero y variables socio-económicas continuas y categóricas. Sobre las variables síntesis obtenidas de MDS, se aplicó el análisis de Cluster que resulta en siete grupos identificados. Los primeros cuatro grupos son productores ganaderos en donde el rol de la forestación es la provisión de servicios a la ganadería y la producción de madera. Estos grupos se diferencian principalmente, en la orientación ganadera, la propiedad de la tierra, el tamaño y la superficie de mejoramiento forrajero, Los restantes tres grupos son los forestadores que albergan ganado propiedad de la empresa como el Grupo 5 y 7, o de propiedad de otros productores como el Grupo 6. Estos tres grupos difieren en la organización legal como forestadores individuales o corporaciones, el tamaño del predio y la integración con la ganadería. La identificación de estas estrategias contrastantes brinda elementos para futuras investigaciones y políticas de sustentabilidad de los sistemas silvopastoriles en la región.

Palabras clave: sistemas silvopastoriles, pastoreo, cluster, Uruguay, Sudamérica

DIVERSE STRATEGIES FOR INTEGRATION OF FORESTRY AND LIVESTOCK PRODUCTION

2.2. SUMMARY

Global changes in land use and increased forestry plantations have reduced the livestock area in Uruguay, and silvopastoral systems have recently emerged. This paper aimed to quantify these new systems, and to identify the diversity of patterns of integration of forestry and livestock production. Based on detailed data from the 2011 Uruguay Census of Agriculture a principal components analysis was performed on land tenure, land use, livestock management, and socio-economic continuous and categorical variables, followed by a cluster analysis, which resulted in seven groups. The first four groups were primarily livestock farmers, with forests providing services to livestock farming, and timber production coming third or second in economic importance. These groups differ mainly in the land ownership and farm size. The other three groups were primarily foresters, with livestock grazing in their lands. These groups differ in the legal organization (individual foresters vs corporations), farm size, and integration with livestock. The identification of these contrasting strategies for integration can inform future research and policies for the sustainability of silvopastoral systems in the region.

Keywords: silvopastoral systems, grazing, cluster, Uruguay, South America

2.3. INTRODUCCIÓN

A diferencia de otras regiones forestales, la mayor parte de las forestaciones en Uruguay, se encuentran bajo la propiedad de compañías extranjeras, que concentran el 88% del área forestada. El resto de la superficie bajo árboles no es menos importante tanto desde el abastecimiento de madera como de la estrategia que pueden fijar los productores no integrados a la industria. La dinámica de las tierras forestadas está ligada a los cambios de uso de la tierra en otros países (Barbier et al., 2010) lo que en Uruguay ha contribuido a cambiar la superficie dedicada a la ganadería. A mediados de los 80 el área ganadera ocupaba 13,8 millones de ha de un total de 15,5 millones de ha (OPP, 1992) actualmente esa superficie es de unas 12 millones de ha (DIEA, 2013), a pesar de lo cual Uruguay sigue siendo un país ganadero en la ocupación de su territorio. Se estima que entre los años 2000 y 2011 la reducción de la superficie ganadera ha sido de 1,3 millones de ha (MGAP, 2015a, MGAP, 2015b). La forestación irrumpe en áreas ganaderas, para luego integrarse en mayor o menor medida, por lo que deberían buscarse aquellos modelos de integración que optimicen las sinergias de ambas producciones.

Entre los años 1995 y 2013 la dotación ganadera para 4 zonas consideradas disminuye en 2,08 millones de cabezas de ganado (Cuadro 2). En el mismo sentido la superficie de pastoreo se contrae en 3,8 millones de ha, lo que representa 30% menos de área para la actividad ganadera (Figura 1). Por el contrario, en la Figura 1 la carga ganadera vacuna (UG/ha), representado por líneas para las zonas: Litoral, Norte, Centro y Sureste, se puede observar que UG/ha crece en promedio 9% para las 4 zonas para luego decrecer 2% entre 2007-2010 lo que da un aumento de carga promedio de 2,3% para todo el período.

Amén de la expansión de la superficie forestada, la trayectoria de las existencias ganaderas se debe a otros factores como por ejemplo, la demanda de carne y lana en mercados externos y el mercado de cereales y oleaginosas. Es así que la evolución de las existencias ganaderas ha tenido oscilaciones con un mínimo reportado en el año 2010 de 11 millones de cabezas vacunas, un máximo de 12 millones en el año 2016, y una baja del rodeo ovino (INAC, 2020). El factor predominante es la evolución

reciente del área forestada en Uruguay que ha pasado de 661.000 ha en el año 2000 (MGAP, 2003) a poco más de 1.000.000 ha afectadas (MGAP, 2019).

Cuadro 2.- Evolución de existencias ganaderas (miles de UG), área de pastoreo (miles ha) y carga ganadera (UG/ha) en 4 zonas del Uruguay.

Zona	Años	1995	2000	2005	2007	2010	2013	Zona	1995	2000	2005	2007	2010	2013
<i>Litoral</i>	UG (miles)	1.953	1.539	1.605	1.379	1.255	1.148	<i>Centro</i>	1.827	1.5637	1.706	1.613	1.398	1.407
	Área pastoreo con monte (miles ha)	2.860	2.259	2.141	1.892	1.791	1.623		2.540	2.181	2.148	2.058	1.914	1.790
	Área pastoreo sin monte	2.758	2.204	2.081	1.846	1.729	1.548		2.499	2.150	2.116	2.032	1.885	1.754
	UG/ha (con montes)	0,68	0,68	0,75	0,73	0,70	0,71		0,72	0,72	0,79	0,78	0,73	0,79
	UG/ha (sin montes)	0,71	0,70	0,77	0,75	0,73	0,74		0,73	0,73	0,81	0,79	0,74	0,80
<i>Norte</i>	UG	1.691	1.392	1.442	1.372	1.415	1.381	<i>Sureste</i>	3.193	2.875	2.990	2.875	2.767	2.649
	Área pastoreo con monte	2.341	1.913	1.958	1.865	1.846	1.745		4.577	3.999	3.943	3.788	3.671	3.508
	Área pastoreo sin monte	2.295	1.8958	1.902	1.800	1.781	1.696		4.509	3.939	3.875	3.717	3.591	3.429
	UG/ha (con montes)	0,72	0,73	0,74	0,74	0,77	0,79		0,70	0,72	0,76	0,76	0,75	0,75
	UG/ha (sin montes)	0,74	0,73	0,76	0,76	0,79	0,81		0,71	0,73	0,77	0,77	0,77	0,77
<i>Resto del país</i>	UG	2.483	1.908	2.139	1.838	1.849	1.885	<i>Nacional</i>	11.147	9.278	9.883	9.076	8.685	8.471
	Área pastoreo con monte	3.323	2.810	2.787	2.610	2.569	2.494		15.641	13.162	12.9769	12.213	11.791	11.157
	Área pastoreo sin monte	3.292	2.794	2.772	2.596	2.554	2.480		15.353	12.983	12.746	11.991	11.540	10.908
	UG/ha (con montes)	0,75	0,68	0,77	0,70	0,72	0,76		0,71	0,71	0,76	0,74	0,74	0,76
	UG/ha (sin montes)	0,75	0,68	0,77	0,71	0,72	0,76		0,73	0,72	0,78	0,76	0,75	0,78

Fuente: Datos anuales Dicose 1995 y microdatos Dicose, años 2000 al 2013 (MGAP-DICOSE; 2015a; MGAP-DICOSE, 2015b).

La composición entre la producción de madera y la producción de carne en predios agropecuarios, se presenta en una amplia variedad de combinaciones que pueden ser considerados SSP, de acuerdo a la escala de plantación y el énfasis en la producción de madera o servicios.

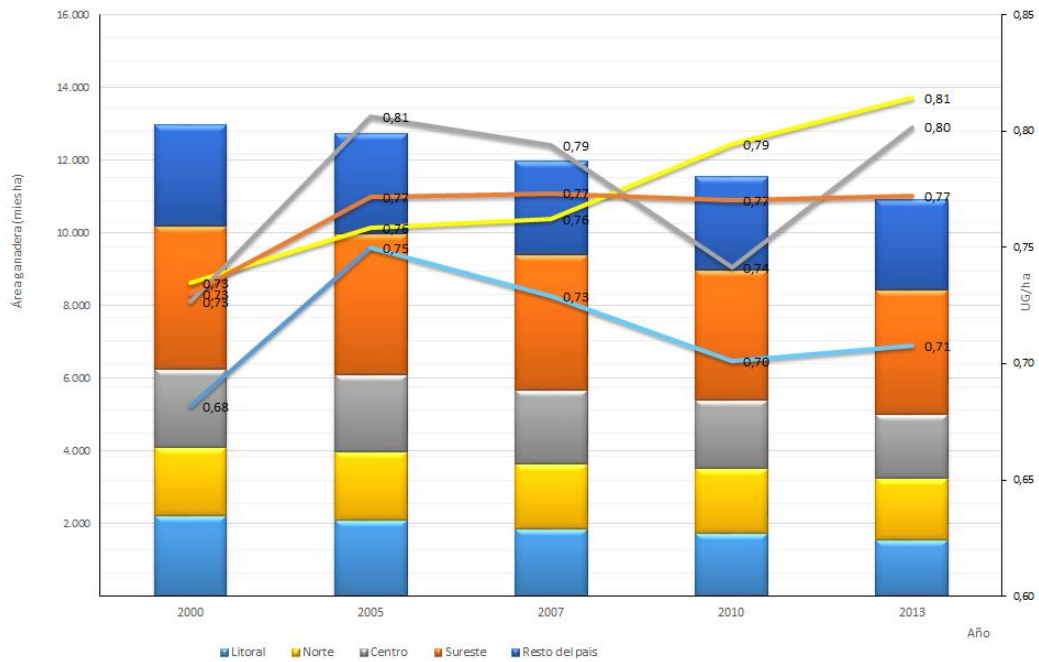


Figura 1.- Evolución de área ganadera y carga ganadera en 4 zonas del Uruguay

Este abanico recorre desde el extremo de plantaciones de protección para el control de agua, biodiversidad y protección de riveras; en un punto intermedio se situarían las plantaciones forestales en establecimientos de productores independientes. Aumentando la escala de producción le siguen los contratos de producción que realiza la industria con productores independientes y en el extremo derecho como se muestra en la Figura 2, la producción forestal en tierras propias de empresas industriales integradas (Nuberg et al., 2009), en donde se encuentran los predios de mayor productividad y escala de producción

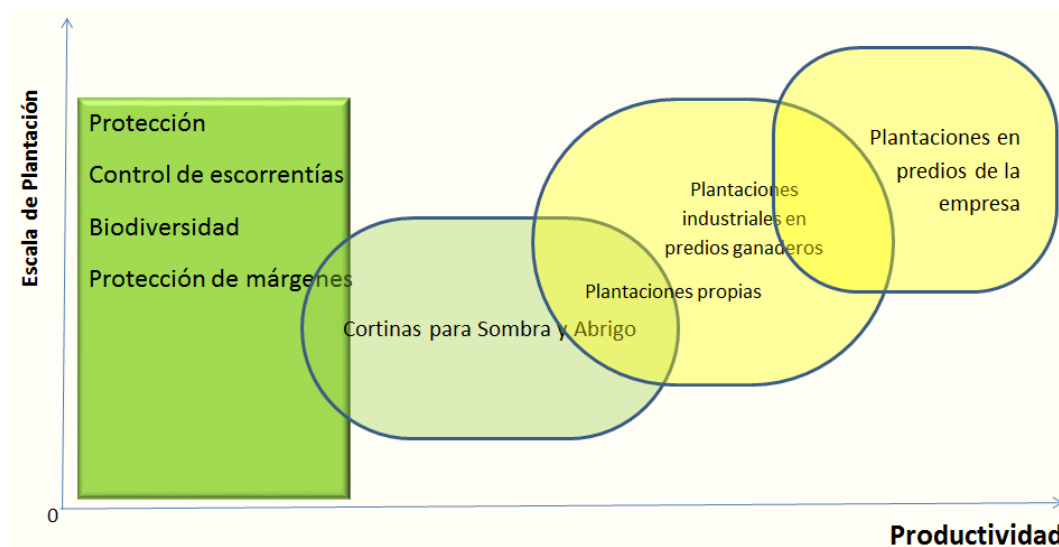


Figura 2.- Formas de forestación en diferente escala y productividad forestal, en base a Nuberg et al. (2009)

La combinación de técnicas de agrupamiento, ha sido utilizada en diversas producciones rurales, permitiendo definir patrones de preferencias que no sería posible cuando se analiza una muestra en conjunto (Collado et al., 2015), agrupar sistemas de producción en base a aspectos técnicos, económicos y productivos (Gaspar et al., 2007; Goswami et al., 2014), con algunas limitantes en lo que refiere a agrupamientos distantes geográficamente (Madry et al., 2013). El agrupamiento nos permite establecer relaciones entre el productor, el lugar físico donde se lleva a cabo el proceso y el medio ambiente circundante (Ferreira, 1997). Agrupamientos de forestadores, principalmente los no integrados verticalmente en el Hemisferio Norte, han tenido el objetivo de identificar a) cuáles son los factores que inciden en los momentos de cosecha forestal, la silvicultura y el manejo en sus montes (Jennings y van Putten, 2006), b) cual es la actitud hacia la forestación (Gramann et al., 1985), c) los objetivos y la utilidad asignada al bosque por parte de los productores (Ingemarson et al., 2006; Urquhart y Courtney, 2011), los modelos de trabajo y administración (Novais y Canadas, 2010). Los grupos en general presentan una gran amplitud de superficie; por ejemplo, Ingemarson et al., (2006) agrupa inicialmente sobre una base de 5 a 8,000 ha de bosque. En otros estudios se homogeniza la superficie de productores ganaderos con forestación y se agrupan en base a indicadores económico-productivos (Gaspar et

al., 2007). Las variables para realizar los agrupamientos responden en algunos casos a los objetivos contrapuestos, entre producción y conservación de los bosques de productores no integrados: sobre una revisión de seis estudios previos Boon et al. (2004) clasifica 5 grupos forestales: el economista, el multiobjetivo, el autosuficiente, el recreacionista y el pasivo, mientras que Richter y Lewis (2007) identifica el valor de legado como variable clasificatoria.

En Uruguay, existen antecedentes para productores ganaderos que identifican la actitud hacia la incorporación tecnológica y las variables de motivación (Ferreira, 1997), las trayectorias tecnológicas de productores ganaderos (Mondelli y Picasso, 2001) y agrupamientos aplicados a productores ganaderos familiares (Prieto y Wins, 2007), una tipología para el Norte del país construida en base a la propiedad de la tierra y el ganado (Carriquiry et al., 2012). Uno de los tipos identificados son productores ganaderos que mandan su ganado a las empresas forestales, arrendando esa superficie de pastoreo bajo montes. Sin embargo, existe poca evidencia más allá de estos trabajos citados, que intenten comprender los grupos de productores que hayan integrado ambas producciones o forestadores que alberguen ganado en sus montes para el sector rural en su conjunto.

La evolución del uso del suelo es el resultado de la toma de decisión de unidades de producción individuales. Son los productores en sus diversas formas de organización los que deciden incorporar en mayor o menor medida las actividades productivas, apoyados en su entorno y circunstancias (Ferreira, 1997). En ese sentido el resultado de este trabajo refleja el pasado reciente en el agro uruguayo, el cual se puede abordar desde una perspectiva económica evolucionista (Audretsch, 2015; Heese, 1992), a los efectos de entender de manera más integral su resultado. La obtención de grupos productivos que combinan ambas actividades (ganadería y forestación) puede ser un aporte a los efectos de las políticas públicas y de los productores forestales en el Uruguay.

Se realiza la identificación de grupos de productores de manera de identificar las formas de articulación de la forestación con la ganadería y los sistemas de producción que albergan estas producciones. A través de entender en los grupos la organización

productiva, el empleo de los recursos productivos y recursos naturales se puede identificarlos modelos productivos e inferir la sostenibilidad de esos grupos.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de obtención de agrupamiento y la identificación de las principales relaciones entre ganadería y la forestación se realizó en tres etapas:

I) A partir de los microdatos del Censo General Agropecuario 2011 (CGA), y posterior obtención de una base depurada,

II) Obtención de las variables síntesis aplicando la técnica de Escalamiento Multidimensional (EM) o MDS por sus siglas en inglés; a continuación la identificación de los grupos a partir de Análisis de Cluster empleando algoritmo de Ward (Ward, 1963), una técnica de agrupamiento jerárquico aglomerativa que define los grupos en base a la mínima varianza de los individuos en cada grupo, o la máxima similitud en el grupo con respecto a características específicas.

III) Interpretación de los resultados obtenidos.

El método de Ward se ejecuta con el algoritmo recursivo de Lance-Williams (Everitt et al, 2011); lo que se busca es minimizar la distancia euclideana entre los grupos. Como señala Ward (1963) al agrupar estamos “perdiendo” información que se mide como la varianza entre los clusters preliminares. Dado dos grupos P y Q , que se unen en un grupo R ($P \cup Q$), la heterogeneidad del grupo R se mide como la suma de las varianzas de los p componentes de x_i : $I_R = \sum_{i=1}^{n_R} d^2(x_i, \bar{x}_R)$, en donde x_i es la observación del individuo i , \bar{x}_R es la media aritmética, n_R es el número de observaciones dentro del grupo R (Härdle y Hlávka, 2007). En cada paso del algoritmo se unen los grupos P y Q que dan el menor I_R .

El agrupamiento tiene como finalidad mejorar la comprensión e interpretación de ese conjunto de datos. Al inicio del proceso cada objeto es considerado un cluster, en el paso siguiente se crea un nuevo cluster uniendo los objetos más próximos, pudiendo computarse la disimilaridad o distancia con otro cluster formado.

El Censo Nacional Agropecuario 2011 (MGAP, 2013) que se realiza cada 10 años en Uruguay, releva todos los predios rurales, siendo la base más completa que dispone el país; sobre esta base se obtuvo la población objetivo del trabajo.

Existen una serie de técnicas de análisis multivariado que asumen distribución normal de los datos como el análisis de componentes principales (Rabe-Hesketh y Everitt, 2004). En el presente trabajo, se utiliza el método de Multidimensionamiento Escalar (Multidimensional Scaling) que es una técnica adecuada para uso de variables tanto cualitativas como cuantitativas (Borg y Groenen, 2005). Consiste en una reducción de dimensiones que opera directamente en la matriz de distancias. Esto permite obtener variables síntesis que representan los objetos en un hiperplano, a diferencia de la técnica de Componentes Principales que opera sobre la matriz de datos en forma directa (Everitt y Hothorn, 2011).

El análisis de cluster permite agrupar los casos de estudio; el proceso de decidir el número de grupos se realizó en base a un criterio mixto: por un lado se tomó en consideración el Índice de Duda-Hart (Mooi y Sarstedt, 2011), por otro lado se realiza una observación de los grupos obtenidos que mejor expliquen las diferencias entre los mismos. Finalmente se obtienen 7 grupos. Se comparan las diferencias de las medias entre grupos utilizando el test de varianza no paramétrica de Kruskal Wallis modificado (Caci, 1999). Se aplica el test de chi cuadrado para variables categóricas y el test de Fisher cuando el número de observaciones es menor a cinco. Finalmente, todos los análisis se realizaron con el paquete estadístico Stata (SataCorp, 2015).

2.4.1. Criterio para la base depurada

La base de datos original del Censo, está compuesta por 12.597 predios agropecuarios con ≥ 1 ha forestada, sobre este conjunto se identificaron 1.019 casos que abarcan predios de más de 100 hectáreas en propiedad, con producción forestal y ganadera, predios forestales que alberguen ganado en sus montes y predios ganaderos con más del 5% forestado. Cuando existe área forestada en un predio, el valor mínimo registrado es una hectárea, lo que incluye una gran variedad de casos. Con el fin de

que el agrupamiento refleje SSP mejor definidos y en base a experiencia previa, se consideraron los casos de predios forestales o ganaderos a partir del 5% forestado, lo que a priori se considera, abarcan situaciones de objetivos variados en los diferentes predios como: a) producción de madera b) brindar servicios a la ganadería y, c) objetivos mixtos de los montes. Para el análisis e interpretación de los grupos, se tomó en cuenta cuatro zonas con alta representatividad de áreas forestadas en base al trabajo de (Bussoni et al., 2015): Zona Litoral (Paysandú, Río Negro y Soriano), Zona Norte (Tacuarembó y Rivera), Zona Centro (Durazno, Flores y Florida) y Zona Sureste (Canelones, Cerro Largo, Lavalleja, Maldonado, Rocha y Treinta y Tres).

Para la caracterización de los grupos se emplearon 18 variables originales (11 continuas y 7 categóricas) y 17 variables creadas (15 continuas y 2 categóricas). Se dividen en cinco grupos de variables: a) Tenencia, b) Uso del suelo, c) Nivel tecnológico ganadero e intensificación d) Producción ganadera y especialización ganadera y e) Variables sociales (Cuadro 3).

Cuadro 3.- Variables originales y creadas a partir del CGA2011 empleadas en los grupos.

Variable	Unidad	Código Variable	Variable (C: Continua, Ca: Categórica	Observaciones O= Original Cr= Creada.
Tenencia				
Área en Propiedad	ha	sup_propiedad	C	O
Área total	ha	sup_total	C	O
Área no propia	ha	areanoprop	C	O
Proporción de la Propiedad (Área Propiedad/Área total)	%	suprop_suptot	C	Cr
Ocupación productiva del territorio (Uso del Suelo)				
Montes artificiales	ha	ma	C	O
Pino	ha	pino	C	O
Eucalipto	ha	eucalipto	C	O

Variable	Unidad	Código Variable	Variable (C: Continua, Ca: Categórica	Observaciones O= Original Cr= Creada.
Proporción montes	%	propma_sup1 (sobre área total)	C	Cr
Área ganadera	ha	areaganadera	C	Cr
Proporción Área ganadera	%	prop_area_ganadera = areaganadera (forrajeros+praderas+cn) /sup.total	C	Cr
Nivel tecnológico ganadero e intensificación				
Área con pasturas plurianuales	ha	pp	C	O
Área con mejoramientos	ha	area_mejorada = (sup_cult_forraj_anual + sup_pradera_artif)	C	Cr
Proporción Área Mejorada	%	prop_area_mejorada (área mejorada/área ganadera)	C	Cr
UG/ha	UG/ha	ug_ha (ugt/sup.total)	C	Cr
UG/ha área ganadera	UG/ha	ugt_area_ganadera	C	Cr
UG/ha área ganadera y forestal	UG/ha	ugt_area_ftalyganadera	C	Cr
Mano de Obra contratada	Nº personas	mocontratada	C	O
Mano de obra contratada/1000 ha	--	MO_1000	C	Cr
Asesoramiento profesional	--	Ing_Agr Veterinario Técnico otros	Ca	O
Índice de Contratación servicios		Índice-Servicios	Ca	Cr
Producción ganadera, carga animal y orientación ganadera				
Unidades Ganaderas en establecimiento	UG	ugt	C	Cr
UG Vacunos	UG	TotalUGVac	C	Cr

Variable	Unidad	Código Variable	Variable (C: Continua, Ca: Categórica	Observaciones O= Original Cr= Creada.
UG Ovinos	UG	TotalUGOvino	C	Cr
Campo Natural	ha	cnr	C	O
Superficie praderas permanentes	ha	sup_praderas	C	O
Relación UG Ovino/ UG Vacuno	%	ugo_ugv	C	Cr
UG por superficie forestada		ugt_ma	C	Cr
		1: Cría, 2: Invernada, 3: Ciclo		
Orientación Ganadera	--	Completo, 4: Sin ganado vacuno; Ovejero	Ca	Cr
Pastoreo de ganado (propio o ajeno) bajo los montes forestales	--	ganado_monte	Ca	O
VARIABLES SOCIALES Y DE UBICACIÓN: DEPARTAMENTO, EDUCACIÓN, EDAD, SEXO, ETC.				
Departamento	--	dpto	Ca	O
Edad (es el rango de edad)	años	edad	C	O
		1: Ninguno, 2: Primaria, 3: Secundaria, 4: Técnica, 5: Universitaria, 6: Otros		
Nivel Educativo			Ca	O
Residencia en la explotación	--		Ca	O
Fuentes de Ingreso en la Unidad Productiva	--	Forestación, Vacunos, Ovinos	Ca	O
Tipo de Empresa o Sociedad (Organización jurídica)	--	Unipersonal, SA , SRL, etc.	Ca	O

La Contratación de Servicios es una variable categórica creada, que estima indirectamente la mano de obra contratada fuera del predio. Se crea a partir de la suma

de valores ponderados directos y su valor expresa un estimativo de la cantidad de mano de obra externa para faenas en el predio. Por ejemplo, la plantación es una tarea altamente demandante y el valor de 8 reflejaría un número estimado de personas contratadas para la faena. Los valores asignados fueron: servicio de plantación forestal (8), cosecha forestal (8), manejo de poda y raleo (7), aserradero (6), cosecha en general (5), servicios de laboreo (4), aplicación de agroquímicos (3) y contratación de pastoreo (2), en orden decreciente. Las empresas forestales se caracterizan por tener un bajo nivel de contratación por unidad de superficie y ejecutar la realización de labores en sus predios de manera externa, por lo que esta variable refleja la mano de obra externa, que es contratada en la unidad productiva. Si bien los servicios contratados reflejan una situación particular de ese año en el predio, este valor nos permite obtener indicios de la mano de obra indirecta contratada fuera del establecimiento.

Considerando la categoría Tenencia, la variable *Propiedad* se obtiene de la relación del *Área en propiedad* de la unidad y el *Área total* que incluye todas las formas de tenencia.

En la categoría Ocupación productiva del territorio, la variable *Proporción montes* surge de la superficie de montes artificiales sobre el *Área total*; el *Área ganadera* es la sumatoria de la superficie de cultivos forrajeros anuales, praderas, campo natural sembrado en cobertura, campo natural fertilizado y campo natural; la *Proporción Área ganadera* es la relación de la anterior variable sobre la superficie total.

En Nivel tecnológico ganadero e intensificación, el *Área con mejoramientos* se obtiene de sumar las superficies de cultivos forrajeros anuales y praderas artificiales, la variable *Proporción Área Mejorada* se obtiene de la relación entre las variables *Área con mejoramientos* y *Área ganadera*. Las unidades ganaderas (UG) se obtienen de las categorías ganaderas y la relación con la categoría vaca de cría de 380 kilogramos de peso con ternero al pie (1 UG), luego las UG en el predio se relacionan con las variables *Área total*, *Área ganadera*, *Área ganadera y forestal*, y se obtiene *UG/ha*, *UG/ha área ganadera* y *UG/ha área ganadera y forestal*, respectivamente. La variable *Mano de obra contratada/1000 ha* se utiliza para comparar número de asalariados de

manera independiente de la superficie bajo producción; se obtiene de expresar la variable *Mano de Obra contratada* en proporción a 1.000 has de superficie.

Las variables creadas en *Producción ganadera, carga animal y orientación ganadera* fueron *Unidades Ganaderas en establecimiento* siendo la suma de todas las UG, luego discriminados en las variables *UG Vacunos* y *UG Ovinos*, la variable *UG por superficie forestada* es la resultante de dividir *Unidades Ganaderas en establecimiento* y la superficie de montes (variable Montes artificiales), finalmente la variable categórica *Orientación Ganadera* que se obtiene de la relación entre cabezas de Novillos y la suma de Vacas de cría y Vaquillonas; si la relación es >2 se considera que establecimiento desarrolla un sistema de invernada, $<0,2$ sistema de cría, valor entre 0,2 a 2 sistema de ciclo completo; finalmente si la relación de cabezas ovinas con respecto a cabezas vacunas es $>$ a 3 se considera sistema ovino.

2.4.2. Descripción de la población objeto de estudio

Los 1.019 predios analizados agrupan el 58% de la superficie forestada, sobre un total de 1.071.323¹ ha y el 9% de las Unidades Ganaderas (UG) en predios con forestación.

Se describe la población objetivo a partir de los valores medios de 4 zonas y resto del país (Figura 3) para las variables de propiedad, uso del suelo y orientación productiva. Los predios se distribuyen en un 39% en la zona Sur y Este, 17% en la Zona Litoral, 15% en la Zona Norte y 12% en la Zona Centro. El restante 17 % se encuentra en el resto del país. Los valores medios de propiedad, producción forestal y ganadera, presentan valores medios mayores en las zonas Litoral y Norte, y se diferencian con respecto a la Zona Centro y Sureste, que presentan un área menor. Es de destacar que todos los resultados presentan un coeficiente de variación mayor al 100% lo que refleja la diversidad de situaciones productivas dentro de la especialización forestación y ganadería con forestación.

¹ Valor obtenido de la población de 12.597 predios que declaran en el CGA_2011 más de 1 ha forestada,

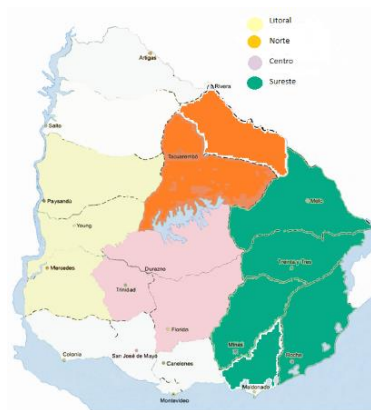


Figura 3.- Zonas consideradas para Uruguay

En cuanto a la especialización ganadera todas las zonas, presentan la actividad cría como predominante, no presentando diferencias entre las zonas. Sigue en orden de importancia la producción de ciclo completo e internada, respectivamente. Si consideramos todos los predios que presentan montes implantados en Uruguay (12.597 predios), la base depurada que conforma la población de análisis (1.019 casos) representa el 77% del área forestada y el 12,4% del área ganadera, por lo que esta base abarca una participación importante del territorio nacional con predios que combinan ambas actividades.

2.5. RESULTADOS

Se presentan los siete grupos obtenidos a partir del análisis de Cluster, para posteriormente describir el uso de los recursos, la organización y principales características. Las variables que más diferencian los grupos son aquellas asociadas con el uso del suelo, el tipo de organización legal, el índice de contratación de servicios, la fuente de ingreso principal y la orientación ganadera.

Los grupos resultantes son:

Grupo 1.- Ganaderos internadores,

Grupo 2.- Ganaderos arrendatarios criadores y ciclo completo,

Grupo 3.- Ganaderos de ciclo completo,

Grupo 4.- Ganaderos criadores,

Grupo 5.- Forestales con ganadería de ciclo completo,

Grupo 6.- Forestales que dan tierras a pastoreo e integrados verticalmente,

Grupo 7.- Forestales que integran ganadería de cría.

La producción agropecuaria es la principal fuente de ingreso, en aproximadamente un 80 % de la población. Los primeros cuatro grupos (Grupo 1 al Grupo 4) son predios ganaderos siendo la producción vacuna y ovina la primera y segunda fuente de ingreso, respectivamente. Estos grupos, presentan en común que el área dedicada a la ganadería es mayor al 71% de la superficie, la relación entre la unidades ganaderas (UG) y el área del predio forestada es mayor a 8 (Cuadro 4) y presentan una carga ganadera entre 0,68 a 0,74 UG/ha. Considerando solo el área de pastoreo este valor es de 0,93-1,24 UG/ha, por encima del promedio nacional de 0,76 UG/ha. La proporción forestada en el predio se ubica en un rango entre 17 al 25%, el cual es una proporción importante comparado con al valor de 1% promedio de montes en predios ganaderos en el promedio nacional.

Cuadro 4.- Proporción de áreas productivas y carga ganadera (UG/ha) en los grupos ganaderos (Grupo1 a Grupo4) y grupos forestales (Grupo 5 a Grupo 7).

VARIABLES	Grupos Ganaderos	Grupos Forestales
Proporción Área Ganadera (%)	> 71	< 31
Proporción área forestada (%)	17-25	> 52
UG/Área forestada	> 8	< 0,21
UG/Área predio	0,68-0,74	0,14

Los grupos restantes (Grupo5 a Grupo 7) está compuesto por productores forestales o empresas, en donde el área forestada ocupa en promedio al menos 52% del área. Asimismo, el área en producción es en su mayoría área de propiedad (92-

99%), finalmente la carga ganadera en el área productiva es entre 0,07-0,30 UG/ha, valores muy por debajo de la media de los ganaderos de 0,74-0,78 UG/ha.

Cuadro 5.- Recursos productivos en cada grupo.

	<i>Gr. 1</i>	<i>Gr. 2</i>	<i>Gr. 3</i>	<i>Gr. 4</i>	<i>Gr. 5</i>	<i>Gr. 6</i>	<i>Gr. 7</i>
<i>n</i>	85	277	115	185	118	140	99
Área en propiedad (ha)	48.066	223.723	81.209	139.871	205.772	359.677	174.205
Área arrendada (ha)	12.659	60.035	16.328	12.426	2.798	28.172	459
Área forestada (ha)	9.688	65.614	29.437	41.506	132.181	239.622	103.795
Área forestada (%)	20%	29%	36%	30%	64%	67%	60%
Unidades Ganaderas Campo	40.989	200.961	73.417	97.906	33.576	18.598	31.741
Natural (ha)	27.343	194.329	65.297	108.618	58.033	129.256	53.969

Con respecto a la localización, la mayoría de los predios (41%) se encuentran en la región Sureste, 23% en la región Litoral, el resto repartido entre el Norte, Centro y resto del país en un 14%, 12% y 11%, respectivamente. A excepción del grupo 6 que en su mayoría está localizado en el Litoral, el resto de los grupos no presenta un patrón de distribución diferencial.

La característica dominante de los grupos forestales es el de poseer la mayoría de la superficie bajo su propiedad, el 56% de la superficie pertenece a los grupos Grupo5, Grupo 6 y Grupo7. Los grupos ganaderos detentan el resto del área,

destacándose el Grupo 2 que produce sobre el 45 % del total de superficie arrendada (Figura 4).

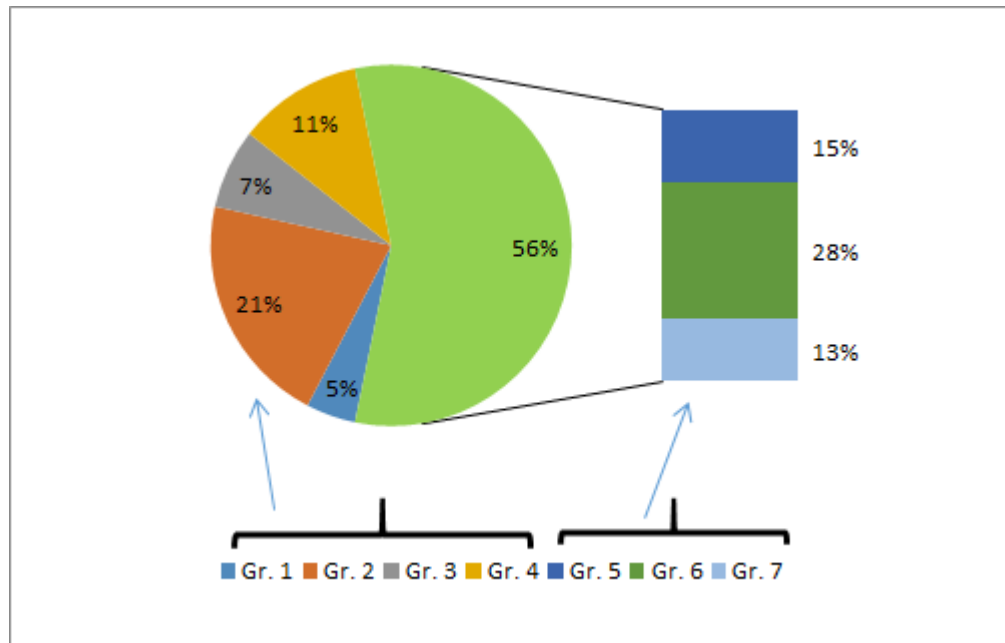


Figura 4.- Distribución entre los grupos del total de superficie de tierra

A su vez, el grupo de los forestadores (Grupo 5 a Grupo7) detenta el 76% de la tierra forestada (Figura 5). de las cuales el Grupo 6 es el que posee la mayor cantidad (39%); en contrapartida los forestadores tienen tan solo el 17% de las unidades ganaderas (Figura 5, Figura 6)

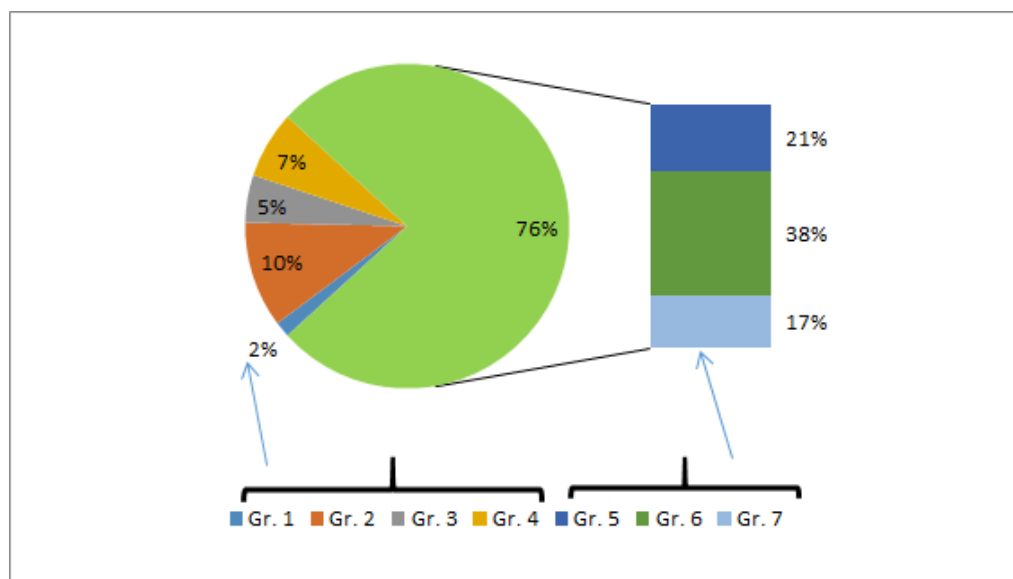


Figura 5.- Distribución de superficie forestada entre los grupos

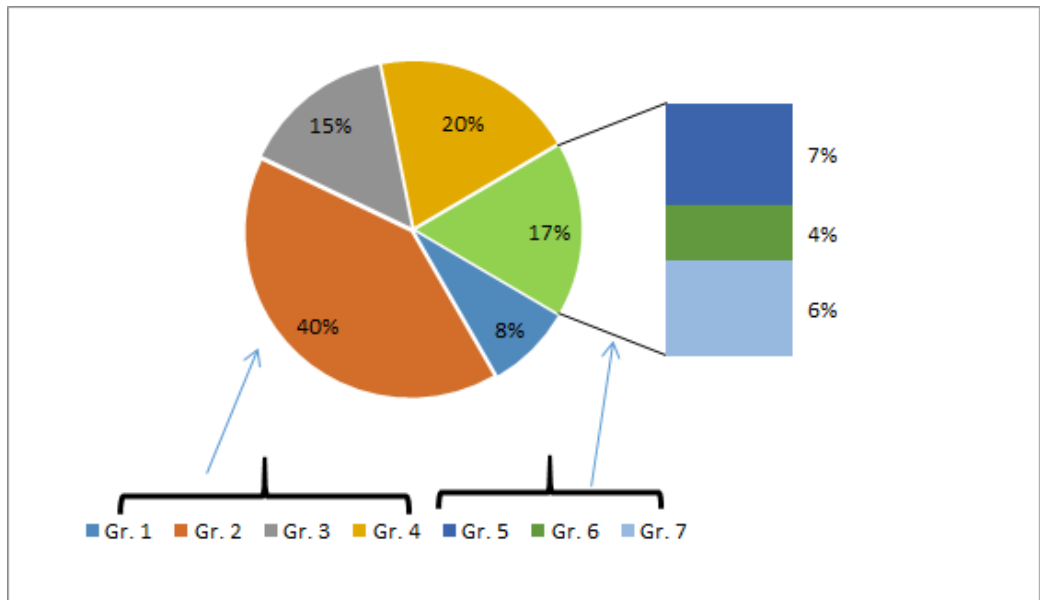


Figura 6.- Las Unidades Ganaderas en los grupos

Como mencionado anteriormente, los 7 grupos albergan el 9% de las UG del universo de unidades con forestación, de las cuales el 7,1% (103.318 UG), se encuentra en los predios ganaderos (Grupo 1 al Grupo 4).

El agrupamiento obtenido se puede apreciar en la Figura 7 en donde el valor cero y uno en el eje de las abscisas indica si la actividad principal es la ganadería o la forestación, respectivamente.

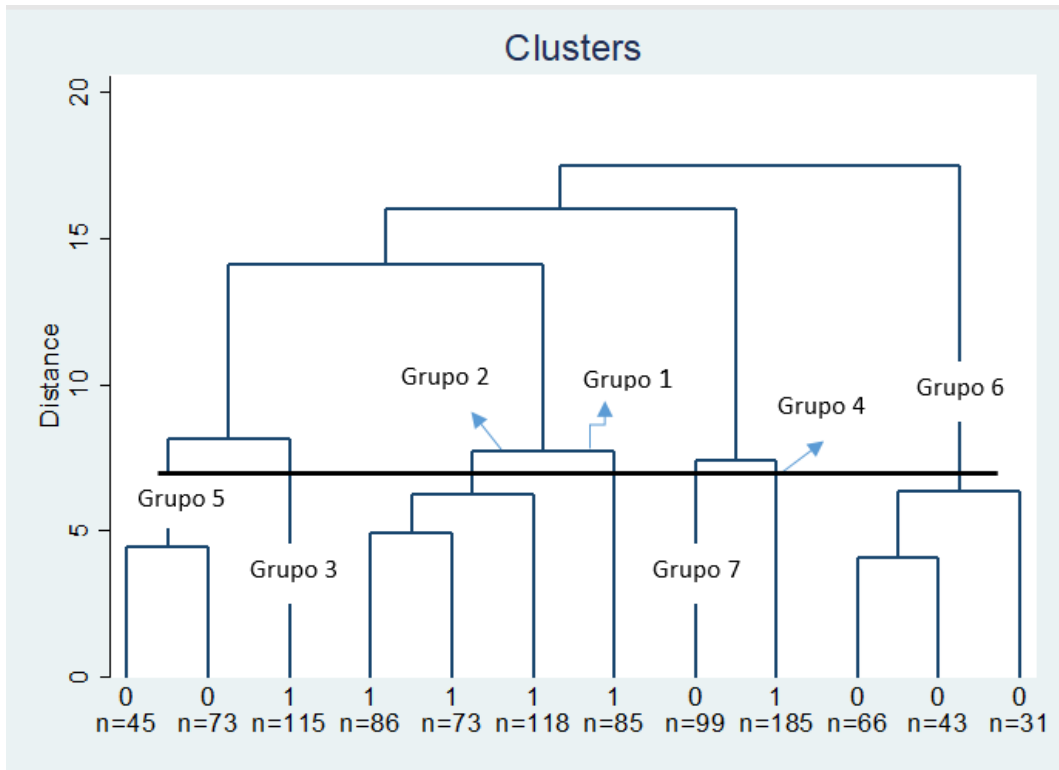


Figura 7.- Agrupamiento resultante.

Cuadro 6.- Valores promedio en cada grupo (grupos que comparten la misma letra superíndice no presentan diferencias significativas)

(Test de Kruskal- Wallis para múltiples comparaciones, p valor ajustado $\geq 0,001$).

	Variable	Unidad	Gr. 1	Gr. 2	Gr. 3	Gr. 4	Gr. 5	Gr. 6	Gr. 7
Producción	Área total	ha	744 ^a	1.221 ^b	1.023 ^{ab}	945 ^a	1.776 ^{bc}	2.793 ^c	1.795 ^{ab}
	Área propia	ha	565 ^a	808 ^{ab}	706 ^{ab}	756 ^a	1.744 ^c	2.569 ^c	1.760 ^{bc}
	Área propia/ Área total	%	87% ^{abcd}	77% ^{ad}	77% ^{abd}	87% ^{bd}	99% ^c	92% ^d	98% ^c
	Área forestada	ha	114 ^a	237 ^{ab}	256 ^b	224 ^{ab}	1.120 ^{cd}	1.712 ^c	1.048 ^d
	Área con Eucalipto	ha	97 ^a	194 ^a	207 ^a	189 ^a	819 ^{bc}	1.237 ^b	819 ^c
	Área Pino	ha	13 ^a	40 ^a	46 ^a	32 ^a	299 ^{bc}	466 ^b	227 ^c
	Área Ganadera	ha	491 ^{ab}	892 ^c	666 ^{ac}	648 ^{ab}	510 ^b	939 ^{bc}	566 ^b
	Área Ganadera/Área Total Productiva	%	71% ^a	75% ^a	68% ^a	70% ^a	30% ^b	35% ^b	40% ^b
	Área Ganadera/ Área propiedad	%	106% ^{abc}	147% ^{bc}	119% ^{ac}	107% ^b	32% ^d	45% ^d	44% ^d
	Proporción Área Forestada	%	17% ^{ab}	17% ^a	25% ^b	24% ^b	63% ^c	61% ^c	52% ^c
	Pino/ Área Forestada	%	9% ^a	7% ^a	7% ^a	7% ^a	17% ^{bc}	15% ^b	14% ^{ac}
	Área Ganadera/ Área Forestada		10 ^{ab}	13 ^b	8 ^a	9 ^{ab}	0.96 ^c	0.78 ^c	1.94 ^c
	Campo Natural	ha	322 ^a	702 ^b	568 ^{bc}	587 ^{abc}	492 ^{ac}	923 ^b	545 ^c
	Pasturas plurianuales	ha	56 ^a	78 ^a	39 ^{bc}	19 ^c	5 ^d	12 ^{cd}	3 ^d

Variable	Unidad	Gr. 1	Gr. 2	Gr. 3	Gr. 4	Gr. 5	Gr. 6	Gr. 7
Área Mejorada/ Área Ganadera	%	23% ^a	16% ^a	8% ^b	6% ^{bc}	2% ^d	2% ^{cd}	2% ^c
UG	UG	482 ^{abc}	725 ^d	638 ^{ad}	529 ^{ac}	285 ^{bc}	133	321 ^c
UG/ Área Ganadera (UG/ha)	UG/ha	0,94 ^{ab}	0,93 ^a	1,1 ^a	1,24 ^a	0,96 ^c	0,21	0,98 ^{bc}
UG /Área Ganadera + Forestada (UG/ha)	UG/ha	0,74 ^{ab}	0,74 ^a	0,69 ^b	0,68 ^{ab}	0,23 ^c	0,07	0,3 ^c
UG/ Área Forestada (UG/ha)	UG/ha	8,49 ^a	10,58 ^a	6,3 ^a	7,12 ^a	0,48 ^b	0,12	1,26 ^b
UG ovino /UG vacuno	--	0,25 ^a	0,15 ^b	0,14 ^b	0,11 ^b	0,08 ^a	0,01	0,27 ^a
Cría	%	0%	58%	0%	100%	0%	29%	100%
Ciclo Completo	%	0%	42%	100%	0%	63%	1%	0%
Engorde	%	99%	0%	0%	0%	19%	6%	0%
Sin ganado	%	1%	0%	0%	0%	18%	64%	0%
Ovejero	%	5%	4%	3%	2%	3%	1%	9%
Ganado bajo forestación	%	20%	31%	32%	32%	76%	95%	67%
Asalariados	n	2 ^{ab}	5 ^b	2 ^{ab}	2 ^a	3 ^a	3 ^a	3 ^a
Asalariados_1000 (n/1000 ha)	n	5 ^{ab}	6 ^a	5 ^{bc}	5 ^{abcd}	4 ^d	2 ^d	3 ^{cd}

	Variable	Unidad	Gr. 1	Gr. 2	Gr. 3	Gr. 4	Gr. 5	Gr. 6	Gr. 7
	Índice Contratación de Servicios	--	5 ^a	7 ^b	0,3	1	9 ^b	17	6 ^a
	Residencia en predio	%	24%	32%	34%	29%	3%	0%	12%
	Educación Universitaria	%	21%	21%	23%	25%	13%	1%	16%
	Educación Secundaria	%	12%	17%	13%	12%	5%	--	9%
	Educación Primaria	%	7%	7%	10%	14%	3%	--	3%
	Empresa Unipersonal	%	59%	65%	76%	63%	22%	1%	40%
	Sociedad (SA o SRL)	%	25%	16%	10%	19%	72%	96%	48%
	Otro tipos de Sociedad	%	13%	17%	13%	15%	4%	1%	9%
	Principal Ingreso	%	78%	83%	80%	75%	84%	97%	66%
Importancia del rubro productivo	Ganadería Primer Ingreso	%	98%	95%	100%	100%	0%	0%	0%
	Ganadería Segundo Ingreso	%	1%	4%	0%	0%	41%	21%	67%
	Forestación Primer Ingreso	%	0%	1%	0%	0%	94%	100%	89%
	Forestación Segundo Ingreso	%	20%	11%	14%	18%	2%	0%	0%
	Oveja Primer Ingreso	%	2%	4%	0%	0%	6%	0%	11%
	Oveja Segundo Ingreso	%	25%	52%	57%	50%	3%	1%	1%

En el Cuadro 6 en la sección Intensidad productiva y Especialización ganadera, se considera la proporción de predios que llevan adelante la actividad de cría, ciclo completo, engorde u ovejero. En este último caso un predio es ovejero cuando la relación cabezas ovinas/vacunas es mayor a 3. La proporción del área ganadera se obtiene como el cociente entre el área ganadera y el área productiva, ya que se descuenta el área improductiva para cada caso.

Dentro de las variables sociales, la variable Educación alcanzada (Universitaria, Secundaria, Primaria) se considera solo para los predios con organización unipersonal, no incluyendo las sociedades. Los grupos ganaderos (Grupo 1 a 4) presentan en promedio un 23% de Educación Universitaria el cual es un valor por encima de la población base (los 12.597 predios originales) que presenta un 13% de los casos con este nivel de educación.

Todos los grupos presentan alta concentración del área forestada, con una distribución hacia la derecha; en promedio la mediana de casos explica el 20% del área forestada.

Los valores medios expuestos en el Cuadro 5 se obtienen del procesamiento estadístico de las variables y su valor puede no coincidir con la relación de variables originales y correlacionadas. Por ejemplo, el valor de la proporción del área ganadera para el grupo 1 es 71%, valor que no coincide con la relación de la media de área ganadera y la media de área total. Por otro lado, los valores de Área ganadera/Área en propiedad es mayor al 100 % para los cuatro grupos ganaderos (Grupo 1 al Grupo 4), debido a que el área ganadera excede en todos los casos la superficie en propiedad, extendiéndose a áreas productivas bajo otra forma de tenencia como el arrendamiento.

2.5.1. Características de los grupos

2.5.1.1. Grupo 1.- Ganaderos invernadores

Este es el grupo menos frecuente, con 85 casos representa el 8% de la población. El rasgo saliente de este grupo es la especialización ganadera de terminación del ganado, lo que se conoce como engorde o actividad de invernada.

La superficie media es de 744 ha en régimen de propiedad en un 87% de los casos, presentando un área promedio de pastoreo de 491 ha, lo que representa el 71% del área. Los predios presentan un 23 % del área con mejoramientos forrajeros, principalmente pasturas plurianuales y mejoramientos de cobertura con leguminosas. El área de mejoramiento es consistente con la especialización ganadera de engorde, que demanda una mejor calidad del forraje. La carga ganadera es alta (0,94 UG/ha), por encima del promedio nacional.

En cuanto al tipo de organización legal, un 59% son productores unipersonales y un 25% son sociedades (Sociedad Anónima o Sociedad de Responsabilidad Limitada). Se emplean 2 trabajadores por predio, lo que se traduce en 5 trabajadores contratados cada 1.000 ha.

Un 20% de los predios declara pastorear su ganado bajo monte; es esperable que este valor sea mayor debido a que solo se registra esta respuesta como positiva, en aquellos casos en que el ganado pastorea en montes mayores a 100 ha.

El valor forestado promedio es de 114 ha, lo que representa un 14% de la superficie del predio; con un valor mediano de 60 ha y un valor modal o valor más frecuente de 30 ha. El Índice de contratación de 5 es aportado principalmente por contratación de servicios de laboreo general (39 casos), aplicación de agroquímicos (29 casos) y cosecha general (18 casos).

2.5.1.2. Grupo 2.- Ganaderos arrendatarios criadores y de ciclo completo

Este grupo está integrado por los predios de mayor tamaño con un promedio de 1.221 ha y alta proporción de área arrendada (33%) destinada al pastoreo. La especialización productiva es la cría de ganado (58%) y ciclo completo (42%). Es el grupo de mayor presencia en la zona Litoral y Sureste en donde se encuentran los forestadores orientados hacia madera para pulpa. Es el grupo mayoritario con 277 casos y presenta como rasgo saliente la alta proporción de tierras arrendadas. Es el grupo que detenta la mayor cantidad de unidades ganaderas.

En cuanto a la mano de obra es el grupo más intensivo: se contratan 4,6 trabajadores en promedio (desvío standard s , 1,6 trabajadores), lo que se traduce en 6 trabajadores cada 1.000 ha. Dentro del grupo de los ganaderos, también es el que contrata más servicios externos, el Índice de contratación de servicios es 7 asociado con contratación de servicios ganaderos y agrícolas de laboreo general (225 casos), aplicación de agroquímicos (148 casos) y cosecha general (64 casos); luego muy por debajo están los servicios de plantación y cosecha forestal (18 casos), raleo y poda (12 casos).

La base de la alimentación ganadera es el campo natural y en un 16% las praderas implantadas. Asimismo, es un grupo que trabaja en promedio con alta carga ganadera 0,93 UG/ha, si bien este valor no presenta diferencias con el resto de los grupos ganaderos; Cuando se incorpora el área forestada al área ganadera, la carga animal pasa a ser de 0,74. Es el grupo que presenta mayor cantidad de cabezas en relación al área forestada: 10,58 UG/ha forestada, sin diferencias significativas entre los otros grupos ganaderos. Presenta en promedio un 17% del área forestada, siendo la moda de 12%. Existe una alta concentración de superficie de Pino en 5 unidades productivas que concentran 7.000 has de esta especie en los departamentos de Rivera y Tacuarembó; el resto de los casos presentan plantaciones de eucalipto.

2.5.1.3. Grupo 3.- Ganaderos de ciclo completo

Comprende establecimientos de ganadería vacuna en donde el sistema de producción es de ciclo completo; en un 57% de los casos la actividad ovejera es la segunda fuente de ingreso.

Con respecto a la utilización del territorio, en promedio un 25% del área está forestada (256 ha, s 37 ha) y presenta una baja proporción de mejoramientos (8%) con respecto al área ganadera.

Es el grupo que presenta menor Índice de Contratación de Servicios (0,3) y menor contratación de mano de obra cada 1.000 ha (4,6). La carga ganadera es alta (1,1 UG/ha), no obstante, esta pasa a ser de 0,69 UG/ha cuando sumamos el área forestada.

En su mayoría son empresas unipersonales (76%) y en menor proporción como otras organizaciones (23%), es el grupo que presenta mayor proporción de residencia en el predio (34%).

Este grupo es el menos intensivo de todos en contratación de mano de obra (4,6/1000 ha) y contratación de servicios (0,3).

2.5.1.4. Grupo 4.- Ganaderos criadores

El Grupo 4 se caracteriza por poseer predios de extensión mediana, la mayoría en propiedad y en donde se realiza en un 100% de los casos, la cría vacuna, siendo esta la principal fuente de ingreso; en un 50 % de los casos la actividad ovina es la segunda fuente de ingreso.

Presenta un bajo Índice de contratación (1), con una baja superficie de mejoramiento forrajero (6%). Contrasta el valor de carga ganadera de 1,24 UG/ha por lo que se podría expresar un empleo intensivo del campo natural debido a los bajos valores de superficie mejorada. Al igual que en los otros grupos, cuando se suma el área forestada, se obtienen valores promedios de carga ganadera de 0,68 UG/ha. En un

32% de los casos se declara el pastoreo bajo montes forestales; la mayoría de este grupo está localizado en el Sureste del país.

2.5.1.5. Grupo 5.- Forestales con ganadería de ciclo completo

Representa el 12% de casos de la muestra y abarcan el 21 % del área forestada (132.181 ha sobre 621.973). La mayoría de las unidades se encuentran en el Sureste del país.

La forma de tenencia es la de propiedad en la totalidad de los casos, en promedio cada predio presenta un 32 % de la superficie de área ganadera y un 63 % ocupado con montes forestales. Con respecto a la organización jurídica, el 72 % son compañías, principalmente corporaciones.

El principal objetivo productivo es la producción de madera, proveniente del género eucalipto que ocupa en promedio, el 73 % del área forestada. La fuente de ingreso secundario es la actividad ganadera en un 41 % de los casos y un 18 % de los casos declara no tener ganado.

El área ganadera ocupa en promedio 510 ha con una carga ganadera de 0,96 UG/ha. Como es de esperar al sumar el área forestada, los valores de carga ganadera pasan a ser muy bajos, en un promedio de 0,23 UG/ha.

Un alto porcentaje (76%) declara el pastoreo de ganado en los montes forestales y un 41% declara la actividad ganadera como fuente de ingresos secundaria, por lo que podemos decir que una parte del ganado pastando en esos montes pertenece a productores ganaderos anteriormente descriptos. Asimismo, el sistema ganadero es extensivo en campo natural, ya que solo se presenta un 2% de mejoramientos en los predios.

Asimismo, este grupo contrata servicios externamente con un valor de Índice de Contratación de 9 aportado por la contratación de plantación y cosecha (63 casos, principalmente en las zonas Sureste y Norte), contratación de raleo y poda (53 casos, también la mayoría ubicados en las zonas Sureste y Norte).

2.5.1.6. Grupo 6.- Forestales que dan tierras a pastoreo e integrados verticalmente

Este grupo posee el 39 % de la tierra forestada, la mayoría de las unidades son de tamaño grande (promedio 2.793 ha) y se encuentran en la zona Litoral en donde predomina la producción de madera para pulpa, si bien algunas unidades pueden obtener una proporción de madera con manejo como poda. Presenta una baja proporción de área ganadera (35%) con alimentación basada en campo natural. Si bien el 95% de las unidades declaran pastoreo bajo monte, podemos deducir que el ganado es de productores ganaderos que arriendan tierras en el área forestada, ya que solo el 20 % de las unidades productivas declara a la actividad ganadera como fuente de ingresos secundaria y un 64 % declara no tener ganado en propiedad. Asimismo, la carga ganadera es muy baja, 0,21 UG/ha en el área ganadera y 0,07 UG/ha incluyendo toda la superficie, el promedio de stock ganadero es de 133 UG/ha en sistema de cría principalmente.

El Índice de contratación de servicios es el más alto de los grupos (17) demandando tareas forestales como plantación y cosecha forestal en prácticamente todos los casos (98%), poda y raleo en un 30% de los casos, cosecha (22%), plantación (98%) y aplicaciones químicas (98%). En contraste, el empleo en el predio es el más bajo de todos los grupos, 2 personas/1000 ha. La superficie de Pino está altamente concentrada: 2 establecimientos que presentan 25.000 ha forestadas con esa especie sobre un total de poco más de 65.000 ha, mientras que la superficie de eucalipto es más dispersa entre las unidades.

2.5.1.7. Grupo 7.- Forestales que integran ganadería de cría

El último grupo forestal se caracteriza por producir ganado de cría, siendo la segunda fuente de ingreso en un 67% de los casos. Se encuentra localizado mayoritariamente en la zona Sureste del país.

Entre los forestadores es el que presenta la mayor carga ganadera en área ganadera (0,98 UG/ha) y en área forestada (1,26 UG/ha).

También entre los forestadores es el que presenta menor Índice de contratación de servicios (6), se contrata servicios de plantación y servicios de poda, en especial las unidades en forma de compañías. Este grupo podría estar compuesto por fondos de inversión

En base al Índice de contratación de 6 y los números de la ganadería podemos decir que ambas producciones (ganadería y forestación) se llevan delante de una manera integrada y extensiva. Con respecto al Índice de contratación 33 casos sobre 99 contratan plantación y cosecha, 29 casos raleo y poda y 31 casos pastoreo.

2.6. ANÁLISIS

Los datos de la muestra dan la oportunidad de analizar predios forestales integrados verticalmente con predios ganaderos que han integrado forestación.

A pesar de estas limitantes se pudo delinear los rasgos emergentes de los grupos en base a tres grupos de variables como son a) el uso del suelo, tamaño y propiedad (área en campo natural, pasturas, área en propiedad y arrendada), b) fuentes de ingreso principal y secundaria (forestación, ganadería vacuna y ovina y c) Índice de contratación de servicios y mano de obra.

El primer agrupamiento (grupos 1, 2, 3 y 4) está constituido por productores ganaderos en predios medianos a grandes que en general arriendan tierras para pastoreo en campos ganaderos o en predios forestales. El segundo agrupamiento (grupos 5, 6 y 7) está integrado por grandes compañías o propietarios especializados en la producción de madera y que tienen ganado de terceros (grupo 6) o propio (grupo 7) pastoreando bajo los montes.

A pesar de que los resultados no permiten directamente agrupar por objetivos productivos como el trabajo de Ingemarson et al. (2006) o por actitudes hacia la forestación como los trabajos de Boon et al. (2004) o Bussoni et al. (2015), se puede pensar en diferentes propósitos de la forestación en el predio, de manera similar a los

objetivos que identificó (Ingemarson et al., 2006) y los indicadores productivos que empleó Gaspar et al. (2007).

El Grupo 1 de ganaderos invernadores estaría incluyendo la ganadería con objetivos múltiples como el acceder a los servicios ambientales y como una reserva de activo en el predio; si bien el promedio forestado es de 114 ha, el valor más frecuente de superficie forestada (moda) es de 30 ha y la mediana de 60 ha. Esto pasa en general con los grupos en donde la variabilidad de superficie forestada es alta. Por otro lado, los servicios contratados no son en general para la producción forestal por lo que podríamos decir que en ese sentido es un sistema extensivo forestal (usa pocos servicios externos) y alta productividad ganadera. Es posible que buena parte de las cortinas y montes de abrigo estén presentes en este grupo. Comparando el agrupamiento realizado en productores ganaderos obtenido por Mondelli y Picasso (2001), el grupo 1 es similar a los “productores tradicionales”, mientras que el grupo 4 es el grupo “innovador” que incorpora la actividad forestal de una manera extensiva en el sistema ganadero.

El grupo 2 es entre los ganaderos, el más numeroso en todas las zonas y el que presenta mayor superficie forestada. El valor relativamente alto en contratación de servicios asociados a la ganadería y de contratación de mano de obra, podría reflejar diferentes estrategias productivas como el arrendamiento a otros forestadores para el pastoreo del ganado; esta es una estrategia que se practica en zonas forestadas, para acceder a importantes extensiones de tierras en valores económicos relativamente menores de arrendamiento. Este grupo también es similar al nombrado por Bussoni et al. (2015) en donde el acceder a un acuerdo de forestación es también una forma de acceder al pastoreo en tierras forestadas de empresas del sector. Este sería un grupo intensivo ganadero con un nivel intermedio de mejoramientos forrajeros. La carga ganadera calculada sobre el área ganadera es alta, pero si incorporamos el área forestal los valores tienden a ser más cercanos a los que se cita en la literatura como posibles o sostenibles en el mediano plazo con un manejo adecuado.

En general en los ganaderos cuando comparamos la dotación en unidades ganaderas es más alta que la media esperable, por lo que es dable esperar que el área

forestada juegue un rol importante en albergar el rodeo, mejorando las condiciones de bienestar y mejorando los resultados globales del predio

Los grupos 3 y 4 presentan importantes superficies forestadas, entre 23% y 24% y representan grupos con baja utilización de servicios. Ambos grupos se diferencian por la especialidad ganadera y presentan escasa presencia en la zona Centro. Estos dos grupos serían de gran potencial ya que integran la forestación a la actividad ganadera brindando servicio al ganado y con la madera como una reserva de valor.

La Figura 7 muestra la relación entre la intensidad productiva de la actividad forestal, representada por el Índice de Contratación de servicios, ya que los servicios forestales son los que aportan mayor valor al Índice, y la intensidad productiva ganadera representada por la carga ganadera (UG/ha). Se observa que el Grupo 6 es el que presenta mayor área promedio y área forestada con la menor carga ganadera. De manera opuesta los Grupos 3 y 4 son los que presentan menor índice de servicios y menor carga ganadera por lo que podríamos decir que los grupos 3 y 4 son los extensivos, y los grupos 1 y 2 son los ganaderos intensivos; finalmente el Grupo 7 es el más extensivo de los forestales.

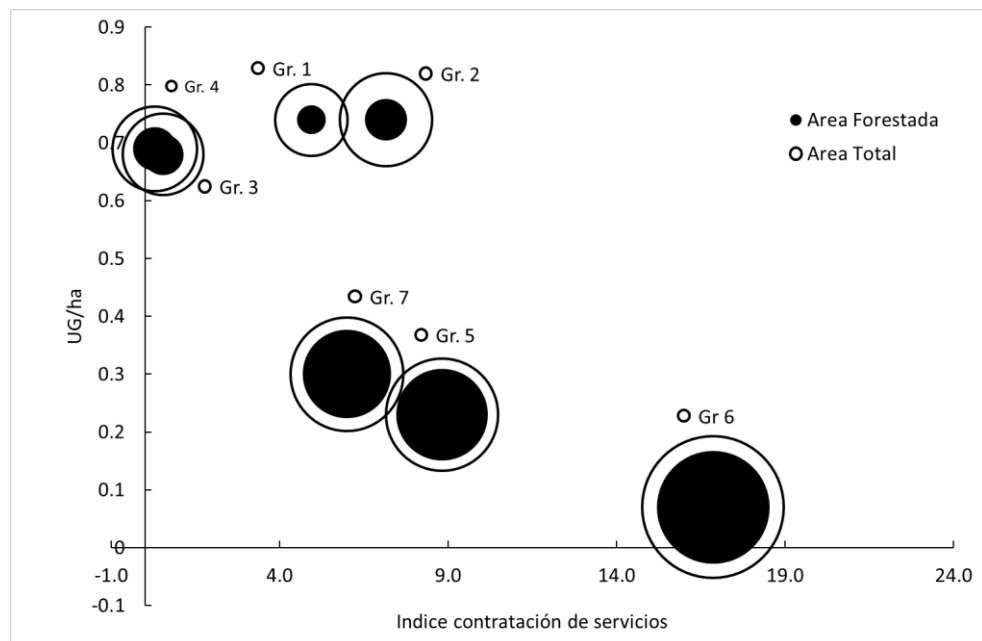


Figura 7.- Ubicación de los grupos según la carga ganadera (UG/ha) y el Índice de contratación de servicios.

Los grupos ganaderos presentan una carga alta cuando se calcula sobre área ganadera (0,93-1,24). Sin embargo, cuando se incorpora el área forestada, la carga tiende a alinearse con los valores promedio (0,68-0,74), estando relacionado con la proporción de mejoramientos y área mejorada.

Todos los grupos ganaderos arriendan tierras en diferente proporción, pero el Grupo 2 y Grupo 3 lo realizan en mayor proporción. Este último grupo (Grupo 3) realiza es en un sistema de producción más extensivo basado en menor contratación de MO, menor Índice de contratación de servicios y baja proporción de mejoramientos. Podemos resumir este grupo como un grupo de productores que presentan un mediano tamaño de predio, con una estrategia extensiva de producción

En promedio un 20 a 32% de los ganaderos declaran que pastorean el ganado bajo monte; este valor aparentemente bajo, está referido a montes de más de 100 ha, por lo que es esperable que el pastoreo en general sea mayor y extendido en todos los grupos.

La organización jurídica y tenencia divide a los forestales y en menor medida a los ganaderos.

Si analizamos la distribución de los grupos ganaderos por zona del país, todos los grupos están presentes, en su mayoría en la zona SE, sobre 579 casos analizados en las cuatro zonas, 277 casos están en el SE. Esta zona es la que nuclea mayor cantidad de predios ganaderos

Este dato nos lleva a reflexionar sobre los potenciales sistemas de integración entre las dos actividades en predios ganaderos. No se debería descartar sistemas orientados a la producción de diámetros menores (para picado o energía) como modelos a desarrollar en predios ganaderos.

La especialización e intensidad productiva (superficie, UG/ha, proporción de mejoramientos), la actividad principal y secundaria y el grado de contratación de mano de obra y servicios, se puede considerar rasgos emergentes sobre el rol de la forestación en la estructura productiva, el uso de los recursos productivos y sus posibles resultados.

A pesar de que la fuente de datos del Censo, releva la actividad productiva de manera acotada y sus datos aportan a la descripción de los casos, se puede concluir que, de los datos analizados, en los grupos ganaderos se evidencia que el rol de la forestación es la de proveer servicios al rodeo, mientras que la producción de madera no es considerada una fuente de ingresos en la mayoría de los casos o es considerada una fuente secundaria (16%). Esto es coincidente con lo encontrado por Bussoni et al. (2015) en donde en un relevamiento sobre 39 predios forestados, la principal motivación de incorporar montes en el predio fue el acceso a la sombra y abrigo; adicionalmente, este sería el motivo para incluir montes en 65 predios relevados sin forestación.

En síntesis, del trabajo llevado adelante obtenemos los ganaderos tradicionales y las compañías forestales que integran activamente ganadería y forestación con un objetivo económico (compañías forestales Grupo 5 y Grupo 7), o que permiten de manera pasiva el pastoreo con objetivos económicos menores (Grupo 6).

El desarrollo de tecnologías que propendan a una mayor integración de ambas producciones debe contemplar el entorno productivo y social y el de oportunidades de su entorno socio demográfico.

Finalmente, la parte del universo que no entro en la muestra, aquellas unidades con menos del 5 % forestado, reúne la mayoría de los montes de abrigo y sombra en predios ganaderos, que son porciones del territorio salpicados por grupos de árboles que cumplen un papel muy importante en la provisión de servicios a la ganadería. La gran mayoría de estos casos son superficies entre 1ha y 6 ha (Figura 8) que proveen de sombra y abrigo al ganado.

Los grupos 3 y 4 reuniría los casos de mayor integración de la actividad forestal en el predio, brindando tanto servicios a la ganadería como bienes; por el tipo de especialización en producción ganadera cría y ciclo completo serían los grupos que ocupan áreas con menor productividad y por lo tanto serían predios con mejor aptitud para integrar la actividad forestal.

Grupo 1 está especializada en invernada por lo que quizás destinen las áreas de menor productividad a la forestación, brindando servicios y reserva de activos en el predio.

Entre los productores forestales existen aquellos que forestan y tienen ganado en donde el grupo 7 es extensivo dentro de los forestadores y posee ganado en propiedad.

El Grupo 6 a pesar que es el que presenta mayor proporción de ganado bajo monte, integra la ganadería de manera pasiva con muy baja carga ganadera; asimismo sería el grupo que más se encuentra integrado con los mercados externos, y en donde sea baja la predisposición a desarrollar una integración más activa.

El Grupo 7 presenta más casos relativos en las zonas SE y Norte, en donde aproximadamente la mitad (34 casos) son productores y la otra mitad (41 casos) son compañías. Posiblemente tanto el grupo 5 como 6 este en parte compuesta por formas jurídicas que involucre inversionistas extra sector y otras formas en donde se profesionalice el negocio ganadero y forestal, se contratan a empresas externas las actividades, en donde decisiones estratégicas sobre compra y venta de activos se den

por la administración de gerencias mandatados por grupos inversores. Este tipo de organización tendría un potencial de integración, para inversores nacionales que no sean del sector inclusive con innovación en instrumentos financieros y posibilidad de desarrollar otros mercados de la madera, por ejemplo, obtener trozas de diámetros mayores.

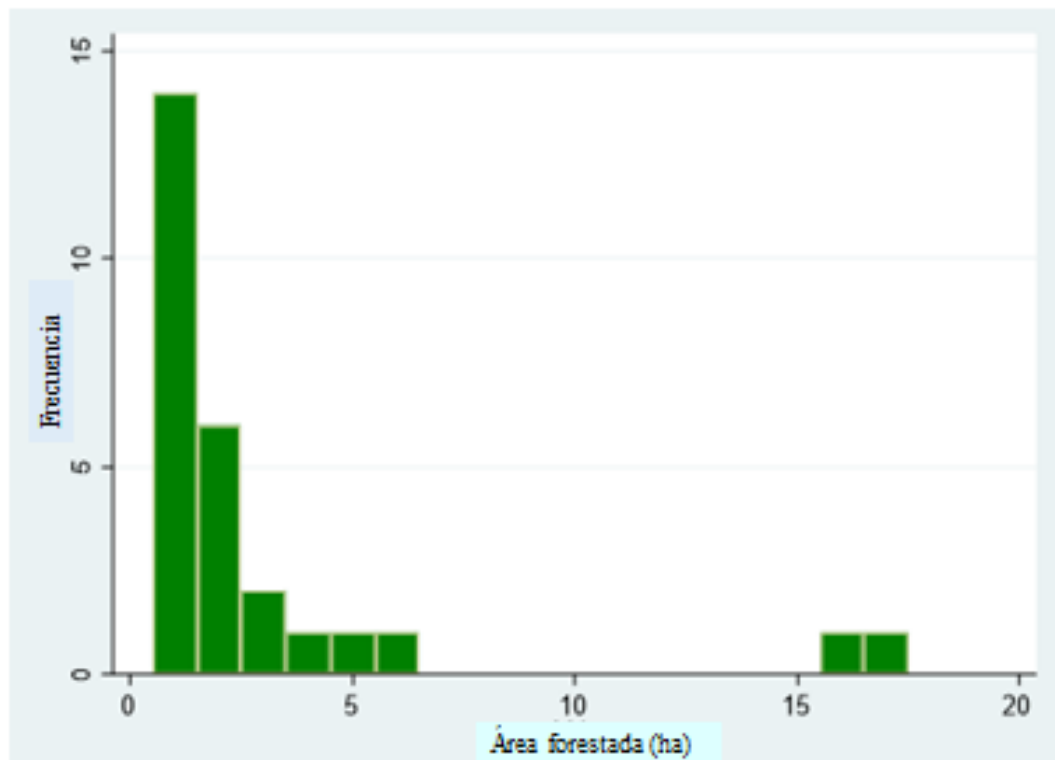


Figura 8.- Histograma de montes de abrigo y sombra en predios ganaderos con menos del 5% forestado.

Basado en estudios previos y en literatura, la hipótesis era que existían 3 grupos de unidades productoras con integración de ganado y forestación. Empleando información detallada que brinda el censo, se encontraron 7 grupos (Figura) de acuerdo a la relación de múltiples variables. El primer grupo hipotético de ganaderos que incluyen forestación resultó en 4 grupos. El segundo grupo hipotético, compañías forestales con ganado propio, resultó en los grupos 5 y 7 y el tercer grupo hipotético, compañías forestales con acuerdos con ganaderos para pastoreo de ganado bajo los

montes resultó en el grupo 6. A pesar de que el concepto de grupo o cluster no es permanente en el tiempo (Alvarez et al., 2014), las características de los grupos y su evolución ayuda a entender mejor el uso de la tierra y las características socio productivas en el territorio.

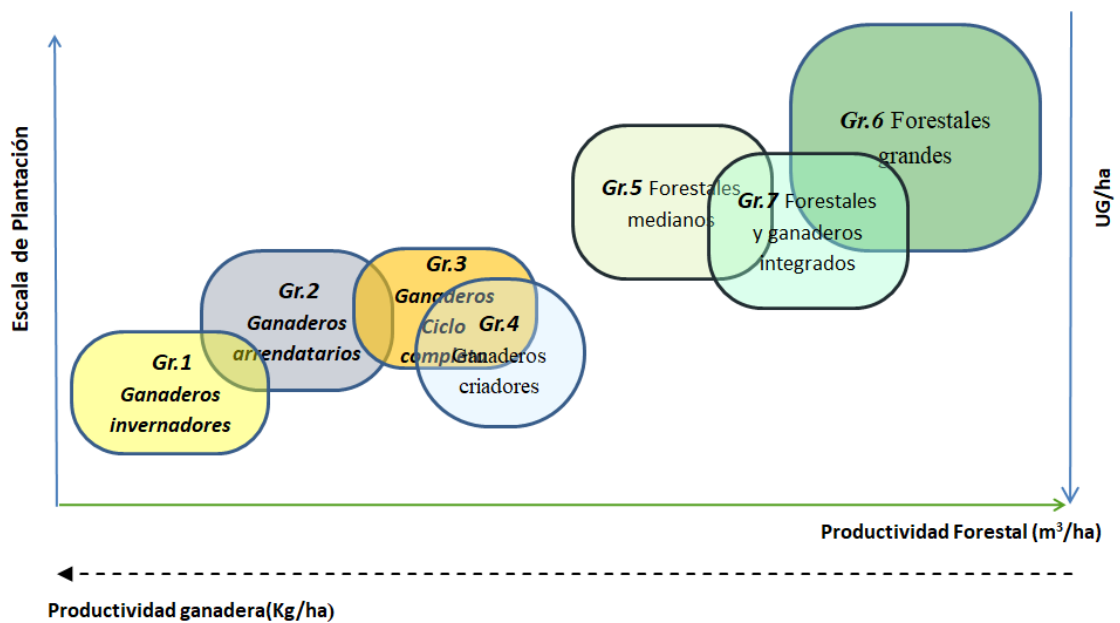


Figura 9.- Productividad ganadera y forestal en los grupos.

Estas formas integradas aparentemente están siendo aceptadas por los productores, ya que se cubre una importante parte del territorio con este tipo de sistemas. Sin embargo, la integración requiere de herramientas de política sectorial dirigidas a estos grupos ganaderos para promover una producción conjunta más eficiente o la conservación de recursos naturales. Los grupos encontrados ponen en evidencia que no existe una combinación de transición, al contrario, predominan los extremos; a pesar de los resultados, estos productores son más integrados si lo comparamos con otros países como en Estados Unidos (Cubbage et al., 2012), por lo que hay posibilidades de avanzar en este tema teniendo en cuenta la inserción de mercado y la posibilidad que productores ganaderos familiares y medianos puedan diversificar sus ingresos y mejorar la calidad de vida en el campo. Es importante destacar que los datos originales que se analiza en este capítulo son del año 2011.

Desde esa fecha a la actualidad el sector forestal ha incorporado entre 140.000 a 170.000 ha, según estimaciones de la Dirección General Forestal. La base de productores ganaderos que integran la forestación se ha ampliado en los últimos años, a partir de la creación de programas asociativos entre empresas forestales y productores ganaderos. Adicionalmente en la última década se han consolidado diferentes formas de fondos de inversión que expanden las posibilidades de negocios en el sector forestal. Desde las políticas públicas el MGAP ha incluido llamados para incorporar montes de servicio a la ganadería, lo que también contribuye a mejorar la integración entre las dos producciones.

La forestación en Uruguay ha sido promovida tanto por política de las empresas como políticas públicas. Para avanzar en una mayor integración se requiere que mayor cantidad de productores ganaderos puedan incorporar forestación en sus predios y que el sistema productivo diseñado sea tal que permita un retorno económico adecuado. Tal vez pensar en modelos que produzcan madera de mayor valor y con mayor manejo silvícola. La industria forestal del Uruguay presenta una capacidad industrial en expansión, por lo que existe un alto potencial para que esta integración sea beneficiosa para los productores ganaderos.

Adicionalmente, la implantación de forestaciones en campo natural puede dar otros beneficios ambientales, por ejemplo, cuando la plantación se realiza con baja intervención en el tapiz, puede contribuir a reducir la erosión en suelos frágiles o marginales o beneficios de almacenamiento de carbono y retorno económico de producción de madera para diámetros finos o gruesos en los suelos adecuados.

Sin embargo, la conversión del tapiz natural en plantaciones forestales interpela sobre la conservación de la biodiversidad y otros aspectos ambientales como la provisión de servicios ecosistémicos (Modernel et al., 2016).

A partir del análisis expuesto podemos decir que es censario avanzar en la investigación de modelos que involucren estos aspectos y profundicen en las interacciones de los componentes para evaluar la sustentabilidad de los SSP en el Uruguay.

2.7. CONCLUSIONES

Se encontraron diversas estrategias para integrar forestación y ganado en Uruguay, 1- Ganaderos invernadores, 2- Ganaderos arrendatarios de ciclo completo, 3- Ganaderos de ciclo completo con importante superficie forestada, 4- Ganaderos criadores con importante área forestada, 5- Compañías forestales con ganado, 6- Grandes compañías que arriendan a ganaderos, y 7- Forestadores y ganaderos integrados. Los productores de menor tamaño utilizan los montes en sus múltiples usos como la producción de madera, los servicios a la ganadería de sombra y abrigo y otros servicios ambientales, mientras que los de mayor escala utilizan en el área productiva, una cierta proporción de pastoreo y producción de carne con producción de madera en los esquemas productivos presentados. Los siete grupos encontrados en este trabajo muestran una serie de estrategias para producir madera y carne al mismo tiempo, lo que brinda información para evaluaciones de sustentabilidad, así como insumos para políticas públicas y privadas en un escenario de aumento de predios que incorporen estos sistemas. La integración lograda en estas tres décadas es algo a resaltar; se precisa más investigación y políticas de extensión que evalúen la sustentabilidad de estos sistemas, así como la identificación de las mejores prácticas para estos SSP.

Los grupos identificados, en especial los ganaderos abren el interrogante de si estas dos producciones pueden ser compatibles en el largo plazo y si se pueden lograr combinaciones productivas que sean compatibles con metas ambientales, en especial con la especialización productiva más extendida en el territorio uruguayo como es la ganadería de cría. En el próximo capítulo en base a un estudio de caso realizado en un establecimiento en el Sureste del país, se trata de responder estos interrogantes.

2.8. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez S, Paas W, Descheemaeker K, Tiftonell P, Groot J. 2014. Typology construction, a way of dealing with farm diversity. General guidelines for Humidtropics. [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10568/65374>
- Audretsch, DB. 2015. Joseph Schumpeter and John Kenneth Galbraith: two sides of the same coin? *Journal of Evolutionary Economics*, 25: 197–214. doi:10.1007/s00191-013-0326-4
- Barbier EB, Burgess JC, Grainger A. 2010. The forest transition: Towards a more comprehensive theoretical framework. *Land Use Policy*, 27: 98–107. doi:10.1016/j.landusepol.2009.02.001
- Boon TE, Meilby H, Thorsen JB. 2004. An Empirically Based Typology of Private Forest Owners in Denmark: Improving Communication Between Authorities and Owners. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19: 45–55. doi:10.1080/14004080410034056
- Borg I, Groenen P. 2005. *Modern Multidimensional Scaling*. NY: Springer. 614 p.
- Boscana M, Rachetti M, Munka C, González A, Bussoni A. 2019. Recomendaciones para la Integración de forestaciones en predios ganaderos y lecheros familiares. [En línea]. Consultado 15 marzo 2021. Disponible en: http://www.silvopastoreo.com.uy/pdf/manual_rif.pdf
- Bussoni A, Cabris J, Fernández E, Boscana M, Cabbage F, Bentancur O. 2015. Integrated beef and wood production in Uruguay: potential and limitations. *Agroforestry Systems*, 89: 1107–1118. doi:10.1007/s10457-015-9839-1
- Carriquiry R, Morales H, De Hegedus P, Tourrand J. 2012. Heterogeneity and vulnerability of livestock in forest plantations of Uruguay. En: *European International Farming Systems Symposium (X, 2012, Aarhus)*. Proceedings, Theme 1: WS 1.3. Understanding agricultural structural changes to support

inclusive policy dialogue. 10 p.

- Caci H. 1999. KWALLIS2: Stata module to perform Kruskal-Wallis Test for equality of populations. Boston: Boston College, Department of Economics, Software Statistical Software Components S379201.
- Collado MD, Byrne TJ, Amer PR, Santos BF, Axford M, Pryce, JE. 2015. Analyzing the heterogeneity of farmers' preferences for improvements in dairy cow traits using farmer typologies. *Journal of Dairy Science*, 98: 4148–4161. doi: 10.3168/jds.2014-9194
- Cubbage F, Balmelli G, Bussoni A, Noellemeyer E, Pachas AN, Fassola H, Colcombet L, Rossner B, Frey G, Dube D, Lopes de Silva M, Stevenson H, Hamilton J, Hubbard W. 2012. Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforestry Systems*, 86: 303–314. doi: 10.1007/s10457-012-9482-z
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2013. Anuario Estadístico Agropecuario 2013. [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-diea-2013>
- Everitt B, Hothorn T. 2011. *An Introduction to Applied Multivariate Analysis with R*. NY: Springer. doi:10.1007/978-1-4419-9650-3
- Ferreira G. 1997. An evolutionary approach to farming decision making on extensive rangelands. Tesis PhD. Edinburgo. University of Edinburgh. 217p.
- Gaspar P, Mesías FJ, Escribano M, Rodríguez de Ledesma A, Pulido F. 2007. Economic and management characterization of dehesa farms: implications for their sustainability. *Agroforestry Systems*, 71: 151–162. doi: 10.1007/s10457-007-9081-6
- Goswami R, Chatterjee S, Prasad B. 2014. Farm types and their economic characterization in complex agro-ecosystems for informed extension intervention: study from coastal West Bengal, India. *Agricultural and Food*

Economics, 2: 5. doi: 10.1186/s40100-014-0005-2

Gramann J, Marty T, Kurtz W. 1985. A logistic analysis of the effects of beliefs and past experience on management plans for non-industrial private forests. *Journal of Environmental Management*, 20: 177–185.

Härdle W, Hlávka Z. 2007. *Multivariate Statistics: Exercises and Solutions*. Berlin: Springer. ISBN 978-0387-70784-6. 368 p.

Heese G. 1992. Land use systems and property rights. *Journal of Evolutionary Economics*, 2: 195–210.

Huertas SMC, Bobadilla PR, Bueno HL, Blanco DC, Vila FH, Piaggio JM, Gil AG, Callero JLC, Van der Laar EA. 2020. Evaluación de la sustentabilidad de los sistemas productivos silvopastoriles y sistemas forestales existentes en el país y su relación con la producción de bovinos de carne. [En línea]. Consultado 15 marzo 2021. Disponible en:
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/14475/1/Inia-Fpta-87-proyecto-311-2020.pdf>

INAC (Instituto Nacional de Carnes). 2020. Serie anual stock - bovinos y ovinos por edad - INAC. [En línea]. Consultado 15 marzo 2021. Disponible en:
<https://www.inac.uy/innovaportal/v/4714/10/innova.front/serie-anual-stock---bovinos-y-ovinos-por-edad>

Ingemarson F, Lindhagen A, Eriksson L. 2006. A typology of small-scale private forest owners in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 21: 249–259. doi: 10.1080/02827580600662256

Jennings S, van Putten I. 2006. Typology of Non-Industrial Forest Owners in Tasmania. *Small-scale Forest Economics, Management and Policy*, 5:37–56.

Kruskal W, Wallis A. 1952. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47: 583–621.

Madry W, Mena Y, Roszkowska-Madra B, et al (2013) An overview of farming

system typology methodologies and its use in the study of pasture-based farming system: A review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11: 316–326. doi: 10.5424/sjar/2013112-3295

MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 2019. Cartografía Forestal Nacional 2018. [En línea]. Consultado 15 marzo 2020. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/informe-resultados-cartografia-forestal-nacional-2018>

MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 2013. Censo General Agropecuario. [En línea]. Consultado 15 marzo 2014. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/censo-general-agropecuaria-2011>

MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 2003. La actividad forestal a través del Censo Agropecuario. [En línea]. Consultado 15 marzo 2009. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/actividad-forestal-traves-del-censo-agropecuaria-junio-2003>

MGAP-DICOSE (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca-Division de Contralor de Semovientes). 2015a. [En línea]. Consultado 15 marzo 2017. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgsg,dgsg-dicose-datos-de-la-declaracion-jurada-2015,O,es,0,>

MGAP-DICOSE (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca-Division de Contralor de Semovientes). 2015b. [En línea]. Consultado 15 marzo 2017. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgsg,dgsg-dicose-institucional,O,es,0,>

Modernel P, Rossing WAH, Corbeels M, Dogliotti S, Picasso V, Tittonell P. 2016. Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. *Environmental Research Letters*, 11 113002. doi:10.1088/1748-9326

- Mondelli M, Picasso V. 2001. Trayectorias Tecnológicas en la Ganadería Uruguaya: Un enfoque Evolucionista. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 115 p.
- Mooi E, Sarstedt M. 2011. Cluster Analysis. En: Mooi E, Sarstedt M (Eds.). A Concise Guide to Market Research. Berlin: Springer. 237–284
- Novais A, Canadas MJ. 2010. Understanding the management logic of private forest owners: A new approach. *Forest Policy and Economics*, 12: 173–180. doi: 10.1016/j.forpol.2009.09.010
- Nuberg I, Brendan G, Reid R. 2009. Agroforestry for natural resource management. Collingwood: CSIRO. 347 p.
- OPP (Oficina de Planeamiento y Presupuesto). 1992. Recursos Naturales: Uso, situación y perspectivas, Uruguay. Estudio Ambiental Nacional. [En línea]. Consultado 15 marzo 2013. Disponible en: <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea10s/oea10s.pdf>
- Prieto V, Wins R. 2007. Comparación de diferentes agrupamientos generados utilizando técnicas multivariadas y distintos tipos de variables. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 63 p.
- Rabe-Hesketch S, Everitt B. 2004. Handbook of Statistical Analysis using Stata. NY: Chapman & Hall/CRC. 354 p.
- Richter J, Lewis B. 2007. Reaching out to family forest owners: An examination of information behaviors by attitudinal type. En: Miner C, Jacobs R, Dykstra D, Bittner B (eds) International Conference on Transfer of Forest Science Knowledge and Technology. General Technical Report PNW-GTR-726. Oregon: USDA Forest Service. 209–217.
- Stata. 2015. Stata multivariate statistics reference manual. release 14. Stata Press. 739 p. [En línea]. Consultado 15 marzo 2021. Disponible en: <https://www.stata.com/manuals/mv.pdf>

StataCorp. 2015. *Stata User's Guide*. Texas: Stata Press. 416 p. [En línea].

Consultado 15 marzo 2016. Disponible en:

<https://www.stata.com/manuals/u.pdf>

Urquhart J, Courtney P. 2011. Seeing the owner behind the trees: A typology of small-scale private woodland owners in England. *Forest Policy and Economics*, 13: 535–544. doi: 10.1016/j.forpol.2011.05.010

Ward JH. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58: 236–244.

3. SISTEMAS SILVOPASTORILES Y OPTIMIZACIÓN MULTICRITERIO: RESULTADOS ECONÓMICOS Y BALANCE DE CARBONO

3.1. RESUMEN

La producción forestal puede brindar servicios productivos y ambientales a la ganadería a partir de la mitigación de los Gases Efecto Invernadero (GHG) que se producen en la ganadería pastoril. El trabajo parte de un estudio de caso, un establecimiento forestal y ganadero; en base a una encuesta llevada adelante a productores ganaderos se definen prioridades. Los criterios pre-establecidos fueron el Valor Presente Neto (NVP) Forestal, el NVP Ganadero y el Balance de Carbono, entre otras. Se estructura un modelo de programación por metas lexicográfico (LGP) del tipo I que deriva en 3 modelos jerárquicos para el establecimiento de 408 ha. El modelo M_1 resulta en el mayor valor de producción combinada NPV Ganadero (302,935 US\$) y NPV Forestal (556,578 US\$); el modelo M_2 en donde se prioriza la producción ganadera en el primer nivel, alcanzando el valor 317,307 US\$ de NPV Ganadero, y el valor más bajo de balance de carbono con -20,160 ton de CO₂-e. comparando los resultados del modelo M_3 , en donde se minimiza el desvío negativo del balance de carbono, resulta en un balance positivo de + 6,788 ton CO₂-e, en un escenario en donde la meta ambiental se prioriza. La meta ambiental debe ser jerarquizada en un nivel alto para alcanzar un balance de carbono positivo y obtener retornos ganadero y forestal. La metodología permite cuantificar la distancia de alcanzar una meta en un modelo productivo. La metodología lexicográfica permite la cuantificación de los resultados en función de la ubicación de la jerarquía de varias metas en modelos. Se demuestra que los objetivos productivos y ambientales pueden ser integrados, si el tomador de decisiones puede aceptar los desvíos; los planes productivos pueden servir como una guía de políticas, que provea la incorporación de servicios ambientales. Las variaciones en los modelos muestran que la solución final es altamente dependiente del orden y jerarquía en las prioridades; finalmente la meta ambiental es alcanzable si establece en un alto nivel de prioridad.

Palabras clave: producción ganadera y forestal, matriz de pagos, *Eucalyptus globulus*, gases efecto invernadero, optimización.

SILVOPASTORAL SYSTEMS AND MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION FOR COMPATIBLE ECONOMIC AND CARBON BALANCE OUTCOMES

3.2. SUMMARY

Forestry production can provide a valuable commodity and environmental services to complement cattle farming through the mitigation of greenhouse gases (GHG) from meat production. This study used goal programming and empirical field data and farmer interviews of priorities. The preemptive criteria applied were max Forest Net Present Value (NPV), max Cattle NPV, and Carbon Balance, among others. A Type I lexicographical multi-criteria model was developed in three hierarchical models for a 408 ha model farm. Model M_1 results in the higher combined NPV Cattle (302,935 US\$) and NPV Forest (556,578 US\$); Model M_2 , where NPV Cattle is prioritized at the first level, achieved the target of 317,307 US\$ but the least success in achieving carbon positive balance with a negative balance of -20,160 tons of CO₂-e released. Comparing the results of model M_3 , where minimizing the negative carbon balance, a positive carbon balance of + 6,788 tons CO₂-e, in a scenario where the environmental goal would be imposed. The difference of NPV cattle between M2 and M3 is -24,609 US\$. The environmental criterion must be allocated to higher hierarchical levels in order to achieve a positive balance and obtain profits from forest and cattle. This also allows quantification of how far removed a system is from achieving a goal of integrated and sustainable production. The lexicographical methodology allowed quantification of results as a function of the hierarchical allocation of various goals within different integration models through studying efficient subgroups. It is shown that environmental and productive objectives can be integrated, achieving economic, environmental and productive goals, with deviations that the decision maker can accept; plans can also be established with results that can serve as a policy guide, that provide for the incorporation of environmental services. Variations in the models showed the final solution is highly dependent on the preferences order in the higher level; the environmental goal is achievable if it is prioritized at a higher hierarchical level.

Keywords: cattle and forest production; payoff matrix; *Eucalyptus globulus*; greenhouse gases; optimization.

3.3. INTRODUCCIÓN

Los sistemas silvopastoriles (SSP) han existido desde la introducción del ganado y su explotación comercial en América. Se estima que alrededor de 3.2 millones de kilómetros cuadrados (Zomer et al., 2009) es ocupada por estos sistemas, que se transforman en estrategias de producción para numerosos productores rurales familiares de pequeña a mediana escala (Peri et al., 2016). Estos sistemas combinan productivamente árboles y ganado de una manera amigable con el medio ambiente (Lacorte et al., 2016), permitiendo la integración de productos forestales no maderables y servicios forestales (Aldea et al., 2014).

Las ventajas que ofrecen estos sistemas van desde la diversificación productiva, el control de la erosión y el secuestro de carbono (Peri, 2016). La producción integrada puede atenuar el efecto negativo de la producción de carne en las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GHG) (Claytor et al., 2018). La producción ganadera está en el centro del debate por ser señalada una de las principales fuentes de emisión de gases metano y óxido nítrico, lo que representa una amenaza a buena parte de las economías que dependen de la exportación de este producto como Australia (Doran-Browne et al., 2018), y en especial para la región sur de América Latina.

Los trabajos que integran la forestación para el abatimiento de GHG de la producción de ganado, plantean mantener los árboles en pie arribando a modelos sustentables (De Oliveira et al., 2015).

La expresión de las preferencias dan como resultado los trade-offs que expresan los conflictos productivos y sociales en un nivel local o regional (Boillat et al., 2017) o la disponibilidad de los productores para integrar la forestación en predios ganaderos a partir de incentivos (Claytor et al., 2018). La forestación debería ser percibida como una oportunidad para diversificar ingresos (Schirmer y Bull, 2014), o deberían existir incentivos para que productores ganaderos incorporen forestación en tierras de pastoreo y se concrete un cambio en el uso del suelo (Claytor et al., 2018). En Alabama, USA, el silvopastoreo se señala como una mejor alternativa, frente a cambios extremos en el uso del suelo como la forestación permanente (Davis y Rausser, 2020).

Es relevante que los SSP sean sustentables a lo largo del tiempo; el trabajo de Kanter et al. (2018) evaluó los trade offs entre los componentes del sistema. La expresión de las preferencias pueden evidenciar conflictos sociales y productivos (Boillat et al., 2017) en un nivel local o regional. Al incorporarse las preferencias de los involucrados en modelos de optimización multicriterio, como en el trabajo de Aldea et al. (2014) nos puede revelar una aproximación de los efectos de incentivos ambientales en la producción agrícola.

Por otro lado están los trabajos clásicos de optimización forestal que han desarrollado modelos para la regulación de importantes masas boscosas con objetivos de abastecimiento industrial (Díaz-Balteiro et al., 2014; Díaz-Balteiro y Rodríguez, 2006; Giménez et al., 2013; Rodríguez y Moreira, 1989), objetivos ambientales (Steiguer et al. 2002) o ambos (Díaz-Balteiro et al., 2016; Díaz-Balteiro y Romero, 2008; Giménez et al., 2014). No se conoce hasta donde sabemos, antecedentes de trabajos que busquen optimizar los rubros productivos y beneficios ambientales en ganadería y forestación de forma conjunta, de manera que ambas producciones puedan co-existir.

Se debe tener presente que la producción ganadera y forestal pueden ser complementarios hasta cierto punto, pasado el cual pasan a ser competitivos por el uso de los recursos suelo, luz, agua y nutrientes.

La producción conjunta de dos actividades se ha estudiado a través de la herramienta de optimización multicriterio (MCDM), la que permite integrar el enfoque de sistemas a un concepto de ingeniería de sistemas (Kangas et al., 2008), mejorando la comprensión de los procesos de decisión en los sistemas de producción. La gran ventaja que ofrece este enfoque es que permite descomponer grandes problemas complejos en conjuntos más acotados. Asimismo, nos permite analizar conjuntos de solución obtenidos ex-ante y los resultados productivos ambientales de las soluciones obtenidas. La optimización nos da la posibilidad de ampliar e integrar la comprensión del problema (Kaya et al., 2016), en este caso a través del análisis de los subconjuntos satisficentes obtenidos. En especial la programación por objetivos o Goal Programming (GP) permite el análisis de los subconjuntos y el nivel de logro

alcanzado para el tomador de decisiones. Así, se puede construir un modelo en donde se incluya diferentes tipos de objetivos como la cantidad de madera a cosechar, niveles de recreación conocido en la literatura como “amenities”, conservar áreas para el hábitat para la vida salvaje, entre otros (Díaz-Balteiro y Romero, 2008).

En este estudio las dos producciones, forestación y ganadería, presentan un grado de complementación, en donde pueden coexistir hasta un punto en donde se vuelven competitivas.

El sistema productivo ganadero presenta el desafío de encontrar mecanismos de mitigación. Dada la importancia de Uruguay como productor de carne, Uruguay es el octavo exportador mundial de carne (Indexmundi, 2019), se deberían encontrar mecanismos de mitigación de GHG en sus sistemas de producción. Existen alternativas tecnológicas para esa mitigación como la mejora de la eficiencia de alimentación y los sistemas de terminación o engorde del ganado (Modernel et al., 2013; Picasso et al., 2014). Al comparar las emisiones de GHG entre sistemas ganaderos de Uruguay y Nueva Zelanda (NZ), se encuentra que las emisiones de metano (CH₄) ascienden a 18,4-21,0 kgCO_{2-e}/kg carne en Uruguay, frente a 8-10 kgCO_{2-e}/kg carne en NZ; al compararse las emisiones por área necesaria para obtener el producto, las emisiones en NZ pasan a ser el doble: 3013-6683 kg/CO_{2-e}/ha/año en NZ vs. 1895-2226 kgCO_{2-e}/ha/año en Uruguay (Becoña López et al., 2013).

La forestación puede contribuir a mitigar la emisión de GHG en la producción ganadera, brindando un servicio ambiental. Se debe evaluar en una trayectoria temporal el manejo y la proporción en el que ambas actividades productivas convergen en este objetivo.

Este trabajo tiene como objetivo el estudio de la integración de largo plazo entre la forestación y la ganadería para alcanzar objetivos productivos, económicos y beneficios ambientales de reducción de GHG. También se busca evaluar la integración y la sostenibilidad de la forestación y la ganadería desde un enfoque cuantitativo.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realiza sobre un estudio de caso en un establecimiento en el Departamento de Maldonado, Uruguay, con actividades de ganadería y forestación.

En la Figura 10 se presenta un esquema de los pasos seguidos en este capítulo para la obtención de los tres modelos (Ganadero y Forestal, Ganadero y Balance de Carbono)

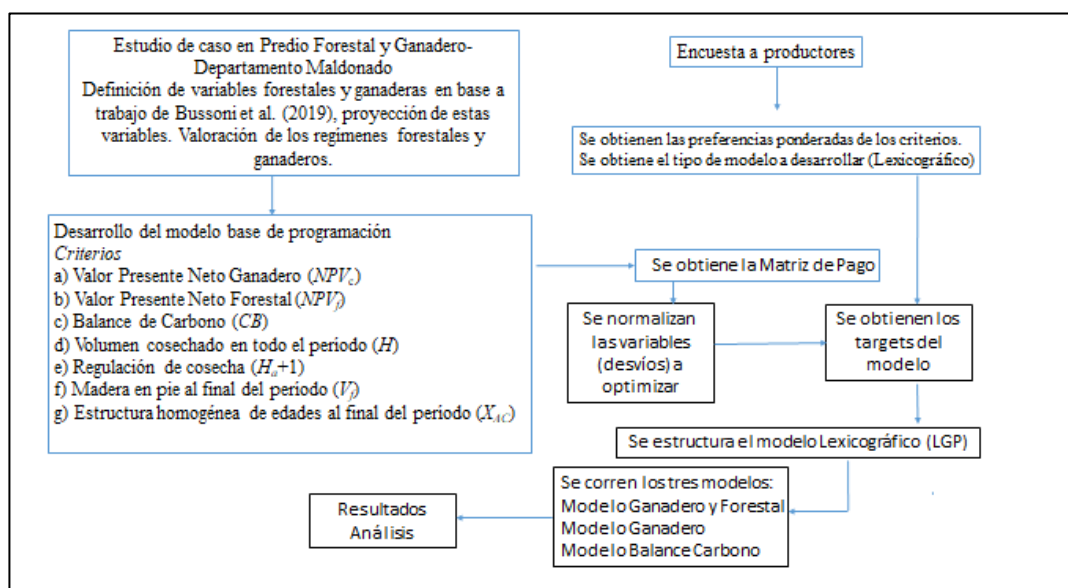


Figura 10.- Resumen de la metodología empleada y los modelos obtenidos en el trabajo.

En esta sección se presenta el modelo base de programación: el modelo se basa en la optimización de tres principales criterios pre establecidos: Valor Presente Neto de la producción ganadera (NPV Ganadero), Valor Presente Neto de la forestación (NPVP Forestal) y el balance entre la emisión y la fijación de GHG. Otro criterio incluido es el concepto de bosque normal que incluye, entre otros, una estructura de edad balanceada de los rodales al final de horizonte y la corta regular anual en volumen y área (Davis y Johnson, 1987).

En base a la optimización de los diferentes criterios, se obtiene una matriz de pagos o Matriz de Pay-off. A partir de ésta, se puede determinar de manera objetiva

los valores ideal y anti-ideal, lo que brinda información valiosa para modelos más complejos (Aldea et al., 2014), pudiendo establecer el grado de conflicto entre los criterios.

Se estructura un modelo de programación por metas lexicográfico (LGP), que es una variante dentro de los modelos programación por metas (GP) que busca la minimización de los desvíos ponderados con respecto a los objetivos en niveles de jerarquía asignados. Estos valores se obtienen a partir de entrevistas a productores ganaderos con actividad forestal integrada y a técnicos referentes del sector.

Se plantea un modelo ganadero-forestal que considera el balance de los GHG: por un lado, las emisiones de GHG en función de los requerimientos energéticos ganaderos y la carga animal (LU/ha) y la emisión de GHG en las labores de plantación y cosecha forestal; por otro lado, se calcula incremento de biomasa en pie de las plantaciones forestales y el diferencial de stock de carbono de esas plantaciones. Para la resolución del modelo se utiliza el software Lingo 18.0 (Lingo, 2018).

3.4.1. Modelo de optimización

El trabajo se resuelve empleando optimización multicriterio que es un abanico de técnicas que presenta algunos desafíos, ya que la solución final depende en buena medida de la selección de la variante (Uría et al., 2002). Para el presente estudio, se empleó la variante de programación por metas lexicográfico (LGP) de tipo I.

En los modelos tipo I, el rodal es una unidad física que mantiene su identidad durante todo el período de la planificación (Davis y Johnson, 1987); el modelo se estructuró siguiendo las recomendaciones de Davis et al (2001), constando de dos partes: la primera expresa la capacidad de los recursos y la respuesta biológica, económica y física a diferentes tratamientos; la segunda parte establece la política de uso de los recursos. La programación por metas lexicográficas (LGP), utiliza el concepto de prioridades preferenciales o pre-emptive priorities (Romero, 1996). Se

basa en priorizar un conjunto de metas pre definidos que se van satisfaciendo en orden jerárquico.

El enfoque permite precisar los conjuntos satisficentes con procedimientos más flexibles y reales aplicables a la producción y la toma de decisiones (Jones y Tamiz, 2010; Romero y Rehman, 2003). Esto admite que el centro decisor fije de antemano una serie de metas relevantes con niveles de aspiración definidos a priori (Romero, 1996).

Algunos conceptos que se manejan en el desarrollo del modelo son: Atributo, siendo éste un valor que puede medirse y enfrenta un centro decisor, Target es un nivel aceptable de logro de un determinado atributo, Meta es una combinación de atributo y target, y objetivo que es el signo (positivo o negativo) de mejora de los atributos, todos estos conceptos se pueden ampliar en Romero (1996).

3.4.2. Criterios del modelo

Para la construcción del modelo, se tuvieron en cuenta criterios que la literatura forestal emplea frecuentemente en la optimización multicriterio (Kaya et al., 2016; Díaz-Balteiro et al., 2016b; Díaz-Balteiro et al., 2014; Aldea et al., 2014; Díaz-Balteiro y Romero, 2004, Buongiorno y Gilles, 2003) y criterios considerados relevantes para los productores ganaderos (Bussoni et al., 2015; Tamosiunas, 2015), a saber: a) Valor Presente (NPV) de la producción ganadera, b) Valor Presente (NPV) de la producción forestal, c) balance de carbono, d) ingresos anuales provenientes de actividad forestal y ganadera, e) total de volumen de madera cosechada, f) madera en pie al final del horizonte de planificación, g) regulación del volumen cosechado entre períodos (se tiende a cosechar cantidades regulares entre años), h) estructura equilibrada de las edades de los montes en pie al finalizar el período. Estas tres últimas metas se referencian en la literatura como la de Bosque Normal, empleada frecuentemente tanto en montes nativos como bosques comerciales (Davis et al., 2001, Bettinger et al., 2009). El modelo asume que no ocurren cambios en la productividad del suelo por un cambio de uso, por ejemplo, de un suelo ganadero a un suelo forestal o viceversa. Esto

se corresponde con investigación nacional, que no reporta cambios en la materia orgánica en plantaciones forestales (Hernández et al., 2016).

3.4.3. Restricciones y Metas del modelo

El cuerpo de Restricciones y Metas, sigue la estructura de Díaz-Balteiro y Romero (2003). La única restricción del modelo son las variables endógenas, definidas como el conjunto de áreas de pastoreo (L) y el conjunto de rodales forestales (K), en donde $K \subset L$.

El área libre de árboles para pastoreo G_l (Ecuación 1), está compuesto por la suma de x_l , (ha) que comprende el área de pastoreo l , cada área x_l puede pertenecer a alguna de las siguientes tres sub-áreas: a) Área de pastoreo (G_{lk}) en donde la ganadería desplaza a la forestación (son actividades mutuamente excluyentes), b) Área de pastoreo residual (A_{gk}), que rodea los rodales como cortafuegos o zonas buffer y c) Área exclusiva para pastoreo de ganado (G_i) no apta para forestación.

$$\sum_l^L x_l = G_l \quad \forall_l \in L$$

Ecuación 1

El área forestada A_k es la suma de las áreas x_{kj} (ha) que comprende el rodal k , bajo el régimen j (Ecuación 2). El área de estudio comprende tres calidades de sitio z .

$$\sum_{k,j}^{K,J} x_{kj} = A_k \quad \forall_k \in K$$

Ecuación 2

La Unidad Ganadera (LU) representa el requerimiento nutricional para mantenimiento de una vaca de cría de 380 kilogramos de peso, criando un ternero. Estos requerimientos se estiman en 2.800 kg Materia Seca (MS) anual, lo que equivale

a 7,6 kg MS diario. La LU permite convertir los requerimientos de forraje para diferentes categorías vacunas en base a su peso y categoría.

Los valores anuales de ganado (LU_t , $LU \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) es la suma de las unidades de pastoreo sustentable en las áreas x_l (Ecuación 4) y en las áreas x_{kj} (Ecuación 5) que es el ganado bajo la forestación. Este valor depende de la edad del rodal, ya que a medida que el dosel arbóreo se desarrolla, aumenta la intercepción de luz y se reduce la disponibilidad forrajera. Cuando el rodal es cosechado se considera que el área no alberga ganado durante ese año.

Por lo tanto las unidades LU_t (Ecuación 3) son las unidades ganaderas pastoreando en las áreas x_l y x_{kj} , en cada período anual t (año), siendo LU_T las unidades ganaderas de todo el período de planificación.

$$\sum_{l t}^{L T} LU_{lt} x_l + \sum_{k j t}^{K J T} LU_{lt} x_{kj} = LU_T$$

Ecuación 3

3.4.4. Metas

Se consideraron las siguientes metas: Valor Presente Neto de la producción ganadera (NPV Ganadero), Valor Presente Neto de la forestación (NPV Forestal), Balance de Carbono, Ingreso Anual, volumen de madera cosechada, Volumen madera en pie al final del período, Cosecha madera inter anual, Estructura de edades balanceada de los rodales al final de horizonte. Los valores proporcionales α de cada ecuación se obtienen del procesamiento de las encuestas, explicado más adelante en el texto.

3.4.4.1. Valor presente de la producción ganadera

$$\sum_{l, kj}^{L, KJ} NPV_{cl} x_l + NPV_{cl} x_{kj} + n_{NPV_c} - p_{NPV_c} = \alpha_c NPV_c^*$$

Ecuación 4

Las variables NPV_{cl} (US\$ ha⁻¹) es el valor presente neto de la producción de ganado en áreas de pastoreo x_l y producción de ganado bajo la forestación x_{kj} que puede albergar una cierta carga ganadera.; α_c es la proporción de logro a alcanzar, NPV_c^* es el valor ideal que se obtiene de maximizar NPV_{cl} (Ecuación 4). Los desvíos p_{NPV_c} y n_{NPV_c} , son los desvíos positivos y negativos con respecto al valor ideal, siendo n_{NPV_c} el desvío a incluir en la Función Objetivo.

3.4.4.2. Valor presente de la producción forestal

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

Ecuación 5

Siendo $NPV_{f_{kj}}$ (US\$ ha⁻¹) el valor presente neto forestal del área x_{kj} (ha) en el rodal k bajo el régimen j ; NPV_f^* es el valor ideal obtenido cuando se maximiza NPV de la forestación (Ecuación 5), α_f es la proporción a alcanzar de la meta forestal. El desvío negativo a minimizar es n_{NPV_f} , mientras que un desvío positivo (p_{NPV_f}) es bien aceptado por el centro decisor.

3.4.4.3. Balance de carbono

El balance de carbono (CB , Mg CO_{2-e}) es el resultado contable del incremento anual de carbono en la biomasa forestal Bf_{kjt} (Mg CO_{2-e} ha⁻¹ año⁻¹) en el rodal k durante el período t , descontando el carbono por la cosecha de la madera en el período t (CH_{kjt} , Mg CO_{2-e} ha⁻¹ año⁻¹) y el carbono anual emitido por el ganado pastoreando (Ce). Este

valor se obtiene de multiplicar la carga ganadera en un año t por un factor de emisión de 3,487 (Mg CO_{2-e} LU⁻¹), ver Cuadro 24 en Anexo. Se considera solo la biomasa forestal aérea, no se incorpora en el balance la biomasa radicular.

$$\sum_{kjt}^{KJT} (Bf_{kjt} - Bf_{kjt-1})x_{kj} - \sum_{kjt}^{KJT} CH_{kjt}x_{kj} - \sum_{lkjt}^{LKJT} Ce_t x_l + Ce_t x_{kj} + n_{CB} - p_{CB} = \alpha_{CB} CB^*$$

Ecuación 6

El valor CB^* (Ecuación 6) se obtiene maximizando el balance de carbono CB , sujeto a restricciones de área; α_{CB} es la proporción con respecto al valor ideal admitido, con desvíos positivos (p_{CB}) al valor ideal o desvíos negativos (n_{CB}), este último es un desvío no deseado que integra la Función Objetivo. Todos los parámetros para computar el carbono se presentan en el Apéndice 1.

3.4.4.4. Ingresos anuales

$$\sum_{kjt}^{KJT} I_{f_{kjt}} x_{kj} + I_{C_t} x_l + I_{C_t} x_{kj} = I_t$$

Ecuación 7

$I_{f_{kjt}}$ representa el ingreso forestal (US\$ ha⁻¹) en el rodal k , régimen j y período de corta t , I_{C_t} (US\$ ha⁻¹) es el ingreso ganadero (Ecuación 7). Se busca que el ingreso de un determinado año I_t , se iguale con el del siguiente año I_{t+1} (Ecuación 8) de manera tal de lograr ingresos estables a lo largo del horizonte de planificación.

$$I_{t+1} - I_t + n_t I - p_t I = 0, \quad t = 1, \dots, T-1$$

Ecuación 8

La meta es minimizar la suma de desvíos negativos y positivos $n_t I$ y $p_t I$, siendo α_{I_t} (Ecuación 9), la proporción que es aceptada desviar de la meta inicial de ingresos uniformes, a lo largo del tiempo. Esta meta es incluida en el modelo ya que una de las barreras señaladas por los productores en este tipo de SSP es la falta de ingresos en

largos períodos de tiempo (Bussoni et al., 2015); los productores ganaderos prefieren ingresos regulares en el tiempo; este aspecto luego se confirma en las encuestas.

$$\alpha_{I_t} \sum_{t=1}^{T-1} n_t I + p_t I$$

Ecuación 9

3.4.4.5. Volumen de madera cosechada en todo el período

La madera cosechada en todo el período (V_{kjt} m³ ha⁻¹) se obtiene de lo que aporta X_{kj} en los momentos de corta t (Ecuación 10), p_h y n_h son los desvíos positivos y negativos, respectivamente, con respecto al valor ideal H^* en la proporción α_H .

$$\sum_{kjt}^{KJT} V_{kjt} X_{kj} + p_h - n_h = \alpha_H H^*$$

Ecuación 10

3.4.4.6. Madera en pie al final del período de planificación

$$\sum_{kj}^{KJ} V_f x_{kj} + n_{Vf} - p_{Vf} = \alpha_{Vf} V_f^*$$

Ecuación 11

Donde, X_{kj} (ha) es la superficie al final del horizonte con un volumen de madera en pie V_f (m³ ha⁻¹); el valor V_f^* se obtuvo maximizando V_f . Esto asegura llegar al final del horizonte de planificación con biomasa en pie lo que brinda sombra al ganado y asegura la continuidad de la producción tanto forestal como ganadera. Los desvíos negativo y positivo n_{Vf} y p_{Vf} , respectivamente, es la distancia en volumen con

respecto al volumen ideal V_f^* (Ecuación 11) y la proporción α_{V_f} , que se acepta del valor ideal.

3.4.4.7. Volumen de cosecha regulada por periodo

$$\sum_{kjt}^{KJT} V_{kjt} x_{kj} = H_a$$

Ecuación 12

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

Ecuación 13

El volumen de cosecha anual de madera de manera regular es otra meta a alcanzar, siendo V_{kjt} ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) el volumen a ser cosechado en el rodal k , bajo el régimen j .

La variable H_a ($\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$) es el volumen cosechado en cada momento de corte t (Ecuación 12); se busca que lo cosechado anualmente sea uniforme entre años (Ecuación 12), aceptando desvíos negativos (n_{Hm}) y positivos (p_{Hm}) entre períodos (Ecuación 13). Estas dos variables son minimizadas ya que son valores no deseados en el modelo. Una cosecha regular de madera contribuye a obtener una estructura de bosque normal (Bettinger et al., 2009; Davis y Johnson, 1987).

$$\alpha_{H_m} \sum_m^M n_{Hm} + p_{Hm}$$

Ecuación 14

Se busca minimizar el desvío, siendo α_{H_m} la proporción que se puede apartar del ideal de desvío cero (Ecuación 14).

3.4.4.8. Control de área forestal final

$$\sum_{kj}^{KJ} X_{kj} + n_A - p_A = \alpha_{AC} X_{AC}$$

Ecuación 15

Donde X_{AC} (Ecuación 15), es el área ocupada que pertenece a una de las 4 clases de edad (0-2, 3-5, 6-8, > 8) al final del horizonte de planificación, siendo n_A y p_A son los desvíos negativos y positivos y α_{AC} la proporción de desvío aceptable. La quinta clase es área que pudo haber sido forestada en el período pero que al final del período está libre de árboles y reservada para el ganado.

3.4.5. Encuestas

Se realizó una encuesta individual tanto en forma personal como telefónica a 20 productores ganaderos que poseen forestación comercial en sus predios (ver Anexo). La consulta constó de 4 partes: asignar los niveles de prioridad a los criterios del modelo (alta prioridad, media prioridad o baja prioridad), dar un orden o jerarquía a los criterios; a posteriori se pidió realizar la valoración cuantitativa de los mismos utilizando la metodología de Saaty (1977) exponiendo los criterios de a pares y valorando los mismos en una escala del 1 al 5. Finalmente, se les consultó sobre los tipos de modelo de decisión preferidos y la proporción que estarían dispuestos a aceptar con respecto al ideal de cada criterio.

La encuesta genera los insumos para la asignación de preferencias evaluando el primer criterio de a pares en una escala de 1 al 5. A partir de estas preferencias, se construye el vector ponderado, siguiendo a Romero (1996), en donde a_{in} representa el valor de preferencia del criterio i con respecto a cada n criterio. Por lo tanto el vector ponderado de cada criterio i será la resultante de $\sqrt[n]{\sum_{i=1}^n a_{in}}$. Subsecuentemente el valor cardinal ponderado es obtenido como $W_i = \frac{\alpha_i}{\sum \alpha_n}$, de manera tal que $\sum W_n = 1$.

Finalmente se pregunta sobre los tipos preferidos de modelos de decisión; jerárquicos o multiobjetivos. Se asume que el tomador de decisiones puede ordenar sus preferencias de manera consistente. Se puede profundizar en la metodología de Saaty en Romero (1996), y en casos aplicados forestales a grupos de decisores en los trabajos de Kangas y Kangas (2005) y Kangas et al. (2008).

Con estos valores se construyó una matriz de comparación para cada entrevistado, obteniendo los pesos relativos normalizados para cada criterio; el valor promedio para cada criterio es los que finalmente se utiliza en el modelo. Para cada criterio W_i refleja el valor dispuesto a aceptar o target comparado con el valor ideal.

El modelo general, está integrado por los desvíos no deseados a minimizar (Ecuación 16) siendo ésta, la función de logro general (general achievement function):

$$\text{Min } (n_{NPV_c}, n_{NPV_f}, n_{CB}, n_tI, p_tI, n_h, n_{HT}, p_{HT}, n_A, p_A, n_{Vf}, p_{Vf})$$

Ecuación 16

Todos los criterios son normalizados a partir de *Pay-off* matrix y ponderados y ordenados a partir de los resultados de las encuestas.

La programación por metas lexicográfica (LGP) es una técnica que ordena las desviaciones no deseadas con respecto a metas a priorizar. Utiliza el concepto de prioridad o peso excluyente, en donde el logro de un conjunto de metas situadas en una prioridad es siempre preferido al logro de un conjunto de metas en una prioridad inferior (Romero, 1996) introduciendo el concepto de función de logro o achievement function. LGP considera que la primera función de logro U_1 es infinitamente superior a U_2 (Romero y Rehman, 2003; Díaz-Balteiro y Romero, 2008) y esta a su vez a U_3 .

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 (Ecuación 17), puede presentar una relajación de $U_{i(\mu_h)}$ cuando $h < i$; por ejemplo $U_{3(\mu_2)}$ puede tomar cualquier valor con respecto a $U_{3(\mu_1)}$, sin embargo estrictamente $U_{3(\mu_2)} \geq U_{3(\mu_3)}$, cumpliendo con los preceptos del modelo LGP, siendo .

En este trabajo la función $U_{i(h)}$ (Ecuación 17), representa los valores de desvío en orden jerárquico como expresado por Romero y Rehman (2003).

$$U_{i(h)} = \sum n_{i_h} + p_{i_h}$$

Ecuación 17

El procedimiento por LGP garantiza que en la etapa i se encuentre el conjunto que optimiza la utilidad U_i , manteniendo los niveles alcanzados en etapas anteriores, por lo que se verifican las propiedades expresadas en Ecuación 19, Ecuación 19 y Matriz 1.

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

Ecuación 18

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

Ecuación 19

En donde i, j van de 1 a 3.

$$\begin{aligned} U_{1(\mu_1)} &= U_{1(\mu_2)} = U_{1(\mu_3)} \\ U_{2(\mu_1)} &\geq U_{2(\mu_2)} = U_{2(\mu_3)} \\ U_{3(\mu_1)} &? U_{3(\mu_2)} \geq U_{3(\mu_3)} \end{aligned}$$

Matriz 1

Resumidamente las etapas realizadas para la construcción del modelo base son las siguientes:

- a) Se construye la matriz de Pay off con los criterios pre-seleccionados,
- b) Se realizan encuestas a productores ganaderos con forestación. Esta información sirve para seleccionar el tipo de modelo, jerarquizar las metas y ponderar las mismas,

- c) En base a la información anterior, se cuantifica los targets del modelo y la clase de modelo multicriterio LGP ponderado, ya que permite jerarquizar en subconjuntos,
- d) Se ejecuta el modelo M_1 que minimiza los desvíos negativos de NPV ganadero y NPV forestal, en el primer nivel de prioridad,
- e) Se ejecuta el modelo M_2 que minimiza los desvíos negativos de NPV ganadero, en el primer nivel de prioridad,
- f) Finalmente se ejecuta el modelo M_3 que prioriza la meta ambiental en el primer nivel de jerarquía.

3.4.6. Estudio de caso

A continuación, se describe las principales características del estudio de caso, la metodología y los supuestos utilizados para el cálculo de las emisiones y fijación de carbono en los sitios

3.4.6.1. Parcelas permanentes y crecimiento

El predio se ubica en el Departamento de Maldonado ($34^{\circ}41'12.33''S$, $55^{\circ}08'20.89''W$), estando compuesto por 4 padrones que cubren en total 408 ha. El establecimiento posee forestación con *Eucalyptus globulus ssp globulus*, realizada en septiembre 2012, en un marco de plantación de 6x1.5 m.

Se establecen 31 parcelas forestales de diseño rectangular de 360 m² por parcela, las cuales se miden en 5 momentos (19, 25, 31, 36 y 54 meses) en que se registran las siguientes variables dasométricas: Diámetro a la altura del Pecho (DAP, cm), Densidad (plantas/ha) y Altura (H, m); con estas variables se calculó Volumen (m³/ha), Altura Media de los Dominantes (AMD, m) y Altura promedio (Ht, m). Con el procesamiento de los datos se establecen 3 sitios de productividad forestal (Figura 8) que presentan diferentes condiciones edáficas y topográficas como se muestra en Cuadro 7. Para más detalles sobre los resultados dasométricos, se puede consultar Bussoni et al. (2019).

Cuadro 7.- Principales características de suelos, pendiente en diferentes sitios.

Sitio Clase	Pendiente y posición	Permeabilidad (mm/h)	Tipo de suelo predominante
Sitio I (alta a media productividad)	2%-9%, Ladera alta	Moderadamente rápida, 7-12 mm/h	Urdotent lítico y Hidraquent típico
Sitio II (media a media baja productividad)	7-15%, Ladera media	Moderadamente lenta a lenta, 3.8-7 mm/h	Hapludalf típico y Endoacualf típico
Sitio III (baja productividad)	3-6%, Ladera baja	Moderadamente lenta a lenta, 3.8-7 mm/h	Endoacualf típico o mólico

Fuente: Alconada Magliano y Carricaburu (2019)

La superficie está distribuida en 276,6 ha en el que se puede combinar forestación y ganadería, un área libre de forestación en los rodales comprendida por cortafuegos y apta para el ganado de 32 ha, un área ganadera exclusiva fuera de la forestación que comprende 81,82 has (Área N1). Finalmente, un área de 17,3 has (Área N2) que no es considerada productiva por ser una zona buffer o de conservación (Figura 8).

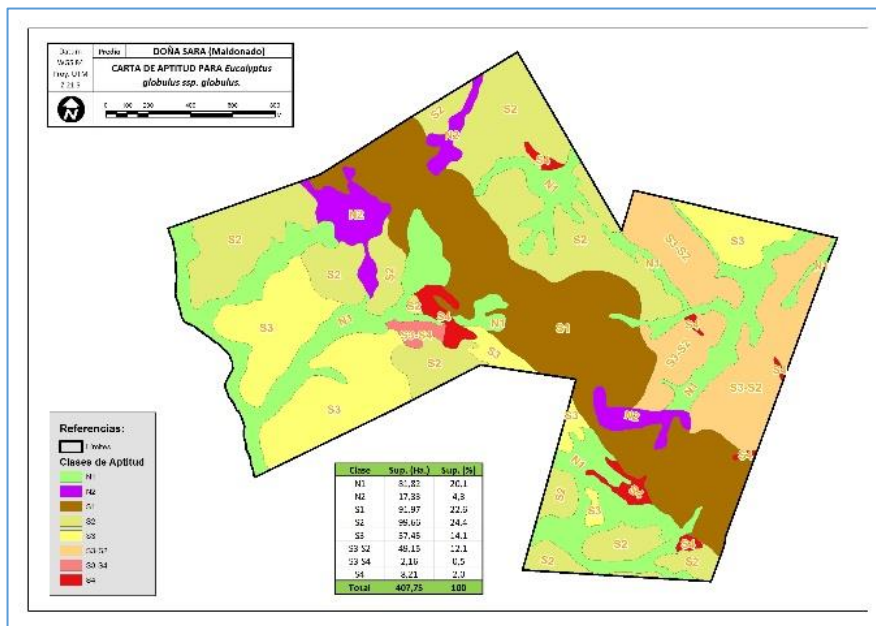


Figura 8.- Áreas con diferente aptitud productiva.

La proyección de madera se realizó con el programa SAG_INIA (Hirigoyen y Rachid, 2014) para *Eucalyptus globulus*. Las edades en las que se consideró la cosecha varían entre los 8-14 años, si bien en la gran mayoría de los regímenes se estiman cortas entre 9-11 años. Se planifica ciclos de plantación con 2 a 3 rotaciones y eventual replantación o manejo de rebrote.

El establecimiento cuenta con una dotación promedio de vacas de cría, retención de vientres y venta de terneros y novillos 1-2 años, que se toma como base para el modelo productivo (Cuadro 8).

Cuadro 8.- Rodeo Base Ganadero en el establecimiento.

<i>Dotación ganadera</i>	
Modelo criador	
Toro	3
Vaca de cría	100
Tenera	40
Ternero	40
Vaquillona 1 año	33
Vaquillona 1-2	33
Vaquillona >2 años	33
Novillo 1-2	30
Carga promedio (UG/ha)	0.78

3.4.6.2. Cálculo de alimentación energética animal y emisiones de CO_{2e}

Para estimar las necesidades energéticas vacunas, se parte de los requerimientos por categoría animal, aplicando el concepto de carga segura (SNIA, 2016), que calcula la dotación ganadera como el cociente entre la oferta y la demanda de forraje: la oferta estimada como el 50% de la productividad primaria neta forrajera (PPNA) en kg MS/ha y la demanda calculada como el 2% de peso vivo del animal (Ecuación 20).

$$\text{Carga Segura (UG/ha)} = (\text{PPNA} * 50\%) / (2\% * \text{peso vivo})$$

Ecuación 20

El valor de referencia de carga segura para la zona Cristalino Medio y Cristalino del Este, campos ondulados con pendientes que varían entre 2-12%, se ubica entre 0.70-0.80 UG/ha (Saravia et al., 2011) en campo natural, el que se emplea en el trabajo.

El cálculo de energía animal consumida en la pastura natural (Cuadro 23, en Anexo), se realiza en base a la producción de materia seca (DM) de 4.000 kg DM/ha año (Crempien, 2008), 9% de proteína como valor promedio y 50% de digestibilidad tomado de valores medidos previamente (Bussoni et al., 2019). A partir de los requerimientos de energía bruta (Gross Energy) en mantenimiento, actividad y

crecimiento para las categorías animales, se calcula la emisión de GHG (Cuadro 24 y Cuadro 26, en Anexo).

Si relacionamos las emisiones con el peso de los animales (kgCO₂-e/kg UG) los valores calculados en promedio de 9,45 son muy semejantes a 8,4 (Subak, 1999), por debajo del valor 16,7, calculado para un sistema de invernada para Uruguay (Modernel et al., 2013). Partiendo de un Sistema Criador se calcularon los valores de emisión del rodeo ganadero por UG.

Debido a que la carga ganadera decrece con la edad de la forestación, se asumen los valores en Cuadro 9; como se muestra, el ganado puede entrar en el monte a partir del año de edad.

Cuadro 9.- Carga ganadera asumida para diferentes edades bajo el monte forestal.

Edad del Monte (años)	Carga Ganadera Bajo Monte (UG/ha)	Edad del Monte (años)	Carga Ganadera Bajo Monte (UG/ha)
0-1	0	6-7	0,4
2-3	0,6	> 7	0,3
4-5	0,5	Año de cosecha +1 año	0

Se supone que cuando no hay forestación en pie, luego del primer año, puede haber ganado pastoreando en las Unidades de Manejo y que la carga ganadera en áreas libres es de 0,78 UG/ha. Esta situación ocurre particularmente en los rodales que se cosechan y no se vuelven a replantar o en áreas libres de forestación.

La superficie ganadera bajo monte se calcula indirectamente a partir del cálculo del área ocupada por el ganado (Unidades Ganaderas anuales sobre la carga ganadera admisible de 0,78 UG/ha) restando el área disponible para ganadería. Las Unidades Ganaderas anuales son un resultado del modelo y se asignan a las áreas libres de forestación y luego a áreas con monte.

3.4.7. Cálculo de carbono en el sistema biomasa forestal

La biomasa forestal retiene carbono hasta su cosecha, haciendo las veces de efecto compensatorio de las emisiones ganaderas. Todas las medidas de carbono son expresadas en toneladas de dióxido de carbono equivalente ($\text{Mg CO}_2\text{-e}$), en base a las valores de conversión (IPCC, 2013, Anexo) que establece las equivalencias en base al potencial de calentamiento global en un período de 100 años (Cuadro 25, Anexo). En la misma se observa los valores $\text{CO}_2\text{-e}$ equivalentes de los diferentes gases y el Global Warming Potential (GWP) que es un valor que combina la permanencia del gas en la atmósfera y el potencial de calentamiento, a través del poder de absorción de energía en un período de 100 años. Estos coeficientes se aplican a la metodología GWP, los que son usados para estimar la emisión del rodeo de cría. Existen grandes variaciones de los factores de conversión del gas Metano a $\text{CO}_2\text{-e}$, dependiendo de la fuente y año de estudio, para el presente trabajo se asume un valor de conversión de 25.

La biomasa forestal se calcula como la biomasa en el tronco, multiplicado un factor de expansión de biomasa (BEF) de 1,25 en base a trabajos nacionales (Anexo); se utiliza un coeficiente de emisión en la cosecha forestal realizada con equipo harvester y forwarder en base a un consumo de combustible de $2,8 \text{ l m}^{-3}$ y $1,7 \text{ l m}^{-3}$, respectivamente (Cuadro 25, Anexo), en base a una potencia estimada de 122 KW.

No se consideran cambios en los contenidos de materia orgánica en el suelo; de acuerdo a la investigación de De Stefano y Jacobson (2018) basado en estudios previos, se llega al resultado que no existen variaciones de esta variable cuando se pasa de campo natural o pasturas al uso de silvopastoreo. En el mismo sentido, estudios en Uruguay (Hernández et al., 2016) en rotaciones de 8 años en *Eucalyptus sp.*, no encontraron diferencias en la cantidad de carbono en el suelo en sitios con ocupación anterior de campo natural. Asimismo, tampoco se consideran cambios en la fertilidad del suelo.

3.4.8. Valoración de los regímenes forestales

El Ciclo forestal es el tiempo entre la plantación y la tala rasa, pudiendo incluir una o más rotaciones (Davis y Johnson, 1987), las que pueden ser manejadas aplicando tala rasa y replantación o rebrote. El horizonte de planificación de 30 años, puede incluir hasta 3 Rotaciones; las combinaciones posibles son tala rasa y replantación (Felling cycle o FC) o cosecha con manejo de rebrotes (C).

Para el cálculo de retorno económico se estima un valor de la madera en pie de 15 US\$/m³, los costos de plantación se presentan en el Cuadro 10. A pesar de que un cambio en los valores de los precios de insumos y productos podrían cambiar los resultados, esto no se analiza en el trabajo; los valores incorporados son conservadores tanto para los costos de producción como los productos.

Cuadro 10.- Costos de plantación y establecimiento del cultivo forestal.

	Edad (año)	Valor US\$/ha
Marcación de curvas de nivel con excéntrica	0	61
Labor	0	24
Subsolado profundo con tractor 50 cm	0	351
Excéntrica para afinado de tierra	0	61
Alomador tipo taipera o camellón	0	61
Herbicida (Acetoclor 120 cc)	0	54
Plantación de plantines <i>E. globulus</i> . Genética semilla	0	180
Reposición	1	36
Control de hormigas	0, 1	54
Fertilización fosfato mono- amónico (80 gr/planta)	0	120
Herbicida entre fila con aplicación (haloxifop + Control con desmalezadora	1	54

	Edad (año)	Valor US\$/ha
Herbicida en la línea de plantación	1	54
Fertilización foliar 2 aplicaciones.	1	74
Total Costo Plantación y establecimiento		1.238

Nota: US\$ referenciados a septiembre 2018.

En el caso de cosecha con manejo de rebrotes (C) se evitan los costos de plantación, pero existen otros costos asociados como la eliminación de vástagos y una menor productividad de la cepa que se evalúa en un 70% de su producción original, en cada rebrote (Guedes et al., 2011). El costo de manejo de rebrote según estimaciones propias es de 300US\$/ha e incluye: control de hormigas en dos períodos, despejador manual y eliminación de vástagos con motosierra y moto guadaña en el segundo año.

El valor de los Regímenes es la suma de los ingresos netos valorizados de madera y el valor productivo de la tierra (LEV). Este último se le conoce como Valor Esperado del Suelo (LEV) y expresa el máximo potencial de retorno neto en infinitas rotaciones (Davis y Johnson, 1987) como se muestra en Ecuación 21.

$$LEV = P(t)f(t)e^{-it} - K - Qe^{-it} - (R + G) \int_0^t e^{-it} dt$$

Ecuación 21

Donde, $P(t)$ es el precio de la madera al momento t , $f(t)$ es la función de producción de madera, i la tasa de descuento utilizada (3%), K costos de replantación, Q costos de cosecha, R la renta de la tierra y G los costos anuales de administración.

La potencial oferta de madera surge de la selección de la edad de cosecha en diferentes momentos para manejo fustal (FC) y tallar (C). Nuestro modelo se compone de 49 regímenes y 44 rodales (14 rodales Sitio I con 99,4 ha, 20 Rodales Sitio II con

118,6 ha y 10 rodales Sitio III que incluye los rodales sitio IV, con 51,1 ha) lo que permite la opción de un abastecimiento regular de madera.

El valor económico del régimen forestal (NPVR) es la actualización de los ingresos netos de madera en el período de planificación en cada régimen en particular (Ecuación 22); además del valor inicial y final del valor LEV (Rodríguez y Moreira, 1989).

$$NPVR_1 = P(t)f(t)e^{-it} - Ke^{-it} + \frac{LEV}{(1+i)^t} - LEV$$

Ecuación 22

3.5. RESULTADOS

Esta sección se divide en la presentación de los resultados a partir de la matriz de pay-off, las entrevistas y los valores obtenidos en los niveles de logro de los modelos considerados (M_1, M_2 y M_3).

En la matriz de pay off (Cuadro 11) se presentan los valores de los criterios considerados al maximizar un criterio a la vez. Como se observa, el Balance de Carbono, presenta importantes diferencias según el objetivo a optimizar. En la diagonal principal de la matriz se puede apreciar los valores ideales a alcanzar para cada objetivo. Los valores anti ideal o nadir son particularmente altos en la columna que prioriza el NPV ganadero. Cuando se maximiza NPV ganadero (Columna 2), la producción forestal es nula y el balance de carbono presenta el valor más alejado del ideal o nadir valor de -32.561 Mg de CO_{2-e}, lo que marca el punto más alejado del ideal (Columna 4) de 63.413 Mg CO_{2-e}.

Como ya mencionado, la diagonal principal de la matriz marca los valores ideales a excepción de la fila 7 y 8 en la Columna 2, en donde no existiendo producción forestal el criterio Desvío flujo continuo madera y Desvío Ingresos Anuales es nulo, debido a que la solución no considera la producción forestal; los valores ideales de

ambos criterios son entonces los que se muestran en la diagonal principal de la matriz en la fila 7 y 8.

También es interesante comparar los valores normalizados de la matriz en el Cuadro 11, en donde se aprecian las distancias absolutas entre los dos extremos ideal y anti-ideal. Es a destacar, la distancia en el Balance de Carbono, que alcanza 95.974 Mg CO₂_e con respecto al valor ideal, cuando se maximiza el retorno de la actividad ganadera.

Cuadro 11.- Resultados de la Matriz de Pay-off, para los criterios considerados.

Criterios	NPV Forestal (US\$)	NPV Ganadero (US\$)	Madera cosechada (m ³)	Balance Carbono (Mg CO _{2-e})	Desvío Edad Forestal (ha)	Desvío Inventario Forestal Final (m ³)	Desvío Flujo continuo (madera) (m ³ /año)	Desvío Ingresos Anuales (US\$)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
NPV Forestal (US\$)	883.456	0	821.934	537.836	300.396	428.085	440.648	456.198
NPV Ganadero (US\$)	101.053	411.001	102.595	98.687	108.312	124.412	144.295	277.210
Madera cosechada (m ³)	154.548	0	171.129	103.952	80.225	87.051	105.000	105.781
Balance Carbono (Mg CO _{2-e})	5.895	-32.561	38.376	63.413	12.435	40.684	17.433	6.501
Desvío 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 Flujo continuo (madera) (m ³ /año)	176.412	0	221.343	158.455	127.808	121.248	13.990	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

Cuadro 12.- Resultados normalizados de la Matriz de Pay-off, para los criterios considerados.

Criterios	NPV Forestal (US\$)	NPV Ganadero (US\$)	Madera cosechada (m ³)	Balance Carbono (Mg CO ₂ -e)	Desvío Edad Forestal (ha)	Desvío Inventario Forestal Final (m ³)	Desvío Flujo continuo (madera) (m ³ /año)	Desvío Ingresos Anuales (US\$)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
NPV Forestal (US\$)	0	883.456	61.522	345.620	583.060	455.371	442.808	427.258
NPV Ganadero (US\$)	309.948	0	308.406	312.314	302.689	286.589	266.706	133.791
Madera cosechada (m3)	16.581	171.129	0	67.177	90.904	84.078	66.129	65.348
Balance Carbono (Mg CO ₂ -e)	57.518	95.974	25.037	0	50.978	22.729	45.980	56.912
Desvío Edad Forestal (ha)	221	270	270	539	0	408	56	70
Desvío Inventario Forestal Final (m3)	3.905	0	0	46.725	13.145	0	14.301	13.851
Desvío Flujo continuo (madera) (m3/año)	162.422	13.990	207.353	144.465	113.818	107.258	0	3.674
Desvío Ingresos Anuales (US\$)	2.420.770	204.464	3.124.971	2.203.563	1.723.647	1.638.237	11.654	0

3.5.1. Resultado de las encuestas

En el Cuadro 13 se presentan los resultados de la encuestas, en la primera fila se muestra el orden de importancia asignado a cada criterio. Todos los productores le asignaron el primer orden de preferencia a la rentabilidad ganadera. Además, un grupo de productores (60%) le asignó el mismo orden a la rentabilidad forestal; el 40% restante le asignó un segundo orden de prioridad. Al ser estos dos criterios centrales en la configuración productiva y en los resultados a obtener, se plantea comparar los resultados de ambos criterios en conjunto lo que se denominará Modelo 1 (M_1) y por separado que se denominará Modelo 2 (M_2).

Los valores de las preferencias w_i , se obtienen del promedio de la matriz de comparación para cada criterio y su posterior normalización de manera que $\sum_{i=1}^j w_i = 1$, tal como recomienda Romero (1996). Finalmente, los targets a alcanzar se obtienen del promedio de las respuestas para cada criterio y refleja la proporción que estaría dispuesto un productor a renunciar, con respecto al valor ideal.

Cuadro 13.- Resultados de las encuestas realizadas a productores ganaderos con forestación en sus predios.

	Rentabilidad ganadera	Rentabilidad forestal	Ingresos interanuales	Cosechar madera	Balance Carbono	Bosque Normal
Orden de importancia asignado	1	1/2	2	2	3	3
Valores de asignación de preferencia	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

En todos los casos consultados, los productores prefieren jerarquizar las metas a alcanzar, por lo que el tipo de modelo seleccionado fue el lexicográfico, ponderado, aplicando la metodología lineal secuencial o Sequential Linear Method (Romero y Rehman, 2003).

3.5.2. Resultados de los modelos

A partir de los resultados de las encuestas se obtienen las funciones objetivo y tres modelos a considerar. Tenemos en el Cuadro 14 un primer modelo (M_1) que incluye los desvíos negativos a minimizar de NPV Ganadero (n_{NPV_c}) y NPV Forestal (n_{NPV_f}), en un segundo nivel de logro (U_2) se incluyen los desvíos de Ingresos Anuales (n_tI, p_tI) y Madera Cosechada (n_h) y en el tercer nivel (U_3) se busca minimizar los desvíos negativos de Balance Carbono (n_{CB}), desvío de cosecha de madera anual o Desvío Flujo continuo de madera (n_{Hm}, p_{Hm}), desvíos negativos de clase de edad o Desvíos de Edad Forestal (n_A, p_A) y desvíos de Inventario Forestal Final (n_{Vf}, p_{Vf}).

Un segundo grupo de productores considera n_{NPV_f} en un segundo nivel de jerarquía, por lo que se incluye esta variante en un segundo modelo (M_2). Adicionalmente, se considera en un nivel inicial (U_0) la meta ambiental n_{CB} lo que conforma el modelo M_3 .

Cuadro 14.- Función objetivo a minimizar en los modelos M en cada nivel de logro U_i .

	U_0	U_1	U_2	U_3
M_1	--	n_{NPV_c}, n_{NPV_f}	n_tI, p_tI, n_h	$n_{CB}, n_{Ht}, p_{Ht}, n_A, p_A, n_{Vf}, p_{Vf}$
M_2	--	n_{NPV_c}	$n_{NPV_f}, n_tI, p_tI, n_h$	$n_{CB}, n_{Ht}, p_{Ht}, n_A, p_A, n_{Vf}, p_{Vf}$
M_3	n_{CB}	n_{NPV_c}, n_{NPV_f}	$n_{Ht}, p_{Ht}, n_A, p_A, n_{Vf}, p_{Vf}, n_h$	--

Como se observa en Cuadro 15 y Cuadro 16 cuando NPV Ganadero y NPV Forestal se encuentran en un primer nivel de jerarquía, los valores target no se logran alcanzan en U_1 ; los valores alcanzados en U_2 resultan en una leve mejoría en los ingresos interanuales y la madera cosechada interanual.

Cuadro 15.- Resultados del modelo M_1 , en los tres niveles de logro U_1, U_2 y U_3 , considerando NPV Ganadero y NPV Forestal en primer nivel de prioridad.

Criterio	U_1	U_2	U_3
	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}
NPV Ganadero (US\$)	302.935	302.935	302.935
NPV Forestal (US\$)	556.578	556.578	556.578
Desvío Ingresos Anuales (US\$)	2.310.732	2.310.653	2.310.653
Volumen Madera Cosechada (m ³)	95.762	95.762	95.762
Desvío Edad Forestal (ha)	341	341	341
Desvío Inventario Forestal Final (m ³)	7.392	7.392	7.392
Desvío Flujo continuo madera (m ³ /año)	154.276	154.274	154.274
Balance de Carbono (Mg CO _{2-e})	-17.492,5	-17.492,5	-17.492,5

Los valores resultantes de función de logro (Cuadro 16), se obtienen de la sumatoria de los desvíos normalizados con respecto a los targets (Ecuación 17) en cada nivel jerárquico.

Cuadro 16.- Valores obtenidos de las U_i derivados de los resultados de Cuadro 15.

	μ_1	μ_2	μ_3
U_1	160.207	160.207	160.207
U_2	267.604	267.599	267.599
U_3	233.527	233.527	233.527

Como se observa en el Cuadro 16, el valor de utilidad U_i es fijado en el primer nivel del modelo lo que sugiere que el imponer en el primer nivel de jerarquía el maximizar el NPV Forestal y el NPV Ganadero, determina toda la estructura

productiva y no permitiría ninguna modificación para alcanzar otro tipo de metas, como la meta ambiental.

En el Cuadro 17, se presentan los resultados del modelo 2, M_2 con los valores alcanzados cuando se prioriza en primera jerarquía NPV Ganadero. En este caso el valor target es alcanzado en el primer nivel de jerarquía (U_1) de tal manera que $U_{1(u_1)} = 0$ ya que no hay ningún desvío, como se observa en el Cuadro 18. El modelo M_2 es el que resulta en la ocupación más extendida del área ganadera con un total de 258 ha (Cuadro 21). El área ganadera es la suma del área del ganado bajo dosel, áreas marginales como cortafuegos y área exclusiva ganadera. En un segundo nivel de jerarquía (U_2) el NPV Forestal se incrementa en un 86%, en parte con un incremento en el desvío del valor de inventario forestal al final del ciclo que pasa de 4.263 m³ a 8.495 m³ de desvío, a su vez la cantidad de madera en pie al final del ciclo se reduce pasando de 5.799 m³ en U_1 a 515 m³ en U_2 (Cuadro 21). También se puede apreciar que los regímenes seleccionados se concentran en sitio II y del tipo FC o Tallar. Todos estos resultados empeoran el balance de carbono, pero el conjunto de targets impuestos en el nivel U_2 son alcanzados.

Cuadro 17.- Resultados del modelo M_2 , en los tres niveles de logro U_1 , U_2 y U_3 , considerando NPV Ganadero en primer nivel de prioridad.

Criterio	U_1	U_2	U_3
	n_{NPV_C}	$n_{NPV_F}, n_{tI}, p_{tI}, n_h$	$n_{CB}, n_{Ht}, p_{Ht}, n_A, p_A,$ n_{Vf}, p_{Vf}
NPV Ganadero	317.307	317.307	317.307
NPV Forestal	260.440	483.711	483.711
Desvío Ingresos Anuales (US\$)	1.087.767	1.764.601	1.764.601
Volumen Madera Cosechada (m ³)	70.790	83.943	83.943
Desvío Edad Forestal (ha)	297	352	352
Desvío Inventario Forestal Final (m ³)	4.263	8.485	8.485
Desvío Flujo continuo madera (m ³ /año)	72.092	118.641	118.641
Balance de Carbono (Mg CO _{2-e})	-12.741	-20.160	-20.160

Cuadro 18.- Valores obtenidos de las U_i derivados de los resultados de Cuadro 17.

	μ_1	μ_2	μ_3
U_1	0	0	0
U_2	1.160.943	224.235	224.235
U_3	205.507	221.737	221.737

En el Cuadro 19, se observan los resultados del modelo M_3 , en donde la columna U_0 en la última fila, muestra el valor del target ambiental que es alcanzado con un balance de carbono de 6.788 Mg CO_{2-e}. El incremento del valor total de los targets en U_1 (NPV Ganadero y NPV Forestal) se realiza disminuyendo el área forestada que

pasa de 270 ha a 168 ha y también una disminución de la madera cosechada que pasa de 147.076 m³ a 109.719 m³ en todo el período; por lo tanto disminuye NPV Forestal pero mejora el valor $U_2(\mu_2)$ como se observa en el Cuadro 20. Esto ocurre porque la ponderación de NPV Ganadero es mayor que NPV Forestal. Es interesante observar que el valor del target ambiental (6.788) se sigue manteniendo a pesar de que aumenta el área ganadera de 121 ha a 222 ha, las Unidades Ganaderas pasan de 6.223 UG a 7533 UG. Asimismo, se reduce el área forestada de 270 ha a 168 ha (Cuadro 21) y se mejora el NPV Ganadero, el criterio más apreciado por los productores ganaderos como muestran los resultados de las encuestas.

Se puede decir que los targets productivos en un primer nivel de prioridad como ocurre en M_1 y M_2 , condicionan de manera importante el resto de los targets a alcanzar. De manera particular, el target ambiental no puede ser alcanzado si no se impone en el primer nivel de jerarquía como ocurre en M_3 .

Cuadro 19.- Resultados del modelo M_3 , en los tres niveles de logro U_0 , U_1 y U_2 , considerando Balance de Carbono en el nivel U_0 y NPV Ganadero y NPV Forestal en U_1 .

Criterio	U_0	U_1	U_2
	n_{CB}	n_{NPV_c}, n_{NPV_f}	$n_{HT}, p_{HT}, n_A, p_A,$ n_{Vf}, p_{Vf}, n_h
NPV Ganadero	227.210	292.698	292.698
NPV Forestal	641.562	556.578	556.578
Desvío Ingresos Anuales (US\$)	2.132.883	2.369.579	2.369.577
Volumen Madera Cosechada	147.076	109.719	109.719
Desvío Edad Forestal (ha)	170	377	377
Desvío Inventario Forestal Final (m ³)	5.693	9.000	9.000
Desvío Flujo continuo madera (m ³ /año)	144.821	158.298	158.298
Balance de Carbono (Mg CO _{2-e})	6.788	6.788	6.788

Cuadro 20.- Valores de las U_i derivados de los resultados de Cuadro 19.

	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

Cuadro 21.- Resumen de algunos resultados productivos en los modelos.

Modelos	M_1	M_2	M_3
Resultados			
Ocupación de área ganadera en área forestable (ha)	115	137	0 / 101
Área ganadera en cortafuegos (ha)	32	32	32
Área exclusiva ganadera (ha) (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
SW Site I (m ³)	1.608	3.531 / 502	5.435 / 0
SW Site II (m ³)	0	1.682 / 13	4.076 / 0
SW Site III (m ³)	0	586 / 0	548 / 0
SW (m ³)	1.608	5.799 / 515	10.559 / 0
LU_T	7.765	7.669 / 8.004	6.223 / 7.533

* Valores luego de la barra (/) significan un cambio en los resultados en los resultados en U_1 , U_2 o U_3 .

FC: Fustal; C: Tallar; SW: Madera en pie al final del ciclo de planificación.

En el Cuadro 22, se registran las distancias entre los targets establecidos por los productores en la primera columna y los resultados finales de los 3 modelos considerados. Un punto a considerar es que ninguno de éstos, llega a alcanzar un 100% de los valores de target. El modelo M_2 alcanza el 100 % del target de Ganadero NPV que es una meta de primera jerarquía, pero a costa del peor balance de carbono negativo, -20.160 Mg de CO_{2-e}. Si comparamos estos valores con los resultados del modelo M_3 en donde la meta de minimizar los desvíos negativos del balance de CO_{2-e} es la primera prioridad, los resultados son favorables, en un escenario en donde se

impusiera la meta ambiental de producir carne minimizando las emisiones del ganado. Si existieran incentivos a través de un diferencial de precio para este tipo de productos, estas metas podrían técnicamente ser alcanzadas con adecuados incentivos económicos como precios diferenciales para la carne producida en estas condiciones.

Cuadro 22.- Resultados comparados entre modelos.

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
Desvío Edad Forestal Regulación (ha)	275	341	352	377
Desvío Inventario Forestal Final (m ³)	23.830	7.392	8.485	9.000
Desvío Flujo continuo (madera) (m ³ /año)	112.885	154.274	118.641	158.298
Desvío Ingresos Anuales (US\$)	1.764.601	2.310.653	1.764.601	2.369.577

El modelo M_2 es el que recibe menor retorno financiero, ya que el total NPV sumando las dos actividades es de 801.018 US\$ frente al retorno recibido en M_1 e

inclusive en M_3 . Este modelo M_3 es el que alcanza el mejor valor de la meta de ingresos anuales regulados a lo largo del horizonte de planificación, lo cual es apreciado por los productores ganaderos.

Los criterios de ordenar la producción forestal tendiendo a obtener un bosque normal (Desvío Edad Forestal, Desvío Inventario Forestal Final, Desvío Flujo continuo madera) son por un lado poco valorados por los productores y por otro lado, resultan en soluciones dominadas por las metas de primera y segunda jerarquía, para todos los modelos planteados.

3.5.3. Uso de los recursos en los modelos

Los resultados de los modelos M_1 , M_2 y M_3 derivan en diferente uso del espacio y de los recursos como presentado en Cuadro 21. En M_1 el 77% (119 ha) del total de área forestada (155 ha) es realizada en el Sitio II ocupando 20 rodales (Figura 9).



Figura 9.- Áreas ocupadas con forestación en el modelo Ganadero y Forestal (M_1).

El modelo $M_2 - U_1$ ocupa 132 ha de forestación en donde el 47 % del área es asignada al Sitio I; a su vez 8 rodales son los que abastecen de madera en regímenes Fustal (

Figura 10). El modelo M_2 es el que alberga mayor cantidad de ganado, entre 7.669 UG y 8.004 UG en todo el período. Como se muestra en la Figura 11 y Figura 14, el área forestada se redistribuye cuando se obtiene U_2 , en un 90% de rodales de productividad intermedia (Sitio II).

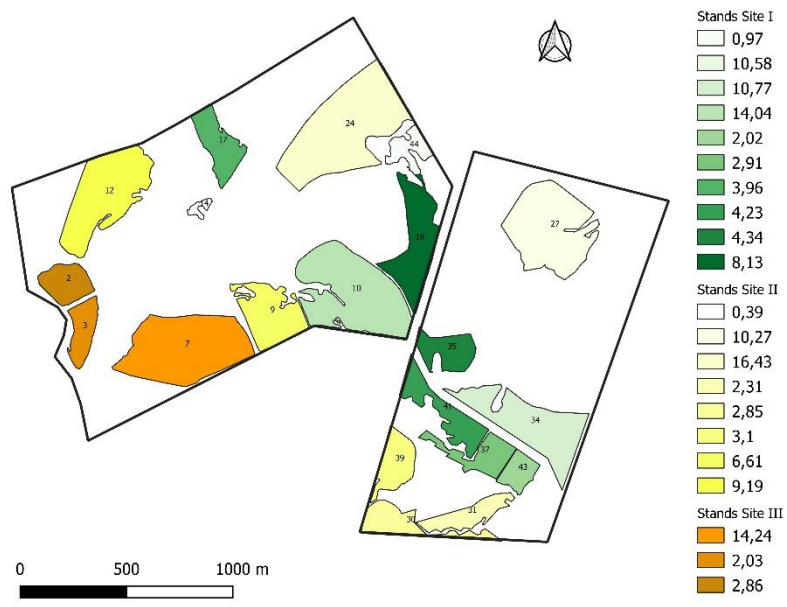


Figura 10.- Áreas ocupadas con forestación en el Modelo Ganadero $M_2 - U_1$.



Figura 11.- Áreas ocupadas con forestación en el Modelo Ganadero $M_2 - U_2$.

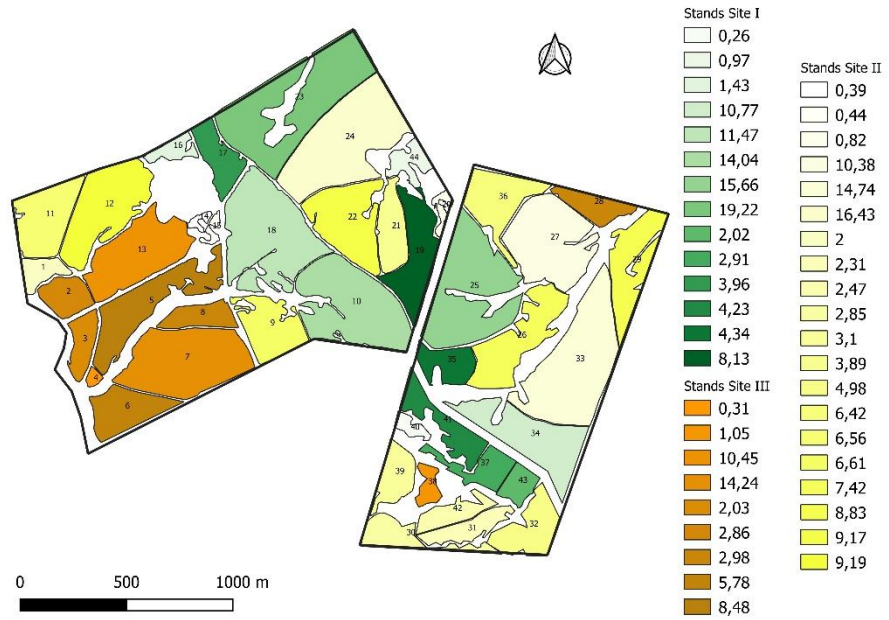


Figura 12.- Áreas ocupadas con forestación en el Modelo Balance de Carbono $M_3 - U_0$.

El modelo $M_3 - U_0$ (Figura 12) resulta en la mayor ocupación de área forestada, en donde 44 rodales ocupan aproximadamente 270 ha, alcanzando de esta manera el target de Balance de Carbono.



Figura 13.- Áreas ocupadas con forestación en el modelo $M_3 - U_1$.

En el modelo M_3 , los resultados cambian cuando se busca minimizar el desvío de los target financieros VPN forestal y ganadero , $M_3 - U_1$ en donde, para alcanzar estos objetivos se deben ocupar 27 rodales de Sitios I y II (Figura 12 y Figura 13). En este caso la estrategia para obtener U_1 es ocupar el espacio con mayor cantidad de ganado (Cuadro 21) en el período de planificación y no tener madera en pie al final del período (ver el valor de SW en Cuadro 21). Este modelo es promisorio desde el punto de vista que es posible alcanzar niveles altos de las metas productivas y ambientales (Balance de Carbono, NPV Forestal, NPV Ganadero) cuando se jerarquiza en un primer nivel la meta ambiental, si bien se debe reasignar beneficios financieros de las dos producciones.

3.6. DISCUSIÓN

Los datos de campo detallados, las entrevistas a los productores ganaderos y los modelos de programación por metas, sintetizan una gran cantidad de información biofísica, productiva y económica. Proveen una rigurosa herramienta para analizar el uso de los recursos y la sustentabilidad sobre los modelos planteados. Los resultados de las entrevistas resaltan los múltiples criterios que se tienen en cuenta en la toma de decisiones como señala Romero y Rehman (2003), en donde el productor dispone de información limitada y más que optimizar o llegar al mejor valor de una meta, pretende alcanzar la función de logro que lo satisfaga, al estilo de la teoría de racionalidad limitada de Simon (Simon, 1955).

Asimismo, brinda información del conjunto satisfaciente que debe ser considerado por el tomador de decisiones. La información de mediano y largo plazo generada en esta investigación, permite integrar diferentes dimensiones en el tiempo, incorporando las preferencias de los tomadores de decisión.

Los modelos propuestos y sus resultados pueden contribuir a la cuantificación de los conflictos productivos y ambientales y aportar en comprender en un horizonte temporal de largo plazo, las ventajas y desventajas de las diferentes formas de integración.

El enfoque multicriterio que se aplica a partir de la matriz de pagos, permite obtener un conjunto satisfaciente por parte del tomador de decisiones. Como se muestra en Cuadro 19, los valores de Desvío Flujo continuo de madera, pueden empeorar pero el conjunto satisfaciente U_3 mejora, como aparece en Cuadro 20 por lo que se evalúa el conjunto de los resultados.

La cuantificación de los trade-offs ayuda a evidenciar los conflictos productivos y ambientales como señala Boillat et al. (2017), en nuestro trabajo se obtienen modelos productivos que permiten la producción comercial de la ganadería y la forestación, a diferencia de otros trabajos que proponen neutralizar las emisiones del ganado, manteniendo el reservorio de carbono con la forestación en pie (De Oliveira

et al., 2015). El trabajo permite cuantificar la renuncia productiva y financiera para conseguir este conjunto de metas.

La metodología y los resultados obtenidos a partir de las diferencias entre los modelos y los valores alcanzados en cada etapa, permiten establecer la distancia en términos productivos, económicos, financieros y de balance de carbono para alcanzar el conjunto de metas impuestas. También brinda información sobre el cambio en el uso de los recursos, la productividad y los resultados financieros. Se demuestra que los objetivos productivos y de balance de carbono se podrían alcanzar con el adecuado diseño espacial y temporal de ambas producciones, inclusive considerando la cosecha de árboles en el sistema, a diferencia del trabajo de (Doran-Browne et al., 2018) en donde el carbono se almacena indefinidamente en los árboles.

Como se observa en los resultados de los modelos (M_1 , M_2 y M_3) la solución final es altamente dependiente del orden de preferencias en el nivel superior. El modelo M_2 que emplea el esquema de preferencias mayoritario dentro de los productores ganaderos encuestados, revela que los resultados en la jerarquía superior (U_1) son más determinantes que en los modelos M_1 y M_3 . El objetivo ambiental si bien es, en un principio valorado por una amplia mayoría de los encuestados es pobremente priorizada cuando se confronta con los otros objetivos.

Esto por un lado nos estaría revelando que la producción comercial y sus resultados económico-financieros de la producción forestal y ganadera son posibles técnicamente.

La meta de balance de carbono que es uno de los posibles servicios ecosistémicos, es posible de alcanzar si esta se jerarquiza en un nivel superior; la distancia hacia los targets de retorno económico debería ser confrontada con los tomadores de decisión. Esta distancia asimismo estaría marcando el incentivo mínimo a ser recibido por los productores ganaderos. Estas barreras para la integración de objetivos ambientales son también encontradas en trabajos sobre ganaderos en Australia y Texas, USA (Claytor et al., 2018; Schirmer y Bull, 2014), en donde el incentivo económico es una parte importante para la integración de la forestación con

objetivos ambientales, si bien operan de manera importante aspectos culturales y sociales.

Empero los resultados generados podrían ser limitados en su alcance, este estudio sugiere posibles caminos de integración entre la ganadería y la forestación y la posibilidad de incorporar beneficios ambientales. Los resultados proveen evidencia de que es posible tener planes de manejo que incorporen objetivos económicos y ambientales si los incentivos apropiados son incorporados al plan de mediano y largo plazo.

A pesar de que los modelos de optimización pueden ser reduccionistas, también brindan la posibilidad de simplificar realidades complejas y tratar los aspectos esenciales del problema. Se puede pensar algunos aspectos que pueden ser profundizados en futuros estudios como la estructura del proceso de toma de decisiones, las posibles interacciones entre la fertilidad y el carbono almacenado en el suelo, por un cambio de uso de ganadería a forestación o viceversa. Con la posibilidad de incorporar nueva evidencia científica se podrían diseñar modelos que incorporen mayores interacciones; con un análisis más específico en el uso de los recursos naturales para la situación de cambio de uso pastoril a uso forestal.

La investigación indica que el área ocupada por la forestación puede ser proporcionalmente alta en los niveles de óptimo, lo que llevaría a un cambio importante en la orientación de los productores.

El mejor resultado de metas integradas es el obtenido en el Modelo Ambiental (M_3) en el segundo nivel μ_2 , en donde se logra cumplir con la meta de balance de carbono y mejorar los resultados financieros de ambas producciones. Sin embargo, el nivel de ocupación de la actividad forestal es del 41%, muy por encima del promedio del 21% de superficie forestada, encontrado en los Grupos Ganaderos (Grupos 1, 2, 3 y 4) del Capítulo 2. En los otros dos modelos (M_1 y M_2) los valores de balance de carbono son siempre negativos (-17.492 vs. -20.160), si bien es un poco más favorable en el modelo integrado M_1 .

La integración en la producción de ganado y madera y la minimización de GHG muestra un gran potencial dependiendo entre otros factores, de los sitios a ocupar y la incorporación de incentivos posibles para mejorar los aspectos ambientales.

Existe cada vez mayor presión en las políticas para reducir los GHG a través de diferentes enfoques; los SSP pueden ofrecer una oportunidad a un costo social razonable.

Esto requiere una planificación y costos de monitoreo que no fueron tenidos en cuenta en este trabajo. Asimismo, se revela que la superficie que se debe implantar con montes es alta, lo que conlleva a un cambio importante en el uso del suelo. Por ejemplo, en los resultados presentados en el Cuadro 21 sería necesario un 41 % del área con montes forestales para cumplir las metas de Balance de Carbono, NPV forestal y NPV ganadero. Esto requiere planificación y un adecuado diseño espacial y temporal, de esta manera los rodales que se van cosechando pueden ser usados con mayor carga ganadera en los primeros años para luego ir disminuyendo la ganadería bajo dosel a medida que se llega al turno de corta.

La integración de ambas producciones revela un gran potencial a trabajar como la forma en que se da la integración y la incorporación adecuada de los eventuales incentivos a mejorar aspectos ambientales.

Como se demuestra en el trabajo, la forestación mejora el retorno económico financiero con respecto a la ganadería como actividad exclusiva, por lo que la integración adecuada puede beneficiar a los productores con un aumento en los ingresos del predio, cuando las dos producciones son complementarias. Cuando la producción de carne y la producción de madera entran en una zona de competencia, si los valores presentes son bajos, los pagos por servicio ambiental podrían mejorar el bienestar social o la incorporación de ese servicio al precio de la carne con valor diferencial en el mercado o una mejora en las condiciones de comercialización de la carne.

Como mencionado, los incentivos pueden provenir directamente del mercado de este tipo de productos que incorporan el servicio ambiental. El sector ganadero puede

argumentar que producen carne en sistemas de producción sumamente amigables con el ambiente y en condiciones de baja emisión de carbono, lo que pone al sector en un punto de ventaja frente a regiones que desforestan para producir carne, o que ignoran las oportunidades que brindan los sistemas integrados con respecto al abatimiento de GHG. Los sistemas de producción de carne en pasturas naturales pueden ofrecer ventajas en la Unión Europea y tal vez en Estados Unidos y Japón.

Uruguay y la región del Mercosur que es una zona del mundo que nuclea países con fuerte vocación exportadora de carne podrían promocionar sus exportaciones con el valor agregado ambiental y obtener diferenciales de precio para consumidores dispuestos a pagar por ese valor.

Adicionalmente, es importante seguir investigando si es posible desarrollar la diversificación de productos forestales que tiendan a obtener productos de madera sólida con mayor vida útil luego de la cosecha.

Por encima de todo, esta descripción biológica detallada y la investigación de programación por metas mejora el conocimiento de los SSP y los potenciales beneficios ambientales en Uruguay, país de importante contribución al mercado internacional de la carne y con oportunidades para reducir la emisión neta de carbono.

Existirían otros beneficios ambientales de las forestaciones como la mejora en la calidad de agua, la disminución de la erosión, una mayor diversidad de fauna, así como beneficios económicos para productores o para las economías locales. Se precisa generar información científica con resultados locales y que tengan en cuenta las múltiples formas en que se puede incluir la forestación en el predio como la proporción forestada, la densidad y el manejo silvícola. Esto implica trade off como la aceptación de nuevos sistemas de producción, un menor acceso al paisaje de pastizal, o cambios en el estilo de vida de los productores. Los productores y los hacedores de políticas para el sector, pueden utilizar los resultados presentados en este trabajo para considerar los incentivos apropiados para alcanzar las metas de producción de carne, madera y reducción de emisión de carbono.

3.6. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados resaltan la importancia de la planificación y de disponer de información detallada para el estudio de los sistemas integrados. El orden de las jerarquías asignadas da resultados muy diferentes como se evidencia en el modelo ganadero M_2 : en su segundo nivel se obtiene una mejora en el VPN forestal a costa de empeorar el balance de carbono que pasa de -12.741 ton CO_{2-e} a -20.160 ton CO_{2-e}, con una superficie forestada de 32% mientras que el modelo M_3 logra cumplir las metas con un 41% de superficie forestada.

Los productores ganaderos uruguayos pueden también argumentar que producen en sistemas ganaderos carbono neutral y muy posiblemente se puedan ganar mercados con respecto a regiones que precisan desforestar para producir carne. Los sistemas ganaderos uruguayos tienen incomparables condiciones para transformar la amenaza en una ventaja competitiva para el país. Los sistemas de carne en base a pasturas naturales ofrecen ventajas en la Unión Europea y quizás en Estados Unidos o Japón.

Otros beneficios ambientales podría ser la diversidad de la fauna, así como beneficios económicos. Como desventajas que podrían incorporarse en las preferencias está el cambio en el estilo de vida productivo tradicional sin árboles en los establecimientos.

3.8. BIBLIOGRAFÍA

- Alconada Magliano MM, Carricaburu F. 2019. Estudio de la relación SUELO - AGUA en la producción de madera de *Eucalyptus globulus* en silvopastoreo: Caso de estudio. En: Bussoni A (Ed.). Producción Ganadera y Forestal: Análisis de Sistemas de Producción Integrados. Montevideo: INIA (70). 87–129.
- Aldea J, Martínez-Peña F, Romero C, Díaz-Balteiro L. 2014. Participatory goal programming in forest management: An application integrating several ecosystem services. *Forests*, 5: 3352–3371. doi:10.3390/f5123352
- Becoña López G, Ledgard S, Wedderburn E. 2013. A Comparison of Greenhouse Gas Emissions from Uruguayan and New Zealand Beef Systems. *Agrociencia Uruguay*, 17: 120–130.
- Bettinger P, Boston K, Siry J, Grebner D. 2009. *Forest Management and Planning*. Burlington, MA: Academic Press. 331 p.
- Boillat S, Scarpa FM, Robson JP, Gasparri I, Aide TM, Aguiar APD, Anderson LO, Batistella M, Fonseca MG, Fudemma C, Grau HR, Mathez-Stiefel SL, Metzger JP, Ometto JPHB, Pedlowski MA, Perz SG, Robiglio V, Soler L, Vieira I, Brondizio ES. 2017. Land system science in Latin America: challenges and perspectives. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26–27: 37–46. doi:10.1016/j.cosust.2017.01.015
- Buongiorno J, Gilless K. 2003. *Decision Methods for Forest Resource Management*. San Diego: Academic Press. 439 p.
- Bussoni A, Boscana M, Varela F, Llanos E, Picasso V, Cubbage F, Alconada Magliano M, Carricaburu F. 2019. Producción Ganadera y Forestal: Análisis de Sistemas de Producción Integrados. Montevideo: INIA (70). 144 p.
- Bussoni A, Cabris J, Fernández E, Boscana M, Cubbage F, Bentancur O. 2015. Integrated beef and wood production in Uruguay: potential and limitations. *Agroforestry Systems*, 89: 1107–1118. doi:10.1007/s10457-015-9839-1

- Clayton H, Clark C, Lambert D, Jensen K. 2018. Cattle producer willingness to afforest pastureland and sequester carbon. *Forest Policy and Economics*, 92: 43–54.
- Crempien C. 2008. Antecedentes técnicos y metodología básica para utilizar en presupuestación en establecimientos ganaderos. *Bovinos para carne y ovinos*. Montevideo: Bs.As: Ed. Agropecuaria Hemisferio Sur. 72 p.
- Davis J, Rausser G. 2020. Amending conservation programs through expanding choice architecture: A case study of forestry and livestock producer. *Agricultural Systems*, 177 (1): 102678. doi: 10.1016/j.agry.2019.102678.
- Davis LS, Johnson NK, Bettinger P, Howard TE. 2001. *Forest Management. To Sustain Ecological, Economic, and Social Values*. Long Grove, IL: Fourth. Ed. Waveland Press, Inc. 816 p.
- Davis LS, Johnson NK. 1987. *Forest Management*. NY: McGraw_Hill, Inc. 790 p.
- De Oliveira R, Barioni LG, Zanett T, Eory V, Topp CFE, Fernandes FA, Moran D. 2015. Developing a nationally appropriate mitigation measure from the greenhouse gas GHG abatement potential from livestock production in the Brazilian Cerrado. *Agricultural Systems*, 140: 48–55.
doi:10.1016/j.agry.2015.08.011
- Díaz-Balteiro L, González-Pachón J, Romero C. 2016a. Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: A critical review. *European Journal of Operational Research*, 258: 607–616. doi:10.1016/j.ejor.2016.08.075
- Díaz-Balteiro L, Alfranca O, González-Pachón J, Romero C. 2016b. Ranking of industrial forest plantations in terms of sustainability: A multicriteria approach. *Journal of Environmental Management*, 180: 123–132.
doi:10.1016/j.jenvman.2016.05.022
- Díaz-Balteiro L, Romero C, Rodríguez LC, Ribeiro SN, Borges JG. 2014. *Economics and Management of Industrial Forest Plantations*. En: Borges JG, Díaz-Balteiro L, McDill ME, Rodríguez LCE (Eds.), *The Management of*

Industrial Forest Plantations. Theoretical Foundations and Applications.
Springer, NY, p. 543. doi:10.1007/978-94-017-8899-1

Díaz-Balteiro L, Romero C. 2008. Making forestry decisions with multiple criteria: A review and an assessment. *Forest Ecology and Management*, 255: 3222–3241. doi:10.1016/j.foreco.2008.01.038

Díaz-Balteiro L, Rodriguez LCE. 2006. Optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration-A comparison of results in Brazil and Spain. *Forest Ecology and Management*, 229, 247–258. doi:10.1016/j.foreco.2006.04.005

Díaz-Balteiro L, Romero C. 2004. Sustainability of forest management plans: A discrete goal programming approach. *Journal of Environmental Management*, 71: 351–359. doi:10.1016/j.jenvman.2004.04.001

Díaz-Balteiro L, Romero C. 2003. Forest management optimisation models when carbon captured is considered: a goal programming approach. *Forest Ecology and Management*, 174: 447–457. doi:443/10.1016/S0378-1127(02)00075-0

Doran-Browne N, Wootton M, Taylor C, Richard E. 2018. Offsets required to reduce the carbon balance of sheep and beef farms through carbon sequestration in trees and soils. *Animal Production Science*, 58: 1648–1655. doi:10.1071/AN16438

Giménez J, Bertomeu M, Díaz-Balteiro L, Romero C. 2014. Dealing with the Sustainability Issue for Industrial Plantation Management. En: Borges JG, Díaz-Balteiro L, McDill ME, Rodriguez LCE (Eds). *The Management of Industrial Forest Plantations. Theoretical Foundations and Applications*. Dordrecht: Springer, 473–488. doi:10.1007/978-94-017-8899-1

Giménez JC, Bertomeu M, Díaz-Balteiro L, Romero C. 2013. Optimal harvest scheduling in Eucalyptus plantations under a sustainability perspective. *Forest Ecology and Management*, 291: 367–376. doi:10.1016/j.foreco.2012.11.045

Guedes ICL, Coelho Junior LM, Oliveira AD, Mello JM, Rezende JLP, Silva CPC.

2011. Economic analysis of replacement regeneration and coppice regeneration in eucalyptus stand under risk conditions. *Cerne*, 17: 393–401.
- Hernández J, del Pino A, Vance ED, Califra Á, Del Giorgio F, Martínez L, González-Barrios P, 2016. Eucalyptus and Pinus stand density effects on soil carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 368: 28–38. doi:10.1016/j.foreco.2016.03.007
- Hirigoyen A, Rachid C. 2014. Sistema de Apoyo a la Gestión Forestal. [En línea]. Consultado 15 marzo 2018. Disponible en: <http://www.iniaforestaluy.com/sag/menu.aspx?74056>
- Indexmundi, 2019. Beef and Veal Meat Exports by Country. [En línea]. Consultado 15 marzo 2020. Disponible en: doi:<https://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=beef-and-veal-meat&graph=exports>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing BT - Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Stockholm. [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/WGI_AR5.Chap_8_SM.pdf
- Jones D, Tamiz M. 2010. Practical Goal Programming, Management Science. NY: Springer. 170 p. doi:10.1007/978-1-4419-5771-9
- Kangas A, Kangas J, Kurttila M. 2008. Decision Support for Forest Management. NY: Elsevier. 224 p.
- Kangas J, Kangas A. 2005. Multiple criteria decision support in forest management—the approach, methods applied, and experiences gained. *Forest Ecology and Management*, 207, 133–143. doi:10.1016/j.foreco.2004.10.023
- Kanter DR, Musumba M, Wood SLR, Palm C, Antle J, Balvanera P, Dale VH, Havlik P, Kline KL, Scholes RJ, Thornton P, Tittone P, Andelman S. 2018. Evaluating agricultural trade-offs in the age of sustainable development. *Agricultural Systems*, 163: 73–88. doi:10.1016/j.agsy.2016.09.010

- Kaya A, Bettinger P, Boston K, Akbulut R, Ucar Z, Siry J, Merry K, Cieszewski C. 2016. Optimisation in Forest Management. *Current Forestry Reports*, 2: 1–17. doi:10.1007/s40725-016-0027-y
- Lacorte S, Barth SR, Colcombet L, Crechi EH, Esquivel JI, Fassola H, Goldfard MC, Pezzuti R, Videla D, Wick RÁ. 2016. Silvopastoral Systems Developed in Misiones and Corrientes, Argentina. En: Peri P, Dube F, Varella A. (Eds.), *Silvopastoral Systems in Southern South America*. Gainesville:Springer. 9–39. doi:10.1007/978-3-319-24109-8
- Lingo. 2018. LINGO. The Modeling Language and Optimizer. Chicago, IL: LINDO SYSTEMS INC. 973 p.
- Modernel P, Astigarraga L, Picasso V. 2013. Global versus local environmental impacts of grazing and confined beef production systems. *Environmental Research Letters*, 8, 035052. doi:10.1088/1748-9326/8/3/035052
- Peri PL, Dube F, Costa Varella A. 2016. Silvopastoral Systems in the Subtropical and Temperate Zones of South America: An Overview. En: Peri P, Dube F, Varella A. (Eds.), *Silvopastoral Systems in Southern South America*. Gainesville:Springer. 1–8. doi:10.1007/978-3-319-24109-8
- Picasso VD, Modernel PD, Becoña G, Salvo L, Gutiérrez L, Astigarraga L. 2014. Sustainability of meat production beyond carbon footprint: A synthesis of case studies from grazing systems in Uruguay. *Meat Science*, 98: 346–354. doi:10.1016/j.meatsci.2014.07.005
- Rodriguez LCE, Moreira RM. 1989. Gerenciamiento de Florestas de Eucalyptus com Modelos de Programação Linear. Piracicaba: IPEF (6;19). 15 p.
- Romero C, Rehman T. 2003. *Multiple Criteria Analysis for Agricultural Decisions*. Amsterdam: Elsevier. 186 p.
- Romero C. 1996. *Análisis de las decisiones multicriterio*. Madrid: Isdefe. 115 p
- Saaty J. 1977. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of*

Mathematical Psychology, 15: 234–281.

Saravia A, César D, Montes E, Taranto V, Perreira M. 2011. Manejo del rodeo de cría sobre campo natural. Montevideo 80 pág. [En línea]. Consultado 19 agosto 2014. Disponible en:
http://www.planagropecuario.org.uy/uploads/libros/21_manual.pdf.

Schirmer J, Bull L. 2014. Assessing the likelihood of widespread landholder adoption of afforestation and reforestation projects. *Global Environmental Change*. 24, 306–320. doi:10.1016/j.gloenvcha.2013.11.009

Simon H. 1955. A Behavioral Model of Rational Choice. *The Quarterly Journal of Economics*, 69: 99–118.

SNIA (Sistema Nacional de Información Agropecuaria). 2016. Carga segura. [En línea]. Consultado 15 marzo 2017. Disponible en: SNIA-Monitoreo Ganadería
http://dlibrary.snia.gub.uy/maproom/Monitoreo_Agroclimatico/MONITOREO_GANADERIA/CARGA_SEGURA/Carga_Segura.html#tabs-1

Steiguer JE, Liberti L, Schuler A, Hansen B. 2002. Multi-Criteria Decision Models for Forestry and Natural Resources Management : An Annotated Bibliography. [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en:
<https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtrne307.pdf>

Subak S. 1999. Global environmental costs of beef production. *Ecological Economics*, 30: 79–91.

Tamosiunas M. 2015. La integración productiva de árboles y ganado en predios familiares: la visión del productor. *Agrociencia Uruguay*, 19: 150–157.

Uría M, Caballero R, Ruiz F, Romero C. 2002. Meta-goal programming. *European Journal of Operational Research*, 136, 422–429.

Zomer R, Trabucco A, Coe R, Place F. 2009. Trees on Farm: Analysis of Global Extent and Geographical Patterns of Agroforestry. [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/281748825_Trees_on_farm_analysis_of_global_extent_and_geographical_patterns_of_agroforestry

4. DISCUSIÓN GENERAL

En esta sección del documento se analizan los resultados de manera integral de acuerdo a los principales hallazgos encontrados en los dos capítulos precedentes. En especial se discute si los resultados encontrados son significativos y suficientes para los objetivos específicos planteados en el Capítulo 1 de este trabajo. Asimismo, se intenta dar una proyección del trabajo en el ámbito científico nacional y regional.

El primer objetivo específico del trabajo fue “*Caracterizar los principales Sistemas Integrados Madera Ganado existentes en el país y sus arreglos organizacionales*”.

En el capítulo 2 se presenta un análisis de la evolución del área ocupada por la ganadería y los recursos ganaderos, principalmente unidades ganaderas, con una reducción de área entre los años 2000 al 2013; en forma paralela se observa que ocurre una reducción de las unidades productivas de manera importante en ese período; diversos estudios señalan la pérdida de la producción ganadera familiar. Por lo tanto, existe una reconfiguración del territorio que en parte está explicado por los grupos encontrados.

Los grupos resultantes presentan un espectro de posibilidades productivas, arreglos organizacionales, propiedad de los recursos y generación de trabajo. Dentro de los grupos forestales emerge el grupo de las grandes extensiones forestales e integrados verticalmente (Grupo 6). Este grupo presenta una muy baja carga ganadera por lo que su integración con la ganadería es secundaria, a partir de contratos con pastoreantes o propiedad del ganado. La importancia de este grupo radica en que están integrados verticalmente y tienen poder de mercado de la madera.

Se agregan a los forestales, dos grupos que nuclean los predios medianos a grandes con ganadería en el monte, principalmente propiedad de pastoreantes (Grupo 5) y Forestadores extensivos que realizan cría vacuna y son dueños del ganado (Grupo7). Estos dos grupos forestadores no están integrados localmente, pero presentan un fuerte acceso al mercado forestal y manejan economías de escala.

Como contrapartida en los grupos ganaderos (Grupo1 al Grupo 4) en donde el principal rubro es la ganadería, la forestación es un complemento de sus ingresos ocupando en promedio un 20 % del área en propiedad. Se puede pensar que estos grupos realizan una diversificación productiva, orientados hacia el mercado de madera para picado, en rotaciones cortas y un manejo extensivo de la forestación de baja intervención silvicultural como podas y raleos. Por el tamaño de la producción forestal no detentan poder de mercado y no acceden a economías de escala en ese rubro. Este grupo se beneficia de la diversificación productiva y podría beneficiarse en incorporar al producto ganadero servicios ambientales ofrecidos por la forestación.

Si analizamos la evolución de las unidades ganaderas, parecería que la integración del rubro forestal tiene una contribución y actúa como un complemento de ingresos en la permanencia de la actividad ganadera. Sin embargo, las condiciones que un productor ganadero debe presentar para acceder a un acuerdo de forestación en su predio difícilmente abarque a un productor familiar pequeño.

Dentro de los grupos ganaderos, si bien no se puede saber qué tipo de forestación implantaron, la mayoría realiza acuerdos con empresas del tipo Grupo 6. Quiere decir que un sector comunicante entre el grupo de los ganaderos y la forestación es el Grupo 6, lo que le da la jerarquía de un sector privado que ejerce políticas en el territorio que influyen en el sector ganadero. Esta base de productores ganaderos es probable se esté ampliando debido a las expectativas de demanda de madera, pero sigue siendo un grupo reducido de productores.

Tomando como guía estos agrupamientos, en especial interesan el grupo de ganaderos de ciclo completo (Grupo3) o Ganaderos Criadores (Grupo 4), ambos con alta proporción de área forestada.

El segundo y tercer objetivo específico planteados en el trabajo fueron: *“Integrar variables económica-productivas en modelos de decisión”* y *“Estimar los efectos ambientales en los Sistemas Integrados basado en información empírica e información secundaria”*.

La primer Hipótesis “*Se pueden identificar grupos de productores según diferentes estrategias productivas de integración forestación y ganado*” se pudo demostrar a través de la obtención de los Grupos encontrados.

La segunda Hipótesis “*Los Sistemas Integrados Madera Ganado son potencialmente más estables económica y financieramente frente a los sistemas puros*” se puede demostrar parcialmente ya que los resultados de los modelos de acuerdo a las preferencias de los productores, tanto en M_1 como M_2 , pueden demostrar mayor retorno financiero combinando las dos producciones, con fuertes desvíos en la meta de regularidad en los ingresos netos anuales en el establecimiento. Si observamos los resultados financieros, la actividad forestal contribuye de manera importante a la mejora de la rentabilidad a partir de un aumento del valor presente neto de la producción conjunta, con respecto a la producción ganadera exclusiva. A pesar de ello los ingresos interanuales presentan fuertes desvíos con respecto a las metas fijadas por lo que se prueba una mejora en la rentabilidad, pero no se logra la meta de estabilidad de ingresos interanual. Este fue un aspecto relevado como importante por los grupos ganaderos en las encuestas realizadas.

La tercer Hipótesis “*Los Sistemas Integrados son más productivos y mejoran el desempeño ambiental frente a los sistemas puros*” se demuestra en la Matriz de Pagos en donde si el principal objetivo es maximizar la producción ganadera, resulta en el más bajo retorno financiero y peor desempeño ambiental de balance de carbono; en particular en el modelo M_2 en donde se jerarquiza en primer lugar la actividad ganadera, resulta en el modelo con más baja producción forestal (U_1) y peor resultado ambiental (U_2). El condicionante para demostrar la mejora en el desempeño ambiental sería posicionar la meta en un nivel jerárquico alto en la toma de decisiones.

La metodología LGP aplicada es un enfoque reduccionista, pero de una gran potencia que nos permite aislar en subconjuntos y analizar con mayor claridad, diferentes áreas como la productiva, la económica y la ambiental. Este punto es muy importante para analizar y tomar decisiones en sistemas complejos en el plano productivo y de políticas del sector. En particular este trabajo demuestra de manera inédita que se puede planificar y optimizar para obtener metas productivas y

ambientales, en Sistemas de producción de carne y madera, incorporando las preferencias de los productores.

A partir de criterios económico productivos y ambientales, la estructuración de una matriz de pago y los resultados obtenidos en la encuesta a productores ganaderos, se logra evaluar los resultados en base a tres modelos de decisión; el modelo M_1 que integra la producción forestal y ganadera es el que obtiene mejores retornos económico financieros en conjunto, pero no logra alcanzar la meta ambiental planteada en un tercer nivel de jerarquía.

El modelo ganadero puro M_2 , es el que obtiene los indicadores económico productivos más bajos y el de resultados más negativos en términos de balance de carbono. En un contexto de demanda creciente por servicios ambientales, como las demandas de la sociedad europea para castigar el consumo de los productos cárnicos, debido a los gases de efecto invernadero que resultan de la fermentación ruminal, Uruguay debiera buscar estrategias de mercado que demuestren las formas naturales de producción, y como los sistemas productivos ganaderos en el territorio presentan valores ambientales más bajos que la simple emisión bruta de GHG. A pesar de que la superficie que se debe presentar para conseguir la meta ambiental es particularmente alta, muy por encima del 20% del promedio de los grupos ganaderos, se pueden obtener valores aceptables en planes de producción que mejoren notablemente esos indicadores.

De este trabajo se obtienen también que las formas en que se jerarquizan los criterios productivos tiene un fuerte impacto en las variables ambientales, por ejemplo, el Modelo M_1 que es integrador de las dos actividades y es el que obtiene mejores resultados económico financieros no logra mejorar las metas ambientales o de bosque normal en sucesivos niveles.

El trabajo demuestra cómo influye de manera decisiva el orden de las metas para alcanzar los targets planteados. Así, modelos productivos que no tengan en cuenta la meta ambiental en un alto nivel de prioridad, difícilmente puedan mejorar las funciones de logro en estos sistemas productivos.

Los grupos ganaderos encontrados en el trabajo, se presentan como los productores a incorporar en futuros estudios, en donde se analice la integración de las dos producciones, los servicios ambientales y la sinergia que se generan en esa integración.

Los Grupos encontrados en la investigación, los modelos desarrollados y sus resultados que se basan en las preferencias de los productores, aspecto que debe ser tomada en cuenta en futuros modelos.

4.1. LINEAMIENTOS FUTUROS

Para alcanzar de manera más eficiente las metas propuestas en este trabajo y otras metas deseables, deberían ser incluidos en futuros estudios aspectos biofísicos y económicos que delimitan las posibilidades de modelos integrados. Así, la productividad forestal es un punto importante, los objetivos productivos, el diseño de plantaciones y una mayor integración espacial son líneas de trabajo a desarrollar.

Es esperable que las presiones de la economía global sobre el sector ganadero y forestal se profundicen en esta década. Estos sectores son grandes usuarios de recursos naturales por lo que estudios que evalúen el nivel de uso y los resultados económicos y sociales es probable sean demandados por una sociedad civil más informada y por la academia.

Los Sistemas integrados son, desde el punto de vista estructural y funcional, más complejos que el monocultivo de árboles o las pasturas y el ganado (Lorenz y Lal, 2018). La gran cantidad de aspectos involucrados en estos sistemas y los objetivos en conflicto, evidencian la necesidad de aplicar metodologías que puedan aislar la complejidad ecológica, económica y social para obtener planes eficientes, información sobre los términos de intercambio y la sensibilidad del plan hacia ciertos parámetros como precios y variaciones climáticas, entre otros (Baskent et al., 2020).

En el trabajo se alcanzan metas aceptables (productivas y de balance de carbono) con una proporción de 41% de área forestada, lo que es considerado alto para el

promedio del 20% forestado de los grupos ganaderos desarrollados en el capítulo 2 del trabajo. Esto podría ser mejorado a partir de incorporar rotaciones más largas con la obtención de productos intermedios. A continuación, se nombran algunas posibles líneas de trabajo que se consideran importantes para profundizar:

- a) Por ejemplo, el desarrollo de modelos planificados, en donde la plantación tenga como objetivo obtener madera para productos sólidos con mayor vida útil, el incorporar la vida útil del producto final podría mejorar el balance de carbono.
- b) Es muy importante tener en cuenta los mercados, las distancias en la producción forestal, la distancia a fábrica o puerto, aspectos que definirán también la viabilidad de estos modelos. En ese sentido el Centro del país emerge como una zona estratégica y de importante desarrollo, luego también con sus características las zonas Litoral, Norte y el Sureste del país, todas presentan características de mercado, suelos y sistemas forestales y ganaderos diferenciales.
- c) Existen zonas del país en donde por los motivos expuestos, no se podría llevar adelante modelos productivos para obtención de madera para productos sólidos, la mayor demanda en el país es la de madera para picado, en especial para producción de pulpa de celulosa. Este tipo de plantaciones que son las que predominan en el Uruguay producen un cambio en el uso de la tierra; existiendo poco conocimiento documentado sobre la reversión en este cambio, si bien si hay alguna evidencia empírica.
- d) La inclusión de otras fuentes de secuestro de carbono, pueden mejorar sensiblemente los valores del balance como, por ejemplo, el carbono en el suelo y el carbono en la biomasa radicular, aspectos que no fueron tenidos en cuenta en el trabajo.
- e) Los sistemas productivos presentes en los grupos ganaderos encontrados, deberían ser estudiados en cuanto a la eficiencia en las emisiones en el área producida (la hectárea) y en la unidad de producto (kg de carne) ya que estos aspectos llevan a resultados diferentes; por ejemplo, los trabajos de Picasso et al. (2014), Modernel et al. (2013) y Becoña López et al. (2013), señalan la

importancia de la eficiencia en la alimentación y la unidad elegida de medida en el balance de las emisiones, el tiempo de permanencia del animal en el sistema. La edad de faena y la eficiencia del rodeo como la tasa de preñez, llevan a obtener mejores resultados económicos y menor cantidad de emisión por kilogramo producido (Taylor et al., 2020). En general este tipo de estudios privilegia a los sistemas intensivos debido a una mayor tasa de ganancia de peso, lo cual puede ser bastante cuestionable desde el punto de vista de nuestros sistemas pastoriles en pasturas naturales. Para esto es preciso poner en valor estos atributos.

- f) Se debería incluir en los modelos, escenarios de contingencia ante cambios abruptos en la demanda o comercialización y usos alternativos de estos productos. Actualmente en mercados globalizados no es impensable que aparezcan nuevas reglamentaciones para la comercialización de carnes o de madera que conlleven restricciones a la demanda, si bien los modelos propuestos tratan de levantar esas restricciones. Los resultados pueden ser diferentes de manera notoria ante cambios en los parámetros los precios relativos de los productos carne y madera, aspectos a estudiar, sobre todo en el mediano y largo plazo.
- g) Sería deseable desarrollar parcelas experimentales permanentes y demostrativas en donde se pueda monitorear, relevar y estudiar las interacciones productivas y económicas de estos modelos, incluyendo arreglos espaciales con diferentes objetivos productivos. Esto permitiría tener una plataforma de investigación y capacitación para lo cual el ámbito académico tiene ventajas. Actualmente existe una iniciativa en el predio de un productor en ese sentido llevado adelante por el grupo de estudio del Polo Agroforestal.
- h) Es importante integrar en toda planificación las preferencias de los productores ganaderos. Esto ha ido cambiando con el tiempo a partir de una mayor apertura de empresas forestales hacia planes de integración, pero sería deseable desarrollar modelos de integración similares con mayor diversificación forestal.

- i) Los modelos deberían ser validados, para esto la confiabilidad de los mismos exige incorporar parámetros adecuados que reflejen la realidad productiva de las zonas. En nuestro caso se partió de un estudio de caso en profundidad y que se monitoreó durante tres años con *Eucalyptus globulus* que es una especie muy apreciada por su calidad de pulpa pero que, en la actualidad por problemas sanitarios es de las menos plantadas en el país. Es deseable ir sumando otros elementos que son importantes desde el punto de vista social y ambiental como el agua y la biodiversidad. Al contrario de lo que se publica en el hemisferio norte o en zonas de selva, en donde la biodiversidad es valorada en nuestros sistemas existen pocos estudios en esos aspectos. Los aspectos de agua y biodiversidad serán de gran importancia para incorporar productores ganaderos a la cadena comercial de la madera
- j) En anteriores estudios Bussoni et al. (2015), encuentra que la proliferación de especies depredadoras como zorro o jabalíes es una de las amenazas a las majadas y rodeo que maneja el productor. Otro tipo de biodiversidad como la proliferación de aves seguramente tendría un valor positivo siendo importante el abordaje productivo y social. A diferencia de las regiones en donde los bosques brindan una reserva de fauna y servicios de recreación o “ammenities” para nuestros casos son unidades productivas.

Los resultados encontrados en este trabajo podrían ser utilizados en los argumentos de conflictos ambientales y que mejoren la capacidad estratégica y de negociación ante organismos internacionales y en beneficios de los productores ganaderos locales.

La futura competitividad en los mercados internacionales puede evolucionar hacia la innovación y la obtención de productos agropecuarios que demuestren procesos cuidados con el medio ambiente y orientados a consumidores que identifiquen estas cualidades.

Finalmente, el desarrollo integral de ambas actividades depende del conocimiento que se genere sobre la mejora de la competitividad de producciones integradas.

4.3. BIBLIOGRAFÍA

- Baskent EZ, Borges JG, Kašpar J, Tahri M. 2020. A design for addressing multiple ecosystem services in forest management planning. *Forests* 11, 1–24. doi:10.3390/f11101108
- Becoña López G, Ledgard S, Wedderburn E. 2013. A Comparison of Greenhouse Gas Emissions from Uruguayan and New Zealand Beef Systems. *Agrociencia Uruguay*, 17: 120–130.
- Bussoni A, Cabris J, Fernández E, Boscana M, Cabbage F, Bentancur O. 2015. Integrated beef and wood production in Uruguay: potential and limitations. *Agroforestry Systems*, 89: 1107–1118. doi:10.1007/s10457-015-9839-1
- Lorenz K, Lal R. 2018. Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems, Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems. Springer. doi:10.1007/978-3-319-92318-5, 392 p.
- Modernel P, Astigarraga L, Picasso V. 2013. Global versus local environmental impacts of grazing and confined beef production systems. *Environmental Research Letters*, 8, 035052. doi:10.1088/1748-9326/8/3/035052
- Picasso VD, Modernel PD, Becoña G, Salvo L, Gutiérrez L, Astigarraga L. 2014. Sustainability of meat production beyond carbon footprint: A synthesis of case studies from grazing systems in Uruguay. *Meat Science*, 98: 346–354. doi:10.1016/j.meatsci.2014.07.005
- Taylor RF, McGee M, Kelly AK, Crosson P. 2020. Bioeconomic and greenhouse gas emissions modelling of the factors influencing technical efficiency of temperate grassland-based suckler calf-to-beef production systems. *Agricultural Systems*. 183, 102860. doi:10.1016/j.agsy.2020.102860

5. BIBLIOGRAFÍA

- Amaya García J, Rivas de los Santos N. 2012. Recría de terneras Hererford en Silvopastoreo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 70 p.
- Arbeletche P, Ernst O, Hoffman E. 2010. La Agricultura en Uruguay y su Evolución. En: García Préchac F, Ernst O, Arbeletche P, Pérez Bidegain M, Pritsch C, Ferenczi A, Rivas M. (Eds.). Intensificación Agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural. Montevideo: Udelar. 13-27
- Barrán JP, Nahum B. 1984. Uruguayan Rural History. *Hispanic American Historical Review*. 64: 655–673.
- Benavides R, Douglas G, Osoro K. 2009. Silvopastoralism in New Zealand: Review of effects of evergreen and deciduous trees on pasture dynamics. *Agroforestry Systems*, 76: 327–350.
- Bettinger P, Boston K, Siry J, Grebner D. 2009. *Forest Management and Planning*. Burlington, MA: Academic Press. 331 p.
- Bussoni A, Cabris J, Fernández E, Boscana M, Cabbage F, Bentancur O. 2015. Integrated beef and wood production in Uruguay: potential and limitations. *Agroforestry Systems*, 89: 1107–1118. doi:10.1007/s10457-015-9839-1
- Castelli M, Fossati JP, Camacho MN, Chakelson C. 2009. Desarrollo de un sistema de indicadores para la actividad de cosecha y extracción mecanizada de madera, *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, 7: 80-87.
- Chiappe M. 2008. Sustentabilidad de la agricultura: Un enfoque integrador. En: Chiappe M, Carámbula M, Fernández E.(Eds.). *El Campo Uruguayo: una mirada desde la sociología rural*. Montevideo: Facultad de Agronomía. 251–268.

- Clason TR. 1995. Economic implications of silvopastures on southern pine plantations. *Agroforestry Systems*, 29: 227 – 238.
- Cosola G, Grigolato S, Ackerman P, Monterotti S, Cavalli R. 2016. Carbon Footprint of Forest Operations under Different Management Regimes. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 37: 201–217.
- De Klein C, Novoa R, Ogle S, Smith K, Rochette P, Wirth T, McConkey B, Mosier. 2006. Emisiones de N₂O de los suelos gestionados y emisiones de CO₂ derivadas de la aplicación de Cal y Urea. . [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf
- Delgado S, Alliaume F, García Préchac F, Hernández J. 2006. Efecto de las plantaciones de Eucalyptus sp. sobre el recurso suelo en Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, X: 95–107.
- Díaz-Balteiro L, González-Pachón J, Romero C. 2016. Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: A critical review. *European Journal of Operational Research*, 258: 607–616. doi:10.1016/j.ejor.2016.08.075
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2019. Anuario Estadístico Agropecuario 2019. [En línea]. Consultado 15 marzo 2020. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-diea-2019>
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2013. Anuario Estadístico Agropecuario 2013. [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-diea-2013>
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2012. Anuario Estadístico Agropecuario 2012. [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-diea-2012>

pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-diea-2012

- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2005. Anuario Estadístico Agropecuario 2005. [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-diea-2005>
- Doldán J, Fariña I, Tarigo F. 2008. Utilización de Eucalyptus spp . Alternativas de plantaciones uruguayas para pulpa Kraft. Publicación Anual del Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo: LATU. 30–34.
- Durán P, García Préchac F. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación. Vol II. Montevideo: Hemisferio Sur. 358 p.
- FAO, 2010. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010. Informe Nacional Uruguay, FRA2010/225. Roma: FAO. 46 p.
- Gasparri N, Grau H. 2009. Deforestation and fragmentation of Chaco dry forest in NW Argentina (1972-2007). *Forest Ecology and Management*, 258: 913–921.
- Grado S, Hovermale C, St Louis D. 2001. A financial analysis of a silvopasture system in Southern Mississippi. *Agroforestry Systems*, 52: 313–322.
- Hartwick J. 1977. Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources. *American Economic Review*, 67: 972–974.
- Ibrahim M, Villanueva C, Casasola F, Rojas J. 2006. Silvopastoral Systems as a tool for the improvement of productivity and restoration of the ecological integrity of cattle production landscapes. *Pastos y Forrajes*, 29: 23–24.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Emissions from livestock and manure management. En: *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 87 p. [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf
- Kurtz W. 2000. Economics and policy of agroforestry. En: Garrett, H., Rietveld, W.,

- Fisher, R. (Eds.), North American Agroforestry: An Integrated Science and Practice. Madison, WI: American Society of Agronomy. 321–360.
- Lambin E, Meyfroidt P. 2011. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Sustainability Science*, 108: 3465-72. doi: 10.1073/pnas.1100480108
- Lamtom SH, Savidge RA. 2003. A reassessment of carbon content in wood: Variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy*, 25: 381–388. doi:10.1016/S0961-9534(03)00033-3
- Lima de Paula W, Brito Zakia M. 2006. As florestas plantadas e a água. Implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. São Carlos: RiMa-CNPQ, 218 p.
- Lovell S. 1981. Predicting the Diffusion of Improved Pastures in Uruguay. *American Journal of Agricultural Economics*, 63: 495–502.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington DC, 137 pág. Consultado 20 marzo 2014. Disponible en: <http://millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>.
- MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 2019a. *Cartografía Forestal Nacional 2018*. Montevideo: Artes Gráficas S.A. 21 p.
- MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 2019b. *Planes de Uso y Manejo Responsable de los Suelos*. [En línea]. Consultado 15 marzo 2020. Disponible en: <https://planesdeuso.mgap.gub.uy/planesdeuso/App/index.aspx>
- MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 2011. *Censo General Agropecuario*. [En línea]. Consultado 15 marzo 2014. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/censo-general-agropecuario-2011>
- MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 2004. *Código Nacional de*

- Buenas Prácticas Forestales. [En línea]. Consultado 15 marzo 2009. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/codigo-nacional-buenas-practicas-forestales-diciembre-2004>
- Nair PKR. 1993. An Introducción to Agroforestry. Dordrecht: Klgwer Academic Publishers. 499 p.
- Nuberg I, Brendan G, Reid R. 2009. Agroforestry for natural resource management. Collingwood: CSIRO. 347 p.
- Paolino C, Hill M. 2011. Perfiles de especialización agro/industrial y eficiencia en el uso de los recursos naturales: Uruguay frente a otros países de América Latina. En: Opypa (Ed.). Anuario Opypa 2011. Montevideo: Opypa. 223–238.
- Pérez Bidegain M, García Préchac F, Hill M, Cléríci C. 2011. La erosión de suelos en sistemas agrícolas. En: Intensificación Agrícola: Oportunidades y Amenazas para un País Productivo y Natural. Montevideo: Udelar. 128 p.
- Pérez-Bidegain M, García F, Duran A. 2001. Soil use change effect, from pastures to Eucalyptus sp., on some soil physical and chemical properties in Uruguay. En: International Conference on Land Degradation and Meeting of the IUSS Subcommission C- Soil Land and Water Conservation (3º, 2011, Río de Janeiro). Proceedings. 17-21.
- Prieto P. 2011. Base cartográfica para el desarrollo de una metodología de monitoreo de propiedades físicas y químicas de suelos forestales. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 110 p.
- ProBio. 2015. Producción de electricidad a partir de Biomasa en Uruguay. Proyecto “Producción de electricidad a partir de Biomasa en Uruguay” - URU/10/G31 - PROBIO Tacuarembó:INIA. 34p. [Datos sin publicar].
- Reca L, Lema D, Flood C. 2010. El crecimiento de la agricultura Argentina. Medio Siglo de Logros y Desafíos. Bs. As.: Ed. UBA. 488 p.

- Saez R. 2009. Desempeño del sector agropecuario y agroindustrial de Uruguay en el período 2000-2008 Montevideo: IICA.
- Siiskonen H. 2013. From economic to environmental sustainability: the forest management debate in 20th century Finland and Sweden. *Environment, Development and Sustainability*, 15: 1323–1336.
- Silveira L, Gamazo P, Alonso J, Martínez L. 2016. Effects of afforestation on groundwater recharge and water budgets in the western region of Uruguay. *Hydrological Processes*, 30: 3596-3608. doi:10.1002/hyp.10952
- Silveira L, Alonso J, Martínez L. 2006. Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 10: 75–94.
- Simeone A, Caorsi J. 2009. Los números de la ganadería en la forestación: la experiencia del proyecto ganadero de UPM Forestal Oriental. . [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en: <https://www.upm.uy/siteassets/documents/forestacion-ganaderia-uruguay.pdf>
- Simon H. 1955. A Behavioral Model of Rational Choice. *The Quarterly Journal of Economics*, 69: 99–118.
- Smith J, Pearce B, Wolfe M. 2013. Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? *Renewable Agriculture and Food Systems*, 28: 80–92.
- Solow R. 1974. The Economics of Resources or the Resources of Economics. *American Economic Review*, 64: 1–14.
- Stape JL. 2002. Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in Northeastern Brazil. Tesis PhD. Fort Collins, Colorado. Colorado State University. 225p.
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, de Haan C. 2006. *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. Roma: FAO. 390 p.
- Tamosiunas M. 2015. La integración productiva de árboles y ganado en predios

- familiares: la visión del productor. *Agrociencia Uruguay*, 19: 150–157.
- Tommasino H, Gómez A, González M, Santos C, Franco L. 2007. La sustentabilidad en la producción familiar y sus indicadores. En: IX Encuentro de Nutrición y Producción En Animales Monogástricos (IX, 2007, Montevideo). Actas. 19–23.
- Udawatta R, Shibu J. 2012. Agroforestry strategies to sequester carbon in temperate North America. *Agroforestry Systems*, 86: 225–242.
- UNIT 2014. Gestión forestal sostenible – Criterios e indicadores (No. UNIT 1152:2014). Montevideo: Ed. UNIT. 19p.
- Uruguay. Poder Legislativo. 1988. Ley N° 15.939. Ley Forestal [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en:
<https://legislativo.parlamento.gub.uy/temporales/leytemp5732273.htm>
- Von Stackelberg N. 2005. Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay. Tesis PhD. Raleigh, NC. North Carolina State University. 171 p.
- Woeste K, Blanch S, Moldenhaeur K, Nelson C. 2010. Plant breeding and rural development in the United States. *Crop Science*, 50: 1625–1632.
- WCED (World Commission on Environment and Development). 1987. Our common Future. Hauff V (Ed.). Oxford: Oxford University Press. 383 p.
- Zomer R, Trabucco A, Coe R, Place F. 2009. Trees on Farm: Analysis of Global Extent and Geographical Patterns of Agroforestry. [En línea]. Consultado 15 marzo 2015. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/281748825_Trees_on_farm_analysis_of_global_extent_and_geographical_patterns_of_agroforestry

6. ANEXOS

6.1. COEFICIENTES Y ECUACIONES

Cuadro 23.- Energía (Mj/head) calculada por categoría animal y emisiones de GHG.

Categoría	Peso Medio del animal	GE maintenance (MJ/head/day)	GE activity (MJ/head/day)	GE growth (MJ/head/day)	GE intake (MJ/head/day)
Toro	600	39,0	6,6	0	208,3
Vaca de cría	380	30,5	5,2	0	162,6
Tenera	140	13,1	2,2	5,8	130,3
Ternero	140	13,1	2,2	5,8	130,3
Vaquillona 1 año	270	21,4	3,6	9,4	213,2
Vaquillona 1-2	320	24,4	4,1	10,7	242,2
Vaquillona >2 años	350	26,1	4,4	11,4	259,0
Novillo 1-2	300	23,21	3,95	8,6	214,3
Novillo 2-3	400	28,80	4,90	10,7	265,9
Vaca Refugio	360	28,26	4,80	10,5	260,9

Cuadro 24.- Emisiones de GHG por categoría animal.

Categoría	CH ₄ (kg CH ₄ /head/day)	Intake N ₂ O (kg N ₂ O/head /day)	Excretion N ₂ O (kg/head /year)	CO ₂ _e (kg N ₂ O/head/yr)	CO ₂ _e (kg CH ₄ /head/yr)	Total CO ₂ _e (kg Live Unit/year)
Toro	0,243	0,151	51,3	480,7	3.019,2	3.499,8
Vaca de cría	0,190	0,118	40,1	375,1	2.356,4	2.731,6
Tenera	0,152	0,095	32,1	300,6	1.888,4	300,6
Ternero	0,152	0,095	32,1	300,6	1.888,4	300,6
Vaquillona 1 año	0,249	0,155	52,5	492,0	3.090,5	3.582,5
Vaquillona 1-2	0,283	0,176	59,7	558,9	3.510,5	4.069,4
Vaquillona >2 años	0,303	0,188	63,8	597,7	3.754,6	4.352,3
Novillo 1-2	0,250	0,156	52,8	494,5	3.105,9	3.600,3
Novillo 2-3	0,311	0,193	65,5	613,5	3.853,8	4.467,3
Vaca Refugio	0,305	0,189	64,3	602,0	3.781,3	4.383,3

Cuadro 25.- Valores utilizados para el cálculo del balance de GHG en el sistema silvopastoril.

GHG	Valor	Potencial de vida y de calentamiento (GWP) / Referencia
CO ₂ /C ^a	3,67 (12+16+16)/12	
CO ₂ /CH ₄	1,33 (44/33)	34 (IPCC, 2013)
CO ₂ /N ₂ O (Óxido Nitroso)	1,57 (44/28)	265 (IPCC, 2013)
Factor de conversión de Metano (CH ₄) conversion factor (% Gross energy in feed)	6,5%	(IPCC, 2013)
Factor de conversión de Óxido Nitroso (N ₂ O) (% Energía bruta en el alimento)	36%	(IPCC, 2013)
Densidad de la madera (gr/cm ³)	0,52	(Doldán et al., 2008)
Carbono en biomasa (%)	45%	(Lamlom y Savidge, 2003; Stape, 2002)
Factor expansión de Biomasa	1,25	(ProBio, 2015)
Factor de Biomasa exportada a la cosecha	0,8	(ProBio, 2015)
Emisión Combustible diésel (gr CO _{2-e} /l)	2,79	(Cosola et al., 2016)
Harvester + Forwarder ^b (l/m ³)	2,8 + 1,7	(Castelli et al., 2009)

^a Una tonelada de C abatida equivale a 3,67 Mg CO_{2-e}. ^b Consumo combustible en base a una potencia de 122 KW por operación.

Cuadro 26.- Coeficientes para estimar la emisión de Metano del ganado en mantenimiento y en crecimiento.

Parámetro	Unidad	Animal en mantenimiento	Animal en crecimiento	Reference
Peso inicial	Kg/animal	380 ¹	200 ²	¹ 380 kg corresponde a 1 vaca de cría con ternero al pie, ² peso de categoría Ternero
Peso final	Kg/animal	380	383 ³	³ Se estima en base a una ganancia anual de 100 kg/animal/año por lo se precisarían 22 meses para el peso final
PPNA Campo natural (a)	kg MS/ha/año	4.000		
Utilización de Pastura (b)	%	50		
Energía de la pastura (c)	Mcal/kg MS	2,2		
Oferta energía anual	Mcal/ha/año	4.400		
(d) = (a)*(b)*(c)				
Relación Energía(e)	MJ/Mcal	4,187		

Parámetro	Unidad	Animal en mantenimiento	Animal en crecimiento	Reference
EC: Consumo				
diario de energía por animal	Mcal/animal/día	12,1		
(f) = (d)/365				
Consumo diario				
Energía (g) = (e) * (f)	MJ/animal/día	50,5		
Digestibilidad	%	55		
REM (Ratio of net energy for maintenance to digestible energy consumed)		0,47		Ecuación 10.14 (IPCC, 2006)
REG (Ratio of net energy available for growth in a diet to digestible energy consumed)		0,24		Ecuación 10.15 (IPCC, 2006)
Coeficientes para energía de mantenimiento	Vacas sin ternero al pie	0,322		
	Vacas con ternero al pie	0,386		
	Cattle	0,370		
Ganancia diaria de peso (kg/día)	Terneros			
	Terneras	0,700		

Parámetro	Unidad	Animal en mantenimiento	Animal en crecimiento	Reference
	Vaquillonas y Novillos	0,500		

El consumo diario por categoría animal (Mcal/animal/día) se obtiene de la siguiente expresión,

$$EC = \alpha * W^{0,75} * \beta + \gamma * W^{0,75} * G^\theta$$

Ecuación 23

Siendo, EC: Energy diaria de consumo, W: Peso inicial (kg/cabeza), G: Ganancia diaria (kg/día), valores o coeficientes /parámetros de actividad:

α : 0.107 coeficiente de energía para cosecha de forraje,

β :1.3, γ : 0.141 y θ :1.097. A continuación, se presenta una tabla de consumo según las categorías animales empleadas en el trabajo.

6.1.1 Cálculo de green house gases (GHG), emisión de metano y óxido nitroso

Los coeficientes para estimar la emisión de Metano en Uruguay han sido la adaptación de modelos creados para New Zealand (NZ), adaptado a la base forrajera del Uruguay (Becoña López et al., 2013), en este trabajo se señala una emisión de 18,4-21,0 kgCO_{2e}/beef en Uruguay vs 8-10 kgCO_{2e}/beef en NZ, si se compara por superficie, las emisiones en NZ pasan a ser el doble: 1.895-2.226 KgCO_{2e}/ha/año en Uruguay versus 3.013-6.683 kg/CO_{2e}/ha/año en NZ.

En el trabajo (Becoña López et al., 2013) se utiliza el valor por defecto de 56 Kg CH₄/animal/año tomado del coeficiente sugerido por (IPCC, 2006). Para nuestro trabajo, tomando la metodología Nivel Tier 2 (IPCC, 2006), la emisión de CH₄ se

calcula según la categoría, teniendo en cuenta el consumo del animal con la siguiente ecuación:

$$EF = \left[\frac{GE * \left(\frac{Y_m}{100} \right) * 365}{55.65} \right]$$

Donde EF =Factor de Emisión, kg CH₄ head⁻¹yr⁻¹, GE = Consumo energía Bruta, MJ head⁻¹day⁻¹, Y_m= Factor de conversión de Metano o emisión de CH₄ por energía bruta consumida. Este factor es 6,5%±1% que es el factor para ganado en condiciones de pastoreo.

Para el cálculo de GE se estima que 1 UG (equivalente a 360 kg) consume el 2% de su peso vivo, esta cantidad de MS se transforma en energía (MJ). El 6,5% por kg de MS en equivalente de energía es convertido en CH₄. Factor de conversión de MS de Campo Natural a MJ (con esto se calcula MJ/ unidad/día).

6.1.2 Cálculo de GHG, N

Para la estimación de la tasa de excreción de N, se empleó el valor por defecto para ganadería vacuna de 0.36 (kg de N/1000 kg Masa Animal/ día) según IPCC (2006).

Para la emisión de ganado se utilizaron las tablas elaboradas (IPCC, 2006) en base a materia seca ingerida por categoría animal.

La actividad ganadera es una actividad productiva y económica relevante pero que ha sido señalada como la responsable de fuente de emisión de GHG. Por otro lado, las plantaciones forestales son utilizadas como uno de los mecanismos para retener carbono de la atmósfera, lo que puede servir a los efectos de equilibrar la emisión de la ganadería.

6.1.3. Emisión de GHG en ganadería

Para el cálculo de emisión de GHG ganadero se emplea la metodología Nivel 2 (Tier 2) de IPCC (2006).

En primer lugar, se calcula sobre la dotación ganadera, la energía bruta consumida (Gross Energy (MJ/day), según Ecuación 10.16, a partir de la estimación de consumo para mantenimiento, actividad y crecimiento (Ecuaciones 10.3, 10.4 y 10.6 of IPCC, 2006, respectivamente), transformado posteriormente a energía bruta (MJ/head/day), con Ecuación 10.16 of IPCC (2006). Se calcula la emisión de metano (CH₄) aplicando un factor de conversión de 6.5% (Cuadro 25) provenientes de la Fermentación entérica (Emissions from enteric Fermentation), y las emisiones de óxido nitroso (N₂O) del estiércol (Emissions from Manure Management). Para la categoría terneros no se considera la emisión de CH₄ (IPCC, 2006).

Las emisiones de N₂O que se consideran son las de la orina y estiércol de los animales de pastoreo, la excreta del ganado se calcula con las Ec 10.31 y 10.32 (IPCC, 2006) que toma en cuenta la energía ingerida por animal; se consideró 50% de digestibilidad, 9 % de proteína cruda, y el 34% de Fibra Digestible ácida, tomado del promedio de mediciones realizadas entre los años 2014-2016 en el proyecto FPTA300. Sobre el valor calculado de excreción de N₂O, se aplica el valor de emisión por defecto de 2% (De Klein et al., 2006).

No se considera el CH₄ proveniente del estiércol ganadero ya que por las condiciones de pastoreo se considera despreciable la cantidad producida de CH₄ de este origen (IPCC, 2006).

Finalmente tanto el CH₄ como el N₂O se convierten en el factor común, Dióxido de Carbono equivalente (CO_{2-e}) con los factores de conversión (Cuadro 25).

Cuadro 27.- Coeficientes utilizados para el cálculo de alimento requerido y emisión de gases efecto invernadero en los casos propuestos.

Variable	Función	Observaciones	Valor asignado
Energía de mantenimiento	$NE_m = C_{fi} * Weigh^{0.75}$	NE _m = Net energy for maintenance C _{fi} = coeficiente que varía con cada categoría de animal (MJ day ⁻¹ kg ⁻¹) Weigh := live-weight of animal, kg	<u>C_{fi}</u> =Cattle/Bufalo (no lactating cows) 0,322 Cattle/Bufalo (lactating cows) 0.386
Energía de actividad	$NE_a = C_a * NE_m$	NE _a Net energy for animal activity MJ day C _a = coefficient corresponding animal feeding situation NE _m = net energy required by the animal for maintenance	<u>C_a</u> for grazing large areas con alta disponibilidad = 0,17 (En otras situaciones debería ser 0,36)
Estimación de ingesta de Materia Seca para Ganado adulto		DMI BW: Live body weigth, kg Bema:	
Dry matter intake for mature beef cattle			

Variable	Función	Observaciones	Valor asignado
Net Energy for growth	$NEg = 22.02 * \left(\frac{BW}{C * MW} \right)^{0.75} * WG^{1.097}$	<p>NEg=Net Energy for growth</p> <p>BW= Body weight (kg)</p> <p>C= coefficient</p> <p>MW=mature live body weight of an adult female in moderate body condition (kg)</p> <p>WG= Average daily weight gain of the animals in the population (Kg day⁻¹)</p>	C: 0,8 females, 1 castrates, 1,2 bulls
Gross Energy for Cattle	$GE = \left[\frac{\left(\frac{NE_m + NE_g}{REM} \right) + \left(\frac{NE_g}{REG} \right)}{\frac{DE\%}{100}} \right]$	<p>REM = Ratio of net energy available for maintenance to digestible energy consumed</p> <p>REG= Ratio of net energy available for growth in a diet</p>	0,439
CH ₄ emission factor for enteric fermentation	$EF = 22.02 * \left(\frac{GE * \frac{Y_m}{100} * 365}{55.65} \right)$	<p>GE Gross Energy intake , MJ /cab/día</p> <p>Ym Methane conversion factor , per</p>	Ym= for grazing conditions= 6,5%

Variable	Función	Observaciones	Valor asignado
from livestock category	a	cent of gross energy in feed converted to methane 55,65 is the energy content of methane (MJ/kg CH ₄)	
N excretion for cattle	$N_{ex} = \alpha * \left[\frac{GE}{18.45} * \left(\frac{CP\%}{6.25} \right) \right]$		$\alpha = 0,93$ Crude Protein CP=9%

Fuente: (IPCC, 2006)

6.2. ENTREVISTA A PRODUCTORES

Encuesta N°

Localidad:

Fecha: xx /xx /2018

Desde la Facultad de Agronomía se está llevando adelante un trabajo sobre modelos productivos que combinan ganadería y forestación en la actividad agropecuaria con el objetivo de obtener resultados que mejoren los ingresos, la rentabilidad agropecuaria, así como la provisión del Servicio de captura de carbono o la provisión de sombra para el ganado. La siguiente encuesta aportara en mejorar el trabajo de investigación sobre las preferencias entre ambas actividades.

Todas las preguntas se sitúan en un horizonte de planificación de mediano a largo plazo, así por ejemplo rentabilidad forestal se refiere a llegar a obtener ese criterio a lo largo de un horizonte de largo plazo.

Siempre se están considerando las dos producciones combinadas. Un concepto que se maneja en la encuesta es la de **CRITERIO** que a los efectos de este trabajo son los elementos que se consideran para decidir, por ejemplo, obtener en un predio un determinado nivel de producción de madera y/o de carne.

Esta encuesta se dirige a técnicos y productores agropecuarios y sus resultados serán tratados de manera anónima, serán protegidos por la confidencialidad y sus respuestas no serán reveladas nunca de manera individual.

Parte A) Importancia de los criterios en la producción conjunta

Pregunta 1) Marcar con una X ALGUNO de los 3 casilleros por fila

Se pide que enumere la importancia de los siguientes criterios en la producción:

Tabla 1.- Importancia asignada a los criterios

Importancia de los siguientes criterios en la producción conjunta	Es muy importante	Es medianamente importante	Es poco importante
Obtener rentabilidad ganadera			
Obtener rentabilidad forestal			
Conseguir ingresos anuales homogéneos o con pocas oscilaciones inter anuales (sin picos de grandes ingresos o años con falta de ingresos), provenientes tanto de la forestación como de la ganadería.			
Producción ganadera Obtener un Balance positivo de Gases Efecto Invernadero en el horizonte de planificación.			
Cosechar el máximo de madera en todo el horizonte de planificación			
Obtener a un Bosque Normal (ver los 3 criterios en conjunto Forestación 1, 2 y 3)*			

*Los siguientes *tres criterios (Forestacion1, Forestacion2 y Forestacion3* se consideran en *conjunto* y se toman en cuenta para obtener una mayor sustentabilidad de la producción forestal, más allá del horizonte de planificación:

Forestación-1: Se busca hacia el final del horizonte de planificación obtener una superficie con **estructura equilibrada de edades**. De esta manera llegar al último año con edades de montes con edades equilibradas en superficies iguales. Supongamos dividir las edades de las forestaciones en el último año de planificación en 4 clases de edad de manera que en 100 ha forestadas, cada clase de edad tendría 25 ha.

Forestación-2: Obtener un **Inventario Final balanceado**: esto se refiere a obtener por zona productiva una cantidad de madera en pie lo más homogénea posible. Por ejemplo, que el sitio de alta productividad y de media productividad forestal tenga cada uno 3000 m³ de madera en pie al final del horizonte.

Forestación-3: Tender a **homogeneizar la cosecha anual** de manera de evitar picos de volumen cosechado. Esto tendría una serie de ventajas como ir cosechando progresivamente y garantizar el empleo de mano de obra en el establecimiento, a modo de ejemplo.

Pregunta 2) Orden de Importancia que se asigna a cada criterio. Se solicita que ordene en importancia los criterios más importantes a considerar en la producción conjunta, poniendo el número 1 al criterio más importante. **Ud. puede poner el mismo número de importancia a más de un criterio.** (Ej cosechar madera y obtener un bosque normal pueden tener el número 1, lo que significa que le da la misma jerarquía e importancia).

Tabla 2.- Ranking de criterios

Ranking de los siguientes criterios en la producción conjunta	Ranking de importancia
Obtener rentabilidad ganadera	
Obtener rentabilidad forestal	
Conseguir ingresos anuales homogéneos o con pocas oscilaciones inter anuales (sin picos de grandes ingresos o años con falta de ingresos), provenientes tanto de la forestación como de la ganadería.	
Producción ganadera Obtener un Balance positivo de Gases Efecto Invernadero en el horizonte de planificación.	
Cosechar el máximo de madera en todo el horizonte de planificación	
Obtener a un Bosque Normal (ver los 3 criterios en conjunto Forestación 1, 2 y3)	

Parte B) Importancia de los rubros llevados adelante en la producción conjunta

Pregunta 3) Los pesos a ser considerados para los criterios tenidos en cuenta

A continuación, se expone una tabla en donde se le consulta de a pares la importancia de un criterio frente a otro. Se solicita que asigne con un número si un criterio es más o es menos importante **comparando siempre el Primer criterio con respecto al segundo criterio.**

La escala usada es la siguiente

1: los dos criterios son **igualmente importantes**

2: el primer criterio es **moderadamente más importante** con respecto al segundo

3: el primer criterio es **más importante** con respecto al segundo

4: el primer criterio es **notablemente más importante** con respecto al segundo

5: el primer criterio es **extremadamente más importante** con respecto al segundo

Si esta puntuación no representa su opinión, puede poner en el casillero un valor intermedio. Por ejemplo, Rentabilidad ganadera con respecto a Rentabilidad forestal es moderadamente más importante pero el valor asignado es 4.

Tabla 3.-Puntuación a aplicar

Puntuación a asignar	Es igual de importante el primer criterio que el segundo 1	Es medianamente importante 2	Es más importante 3	Es notablemente más importante 4	Es extremadamente más importante 5
----------------------	--	--	-------------------------------	--	--

Completar con un valor cada fila según la puntuación de Tabla 3.

Tabla 4.- Criterio Rentabilidad Ganadera

Valoración de a pares del criterio Rentabilidad Ganadera en la producción conjunta	Puntaje
<u>Rentabilidad Ganadera</u>-VS Rentabilidad forestal	Ej 5 (es extremadamente más importante la rentabilidad ganadera que la forestal)
<u>Rentabilidad Ganadera</u>-VS Ingresos anuales homogéneos	
<u>Rentabilidad Ganadera</u>-VS <i>Balance positivo de Gases Efecto Invernadero</i>	

<u>Rentabilidad Ganadera</u>-VS Cosechar el máximo de madera en todo el horizonte de planificación	
<u>Rentabilidad Ganadera</u>-VS Obtener a un Bosque Normal (los 3 criterios en conjunto)	

Tabla 5.- Criterio Rentabilidad Forestal

Valoración de a pares del criterio Rentabilidad Forestal en la producción conjunta	Puntaje
<u>Rentabilidad Forestal</u> -VS Ingresos anuales homogéneos	
<u>Rentabilidad Forestal</u> -VS <i>Balance positivo de Gases Efecto Invernadero</i>	
<u>Rentabilidad Forestal</u> -VS Cosechar el máximo de madera en todo el horizonte de planificación	
<u>Rentabilidad Forestal</u> -VS Obtener un Bosque Normal (los 3 criterios en conjunto)	

Tabla 6.- Criterio Ingresos Anuales Homogéneos.

Valoración de a pares de los siguientes criterios en la producción conjunta	Puntaje
<u>Ingresos anuales homogéneos</u> -VS <i>Balance positivo de Gases Efecto Invernadero</i>	
<u>Ingresos anuales homogéneos</u> -VS Cosechar el máximo de madera en todo el horizonte de planificación	
<u>Ingresos anuales homogéneos</u> -VS Obtener Bosque Normal (los 3 criterios en conjunto)	

Tabla 7.- Criterio Balance positivo de Gases Efecto Invernadero

Valoración de a pares del criterio <i>Balance positivo de Gases Efecto Invernadero</i> en la producción conjunta	Puntaje
<u>Balance positivo de Gases Efecto Invernadero</u> -VS Cosechar el máximo de madera en todo el horizonte de planificación	
<u>Balance positivo de Gases Efecto Invernadero</u> -VS Bosque Normal	

Tabla 8.- Criterio Cosechar el máximo de madera

Valoración de a pares del criterio Cosechar el máximo de madera en todo el horizonte de planificación	Puntaje
<u>Cosechar madera</u> en todo el horizonte de planificación -VS Bosque Normal	

Parte C)

Pregunta4) Tipo de Optimización a emplear

En esta sección se pide que seleccione la forma de alcanzar los criterios establecidos. Marcar SI **con una X en solo una de las dos preguntas (a o b).**

a) Ud. prefiere alcanzar los criterios más importantes en un primer nivel de jerarquía, y luego tratar de alcanzar aquellos criterios menos importantes en un segundo o tercer nivel de jerarquía.

SI

NO

b) Ud prefiere poner todos los criterios en un mismo nivel y tratar de llegar a una solución, aunque se logren valores en algunos criterios menores.

SI

NO

Parte D)

En esta parte se pregunta sobre el mínimo valor que estaría dispuesto a obtener en función de considerar la combinación de los dos rubros (ganadería y forestación) expresados en porcentaje, con respecto al máximo que se podría lograr. Por ejemplo, Ud. estaría dispuesto a obtener el 80% del máximo de VAN ganadero (el 100% lo obtendría si realizará solo ganadería) en función de la incorporación del rubro forestal en su establecimiento. Tener en cuenta que no puede obtener el 100% de los criterios si combina actividades.

Pregunta 5) Cuanto estaría dispuesto a aceptar (en %) de los criterios enumerados al combinar ambas actividades, considerando las 6 metas.

Tabla 8.- Porcentaje a alcanzar.

Metas en la producción conjunta	Porcentaje (%) que estaría dispuesto a aceptar con respecto al óptimo
Maximizar la Rentabilidad ganadera	
Maximizar la Rentabilidad forestal	
Minimizar los desvíos de Ingresos inter-anales	
<i>Producción ganadera</i> Obtener un Desvío de máximo <i>Balance positivo de Gases Efecto Invernadero</i> en el horizonte de planificación.	
Desvío de Cosechar el máximo de madera en todo el horizonte de planificación	
Desvío de Obtener a un Bosque Normal (ver los 3 criterios en conjunto Forestación 1, 2 y 3)	

6.3. DIVERSAS ESTRATEGIAS PARA INTEGRAR LA PRODUCCIÓN GANADERA Y FORESTAL

Agroforest Syst (2019) 93:333–344
DOI 10.1007/s10457-017-0092-7



Diverse strategies for integration of forestry and livestock production

Adriana Bussoni · Jorge Alvarez · Frederick Cabbage · Gustavo Ferreira · Valentin Picasso

Received: 15 December 2016 / Accepted: 10 May 2017 / Published online: 16 May 2017
© Springer Science+Business Media Dordrecht 2017

Abstract Global changes in land use and increased forestry plantations have reduced the livestock area in Uruguay, and silvopastoral systems have recently emerged. This paper aimed to quantify these new systems, and to identify the diversity of patterns of integration of forestry and livestock production. Based on detailed data from the 2011 Uruguay Census of Agriculture a multi dimensional scaling analysis was performed on land tenure, land use, livestock management, and socio-economic continuous and categorical variables, followed by a cluster analysis, which resulted in seven groups. The first four groups were primarily livestock farmers, with forests providing services to livestock farming, and timber production coming second in economic importance. These groups differ mainly in cattle orientation, land ownership and farm size. The other three groups were primarily foresters, with livestock grazing in their lands. These groups differ in the legal organization (individual

foresters vs corporations), farm size, and integration with livestock. The identification of these contrasting strategies for integration can inform future research and policies for the sustainability of silvopastoral systems in the region.

Keywords Silvopastoral systems · Livestock · Cluster analysis · Grazing · Typology · Agroforestry · Uruguay · South America

Introduction

Silvopastoral systems are production systems that integrate forestry and livestock production, deliberately on the same land management unit (Peri et al. 2016) and may have multiple benefits in terms of economic and environmental variables (Nuberg et al. 2009). In the world agroforestry systems represent around 1000 million ha (Nair et al. 2009), including 85 million ha of silvopastoral systems for Latin America (Somarriba et al. 2012). Silvopastoral systems are not homogeneous, and there are many ways forestry and livestock production may be integrated. Nuberg et al. (2009) identify three types: forest plantations for environmental services, forest plantations on farms, and forest industrial plantations. Other authors stress the difference between temporal and permanent silvopastoral systems (Rois-Díaz et al. 2006; Peri et al. 2016) or between the proportion of integration

A. Bussoni · J. Alvarez · G. Ferreira · V. Picasso
Facultad de Agronomía, Universidad de la República (UDELAR), Avenida Garzón 780, CP 12400 Montevideo, Uruguay

F. Cabbage
North Carolina State University, 3118B Jordan Hall, Raleigh, NC, USA

V. Picasso (✉)
University of Wisconsin – Madison, 1575 Linden Dr., Madison, WI 53706, USA
e-mail: picassorisso@wisc.edu

between animals and wood products (Nair 1985). Any evaluation of sustainability of silvopastoral systems requires first a proper description and classification of the form of integration between forestry and livestock.

The history of land use change and land tenure structure in each region are relevant to understand the heterogeneity of silvopastoral systems. In contrast to other forest regions in Europe and North America, foreign companies own most of the forests in South America. In Uruguay for instance, foreign companies own 70–75% of the afforested area and a high concentration of forest industrial companies (Pou 2016). Land use change is one important driver for the developing of silvopastoral systems. For example, forestry and crops expansion have reduced the livestock area from 10.2 to 8.4 million ha in Uruguay between 2000 and 2013 (MGAP 2015a) (Fig. 1), which in turn increased cattle stocking rates on average by 8.6%, so there has been a more intensive use of grazing lands in this period (Modemel et al. 2016). This pressure has promoted the development of various types of “de-facto” silvopastoral systems in the region: from cattle farmers with increasing afforested area to large forestry companies which accept livestock grazing under their forests. The existence of silvopastoral systems is therefore the consequence of individual farmer decisions (Ferreira 1997), public policies promoting forestry plantations, and the installation of foreign forestry corporations in Uruguay. This context generated different types of silvopastoral systems.

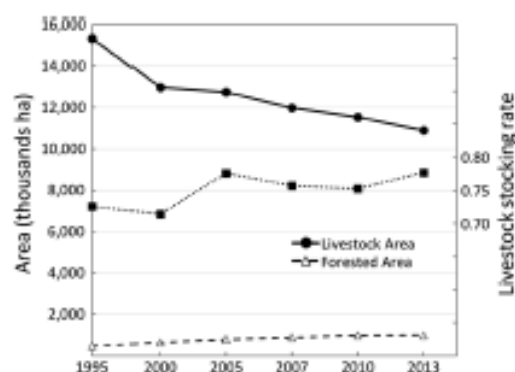


Fig. 1 Livestock area, stocking rate, and forested area in Uruguay in the last two decades. Data from Ministry of Agriculture (MGAP 2013, 2015a, 2015b)

Statistical clustering techniques have been used to classify and identify typologies of farming systems with multiple goals and for many systems (Ferreira 1997; Gaspar et al. 2007; Madry et al. 2013; Goswami et al. 2014; Collado et al. 2015). Clusters of forestry systems have determined factors affecting management of forests (Jennings and Van Putten 2006), attitudes towards forestry production (Gramann et al. 1985), utility assigned to the forest by producers (Ingemarson et al. 2006; Urquhart and Courtney 2011) and management patterns (Novais and Canadas 2010). Boon et al. (2004) identified forestry groups based on economic and conservation goals, while Richter and Lewis (2007) used legacy as a classificatory variable. In Uruguay, clusters of livestock farmers identified attitudes towards technology adoption (Ferreira 1997), technological trajectories (Mondelli and Picasso 2001) and types of family farmers (Prieto and Wins 2007). The only study of forestry and livestock farmers together (Torres et al. 1995) was done prior to the growth of forestry industries with dated forest technology. A qualitative typology of livestock farmers for the north region of the country based on land and livestock property (Carrquiry et al. 2012), identified one group of livestock farmers who send animals to forest companies, but it did not study silvopastoral systems per se.

The importance of silvopastoral systems has grown dramatically in Uruguay. Therefore, assessing the sustainability of these systems is needed in order to design public policies to address their benefits and challenges. However, there was no information available regarding the actual number of silvopastoral farms or the diversity of systems in terms of production, management, and socioeconomic characteristics to date. This paper aimed to quantify these emerging systems, and to identify the diversity of patterns of production structure and resource use of these systems combining both forestry and livestock production. Based on the previous literature and the history of the development of silvopastoral systems in the region, we started with the hypothesis that there would be three groups of silvopastoral systems: (1) livestock farmers who added forest plantations in their farms, (2) forestry companies which own livestock in their forests, and (3) forestry companies with agreements with livestock farmers for grazing under their forests. We obtained detailed farm data from the Uruguay Declaration of Cattle Stocks and forested area, and

then analysed the mix of actual practices in Uruguay to test this hypothesis.

This comprehensive set of cross sectional data in Uruguay reflects the changes in a country that experience major afforestation of almost 1 million ha of planted forest on pasture lands from 1987 to 2016. Almost all of those forests still have some degree of cattle grazing, either through purposive silvopastoral systems or extensive grazing in stream buffers and forest borders. This rich 30-year evolution of silvopastoral systems and our analysis of cross sectional data on current practices provides insights in the country about how planted forests are perceived and the actual adoption and integration into farm practices. From an international perspective, this paper aims to address the issue of the changes in natural and productive resource use at the production units (farms or plantations) as a result of the global change and relocation of forestry industry, and how the livestock farmers adapt to this changing context. Therefore, this paper can provide insight about the consequences of globalization on natural resource use.

Materials and methods

Database

We started with a database of 12,597 farms with ≥ 1 ha afforested, obtained from the Uruguayan National General Agriculture Census conducted in 2011 (MGAP 2015b). Based on this, cases involving farms with ≥ 100 ha property contemplating any of the following situations were selected: (a) forest farms with livestock, (b) forest properties hosting livestock under the trees and (c) livestock farms with more than 5% afforested. We obtained a database of 1019 commercial silvopastoral systems. This represents 58% of the afforested area, on a total of 1,071,323 ha, and 9% of the livestock units (LU) over a total of 5,790,452 LU. Our universe of analysis covers a significant share of the national territory with units that combine both activities. In order to corroborate our database universe, we also obtained the annual national survey of livestock database (MGAP 2015a) and the number of farmers with livestock and more than 5% of forested area was 1242 for 2013 (3.2% of all livestock farmers).

Multidimensional scaling and clustering

Many multivariate analyses techniques assume multivariate normal distribution for the data, like principal components analysis (Rabe-Hesketh and Everitt 2004). In our database, some variables were not normally distributed and others were categorical variables, so multidimensional scaling was the method chosen for our analyses. Multidimensional scaling is a dimension-reduction and visualization technique that operates directly on the distance matrix instead of the data matrix as principal components analysis does (Everitt and Hothorn 2011). Gower dissimilarity measure for mixed data (binary and continuous variables) was used. Multidimensional Scaling was performed in order to describe the diversity of the farm enterprise sample, and understand the main relationships between the variables. This procedure allowed to obtain synthesis variables (dimensions) that summarize the dissimilarity. According to the scree-plot 7 dimensions were optimal to represent the objects (producers) at the hyperplane.

We included 15 original variables from the database (9 continuous and 6 categorical), and 17 calculated variables (16 continuous and one categorical). Variables included aspects of: (a) land tenure and farm size (total area, owned area, land tenure, proportion of area owned), (b) land use and forestry (forest plantations, Pine area, Eucalypt area, forested area proportion, livestock area, livestock area proportion), (c) livestock management (pasture area, improved pastures area, stocking rates—LU/total area, LU/livestock area, LU/livestock + forested area, employees, employees/1000 ha, professional advice, and a hiring service index described below), (d) livestock production and specialization (total LU, cattle LU, sheep LU, sheep/cattle ratio, LU/forested area, cattle specialization—cow-calf, finishing, or full cycle, sheep rearing, area in native grassland, area in improved pastures, presence of livestock under forests—for farms with forested area >100 ha), (e) social variables (farmer's age, education level, residence, main income source, legal organization). The hiring service index is a weighed sum of all hired employees for services, weighing more the services for forestry plantations than livestock (Weighting factors were: forest planting or harvesting = 8, pruning and thinning = 7, sawmill = 6, other crop harvest = 5, tillage = 4, pesticide application = 3,

grazing services = 2). Analyses were performed using the software Stata (StataCorp LP 2015).

The 7 dimensions obtained from the multidimensional scaling, were then used for identifying groups, with a Cluster Analysis using Ward algorithm (Ward 1963), a hierarchical clustering that minimizes the variance within each group, and Gower's distance (Gower 1971) that allows working with continuous and categorical variables (Franco 1998). The number of groups was decided considering the Duda Hart Index (Mooi and Sarstedt 2011), where the smallest index value plus one determines the appropriate number of groups (Crossa and Franco 2004). Figure 2 shows the dendrogram of the clustering procedure. In order to compare mean differences between groups, Kruskal–Wallis nonparametric variance test (Kruskal and Wallis 1952) modified (kwallis2 version in Stata) was performed (Casi 1999). The Chi square test was applied in categorical variables, and in cases with less than 5 observations the Fisher exact test was applied.

Results

Seven cluster groups were identified (Tables 1, 2). Based on their identifying characteristics, we named the groups as: Group 1: finishing cattle farmers; Group 2: large cow-calf and full cycle leaseholders; Group 3: full cycle cattle farmers with high forestry area; Group

4: cow-calf farmers with high forestry area; Group 5: forest companies with cattle; Group 6: large forest companies leasing grazing area, and Group 7: integrated forestry and livestock systems.

The clustering variables which most differentiate between groups were those associated with the livestock and forestry area, type of legal organization (farmer vs company), hiring service index, source of main income, and livestock orientation. Overall, the first four groups (1–4) gather farms with cattle and sheep ranching as first and second source of income, respectively. These four groups have in common an area dedicated exclusively to livestock grazing greater than 68%, stocking rates considering the grazing and afforested area between 0.68 and 0.74 LU/ha, and afforested area between 17 and 25% of their area. The stocking rates considering only the grazing area range from 0.93 to 1.24 LU/ha, which is above the national average of 0.76 LU/ha. Group 1 is comprised by livestock farmers specialized in finishing cattle, who use the forests for services for the cattle (sheltering). Group 2 are cow-calf and full cycle cattle farmers, who rent land and hire services (grazing). Group 3 are livestock farmers specialized in cattle full-cycle, with higher area in forestry (25%). Group 4 is comprised by cow-calf cattle farmers with higher area in forestry (24%).

The remaining three groups (5–7) are forestry farmers or companies, where forestry occupies more

Fig. 2 Dendrogram showing the clustering of the 7 groups of silvopastoral farms in Uruguay. The number of farmers in each group is shown (n). Groups with values of 1 are comprised by livestock farmers with forests (groups 1–4). Groups with values of 0 at the bottom are comprised by forestry farms with cattle (groups 5–7)

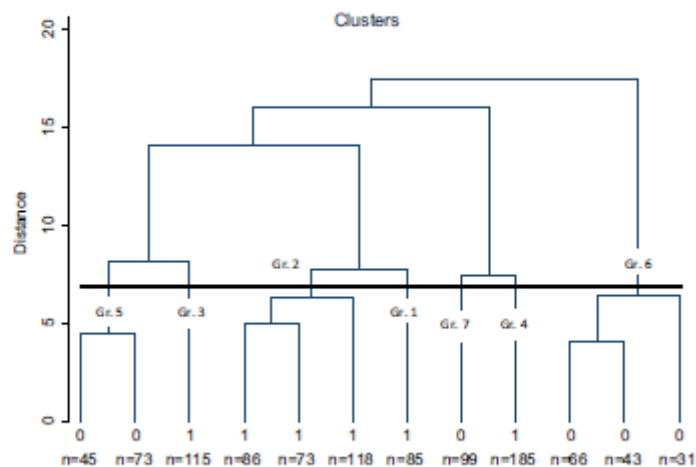


Table 1 Total figures for the seven groups of silvopastoral systems identified in Uruguay

	Group 1 Finishing cattle farmers	Group 2 Large cow-calf and full cycle leaseholders	Group 3 Full cycle farmers with high forestry area	Group 4 Cow-calf farmers with high forestry area	Group 5 Forest companies with cattle	Group 6 Large forest companies leasing grazing area	Group 7 Integrated forestry and livestock systems
n	85	277	115	185	118	140	99
Total owned area (ha)	48,066	223,723	81,209	139,871	205,772	359,677	174,205
Leased Land (ha)	12,659	60,035	16,328	12,426	2798	28,172	459
Total forested area (ha)	9688	65,614	29,457	41,506	132,181	239,622	103,795
Forested area (%)	2	11	5	7	21	39	17
Livestock units (LU)	40,989	200,961	73,417	97,906	33,576	18,598	31,741
Native grasslands (ha)	27,343	194,329	65,297	108,618	58,033	129,256	53,969

Number of farmers (n), total area owned and leased per group (ha), total forested area (ha), percent of the total forested area (%), total livestock units, and total area in native grasslands (ha)

than 52% of the area, which is mostly owned (92-99%), and stocking rates considering the grazing and afforested area between 0.07 and 0.30 LU/ha. Group 5 comprises forest companies with cattle owned and also some area leased for cattle grazing. Group 6 comprises larger forest companies (in area) mostly leasing grazing area to livestock farmers, and hiring high labor and services. Finally, group 7 is comprised by forestry farmers and companies, which own their cattle and sheep, making it a more integrated forestry and livestock system. The private forest owners, which were not previously documented in the literature, are mostly in Group 7 (40% of the group).

While 41% of the farms are located in the southern region of the country, 23% are in western (Littoral) region, and the remainder in the northern, central, and other regions of the country (Table 3). Overall, the distribution of the groups reflects the general distribution of the farmers, with few exceptions: forest companies from group 6, are mainly located in the Western region (45% of the group); most of forest companies from group 5 (53%) are located in the Southern region; and in the central region most of the farms are large livestock farmers from group 2 (41% of the farms in the region, 17% of the farms in the group). A detailed description of each group is presented next.

Group 1: finishing cattle farmers

The smallest group of farmers (n = 85, 8% of total) is comprised of medium size cattle ranchers specialized on beef finishing (99%), with an average area of 744 ha (Table 2). Production is carried out almost exclusively on their own land (87%), with a total area under grazing averaging 491 ha (71% of total area). Cattle feeding is based on natural grasslands and improved pastures (pluri-annual seeded pastures and legumes overseeded on grasslands, 23% of area). This group has the higher relative improved pastures are which is consistent with the specialization on beef finishing which demands a better quality forage. This group registers high stocking rate (0.94 LU/ha), far above the national averages; although taking into account additionally the afforested area, the value becomes 0.74 LU/ha. Most of the farms have private owners (59%), while 25% of them are companies. The intensity of labor contract is 2 employees per farm, which means 5 workers/1000 ha. Almost all (98%)

Table 2 Mean values for all variables describing seven groups of agroforestry systems identified in Uruguay

Variable	Units	Group 1 Finishing cattle farmers	Group 2 Large cow- calf and full cycle leaseholders	Group 3 Full cycle farmers with high forestry area	Group 4 Cow-calf farmers with high forestry area	Group 5 Forest companies with cattle	Group 6 Large forest companies leasing grazing area	Group 7 Integrated forestry and livestock systems
Land use and forestry production								
Total area per farm	ha	744 ^a	1221 ^b	1023 ^{ab}	945 ^a	1776 ^{bc}	2795 ^c	1795 ^{bc}
Owned area per farm	ha	565 ^b	808 ^{ab}	706 ^{ab}	756 ^b	1744 ^c	2569 ^d	1760 ^{bc}
Owned area/total area	%	87% ^{bc}	77% ^{ab}	77% ^{ab}	87% ^{bc}	99% ^c	92% ^c	98% ^c
Forested area	ha	114 ^a	237 ^{ab}	250 ^b	224 ^{ab}	1120 ^{cd}	1712 ^d	1048 ^d
Eucalypt area	ha	97 ^a	194 ^a	207 ^a	189 ^a	819 ^{bc}	1237 ^b	819 ^c
Pine area	ha	13 ^a	40 ^a	46 ^a	32 ^a	299 ^{bc}	466 ^b	227 ^c
Grazing area	ha	491 ^{ab}	892 ^c	666 ^{abc}	648 ^{ab}	510 ^b	939 ^{bc}	566 ^b
Grazing area/total area	%	71 ^a	75 ^a	68 ^a	70 ^a	30 ^b	35 ^b	40 ^b
Grazing area/owned area	%	106 ^{ab}	147 ^{ab}	119 ^{ab}	107 ^b	32 ^c	45 ^c	44 ^c
Percent of forested area	%	17 ^{ab}	17 ^a	25 ^b	24 ^b	63 ^c	61 ^c	52 ^c
Pineforested area	%	9 ^a	7 ^a	7 ^a	7 ^a	17 ^b	15 ^b	14 ^{ab}
Grazing area/forested area	%	10 ^{ab}	13 ^b	8 ^a	9 ^{ab}	1 ^c	1 ^c	2 ^c
Native grasslands area	ha	322 ^a	702 ^{bc}	568 ^{bc}	587 ^{abc}	492 ^{ab}	923 ^c	543 ^b
Pluriserial pastures area	ha	56 ^a	78 ^a	39 ^a	19 ^a	9 ^d	12 ^{cd}	3 ^d
Improved area/grazing area	%	23 ^a	16 ^a	8 ^b	6 ^b	2 ^c	2 ^c	2 ^c
Livestock production								
Livestock total stock	LU	482 ^{abc}	725 ^a	638 ^{ab}	529 ^{ab}	285 ^{bc}	133 ^c	321 ^c
Livestock stocking rate (over grazing area)	LU/ha	0.94 ^b	0.93 ^a	1.10 ^a	1.24 ^a	0.96 ^b	0.21 ^c	0.98 ^{bc}
Livestock stocking rate (over grazing + forested area)	LU/ha	0.74 ^b	0.74 ^a	0.69 ^b	0.68 ^{ab}	0.23 ^c	0.07 ^d	0.30 ^d
Sheep stock (LU)/Cattle stock (LU)		0.25 ^a	0.15 ^b	0.14 ^b	0.11 ^b	0.08 ^b	0.01 ^b	0.27 ^a
Percent of cow-calf farms	%	0	58	0	100	0	29	100
Percent of full-cycle farms	%	0	42	100	0	63	1	0
Percent of finishing farms	%	99	0	0	0	19	6	0
Percent of farms which don't own cattle	%	1	0	0	0	18	64	0
Percent of farms with cattle grazing under forestry	%	20	31	32	32	76	95	67

Table 2 continued

Variable	Units	Group 1 Finishing cattle farmers	Group 2 Large cow- calf and fall cycle leaseholders	Group 3 Full cycle farmers with high forestry area	Group 4 Cow-calf farmers with high forestry area	Group 5 Forest companies with cattle	Group 6 Large forest companies leasing grazing area	Group 7 Integrated forestry and livestock systems
Socio-economic variables								
Number of employees		2 ^b	5 ^a	2 ^b	2 ^{ab}	3 ^a	3 ^a	3 ^a
Number of employees per 1000 ha		5 ^{ab}	6 ^a	5 ^{bc}	5 ^{abc}	4 ^a	2 ^d	3 ^{cd}
Hiring Service Index		5 ^b	7 ^b	0.3 ^c	1 ^c	9 ^b	17 ^a	6 ^b
Percent of farmers who live on farm	%	24	32	34	29	3	0	12
Percent of farmers with university education	%	21	21	23	25	13	-	16
Percent of farmers with secondary education	%	12	17	13	12	5	-	9
Percent of farmers with elementary education	%	7	7	10	14	3	-	3
Percent of farms owned by private owners	%	59	65	76	63	22	1	40
Percent of farms owned by companies	%	25	16	10	19	72	96	48
Percent of farms owned by other type of societies	%	13	17	13	15	4	1	9
Percent of farms with beef cattle as the main income	%	98	95	100	100	0	0	0
Percent of farms with beef as secondary income	%	1	4	0	0	41	21	67
Percent of farms with forestry as the main income	%	0	1	0	0	94	100	89
Percent of farms with forestry as secondary income	%	20	11	14	18	2	0	0
Percent of farms with sheep as the main income	%	2	4	0	0	6	0	11
Percent of farms with sheep as secondary income	%	25	52	57	50	3	1	1

Groups sharing the same superscript letter are not significantly different (Kruskal–Wallis test for multiple comparisons, adjusted *p* value = 0.001)

Table 3 Number of farms in each group per region of the country and total

Group	Western	Northern	Central	Southern	Eastern	Total
1	18	7	15	36	9	85
2	67	26	48	105	31	277
3	24	19	10	51	11	115
4	36	14	18	85	32	185
5	18	20	9	63	8	118
6	63	29	8	37	3	140
7	12	23	10	40	14	99
Total	238	138	118	417	108	1019

declare beef cattle production as the main economic activity. Although 20% of the farms register cattle grazing in the forests larger than 100 ha, it is expected that this value could be greater when including the smaller forested areas. The average afforested area is 114 ha, which is a 17% of the total area, with a median value of 60 ha and mode value of 30 ha. This would include forests for services for livestock, where producers plant with the primary objective of providing shade and shelter for livestock and with a secondary objective of having the forest as a reserve capital asset. Forests are under extensive management and integrated as service forests without pruning or cleaning, which is deduced based on the low values for hiring thinning and pruning services (3.5%); when harvested, the wood will be chopped for pulp or biomass for energy (firewood). Forest production is not hierarchized as an economic activity, only 20% declared forestry as a second or third income. Most of these farms are in the southern (42%) and western Littoral (21%) regions of the country, respectively.

Group 2: large cow-calf and full cycle leaseholders

This large group ($n = 277$, 27% of total) is comprised by larger farms (1221 ha) with a high proportion of leased land (23%) dedicated to grazing cow-calf (58%) or full cycle (42%) beef systems. It is the group with the highest percentage of land leased, probably grazing under forests. In general, these producers could base their strategy on non-traditional agreements and arrangements with forestry companies. Possible arrangements with forest companies are an advantage for this type of livestock farmers, providing access to technology plantation with high quality genetic material and grazing in afforested

areas. Most farms are owned by private farmers (65%) or companies (16%). This is the most intensive group in direct hiring of labor (5 employees on average, median is 2), with 6 employees per 1000 ha. On the other hand, this group has the highest service contract index (7) of the livestock farms associated with livestock services and agricultural services. The afforested average area is 17%, and mode is 12%. Most forested area with Pine trees is concentrated in 5 farms (7000 ha approximately, located in the northern region, Rivera and Tacuarembó Departments); however, the other farms in the group do not plant Pines (average afforested Pine area is 0.4 ha per farm on 92% of the farms of these group). The main objective of afforested area may be to provide services to cattle farming or being livestock shelter in forests outside the owned property. The high level of employees and hiring service index is related to management for livestock outside the owned area, in forest lands. These farmers base its livestock production strategy by grazing in natural grassland (on average 702 ha), with high stocking rates (0.93 LU/ha), which is sustained by grazing on leased lands in forest areas that might be owned by large forest companies. Sheep production is the second income in 52% of farms.

Group 3: full cycle cattle farmers with high forestry area

This group ($n = 115$, 11% of total) is comprised by medium to large (1023 ha) beef producers specialized in full cycle (100%) in an extensive way. The main activity of the group is beef production (100%), sheep production is the second (57%). They have only 8% of the area with improved forages, denoting extensive management of livestock. These farms have higher

proportion of forested land (25%) than other livestock farmer groups. They employ 5 persons per 1000 ha, and the service hiring index is the lowest of all the groups (0.3). These farms are organized mainly as private owners (76%) or other types of companies (10%). These farmers have high stocking rate (1.10 LU/ha), but when accounting the forested area, the stocking rates are low (0.69 LU/ha), low proportion of improved area (8%), and low intensive use of Hired Service (0.3). These group shows the higher percent of farmers with residence on farm (34%).

Group 4: cow-calf farmers with high forestry area

This group ($n = 185$, 18% of total) comprises farmers who own middle to large-sized farms (945 ha), specialized in cow-calf beef production (100%). These farms also have high percent of forestry area (24%). Livestock farming and forest production are conducted in an extensive way. Grazing under forest is declared by 32% of the farms mainly located in the southeast of the country. These are producers who are mainly private owners (63%) or companies (19%). These are the farms with highest stocking rate (1.24 LU/ha) but when adding the afforested area, the stocking rate goes down to 0.68 LU/ha, denoting that forests play an important role in providing not only shelter, but grazing area to cattle. They perform medium-scale forestry production, with medium intensity of labor (5 employees/1000 ha) and management of their forests. The hiring service index is low (1) which indicates that this group is extensive in the use of labor.

Group 5: forest companies with cattle

This group ($n = 118$, 12% of total) comprises medium to large forest owners (1776 ha), with 30% of their area for livestock grazing. These are farms located primarily in the central (53%) and northern (17%) regions. The majority of these farms are owned by forest companies (72%) mainly corporations, and only 22% are private owners. Their main objective is timber production: 94% declare forestry as the main income, having livestock farming as a marginal activity with a stocking rate of 0.23 LU/ha considering cattle and forested area. Most companies declare having livestock under their forest (76%) which are fed on natural grassland in remaining free areas,

without much forage improvements (only 2%). Most of farms own cattle (only 18% don't), and 41% of the farms have livestock as a secondary source of income. These companies hire external services for forestry activities, (hiring service index is 9).

Group 6: large forest companies leasing grazing area

This group ($n = 140$, 14% of total) is comprised by the largest farms (2793 ha) owned by forest companies (96%), representing 39% of the total forest land, mainly located in the western region of Uruguay (45%). They have a low percent of livestock area (35%) with feeding based on natural grasslands (only 2% is improved pastures). Although livestock farming is not a secondary source of income (only 21% declare it), 95% of forests are grazed by cattle, so it can be inferred that livestock is owned by others outside the company, who lease the forests and use them with low livestock stocking rates (0.07 LU/ha considering afforested land). The hiring service index is the highest (17) and therefore they demand highly specialized forest tasks such as pruning (30%) and harvesting (22%), planting (98%), chemical application (98%), among others. In contrast, the on farm labor is the lowest of all groups (2 employees/1000 ha). The Pine tree area distribution is concentrated in few farms (two farms concentrate 25,000 ha). The area with *Eucalyptus* has a greater dispersion.

Group 7: integrated forestry and livestock systems

This group ($n = 99$, 10% of total) comprises large farms (1795 ha) with forestry (89%) or sheep production (11%) as the main source of income. All the farmers of this group are specialized in cow-calf beef production, which is the second source of income (67%). Farms are owned by companies (48%) or private owners (40%). They have the higher stocking rate among the foresters (0.30 LU/ha including afforested area). The hiring service index is the lowest among foresters (6), mainly the contract of service plantation and pruning by companies, so this group is probably comprised by forest investors and farmers, where agricultural production could be a capital asset reserve, and forestry production serve the double purpose of accumulating capital and providing services to livestock. Both livestock farming and forest

production are conducted in an extensive way. These farms are mainly located in the southeast of the country, although they represent the largest group in the northern region (23% of the northern farms).

Discussion

The forestry and livestock farms found in Uruguay, provided the opportunity to analyze a range of silvopastoral systems from vertically integrated industrial forestry projects with cattle to cattle farms that have included forestry into their activities. Based on three groups of variables: (a) the land use, size and ownership (area in native pastures, improved pastures, forestry plantations, total, and owned vs leased), (b) main source of income (forestry, cattle, sheep), and (c) service contract index and hired labor, we were able to outline emerging features about the role of forests in the productive structure as well as the intensity in the use of productive resources and possible outcomes. The first major class (groups 1–4) consisted of producers who were primarily cattle ranchers, who use the land they own or lease for forestry and grazing. The second class (groups 5–7) were large forest companies or land owners who focused more on forestry production, and made use of livestock grazing under their forests.

The information gathered in the Census did not allow to directly group the objectives of forestry in the farm (Ingemarson et al. 2006) or attitudes towards forestry (Boon et al. 2004). However, groups 3 and 4 may be related to Boon's financial motivations ("economists") while groups 1 and 2 could have a "multi-objective" motivations. Compared with the previous clustering of cattle farmers in Uruguay (Mondelli and Picasso 2001), group 1 is similar to the smaller "traditional farmers", and group 4 with "innovators" that incorporate, in an extensive way, forestry into their livestock system. However, note that while these producers of 500–700 ha under management might be small for Uruguay standards, they are relatively large for almost any other country, so surely they are able to achieve greater economies of scale.

Livestock farmer groups (groups 1–4) evidence that the role of forests is to provide service to livestock farming, while timber production is secondary. The primary integration would be between livestock

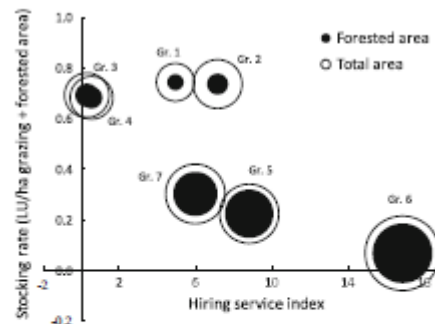


Fig. 3 A graphical representation of the seven clusters of silvopastoral systems identified in Uruguay. In the X axis, hiring services index (as a proxy for forestry intensity). In the Y axis, livestock stocking rate per area for cattle plus forestry (as a proxy for livestock intensity). The size of the bubbles represents the total average area (outer circle) and the afforested area (inner circle)

farming and forestry. The groups identified may show different aims of forests on the premises, similar to objectives identified by Ingemarson et al. (2006) and the productive indicators employed by Gaspar et al. (2007). In brief, the managers still separate into traditional ranchers—although small scale producers incorporate forestry more than large producers—and forest companies, who actively seek grazing and cattle for making profits (small companies), or passively permit grazing with only minor income objectives.

Figure 3 shows the tradeoff between forestry intensity (represented as hiring services index) and livestock intensity (represented as livestock stocking rate per area for cattle plus forestry). The livestock farmers from groups 1 to 4 have the lower proportion of forested area (24%), while the foresters from groups 5 to 7 have the higher proportion of forested area (76%). This graph can be compared to the Nuberg et al. (2009) graph on the trade off between forest productivity and livestock productivity. In this study we did not have productivity data, but the concepts are similar.

Based on preceding studies and literature, we hypothesized finding three types of silvopastoral farms in Uruguay. Using the detailed farm data collected by the government, we found a higher number of clusters (seven groups) based on multiple variables. Our first hypothesized group, livestock farmers who added

forest plantations in their farms, turned out to be actually four groups (1–4). The second hypothesized group, forestry companies which own cattle, were groups 5 and 7. Finally, the third hypothesized group, forest companies with agreements with livestock farmers for grazing under their forests were included in group 6. Although the cluster is not a permanent concept over time (Alvarez et al. 2014), the characteristics of the groups and their evolution help to better understand the land use and the socio-productive characteristics in space.

These silvopastoral systems appear to be achieving farmers' acceptance since extensive planted forests were introduced in Uruguay three decades ago. This integration may require implementation of specific government policies towards each of these groups to promote either more joint efficient production or natural resources conservation. Both ranchers and foresters still tend to have a dominant land use of one type or another, but are more integrated than farmers in North America, who still tend to have single use pastures and forests with very little silvopastoral systems area (Cubbage et al. 2012).

Uruguay has been increasing forestry area promoted by both private companies marketing and public policies. Further expansion of forestry would necessarily require the integration of more livestock farmers into forestry. However, the sustainability over time of both productions on a whole farm scale must be assessed. Because of the expansion of capacity in forest industry, a great potential exists to combine both productions to improve income of farmers in Uruguay. In addition, the use of forests as a component of pastures and grazing may offer opportunities to reduce erosion on fragile or marginal soils, as well conservation benefits such as carbon storage, and economic returns from wood fiber production on suitable lands. Nevertheless, the conversion of native grasslands into forest plantations, raises questions regarding the conservation of biodiversity as well as the provision of ecosystem services (Modernel et al. 2016). Clearly further research in this matter is needed to assess the sustainability of silvopastoral systems in Uruguay.

Conclusion

We found a diversity of strategies for integrating forests and cattle in Uruguay: 1—finishing cattle

farmers, 2—large cow-calf and full cycle leaseholders; 3—full cycle cattle farmers with high forestry area; 4—cow-calf farmers with high forestry area; 5—forest companies with cattle; 6—large forest companies leasing grazing area, and 7—integrated forestry and livestock systems. The smaller producers have the integrated multiple use forests, and large owners on both ends of the grazing and timber production spectrum do purposefully use some level of forest and grazing in their management schemes. The seven groups identified in this paper denote a range of strategies to produce livestock and timber at the same time, that may inform sustainability assessments as well as future private and public policies regarding expansion of silvopastoral systems. The existing integration of pastures and planted forests in Uruguay over the last three decades has been remarkable, and more research and extension evaluating the sustainability of these systems, as well as identifying best management practices for silvopastoral systems are needed.

Acknowledgements This work is funded by the Facultad de Agronomía – UDELAR (University of Uruguay), INIA-Uruguay (National Agriculture Research Institute) Grant FPTA 300, and the National Agency for Research and Innovation (ANII-Uruguay) doctoral fellowship to Adriana Bussoni. Special thanks to Federico and Magela from Agronegocios, who helped with data analysis, and anonymous reviewers who improved the quality of the manuscript.

References

- Alvarez S, Paas W, Descheemaeker K, et al (2014) Typology construction, a way of dealing with farm diversity: general guidelines for humidtropics
- Boon TE, Meilby H, Thorsen JB (2004) An empirically based typology of private forest owners in Denmark: improving communication between authorities and owners. *Scand J For Res* 19:45–55
- Carriquiry R, Morales H, De Hegehus P, Tourrand J (2012) Heterogeneity and vulnerability of livestock in forest plantations of Uruguay. In: International Farming Systems Association (ed) *X International Farming Systems*. Aarhus University, Aarhus
- Casi H (1999) KWALLIS2: stata module to perform Kruskal-Wallis Test for equality of populations. Statistical Software Components 5379201. <http://econpapers.repec.org/software/bochoocode/5379201.htm>
- Collado MD, Byrne TJ, Amer PR et al (2015) Analyzing the heterogeneity of farmers' preferences for improvements in dairy cow traits using farmer typologies. *J Dairy Sci* 98:4148–4161. doi:10.3168/jds.2014.9194

- Crossa J, Franco J (2004) Statistical methods for classifying genotypes. *Euphytica* 137:19–37. doi:10.1023/B:EUPH.0000040500.86428.e8
- Cubbage F, Balmelli G, Bussoni A et al (2012) Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agrofor Syst* 86:303–314. doi:10.1007/s10457-012-9482-z
- Everitt B, Hothorn T (2011) *Use R!*. Springer, New York
- Ferreira G (1997) An evolutionary approach to farming decision making on extensive rangelands. University of Edinburgh
- Franco J (1998) Clasificación de observaciones utilizando variables discretas y continuas simultáneamente. Universidad Autónoma de Chapingo
- Gaspar P, Mesías FJ, Escribano M et al (2007) Economic and management characterization of dehesa farms: implications for their sustainability. *Agrofor Syst* 71:151–162. doi:10.1007/s10457-007-9081-6
- Goswami R, Chatterjee S, Prasad B (2014) Farm types and their economic characterization in complex agro-ecosystems for informed extension intervention: study from coastal West Bengal, India. *Agric Food Econ* 2:5. doi:10.1186/640100-014-0005-2
- Gower JC (1971) A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics* 27:857–871. doi:10.2307/2528823
- Gramann J, Marty T, Kurtz W (1985) A logistic analysis of the effects of beliefs and past experience on management plans for non-industrial private forests. *J Environ Manag* 20:177–185
- Ingemarson F, Lindhagen A, Eriksson L (2006) A typology of small-scale private forest owners in Sweden. *Scand J For Res* 21:249–259. doi:10.1080/02827580600662256
- Jennings SM, Van Patten IE (2006) Typology of non-industrial private forest owners in Tasmania. *Small-Scale For* 5:37–56. doi:10.1007/s11842-006-0003-7
- Kruskal W, Wallis A (1952) Use of ranks in one-criterion variance analysis. *J Am Stat Assoc* 47:583–621
- Madry W, Mena Y, Roszkowska-Madra B et al (2013) An overview of farming system typology methodologies and its use in the study of pasture-based farming system: a review. *Span J Agric Res* 11:316–326. doi:10.5424/sjar/2013112-3295
- MGAP (2013) Dirección Forestal - Superficie Total de Bosques. <http://www2.mgap.gub.uy/portal/psa.ge.aspx?2.dgf.dgf-recursos-forestal,O.es,0>. Accessed 15 May 2015
- MGAP (2015a) Dicose - Dirección General de Semovientes - Datos Generales de la Declaración Jurada ante DICOSE al 30 de junio de cada año. <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2.dgsg.dgsg-dicose-institucional,D.es,0>. Accessed 15 May 2015
- MGAP (2015b) Censo General Agropecuario 2011. <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2.diea.diea-censo-2011,O.es,0>. Accessed 15 May 2015
- Modernel P, Rossing WA, Corbeels M, Dogliotti S, Picasso VD, Tittonell P (2016) Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. *Environ Res Lett* 11:113002
- Mondelli M, Picasso V (2001) Trayectorias Tecnológicas en la Ganadería Uruguaya: Un enfoque Evolucionista. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay
- Mooi E, Sarstedt M (2011) Cluster Analysis. In: Mooi E, Sarstedt M (eds) *A concise guide to market research*, 2011th edn. Springer, Berlin, pp 237–284
- Nair PKR (1985) Classification of agroforestry systems. *Agrofor Syst* 3:97–128. doi:10.1007/BF00122638
- Nair RPK, Kumar BM, Nair VD (2009) Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J Plant Nutr Soil Sci* 172:10–23
- Novais A, Canadas MJ (2010) Understanding the management logic of private forest owners: a new approach. *For Policy Econ* 12:173–180. doi:10.1016/j.forpol.2009.09.010
- Nuberg I, George B, Reid R (2009) *Agroforestry for natural resource management*. CSIRO, Collingwood
- Peri PL, Dube F, Costa Varella A (2016) Silvopastoral systems in the subtropical and temperate zones of South America: an overview. In: Peri PL, Dube F, Costa Varella A (eds) *Silvopastoral systems in southern South America*. Springer, Gainesville, pp 1–8
- Pou R (2016) *Forestación en Uruguay*. First. Plus Ultra, Montevideo
- Prieto V, Wins R (2007) Comparación de diferentes agrupamientos genéticos utilizando técnicas multivariadas y distintos tipos de variables. Universidad de la República
- Rabe-Hesketh S, Everitt B (2004) *Handbook of statistical analysis using Stata*, 3rd edn. Chapman & Hall/CRC, NY
- Richter J, Lewis B (2007) Reaching out to family forest owners: an examination of information behaviors by attitudinal type. In: Miner C, Jacobs R, Dykstra D, Bittner B (eds) *International conference on transfer of forest science knowledge and technology*. General technical report PNW-GTR-726. USDA Forest Service, Oregon, pp 209–217
- Rois-Díaz M, Mosquera-Losada R, Antonio R-R (2006) Biodiversity indicators on silvopastoralism across Europe. EFI, Joensuu
- Somarriba E, Beer J, Alegre-Orihuela J, et al (2012) Mainstreaming agroforestry in Latin America. In: *Agroforestry—the future of global land use advances in agroforestry*, pp 429–453
- StataCorp LP (2015) *Stata user's guide*
- Torres A, Casella Ma, Cedres A, et al (1995) *Diagnóstico de Sistemas Agroforestales del Uruguay*
- Urquhart J, Courtney P (2011) Seeing the owner behind the trees: a typology of small-scale private woodland owners in England. *For Policy Econ* 13:535–544. doi:10.1016/j.forpol.2011.05.010
- Ward JH (1963) Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J Am Stat Assoc* 58:236–244

6.4. SISTEMAS SILVOPASTORILES Y OPTIMIZACIÓN MULTICRITERIO PARA RESULTADOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

Agricultural Systems 190 (2021) 103118



Contents lists available at ScienceDirect

Agricultural Systems

journal homepage: www.elsevier.com/locate/agsy



Silvopastoral systems and multi-criteria optimization for compatible economic and environmental outcomes

Adriana Bussoni^{a,*}, Frederick Cubbage^b, Jorge Alvarez Giambruno^a

^a Department of Social Sciences, Facultad de Agronomía, Universidad de la República (Uruguay), Av. Garzón 780, CP 12900 Montevideo, Uruguay

^b Department of Forestry and Environmental Resources, North Carolina State University, 3118B Jordan Hall, Raleigh, NC, United States of America

ARTICLE INFO

Editor: Emma Stephens

Keywords:

Cattle and forest production
Payoff matrix
Eucalyptus globulus
Greenhouse gases
Optimization

ABSTRACT

Context: Forestry production can provide a valuable commodity and environmental services to complement cattle farming through the mitigation of greenhouse gases (GHG) from meat production, allowing more intensive use of natural resources.

Objective: This study addressed the long-term integration of forestry and cattle farming to achieve productive, economic and environmental benefits.

Methods: It was applied Goal Programming and empirical field, cattle, and timber production data and farmer interviews of priorities were used to analyze integrated forestry production of *Eucalyptus* plantations and cattle breeding and rearing. The preemptive criteria applied were max Forest Net Present Value (NPV), max Cattle NPV, and Carbon Balance. Additionally goals were to minimize the deviation of a normal forest, among others. **Results and conclusions:** A Type I lexicographical multi-criteria model was developed in three hierarchical models for a 408 ha model farm. Model M_1 results in the higher combined NPV Cattle (302,935 US\$) and NPV Forest (556,578 US\$); Model M_2 , where NPV Cattle is prioritized at the first level, achieved the target of 317,307 US\$ but the least success in achieving carbon positive balance with a negative balance of -20,160 tons of CO_{2-e} released. Comparing the results of model M_3 , where minimizing the negative carbon balance, a positive carbon balance of +6788 tons CO_{2-e}, in a scenario where the environmental goal would be imposed. The difference of NPV cattle between M_2 and M_3 is -24,609 US\$. The environmental criterion must be allocated to higher hierarchical levels in order to achieve a positive balance and obtain profits from forest and cattle. This also allows quantification of how far removed a system is from achieving a goal of integrated and sustainable production. The lexicographical methodology allowed quantification of results as a function of the hierarchical allocation of various goals within different integration models through studying efficient subgroups.

Significance: It is shown that environmental and productive objectives can be integrated, even considering harvest of trees in the system achieving economic, environmental and productive goals in the medium or long term, with deviations that the decision maker can accept; plans can also be established with results that can serve as a policy guide, that provide for the incorporation of environmental services. Variations in the models showed the final solution is highly dependent on the preferences order in the higher level; the environmental goal is achievable if it is prioritized at a higher hierarchical level.

1. Introduction

Silvopastoral systems have existed since cattle introduction and its commercial exploitation in America. It is estimated that about 3.2 million km² (Zomer et al., 2009) are occupied by these systems, which are transformed into production strategies for numerous small-to-medium-scale rural family producers (Peri et al., 2016). These systems combine trees and animal production improving overall productivity in

an environmental friendly way (Lacorte et al., 2016) and allow the integration of non-timber forest goods and forest management services (Aldex et al., 2014).

The advantages offered by these systems, which are involved in livestock and woody perennials production, include productive diversification, erosion control and carbon sequestration (Peri et al., 2016). Integrated production could mitigate the negative effect of meat production on greenhouse gas (GHG) emissions (Clayton et al., 2018). This

* Corresponding author.

E-mail address: abussoni@fagro.edu.uy (A. Bussoni).

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103118>

Received 7 April 2020; Received in revised form 18 February 2021; Accepted 23 February 2021
0308-521X/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

production is at the center of the debate as it is considered an important source of methane and nitrous oxide emissions, which if further regulated represent a market threat to a large part of Latin American economies and others that also depend on exporting beef such as Australia (Doran-Browne et al., 2018).

Studies have indicated that integrating forestry with cattle production can reduce net GHG emissions (De Oliveira et al., 2015). Evidence suggests that for a change in land use to occur, incentives must exist, as Claytor et al. (2018) pointed out, or an opportunity to diversify income should be perceived (Schirmer and Bull, 2014). In Alabama, USA, silvopastoralism can be a more successful alternative than other more extreme changes such as permanent afforestation, if producers are knowledgeable (Davis and Rauser, 2020).

Silvopastoral systems should be sustainable over time; Kanter et al. (2018) have evaluated the trade-off of adding system components by using indicators to measure system sustainability. Preferences expression of these trade-offs can show productive and social conflicts (Boillat et al., 2017) in a local or regional level. Being able to incorporate stakeholder preferences in multi-criteria optimization models, such as the work by Aldea et al. (2014) could give an approximation of the effects of environmental incentives in agricultural production.

In addition, classical forest optimization studies have developed models for the regulation of forest inventory with industrial supply objectives (Díaz-Balteiro et al., 2014; Díaz-Balteiro and Rodríguez, 2006; Giménez et al., 2013; Rodríguez and Moreira, 1999), environmental objectives (Steiguer et al., 2002) or both (Díaz-Balteiro et al., 2016; Díaz-Balteiro and Romero, 2008; Giménez et al., 2014). To our knowledge, there is no study that seeks mathematical optimization of joint production and environmental benefits in cattle and forestry, so that optimal forest and cattle management co-exist.

Forestry and cattle farming can be complements to a certain degree; they can co-exist until they become competitive for scarce land, light, water, or nutrient resources. Joint production issues have been studied with multicriteria optimization, which allow integrating the systems approach with a systems engineering concept (Kangas et al., 2008), improving the understanding of the decision processes in production systems. The great advantage of this approach is that it allows the decomposition of significant complex problems into smaller groups. Moreover, it allows analyzing ex ante sets of solutions and productive environmental results of the obtained solutions. Optimization enables the possibility of expanding and integrating the understanding of the problem (Kaya et al., 2016). Specifically, Goal Programming, a multicriteria optimization technique, allows the analysis of satisfactory subsets obtained, or the acceptable level of achievement for the decision maker. Timber harvests, recreation opportunities and wildlife habitat goals can be included in these sets among others (Díaz-Balteiro and Romero, 2008) and can be solved in different hierarchy levels with the lexicographic goal programming.

Forestry and cattle farming can be complements to a certain degree; they can co-exist until they become competitive for scarce land, light, water, or nutrient resources.

Cattle production systems are challenged to find GHG mitigation mechanisms. Given the importance of meat exports to the economy of Uruguay—ranked as the world's eighth largest (Indexmundi, 2019)—it must find mitigation mechanisms for its production systems. There are technological alternatives for mitigation such as improving feed efficiency and livestock finishing, or fattening systems (Modemel et al., 2013; Picasso et al., 2014). Comparative studies calculated GHG emissions between livestock systems in Uruguay and NZ: methane emissions (CH₄) in Uruguay account for 18.4–21.0 kg CO₂-e/kg beef, compared with 8–10 kg CO₂-e/kg beef in NZ. However, emissions in NZ were twice as great as Uruguay when compared on a per unit land area basis: 3010–6680 kg CO₂-e/ha/year in NZ vs. 1900–2230 kg CO₂-e/ha/year in Uruguay (Becoña López et al., 2013), because New Zealand had greater stocking rates.

Forestry can contribute to mitigating GHG emissions in livestock

production, providing an environmental service. This study addressed the long-term integration of forestry and cattle farming to achieve productive, economic and environmental benefits of GHG reduction, from a quantitative goal programming approach and using empirical field data.

2. Material and methods

The study was based on a combination of empirical field data and a mathematical programming case study in Maldonado, Uruguay, including livestock and forestry activities. This section presents the mathematical model used and then describes the area of study. The model is based on the optimization of three preemptive criteria: net present value (NPV) of the forest, NPV of cattle production, and positive carbon balance over the period. These are used in the model to achieve a fully regulated forest in regular cutting area and regular volume (Davis and Johnson, 1987), and finally to obtain annual regulated incomes over the period.

A payoff matrix was obtained, and a goal programming optimization model was formulated. The payoff matrix allows one to determine objectively the ideal and anti-ideal or nadir values, which provide relevant information for more complex models (Aldea et al., 2014), allowing to determine the degree of conflict between the criteria.

We used the lexicographic goal programming approach to solve the problem, which seeks to minimize the weighted average deviation from the goals at each of the designated levels of weights applied. Relative priorities and weights for preemptive criteria were determined by interviews with farm producers.

A cattle-forestry model explained in Subsection 2.4 was proposed considering GHG balance. Greenhouse gas emissions, were based on cattle energy requirements and stocking rate (LU/ha). The amount of standing biomass and the carbon stock of the tree component are calculated. Tree planting and harvest also contribute to GHG emissions, and these data were included. Lingo software (Lindo Systems Inc., 2018) was used to solve the long range production model.

2.1. Optimisation model

As noted, this study is solved using multicriteria optimization, over timber and cattle production profits, carbon balance and a normal forest structure which is a concept of long-term sustainable production (Davis and Johnson, 1987). Multicriteria optimization includes a range of techniques that present some challenges since the final solution depends to a large extent on the selection of the variant (Uría et al., 2002). In our case, we used a weighted lexicographic Type I model which is a variant of goal programming (GP).

In Type I models, the stand is a physical unit that maintains its identity throughout the planning period (Davis and Johnson, 1987); it is a model structured by the recommendations of Davis et al. (2001) consisting of two parts: the first expresses the resources capacity and the biological, economic and physical response to different treatments; the second part establishes the use of resources policy. Lexicographic goal programming uses the preemptive priorities (Romero, 1996) concept. It is based on prioritizing a set of predefined goals that are met in a hierarchical order.

The approach allows the specification of the satisfying sets with more flexible and real procedures applicable to production and decision making (Jones and Tamis, 2010; Romero and Rehman, 2003). This enables the decision center to set a series of relevant goals with aspiration levels defined a priori (Romero, 1996). Particularly, the lexicographical variant (GPL) is a technique that orders unwanted deviations in regard to goals to prioritize. It uses the concept of priority or exclusive weight, where achieving a prioritized set of goals is always preferred to achieving a set of goals in a lower priority (Romero, 1996) introducing the achievement function concept.

2.1.1. Model criteria

Criteria often used in forestry literature for multicriteria optimization were considered for the construction of the model (Aldea et al., 2014; Buongiorno and Gilles, 2003; Clason, 1995; Diaz-Balteiro et al., 2016; Díaz-Balteiro et al., 2014; Diaz-Balteiro and Romero, 2004; Kaya et al., 2016) as well as relevant criteria for livestock producers (Bussoni et al., 2015). These included (a) net present value of livestock production, (b) net present value of forest production, (c) carbon balance, (d) total annual income from forestry and livestock activity, (e) total volume of harvested wood, (f) standing wood at the end of the planning horizon, (g) control of the harvested volume between periods, and (h) forest age structure at the end of the period. These last three goals are referred to in the literature as the “normal forest”, frequently desired in both native forests and commercial forests (Bettinger et al., 2009; Davis et al., 2001). The model assumes there are no changes in soil productivity when going from forest use to livestock use and vice versa. This assumption corresponds to the Uruguayan reality as no changes in carbon soil has been found in national research (Hernández et al., 2016).

2.1.2. Restrictions and goals of the model

The Restrictions and Goals body broadly follows the Diaz-Balteiro and Romero (2003) structure. The only constraints of the model are the endogenous variables, namely the set of grazing units (L) and the set of forest stands (K), where KCL .

Total tree-free grazing area G_l is the sum of areas x_l (hectares) comprising each grazing area l (Eq. 1). Each area x_l may belong to one of three sub-areas, namely (a) Cattle grazing area (G_a) where cattle displace forestry (they are mutually exclusive), even when sites are apt for tree growing; (b) Residual cattle grazing areas (A_{jk}), peripheral to forest stands, such as firebreaks and buffer zones; and (c) Areas exclusively used for cattle grazing (G_j), not suitable for forestry.

$$\sum_l x_l = G_l \quad \forall l \in L \tag{1}$$

Total forest stand area A_k is the sum of areas x_{kj} (hectares) comprising each stand k , under the regime j (Eq. 2). Field research area includes three site qualities z .

$$\sum_{kj} x_{kj} = A_k \quad \forall k \in K \tag{2}$$

Livestock Unit (LU) represents the maintenance nutritional requirement of a nursing cow with a live weight of 300 kg, weaning a yearly calf. These requirements are estimated as 2500 kg dry matter/year, about 7.6 kg dry matter/day. Livestock Unit allows for approximate equivalent forage requirements for each cattle class on the basis of live weight, even when they may vary according to animal physiological condition.

Livestock Unit values, (LU_{lk} LU/ha⁻¹ year⁻¹) represent sustainably grazing animals on areas x_l (Eq. 1) and on areas x_{kj} (Eq. 2) under forest canopies. The latter LU values depend on stand age, because developing tree canopies increasingly intercept sunlight and thus reduce forage availability. As age of the forest stand increases, LU values should decrease accordingly. In turn, clearcut areas at the end of forest stand rotation will eventually be free of grazing cattle during a year.

LU_{lt} are the Livestock Units hosted by unit areas x_l and x_{kj} in each annual period t (years), with LU_T being all LUs in the whole planning period (Eq. 3). The value of LU_{lt} depends on management regime j .

$$\sum_l LU_{lt} x_l + \sum_{kj} LU_{lt} x_{kj} = LU_T \tag{3}$$

2.2. Goals

The goals considered were Net Present Value of Cattle Production, Net Present Value of Forest Production, Carbon Balance, Annual Income, Harvested wood volume throughout the period, Standing wood at the

end of the planning period, Even-flow Harvested wood by period, Final Forest and Cattle Area Control.

2.2.1. Net present value of cattle production

$$\sum_{l, kj} NPV_c x_l + NPV_c x_{kj} + n_{NPV_c} - p_{NPV_c} = \alpha_c NPV_c^* \tag{4}$$

The variable NPV_{cl} (US\$ ha⁻¹) represents total net present values from livestock production on grazing areas x_l and under forest canopy x_{kj} , which can hold a certain cattle stocking rate; α_c is the desired proportion of optimal achievement (the values α are obtained from surveys, explained in section 2.3) regarding the ideal NPV_c^* , obtained by maximizing NPV_{cl} (Eq. 4). The deviations p_{NPV_c} and n_{NPV_c} , are the positive and negative deviations from the ideal value, being n_{NPV_c} the unwanted deviation, to be included in the Objective Function.

2.2.2. Net present value forest production

$$\sum_{kj} NPV_f x_{kj} + n_{NPV_f} - p_{NPV_f} = \alpha_f NPV_f^* \tag{5}$$

where NPV_{fk} (US\$ ha⁻¹) is the forest net present value for area x_{kj} (ha) in stand k managed under regime j ; NPV_f^* is the ideal forestry net present value when net income from forestry is maximized (Eq. 5); α_f is the desired proportion of optimal achievement for forestry goal. The unwanted value n_{NPV_f} , is part of the function to be minimized, while a positive deviation (p_{NPV_f}) would be well received by the decision-maker.

2.2.3. Carbon balance

The carbon balance (CB, Mg CO_{2-e}) is the accounting result of forest biomass carbon increment, computed as the subtraction between final (Bf_{kt} , Mg CO_{2-e} ha⁻¹ year⁻¹) and initial forest biomass carbon (Bf_{kt-l} , Mg CO_{2-e} ha⁻¹ year⁻¹) on stand k during period t , minus the carbon in the wood extracted (CH_{kt} Mg CO_{2-e} ha⁻¹ year⁻¹) at each time of harvest in any given year throughout period t , and the amount of annual emissions (C_e) from cattle grazing on the farm (Eq. 6). Annual emission values (C_e) are obtained from multiplying Livestock Units (LU ha⁻¹ year⁻¹) by the emission factor of 3.487 (Mg CO_{2-e} LU⁻¹), see Table 2 in Appendix 1.

$$\sum_{kj, t} (Bf_{kt} - Bf_{kt-l}) x_{kj} - \sum_{kt, t} CH_{kt} x_{kj} - \sum_{kt, t} C_e x_l + C_e x_{kj} + n_{CB} - p_{CB} = \alpha_{CB} CB^* \tag{6}$$

CB^* is obtained by maximizing the carbon balance CB, subject to area restrictions; α_{CB} is the intended proportion with respect to the accepted ideal value, with positive (p_{CB}) or negative deviations (n_{CB}), the latter is an unwanted deviation that is part of the Objective Function. All parameters used to compute carbon in Eq. 6, are presented in Appendix 1.

2.2.4. Annual income

$$\sum_{kj, t} I_{fjt} x_{kj} + I_{c, t} x_l + I_{c, t} x_{kj} = I_t \tag{7}$$

I_{fjt} is the forest income (US\$ ha⁻¹) in the stand k , regime j and cutting period t , I_{ct} (US\$ ha⁻¹) is the cattle income (Eq. 7). The income of a certain year I_t is expected to equal the one of the following year I_{t+1} (Eq. 8), so as to obtain stable income throughout the planning horizon.

$$I_{t+1} - I_t + n_{I} - p_{I} = 0, t = 1, \dots, T-1 \tag{8}$$

The goal is to minimize the sum of negative and positive deviations n_{I} and p_{I} , with α_I (Eq. 9), the proportion that is acceptable to deviate from the initial target of regular income over time. This goal or assumption was included because one of the most restricting barriers highlighted by farmers in these kinds of silvopastoral systems is the lack of income over long periods of time (Bussoni et al., 2015); livestock producers of course prefer even income to concentrated income. This

was confirmed in the survey results.

$$\alpha_{ij} \sum_{t=1}^{T-1} n_{ij} + p_{ij} \tag{9}$$

2.2.5. Harvested wood volume throughout the period

The wood harvested throughout the period (V_{kt} $m^3 \text{ ha}^{-1}$) was obtained from what x_{kt} provides in the cutting moments t (Eq. 10), p_h and n_h are the positive and negative deviations, respectively, regarding the ideal value H^* in the proportion α_{Ht} .

$$\sum_{kt}^{K,T} V_{kt} x_{kt} + p_h - n_h = \alpha_{Ht} H^* \tag{10}$$

2.2.6. Standing wood at the end of the planning period

$$\sum_{kt}^{K,T} V_{kt} x_{kt} + n_{Vf} - p_{Vf} = \alpha_{Vf} V_f^* \tag{11}$$

Where x_{kt} (ha) is the area at the end of the planning period, with a volume of standing wood V_f ($m^3 \text{ ha}^{-1}$); the value V_f^* was obtained by maximizing V_f . This guaranteed reaching the end of the planning horizon with standing biomass, which provides shade for livestock and ensures the continuity of both forestry and livestock production. The negative and positive deviations n_{Vf} and p_{Vf} , respectively, is the distance in volume from the ideal volume V_f^* (Eq. 11) and α_{Vf} is the desirable proportion of ideal volume.

2.2.7. Even-flow harvested wood by period

$$\sum_{kt}^{K,T} V_{kt} x_{kt} = H_a \tag{12}$$

$$H_{a+1} - H_a + n_{Ht} - p_{Ht} = 0 \tag{13}$$

The variable V_{kt} ($m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) is the volume to be harvested from unit area x_{kt} at time t . Given that H_a ($m^3 \text{ year}^{-1}$) is the volume obtained at each harvest time t (Eq. 12) it is intended that what is harvested annually is a consistent annual volume (Eq. 13), where each period equals the previous one, which may present negative deviations (n_{Ht}) and positive deviations (p_{Ht}) between periods. The deviation from even flow production for these two variables was minimized in order to achieve the desirable structure of a normal forest (Davis and Johnson, 1987; Bettinger et al., 2009).

The aim was to minimize the deviation of these values, where α_{Ht} is the proportion that can vary from the ideal of zero deviation (Eq. 14).

$$\alpha_{Ht} \sum_{kt} n_{kt} + p_{kt} \tag{14}$$

2.2.8. Final forest and cattle area control

$$\sum_{kt}^{K,T} x_{kt} + n_A - p_A = \alpha_{AC} X_{AC} \tag{15}$$

where X_{AC} (ha), (Eq. 15), is the occupied area that belongs to one of the 5 classes: 4 age classes (0-2, 3-5, 6-8, > 8) at the end of the planning horizon, n_A and p_A are the negative and positive deviations and α_{AC} the acceptable deviation proportion. The fifth (5th) area class is the afforestable area, but reserved for livestock at the end of the period, since it represents the requirement of ensuring livestock activity continuity after the planning period.

2.3. Surveys

In order to determine what preferred goals and objectives would be for the analysis, a survey was conducted, both personally and by telephone, of 20 livestock producers who trade forestry product from their farms. The interview (Appendix 2) consisted of 4 parts. First, farmers assigned one of the three priority levels to the model criteria: very high, high or poor. Second, it is asked the proportion (%) that the farmer was

willing to reduce the goal in order to achieve also other criteria. Third, a quantitative assessment of these criteria was requested using the methodology of Saaty (1977). The survey develops the assignment of peer preferences revealing the first of two criteria and evaluating them on a scale of 1 to 5. From these preferences the weight vector is constructed, following Romero (1996), with α_{in} the preference value of the criterion i with respect to each n criterion. Thus, the weight vector for each criterion i will be $\sqrt{\sum_{n=1}^n \alpha_{in}}$. Subsequently, the cardinal weights of the preferences are obtained, where $W_i = \frac{\alpha_{in}}{\sum_{n=1}^n \alpha_{in}}$ so that $\sum W_i = 1$.

Finally, farm producers were asked about the preferred types of decision models (hierarchy or multiobjective models); it was assumed that the decision-maker can order their preferences in a consistent manner. Saaty's methodology can be found in Romero (1996) and in cases of forest management applied to groups in Kangas and Kangas (2005) and Kangas et al. (2008).

The target values were obtained applying the average W_i for each criterion and reflect the proportion that a producer is willing to compromise, compared to the ideal value.

The general model derives from all the unwanted deviations to minimize (Eq. 16), where the general achievement function is the following:

$$Min (n_{NPV}, n_{ENV}, n_{CO}, n_{L}, p_{L}, n_{B}, n_{U}, p_{U}, n_A, p_A, n_{VI}, p_{VI}) \tag{16}$$

The lexicographic goal programming model (GPL) considers that the first achievement function U_1 is infinitely superior to U_2 (Dias-Balteiro and Romero, 2008; Romero and Rehman, 2003). At each achievement level, $U_{i(\mu_h)}$ may be relaxed when $h < i$; for example $U_{3(\mu_2)}$ can take any value with respect to $U_{3(\mu_1)}$; however, $U_{3(\mu_2)} \geq U_{3(\mu_3)}$, when strictly complying with the precepts of the GPL model. Being $U_{i(\mu_h)}$ the level reached in the satisfying subset U_i in the hierarchical optimization stage μ_h (Eq. 17). In this study the function U_i (Eq. 17) represents the deviation values in order of hierarchy as expressed by Romero and Rehman (2003).

$$U_{i(\mu_h)} = \sum n_h + p_{ih} \tag{17}$$

The GPL procedure guarantees that in stage i the set that optimizes U_i is found, maintaining the levels reached in previous stages, so that the properties expressed in Eq. 18 and 19 and Matrix 1 are verified.

$$U_i(\mu_i) \leq U_i(\mu_h) \forall h; \forall i \tag{18}$$

$$U_i(\mu_i) = U_i(\mu_h) \forall h > i \tag{19}$$

where i, j range from 1 to 3.

$$\begin{matrix} U_{1(\mu_1)} = U_{3(\mu_1)} = U_{1(\mu_3)} \\ U_{2(\mu_1)} \geq U_{2(\mu_2)} = U_{2(\mu_3)} \\ U_{3(\mu_1)} \geq U_{3(\mu_2)} \geq U_{3(\mu_3)} \end{matrix} \tag{Matrix 1}$$

In summary, the stages carried out for the construction of the base model are the following:

- a) The Payoff matrix is built with the pre-selected criteria,
- b) Surveys are conducted to livestock producers with forestry. This information serves to select the type of model, prioritize the goals and weight them,
- c) Based on the previous information, model targets and type of multicriteria model to apply are quantified, in this case, a weighted Lexicographic model, since it allows to prioritize in subsets,
- d) The satisfying subsets are obtained in sequence, along with the final result in the last level.
- e) Model M_1 was executed minimizing negative deviations in cattle NPV and forest NPV at the first hierarchy level.
- f) Model M_2 was executed minimizing negative deviations in cattle NPV at the first hierarchy level.
- g) Finally, model M_3 is executed prioritizing the environmental goal.

2.4. Case study

2.4.1. Permanent plots and growth

The case study was located in the Department of Maldonado (34° 41'12.33" S, 55° 08'20.89" W) composed of 4 areas covering a total of 407,8 ha. In September 2012, the property was planted with *Eucalyptus globulus ssp globulus*, in a 6 m between single rows of trees and 1.5 m between trees in the row. A total of 31 plots were monitored (Bussoni et al., 2019) and the following variables were measured: diameter breast height (DBH), density (stem/ha), volume (m³/ha), average dominant height (ADH) and average height (Average Ht). These data were used to establish three forest productivity sites (Fig. 1) that present different edaphic and topographic conditions as shown in Table 1. Projected wood production volumes for *E. globulus* for the three sites, were predicted with the SAO_INIA program (Hirigoyen and Rachid, 2014).

The base total area (Fig. 1) was divided as follows: 276.6 ha in which forestry and cattle could be combined, 32 ha of a forestry-free area including firebreaks and grazingland suitable for cattle, 81.82 ha (N1 Area) exclusively for cattle and 17.3 ha (N2 Area) of a non-productive area used as a buffer or conservation area.

Harvest rotations varied from 8 to 14 years, although most regimes were short, between 9 and 11 years. The farmland has an average stock of breeding cows, replacement heifers and 1–2 year-old calves and steers for sale, which was taken as a basis for the production model (Table 2). Average livestock units (LU) per area (i.e., stocking rate) was 0.78 cows per ha; one LU is the grazing equivalent of one breeding cow of 300 kg and its calf (Crempien, 2008).

2.4.2. Animal energy intake and CO_{2-e} emissions calculations

In order to estimate cattle energy requirements, the carrying capacity concept (GNIA, 2016) was applied to livestock category requirements, which calculates cattle stocking rate as the quotient between forage supply and demand: the supply considered as 50% of forage net primary productivity (ANPP) in kg DM/ha and the demand as 2% of live weight (Eq. 20).

$$\text{Carrying Capacity} \left(\frac{LU}{ha} \right) = \frac{(ANPP \cdot 50\%)}{(2\% \cdot \text{live weight})} \quad (20)$$

The carrying capacity reference value used in this study was between 0.70 and 0.80 LU/ha (Saravia et al., 2011) in natural fields. This range is for the Cristalino Medio and Cristalino del Este areas, with undulating landscape and slopes ranging from 2 to 12%.

Animal energy intake in natural grassland (Table 1 in Appendix 1) was calculated based on the following values: 4000 kg DM/ha year (Crempien, 2008), 9% protein on average and 50% digestibility as previously measured (Bussoni et al., 2019). GHG emissions were

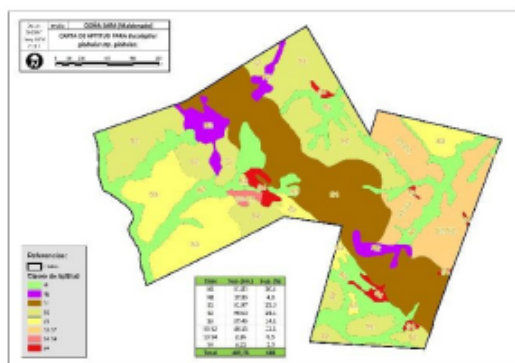


Fig. 1. Areas with different productive performance.

Table 1
Main characteristics of slope and soils at different sites.

Site Class	Slope and position	Permeability (mm/h)	Predominant soil type
Site I (high to medium productivity)	2% -9%, High slope	Moderately fast, 7–12 mm / h	Lithic Urdotem and Typic Hydraquent
Site II (medium to medium-low productivity)	7–15%, Medium slope	Moderately slow to slow, 3.8–7 mm / h	Typic Hapludalf and Typic Endoaqualf
Site III (low productivity)	3–6%, Low slope	Moderately slow to slow, 3.8–7 mm / h	Typic or Mollic Endoaqualf

Source: Alconada Magliano and Carricaburu (2019).

Table 2
Cattle livestock system analyzed.

	Cattle stock
	Cow-Calf model
Bull	3
Breeding cow	100
Female calf	40
Male calf	40
Heifer 1 year	33
Heifer 1–2	33
Heifer >2 years	33
Steer 1–2	30
Stock rate (LU / ha)	0.78

calculated based on the gross energy requirements for maintenance, activity, and growth in animal categories (Table 2 and Table 3 in Appendix 1).

Comparing the emissions per animal weight (kg CO_{2-e}/kg Live Unit), the average value obtained of 9.45 is very similar to 8.4 k (Subak, 1999) and below the 16.7 k value, calculated for a winter fattening system in Uruguay (16.7 k) (Modemel et al., 2013). Emission values from cattle livestock by LU were calculated based on a Large Cow-Calf System.

Since the cattle stocking rate decreases with forest age, values in Table 3 were determined as shown; cattle can enter the forest 1 year after planting.

It was assumed that when there is no standing forest, after a year, there could be cattle grazing in Management Units and that cattle stocking rate in free areas is 0.78 LUha⁻¹ year⁻¹. This situation occurs particularly in the harvested stands that are not replanted or in forest-free areas. Grazing area under forest canopy was estimated indirectly by subtracting available area for livestock from total area occupied by Livestock Units over a carrying capacity of 0.78 LU ha⁻¹ yr⁻¹.

2.4.3. Carbon calculation in the forestry system

Forest biomass retains carbon until its harvest, compensating for the effect of livestock emissions. All carbon measurements were expressed in tons of carbon dioxide equivalent (Mg CO_{2-e}), based on conversion values (IPCC, 2013, Appendix 1) which establish the equivalences based on the global warming potential in a 100-year period (Table 3, Appendix 1).

Forest biomass is calculated from the stem biomass, multiplied by the

Table 3
Cattle stocking rate for different forest ages.

Forest age (years)	Cattle stocking rate under forest plantation (LU/ha)	Forest age (years)	Cattle stocking Rate under forest plantation (LU/ha)
0–1	0	6–7	0.4
2–3	0.6	> 7	0.3
4–5	0.5	Harvest Year +1 year	0

Biomass Expansion Factor (BEF) of 1.25 (Table 3 in Appendix 1). CO_{2-e} emission in forest harvest is calculated with harvester and forwarder using 2.8 l/m³ and 1.7 l/m³ respectively, based on a defined power of 122 KW (Table 3 in Appendix 1).

Based on research by De Stefano and Jacobson (2018) it was assumed that there were no changes in soil organic carbon with changes in land use. They report that previous studies found no variations in the transition from uncultivated pasture/grassland to silvopasture. In particular, studies in Uruguay (Hernández et al., 2016) in *Eucalyptus* rotations of 8 years found no differences in the amount of carbon in the soil, with a previous use of uncultivated grasslands followed by afforestation. Likewise, changes in the productivity and soil fertility due to these changes were not considered.

2.4.4. Variants and assessment of forest cycles

The Forest Cycle is the time between tree planting and clear-cutting including one or more rotations (Davis and Johnson, 1987), which can be managed by applying clearcut followed by replanting or coppicing. The planning horizon of 30 years can include up to three Rotations; the possible combinations are called prescriptions with clear-cutting and replanting, Felling cycle rotation (FC) or Coppice Regime (C).

For the economic return calculations, a value of the standing timber of 15 US\$/m³ is established; planting costs are presented in Table 4. Although a change in relative values could change the final results, the effect of relative prices is not analyzed in this study; the values used in production costs and product prices are conservative.

For coppice management costs, hand planting costs are avoided but there are other associated costs such as the elimination of sprouts and lesser productivity of the stump that is valued as 70% of its original production in each regrowth (Guedes et al., 2011). The 300 US\$/ha cost of coppice establishment includes ant control in two periods and manual clearing and shoot elimination with a chainsaw and brush cutter in the second year.

2.4.5. Forest regimes assessment

The value of the Regimes is the sum of the net wood income and the

Table 4
Plantation costs and prices used in this study.

	Time (yr)	Unit	Value
Contour lines with Disk Harrow	0	US \$/ha	61
Labor	0	US \$/ha	24
Deep ripping /subsoiling 50 cm	0	US \$/ha	351
Disk Harrow	0	US \$/ha	61
Furrow plow	0	US \$/ha	61
Preplant Herbicide (Acetoclor 120 cc/ha)	0	US \$/ha	54
Plantation and seedlings	0	US \$/ha	180
Replanting	1	US \$/ha	36
Ant control	0, 1	US \$/ha	54
Fertilization spot with phosphate 80 g/seedling	0	US \$/ha	120
Wood control (haloxifop) inter-row herbicide application	1	US \$/ha	54
Manual herbicide application on the planting row	1	US \$/ha	54
Fertilizer application 2.	1	US \$/ha	74
Total establishment cost		US \$/ha	1238

Note: US\$ referenced to September 2018.

productive value of the land. The latter is known as Land Expectation Value (LEV), and it expresses the maximum potential of net return in infinite identical rotations (Davis and Johnson, 1987) as in Eq. 21.

$$LEV = P(t)f(t)e^{-i} - K - Qe^{-i} - (R + G) \int_0^t e^{-i} dt \tag{21}$$

where, $P(t)$ is the wood price at the time t , $f(t)$ is the function of wood production, i is the discount rate, K replanting costs, Q harvest costs, R land rent, G , annual administration costs.

The potential wood supply arises from the selection of the harvest age at different times for a FC or C regime. Our model is composed of 49 regimes and 44 stands so as to have the option of regular wood supply. The evaluated prescriptions are stem and coppice with the following combinations of sites and harvest ages. After the second cutting, if the model indicates to continue with afforestation, replanting must occur.

The economic value of forest regime (NPVR) is the update of the net wood income in the planning period in each particular regime (Eq. 22); in addition to the initial and final LEV (Rodríguez and Moreira, 1999).

$$NPVR_i = P(t)f(t)e^{-i} - Ke^{-i} + \frac{LEV}{(1+i)^t} - LEV \tag{22}$$

3. Results

This section presents the results from the payoff matrix, the interviews with farm producers, the resulting models and the values obtained in the achievement levels of the models considered.

In the payoff matrix (Table 5) values of the considered criteria are presented when maximizing one criterion at a time. Carbon balance presented significant differences according to the optimizing objective. In the main diagonal of the payoff matrix the ideal values of each objective to reach are shown; worst or nadir values with respect to the other objectives are focused on NPV Cattle (column 2). The results show the tradeoffs between both forest and livestock production and the conflict between livestock production and the environmental carbon balance. When NPV cattle was maximized, forest production was zero and carbon balance value obtained was the nadir value of -32,561 tons of CO_{2-e} presenting the most distant value from the ideal 63,413 tons CO_{2-e} (column 4).

The main matrix diagonal sets the ideal values except for row 7 and 8 (column 2) where Deviation Even-Flow and Deviation Annual Incomes would be zero if there were no forestry production, since the solution did not consider forest production; therefore, ideal values of both criteria are the ones shown in the main matrix diagonal in rows 7 and 8.

3.1. Surveys

The results of the producer surveys are presented in Table 6; the first row shows the order of importance assigned to each criterion. All producers assigned the first order to livestock profitability; in addition, in terms of forestry profitability 60% of producers assigned the same order whereas the remaining 40% a second priority order. As these two criteria are central to the productive configuration as well as to the results obtained, the results of both criteria should be compared together and separately.

In all consulted cases, the producers preferred to prioritize goals to reach, so the weighted lexicographic model was used, applying the sequential linear method (Romero and Rehman, 2003).

3.2. Models results

The first model (M_1) minimized the negative deviations in cattle NPV (n_{NPVc}) and forest NPV (n_{NPVf}) in the first hierarchy level, as presented in Table 7; in a second level of achievement (U_2) the deviations of inter-annual income (n_I , p_I) and harvested volume were minimized (n_h) and in the third level (U_3) it was intended to minimize the negative

Table 5
Payoff matrix results for the criteria considered.

Criteria	Forest NPV (US\$) (1)	Cattle NPV (US\$) (2)	Wood (m ³) (3)	Carbon Balance (ton CO _{2,e}) (4)	Deviation Forest Age (ha) (5)	Deviation Ending forest inventory (m ³) (6)	Deviation Even flow timber (m ³ /yr) (7)	Deviation Annual Incomes (US\$) (8)
Forest NPV (US\$)	883,456	0	821,934	537,836	300,396	428,085	440,648	456,198
Cattle NPV (US\$)	101,053	411,001	102,595	98,687	108,312	124,412	144,295	277,210
Wood (m ³)	154,548	0	171,129	103,952	80,225	87,051	105,000	105,781
Carbon balance (ton CO _{2,e})	5895	-32,561	38,376	63,413	12,435	40,684	17,433	6501
Deviation forest age (Regulation) (ha)	221	270	270	539	0	408	56	70
Deviation ending forest inventory (m ³)	3905	0	0	46,725	13,145	0	14,301	13,851
Deviation even flow timber (m ³ /yr)	176,412	0	221,343	158,455	127,808	121,248	13,990	17,664
Deviation annual incomes (US\$)	2,625,234	0	3,329,435	2,408,027	1,928,111	1,842,701	216,118	204,464

Numbers in bold are the ideal values.

Table 6
Results of the surveys conducted to livestock producers with forestry.

	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

Table 7
Objective function to be minimized in models M_n in each level of achievement U_n.

	U ₀	U ₁	U ₂	U ₃
M ₁	-	n _{NPVc} , n _{NPVf}	n _f , p _f , n _h	n _{CB} , n _h , p _h , n _A , p _A , n _{VF} , p _{VF}
M ₂	-	n _{NPVc}	n _{NPVc} , n _f , p _f , n _h	n _{CB} , n _h , p _h , n _A , p _A , n _{VF} , p _{VF}
M ₃	n _{CB}	n _{NPVc} , n _{NPVf}	n _h , p _h , n _A , p _A , n _{VF} , p _{VF}	-

deviations of carbon balance (n_{CB}), inter-annual timber harvest deviation (n_h, p_h), age class negative and positive deviations (n_A, p_A) and standing volume at the end of the period (n_{VF}, p_{VF}).

A subgroup considered n_{NPVf} at a second level of hierarchy, so this variant was included in a second model, M₂. Additionally, the environmental goal was considered at an initial level (U₀) n_{CB} which formed the model M₃.

As observed in Table 8 and Table 9 when NPV cattle and NPV forest are placed in a first hierarchy condition, the targets set in U₁ are not reached; the values reached in U₂ result in a slight improvement in the deviation based on the criteria of annual incomes and even flow timber.

Achievement function values (Table 9) were obtained for each hierarchical level from the sum of the standardized deviations with respect to the targets (Eq. 5).

Table 8
Results of M₁ in the three levels of achievement U₁, U₂ and U₃, considering NPV Cattle and NPV Forest in first priority level.

Criteria	U ₁	U ₂	U ₃
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 of forest and cattle final area control (ha)	341	341	341
Deviation ending forest inventory (m ³)	7392	7392	7392
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

Numbers in bold are the results at the U₁, U₂ and U₃ levels of achievement.

Table 9
Deviation values at U_n from results in M₁.

	β ₁	β ₂	β ₃
U ₁	160,207	160,207	160,207
U ₂	267,604	267,599	267,599
U ₃	233,527	233,527	233,527

Table 9 shows that the value U_{2(β2)}, slightly improves compared to the previous U_{2(β1)} in the second level of the model, which suggests that imposing the NPV of timber and livestock at the first level of hierarchy would largely determine, the entire productive structure and would allow minor modifications to achieve other types of goals such as the environmental goal.

In the M₂ model (Table 10) when NPV cattle is prioritized in the first hierarchy, the NPV cattle target is reached at the first hierarchy level (U₁) so that U_{1(β1)} = 0 (Table 11). This model is the one that results in the largest amount of total cattle area of 258 ha (Table 14). Total cattle area is the sum of the area of cattle under forest and in marginal areas such as firebreaks and exclusive areas for cattle grazing lands.

At the second level of hierarchy (U₂) the NPV forest target is improved by 86%, this is largely achieved with an increase in the deviation of ending forest inventory value that goes from 4263 m³ to 8485

Table 10
Results of M₂ in the three levels of achievement U₁, U₂ and U₃, considering NPV Cattle in first priority level.

Criteria	U ₁	U ₂	U ₃
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)	4263	8485	8485
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

Numbers in bold are the results at the U₁, U₂ and U₃ levels of achievement.

Table 11
Deviation values at U_{k_0} from results in M_2 .

	μ_1	μ_2	μ_3
U_1	0	0	0
U_2	1,160,943	224,235	224,235
U_3	205,507	221,737	221,737

m^3 of deviation (Table 10), going from 5799 m^3 of standing wood at the end of the period, in U_1 to a value of 515 m^3 in U_2 (Table 14). A selection of different forest regimes can also be appreciated, concentrated in the Site II FC (Table 14). All this results in a worse Carbon Balance value but the set of targets imposed at hierarchy level U_2 (Table 11) were satisfied.

It is interesting to observe the results coming from M_3 (Table 12), in U_0 the environmental target is reached with a carbon balance of 6788 ton CO_{2-e} , then, the way to improve the U_1 values (NPV cattle and NPV forest) is decreasing the NPV forest value. This is the result of a higher weight level in the NPV cattle goal compared to the NPV forest. The interesting thing about this result is that despite all the values getting worse, the value of the environmental target (6788) is conserved and the most appreciated value by livestock producers, livestock NPV as seen in the surveys, improves.

As observed in Table 8 and Table 10, productive targets condition the rest of the targets proposed. Particularly, the environmental goal cannot be reached without including it within the first level of hierarchy, as occurs in M_3 .

Table 15 shows the distances between the targets established by the producers in the first column and the final results of the three models considered (M_1 , M_2 and M_3). It is important to highlight that none of these reached 100% of the targets. The M_2 model reaches 100% of the Cattle NPV target, which is a high-hierarchy goal, but at the expense of the worst negative carbon balance: -20,160 tons of CO_{2-e} . Comparing these values with the results of model M_3 , where the goal of minimizing the negative balance deviations is the first priority, the results were favorable, in a scenario where the environmental goal of minimizing the emissions of livestock would be imposed when producing meat. These goals could be achieved with adequate economic incentives for livestock producers, through payments for the price differential for these types of products.

The M_2 model showed the lowest financial return, since the total NPV considering both activities was close to 801,000 US\$, compared to the return received in M_1 and even in M_3 . Livestock producers appreciate the fact that the M_3 model is the one achieving the best value of the goal of regulated income (minimizing annual deviation incomes) throughout the planning horizon.

On one hand producers do not value the criteria of ordering forest production to obtain a normal forest, and on the other hand, these criteria result in solutions dominated by first and second hierarchy goals, for all the proposed models.

Table 12
Results of M_3 in the three levels of achievement U_0 , U_1 and U_2 , considering Carbon Balance in the level U_0 and NPV Cattle and NPV Forest in the level U_1 .

Criteria	U_0	U_1	U_2
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)	5693	9000	9000
Deviation even flow timber (m^3/yr)	144,821	158,298	158,298
Carbon balance (ton CO_{2-e})	6788	6788	6788

Numbers in bold are the results at the U_1 , U_2 and U_3 levels of achievement.

3.3. Different use of resources in models

Results of the models M_1 , M_2 and M_3 show a different use of space and resources as presented in Table 14. In M_1 , 77% of the forested area is occupied in Site II with 20 stands out of the 25 afforested ones and 77% of the total area (Fig. 2).

Model M_2 . U_1 (Fig. 3) occupies around 132 afforested ha and assigns 47% of the surface to site I: 8 stands that occupy 47% of the surface in the Felling cycle (Table 14).

This is the model that houses the largest number of cattle (between 7669 and 8004 LU) and, as shown in Fig. 4, redistributes the forest area in 90% of intermediate productive quality stands or site II.

The M_3 . U_0 model (Fig. 5) results in the highest forest occupation in the territory: 44 occupying 270 ha and achieving the Carbon Balance target.

Results change when minimizing deviations from forestal and livestock financial targets; when M_3 . U_1 is obtained, 169 ha forested become occupied mainly in the Felling cycle regimens in 27 stands site II and site I (Fig. 6). The strategy to improve in U_1 is to occupy the space with more cattle (Table 14) during the planning period and reaching the end of it without standing wood at the end of the period. This model is interesting since it prioritizes in a first hierarchy level that high levels of the 3 goals can be reached: carbon balance, NPV forest and NPV cattle, although resigning part of the financial benefits of the two productions.

4. Discussion

The detailed field data collection, farm interviews, and goal programming models synthesize a very large amount of biophysical, producer, and economic information. The results provide sound information that can be considered by farm producers, rural farm and forest consultants, and state decision-makers. They provide a rigorous tool to analyze the use of resources and the sustainability of models. Medium and long-term information generated in this research allows integrating different dimensions over the long term horizon, allowing incorporation of the decision-makers' objectives. The models developed can contribute to quantify the productive and environmental conflicts and to understand the advantages and disadvantages of the different integration models.

The multicriteria goal programming approach applied from the payment matrix allows the decision-maker to obtain a reasonable set of production and environmental alternatives. For example, Table 13 shows that the satisfying set U_2 may improve discounted present values, although values of deviation from even flow do not, as shown in Table 12. Trade-offs quantification aids in showing the productive and environmental conflicts as indicated by Boillat et al. (2017). This study provides productive models that allow livestock and forestry commercial production, unlike other studies that encourage the neutralization of livestock emissions with carbon stocks in standing forests (De Oliveira et al., 2015).

The methodology and results of this study allow quantification of the productive and financial sacrifice incurred to achieve this set of goals, as well as the change in the use of resources, productivity and financial results. It is shown that environmental and productive objectives can be integrated, even considering harvest of trees in the system, unlike Doran-Browne et al. (2018) study, where carbon is stored indefinitely in the forest mass.

Variations in the models (M_1 , M_2 and M_3) showed the final solution is highly dependent on the preferences order in the higher level. Model M_2 used the majority preference scheme within the surveyed livestock producers, revealing that results in the higher hierarchy (U_1) are more determining than in models M_1 and M_3 . Although the environmental goal was initially valued by the majority of the interviewees, it is poorly prioritized when faced with the other goals. This would reveal that commercial forestry and livestock production and its economic-financial results are technically possible.

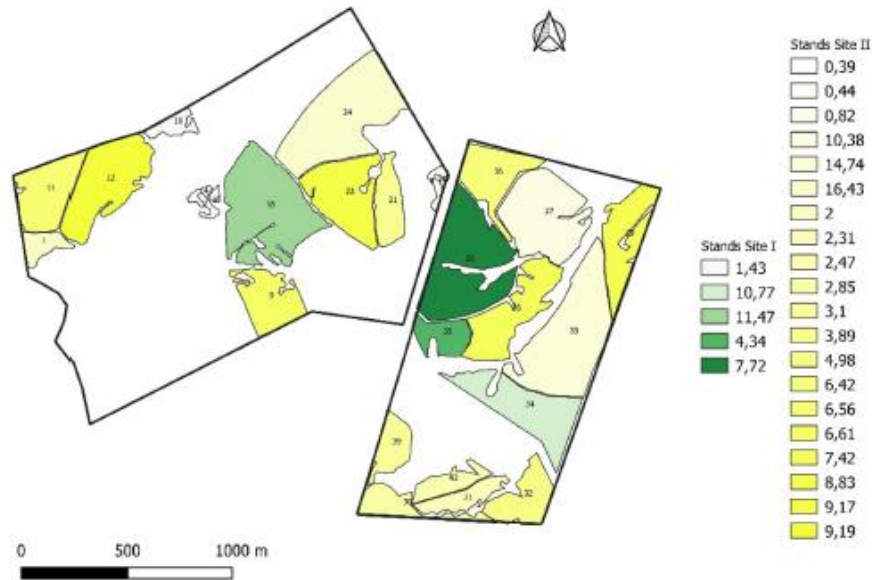


Fig. 2. Occupied areas with afforestation in model M_1 .

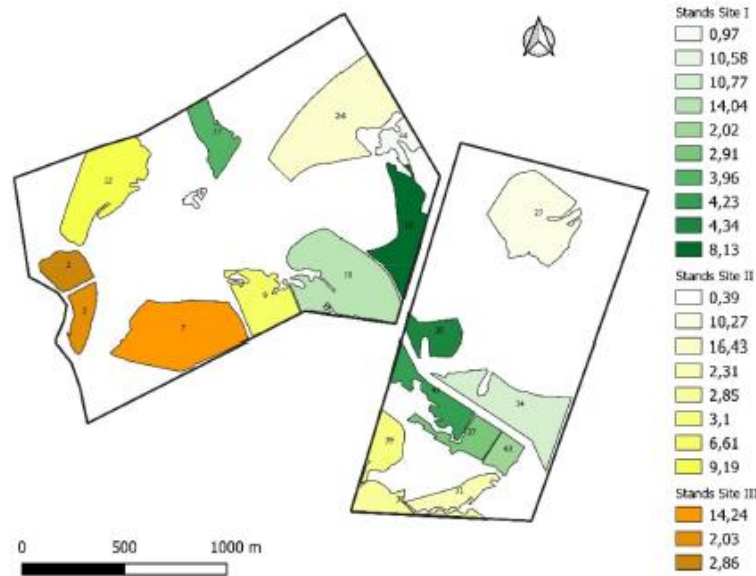


Fig. 3. Occupied areas with afforestation in model $M_2 - U_1$.

The environmental goal is achievable if it is prioritized at a higher hierarchical level; the distance towards the targets of economic return should be compared to the decision-maker's priority. This distance also sets the minimum incentive that livestock producers should receive if

there is a social goal for carbon reduction. These obstacles to the integration of environmental objectives are also found in studies of farmers in Australia and Texas, USA (Clayton et al., 2018; Schirmer and Bull, 2014), where the economic incentive is an important part in the



Fig. 4. Occupied areas with afforestation in model $M_2 - U_2$.

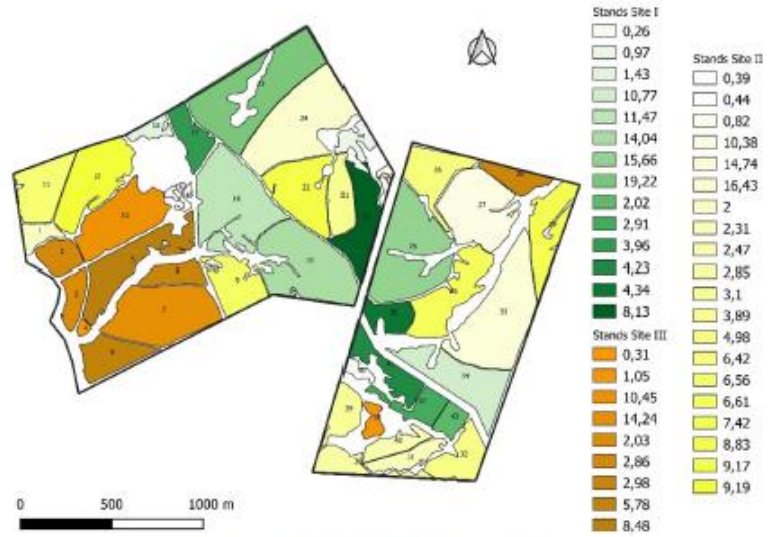


Fig. 5. Occupied areas with afforestation in model $M_3 - U_3$.

integration of forestry with environmental objectives, although cultural and social aspects are highly influential.

While somewhat limited in scope, the quantitative results obtained in this study suggest possible integration paths between forestry and

livestock and the possibility of including environmental benefits. The results provide medium and long term evidence that is possible to have management plans that integrate economic and environmental objectives if the appropriate incentives are incorporated.



Fig. 6. Occupied areas with afforestation in model $M_3 - U_1$.

Table 13
Deviation values at $U_{i,j}$ from results in M_3 .

	β_1	β_2	β_3
U_0	0	0	0
U_1	1,004,310	274,317	274,317
U_2	294,434	408,756	408,755

Table 14
Summary of selected production results among models.

Productive models results	M_1	M_2	M_3
Cattle area in forestable area (ha)	115	137	0/101
Cattle area on firebreaks (ha)	32	32	32
Cattle area in exclusive grazingland (ha) (NI)	89	89	89
Total Cattle area (ha)	236	258	121/222
Forested Area (ha)	155	132.2 / 132.7 ^a	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
SW Site I (m^2)	1608	3531 / 502	5435 / 0
SW Site II (m^2)	0	1682 / 13	4076 / 0
SW Site III (m^2)	0	586 / 0	548 / 0
Total SW (m^2)	1608	5799 / 515	10,559 / 0
LU_T	7765	7669 / 8004	6223 / 7533

FC: Felling Cycle Rotation; C: Coppice; SW Standing Wood at the end of the planning period.

^a Values after the slash (/) is a change on the results on U_1 , U_2 or U_3 .

Table 15
Summary of the models' target and achieved values.

Goal	Target	Achieved value M_1	Achieved value M_2	Achieved value M_3
Forest NPV (US\$)	556,578	556,578	483,711	556,578
Cattle NPV (US\$)	317,307	302,935	317,307	292,698
Wood (m^3)	94,121	95,762	83,943	109,719
Carbon balance (ton CO ₂ -e)	6788	-17,493	-20,160	6788
Deviation forest age regulation (ha)	275	341	352	377
Deviation ending forest inventory (m^3)	23,830	7392	8485	9000
Deviation even flow (timber) (m^3 /yr)	112,885	154,274	118,641	158,298
Deviation annual incomes (US\$)	1,764,601	2,310,653	1,764,601	2,369,577

Number in bolds are the best results achieved in each criterion.

Although reductionist optimization models may simplify complexity, some aspects could be explored in future studies, such as the structure of the decision-making process, the possible interactions between fertility and carbon stored in the soil, by a change in the use of land from cattle to forest or vice versa. Incorporating greater interactions would lead to a more specific analysis in the use of natural resources, which should be addressed when more scientific evidence is available for the situation where the change in land use from pastoral to forest is available.

The research indicates that the optimal economic afforestation surface could be large, which leads to a very important change in the productive orientation for farm producers and Uruguay. It also has implications for similar silvopasture systems elsewhere. Integration of both beef and wood production and GHG minimization reveals a great potential to improve how farm production occurs, and the adequate

incorporation of the possible incentives to improve environmental aspects. As global climate changes, there is increasing policy pressure to reduce GHGs through the best approaches possible, and this silvopasture system can offer considerable promise at a reasonable social cost. Joint production may benefit producers in Uruguay with some increases in farm income when beef and forest are complementary products. When beef production and timber production enter a competitive production range, if the tradeoffs and differences between present values are small, country or global payments for carbon storage in forests can improve social welfare.

There also may be marketing advantages for silvopasture producers in Uruguay, especially compared with other countries that employ many fewer silvopasture systems. Uruguayans could rightfully claim that they produce the most carbon neutral beef production systems, and possibly gain market share to regions that are either deforesting to produce cattle, or at least ignoring silvopasture carbon offset opportunities. Their natural grass beef systems could offer advantages at least in the EU, and perhaps North America or Japan as well.

Uruguay and the Mercosur region in general, which is a large producer and exporter of meat, could promote their exports with environmental added value and obtain a differential price for consumers willing to pay for that value. It is important to continue investigating whether it is possible to develop these actions by diversifying the forest products obtained, through forest shifts that tend to obtain solid wood with a longer useful life after harvest.

Overall, this detailed biological, farmer, and multi-objective goal programming research advances the knowledge of silvopasture systems and environmental benefits in Uruguay, as one important contributor to global beef production, with increasing forest and net carbon reduction opportunities. There may be other environmental benefits from forests as well, such as more diversity of fauna, and as well economic benefits to farmers or the regional economy. There would of course be tradeoffs as well, such as acceptance of new production systems and tall trees blocking viewsheds, or changes in farm producer lifestyles. Individual farmers and state policy makers can use the results presented here to consider these farm uses and appropriate incentives to better achieve the multiple goals of production of beef, timber, and carbon reduction.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This work was funded by the College of Agronomy – Udelar-FAgro (University of Uruguay), INIA-Uruguay (National Agriculture Research Institute) Grant FPTA 300, and the National Agency for Research and Innovation (ANII-Uruguay) doctoral fellowship POS_NAC_2012_1_9S18 to Adriana Bussoni. Special thanks from Bussoni to Dr. Luis Díaz Balteiro from Universidad Politécnica de Madrid, who devoted his time and taught me about Goal Programming; to Ing. Agr. Juan Cabris de León for his careful review and insightful comments on the manuscript; finally, my gratitude to Mariana Boscana.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103118>.

References

Alconada Magliano, M.M., Carricaburu, F., 2019. Estudio de la relación SUELO - AGUA en la producción de madera de Eucalyptus globulus en silvopastoreo: Caso de estudio. In: INIA (Ed.), Producción Ganadera y Forestal: Análisis de Sistemas de Producción Integrados. Montevideo, pp. 87–129.

- Aldoa, J., Martínez-Peña, F., Romero, C., Díaz-Balteiro, L., 2014. Participatory goal programming in forest management: an application integrating several ecosystem services. *Forests* 5, 3352–3371. <https://doi.org/10.3390/f5123352>.
- Becerra López, G., Ledgard, S., Wedderburn, E., 2013. A comparison of greenhouse gas emissions from Uruguayan and New Zealand beef systems. *Agrociencia Uruguay* 17, 120–130.
- Bettinger, P., Boston, K., Sily, J., Grebner, D., 2009. *Forest Management and Planning*. Academic Press, Burlington, MA.
- Bollat, S., Scarpa, F.M., Robson, J.P., Gasparri, I., Aide, T.M., Aguiar, A.P.D., Anderson, L.O., Batistella, M., Fonseca, M.G., Futenma, C., Grau, H.R., Mathez-Stiefel, S.L., Metzger, J.P., Omotto, J.P.H.B., Pedlowski, M.A., Perez, S.G., Robiglio, V., Soier, L., Vieira, I., Brondizio, E.S., 2017. Land system science in Latin America: challenges and perspectives. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 26–27, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.01.015>.
- Buongiorno, J., Gilles, K., 2003. *Decision Methods for Forest Resource Management*. Academic Press, San Diego.
- Bussoni, A., Cabris, J., Fernández, E., Boscana, M., Cabbage, F., Bentancur, O., 2015. Integrated beef and wood production in Uruguay: potential and limitations. *Agrofor. Syst.* 89, 1107–1118. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9839-1>.
- Bussoni, A., Boscana, M., Varela, F., Llanos, E., Picasso, V., Cabbage, F., Alconada Magliano, M.M., Carricaburu, F., 2019. Producción ganadera y forestal: Análisis de sistemas de producción integrados. FPTA-INIA, N°70 144.
- Clason, T.R., 1995. Economic implications of silvopastures on southern pine plantations. *Agrofor. Syst.* 29, 227–238. <https://doi.org/10.1007/BF00704870>.
- Clayton, H., Clark, C., Lambert, D., Jensen, K., 2018. Cattle producer willingness to afford pastureland and sequester carbon. *For. Policy Econ.* 92, 43–54.
- Crempien, C., 2008. Antecedentes técnicos y metodología básica para utilizar en presupuestación en establecimientos ganaderos. In: *Bovinos para carne y ovinos*, 2^a Ed. corr. ed. FUCEA, Montevideo.
- Davis, J., Rauser, G., 2020. Amending conservation programs through expanding choice architecture: a case study of forestry and livestock producer. *Agric. Syst.* 177 <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.102678>.
- Davis, L.S., Johnson, N.K., 1987. *Forest Management*, Third ed. McGraw-Hill, Inc., New York.
- Davis, L.S., Johnson, N.K., Bettinger, P., Howard, T.E., 2001. *Forest Management: To Sustain Ecological, Economic, and Social Values*, Fourth. ed. Waveland Press, Inc., Long Grove, IL.
- De Oliveira, R., Barioni, L.G., Zanetti, T., Eory, V., Topp, C.F.E., Fernandes, F.A., Moran, D., 2015. Developing a nationally appropriate mitigation measure from the greenhouse gas GHG abatement potential from livestock production in the Brazilian Cerrado. *AGSY* 140, 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.08.011>.
- De Stefano, A., Jacobson, M., 2018. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. *Agrofor. Syst.* 92, 285–299. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9>.
- Díaz-Balteiro, L., Rodríguez, L.C.E., 2006. Optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration: A comparison of results in Brazil and Spain. *For. Ecol. Manag.* 229, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.005>.
- Díaz-Balteiro, L., Romero, C., 2003. Forest management optimisation models when carbon captured is considered: a goal programming approach. *For. Ecol. Manag.* 174, 447–457. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00075-0).
- Díaz-Balteiro, L., Romero, C., 2004. Sustainability of forest management plans: a discrete goal programming approach. *J. Environ. Manag.* 71, 351–359. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.04.001>.
- Díaz-Balteiro, L., Romero, C., 2008. Making forestry decisions with multiple criteria: a review and an assessment. *For. Ecol. Manag.* 255, 3222–3241. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.038>.
- Díaz-Balteiro, L., Romero, C., Rodríguez, L.C., Ribeiro, S.N., Borges, J.G., 2014. Economics and Management of Industrial Forest Plantations. In: Borges, J.G., Díaz-Balteiro, L., McDill, M.E., Rodríguez, L.C.E. (Eds.), *The Management of Industrial Forest Plantations. Theoretical Foundations and Applications*, Springer, NY, p. 543. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1>.
- Díaz-Balteiro, L., Alfranca, O., González-Pachón, J., Romero, C., 2016. Ranking of industrial forest plantations in terms of sustainability: a multicriteria approach. *J. Environ. Manag.* 180, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.022>.
- Doran-Browne, N., Wootton, Mark, Taylor, C., Richard, E., 2018. Offsets required to reduce the carbon balance of sheep and beef farms through carbon sequestration in trees and soils. *Anim. Prod. Sci.* 58, 1648–1655. <https://doi.org/10.1071/AN16438>.
- Giménez, J., Bertomeu, M., Díaz-Balteiro, L., Romero, C., 2014. Dealing with the sustainability issue for industrial plantation management. In: McDill, M.E., Rodríguez, L.C.E. (Eds.), Borges, J.G., Díaz-Balteiro, Luis. *The Management of Industrial Forest Plantations. Theoretical Foundations and Applications*, Springer, Dordrecht, pp. 473–488. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1>.
- Giménez, J.C., Bertomeu, M., Díaz-Balteiro, L., Romero, C., 2013. Optimal harvest scheduling in Eucalyptus plantations under a sustainability perspective. *For. Ecol. Manag.* 291, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.045>.
- Guedes, L.C.L., Coelho Junior, L.M., Oliveira, A.D., Mello, J.M., Rezende, J.L.P., Silva, C.F.C., 2011. Economic analysis of replacement regeneration and coppice regeneration in eucalyptus stand under risk conditions. *Cerne* 17, 393–401.
- Hernández, J., del Pino, A., Vance, E.D., Calífra, Á., Del Giorgio, F., Martínez, L., González-Barrios, P., 2016. Eucalyptus and Pinus stand density effects on soil carbon sequestration. *For. Ecol. Manag.* 368, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.007>.
- Hirigoyen, A., Rachid, C., 2014. Sistema de Apoyo a la Gestión Forestal. Modelos de Simulación de Crecimiento y Análisis Económico.

- Indexmundi, 2019. Beef and Veal Meat Exports by Country [WWW Document]. <https://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=beef-and-veal-meat&graph=exports>.
- IPCC, 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing ST - Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Climate Change 2013. The Physical Science Basis, Stockholm.
- Jones, D., Tamiz, M., 2010. Practical goal programming. *Manag. Sci.* <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5771-9>.
- Kangas, A., Kangas, J., Kurttila, M., 2008. Decision Support for Forest Management. Elsevier, NY.
- Kangas, J., Kangas, A., 2005. Multiple criteria decision support in forest management – the approach, methods applied, and experiences gained. *For. Ecol. Manage.* 207, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.023>.
- Kaya, A., Bettinger, P., Boston, K., Akbulut, R., Ucar, Z., Siry, J., Merry, K., Cieszewski, C., 2016. Optimisation in forest management. *Curr. For. Reports* 2, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0027-y>.
- Kanter, D.R., Musumba, M., Wood, S.L.R., Palm, C., Antle, J., Balvanera, P., Dale, V.H., Havlik, P., Kline, K.L., Scholes, R.J., Thornton, P., Tittonell, P., Anderson, S., 2018. Evaluating agricultural trade-offs in the age of sustainable development. *Agric. Syst.* 163, 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.09.010>.
- Lacorte, S.M., Barth, S.R., Colcombet, L., Crechi, E.H., Esquivel, J.J., Fassola, H., Wick, R.A., 2016. Silvopastoral systems developed in Misiones and Corrientes, Argentina. In: Peri, P.L., Dube, F., Costa Varela, A. (Eds.), *Silvopastoral Systems in Southern South America*. Springer, Gainesville, USA, pp. 10–39.
- Lindo Systems Inc., 2018. LINGO.
- Modernel, P., Astigarraga, L., Picasso, V., 2013. Global versus local environmental impacts of grazing and confined beef production systems. *Environ. Res. Lett.* 8 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035052>, 035052.
- Peri, P.L., Dube, F., Costa Varela, A., 2016. Silvopastoral systems in the subtropical and temperate zones of South America: An overview. In: Peri, P.L., Dube, F., Costa Varela, A. (Eds.), *Silvopastoral Systems in Southern South America*. Springer, Gainesville, USA, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24109-8>.
- Picasso, V.D., Modernel, P.D., Beccia, G., Salvo, L., Gutiérrez, L., Astigarraga, L., 2014. Sustainability of meat production beyond carbon footprint: A synthesis of case studies from grazing systems in Uruguay. *Meat Sci.* 98, 346–354. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.07.005>.
- Rodríguez, L.C.F., Moreira, R.M., 1989. Gerenciamiento de florestas de Eucalyptus con modelos de programación lineal. IPEF Ser. Técnica 6, 1–5.
- Romero, C., 1996. Análisis de las decisiones multicriterio. Isefe, Madrid.
- Romero, C., Rehman, T., 2003. Multiple Criteria Analysis for Agricultural Decisions, Second, ed. Amsterdam.
- Saaty, J., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J. Math. Psychol.* 15, 234–281.
- Saravia, A., César, D., Montes, E., Taranto, V., Pereira, M., 2011. Manejo de rodeo de cría sobre campo natural.
- Schimzer, J., Bull, L., 2014. Assessing the likelihood of widespread landholder adoption of afforestation and reforestation projects. *Glob. Environ. Chang.* 24, 306–320. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.11.009>.
- SNIA, 2016. SNIA-Monitoreo Ganadería [WWW Document]. URL: http://dlibrary.snia.gub.uy/mapeocom/MonitoreoAgroclimatico/MONITOREO_GANADERIA/CARGA_SEGURA/CargaSegura.html#tabs-1.
- Steiguer, J.E., Liberti, L., Schuler, A., Hansen, B., 2002. Multi-Criteria Decision Models for Forestry and Natural Resources Management: An Annotated Bibliography. Delaware.
- Subak, S., 1999. Global environmental costs of beef production. *Ecol. Econ.* 30, 79–91.
- Uría, M., Caballero, R., Ruiz, F., Romero, C., 2002. Meta-goal programming. *Eur. J. Oper. Res.* 136, 422–429.
- Zomer, R., Trabucco, A., Coe, R., Place, F., 2009. Trees on Farm: Analysis of Global Extent and Geographical Patterns of Agroforestry (No. 89). ICRAF, Nairobi, Kenya. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.