

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFECTO DEL MARCO DE PLANTACIÓN EN LOS
RESULTADOS PRODUCTIVOS Y ECONÓMICOS EN
SISTEMAS SILVOPASTORILES**

por

Mariana Renée **BOSCANA GOIRES**

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magister en Ciencias Agrarias
opción Ciencias Vegetales

MONTEVIDEO
URUGUAY
Noviembre 2019

Tesis aprobada por el tribunal integrado por el Ing. Ftal. (*PhD*) Roberto Scoz, el Ing. Agr. (*PhD*) Pablo Boggiano y el Ing. Ftal. (*MSc*) Hugo Fassola el 11 de noviembre de 2019. Autor: Mariana Renée Boscana Goires. Directora: Ing. Agr. (*MSc*) Adriana Bussoni.

AGRADECIMIENTOS

A la Ing. Agr. (*MSc.*) Adriana Bussoni quien siempre confío en mí y apoyó en todo este proceso, por sus valiosos aportes y constante estímulo.

Al Ing. Agr. Oscar Bentancur por sus valiosas contribuciones y sugerencias.

En especial agradecer al Ing. Agr. (*PhD*) Ruben Jacques, Ing. Agr. (*MSc*) Fabián Varela, Dr. Vet. (*MSc*) Eduardo Llanos, Ing. Agr. (*MSc*) Carolina Munka, Ing. Agr. Pablo Dellacassa, Ing. Agr. Andrés González, Ing. Agr. (*PhD*) Ana Gonzalez e Ing. Agr. Pablo Prieto por compartir largas jornadas de trabajo de campo, por su apoyo logístico, por brindarme su amistad y por sus valiosos aportes, opiniones y consejos.

A mis padres Lucía y Miguel, mi hermana Noelia, mi cuñado Andrés y a mi sobrino Juan Manuel por estar siempre.

Agradezco el apoyo y paciencia de mis compañeros del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - Dirección General Forestal el Ing. Agr. Leonardo Boragno, Ing. Agr. Ricardo Echeverría e Ing. Agr. Raquel Balero; y a mis compañeros Docentes del Ciclo de Introducción a la Realidad Agropecuaria (IRA) y del Departamento de Ciencias Sociales.

A mis amigas/o Andrea, Carolina, Cecilia F., Cecilia G., Ivette, María José, Ramona, Yamili y César por apoyarme con su amistad.

Agradecer al tribunal compuesto por el Ing. Ftal. (*MSc*) Hugo Fassola, Ing. Agr. (*PhD*) Pablo Boggiano e Ing. Ftal. (*PhD*) Roberto Scoz principalmente por sus enseñanzas, interés en el trabajo y aportes.

A Gabriela, Susana y Shirley del Laboratorio de Nutrición animal por su trabajo.

A la Institución Facultad de Agronomía – Universidad de la República por permitirme continuar con mi formación profesional y académica.

Por último, agradecer el financiamiento brindado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria a través del Proyecto FPTA 300 “Producción Ganadera y Forestal: Modelos de Integración Económico Ambiental” y a la empresa forestal REDALCO por permitirme realizar el trabajo de campo y brindarme información valiosa para lograr los objetivos propuestos.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	X
SUMMARY	XI
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 ANTECEDENTES	13
<u>1.1.1 Efecto del marco de plantación en producción de madera y pasturas.....</u>	14
<u>1.1.2 Producción de forraje en diferentes marcos de plantación.....</u>	20
<u>1.1.3 Efecto del sombreado sobre la producción forrajera.....</u>	23
<u>1.1.4 Efecto en el retorno económico.....</u>	25
1.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS DEL TRABAJO	25
<u>1.2.1 Objetivo general.....</u>	25
<u>1.2.2 Objetivo específico.....</u>	25
<u>1.2.3 Hipótesis.....</u>	26
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	27
2.2 MANEJO DEL COMPONENTE FORESTAL	34
2.3 METODOLOGÍA	35
<u>2.3.1 Componente Forestal.....</u>	35
<u>2.3.2 Componente Pasturas.....</u>	37
2.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	41
<u>2.4.1 Comparación de los marcos de plantación a nivel del resultado de árbol individual.....</u>	41
<u>2.4.2 Comparación de los marcos de plantación a nivel del resultado por unidad de superficie.....</u>	42
<u>2.4.3 Sobrevivencia.....</u>	44

<u>2.4.4 Comparación de los marcos de plantación a nivel de la producción de forraje</u>	45
<u>2.4.5 Evaluación económica financiera de los sistemas</u>	47
2.4.5.1 Estimación de los Costos de producción	47
3. RESULTADOS	52
3.1 PRODUCCIÓN DE MADERA	52
<u>3.1.1 Resultados descriptivos para producción de madera</u>	52
3.1.1.1 Valores DAP y H por sistema.....	52
3.1.1.2 Valores DAP y H por estrato.....	55
3.1.1.3 Densidad.....	57
3.1.1.4 Área basal (G).....	58
3.1.1.5 Volumen con corteza (V)	59
<u>3.1.2 Análisis estadístico para producción de madera</u>	60
3.1.2.1 Análisis individual para las variables DAP, H, área basal (G) y volumen con corteza (V).....	60
3.1.2.2 Resultados de producción por superficie (hectárea).....	72
3.2 RESULTADOS DE PRODUCCIÓN DE FORRAJE	78
<u>3.2.1 Producción forrajera descriptiva</u>	78
3.2.2.1 Principales especies del estrato herbáceo.....	82
<u>3.2.2 Análisis estadístico</u>	84
3.2.2.1 Materia Seca	84
3.2.2.2 Proteína Cruda y Fibra Detergente Ácida.....	89
<u>3.2.3 Carga ganadera que puede albergar el sistema</u>	96
3.3 RESULTADOS ECONÓMICOS FINANCIEROS DE LOS SISTEMAS	98
4. DISCUSIÓN	112
4.1 PRODUCCIÓN DE MADERA	112
4.2 PRODUCCIÓN FORRAJERA	116
4.3 INDICADORES ECONÓMICOS-FINANCIEROS	118
5. CONCLUSIONES	120
6. BIBLIOGRAFÍA	122
7. ANEXOS	133

RESUMEN

Los sistemas silvopastoriles constituyen una modalidad productiva con gran potencial de expansión en Uruguay. El trabajo se planteó evaluar el efecto productivo y económico del marco de plantación en sistemas silvopastoriles. La hipótesis principal es que no existen diferencias en la producción de madera y forraje entre los sistemas evaluados. El mismo se realizó en plantaciones comerciales con *Eucalyptus globulus* en la región Este del Uruguay plantadas en la primavera del año 2011. A los efectos de la investigación se definieron dos sistemas: Sistema de producción convencional (*SPC* 3,5x2,27m - 1.258 arb/ha) y Sistema silvopastoril con filas dobles y callejones (*SSFC* (2 x 2)+8m - 1.000 arb/ha). Se cuantificaron a los 36, 41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), Altura total (H, m) y sobrevivencia (%), las cuales fueron utilizadas para estimar Densidad (N, arb/ha), Altura media de los dominantes (Hdom, m), Área Basal (G, m²/ha) y Volumen (V, m³/ha con corteza). Para evaluar la producción de forraje en campo natural se realizaron mediciones cada 45 a 90 días mediante jaulas de exclusión móviles, complementando la evaluación con análisis de Fibra Detergente Ácida (FDA, %) y Proteína Cruda (PC, %). Los resultados indican que el marco de plantación no tuvo efecto significativo ($p > 0,05$) sobre los valores individuales para DAP y H en los meses evaluados. Se constatan diferencias significativas en producción de madera entre los sistemas a partir de los 41 meses de edad ($p < 0,05$), dado que la densidad entre los mismos comenzó a registrar diferencias significativas ($p < 0,01$), siendo a los 68 meses de 83,7 y 62,7 m³/ha para *SPC* y *SSFC* respectivamente. La producción de materia seca en términos promedios fue de 581,9 ($\pm 19,9$), 378,1 ($\pm 39,1$) y 339,9 ($\pm 19,9$) kg/ha de MS por estación para *SSFC*, *testigo* y *SPC* respectivamente, lo que equivale a un 42% más de producción para el primer sistema respecto al convencional. En general no se establecen diferencias significativas para los contenidos de PC (%) y FDA (%) entre sistemas en cada período de corte. El turno de cosecha óptimo técnico y económico fue de 12 y 13 años para *SPC* y *SSFC*, con rentabilidades del orden del 12 al 13% respectivamente.

Palabras claves: silvopastoreo, rentabilidad, *eucalyptus globulus*, densidad

EFFECT OF THE ARRANGEMENT ON ECONOMIC AND PRODUCTION RESULTS ON SILVOPASTORAL SYSTEMS

SUMMARY

Silvopastoral systems constitute a productive modality with great potential for expansion in Uruguay. The work was proposed to evaluate the productive and economic effect of the arrangement in silvopastoral systems. The main hypothesis is that there are no differences in timber and fodder production between the systems evaluated. It was carried out in commercial plantations established with *Eucalyptus globulus* in the Eastern region of Uruguay in the spring of 2011. For the purposes of the investigation, two systems were defined: Conventional production system (*SPC* 3,5x2,27m - 1,258 arb/ha) and Silvopastoral system with double rows and alleys (*SSFC* (2 x 2) + 8m - 1,000 arb/ha). They were quantified at 36, 41, 45, 51 and 68 months of age of the culture Diameter at Breast Height (DBH, cm), Total height (H, m) and survival (%), which were used to estimate Density (N, arb/ha), Height average of the dominant (Hmod, m), Basal Area (G, m²/ha) and Volume (V, m³/ha cc). To evaluate the production of fodder in the natural field, measurements were made every 60 days by means of exclusion cages, complementing the evaluation with FDA (%) and PC (%) analysis. The results indicate that the planting arrangement had no significant effect ($p > 0.05$) on the individual values for DAP and H in the months evaluated. There are significant differences in wood production between the systems from 41 months of age ($p < 0.05$), since the density between them began to register significant differences ($p < 0.01$), being at 68 months of 83,7 and 62,7 m³/ha for *SPC* and *SSFC* respectively. Dry matter production in average terms was 581,9 ($\pm 19,9$), 378,1 ($\pm 39,1$) and 339,9 ($\pm 19,9$) kg/há MS per station for *SSFC*, witness and *SPC* respectively, which is equivalent to 42% more production for the first system compared to the conventional one. In general, no significant differences are established for the contents of PC (%) and FDA (%) between systems in each cutting period. The optimum technical and economic harvest was 12 and 13 years for *SPC* and *SSFC*, respectively. Both systems are viable with a return of 12 and 13%.

Keywords: silvopastoral, profitability, *eucalyptus globulus*, density

1. INTRODUCCIÓN

El sector forestal en Uruguay registra un gran crecimiento a partir de la década del 90, producto de los subsidios directos e indirectos derivados de la segunda Ley Forestal (Ley N° 15.939/87) (DGF, 2018). El mismo se traduce no sólo en la expansión del cultivo, sino también, en el desarrollo de industrias para su procesamiento. Esta política de fomento al inicio, promovió la instalación de extensas plantaciones forestales por grandes empresas e inversores pequeños y medianos.

El retiro de subsidios y exoneraciones tributarias a la actividad forestal a partir del año 2005, tuvo como efecto una menor superficie de plantación por parte de productores no integrados verticalmente a la cadena (Bussoni y Cabris, 2010). A su vez, la demanda creciente de materia prima son aspectos que conforman un nuevo escenario para el sector y que ha generado el acercamiento de la actividad forestal a actividades agropecuarias.

Frente a este contexto, se abre la oportunidad de incorporar la actividad forestal en establecimientos ganaderos y la necesidad de generar información sobre la conveniencia productiva y económica de los sistemas integrados. En Uruguay son escasas las investigaciones que refieren a sistemas diseñados específicamente con una lógica silvopastoril, donde el marco de plantación además de tener en cuenta el componente forestal, sea optimizador del crecimiento herbáceo bajo dosel y por ende de la producción ganadera.

Para el año 2018 nuestro país destinó aproximadamente 15,8 millones de metros cúbicos para uso industrial, de los cuales alrededor de 10 millones de metros cúbicos fueron destinados a la producción de pulpa de celulosa (DGF, 2019). A su vez, en los últimos años el valor de la tierra se ha venido incrementando. En términos generales el precio promedio de las operaciones de compraventa de tierras para uso agropecuario registrado para el primer semestre del año 2018 fue de 3.098 dólares

por hectárea, lo que implicó que el valor se incrementara más de 7 veces con respecto al precio medio del año 2000 (DIEA, 2018). Esto ha impactado fuertemente en la política de adquisición de grandes superficies de tierras, por lo que las empresas forestales buscan expandir sus cultivos en predios agropecuarios, principalmente explotaciones ganaderas, dada la complementariedad de los rubros, así como también las posibilidades de contar con suelos de aptitud y/o de prioridad forestal en estos establecimientos. Estas estrategias por parte de empresas forestales presentes en nuestro país, han permitido a diferentes productores ganaderos ingresar en la actividad forestal, sin sustituir el principal rubro de su explotación, favoreciendo la diversificación de ingresos y el logro de retornos económicos más estables a largo plazo (Cubbage *et al.*, 2012, Boscana y Varela, 2011).

En los últimos años, se han promovido a través de planes y beneficios fiscales ofrecidos en el sector público, incentivos para que productores ganaderos incorporen el cultivo forestal en parte de sus predios (Pastorini y Acosta, 2009).

En los sistemas silvopastoriles se establecen interacciones productivas-económicas, ambientales y sociales que deben ser conocidas para poder proyectar su viabilidad en el mediano a largo plazo (Figura 1). La producción forestal involucra ciclos de producción entre 8 a 24 años dependiendo de la especie y del destino comercial, mientras que la producción ganadera se realiza en ciclos de 3 a 5 años. Por lo que, el integrar ambas actividades implica diferente uso de los factores de producción como la mano de obra y el capital invertido, el acceder a diferentes mercados y el uso más intensivo de los recursos naturales. Por lo tanto, estos sistemas posibilitan un modelo de integración productiva que, en una adecuada combinación de sus componentes, podrían mejorar la producción de los sistemas ganaderos y forestales tradicionales, el retorno económico de los productores rurales, así como el uso más eficiente de los recursos naturales.



Figura 1. Diagrama de las principales interacciones que se establecen en un sistema silvopastoril

A su vez, el estudio de estos sistemas podría representar una estrategia productiva frente a exigencias internacionales referidas al Cambio Climático. En este sentido, a partir del año 1997 el Protocolo de Kioto, estableció una serie de metas para disminuir las emisiones de gases efecto invernadero de forma de afrontar el cambio climático. El compromiso establecido y de obligatoriedad para países industrializados que lo ratificaron, suponía una reducción del 5% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el periodo 2008-2012, en relación a las emisiones registradas para el año 1990. Con respecto a los países en desarrollo, se trató de un proceso voluntario (caso de Uruguay). A partir del año 2011, se lanza la Plataforma de Durban donde se prevé negociar un tratado con nuevos compromisos y

normas jurídicas en la lucha contra el cambio climático a inicios del 2015, el que entraría en vigencia en el año 2020. En el mismo, se manifiesta el compromiso de reducciones aplicado a todos los países independientemente de su categoría, dado que los países emergentes han registrado un aumento en sus emisiones por el incremento de sus actividades industriales (CEPAL, 2012), si bien el peso relativo de sus emisiones sigue siendo menor frente a los países desarrollados.

Al mismo tiempo, el comercio internacional de bienes de origen agropecuario registra mayores exigencias en materia de impactos ambientales, siendo el etiquetado con la Huella de Carbono de sus productos un ejemplo (Oyhantçabal, 2011). Uruguay para contrarrestar las nuevas exigencias en el mercado, deberá generar estrategias que permitan destacar el valor agregado ambiental de sus productos de origen agropecuario (Becoña y Ordeig, 2013).

Los sistemas silvopastoriles, podrían ajustarse a una estrategia que permita la captación de carbono atmosférico por el componente arbóreo y pastoril, compensando las emisiones de la actividad ganadera (Cubbage, 2012). Sin embargo, la potencialidad en la fijación de Carbono de estos sistemas, dependerá de las características de tapiz herbáceo (metabolismo, especies, tolerancia a la sombra, etc), de la densidad, distribución espacial y edad de las leñosas, de la carga animal del sistema, entre otros (Jackson y Ash, 1998).

Los resultados de este trabajo buscan aportar información para un importante número de productores ganaderos criadores en zonas de aptitud forestal y permitirá desarrollar mejores estrategias a nivel público y privado de asociación productiva. De los datos preliminares del Censo Agropecuario 2011 (DIEA, 2011), se deriva que existen aproximadamente un total de 21.143 productores cuya principal fuente de ingreso es la ganadería, representando el 65,7% de la superficie agropecuaria del país, lo que reafirma la importancia de esta producción a nivel nacional y la búsqueda de nuevas estrategias productivas.

1.1 ANTECEDENTES

Conceptualmente, un sistema silvopastoril constituye una modalidad productiva que integra en una misma área y escala de tiempo árboles-pasturas-animales, estableciéndose relaciones de mayor complejidad entre sus componentes en relación a sistemas forestales y ganaderos puros. Según Ibrahim y Pezo (1998), estos sistemas constituyen *“una opción de producción pecuaria donde las leñosas perennes interactúan con los componentes tradicionales, como forrajeras herbáceas y animales, bajo un sistema de manejo integral”*. Según Somarriba (1992) estos sistemas son alguna forma de combinación entre una especie leñosa y por lo menos una especie forrajera utilizada para el ganado. Para FAO (1999), un sistema silvopastoril es una forma de combinar árboles con pasturas y animales dentro de una parcela. De acuerdo a como se integren estos componentes, el beneficio que estos sistemas pueden brindar responde al aumento de la producción y la conveniencia económica, ambiental y social en el mediano y largo plazo.

En Uruguay, las prácticas silvopastoriles han estado relacionadas a la incorporación del componente forestal como cuadros de sombra y abrigo para protección de ganado y producción de leña; cortinas protectoras para cultivos frutícolas y/o hortícolas; recuperación de zonas con alto nivel de erosión, entre otros usos. Un trabajo sobre el diagnóstico y caracterización de los sistemas agroforestales existentes en el Uruguay fue el de Casellas *et al.* (1993), donde se señala que las prácticas silvopastoriles registradas en el país están relacionadas con el pastoreo del ganado en plantaciones forestales en gran escala, dada la mayor disponibilidad de forraje en áreas de corta fuegos, zonas bajas y caminos de saca. Concluyen que el silvopastoreo tiene como principal objetivo disminuir los incendios forestales.

A pesar de que la asociación árboles, ganado y pastura sería a priori positiva, no es indiferente a la calidad de los recursos naturales y la disponibilidad de los mismos como punto de partida en estos sistemas. Algunos de éstos refieren al estado de degradación del suelo, la competencia que se establece por los insumos y la

fertilidad del suelo, los nutrientes, la luz, el agua, el tiempo dedicado a los rubros y la mano de obra, entre otros. Algunos autores sostienen que los desafíos para la adopción de sistemas combinados de producción a nivel predial es la inversión en términos de capital, mano de obra y tiempo, lo cual implica un riesgo para el productor (Dagang y Nair, 2003). Por lo tanto, en los sistemas silvopastoriles el resultado en sus múltiples dimensiones en el largo plazo dependerá de diversos factores que a su vez interaccionan entre sí.

1.1.1 Efecto del marco de plantación en producción de madera y pasturas

Algunos de las variables del componente arbóreo que cobran importancia en estos sistemas lo constituyen: la especie, el marco de plantación, la densidad, edad y la distribución de los árboles en la plantación. Los mismos determinan no sólo la producción de madera del sistema, sino que también la producción de forraje bajo dosel. En sistemas silvopastoriles en general, los árboles son dispuestos en una o varias filas separados por callejones amplios para maximizar la producción total de forraje y madera, así como también una gestión más eficiente del ganado (Brauer y Ares, 2005).

En general se establece que una menor intensidad de luz hacia el estrato herbáceo por efecto de los árboles (copa, densidad, edad) puede determinar un menor potencial de crecimiento de este último y modificar la composición botánica. Sin embargo, esto dependerá de la tolerancia de las especies al sombreado, de las características de los árboles y de la fertilidad del suelo (Bernardino y García 2009, Gallo 2006). Otro aspecto que puede incidir en la disminución de la producción forrajera es la biomasa forestal producto de la cosecha forestal, la que a medida que se van descomponiendo, su efecto se acentuaría (Nuberg *et al.*, 2009). Algunos de los aspectos positivos de los árboles hacia las pasturas son la protección frente a variaciones de temperatura y vientos, favoreciendo la sobrevivencia y permanencia del tapiz, mayor disponibilidad de humedad del suelo lo que permite prolongar el periodo de crecimiento, transferencia de nutrientes, entre otros (Polla 2011, Gallo

2006, Fassola *et al.*, 2004, Belsky 1994). El resultado de estas interacciones estará determinando la capacidad de carga animal de las pasturas. Si bien, el sombreado de los árboles puede contribuir al confort térmico del ganado, estos pueden afectar la producción de pasto al seleccionar áreas de pastoreo y contribuir a la compactación del suelo bajo dosel dada la mayor concentración de animales en las zonas de sombra (Paciullo *et al.* 2010, Nilsen *et al.* 2009). Por lo que pueden existir diferentes grados de consumo, de erosión por pisoteo y otros daños físicos y de deposición de orina y heces en distintas áreas del sistema (Rusch y Skarpe, 2009).

A su vez, la elección de un determinado espaciamiento y densidad de los árboles en la plantación influyen en el crecimiento individual de los mismos. Los árboles dispuestos en plantaciones con espaciamiento grande, tienden a crecer más de prisa, presentar mayores diámetros, desarrollar ramas más gruesas, copas más densas y porte más cónico en relación a plantaciones de densidad elevada. Sin embargo, el crecimiento en altura no se altera significativamente por el espaciamiento, existiendo una tendencia a la afectación del crecimiento en altura en las masas excesivamente densas (aumento) o en árboles excesivamente aislados (disminución) (Hawley y Smith, 1985).

Existen numerosos estudios que se centran en comparar el crecimiento en altura, diámetro, área basal y volumen para distintas especies de *Eucalyptus sp.* en diversos espaciamientos y densidades. Bernardo *et al.* (1998) evaluó el crecimiento en diámetro y altura para las especies *Eucalyptus camaldulensis*, *E. urophylla* y *E. pellita* para tres marcos de plantación: 3x1,5 m, 3x3 m and 4x3 m y para tres edades 15, 31 y 41 meses, en la región central de Minas Gerais, Brasil. Algunos de los resultados demuestran que el espaciado tuvo poco efecto sobre el crecimiento en altura para las especies en los periodos evaluados, sin embargo, tuvo efecto en el crecimiento en diámetro a partir de los 41 meses de edad. Los árboles creciendo a un mayor espaciamiento (4x3 m) presentaron una menor competencia y, por lo tanto, fueron los que registraron un crecimiento individual en diámetro superior. Sin embargo, los incrementos de crecimiento en diámetro de los árboles individuales no

son suficientes para compensar el efecto de los niveles de población, siendo los que presentaron más bajos valores en área basal por hectárea. Por lo tanto, los valores más altos de área basal fueron registrados a mayor densidad de árboles plantados (3x1,5 m) en todas las especies a los 41 meses de edad.

Otros autores (Alves *et al.*, 2014), evaluando clones de *E. urophylla* x *E. grandis* en diferentes marcos de plantación (3x1 m; 3x1,5 m; 3x2 m y 3x2,5 m) para el tercer y el sexto año de edad en Avare, San Pablo, encontraron que a un mayor espaciamiento de los árboles el crecimiento en diámetro aumenta. Desde la edad de tres años, las plantas dispuestas a 3x1 m presentaron altura media y DAP inferiores a las otras separaciones, probablemente por la alta competencia por agua, luz y nutrientes. A la edad de seis años, los árboles dispuestos en 3x2,5 m y 3x2 m, tuvieron significativamente mayor crecimiento medio que la separación de 3x1 m, por lo que el valor medio de DAP, tiende a aumentar hacia espaciamientos más amplios por un aumento de la disponibilidad de espacio y de los recursos ambientales. En cuanto a la altura, los árboles de 3x1 m de espaciamiento mostraron el valor promedio mínimo, mientras que las otras separaciones, tendieron a ser mayores y próximos. En cuanto al coeficiente de variación para las variables DAP, altura total y volumen medio para las edades evaluadas, el tratamiento de 3x2,5 m tuvo los menores valores resultando en plantaciones más homogéneas, mientras que el tratamiento de 3x1 m presentó los mayores valores. En relación a la supervivencia a los 6 años de edad, se observó que la unidad de separación de 3x1 m obtuvo menores porcentajes, lo que unido a la tendencia de menor crecimiento en DAP y altura, colabora con la evidencia de que está ocurriendo una mayor competencia entre las plantas por menor superficie de crecimiento.

Oliveira *et al.* (2009), evaluaron la dinámica de crecimiento y productividad de una plantación clonal de *E. camaldulensis* x *E. urophylla* bajo 11 diferentes marcos de plantación en un sistema agroforestal en 4 momentos del ciclo forestal (18, 27, 38 y 51 meses de edad) en Minas de Gerais, Brasil. Los marcos de plantación fueron de filas simples de 3,33x2 m, 3,33x3 m, 5x2 m, 10x2 m, 10x3 m, 10x4 m y filas dobles

de (3x4)+7 m, (3x3)+10 m, (3x4)+10 m, (3x3)+15 m, y filas dobles y simple de (3x4)+7+10 m. Algunos de los resultados señalan que aquellos árboles con mayor área útil por planta (m^2/pl) presentaron mayor crecimiento en diámetro y volumen por árbol, registrándose, además, un crecimiento diferenciado en líneas simples cuando eran comprados con filas dobles. A su vez, la tasa de crecimiento disminuyó a lo largo del tiempo en arreglos más densos, tanto para el DAP como en altura. Sin embargo, a nivel de población, tanto el área basal por hectárea como volumen por hectárea registran mayores valores dado el efecto de una mayor cantidad de árboles por hectárea.

Resultados similares fueron obtenidos por Ranieri *et al.* (2013), evaluando plantaciones clonales de *E. camaldulensis* desarrollados en sistemas de monocultivo y silvopastoril, ambos sobre pasturas de *B. brizantha* en el estado de Minas Gerais, Brasil. El primero refiere a espaciamientos de 3,6x2,5 m y 3,3x3,3 m (1111 y 918 árboles por ha respectivamente), mientras que los segundos con marcos de plantación de filas dobles y callejones siendo de (2x2)+10 m y (3x3)+9 m (833 y 556 árboles por ha respectivamente) y filas simples de 9x3 m (370 árboles por ha). Los resultados revelan que el crecimiento en altura no fue afectado por los marcos de plantación evaluados, sin embargo, no fue así para el crecimiento en diámetro de los árboles que sí se vio afectado por la disposición de los mismos. En este sentido, el arreglo de línea simple 9x3 m alcanzó el mayor diámetro en comparación a los otros marcos. Sin embargo, los rendimientos por hectárea más altos fueron obtenidos con las tres densidades iniciales más altas y con el marco de filas dobles de (2x2)+10 m, aunque con menores diámetros. Dado que estos últimos alcanzaron los mismos rendimientos, se recomienda la utilización de este último arreglo (2x2)+10 m, dado que permitiría una mayor transmisión de luz y producción de pasto bajo dosel para uso ganadero.

Estudios en el suroeste de Australia Occidental (Henskens *et al.*, 2001) evaluaron los efectos del diseño y marco de plantación del componente arbóreo sobre la forma, el crecimiento, la intercepción de luz y superficie fotosintética para plantaciones de *Eucalyptus globulus* de 3 a 4 años de edad. Cuatro marcos de

plantación fueron elegidos: 2x4 m, filas triples (2x4)+10 m, filas individuales de 2x10 m y árboles aislados de 10x10 m. Los resultados señalan que los dos primeros tratamientos registraron árboles con menor diámetro, pero con mayor altura de los árboles dominantes (H_{dom}). A su vez, los árboles aislados tuvieron mayores áreas basales por árbol, siendo los arreglos de 2x4 m y de filas triples (2x4)+10 m los que registraron los menores valores. Por lo tanto, el volumen y el crecimiento global individual de los árboles fueron mayores en configuraciones abiertas, seguidos de los ampliamente espaciados y menores en el diseño más denso. A su vez, el marco de plantación tuvo un claro impacto en la incidencia de ramas gruesas y el diámetro de las ramas. Los árboles en arreglos aislados registraron en su mayoría ramas más pesadas y de mayor diámetro con un mayor ángulo de inserción con respecto a la vertical, mientras que para el marco 2x4 m la tendencia fue opuesta. Así mismo, estos últimos registraron en condiciones de intensidad de luz directa, como es en verano, mayores valores de luz interceptada que en comparación con el diseño de árboles aislados. Por lo tanto, las características evaluadas permiten definir el marco de plantación más adecuado según los objetivos de producción. En este sentido concluyen, que los rendimientos poblacionales de madera bajos pueden ser compensados por el mayor crecimiento de pasturas bajo dosel por una mayor disponibilidad de luz, aumentando los beneficios globales en el sistema.

Ferrere *et al.* (2005), en un ensayo instalado en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, evaluaron el efecto de la densidad inicial (entre 2.083 y 582 plantas/ha) para plantación de *Eucalyptus globulus* sobre variables de crecimiento. Concluyeron que el espaciamiento inicial afecta la productividad entre los tratamientos estudiados durante el ciclo del cultivo forestal. En términos generales, el crecimiento en diámetro aumenta con la disminución de la densidad, sin embargo, las diferencias de crecimiento en altura no fueron tan evidentes.

Otras de las variables en estudio refieren a la estimación de la producción de materia seca del árbol según el espaciamiento de los árboles en la plantación. Leles *et al.* (2001), comparan el crecimiento de *E. camaldulensis* y *E. pellita* a los 52 meses

de edad en el estado de Minas Gerais - Brasil, con marcos de plantación de: 9x9 m, 6x4 m, 3x6 m, 3x5 m, 3x4 m, 3x3 m, 3x2 m, 3x1,5 m, 3x1 m. Algunos de los resultados demuestran que para ambas especies la producción de materia seca del árbol decreció a medida que el espaciamiento entre árboles se vuelve más cerrado, dada una mayor competencia por los factores de crecimiento. A su vez, la mayor proporción de madera en relación a materia seca total siguieron una misma tendencia en relación al espaciamiento, en baja competencia (ej 9x9 m) la distribución es mayor en raíces laterales y ramas más gruesas. La producción de biomasa total por unidad de área fue mayor en espaciamientos más cerrados dada la mayor competencia. En los espaciamientos más amplios las plantas no ocupan aún el área disponible. Sin embargo, cada especie varía en este comportamiento, así como, la distribución de la biomasa en las raíces depende del sitio, sobre todo por las características del suelo. A medida que el espaciamiento es más denso la contribución de las raíces a la materia seca total disminuye. Bernardo *et al.* (1998) obtuvieron resultados similares donde el aumento del espaciamiento de 3x1,5 m a 4x3 m redujo la biomasa total (sobre el suelo más raíces).

Las especies del género *Eucalyptus* se adaptan a una gran variedad de suelos; según Prichett (1986), en general pueden crecer en suelos ácidos con bajo contenido de materia orgánica y baja fertilidad natural. Sin embargo, el desarrollo satisfactorio se produce cuando el suelo presenta al menos 50 cm de suelo sin síntomas de hidromorfismo. Por lo tanto, pueden verse sensiblemente afectados en suelos poco desarrollados y en aquellos con drenaje imperfecto, y por el contrario favorecidos en suelos con buena capacidad de retención de agua, profundos, texturas medias y bien drenados (Brussa 1994 citado por Prieto González 2011). Respecto al *Eucalyptus globulus spp globulus*, se adapta a una gran variedad de suelos con buen drenaje, desde arenas costeras a rocosos de serranías, donde presenta muy buen desarrollo vegetal, siendo las principales limitantes en el Uruguay las de tipo climático: heladas, sequías prolongadas, excesivo calor del verano y temperatura promedio anual (Ravera 2002, Brussa 1994). A su vez, *E. globulus* es altamente susceptible a la enfermedad conocida como mancha foliar por *Teratosphaeria nubilosa*, siendo más

susceptible el follaje en estado juvenil, pudiendo generar pérdidas de área foliar superiores al 80% (Balmelli, 2014).

1.1.2 Producción de forraje en diferentes marcos de plantación

Trabajos realizados en Uruguay, han estado orientados a estudios acerca del crecimiento y calidad de las pasturas bajo plantaciones de *Eucalyptus globulus*. Según Neme y Terzieff (2002), evaluando la productividad de pasturas naturales bajo plantaciones de *E. globulus* entre 1 a 4 años de edad y marco de plantación de 3 a 4x2 m sobre grupo de suelos CONEAT 2 en Cerro Colorado-Florida, concluyen que el componente arbóreo sobre la pastura no determinó una disminución en la producción de materia seca con respecto al promedio encontrado para la zona. Además, concluyen que el tapiz evaluado creciendo bajo plantaciones de *E. globulus* entre 1 a 4 años de edad, pastoreado por novillos de sobreaño para invernada, fue capaz de soportar una carga animal similar a la de campo natural (0,6 UG/ha). Otras investigaciones (Almada y Garat, 2010) señalan que la productividad de diferentes leguminosas forrajeras (*Trifolium sp*, *Lotus sp*) bajo la sombra de *E. globulus* sobre grupo de suelos CONEAT 4.2, no presentaron diferencias significativas entre las mismas en plantaciones de 5 años de edad con un marco de plantación de 4x1,8 m instalado en Canelones (Paraje Piedras de Afilas). Según Gómez y Guerrin (2011), al evaluar el crecimiento de cuatro especies de gramíneas forrajes (*Lolium multiflorum*, *Festuca arundinacea*, *Dactylis glomerata*, *Bromus catharticus*) sembradas en un monte de *E. globulus* de año y medio de edad y con un marco de plantación de 4x1,8 m sobre grupo de suelos COENAT 4.2 en Canelones, destacan el buen comportamiento productivo que tuvo *Dactylis* (1.552 kg de MS/ha) en comparación con *Festuca* (1.523 kg de MS/ha), al igual que *Lolium* (1.795 kg de MS/ha) en relación a *Bromus* (1.238 kg de MS/ha); si bien no se pudo realizar análisis estadísticos.

Es de especial interés para esta tesis la Unidad de Polanco en la cual se sitúan los estudios de caso; al respecto en esta Unidad se hicieron estudios en el

departamento de Treinta y Tres, cuyos suelos son de baja capacidad de acumulación de agua, bajos en contenido de materia orgánica, pH ligeramente ácido y muy bajos contenidos de fósforo. Se encontró que dicha Unidad se caracteriza por una baja producción anual (rendimiento promedio 1394 kg de MS/ha) con una estacionalidad de producción forrajera muy marcada, con déficit invernal muy importante y predominio de especies estivales, siendo los picos de producción en verano y primavera, muy influenciados por la ocurrencia de precipitaciones (Mas *et al.*, 1997).

Según Carámbula (1991), las pasturas naturales del Uruguay presentan una composición botánica con predominancia de gramíneas y en general ausencia parcial de leguminosas dado fundamentalmente por el bajo contenido de fósforo en los suelos. Según Altesor *et al.* (2011) realizando relevamientos de cobertura herbácea en las principales unidades de suelos que componen la región Sierras del este, en las cuales se encuentra la Unidad Sierra de Polanco, encontraron que las familias más numerosas fueron Poaceae y Asteraceae, siendo algunas de las especies más frecuentes *Piptochaetium montevidense*, *Richardia humistrara*, *Dichondra serícea* y *Paspalum notatum*.

Las pasturas naturales del país sobre la Unidad Sierra del Polanco presentan una marcada estacionalidad donde, durante el invierno la oferta en cantidad y calidad de forraje constituye la principal limitante en la producción animal, mientras que las mayores tasas de crecimiento ocurren en los meses de verano por una predominancia de especies estivales, pudiendo variar por las condiciones climáticas particulares de cada año, fundamentalmente las precipitaciones. (Ayala *et al.*, 1993) (Figura 2 y Figura 3).

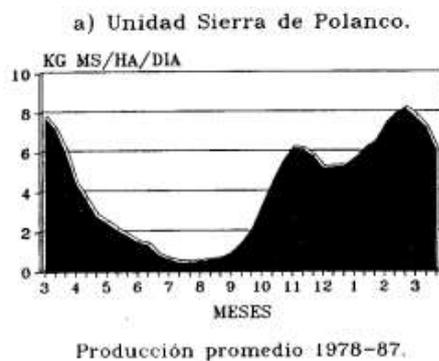


Figura 2. Curva de crecimiento promedio de materia seca en kg/ha/día período 1976 – 87 de tapices naturales para Unidad Sierra de Polanco. Fuente: Ayala *et al.*, 1993.

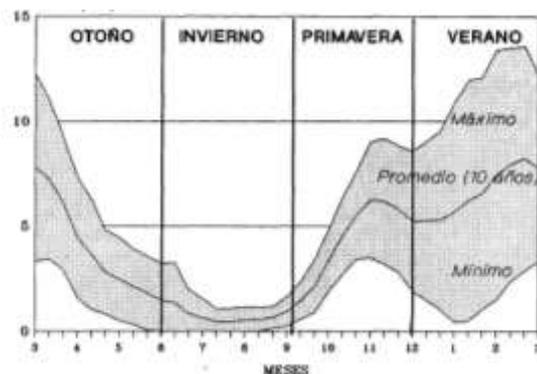


Figura 3. Rango de variación en el crecimiento estacional de una pastura natural sobre Unidad Sierra de Polanco (kg/ha de MS por día). Fuente: Ayala *et al.*, 1993.

Según De Souza (1985) la producción estacional de materia seca en kg/ha por día de forraje en campo natural para aquellos grupos de suelos cuyo material geológico es de origen Cristalino, presenta una producción de $7,2\pm 3,9$, $13,2\pm 11,0$, $6,6\pm 4,9$ y $15,6\pm 12,3$ kg/ha de MS por día para las estaciones de verano, otoño, invierno, primavera respectivamente. Rendimientos anuales de pasturas naturales reportados por Carámbula (1978) para Colinas del Este, señalan una producción de 2 ton/ha/año de materia seca.

En términos de calidad, los contenidos de proteína cruda (PC, % base MS) registrados para pasturas naturales sobre grupos de suelos cuyo material geológico de

origen es el Cristalino, presentó valores de $10,2\pm 3,4$, $14,0\pm 7,7$, $8,1\pm 1,2$, $8,4\pm 1,1$ % para las estaciones de otoño, invierno, primavera y verano respectivamente; siendo los valores más bajos en la primavera y verano, incrementos hacia el otoño y máximo en invierno (De Souza, 1985).

1.1.3 Efecto del sombreado sobre la producción forrajera

En sistemas silvopastoriles de la región de Minas Gerais, Brasil, bajo un marco de plantación de $3\times 3+30$ m, alternando en cada fila con especies de *Eucalyptus grandis* y *Acacia sp* se evaluó el efecto del sombreado sobre la producción de biomasa área y radicular de *Brachiaria decumbens* bajo dosel, a 6 m y 12 m de distancia de la línea de plantación (Paciullo *et al.*, 2010). El área estuvo bajo pastoreo con vaquillonas Cebú (peso vivo inicial de 250 kg), alternando el pastoreo y períodos de descanso de cinco y 45 días, respectivamente. La carga varió según la estación seca y lluviosa, siendo la misma de entre 0,8 y 1,6 unidad animal por ha, respectivamente. Algunos de los resultados obtenidos fueron que la intensidad de sombreado disminuyó con la distancia desde la fila de árboles, siendo mayor bajo dosel (60%) y menor a los 12m de distancia (16%). Estas diferencias en el sombreado determinaron que la masa verde, el material muerto y la materia seca total (variables relacionadas con la parte área de la planta) fueran menores bajo dosel, mientras que la masa verde fue mayor y similar en los 12 y 6 m de distancia. A su vez, se observó una mayor proporción tallo/raíz de *B. decumbens* a la sombra lo que se traduce en un cambio en el patrón de distribución de la biomasa en forraje, priorizando la formación parte área a expensas del sistema radicular.

Otras investigaciones en Brasil (Paciullo *et al.*, 2011) donde fueron evaluados los efectos de los árboles en un sistema agrosilvopastoril, sobre el rendimiento y características nutricionales de *Urochloa decumbens* bajo dosel y a 3, 6, 9, 12 y 15 m de distancia desde la fila de plantación, de forma de identificar la distancia media en la que hay un mejor uso de las sombras. Concluyen que la densidad de tallos, la masa forrajera y la velocidad de la acumulación de forraje se incrementaron a mayores

distancias de los árboles, destacando la importancia de estas evaluaciones para la planificación de los sistemas agroforestales de forma de obtener el máximo beneficio de la inclusión de especies de árboles sobre las pasturas.

Mediciones preliminares de radiación bajo dosel y a 3 m de distancia de la fila de plantación, en un sistema silvopastoril de 3 años de edad para *E. globulus* bajo las mismas condiciones de suelo, registraron un valor promedio de radiación menor de 24,5% con respecto a la radiación máxima en la mitad de la entrefila (Comunicación Personal Carolina Munka, 20 de marzo de 2019). Sin embargo, los porcentajes de sombreado podrán afectar el crecimiento y producción de forraje dependiendo de la tolerancia al sombreado de las especies forrajeras que conforman el tapiz herbáceo.

Silveira (2015) encontró que las especies desarrolladas en ambientes de sotobosque más sombreados presentaron menor relación C4/C3, mientras que ambientes más iluminados presentaron mayores valores de riqueza y diversidad de especies en relación a ambientes más sombreados. Se encontró mayor diversidad de especies en el sotobosque para *E. globulus* con orientación de las hileras de los árboles N-S explicado por las características dasométricas que generan un ambiente que no afecta la misma.

Otras investigaciones han estado enfocadas al manejo y efecto de la sombra y abrigo sobre el bienestar animal y la ganancia de peso del ganado en plantaciones forestales (Callero 2008, Simeone, s.f.), concluyendo el efecto positivo de éste servicio en la producción de carne. Se registró una ganancia de peso mayor en un lote de vaquillonas con acceso a sombra en comparación a aquellas sin sombra (0,772 vs. 0,514 kg/día) en el litoral Oeste (Simeone *et al.*, 2010). Sin embargo, esta información sobre el manejo integrado de la producción ganadera-forestal en términos productivos refiere a resultados en áreas donde no se foresta (bajos y cortafuego). Según Atangana *et al.* (2014), los sistemas silvopastoriles mejoran indirectamente el bienestar y la productividad del ganado dada la protección que ofrecen las copas de los árboles en sombra y resguardo contra el viento.

1.1.4 Efecto en el retorno económico

Los valores de retorno económico varían con la densidad, la especie y el destino comercial de la madera. Según Lacorte *et al.* (2016) comparando el retorno de plantaciones con el único objetivo de producción de madera con plantaciones que integran ganadería y forestación, tuvieron un Retorno Anual de 170 US\$/ha/año y 162 US\$/ha/año respectivamente, a su vez la tasa interna de retorno (TIR) es mayor en plantaciones con ganadería (34%) que en los sistemas puros (26%). Cubbage *et al.* (2012) destaca que los sistemas integrados son sistemas de baja utilización de insumos si se evalúa todo el ciclo; encontrándose que la TIR puede obtenerse entre 7-12 % real sin considerar el costo de la tierra (Cubbage *et al.*, 2014).

1.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS DEL TRABAJO

1.2.1 Objetivo general

Este trabajo tuvo como objetivo general evaluar el efecto del marco de plantación sobre el rendimiento forestal y forrajero en dos sistemas forestales con *Eucalyptus globulus*.

1.2.2 Objetivos específicos

Evaluar la producción de madera y forraje en sistema de producción convencional y sistema silvopastoril con filas dobles y callejones a diferentes edades del cultivo forestal.

Cuantificar los resultados económico-financieros de los sistemas a turno final.

1.2.3 Hipótesis

Las hipótesis de la presente investigación son:

- 1) La producción de madera en el sistema de producción convencional es similar al sistema silvopastoril con filas dobles y callejones;
- 2) La producción de pasturas es menor en el sistema convencional en comparación al sistema silvopastoril con filas dobles y callejones;
- 3) El sistema silvopastoril con filas dobles y callejones representa un mayor retorno económico que el sistema de producción convencional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

Los estudios de caso correspondieron a plantaciones comerciales de *E. globulus* ubicadas en el Establecimiento “El Porá” pertenecientes a la empresa forestal Redalco en la zona Este del país, en el departamento de Rocha (Uruguay), a unos 25 km al este de la ciudad de Velázquez por Ruta N° 13 (34°03'28,82" S y 54°05'1,76" W) (Figura 4).



Figura 4. Ubicación del predio “El Porá”

El estudio se desarrolló en el Potrero La Rinconada, sobre una superficie efectiva de plantación de 112 ha de *E. globulus* (origen Jeeralang) plantados en la primavera del año 2011. El grupo de suelo predominante en la zona es CONEAT 2 (2.12 en su mayoría). Los suelos se desarrollan sobre Basamento cristalino, con

texturas en general arenoso francos graviliosos, con bajos porcentajes de afloramientos rocosos (5%), superficiales a moderadamente profundos y bien drenados. Las pendientes varían entre 5 y 15% conteniendo zonas de interfluvio (parte alta), laderas medias y bajas, principalmente próximo a las vías de escurrimiento. La altitud oscila entre los 60 a 100 m sobre el nivel del mar. Las Unidades de Suelo correspondientes al predio son: José Pedro Varela y Sierra de Polanco (mayoritariamente) (MGAP, 1976). Las zonas bajas del terreno en general presentan hidromorfismo dado su estado permanente o temporal de saturación de agua, que, a su vez, recibe el agua de las laderas medias e interfluvios. El estrato medio presenta un relieve de laderas medias ente cotas de 70 y 90 m.s.n.m., con laderas convexas en rango de pendientes fuertes, y por lo tanto predomina el fenómeno de erosión hídrica natural lo que resulta en suelos más superficiales. Estas fuertes pendientes y texturas medias y livianas inciden en que no haya problemas de mal drenaje. En el estrato alto el interfluvio tiene recubrimientos de escaso espesor de lodolita y una mayor profundidad del suelo. En todos los sitios estudiados prevalece un pH ácido (en torno al 5). En algunos perfiles edáficos a mayor profundidad aumenta el pH, asociándose a la incidencia de agua subterránea. Los suelos contienen muy bajos valores de fósforo (entre 2 y 3 ppm) a excepción de un sitio donde el contenido fue de 19 ppm. El contenido de materia orgánica es entre moderadamente rico a muy rico, superiores a 4%, con máximos de 5,8% y mínimos de 4,2%.

La empresa de capitales chilenos posee un patrimonio de aproximadamente 11.000 ha, de las cuales 7.400 ha corresponde a la superficie efectiva cultivada con el género *Eucalyptus*, de las cuales alrededor de 300 ha efectivas tienen un arreglo espacial del componente arbóreo diferente al convencional con callejones.

La precipitación media anual para la región está entre 1200 y 1300 mm (Castaño *et al.*, 2011). Las precipitaciones anuales registradas a nivel predial fueron de 1371 mm y 1592 mm para el año 2015 y 2016 respectivamente, lo que implicó un incremento del orden del 14%. Si se compara con los registros pluviométricos para la

región de Rocha por estación entre el año 2015 y 2017 (INUMET, 2017), el verano del año 2015 registró lluvias superiores, siendo de 398 y 268 mm respectivamente. Esto es similar para las estaciones de invierno y primavera del mismo año, donde las precipitaciones superan a los registros de la región (invierno 2015: 560 mm y región de 317 mm; primavera 2015: 311 mm y región de 287 mm). Para el mismo año, la única estación que registró una precipitación acumulada menor al reportado para la región fue el otoño, con 132 mm y 251 mm respectivamente. Para el año 2016, el máximo de lluvias se registró en la estación de otoño (701 mm) lo que superó ampliamente al acumulado regional (251 mm) y el mínimo en la estación estival (155 mm) lo que comparado con los registros de la zona estuvo por debajo de lo registrado (268 mm). Para el mismo año, los registros para el invierno y primavera fueron de 389 y 340 mm respectivamente, lo que implicó un incremento respecto al registro local estacional (317 mm y 287 mm respectivamente). Las precipitaciones acumuladas para el verano y otoño 2017 son muy similares a las registradas para la zona (262 mm y 268 mm para el verano respectivamente; y 254 mm y 251 mm para el otoño respectivamente) (Figura 5).

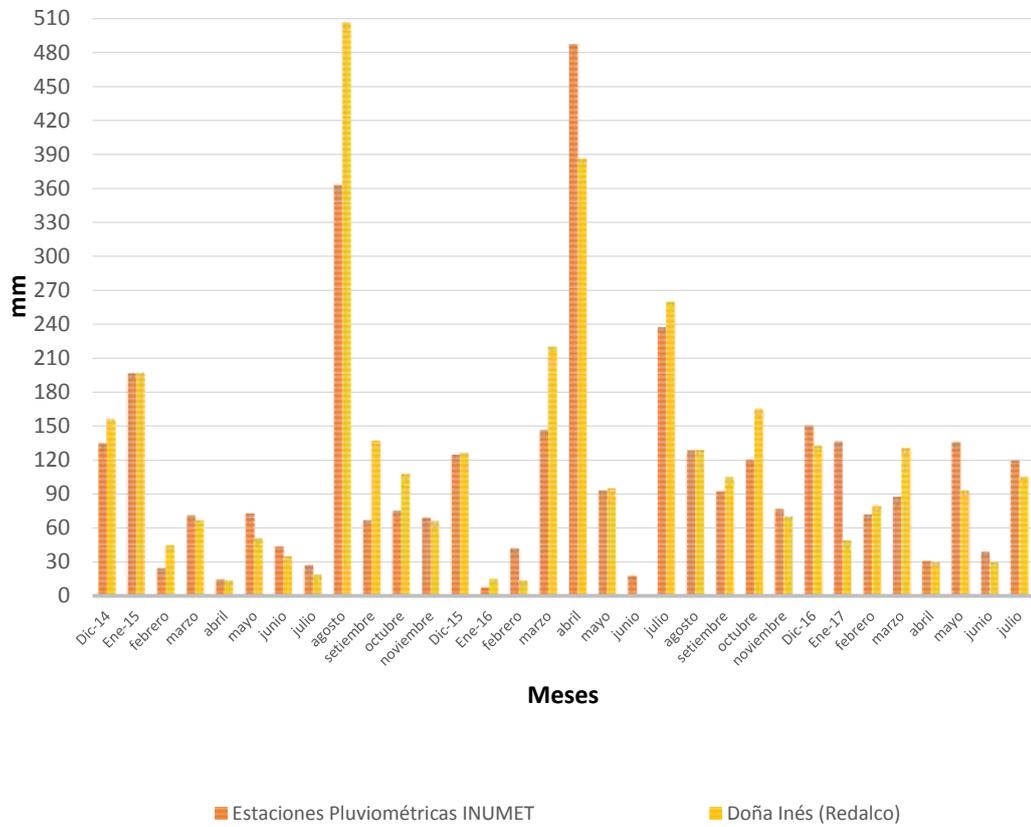


Figura 5. Evolución de las precipitaciones mensuales para el período diciembre 2014 a julio 2017 según registros de INUMET y de la empresa.

Para la zona la temperatura media anual es de 16,8 °C, con una máxima media anual entre 21 y 22 °C, siendo el mes de enero el más cálido y la mínima media anual entre 12 y 13 °C siendo julio el mes más frío (Castaño *et al.*, 2011).

El área experimental se dividió en tres zonas: sistema de producción convencional con mejoramiento con *Holcus lanatus* (22,7 ha), sistema de producción convencional sin mejoramiento forrajero (3,6 ha) y sistema silvopastoril con callejones y filas dobles sin mejoramiento (85,93 ha) (Figura 6).

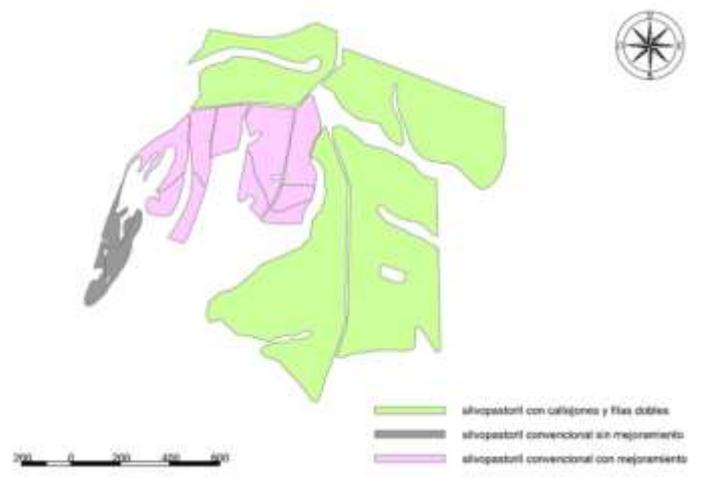


Figura 6. Potrero “La Rinconada” y rodales por sistema

A los efectos de la investigación se definieron los sistemas a evaluar según el marco de plantación y densidad inicial del componente arbóreo, diferenciándose en sistemas de producción convencional (*SPC*) y sistema silvopastoril con filas dobles y callejones (*SSFC*).

El sistema de producción convencional (*SPC*) y sistema silvopastoril con filas dobles y callejones (*SSFC*) difieren en el marco de plantación y densidad inicial. Para el primer caso, el marco de plantación corresponde a una distancia entre filas y de los árboles dentro de la fila de 3,5 m y 2,27 m respectivamente, lo que equivale a una densidad inicial de 1.258 arb/ha. Para el segundo arreglo, el marco de plantación

corresponde a filas dobles separadas por callejones de 8 m, cuya distancia entre filas y dentro de las filas es de 2 m por 2 m, lo que se traduce a una densidad inicial de 1.000 arb/ha.

Por lo tanto, a los efectos de la investigación se definieron dos casos a evaluar en producción de madera: sistema de producción convencional (*SPC* - 26,3 ha) y sistema silvopastoril con filas dobles y callejones (*SSFC* - 85,93 ha) (Figura 7). Mientras que para evaluar la producción de pasturas bajo dosel no se incluye el sistema de producción convencional con mejoramiento con *Holcus sp.*, estableciéndose dos casos de análisis para *SSFC* y *SPC* sin mejoramiento forrajero.



Figura 7. Sistemas productivos en evaluación, a la izquierda *SPC* y a la derecha *SSFC*

Los turnos de corta son de aproximadamente 12 años, siendo el destino industrial el chipeado de la madera. En el componente ganadero, la especialización es la recría e invernada. En términos generales, la entrada al sistema son novillos de

1 a 2 años con aprox. 240 kg permaneciendo de 2 a 3 años hasta lograr un peso final de 480-490 kg (Novillos de más de 3 años), con un sistema de pastoreo rotativo. La empresa cuenta con el registro por establecimiento de categorías, Unidades Ganaderas y número de cabezas de forma mensual, mientras que el pesaje se realiza una vez al año.

2.2 MANEJO DEL COMPONENTE FORESTAL

Las actividades previas a la plantación fueron la aplicación en primavera de glifosato total (en toda la superficie afectada por el cultivo) (promedio 3-5 l/ha) y control de hormigas sistemático previo al laboreo. El laboreo se realizó sólo en faja de plantación por medio de subsolado a 80 cm, excéntrica y disquera. La fecha de fertilización fue el 26 de agosto del año 2011 utilizando 7-40 como fertilizante a razón de 100 gr/planta para *SPC* y *SSFC*. La fecha de plantación fue el 25 de octubre del año 2011.

Las actividades postplantación fueron la aplicación de glifosato entre fila en otoño (promedio 3-5 l/ha) y aplicación de herbicida pre-emergente sobre fila plantada (promedio 4 l/ha). A su vez, hubo una aplicación de glifosato en toda el área afectada por el cultivo a los 2 años y medio de edad, época de aplicación en otoño 2014 (zonas con gramilla) y por *Mycospharella*.

2.3 METODOLOGÍA

2.3.1 Componente Forestal

Para el componente forestal se establecieron parcelas de monitoreo de crecimiento y rendimiento, realizándose 5 mediciones de cada árbol en la parcela, a diferentes edades del cultivo: 36 meses de edad (medición setiembre año 2014), 41 meses de edad (medición febrero año 2015), 45 meses de edad (medición junio año 2015), 51 meses de edad (medición febrero año 2016) y 68 meses de edad (medición junio 2017). Se cuantificaron variables clásicas de mensura forestal: diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (H) y sobrevivencia (S). Mediante estos datos se calcularon variables poblacionales: Densidad (N, arb/ha), Altura Media de los árboles dominantes (Hdom), Sobrevivencia (%), Área Basal (G, m²/ha) y Volumen con coretza (V, m³/ha cc). El Volumen por árbol individual total (con coretza) se calculó en base a la siguiente fórmula para *E. globulus ssp. globulus* (Moras y Vallejos-Barra, 2013):

$$[\ln (\text{Volumen total cc}) = -9,75 + 0,93 \times \ln (\text{DAP}^2 \times h \text{ total}) + \varepsilon$$

Ecuación [1]

Para el cálculo de la Hdom se realizó el promedio por parcela estimándose los mismos con la altura de los 4 árboles más altos en cada parcela.

A priori, se estableció la necesidad de estratificar la población a evaluar según la altitud en el terreno (metros sobre nivel del mar), dado que es un factor que puede interferir en las variables forestales a estudio, estableciéndose 3 estratos: menor a 70 m, entre 70 a 90 m y mayor a 90 m. Los estratos fueron diseñados con el apoyo de imágenes google earth y mapas disponibles en formato shapefile, estas referidas a las cotas de terreno. Con esto se buscó contrarrestar la varianza dentro de cada estrato a los efectos de realizar un tamaño de muestra menor (Sorrentino, 1997).

Se trabajó con un nivel de precisión o error de muestreo admisible entre el 5 y 10%. En relación al tamaño y forma de las parcelas permanentes, se estableció una forma rectangular de aprox. 216 y 400 m² variando según el sistema evaluado. Según Sorrentino (1997) el número de individuos a medir dentro de una parcela debe estar entre los 20 a 30 árboles, valores que se consideraron para el presente trabajo.

El diseño correspondió a un muestreo aleatorio estratificado, donde se establecieron parcelas al azar en cada estrato con igual número de repeticiones en cada sistema y por estrato.

Para el caso de los *SSFC* se establecieron 15 parcelas rectangulares de monitoreo, cuya orientación de las filas mayoritariamente es N-S, y en algunos casos NE-SO. Para el *SPC* se establecieron otras 15 parcelas rectangulares de monitoreo, cuya orientación de las filas mayoritariamente es N-S, y en algunos casos NE-SE y E-O (Cuadro 1).

Cuadro 1. Resumen por Sistema y estrato de la cantidad de parcelas

Sistemas	Estratos	Número de parcelas
<i>SSFC</i>	< 70 m	3
	70 – 90 m	7
	> 90 m	5
<i>SSC</i>	< 70 m	3
	70 – 90 m	7
	> 90 m	5

2.3.2 Componente Pasturas

Según Klingman et al. (1943), las jaulas son un método utilizado para medir producción de pasturas herbáceas. Respecto al número de jaulas propone que estén duplicadas para estimar producción, esto significa la colocación de jaulas duplicadas cercanas, pero los pares bien distribuidos sobre la parcela, lo que fue tenido en cuenta en el presente trabajo.

Según Mendoza y Lascano (1986) los métodos para estimar producción de biomasa herbácea se pueden dividir en destructivos y no destructivos, en nuestro caso el método utilizado fue el destructivo donde se midió la producción de forraje por medio de cortes manuales y/o mecánicos. A su vez, según Sala y Austin (2000) la producción sobre el suelo esta usualmente relacionada con la estación de crecimiento por la disponibilidad de agua, luz, etc., la cual resulta en un patrón estacional de la biomasa con varios picos y bajos, por lo que, el número de muestras está determinado por la variabilidad espacial, la variación temporal y la frecuencia de muestreo, el presupuesto disponible y/o el error aceptado.

Para el componente pastoril se analizó según marco de plantación arbóreo: *SPC* y *SSFC* ambos sin mejoramiento forrajero bajo dosel (campo natural). Se realizó la identificación de las principales especies que conforman el tapiz herbáceo y se cuantificó la producción de forraje en kilos de materia seca por hectárea por estación (kg/ha de MS por estación) bajo dosel en zonas sin mejoramiento forrajero, mediante el método de jaulas de exclusión móviles aparedadas de 1 m² de superficie. Se construyeron pirámides de hierro de 1 m por 1 m de base, cubiertas por alambre para evitar el pastoreo de animales en el área de muestreo. La superficie efectiva de corte fue de 0,4 m² dentro de las jaulas (4 rectángulos de 0,2 m x 0,5 m dispuestos de forma paralela a la base de la jaula), con una altura de corte a partir de los 1,5 cm desde el suelo y frecuencia de corte entre 45 a 90 días que representan diferentes estaciones del año. Sobre las parcelas de muestreo forestal se instalaron las jaulas buscando que sean sitios representativos en cuanto a composición florística. Luego

de cada corte de forraje las jaulas eran reubicadas dentro de la parcela con previa limpieza del área. En febrero del año 2015 se instalaron un total de 24 jaulas, 12 por cada sistema, dentro de los cuales la mitad fueron instaladas en los estratos menores a los 70 m.s.n.m (Estrato 1) y la otra mitad entre los 70-90 m.s.n.m (Estrato 2). A su vez, dentro de cada sistema y estrato se instalaron jaulas testigo en áreas sin cultivo. Las parcelas donde fueron instaladas tienen en su mayoría una orientación de filas de plantación de N-S. Se realizaron en total 12 cortes para el periodo 2015-2017, siendo los cortes realizados durante 2015 (abril, junio, julio, setiembre, octubre, diciembre), durante 2016 (febrero, mayo, agosto, octubre) y durante 2017 (febrero, mayo) (Cuadro 2 y Figura 8)



Figura 8. Jaula para exclusión de ganado

Cuadro 2. Momentos de corte.

Tiempo 0	Tiempo de corte
20-22 de febrero 2015	18 de abril
18 de abril	5 de junio
5 de junio	18 de julio
18 de julio	19 de setiembre
19 de setiembre	24 de octubre
24 de octubre	11 de diciembre
11 de diciembre	21 de febrero 2016
21 de febrero 2016	20 de Mayo
20 de Mayo	24 de agosto
24 de agosto	29 de octubre
29 de octubre	2 de febrero
2 de febrero 2017	11 de mayo

Dado que las fechas de corte no correspondían con las fechas de comienzo de cada estación, se estimó la producción de materia seca teniendo en cuenta la evolución de la misma entre las fechas de corte a campo y prorrateando por el desfase en días entre las fechas de corte y comienzo de estaciones.

Las muestras obtenidas fueron procesadas en laboratorio, en estufa de aire forzado en dos etapas: en una primera fase se secó a 60 °C durante 48 horas; luego a 105 °C, sobre la que se determinó porcentaje de Materia Seca (AOAC International 1990). Los valores de Proteína Cruda (PC) se obtuvieron por el procedimiento Kjeldahl (Horwitz y Latimer 2007) y los de Fibra Detergente Ácida (FDA) por procedimiento Ankom (AnkomTechnology 2015) de forma secuencial, a partir de una submuestra secada a 60 °C y posteriormente corregida a 105 °C.

En todos los cortes se realizó el análisis de una muestra por jaula de Proteína Cruda (% PC) y Fibra detergente Ácida (% FDA) corregida por cenizas (FDAmo) en el laboratorio de nutrición animal de la Facultad de Agronomía. La FDA se basa en la digestibilidad del material vegetal presente en la comida de los animales, y la PC en la cantidad de proteínas que este contiene.

Cuadro 3. Distribución de jaulas de exclusión según sistema y estratos.

Estrato	Sistema	Cantidad de parcelas con jaula	Cantidad de Jaulas por parcela (repeticiones)	Total de jaulas instaladas por sistema y estrato	Cantidad de Jaulas testigo (sin efecto de cultivo)
1	<i>SSFC</i>	2	2	4	2
	<i>SPC</i>	2	2	4	2
2	<i>SSFC</i>	2	2	4	2
	<i>SPC</i>	2	2	4	2
Total				16	8

2.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

2.4.1 Comparación de los marcos de plantación a nivel del resultado de árbol individual

Para evaluar el efecto del marco de plantación y de los estratos sobre las variables DAP, H, G y V individual con corteza durante el periodo de estudio se ajustaron modelos lineales de medidas repetidas en el tiempo, donde el modelo de correlación fue autoregresivo de orden 1 (AR(1)). El modelo tuvo la siguiente forma:

$$Y_{ijklm} = \mu + S_i + E_j + (SE)_{ij} + \varepsilon_{ijk} + M_l + (MS)_{il} + (ME)_{jl} + (MES)_{ijl} + \delta_{ijklm}$$

Ecuación [2]

Siendo:

Y_{ijklm} = variable de respuesta (DAP, H, G o V individual)

$\varepsilon_{ijk} \sim \text{iid } N(0; \sigma^2 \varepsilon)$

$\delta_{ijklm} \sim N(0; \sigma^2 \delta)$, errores no independientes (correlacionados) a lo largo del tiempo

Dónde:

μ = media general

S_i = Efecto del i-ésimo sistema

E_j = Efecto del j-ésimo estrato

M_l = Efecto del l-ésimo mes

“k” es el subíndice correspondiente a las parcelas, y “m” es el subíndice correspondiente al árbol dentro de la parcela

$(SE)_{ij}$ = interacción entre el i-ésimo sistema y el j-ésimo estrato

$(MS)_{il}$ = interacción entre el l-ésimo mes y el i-ésimo sistema

$(ME)_{jl}$ = interacción entre el l-ésimo mes y el j-ésimo estrato

$(MES)_{ijl}$ = interacción entre el l-ésimo mes, el i-ésimo sistema y el j-ésimo estrato

ε_{ijk} = error experimental (entre parcelas)

δ_{ijklm} = error entre árboles dentro de cada parcela y entre mediciones

Para el mes 36 se ajustó el siguiente modelo reducido, dado que no se contaba con datos para el Estrato 1.

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + E_j + (SE)_{ij} + \varepsilon_{ijk} + \delta_{ijkl}$$

Ecuación [3]

Y_{ijkl} = variable de respuesta (DAP, H, G, V individual cc) para los 36 meses de edad

$$\varepsilon_{ijk} \sim \text{id N}(0; \sigma^2 \varepsilon)$$

$$\delta_{ijk} \sim \text{iidN}(0; \sigma^2 \delta)$$

Dónde:

μ = media general

S_i = Efecto del i-ésimo sistema

E_j = Efecto del j-ésimo estrato

“k” es el subíndice correspondiente a las parcelas y “l” es el subíndice correspondiente a los árboles dentro de las parcelas

$(SE)_{ij}$ = interacción entre el i-ésimo sistema y el j-ésimo estrato

ε_{ijk} = error experimental (entre parcelas)

δ_{ijkl} = error entre árboles dentro de cada parcela

2.4.2 Comparación de los marcos de plantación a nivel del resultado por unidad de superficie

Para estudiar el efecto del marco de plantación y de los estratos sobre las variables Volumen con corteza (V, m³/ha cc) y área basal (G, m²/ha), se ajustó un modelo lineal de medidas repetidas en el tiempo, donde el modelo de correlación fue autoregresivo de orden 1 (AR(1)). El modelo tuvo la siguiente forma:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + E_j + (SE)_{ij} + \varepsilon_{ijk} + M_l + (MS)_{il} + (ME)_{jl} + (MES)_{ijl} + \delta_{ijkl}$$

Ecuación [4]

Siendo:

Y_{ijkl} = variable de respuesta (área basal (G, m²/ha) o Volumen cc (V, m³/ha))

$\varepsilon_{ijk} \sim \text{iid } N(0; \sigma^2 \varepsilon)$

$\delta_{ijkl} \sim N(0; \sigma^2 \delta)$, errores no independientes a través del tiempo

Dónde:

μ = media general

S_i = Efecto del i-ésimo sistema

E_j = Efecto del j-ésimo estrato

M_l = Efecto del l-ésimo mes

“k” es el subíndice correspondiente a las parcelas

(SE)_{ij} = interacción entre el i-ésimo sistema y el j-ésimo estrato

(MS)_{il} = interacción entre el i-ésimo sistema y el l-ésimo mes

(ME)_{jl} = interacción entre el l-ésimo mes y el j-ésimo estrato

(MES)_{ijl} = interacción entre el l-ésimo mes, el i-ésimo sistema y el j-ésimo estrato

ε_{ijk} = error experimental (entre parcelas)

δ_{ijkl} = error entre mediciones

Para el mes 36 se ajustó el siguiente modelo reducido, dado que no se contaba con datos para el Estrato 1.

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + E_j + (SE)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Ecuación [5]

Siendo:

Y_{ijk} = variable de respuesta (Volumen cc (V, m³/ha), área basal (G, m²/ha)) a los 36 meses de edad

$\varepsilon_{ijk} \sim \text{iid } N(0; \sigma^2 \varepsilon)$

Dónde:

μ = media general

S_i = Efecto del i-ésimo sistema

E_j = Efecto del j-ésimo estrato

“k” es el subíndice correspondiente a las parcelas

(SE)_{ij} = interacción entre el i-ésimo sistema y el j-ésimo estrato

ε_{ijk} = error experimental (entre parcelas)

2.4.3 Sobrevivencia

Para la variable sobrevivencia se ajustó un modelo lineal generalizado asumiendo que el número de árboles vivos en relación al número de árboles plantados tiene distribución binomial. El modelo estadístico tuvo la siguiente forma:

$$\text{Ln} \left(\frac{P_{ij}}{1 - P_{ij}} \right) = \beta_0 + S_i + E_j + (\text{SE})_{ij}$$

Ecuación [6]

Dónde:

$\text{Ln} \left(\frac{P_{ij}}{1 - P_{ij}} \right)$ = Logit de la Probabilidad de sobrevivencia

β_0 = intercepto

S_i = Efecto del i-ésimo sistema

E_j = Efecto del j-ésimo estrato

(SE)_{ij} = interacción entre el i-ésimo sistema y el j-ésimo estrato

Para comparar las medias de los efectos significativos de todas las variables dasométricas evaluadas se usó la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%.

2.4.4 Comparación de los marcos de plantación a nivel de la producción de forraje

Para la variable producción de forraje (kg/ha/estación de materia seca), se ajustó un modelo lineal de medidas repetidas en el tiempo, donde el modelo de correlación fue autoregresivo de orden 1 (AR(1)). Para el análisis de varianza se utilizó un nivel de significancia del 5%. El modelo tuvo la siguiente forma:

$$Y_{ijklm} = \mu + S_i + E_j + (SE)_{ij} + \varepsilon_{ijk} + M_l + (MS)_{il} + (ME)_{jl} + (MES)_{ijl} + \delta_{ijklm}$$

Ecuación [7]

Dónde:

Y_{ijklm} = variable de respuesta (kg/ha/estación de materia seca)

$\varepsilon_{ijk} \sim \text{iid } N(0; \sigma^2 \varepsilon)$

$\delta_{ijklm} \sim N(0; \sigma^2 \delta)$, errores no independientes a través del tiempo

Dónde:

μ = media general

S_i = Efecto del i-ésimo sistema

E_j = Efecto del j-ésimo estrato

M_l = Efecto de la l-ésimo estación

“k” es el subíndice correspondiente a las parcelas y “l” es el subíndice correspondiente a las jaulas dentro de las parcelas

$(SE)_{ij}$ = interacción entre el i-ésimo sistema y el j-ésimo estrato

$(MS)_{il}$ = interacción entre la l-ésimo estación y el i-ésimo sistema

$(ME)_{jl}$ = interacción entre la l-ésimo estación y el j-ésimo estrato

$(MES)_{ijl}$ = interacción entre la l-ésimo estación, el i-ésimo sistema y el j-ésimo estrato

ε_{ijk} = error experimental (entre parcelas)

δ_{ijklm} = error entre jaulas dentro de cada parcela y entre mediciones

Para las variables PC y FDA se ajustó un modelo lineal con la siguiente forma:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + E_j + \varepsilon_{ijk} + \delta_{ijkl}$$

Ecuación [8]

Dónde:

Y_{ijkl} = variable de respuesta (% PC y %FDA) en cada corte.

$\varepsilon_{ijk} \sim \text{iid N}(0; \sigma^2 \varepsilon)$

$\delta_{ijklm} \sim \text{iidN}(0; \sigma^2 \delta)$

Dónde:

μ = media general

S_i = Efecto del i-ésimo sistema

E_j = Efecto del j-ésimo estrato

“k” es el subíndice correspondiente a las parcelas y “l” es el subíndice correspondiente a las jaulas dentro de las parcelas

ε_{ijk} = error entre parcelas (k: parcelas dentro de cada combinación estrato-sistema)

δ_{ijkl} = error entre jaulas dentro de cada parcela (l: jaulas dentro de cada parcela)

Para el análisis de PC (%) y FDA (%) no se usó modelo de medidas repetidas, dado que hay un solo dato por parcela, esto no permite estimar una autocorrelación a través del tiempo. A su vez, en el análisis de varianza se usó un nivel de significancia del 5%.

Para todos los análisis estadísticos se usó el procedimiento mixed del paquete estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute, Cary, NC, 2012).

2.4.5 Evaluación económica financiera de los sistemas

Las ecuaciones para predecir volumen con corteza de madera en pie, pueden ser desarrolladas a partir de datos de inventario repetidos en el tiempo (Clutter *et al.*, 1992). Para el estudio en marcha, se parte del supuesto que el producto final es la cosecha de madera con un solo destino (chips) y sin manejo silvicultural intermedio como poda o raleo. En estos casos la predicción de rendimiento por unidad de superficie es suficiente (Clutter *et al.*, 1992). En el trabajo se utilizaron los valores promedio de cada sistema para proyectar la producción de madera a turno final. Se utilizó el software SAG de INIA (Methol 2006; Hirigoyen y Rachid 2014) para *Eucalyptus globulus*

$$V = \exp^{\alpha + \beta \ln(G \times Hdom) - \gamma \times \left(\frac{Hdom}{DAP}\right)}$$

Ecuación [9]

Siendo, G: Área Basal, Hdom: Altura Media de Dominantes, DAP: Diámetro a la Altura de Pecho, α , β , γ parámetros estimados en cada Sistema.

La proyección de madera a futuro se obtiene con los valores de G, DAP y Hdom, valores que se deben incluir en las funciones ajustadas. Se debe resaltar que el modelo de SAG INIA no está previsto para sistemas silvopastoriles, por lo tanto, los resultados obtenidos de estas proyecciones son aproximaciones. El largo de troza que se asume es de 7,2 m de largo con destino pulpa de celulosa o chipeado, con un diámetro mínimo en punta fina de 7 cm. Las actividades tanto de pre-plantación como las de instalación del cultivo fueron proporcionadas por la empresa forestal.

2.4.5.1 Estimación de los Costos de producción

Los costos de producción fueron construidos en base a los datos proporcionados por la empresa, a datos de Dirección General Forestal (Boragno *et al.* 2018) y consulta con referentes del sector (Cuadro 4 y Cuadro 5). El valor de referencia del dólar con el que se trabajó fue de US\$ 32.

Cuadro 4. Costos de plantación *SPC* densidad inicial 1250.

Item	Año	Unidad	US\$/unidad	Unidades/ha	(US\$/ha)
<i>Preparación del sitio</i>					
Hormiguicida	0	US\$/kg	6	3,4	20,4
Control de hormigas sistemático		US\$/ha	23	1	23
Marcación de rodales	0	US\$/ha	5	1	5
Herbicida glifosato total	0	US\$/l	3,5	4	14
Control de malezas	0	US\$/ha	12	1	12
<i>Laboreo</i>					
Subsolado 80 cm.	0	US\$/ha	300	1	300
Excéntrica	0	US\$/ha	70	1	70
Disquera	0	US\$/ha	40	1	40
<i>Plantación</i>					
Fertilizante	0	US\$/kg	0,5	125	62,5
Plantación manual + fertilizante	0	US\$/ha	219	1	219
Plantines	0	US\$/pl	0,15	1250	188
Replantación	1	US\$/pl	0,15	125	19
Plantación manual + fertilizante	1	US\$/ha	22	1	22
<i>Tratamientos periódicos</i>					
Control de hormigas producto	0	US\$/kg	6	1	6
Control de hormigas localizado	0	US\$/ha	10	1	10
Herbicida	1	US\$/l	3,5	5	17,5
Control de malezas	1	US\$/ha	30	1	30
<i>Otros costos</i>					
Administración	0	US\$/ha	10	1	10
Total Costos de Plantación					979
US\$/ha					

Cuadro 5. Costos de plantación *SSFC* densidad inicial 1000.

Item	Año	Unidad	US\$/unidad	Unidades/ha	(US\$/ha)
Preparación del sitio					
Hormiguicida	0	US\$/kg	6	3,4	20,4
Control de hormigas sistemático		US\$/ha	23	1	23
Marcación de rodales	0	US\$/ha	5	1	5
Herbicida glifosato total	0	US\$/l	3,5	5	17,5
Control de malezas	0	US\$/ha	12	1	12
Laboreo					
Subsolado 80 cm.	0	US\$/ha	215	1	215
Excéntrica	0	US\$/ha	50	1	50
Disquera	0	US\$/ha	28	1	28
Plantación					
Fertilizante	0	US\$/kg	0,5	100	50
Plantación manual + fert.	0	US\$/ha	175	1	175
Plantines	0	US\$/pl	0,15	1000	150
Replantación	1	US\$/pl	0,15	100	15
Plantación manual + fert.	1	US\$/ha	18	1	18
Tratamientos periódicos					
Control de hormigas	0	US\$/kg	6	1	6
Control de hormigas localizado	0	US\$/ha	10	1	10
Herbicida	1	US\$/l	3,5	5	17,5
Control de malezas	1	US\$/ha	30	1	30
Otros costos					
Administración	0	US\$/ha	10		10
Total Costos de Plantación					772
US\$/ha					

Otros costos que se tuvieron en cuenta para los indicadores financieros fueron: costos de intermediación (8 US\$/m³), Impuestos IRAE (5,25%) y costos anuales que incluyen impuesto al patrimonio, BPS, Contribución Inmobiliaria y mantenimiento en general (20 US\$/ha). La densidad para *Eucalyptus globulus* utilizada fue de 0,8 ton/m³.

Ecuación [10] Valor Actual Neto (VAN)

$$VAN = \sum_{t=0}^T \left(\frac{Fn_t}{(1+i)^t} \right)$$

Donde,

Fn_t es el Flujo Neto en el año t , i es la tasa de descuento (%).

Valor actual neto (VAN), es el valor actual de los ingresos y egresos que genera una inversión. El criterio de decisión es que si el VAN es mayor a cero la inversión es conveniente, lo que significa que los beneficios generados por la inversión son capaces de pagar todos los costos de operación, la inversión y el costo de oportunidad del inversionista (Alvarez y Falcao, 2011).

Tasa Interna de Retorno (TIR)

$$0 = \sum_{t=0}^T \left(\frac{Fn_t}{(1+i)^t} \right)$$

Ecuación [11]

Tasa Interna de retorno (TIR) es la rentabilidad de la inversión

Valor esperado del suelo (VES)

El VES indica cuanto se puede pagar por el suelo para una inversión forestal (Faustmann, 1849) y es utilizado para comparar alternativas de diferentes duraciones en el tiempo o ciclos forestales. Es el valor del suelo forestal sin considerar el vuelo forestal, lo que expresa el potencial productivo económico del rubro, ya que es la actualización de las infinitas rentas forestales periódicas.

$$VES = \frac{VAN (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Ecuación [12]

Otra alternativa es el cálculo de la renta forestal anual que es el equivalente a la Renta anual derivada de la producción forestal. Este indicador es útil para el cálculo de alternativas de diferentes ciclos productivos.

$$RFA = VES \times Tasa\ de\ interés\ (i)$$

Ecuación [13]

Es el equivalente anual de lo que recibiría por ese proceso de producción forestal.

Para la estimación del margen bruto ganadero se tomó como base los resultados económicos de las capetas verdes del Plan Agropecuario entre los años 2014-2019, tomando como valor de referencia un margen bruto ganadero promedio de 50U\$\$/ha para la zona este del país (Molina, 2019). Los valores de margen bruto ganadero bajo dosel se estimaron en relación de la carga ganadera que puede albergar el sistema.

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en producción de madera y forraje, y su análisis económico.

3.1 PRODUCCIÓN DE MADERA

En términos generales, los resultados indicaron diferencias entre estratos para el crecimiento individual en DAP y H, cuyo nivel de significancia varió según la edad del cultivo, siendo el estrato 1 el que presentó los menores crecimientos de ambas variables en contraposición al Estrato 3. Para las mismas variables no se presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) por efecto del marco de plantación (*SPC* y *SSFC*) en cada uno de los meses evaluados. A los 68 meses de edad, el error de muestreo de cada sistema estuvo en el orden del 4% al 8% para DAP.

3.1.1 Resultados descriptivos para producción de madera

3.1.1.1 Valores DAP y H por sistema

En las Figura 9, Figura 10, Figura 11 y Figura 12 se pueden observar la evolución de las variables DAP (cm) y H (m) entre sistemas en cada mes. A los 36 meses de edad la variable DAP adquirió valores que van desde 1,91 cm a 17,19 cm y desde 1,24 cm a 21,49 cm para *SPC* Y *SSFC* respectivamente. Para el *SPC* y a la misma edad, el 50% de las observaciones (mediana) se ubicó en torno a un valor de 8,91 cm, mientras que el valor promedio fue de 8,71 cm. Para *SSFC* la mediana se ubicó en torno a un valor de 8,56 cm, mientras que el valor promedio es de 8,72 cm. Para ambos sistemas los valores de primer y tercer cuartil fueron muy próximos registrándose valores en el entorno de 6,37 cm y los 10,76 cm respectivamente. Los valores en DAP no establecieron diferencias entre sistemas para los meses subsiguientes. Para los 68 meses de edad, los valores promedios se ubicaron en los

13,15 cm, con mínimos de 2,71 cm y 1,66 cm para *SPC* y *SSFC*, a máximos de 29,92 cm (Figura 9 y Figura 10)

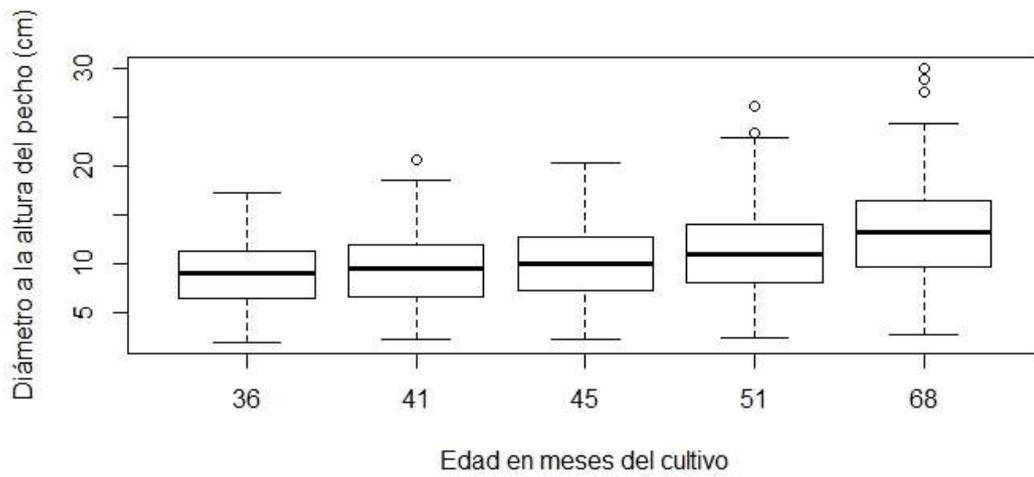


Figura 9. Evolución del Diámetro a la altura del Pecho (DAP cm) según edad del cultivo para *SPC*.

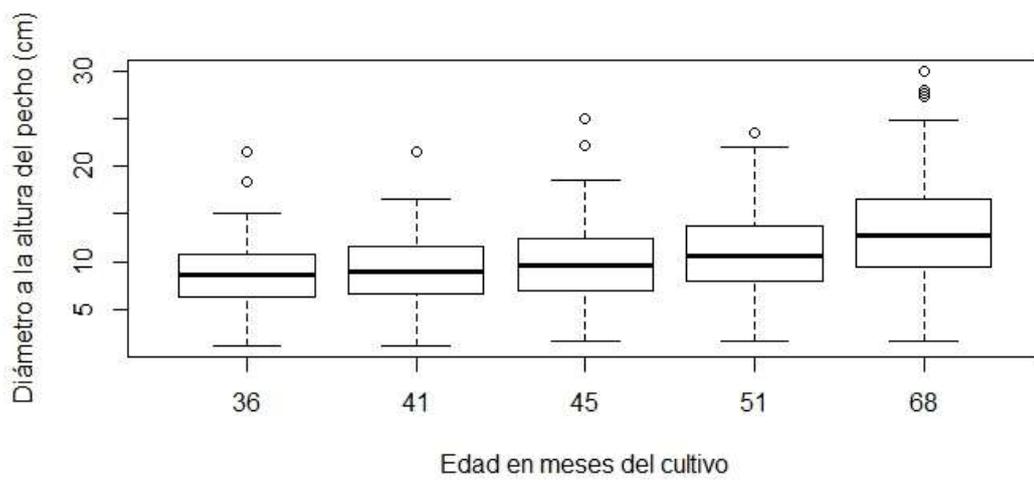


Figura 10. Evolución del Diámetro a la altura del Pecho (DAP cm) según edad del cultivo para *SSFC*.

Para la variable H (m) ambos sistemas al mes 36 presentaron promedios y medianas similares, con valores en torno a los 8 m, mientras que los registros mínimos fueron de 2,80 m y máximos de 13,50 m para *SPC* y de 2,30 m y 14,60 m para *SSFC* respectivamente. En *SPC* el primer cuartil se ubicó en 6,50 m y el tercer en 9,50 m, mientras que en *SSFC* en 6,20 m y 9,70 m respectivamente. Hacia el último mes de medición no existieron diferencias entre sistemas siendo el valor del 50% de las observaciones y promedio de 13,00 y 11,00 m, con valores mínimos de 3,50 m y máximos de 18,40 m para *SPC* y de 3,00 m a 18,50 m para *SSFC* respectivamente. En ambos sistemas el primer y tercer cuartil se ubicó en el entorno de 11,00 m y 14,90 m respectivamente (Figura 11 y Figura 12).

Figura 11. Evolución de la Altura total (m) según edad del cultivo para *SPC*.

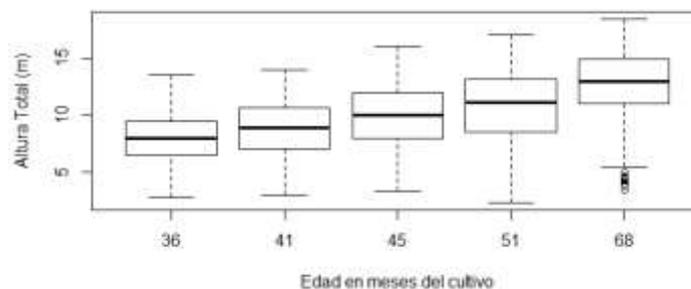
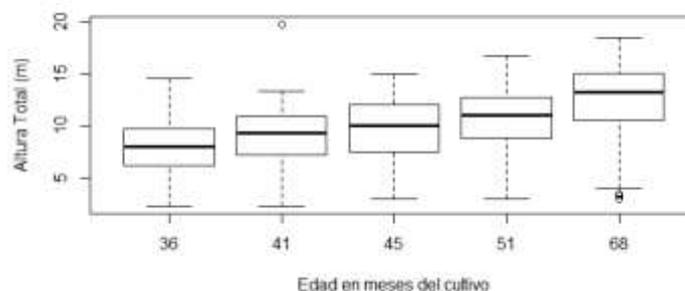


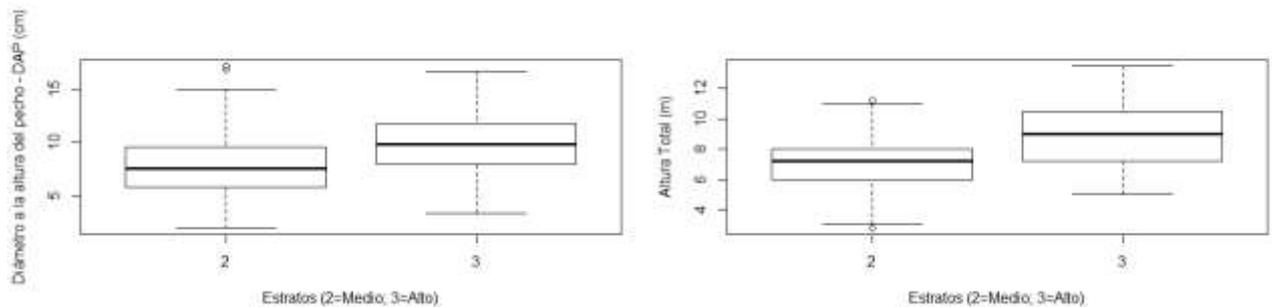
Figura 12. Evolución de la Altura total (m) según edad del cultivo para *SSFC*.



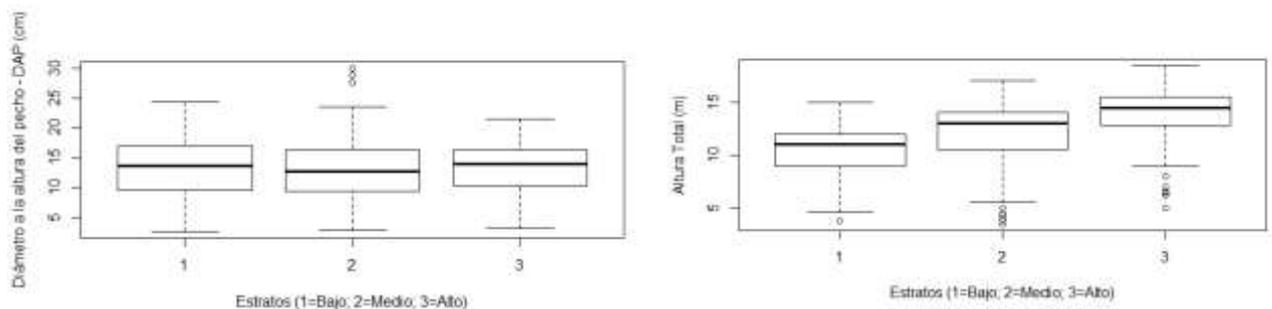
3.1.1.2 Valores DAP y H por estrato

Si se comparan los valores de DAP y H en cada uno de los sistemas por estrato, de la Figura 13 se observa que el estrato 1 siempre registró los menores valores y el estrato 3 los mayores para ambas variables. Si se observa la evolución de la variable DAP desde los 36 a 68 meses de edad (primera y última medición, respectivamente) por estrato en cada sistema, los estratos tendieron a tomar valores muy similares en cada mes y sistema. Sin embargo, la evolución de los valores para la variable H por estrato hacia los 68 meses de edad, registró diferencias en cada uno de los sistemas (Figura 13).

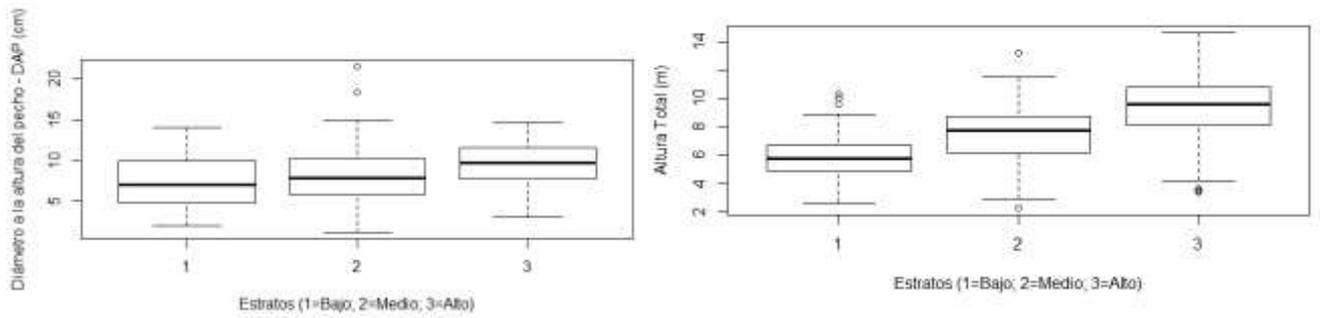
Mes 36: Sistema de Producción Convencional (*SPC*).



Mes 68: Sistema de Producción Convencional (*SPC*).



Mes 36: Sistema Silvopastoril Filas dobles y callejones (*SSFC*).



Mes 68: Sistema Silvopastoril Filas dobles y callejones (*SSFC*).

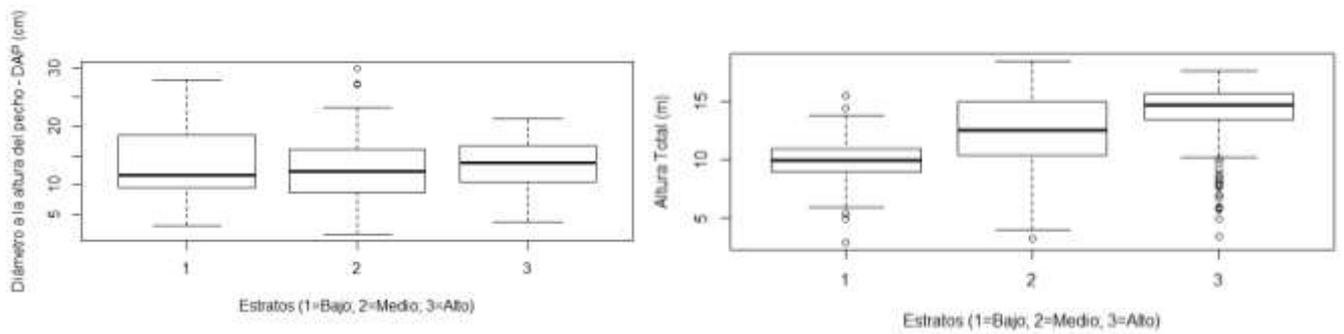


Figura 13. Evolución de las variables DAP y H por sistema y estratos, según 36 y 68 meses de edad del cultivo.

3.1.1.3 Densidad

La densidad inicial promedio fue de 1.021 arb/ha y de 1.318 arb/ha para *SSFC* y *SPC*, respectivamente. Para la última medición realizada a los 68 meses de edad, la densidad promedio resultó en 715 arb/ha y 974 arb/ha para *SSFC* y *SPC*, respectivamente, lo que equivale a una sobrevivencia promedio del orden del 70% y 74%. Si bien los porcentajes de pérdida de árboles por hectárea no reflejaron diferencias considerables entre los mismos en términos promedios, existieron diferencias por estrato dentro de cada sistema. En este sentido, a los 68 meses de edad, el estrato 1 presentó un 51% y 64% de sobrevivencia para *SSFC* y *SPC* respectivamente con respecto a la densidad inicial. En contraposición el estrato 3 presentó mayores porcentajes de sobrevivencia respecto a la densidad inicial, siendo para el sistema *SSFC* del orden del 85% y para *SPC* del 83%, lo que significó pérdidas del entorno del 15 al 17% (

Cuadro 6).

Cuadro 6. Densidades iniciales y al momento de cada medición (árboles/ha) según sistema y estratos.

Estrato	Densidad inicial (arb/ha)	Densidad al momento de medición (arb/ha)				
		36	41	45	51	68
<i>SSFC</i>						
1	987	551	543	518	518	502
2	1042	820	820	798	788	766
3	1034	903	903	883	883	877
<i>SPC</i>						
1	1240	s/d	842	812	799	799
2	1317	1015	978	972	965	965
3	1397	1203	1194	1186	1186	1157

3.1.1.4 Área basal (G)

El área basal inicial (36 meses de edad) promedio por unidad de superficie (m^2/ha) fue de $4,83 m^2/ha$ y de $7,6 m^2/ha$ para *SSFC* y *SPC*, respectivamente. Para la última medición realizada a los 68 meses de edad, el área basal promedio resultó en $10,95 m^2/ha$ y $14,77 m^2/ha$ para *SSFC* y *SPC*, respectivamente, lo que representó un aumento promedio del orden del 56% y 49%. Si se observa por estrato dentro de cada sistema, el estrato 1 siempre presentó los valores más bajos, mientras que el estrato 3 los valores más altos. A los 68 meses de edad, los valores para estrato 1 fueron de $8,47 m^2/ha$ y $12,43 m^2/ha$, para *SSFC* y *SPC* respectivamente. En contraposición el estrato 3 para el sistema *SSFC* tomó valores promedios de $13,43 m^2/ha$ y para *SPC* de $17,17 m^2/ha$. Los incrementos más notorios en área basal son desde el mes 51 al mes 68, donde aproximadamente en promedio se registró un incremento de $4 m^2/ha$ en cada estrato y cada sistema (Cuadro 7), lo que se traduce en un incremento anual de $2,8 m^2/ha$. Si se observa por sistema, para el *SSFC* a los 68 meses de edad el estrato 3 presentó un área basal con valores que superan en un 37% al estrato 1. Mientras que, a la misma edad en el *SPC*, el incremento fue del orden del 28% si se compara el estrato 3 en relación al estrato 1.

Cuadro 7. Promedio de Área basal por hectárea (m^2/ha) por estrato al momento de cada medición.

Estratos	Promedio de Área basal por hectárea (m^2/ha)				
	36	41	45	51	68
<i>SSFC</i>					
1	2,83	3,34	3,58	4,14	8,47
2	4,82	5,38	6,27	7,64	10,96
3	6,84	7,66	8,23	10,02	13,43
<i>SPC</i>					
1	s/d	5,17	6,22	7,88	12,43
2	5,64	7,18	8,04	10,22	14,71
3	9,55	10,73	11,28	13,18	17,17

3.1.1.5 Volumen con corteza (V)

En cuanto al volumen inicial con corteza (36 meses de edad) promedio por unidad de superficie (m^3/ha) fue de $18,58 m^3/ha$ y de $31,66 m^3/ha$ para *SSFC* y *SPC* respectivamente. Para la última medición realizada a los 68 meses de edad, el volumen promedio con corteza fue de $62,67 m^3/ha$ y $86,00 m^3/ha$ para *SSFC* y *SPC*, respectivamente, lo que representó un aumento promedio del orden del 70% y 63%, respectivamente. Si se observa por estrato dentro de cada sistema (Cuadro 8), el estrato 1 siempre presentó los valores más bajos, mientras que el estrato 3 los más altos. A los 68 meses de edad, los valores para estrato 1 fueron de $39,60 m^3/ha$ y $60,90 m^3/ha$, para *SSFC* y *SPC* respectivamente. En contraposición el estrato 3 para el sistema *SSFC* tomó valores promedios de $84,82 m^3/ha$ y para *SPC* de $105,88 m^3/ha$. Los incrementos más notorios en volumen son del mes 51 al mes 68, donde aproximadamente en promedio se registró un incremento entre 20 a $30 m^3/ha$ en cada estrato y cada sistema. Si se observa por sistema, para el *SSFC* a los 68 meses de edad el estrato 3 presentó un volumen con valores que superan en un 53% al estrato 1. Mientras que, a la misma edad en el *SPC*, el incremento fue del orden del 58% si se compara el estrato 3 en relación al estrato 1.

Cuadro 8. Promedio de Volumen por hectárea con corteza (m^3/ha) por estrato al momento de cada medición.

Estratos	Promedio de Volumen con corteza por hectárea (m^3/ha)				
	36	41	45	51	68
<i>SSFC</i>					
1	8,88	11,49	13,24	18,08	39,60
2	18,58	23,93	29,05	39,79	63,61
3	31,28	37,71	43,65	55,48	84,82
<i>SPC</i>					
1	s/d	19,03	24,47	31,59	60,90
2	21,26	29,98	38,59	53,01	91,22
3	42,05	53,18	59,10	75,86	105,88

3.1.2 Análisis estadístico para producción de madera

3.1.2.1 Análisis individual para las variables DAP, H, área basal (G) y volumen con corteza (V)

A los 36, 41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo, existieron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre estratos para las variables altura, y volumen con corteza, no encontrándose diferencias significativas ($p > 0,05$) para estas variables entre sistemas. Para el caso particular de área basal, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) por efecto estrato a partir de los 45 meses.

Para la variable DAP, a partir del ajuste del modelo Ecuación [3] para los 36 meses de edad, se pudieron establecer diferencias significativas para crecimiento en DAP individual por el efecto estrato, siendo significativo ($p = 0,0005$). En términos promedios, el estrato 2 tuvo un valor de DAP medio de 7,91 cm ($\pm 0,26$) mientras que el estrato 3 de 9,52 cm ($\pm 0,28$). Para el *SPC*, el DAP promedio fue de 7,85 cm ($\pm 0,39$) y 9,56 cm ($\pm 0,41$) para el estrato 2 y 3 respectivamente, mientras que el *SSFC* el DAP promedio para el estrato 2 y 3 fue de 7,96 cm ($\pm 0,33$) y de 9,49 cm ($\pm 0,39$) respectivamente. Sin embargo, para el mismo mes de evaluación, no se pudieron establecer diferencias significativas en crecimiento individual para la variable DAP entre sistemas ($p = 0,9676$), siendo el DAP medio de 8,71 cm ($\pm 0,28$) y 8,72 cm ($\pm 0,26$) para *SPC* y *SSFC* respectivamente. Además no se estableció interacción Sistema×Estrato ($p = 0,8247$), registrándose en el *SPC* estrato 2 y 3 un valor de DAP promedio de 7,85 cm ($\pm 0,39$) y 9,56 cm ($\pm 0,41$) respectivamente. Mientras que el *SSFC* toma valores promedios de 7,96 cm ($\pm 0,33$) y 9,49 cm ($\pm 0,39$) para el estrato 2 y 3, respectivamente. Estos valores demuestran que el crecimiento en DAP fue mayor en el estrato 3 en comparación con estrato 2 a los 36 meses de edad del cultivo y en ambos sistemas.

A partir de los 41 meses de edad del cultivo se analizó los datos mediante modelo Ecuación [2] de medidas repetidas incorporando como efecto el mes de

evaluación. Los efectos fijos son sistema, estrato y mes (41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo). Según pudieron establecer diferencias significativas para la variable DAP por efecto edad del cultivo (mes) y por la interacción mes×estrato ($p < 0,0001$). Para los 41, 45, 51 y 68 meses del cultivo los DAP promedio independientemente del sistema fueron de 9,03 cm ($\pm 0,18$), 9,58 cm ($\pm 0,19$), 10,67 cm ($\pm 0,19$) y 13,11 cm ($\pm 0,19$) respectivamente. Así mismo se establecieron diferencias significativas por efecto estrato ($p = 0,0205$). Si se observa desde el mes 41 hasta los 51 meses de edad, existieron diferencias significativas para las medias de DAP por estrato, siendo las mismas más notorias entre el estrato 1 y el estrato 3. A partir de los 68 meses no se observaron diferencias significativas entre las medias, igualándose los valores promedio de DAP en cada estrato (Figura 14). (Ver ANEXO 1)

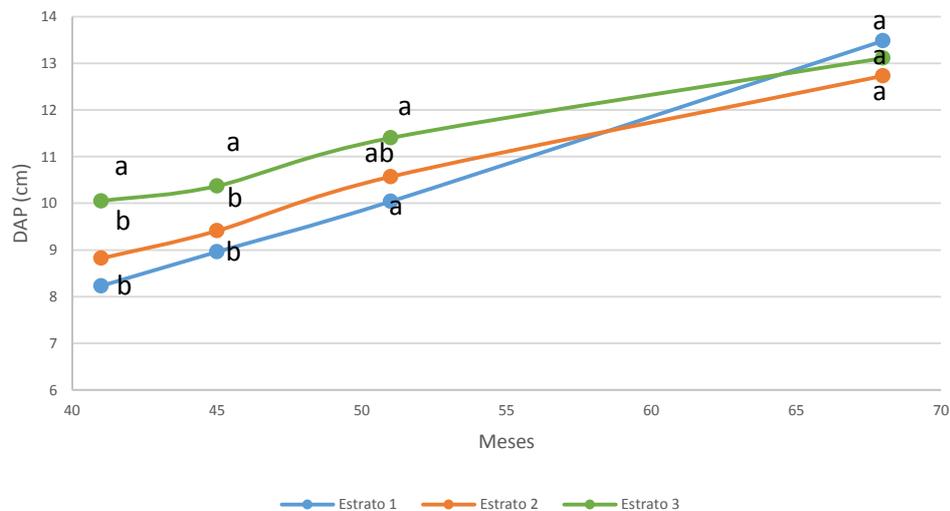


Figura 14. Evolución de las medias de DAP (cm) para la Interacción Mes × Estrato.
Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

Sin embargo no se pudo establecer diferencias significativas en crecimiento en DAP por efecto sistema ($p = 0,4598$), ni que existiera interacción sistema×estrato ($p = 0,8074$), mes×sistema ($p = 0,1002$) y mes×sistema×estrato ($p = 0,3020$) (Cuadro 9).

Si se analiza la interacción mes×sistema, los valores no presentaron diferencias significativas por sistema en cada mes de evaluación, siendo los valores promedios para la variable a los 41 meses de edad de 8,86 cm ($\pm 0,24$) y 9,21 cm ($\pm 0,28$) para *SSFC* y *SPC* respectivamente. Hacia los 45, 51 y 68 meses de edad el DAP promedio para el *SPC* fue de 9,74 cm ($\pm 0,28$), 10,89 cm ($\pm 0,28$) y 13,10 cm ($\pm 0,28$), mientras que para el *SSFC* fue de 9,43 cm ($\pm 0,25$), 10,45 cm ($\pm 0,25$) y 13,15 cm ($\pm 0,24$) respectivamente. Los valores demostraron que en ambos sistemas a medida que aumenta la edad del cultivo se incrementa el crecimiento en DAP de los individuos.

Cuadro 9. Evolución de las medias y error estándar para la Interacción Mes×Sistema×Estrato de la variable DAP (cm).

Mes	Estrato	Media (cm)	
		Error estándar (cm) \pm	
		<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>
41	1	8,34 \pm 0,59 b	8,12 \pm 0,54 b
	2	9,10 \pm 0,38 ab	8,54 \pm 0,32 b
	3	10,18 \pm 0,43 a	9,92 \pm 0,37 a
45	1	9,17 \pm 0,60 a	8,76 \pm 0,55 a
	2	9,61 \pm 0,39 a	9,21 \pm 0,32 a
	3	10,43 \pm 0,44 a	10,31 \pm 0,37 a
51	1	10,49 \pm 0,61 a	9,60 \pm 0,37 b
	2	10,82 \pm 0,37 a	10,33 \pm 0,32 ab
	3	11,36 \pm 0,44 a	11,44 \pm 0,37 a
68	1	13,18 \pm 0,61 a	13,78 \pm 0,54 a
	2	12,98 \pm 0,39 a	12,48 \pm 0,32 a
	3	13,02 \pm 0,44 a	13,20 \pm 0,37 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

Para la variable altura total (H), a partir del ajuste del modelo Ecuación [3] para los 36 meses de edad, se pudieron establecer diferencias significativas ($p = 0,0006$) para crecimiento en H individual por el efecto estrato. En términos promedios, el estrato 2 tuvo un valor de H medio de 7,22 m ($\pm 0,31$) mientras que el estrato 3 de 9,16 m ($\pm 0,35$). Para el *SPC*, la H promedio fue de 7,04 m ($\pm 0,47$) y 8,92 m ($\pm 0,51$) para el estrato 2 y 3 respectivamente, mientras que el *SSFC* la H promedio para el estrato 2 y 3 fue de 7,39 m ($\pm 0,42$) y de 9,40 m ($\pm 0,50$), respectivamente. Sin embargo, para el mismo mes de evaluación, no hubo diferencias significativas en crecimiento individual para la variable H entre sistemas ($p = 0,3893$), siendo la H medio de 7,98 m ($\pm 0,34$) y 8,40 m ($\pm 0,33$) para *SPC* y *SSFC* respectivamente. Además no se estableció interacción Sistema \times Estrato ($p = 0,8821$), registrándose en el *SPC* estrato 2 y 3 un valor de H promedio de 7,04 m ($\pm 0,47$) y 8,92 m ($\pm 0,51$) respectivamente. Mientras que el *SSFC* tomó valores promedios de 7,34 m ($\pm 0,42$) y 9,40 m ($\pm 0,50$) para el estrato 2 y 3 respectivamente. Estos valores demuestran que el crecimiento en H fue mayor en el estrato 3 en comparación con estrato 2 a los 36 meses de edad del cultivo y en ambos sistemas.

A partir de los 41 meses de edad del cultivo se analizó los datos mediante modelo [2] de medidas repetidas incorporando como efecto el mes de evaluación. Los efectos fijos son sistema, estrato y mes (41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo). No se establecen diferencias significativas en crecimiento individual para la variable dependiente Altura total entre sistemas ($p = 0,6440$). Tampoco existencia de interacción Sistema \times Estrato ($p = 0,8790$), mes \times estrato ($p = 0,1784$) y mes \times sistema ($p = 0,0814$) (Figura 15). A los 41, 45, 51 y 68 meses de edad los valores promedios para H fueron de 8,50 m ($\pm 0,17$), 9,42 m ($\pm 0,18$), 10,27 m ($\pm 0,18$) y 12,01 m ($\pm 0,18$) para *SPC* respectivamente, mientras que para el *SSFC* fue de 8,48 m ($\pm 0,15$), 9,07 m ($\pm 0,15$), 10,24 m ($\pm 0,16$) y 12,03 m ($\pm 0,15$) respectivamente (Ver ANEXO 2).

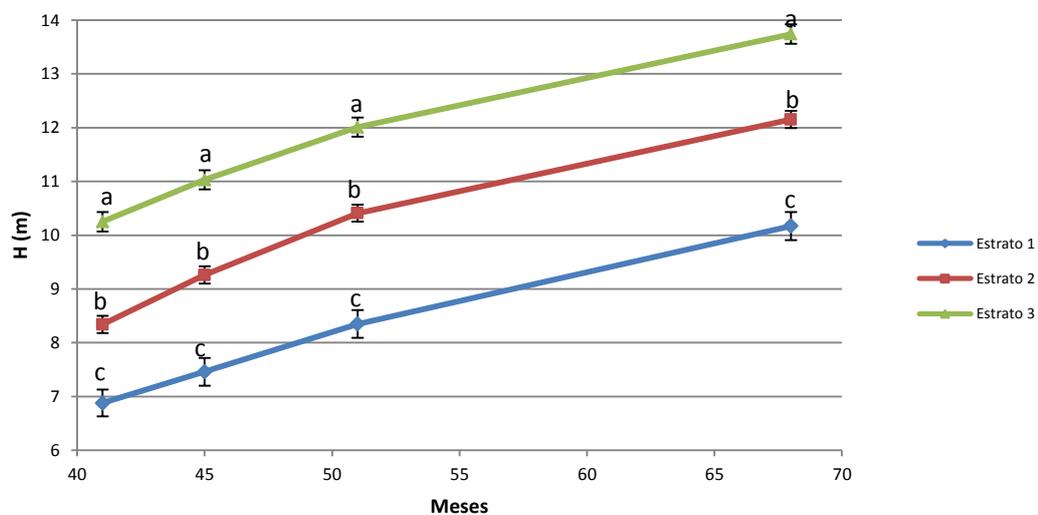


Figura 15 Evolución de las medias para H (m) de la interacción Mes × Estrato.

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

Se pudieron establecer diferencias significativas para crecimiento en H individual por el efecto estrato ($p < 0,0001$), mes ($p < 0,0001$) y para la interacción mes×estrato×sistema ($p < 0,0001$). Independientemente del sistema y del estrato, existió efecto mes sobre H siendo a los 41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo 8,49 m ($\pm 0,11$), 9,25 m ($\pm 0,12$), 10,25 m ($\pm 0,12$) y 12,02 m ($\pm 0,12$) respectivamente (Cuadro 10).

Cuadro 10. Evolución de las medias y error estándar para la Interacción Mes×Sistema×Estrato de la variable H (m).

Mes	Estrato	Media (m)	
		Error estándar (m) ±	
		<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>
41	1	7,02 ± 0,37 c	6,73 ± 0,34 c
	2	8,13 ± 0,24 b	8,54 ± 0,20 b
	3	10,34 ± 0,27 a	10,16 ± 0,23 a
45	1	7,78 ± 0,38 c	7,14 ± 0,35 c
	2	9,49 ± 0,24 b	9,04 ± 0,20 b
	3	11,01 ± 0,27 a	11,04 ± 0,23 a
51	1	8,13 ± 0,39 c	8,57 ± 0,35 c
	2	10,36 ± 0,24 b	10,45 ± 0,20 b
	3	12,32 ± 0,27 a	11,69 ± 0,23 a
68	1	10,36 ± 0,38 c	9,99 ± 0,34 c
	2	12,11 ± 0,24 b	12,20 ± 0,20 b
	3	13,56 ± 0,27 a	13,91 ± 0,23 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

Según el análisis estadístico para evaluar el área basal individual ($m^2/\text{árbol}$) y del ajuste del modelo [3], se pudieron establecer diferencias significativas por efecto estrato a los 36 meses de edad del cultivo ($p = 0,0006$), siendo la media para el estrato 2 y 3 de $0,0056 m^2 (\pm 0,00035)$ y $0,0077 m^2 (\pm 0,00038)$ respectivamente. Sin embargo no se pudieron establecer diferencias por efecto sistema ($p = 0,8977$) e interacción Sistema×Estrato ($p = 0,8384$). Para el *SPC* el área basal por individuo presentó una media de $0,0067 m^2 (\pm 0,00038)$, mientras que para el *SSFC* fue de $0,0066 m^2 (\pm 0,00035)$. Para el estrato 2 la media fue de $0,0056 m^2 (\pm 0,00053)$ y de $0,0056 m^2 (\pm 0,00045)$ para *SPC* y *SSFC* respectivamente, mientras que para el estrato 3 fue de $0,0078 m^2 (\pm 0,00056)$ y de $0,0076 m^2 (\pm 0,00053)$ respectivamente, siendo el estrato 3 el que presentó mayor valor de área basal por individuo en comparación con el estrato 2. A partir de los 41 meses de edad existió efecto sobre el área basal por individuo (m^2) por efecto edad del cultivo ($p = <0,0001$) e interacción mes×estrato ($p = <0,0001$). A los 41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo el área

basal promedio por individuo fue de 0,0074 m² ($\pm 0,00032$), 0,0083 m² ($\pm 0,00033$), 0,010 m² ($\pm 0,00033$) y 0,015 m² ($\pm 0,00033$) respectivamente. Sin embargo no hubo efecto por sistema ($p = 0,46$) y estrato ($p = 0,23$), ni interacción sistema \times estrato ($p = 0,68$), mes \times sistema ($p = 0,10$) y mes \times sistema \times estrato ($p = 0,13$). A los 41 meses de edad del cultivo la media de área basal fue de 0,0077 m² ($\pm 0,00048$) y de 0,0071 m² ($\pm 0,00043$) para *SPC* y *SSFC* respectivamente. A los 45 y 51 meses de edad el *SPC* presentó valores de área basal promedio por árbol de 0,0085 m² ($\pm 0,00050$) y 0,011 m² ($\pm 0,00050$) respectivamente. Para el *SSFC* el área basal promedio fue de 0,0080 m² ($\pm 0,00044$) y 0,0098 m² ($\pm 0,00044$) a los 45 y 51 meses de edad respectivamente. Hacia los 68 meses de edad la media de área basal para *SPC* y *SSFC* fue de 0,015 m² ($\pm 0,00050$) y de 0,016 m² ($\pm 0,00043$) respectivamente (Cuadro 11, Figura 16) (Ver ANEXO 3).

Cuadro 11. Evolución de las medias y error estándar para la Interacción mes \times estrato \times sistema de la variable G.

Mes	Estrato	Media (m ²)	
		Error estándar (m ²) \pm	
		<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>
41	1	0,0068 \pm 0,0010 a	0,0063 \pm 0,00096 a
	2	0,0077 \pm 0,00067 a	0,0066 \pm 0,00055 a
	3	0,0089 \pm 0,00076 a	0,0084 \pm 0,00064 a
45	1	0,0079 \pm 0,0011 a	0,0071 \pm 0,00099 a
	2	0,0084 \pm 0,00069 a	0,0077 \pm 0,00057 a
	3	0,0093 \pm 0,00077 a	0,0091 \pm 0,00065 a
51	1	0,010 \pm 0,0011 a	0,0083 \pm 0,00099 b
	2	0,011 \pm 0,00069 a	0,0097 \pm 0,00057 ab
	3	0,011 \pm 0,00077 a	0,011 \pm 0,00065 a
68	1	0,016 \pm 0,0011 a	0,017 \pm 0,00098 a
	2	0,016 \pm 0,00068 a	0,014 \pm 0,00056 b
	3	0,015 \pm 0,00076 a	0,015 \pm 0,00064 ab

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

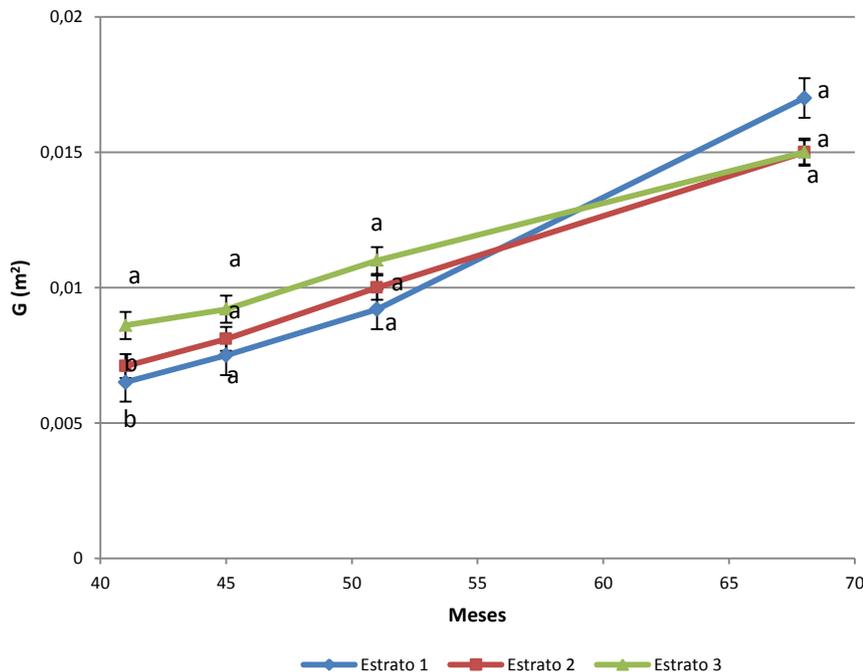


Figura 16 Evolución de las medias para G de la Interacción Mes×estrato.

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

A partir del ajuste del modelo Ecuación [3], se pudieron establecer diferencias significativas para la variable dependiente volumen total por individuo con corteza (m^3) (Ecuación [1]) por efecto estrato a los 36 meses de edad del cultivo ($p = 0,0003$), siendo la media para el estrato 2 y 3 de $0,022 m^3 (\pm 0,0020)$ y $0,035 m^3 (\pm 0,0023)$, respectivamente. No se pudieron establecer diferencias por efecto sistema ($p = 0,8247$) e interacción Sistema×Estrato ($p = 0,8194$). Para el *SPC* el volumen por individuo con corteza presentó una media de $0,0028 m^3 (\pm 0,0022)$, mientras que para el *SSFC* fue de $0,0029 m^3 (\pm 0,0021)$. Para el estrato 2 la media fue de $0,021 m^3 (\pm 0,0031)$ y de $0,022 m^3 (\pm 0,0027)$ para *SPC* y *SSFC* respectivamente, mientras que para el estrato 3 fue de $0,035 m^3 (\pm 0,0033)$ y de $0,035 m^3 (\pm 0,0032)$ respectivamente, siendo el estrato 3 el que presentó mayores valores de volumen total por individuo en comparación con el estrato 2. A partir de los 41 meses de edad según ajuste del modelo Ecuación [2], existió efecto sobre el volumen total por

individuo con corteza (m^3) por efecto edad del cultivo ($p = <0,0001$) y estrato ($p = <0,0001$). A los 41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo el volumen total promedio por individuo fue de $0,032 \text{ m}^3 (\pm 0,0017)$, $0,039 \text{ m}^3 (\pm 0,0017)$, $0,051 \text{ m}^3 (\pm 0,0017)$ y $0,086 \text{ m}^3 (\pm 0,0018)$, respectivamente. Sin embargo, no hubo efectos cuando se analizó el volumen individual con corteza por sistema ($p = 0,2532$). Tampoco se encontraron diferencias para las siguientes interacciones: sistema \times estrato ($p = 0,5769$), mes \times sistema ($p = 0,8254$), estrato \times mes ($p = 0,7741$) y mes \times sistema \times estrato ($p = 0,9540$) (Cuadro 12 y Figura 17). A los 41 meses de edad del cultivo la media de volumen total individual fue de $0,033 \text{ m}^3 (\pm 0,0026)$ y de $0,031 \text{ m}^3 (\pm 0,0023)$ para *SPC* y *SSFC* respectivamente. A los 45 y 51 meses de edad el *SPC* presentó valores de volumen promedio por árbol con corteza de $0,040 \text{ m}^3 (\pm 0,0026)$ y $0,053 \text{ m}^3 (\pm 0,0026)$ respectivamente. Para el *SSFC* el volumen promedio con corteza fue de $0,037 \text{ m}^3 (\pm 0,0023)$ y $0,050 \text{ m}^3 (\pm 0,0023)$ a los 45 y 51 meses de edad respectivamente. Hacia los 68 meses de edad la media de volumen individual con corteza para *SPC* y *SSFC* fue de $0,086 \text{ m}^3 (\pm 0,0026)$ y de $0,087 \text{ m}^3 (\pm 0,0023)$ respectivamente (Ver ANEXO 4).

Cuadro 12. Evolución de las medias y error estándar para la Interacción mes×estrato×sistema de la variable V individual con corteza.

Mes	Estrato	Media (m ³)	
		Error estándar (m ³) ±	
		<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>
41	1	0,023 ± 0,0057 b	0,021 ± 0,0053 b
	2	0,031 ± 0,0036 b	0,029 ± 0,0029 b
	3	0,045 ± 0,0039 a	0,042 ± 0,0032 a
45	1	0,031 ± 0,0058 b	0,026 ± 0,0053 b
	2	0,040 ± 0,0036 ab	0,036 ± 0,0029 b
	3	0,050 ± 0,0038 a	0,050 ± 0,0033 a
51	1	0,040 ± 0,0058 b	0,035 ± 0,0053 c
	2	0,055 ± 0,0036 ab	0,050 ± 0,0029 b
	3	0,064 ± 0,0039 a	0,063 ± 0,0033 a
68	1	0,078 ± 0,0058 a	0,080 ± 0,0054 b
	2	0,088 ± 0,0036 a	0,083 ± 0,0030 b
	3	0,092 ± 0,0039 a	0,097 ± 0,0033 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

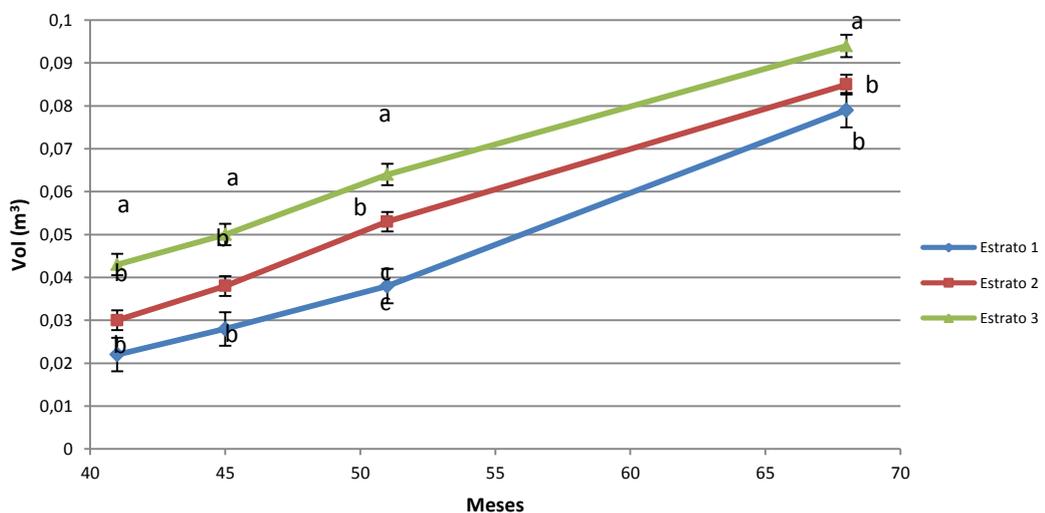


Figura 17 Evolución de las medias de la Interacción mes×estrato para Volumen individual con corteza

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

En el análisis para altura media de los árboles dominantes (Hdom) para los 36 meses de edad del cultivo, los resultados indicaron que existieron diferencias significativas por el efecto estrato ($p = 0,0012$). Para el estrato 2 la Hdom se situó en 9,54 m ($\pm 0,37$) y para el estrato 3 fue de 11,65 m ($\pm 0,42$). Independientemente del estrato, la Hdom en el *SPC* fue de 10,25 m ($\pm 0,40$) mientras que en el *SSFC* fue de 10,93 m ($\pm 0,39$). Para el *SPC* la altura media fue de 9,22 m ($\pm 0,54$) y de 11,29 m ($\pm 0,59$) para el estrato 2 y 3 respectivamente. En el *SSFC* la altura media de los arboles dominantes para el estrato 2 y 3 fue de 9,86 m ($\pm 0,50$) y de 12,02 m ($\pm 0,59$) respectivamente. No se pudieron establecer diferencias significativas en altura media de los dominantes (m) entre sistemas (*SPC* y *SSFC*) ($p = 0,2331$), así como tampoco que exista interacción Sistema \times Estrato ($p = 0,9336$).

A partir de los 41 meses de edad, existieron diferencias significativas para la Hdom por efecto edad del cultivo ($p < 0,0001$) y efecto estrato ($p < 0,0001$). Sin embargo no hubo efecto sistema ($p = 0,4385$), ni interacción sistema \times estrato ($p = 0,2291$), edad \times sistema ($p = 0,6791$) e interacción edad \times estrato ($p = 0,3329$). La Hdom a los 41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo fue de 10,65 m ($\pm 0,25$), 11,73 m ($\pm 0,25$), 12,78 m ($\pm 0,25$) y 14,64 m ($\pm 0,25$) respectivamente (Cuadro 13).

Cuadro 13. Evolución de las medias y error estándar para la Interacción edad×sistema×estrato para Hdom.

Mes	Estrato	Media (m)	
		Error estándar (m) ±	
		<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>
41	1	9,17 ± 0,74 b	7,77 ± 0,74 b
	2	10,38 ± 0,49 b	11,59 ± 0,49 a
	3	12,33 ± 0,58 a	12,66 ± 0,58 a
45	1	9,83 ± 0,74 b	8,87 ± 0,74 c
	2	12,54 ± 0,49 a	11,92 ± 0,49 b
	3	13,50 ± 0,58 a	13,75 ± 0,58 a
51	1	10,24 ± 0,74 b	9,27 ± 0,74 b
	2	13,89 ± 0,49 a	13,68 ± 0,49 a
	3	14,78 ± 0,58 a	14,85 ± 0,58 a
68	1	13,17 ± 0,74 b	10,87 ± 0,74 b
	2	15,44 ± 0,49 a	15,63 ± 0,49 a
	3	16,01 ± 0,58 a	16,70 ± 0,58 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

3.1.2.2 Resultados de producción por superficie (hectárea)

En términos generales, se pudieron establecer diferencias significativas ($p > 0,05$) por efecto estrato para las variables sobrevivencia, área basal y volumen por unidad de superficie con corteza, no así por efecto sistema. El estrato 3 presenta los mayores valores para estas variables, seguido por el estrato 2 y 1.

Para establecer diferencias en sobrevivencia se calculó la probabilidad de la misma estableciendo el número de árboles medidos (NMED) en el total de árboles al momento de la plantación por parcela (NTOT) (NMED/NTOT) (Ecuación [6]).

No se pudieron establecer diferencias significativas para la variable sobrevivencia entre sistemas (*SPC* y *SSFC*) ($p > 0,05$), así como tampoco que exista interacción Sistema×Estrato ($p = 0,9237$; $p = 0,2873$; $p = 0,4315$; $p = 0,4840$ y $p = 0,3288$) para cada uno de los meses evaluados (Cuadro 14 y Cuadro 15). Sin embargo, se pudieron establecer diferencias significativas por el efecto estrato en todos los meses evaluados ($p < 0,05$). Nuevamente el estrato 3 presentó los más altos niveles de sobrevivencia en contraposición al estrato 1 en cada mes del cultivo evaluado.

Cuadro 14. Evolución de las medias y error estándar por efecto Sistema para Supervivencia.

Mes	Sistema	Media	Pvalor
		Error estándar ±	
36	1	0,8166 ± 0,03440 a	0,6995
	2	0,8336 ± 0,02698 a	
41	1	0,7707 ± 0,03135 a	0,7103
	2	0,7549 ± 0,02769 a	
45	1	0,7561 ± 0,02959 a	0,4556
	2	0,7259 ± 0,02624 a	
51	1	0,7545 ± 0,02982 a	0,5356
	2	0,7297 ± 0,02601 a	
68	1	0,7417 ± 0,02749 a	0,4852
	2	0,7154 ± 0,02449 a	

Nota: “1” *SPC* y “2” *SSFC*. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

Cuadro 15. Evolución de las medias y error estándar del efecto Estrato para Supervivencia.

Mes	Estrato	Media	Pvalor
		Error estándar ±	
36	2	0,7720 ± 0,03092 b	0,0396
	3	0,8682 ± 0,02797 a	
41	1	0,6081 ± 0,05061 b	0,0005
	2	0,7703 ± 0,02782 a	
	3	0,8649 ± 0,02648 a	
45	1	0,5913 ± 0,04677 c	0,0003
	2	0,7431 ± 0,02669 b	
	3	0,8490 ± 0,02566 a	
51	1	0,5849 ± 0,04644 c	0,0002
	2	0,7473 ± 0,02637 b	
	3	0,8515 ± 0,02528 a	
68	1	0,5770 ± 0,04307 c	<,0001
	2	0,7318 ± 0,02484 b	
	3	0,8590 ± 0,02406 a	

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

Para área basal por unidad de superficie (m^2/ha), a partir del ajuste del modelo Ecuación [5], se pudieron establecer diferencias significativas por efecto estrato a los 36 meses de edad del cultivo ($p = 0,0008$), siendo la media para el estrato 2 y 3 de $4,77 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,54$) y $8,10 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,64$) respectivamente. Sin embargo no se pudieron establecer diferencias por efecto sistema ($p = 0,1199$) e interacción Sistema \times Estrato ($p = 0,1881$). Para el *SPC* el área basal por hectárea presentó una media de $7,11 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,59$), mientras que para el *SSFC* fue de $5,75 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,59$). Para el estrato 2 la media fue de $4,88 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,77$) y de $4,66 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,77$) para *SPC* y *SSFC* respectivamente, mientras que para el estrato 3 fue de $9,35 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,91$) y de $6,84 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,91$) respectivamente, siendo el estrato 3 el que presentó mayores valores de área basal por hectárea en comparación con el estrato 2. A partir de los 41 meses de edad según ajuste del modelo Ecuación [4], existió efecto sobre el área basal por hectárea (m^2/ha) por efecto edad del cultivo ($p = 0,0001$), sistema ($p = 0,0005$), estrato ($p = 0,0001$) e interacción mes \times sistema ($p = 0,02$). A los 41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo el área basal promedio por hectárea fue de $6,52 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,39$), $7,23 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,39$), $8,85 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,39$) y $12,89 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,39$) respectivamente. Sin embargo no hubo interacción sistema \times estrato ($p = 0,9171$), mes \times estrato ($p = 0,3239$) y mes \times sistema \times estrato ($p = 0,7476$) (Cuadro 16 y Cuadro 17). A los 41 meses de edad del cultivo la media de área basal fue de $7,66 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,55$) y de $5,39 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,55$) para *SPC* y *SSFC* respectivamente. A los 45 y 51 meses de edad el *SPC* presentó valores de área basal promedio por hectárea de $8,47 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,55$) y $10,43 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,55$) respectivamente. Para el *SSFC* el área basal promedio fue de $5,98 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,55$) y $7,27 \text{ m}^2$ ($\pm 0,55$) a los 45 y 51 meses de edad respectivamente. Hacia los 68 meses de edad la media de área basal para *SPC* y *SSFC* fue de $14,83 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,55$) y de $10,95 \text{ m}^2/\text{ha}$ ($\pm 0,55$) respectivamente.

Cuadro 16. Evolución de las medias y error estándar para G m²/ha de la Interacción mes×estrato×sistema

Mes	Estrato	Media (m ² /ha)	
		Error estándar (m ² /ha) ±	
		<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>
41	1	5,14 ± 1,15 b	3,17 ± 1,15 b
	2	7,33 ± 0,75 b	5,40 ± 0,75 ab
	3	10,52 ± 0,89 a	7,59 ± 0,89 a
45	1	6,20 ± 1,15 b	3,58 ± 1,15 b
	2	8,13 ± 0,75 b	6,19 ± 0,75 ab
	3	11,08 ± 0,89 a	8,18 ± 0,89 a
51	1	7,88 ± 1,15 b	4,14 ± 1,15 b
	2	10,34 ± 0,75 ab	7,64 ± 0,75 a
	3	13,08 ± 0,89 a	10,02 ± 0,89 a
68	1	12,43 ± 1,15 b	8,47 ± 1,15 b
	2	14,71 ± 0,75 ab	10,96 ± 0,75 ab
	3	17,34 ± 0,91 a	13,43 ± 0,89 a

Nota: Medias sin letras en común difieren significativamente ($p < 0,05$) dentro de cada mes y sistema

Cuadro 17. Mes×estrato para G m²/ha

Mes	Estrato	Media (m ² /ha)
		Error estándar (m ² /ha) ±
41	1	4,15 ± 0,81 b
	2	6,36 ± 0,53 b
	3	9,06 ± 0,63 a
45	1	4,89 ± 0,81 b
	2	7,16 ± 0,53 b
	3	9,63 ± 0,63 a
51	1	6,01 ± 0,81 c
	2	8,99 ± 0,53 b
	3	11,55 ± 0,63 a
68	1	10,45 ± 0,81 b
	2	12,83 ± 0,53 b
	3	15,39 ± 0,64 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

A partir del ajuste el modelo Ecuación [5], a los 36 meses de edad del cultivo se pudieron establecer diferencias significativas ($p = 0,0002$) para volumen total por unidad de superficie con corteza (m^3/ha) por efecto estrato. Sin embargo, no se pudo establecer que exista efecto sistema ($p = 0,0831$) ni interacción Sistema \times Estrato ($p = 0,2842$). El volumen promedio para el *SPC* fue de $31,65 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 2,64$) mientras que para el *SSFC* de $24,93 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 2,55$). Independientemente del sistema, el estrato 2 tuvo un volumen total promedio de $19,92 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 2,43$) y el estrato 3 de $36,67 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 2,76$). Para el *SPC* el estrato 2 tuvo un volumen promedio de $21,26 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 3,56$) mientras que el estrato 3 de $42,05 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 3,90$). En el *SSFC* el volumen promedio fue de $18,58 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 3,30$) y de $31,28 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 3,90$) para el estrato 2 y 3 respectivamente. Los resultados demuestran que independientemente del sistema, el estrato 3 a los 36 meses de edad del cultivo registró valores promedio de volumen total con corteza por unidad de superficie mayor.

A partir del ajuste del modelo [4], desde los 41 meses de edad se pueden establecer diferencias significativas para la variable dependiente volumen total por unidad de superficie con corteza por efecto estrato y edad de plantación ($p < 0,0001$). Independientemente del sistema y estrato, a los 41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo se registraron volúmenes promedio por hectárea de $29,22 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 2,55$), $34,68 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 2,55$), $45,64 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 2,55$) y $73,21 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 2,55$) respectivamente. Así mismo, existieron diferencias significativas por efecto sistema ($p = 0,0061$), por la interacción mes \times sistema ($p = 0,0058$) y mes \times estrato ($p = 0,0185$) (Cuadro 18). Para el *SPC* a los 41 meses de edad se registró un volumen promedio de $34,06 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 3,60$), a los 45 meses de edad de $40,72 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 3,60$), $53,49 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 3,60$) a los 51 meses de evaluación y la última medición a los 68 meses de edad fue de $83,73 \text{ m}^3/\text{ha}$. Para el *SSFC* los volúmenes fueron de $24,37 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 3,60$), $28,65 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 3,60$), $37,78 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 3,60$) y $62,68 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($\pm 3,60$) para los 41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo respectivamente. Sin embargo, no se pudo establecer que exista interacción sistema \times estrato ($p = 0,8560$) ni interacción mes \times sistema \times estrato ($p = 0,6161$) (Cuadro 19).

Cuadro 18. Evolución de las medias y error estándar para V/ha con coretza de la Interacción mes×estrato.

Mes	Estrato	Media (m ³ /ha)
		Error estándar (m ³ /ha) ±
41	1	15,26 ± 5,36 b
	2	26,95 ± 3,51 b
	3	45,45 ± 4,16 a
45	1	18,86 ± 5,36 b
	2	33,82 ± 3,51 b
	3	51,38 ± 4,16 a
51	1	24,84 ± 5,36 c
	2	46,40 ± 3,51 b
	3	65,67 ± 4,16 a
68	1	50,25 ± 5,36 c
	2	74,02 ± 3,51 b
	3	95,35 ± 4,16 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

Cuadro 19. Evolución de las medias y error estándar de la Interacción mes×estrato×sistema para Vol/ha

Mes	Estrato	Media (m ³ /ha)	
		Error estándar (m ³ /ha) ±	
		<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>
41	1	19,03 ± 7,59 b	11,49 ± 7,59 b
	2	29,98 ± 4,97 b	23,93 ± 4,97 ab
	3	53,18 ± 5,87 a	37,71 ± 5,88 a
45	1	24,47 ± 7,59 b	13,24 ± 7,59 b
	2	38,59 ± 4,97 b	29,05 ± 4,97 ab
	3	59,10 ± 5,88 a	43,65 ± 5,88 a
51	1	31,59 ± 7,59 b	18,08 ± 7,59 b
	2	53,01 ± 4,97 b	39,79 ± 4,97 ab
	3	75,86 ± 5,88 a	55,48 ± 5,88 a
68	1	60,90 ± 7,59 c	39,60 ± 7,59 c
	2	84,42 ± 4,97 b	63,61 ± 4,97 b
	3	105,88 ± 5,88 a	84,82 ± 5,88 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

3.2 RESULTADOS DE PRODUCCIÓN DE FORRAJE

En este capítulo se presentan los principales resultados descriptivos y estadísticos en producción de forraje. Así mismo, se realizó una breve descripción de las especies encontradas en el estrato herbáceo bajo dosel y sus principales características.

3.2.1 Producción forrajera descriptiva

De forma de poder comparar los datos obtenidos en cada estación de corte y para cada sistema se calculó los kilos de materia seca por hectárea por estación (kg/ha de MS por estación).

En la Figura 18 se puede observar la evolución en producción promedio bajo dosel de los sistemas y de los testigos (sin influencia del cultivo) según estación anual, siendo las estaciones de primavera y otoño las de mayor producción promedio con detrimento de la producción hacia las estaciones de invierno y verano. La tendencia es que los mayores picos de producción los registra el *SSFC*, seguido del testigo y por último el *SPC*. Para el *SSFC* en el período evaluado, la producción promedio por estación registró valores desde los 399 kg/ha de MS hasta los 780 kg/ha de MS, siendo el pico de mayor producción en la estación de primavera del año 2015 y el pico mínimo en la estación de invierno del año 2016. Para el período en evaluación, el *SPC* la producción promedio estacional fue desde los 84 kg/ha de MS hasta los 578 kg/ha de MS, siendo el pico de menor producción en la estación de otoño del año 2017 y máximo en la estación de primavera del año 2016. El testigo en general presentó mayor producción promedio que el *SPC*, con excepción de las estaciones de invierno y primavera del año 2016 donde las pasturas creciendo bajo dosel tuvieron mayor crecimiento que el testigo. En términos generales, las pasturas creciendo bajo el dosel del *SSFC* han tenido períodos en general superiores en producción al testigo, no siendo así para aquellas pasturas del *SPC* respecto al testigo.

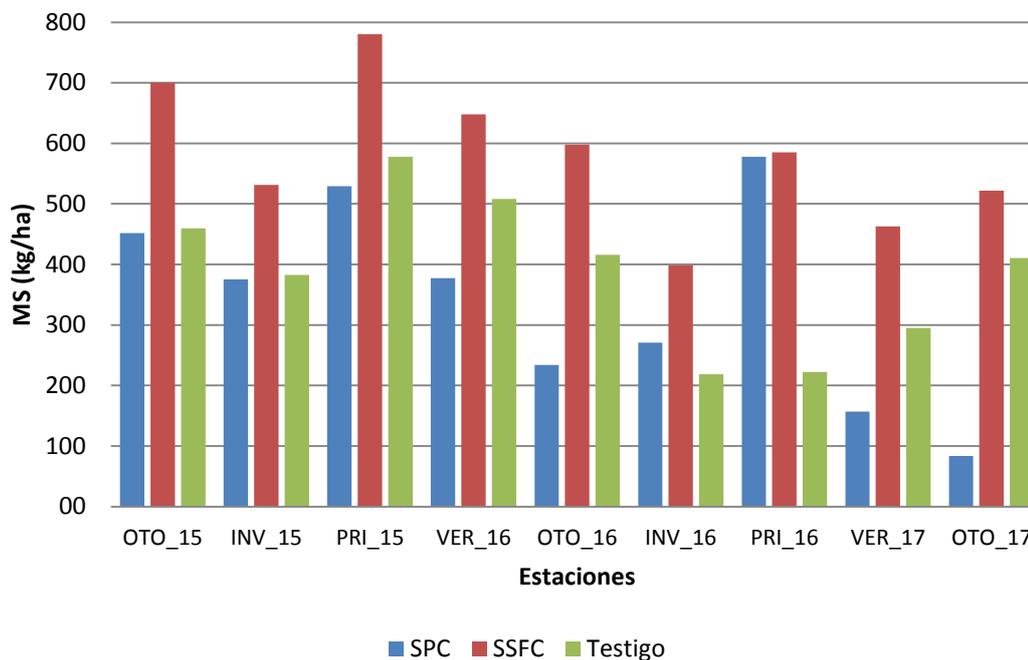


Figura 18. Producción promedio en kg de materia seca por hectárea por estación según sistema y testigo.

Nota: OTO_15, 16, 17 (Otoño 2015, 2016 y 2017); INV_15, 16 (Invierno 2015 y 2016); PRI_15, 16 (Primavera 2015 y 2016); VER_16, 17 (Verano 2016 y 2017)

En la Figura 19 se puede observar la evolución de la producción promedio por estación por estrato bajo dosel para *SSFC* y *SPC*. Nuevamente los picos de producción se registraron en las estaciones de otoño y primavera con descensos hacia el invierno y verano para el *SSFC*, mientras que para el *SPC* es dependiente del año evaluado. En general la tendencia es que el estrato bajo, registró mayores producciones promedios que el estrato medio. Para el *SSFC* las excepciones fueron en las estaciones de otoño e invierno 2015 e invierno y primavera 2016. Para el caso del *SPC* las estaciones donde el estrato medio superó al bajo fueron invierno, primavera 2016 y verano 2017.

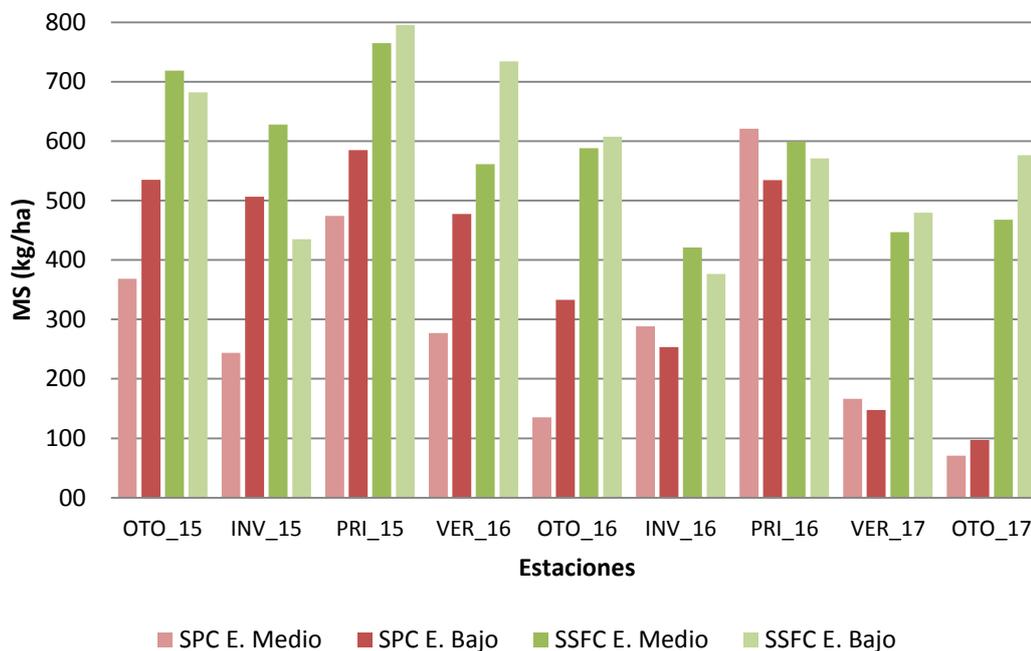


Figura 19. Producción promedio en kg de materia seca por hectárea para *SSFC* y *SPC* por estrato.

En la Figura 20 y Figura 21 se aprecia que los contenidos de PC (%) entre testigos y pasturas bajo dosel no presentaron diferencias notorias en contenido. Sin embargo, en general las pasturas creciendo bajo dosel y sobre todo en el estrato medio han presentado mayores porcentajes en la mayoría de los cortes tanto en los *SPC* como *SSFC*.

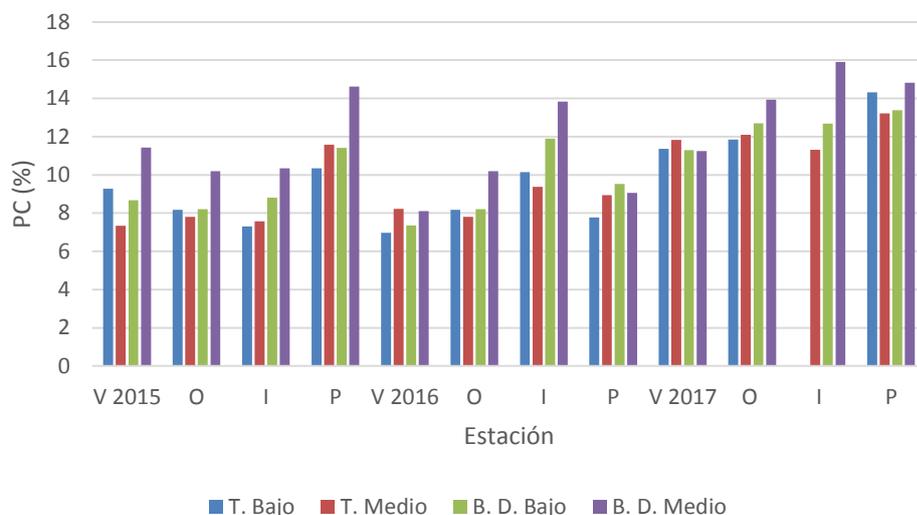


Figura 20. Evolución de la Proteína cruda expresada en porcentaje para *SSFC* y sus testigos.

Nota: V 2015 (Verano 2015); O (Otoño); I (Invierno); P (Primavera); V 2016 (Verano 2016); V 2017 (Verano 2017); T. Bajo (Testigo estrato bajo); T. Medio (Testigo estrato medio); B. D. Bajo (Bajo dosel estrato bajo); B. D. Medio (Bajo dosel estrato medio)

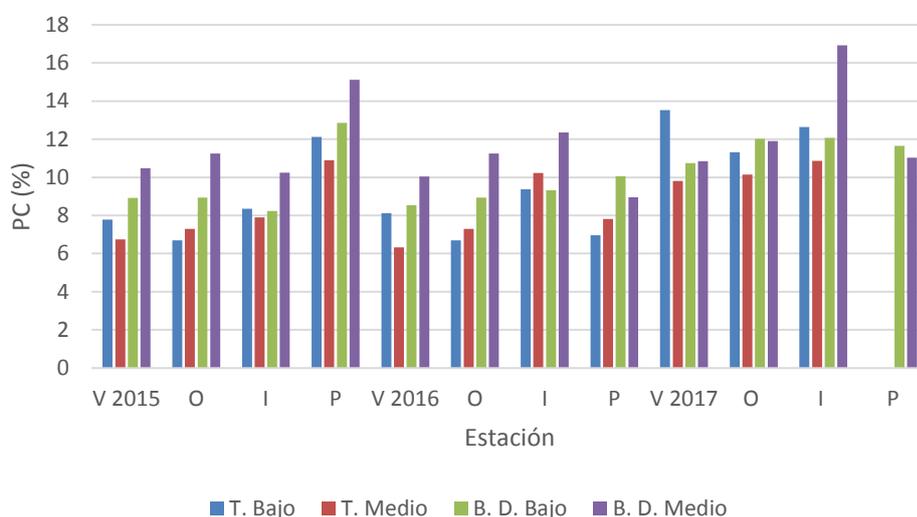


Figura 21. Evolución de la Proteína cruda expresada en porcentaje para *SPC* y sus testigos.

Nota: V 2015 (Verano 2015); O (Otoño); I (Invierno); P (Primavera); V 2016 (Verano 2016); V 2017 (Verano 2017); T. Bajo (Testigo estrato bajo); T. Medio (Testigo estrato medio); B. D. Bajo (Bajo dosel estrato bajo); B. D. Medio (Bajo dosel estrato medio)

3.2.2.1 Principales especies del estrato herbáceo

Las principales especies encontradas en el tapiz herbáceo en el mes de abril fueron: *Axonopus argentinus*, *Axonopus fissifolius*, *Baccharis coridifolia*, *Bromus auleticus*, *Cynodon dactylon*, *Cyperus aggregatus*, *Dichanthelium (Panicum) sabulorum*, *Dichondra microcalyx*, *Eragrostis cilianensis*, *Eragrostis trichocolea*, *Gamochaeta coarctata*, *Piptochaetium montevidensis*, *Richardia humistrata*, *Setaria parviflora*.

Dentro del tapiz se encontraron especies de estrato alto que disminuyen el valor del campo natural como las del género *Baccharis*, *Senecio* y *Eryngium*. *Cynodon dactylon* especie estival que también tiene una incidencia desfavorable en el tapiz (Carámbula, 1991).

En base a Rosengurtt (1979) se presentan las principales características de las especies forrajeras encontradas (Cuadro 20).

Cuadro 20. Principales características de las especies encontradas.

Genero	Especie	Familia	Estación de crecimiento	Ciclo de vida	Metabolismo	SSFC	SPC
<i>Eryngium</i>	<i>sp*</i>	Apiaceae	Estival	Perennes/ Anuales	C3	P	P
<i>Gamochoeta</i>	<i>coarctata</i>	Asteraceae	Invernal	Perenne	C3	A	P
<i>Baccharis</i>	<i>coridifolia*</i>	Asteraceae	Estival	Perenne	C3	A	P
<i>Bacharis</i>	<i>trimera*</i>	Asteraceae	Estival	Perenne	C3	P	P
<i>Dichondra</i>	<i>microcalyx*</i>	Convolvulacea e	Invernal	Perenne	C3	A	P
<i>Cyperus</i>	<i>aggregatus*</i>	Cyperaceae	Estival	Perenne	C4	A	P
<i>Trifolium</i>	<i>sp*</i>	Fabaceae	Invernal	Perennes/ Anuales	C3	P	P
<i>Axonopus</i>	<i>argentinus*</i>	Poaceae	Estival	Perenne	C4	P	P
<i>Bromus</i>	<i>auleticus*</i>	Poaceae	Invernal	Perenne	C3	A	P
<i>Eragrostis</i>	<i>cilianensis</i>	Poaceae	Estival	Anual	C4	P	A
<i>Cynodon</i>	<i>dactylon*</i>	Poaceae	Estival	Perenne	C4	P	P
<i>Axonopus</i>	<i>fissifolius*</i>	Poaceae	Estival	Perenne	C4	P	P
<i>Piptochaetium</i>	<i>montevidense*</i>	Poaceae	Invernal	Perenne	C3	P	P
<i>Setaria</i>	<i>parviflora</i>	Poaceae	Estival	Perenne	C4	A	P
<i>Eragrostis</i>	<i>polytricha</i>	Poaceae	Estival	Perenne	C4	A	P
<i>Dichanthelium (Panicum)</i>	<i>sabulorum</i>	Poaceae	Estival	Perenne	C4	A	P
<i>Richardia</i>	<i>humistrata</i>	Rubiaceae	Estival	Perenne	C4	P	P

Fuente: Rosengurtt, B. 1979.

Nota: “P” = Presencia, “A” = Ausencia; “*” especies coincidentes con el registro del Inventario Forestal Nacional (MGAP-DGF, 2019)

3.2.2 Análisis estadístico

3.2.2.1 Materia Seca

A continuación, se presentan los resultados de los análisis estadísticos y del ajuste del modelo Ecuación [7]. En el análisis de producción de materia seca por sistemas, se establecieron diferencias significativas en producción de materia seca entre sistemas (*SPC* y *SSFC*) ($p < 0.0001$) y en la interacción Estación×Sistema ($p = 0,0139$) (Cuadro 21). En términos promedios la producción de materia seca para el período evaluado fue de 581,9 ($\pm 19,9$) kg/ha de MS por estación y de 339,9 ($\pm 19,9$) kg/ha de MS por estación para *SSFC* y *SPC* respectivamente, lo que equivale a un 42% más de producción para el primer sistema con callejones respecto al convencional. No se pueden establecer diferencias significativas en producción de materia seca por efecto estratos ($p = 0,1039$). Independientemente del sistema, el estrato bajo tuvo una producción promedio mayor que el estrato medio, siendo de 484,8 ($\pm 19,9$) y 436,3 ($\pm 19,9$) kg/ha de MS por estación respectivamente. Para el *SSFC* estrato bajo la producción promedio fue de 585,1 ($\pm 28,3$) kg/ha de MS por estación mientras que para el mismo estrato del *SPC* fue de 384,6 ($\pm 28,3$) kg/ha de MS por estación. El estrato medio del *SSFC* y del *SPC* tuvo una producción promedio de 578,7 ($\pm 28,3$) y 294,0 ($\pm 28,3$) kg/ha de MS por estación respectivamente. El estrato bajo es mejor en general que el medio y aparentemente siempre en una proporción semejante.

Cuadro 21. Evolución de las medias y error estándar de la Interacción Estación×Sistema para kg/ha de MS por estación.

Estación	<i>SSFC</i>	<i>SPC</i>
	Media (kg/ha de MS por estación) Error estándar ±	Media (kg/ha de MS por estación) Error estándar ±
Otoño 2015	696,6 ± 54,4 a	462,4 ± 54,4 b
Invierno	545,4 ± 54,3 a	382,1 ± 54,3 b
Primavera	789,6 ± 54,3 a	517,5 ± 54,3 b
Verano 2016	644,1 ± 54,3 a	369,4 ± 54,3 b
Otoño	595,9 ± 54,3 a	231,8 ± 54,3 b
Invierno	404,5 ± 54,3 a	269,5 ± 54,3 a
Primavera	583,8 ± 54,3 a	577,4 ± 54,3 a
Verano 2017	457,1 ± 54,3 a	155,9 ± 54,3 b
Otoño	519,9 ± 54,3 a	87,4 ± 54,3 b

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada fila por estación de corte.

Adicionalmente, no se pudo establecer que exista interacción Sistema×Estrato ($p = 0,1549$), dado que las diferencias de medias de los sistemas no dependen del estrato. Tampoco hubo interacción Estación×Estrato ($p = 0,4252$) dado que no son diferentes estadísticamente las medias de los estratos si se observan por estación.

Independientemente del sistema, las estaciones de otoño y primavera fueron las de mayor crecimiento en general, lo que coincide con los picos de producción estacional para nuestro país. Si se compara los registros pluviométricos para la región de Rocha por estación y los registrados a nivel predial, el verano, invierno y primavera del año 2015 registraron lluvias superiores. Para el mismo año, la única estación que registró una precipitación acumulada menor fue el otoño, sin embargo, fue una de las estaciones con mayor producción forrajera. Para el año 2016, el máximo de lluvias se registró en la estación de otoño (lo que superó ampliamente al acumulado para la región), seguidos por el invierno y primavera. Esto refleja los valores obtenidos para ese año en producción forrajera, siendo las estaciones de otoño y primavera las de mayor producción. A pesar que el invierno de ese año tuvo

registros pluviométricos por encima de los registros para la zona no se vio reflejado en términos de producción, siendo la estación con menor producción. Así mismo, el verano 2016 tuvo registros por debajo de los promedios regionales, sin embargo, fue una estación con muy buena producción forrajera. Por último, las precipitaciones acumuladas para el verano y otoño 2017 son muy similares a las registradas, siendo similar la producción de forraje en ambas estaciones.

Según los resultados, para todas las estaciones la producción de pastos bajo dosel fue superior en el *SSFC* en relación al *SPC*. Las diferencias de menor significancia son los cortes correspondientes a las estaciones de invierno y primavera del año 2016. Para el otoño 2015 el *SSFC* tuvo un 33,6% más de producción bajo dosel en relación al *SPC*, incrementándose la diferencia promedio al 61% y 83% al otoño 2016 y 2017 respectivamente. Para la estación de invierno del año 2015, el *SSFC* presentó diferencias promedio significativas respecto al *SPC*, lo que se tradujo en un incremento del 30% respecto a este último. Para la estación de primavera del año 2016, no se encontraron diferencias significativas en cuanto a producción promedio de materia seca por ha entre sistemas, sin embargo, la primavera del año 2015 tuvo en promedio una producción 789,6 y 517,5 kg/ha de MS para *SSFC* y *SPC* respectivamente. Tanto para el verano 2016 como del año 2017, se encontraron diferencias significativas en la producción promedio por estación, donde el *SPC* produjo un 43% y 66% menos respectivamente (Cuadro 21).

Se demostró diferencias de producción de materia seca entre *SPC*, *SSFC* y el *testigo* ($p = 0,0012$), así como también que existe interacción Estación×Sistema ($p = 0,0075$) (Cuadro 22). No se evidenciaron diferencias significativas por efecto Estrato ($p = 0,2170$), ni para las interacciones Estación×Estrato ($p = 0,4934$), Estación×Sistema×Estrato ($p = 0,6320$) y Sistema×Estrato ($p = 0,6520$).

Cuadro 22. Evolución de medias y error estándar de la Interacción Sistema×Estación para kg/ha de MS por estación.

Estación	<i>Testigo</i>	<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>
	Media (kg/ha de MS por estación) Error estándar ±	Media (kg/ha de MS por estación) Error estándar ±	Media (kg/ha de MS por estación) Error estándar ±
Otoño 2015	465,1 ± 80,5 a	493,1 ± 80,5 a	692,2 ± 80,5 a
Invierno	340,9 ± 78,4 b	395,0 ± 78,4 ab	580,3 ± 78,4 a
Primavera	526,9 ± 78,0 b	489,2 ± 78,0 b	822,4 ± 78,0 a
Verano 2016	496,7 ± 78,0 a	336,5 ± 78,0 ab	651,7 ± 78,0 a
Otoño	432,3 ± 78,0 a	210,1 ± 78,0 b	599,0 ± 78,0 a
Invierno	218,0 ± 78,0 a	256,6 ± 78,0 a	413,8 ± 78,0 a
Primavera	211,1 ± 78,0 b	572,5 ± 78,0 a	578,7 ± 78,0 a
Verano 2017	283,1 ± 78,4 a	157,2 ± 78,4 b	440,5 ± 78,4 a
Otoño	428,3 ± 80,5 a	100,1 ± 80,5 b	508,4 ± 80,5 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada fila por estación.

La media de producción para el *SPC* fue de 334,5 ($\pm 39,1$), seguido del *testigo* con 378,1 ($\pm 39,1$) y por último el *SSFC* de 587,5 ($\pm 39,1$) kg/ha de MS. El estrato bajo tuvo una media de 462,7 ($\pm 31,9$) y el medio 404,0 ($\pm 31,9$) kg/ha de MS, pero sin diferencias significativas ($p > 0,05$). Para el *SSFC* el estrato bajo y medio tuvo una producción promedio de materia seca de 586,8 ($\pm 55,3$) y 588,1 ($\pm 55,3$) kg/ha de MS respectivamente. El estrato bajo y medio del *SPC* tuvo una producción promedio de materia seca de 380,1 ($\pm 55,3$) y 288,8 ($\pm 55,3$) kg/ha de MS respectivamente. En el *testigo* el estrato bajo y medio tuvo una producción promedio de materia seca de 421,2 ($\pm 55,3$) y 335,1 ($\pm 55,3$) kg/ha de MS respectivamente.

Considerando el ejercicio otoño 2015 al verano 2016 y el otoño 2016 al verano 2017, en el Cuadro 23 se presentan los resultados anuales de producción por sistema y testigo. Para ambos periodos el *SSFC* presenta mayores valores, incluso superiores al testigo (sin influencia del cultivo). Mientras que la producción entre *testigo* y *SPC* fue similar en ambos periodos.

Cuadro 23. Predicción anual de materia seca (kg/ha) por sistema y testigo.

	<i>Testigo</i> (kg/ha de MS)	<i>SPC</i> (kg/ha de MS)	<i>SSFC</i> (kg/ha de MS)
Otoño 2015/Verano 2016	1.830	1.714	2.747
Otoño 2016/Verano 2017	1.136	1.196	2.032

Si se comparan los datos según producción de materia seca promedio por hectárea por estación expresados por día, los valores para el testigo fueron de 4,9, 3,1, 4,1 y 4,3 kg/ha de MS por día para otoño, invierno, primavera y verano respectivamente. Los sistemas evaluados no acompañan el comportamiento estacional de producción forrajera bajo dosel comparado con el testigo (fuera de dosel) (Figura 23).

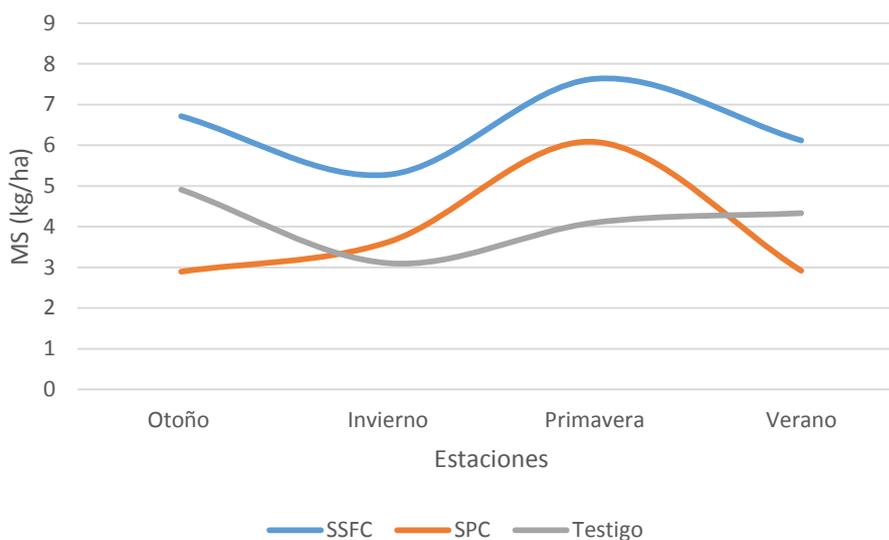


Figura 22. Curva de crecimiento diario en kg/ha de MS por día, período 2015-2017 de campo natural (testigo) y pasturas bajo dosel por sistema (*SSFC* y *SPC*).

3.2.2.2 Proteína Cruda y Fibra Detergente Ácida

A partir del ajuste del modelo Ecuación [8], no existieron diferencias significativas para los contenidos en porcentaje de Proteína Cruda (PC) por sistema ($p > 0,05$) en cada estación de corte (Cuadro 24). En términos promedios el contenido de PC toma valores entre 9,24 a 14,49%, y 9,20 a 14,29% para *SPC* y *SSFC* respectivamente. Los máximos en contenido de PC (%) para ambos sistemas se registraron en la estación de invierno 2016 con valores que rondaron el 14%, mientras que los mínimos se registraron en la estación de verano 2016 con valores que estuvieron entre los 7,73 y 9,28% para *SSFC* y *SPC* respectivamente (Cuadro 24). Independiente del sistema y en general, no se establecieron diferencias significativas por efecto estrato (bajo y medio) para el contenido de PC (%) según estaciones de corte ($p > 0,05$) (Cuadro 25). La excepción los constituyó la estación de otoño 2015 ($p = 0,047$) e invierno 2016 ($p = 0,004$). Las pasturas bajo dosel del estrato bajo presentaron en promedio un contenido de proteína del 8,8% ($\pm 0,4207\%$) y el estrato medio de 10,9% ($\pm 0,4207\%$) para la estación de verano 2015. Para el otoño del mismo año, si bien no hubo diferencias entre sistemas, existieron diferencias significativas entre estratos ($p = 0,047$) siendo el estrato bajo de menor contenido ($8,57\% \pm 0,1131$) en relación al estrato medio ($10,72\% \pm 0,1131$). Para el invierno 2016 esta diferencia también se registró, siendo el efecto estrato significativo ($p = 0,004$), registrándose valores de 12,4% ($\pm 0,5565$) y de 16,4% ($\pm 0,5565$) para el estrato bajo y medio respectivamente.

Cuadro 24. Contenido estacional de proteína cruda (% PC) en la materia seca producida, según Sistema.

Estación	<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>
	Media PC (%) Error estándar ±	Media PC (%) Error estándar ±
Verano 2015	9,70 ± 0,42 a	10,0550 ± 0,42 a
Otoño	10,09 ± 0,11 a	9,2050 ± 0,11 a
Invierno	9,24 ± 0,17 a	9,5700 ± 0,17 a
Invierno	10,84 ± 0,38 a	12,87 ± 0,38 a
Primavera	13,98 ± 0,34 a	13,02 ± 0,34 a
Primavera	9,51 ± 0,23 a	9,29 ± 0,23 a
Verano 2016	9,29 ± 0,27 a	7,73 ± 0,27 a
Otoño	12,07 ± 0,58 a	13,32 ± 0,57 a
Invierno	14,50 ± 0,56 a	14,30 ± 0,56 a
Primavera	11,34 ± 1,13 a	14,10 ± 1,13 a
Verano 2017	10,79 ± 0,52 a	11,27 ± 0,52 a
Otoño	9,02 ± 0,37 a	9,24 ± 0,34 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada fila por estación de corte.

Cuadro 25. Contenido estacional de proteína cruda (% PC) en la materia seca producida, según Estrato.

Estación	<i>Estrato bajo</i>	<i>Estrato medio</i>
	Media PC (%) Error estándar ±	Media PC (%) Error estándar ±
Verano 2015	8,80 ± 0,42 a	10,96 ± 0,42 a
Otoño	8,57 ± 0,11 b	10,72 ± 0,11 a
Invierno	8,52 ± 0,17 a	10,29 ± 0,17 a
Invierno	10,61 ± 0,38 a	13,09 ± 0,38 a
Primavera	12,13 ± 0,34 a	14,87 ± 0,34 a
Primavera	9,79 ± 0,23 a	9,01 ± 0,23 a
Verano 2016	7,95 ± 0,27 a	9,07 ± 0,27 a
Otoño	12,47 ± 0,58 a	12,92 ± 0,57 a
Invierno	12,38 ± 0,56 b	16,41 ± 0,56 a
Primavera	12,52 ± 1,13 a	12,93 ± 1,13 a
Verano 2017	11,02 ± 0,52 a	11,04 ± 0,52 a
Otoño	8,93 ± 0,34 a	9,34 ± 0,37 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada fila por estación de corte.

Si se comparan los porcentajes de Proteína cruda por Sistemas, en algunos momentos de corte los *SSFC* superaron los *SPC* y en otros viceversa. Sin embargo, el estrato medio en ambos casos registró en general mayores porcentajes que el estrato bajo (Cuadro 25 y Figura 23).

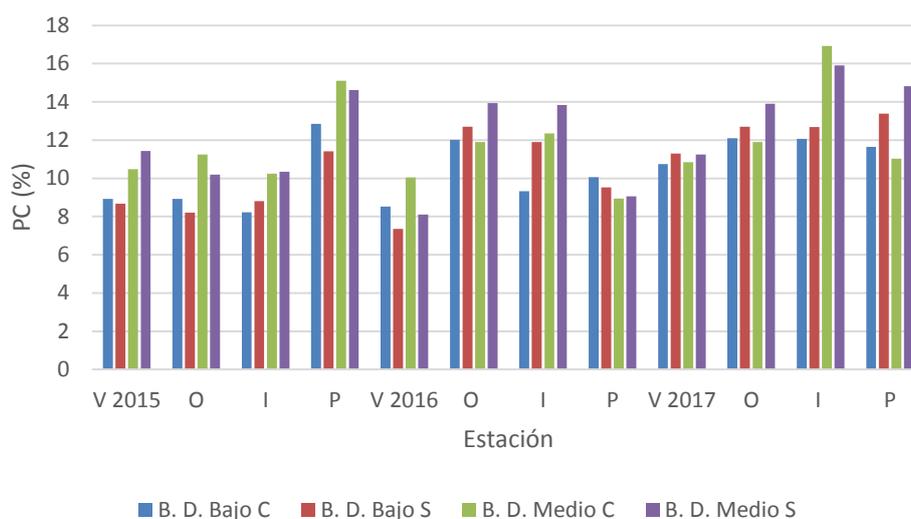


Figura 23. Evolución estacional del contenido de Proteína cruda por estrato para *SSFC* y *SPC*.

Nota: V 2015 (Verano 2015); O (Otoño); I (Invierno); P (Primavera); V 2016 (Verano 2016); V 2017 (Verano 2017); B. D. Bajo C (Bajo dosel estrato bajo convencional); B. D. Medio C (Bajo dosel estrato medio convencional); B. D. Bajo S (Bajo dosel estrato bajo silvopastoril); B. D. Medio S (Bajo dosel estrato medio silvopastoril)

Según análisis para Fibra detergente ácida (FDA%), en general no se pudieron establecer que exista en cada estación de corte diferencias significativas para sistema ($p > 0,05$), a excepción de la estación de verano 2017 ($p = 0,037$). Los valores de FDA van desde 28,62% (mínimo en otoño 2016) a 41,24% (máximo en otoño 2017) para *SPC*. Para *SSFC* el mínimo fue de 28,87% (estación de otoño 2016) y máximos de 40,86% (estación de verano 2017) (Cuadro 26). Tampoco se pudieron establecer diferencias significativas por efecto estrato en términos generales ($p > 0,05$), siendo

únicamente el verano 2017 significativo ($p = 0,0486$). Para la estación de verano 2017, el contenido de FDA fue de 40,86% y 34,09% ($\pm 1,6966$) para *SSFC* y *SPC* respectivamente. Para la misma estación el estrato bajo registró valores de 40,59% ($\pm 1,6966$) y el estrato medio de 34,36% ($\pm 1,6966$) (Cuadro 27).

Cuadro 26. Evolución estacional del contenido de FDA (%) en la MS producida según sistema.

Estación	<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>
	Media FDA (%) Error estándar \pm	Media FDA (%) Error estándar \pm
Verano 2015	35,88 \pm 0,83 a	35,78 \pm 0,83 a
Otoño	35,34 \pm 0,30 a	35,42 \pm 0,30 a
Invierno	36,41 \pm 1,87 a	36,11 \pm 1,87 a
Invierno	32,24 \pm 0,70 a	32,91 \pm 0,70 a
Primavera	30,24 \pm 0,63 a	29,75 \pm 0,63 a
Primavera	33,62 \pm 1,01 a	32,84 \pm 1,01 a
Verano 2016	40,49 \pm 2,82 a	36,75 \pm 2,82 a
Otoño	28,62 \pm 3,23 a	28,87 \pm 3,23 a
Invierno	32,64 \pm 0,88 a	33,41 \pm 0,88 a
Primavera	34,65 \pm 0,97 a	33,74 \pm 0,97 a
Verano 2017	34,09 \pm 1,69 b	40,87 \pm 1,69 a
Otoño	41,24 \pm 1,11 a	39,68 \pm 1,09 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada fila por estación de corte.

Cuadro 27. Evolución estacional del contenido de FDA (%) de la MS producida según estrato.

Estación	<i>Estrato bajo</i>	<i>Estrato medio</i>
	Media FDA (%) Error estándar ±	Media FDA (%) Error estándar ±
Verano 2015	36,82 ± 0,83 a	34,84 ± 0,83 a
Otoño	34,67 ± 0,30 a	36,11 ± 0,30 a
Invierno	35,41 ± 1,87 a	37,11 ± 1,87 a
Invierno	33,13 ± 0,70 a	32,02 ± 0,70 a
Primavera	30,84 ± 0,63 a	29,15 ± 0,63 a
Primavera	33,58 ± 1,01 a	32,89 ± 1,01 a
Verano 2016	37,07 ± 2,82 a	40,18 ± 2,82 a
Otoño	27,98 ± 3,23 a	29,51 ± 3,23 a
Invierno	33,83 ± 0,88 a	32,22 ± 0,88 a
Primavera	35,51 ± 0,97 a	32,89 ± 0,97 a
Verano 2017	40,59 ± 1,69 a	34,37 ± 1,69 b
Otoño	40,19 ± 1,11 a	40,72 ± 1,09 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada fila por estación de corte.

Como se observa en la Figura 24, para la mayoría de las estaciones, resultó en un mayor contenido de FDA (%) el forraje a cielo abierto (testigos) en relación al forraje bajo dosel, a excepción del otoño 2017 en ambos estratos (bajo y medio).

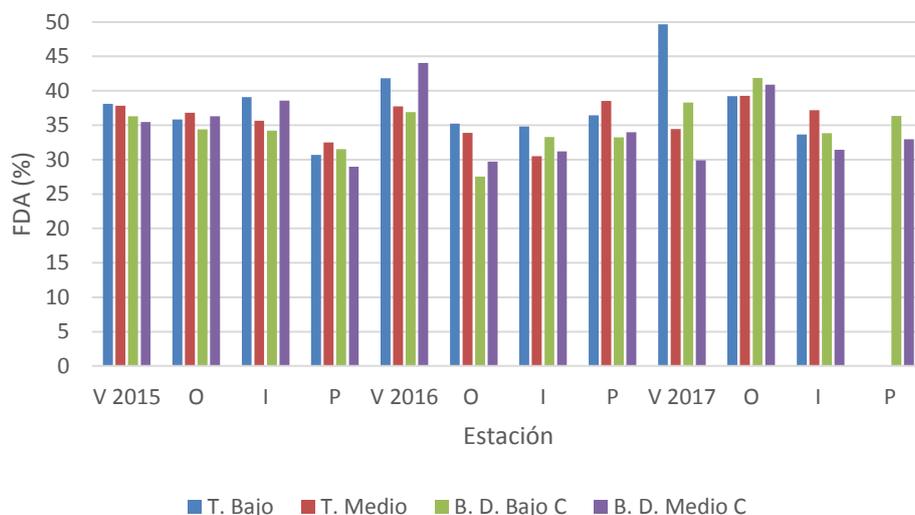


Figura 24. Evolución estacional de FDA (%) en porcentaje para *SPC* y testigos según estrato.

Nota: V 2015 (Verano 2015); O (Otoño); I (Invierno); P (Primavera); V 2016 (Verano 2016); V 2017 (Verano 2017); T. Bajo (Testigo estrato bajo); T. Medio (Testigo estrato medio); B. D. Bajo (Bajo dosel estrato bajo); B. D. Medio (Bajo dosel estrato medio)

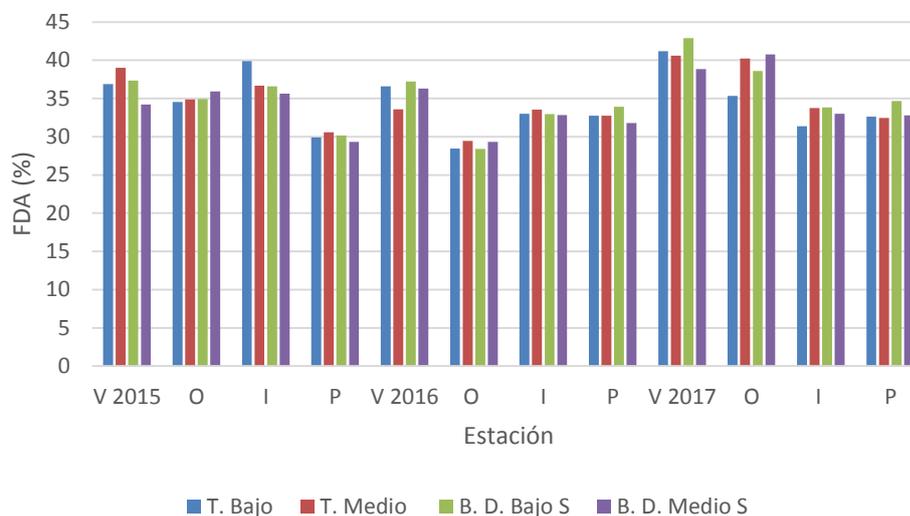


Figura 25. Evolución estacional de FDA (%) para *SSFC* y testigos según estratos.

Nota: V 2015 (Verano 2015); O (Otoño); I (Invierno); P (Primavera); V 2016 (Verano 2016); V 2017 (Verano 2017); T. Bajo (Testigo estrato bajo); T. Medio (Testigo estrato medio); B. D. Bajo (Bajo dosel estrato bajo); B. D. Medio (Bajo dosel estrato medio)

Según Figura 25, la evolución estacional de la FDA (%) para el *SSFC* y testigos presentaron valores similares. Si se compara la evolución estacional entre sistemas por estratos no se observó una tendencia en mayor o menor contenido de FDA (%) (Figura 26).

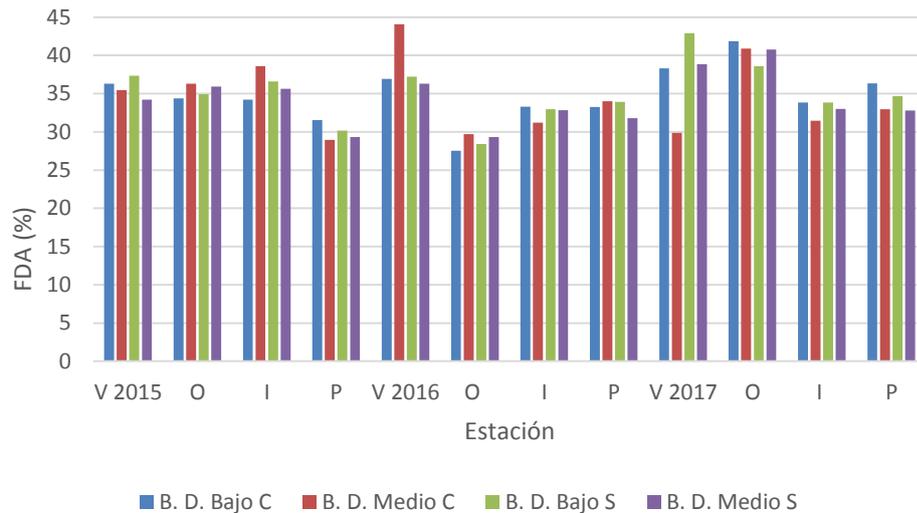


Figura 26. Evolución estacional de FDA (%) para *SSFC* y *SPC* según estratos.

Nota: V 2015 (Verano 2015); O (Otoño); I (Invierno); P (Primavera); V 2016 (Verano 2016); V 2017 (Verano 2017); B. D. Bajo C (Bajo dosel estrato bajo convencional); B. D. Medio C (Bajo dosel estrato medio convencional); B. D. Bajo S (Bajo dosel estrato bajo silvopastoril); B. D. Medio S (Bajo dosel estrato medio silvopastoril)

3.2.3 Carga ganadera que puede albergar el sistema

A partir de los datos de campo se estimó la carga ganadera (UG/ha), aplicando el concepto de carga segura (SNIA 2016), en donde PPNA, es la productividad primaria neta expresada en base estacional o diaria (kg/ha de MS). La carga segura se calcula en base al requerimiento promedio del 2 al 3% de peso vivo (380 kg) de 1 Unidad Ganadera (UG). En términos generales el *SSFC* y como era esperable, se obtuvo mayor producción de forraje lo que deriva en mayor carga ganadera (Cuadro 28).

$$\text{Carga segura (UG/ha)} = (\text{PPNA} \times 50\%) / (2\% \times 380 \text{ kg de peso vivo})$$

Ecuación [14]

Cuadro 28. Producción diaria estimada de forraje en ambos sistemas y testigo.

	kg/ha de MS		
	<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>	<i>Testigo</i>
Verano 2015	5,14	7,74	s/d
Otoño	4,25	6,06	5,17
Invierno	5,75	8,77	3,79
Primavera	4,10	7,16	5,85
Verano 2016	2,58	6,62	5,52
Otoño	2,99	4,49	4,80
Invierno	6,42	6,49	2,42
Primavera	1,73	5,08	2,35
Verano 2017	0,97	5,78	3,15
Otoño	5,14	7,74	4,76

A continuación, se presentan los valores derivados de LART de potreros con Campo natural para la zona Colinas del Este (Cuadro 29). Como se observa la producción estimada del LART es marcadamente superior a la producción resultante de los testigos (ver Cuadro 23). Para el año 2015 la producción estimada por LART fue 4.810 versus 1.830 kg/ha de MS medido a partir de las jaulas testigo. El mismo comportamiento se observó para el año 2016 (4.634 versus 1.136 kg/ha de MS). La carga ganadera segura para el *SSFC* es siempre superior al *SPC* y *testigo*.

Cuadro 29. Producción de materia seca en colinas del este según LART y carga ganadera estimada.

Año	Estación	Colinas del Este Kg/ha de MS por día	Carga ganadera según LART	<i>SPC</i>	<i>SSFC</i>	<i>Testigo</i>
2015	Verano	20,2	1,3	0,36	0,54	s/d
	Otoño	5,1	0,3	0,29	0,42	0,36
	Invierno	9,0	0,6	0,40	0,61	0,26
	Primavera	19,4	1,3	0,29	0,50	0,41
2016	Verano	14,8	1,0	0,18	0,46	0,38
	Otoño	8,0	0,5	0,21	0,31	0,33
	Invierno	10,4	0,7	0,45	0,45	0,17
	Primavera	18,2	1,2	0,12	0,35	0,16
2017	Verano	21,1	1,4	0,07	0,40	0,22
	Otoño	9,2	0,6	0,36	0,54	0,33

Nota: Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección (LART), Unidad académica de la Universidad de Buenos Aires (UBA). A partir de información de satélite obtienen datos sobre el crecimiento del campo natural a través de la estimación de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA)

3.3 RESULTADOS ECONÓMICOS FINANCIEROS DE LOS SISTEMAS

Los resultados productivos fueron utilizados para proyectar los resultados económicos-financieros. La Proyección de volumen con corteza fue realizada en función de la Ecuación [9]. Los resultados se presentan en la Cuadro 30.

Cuadro 30. Proyección de volumen con corteza por sistema a diferentes turnos de cosecha (desde 10 hasta 13 años).

	Sistema <i>SPC</i>				Sistema <i>SSFC</i>			
Edad inicial (años)	5,7				5,7			
Población inicial (pl/ha)	996				750			
DAP medio inicial (cm)	13,1				13,0			
Área basal inicial (m ² /ha)	15,1				11,3			
DAP máximo inicial (cm)	26				25			
Hdom edad inicial (m)	15				15			
Edad a turno de cosecha (años)	10	11	12	13	10	11	12	13
Producción de madera (m ³ /ha)	164,8	181,7	197,5	212,2	139,3	156	171,9	187
IMA a edad de cosecha (m ³ /ha/año)	16,5	16,5	16,5	16,3	13,9	14,2	14,3	14,4
Madera a cosechar (m ³ /ha)*	138,5	159,8	180,9	197,7	121,2	141,3	161,1	177,3
Desperdicio (%)	26,3	21,9	16,6	14,5	18,1	14,7	10,8	9,7

* Datos utilizados para los cálculos de indicadores económicos-financieros

Se realizaron proyecciones de volúmenes para ambos sistemas y diferentes turnos de cosecha, desde los 10 a los 13 años de edad del cultivo. El sistema *SPC* presenta su turno óptimo de cosecha a los 12 años de edad (180,9 m³/ha) (Figura 27), mientras que el turno óptimo de cosecha para *SSFC* es a los 13 años de edad (177,3 m³/ha) (Cuadro 30, Figura 28).

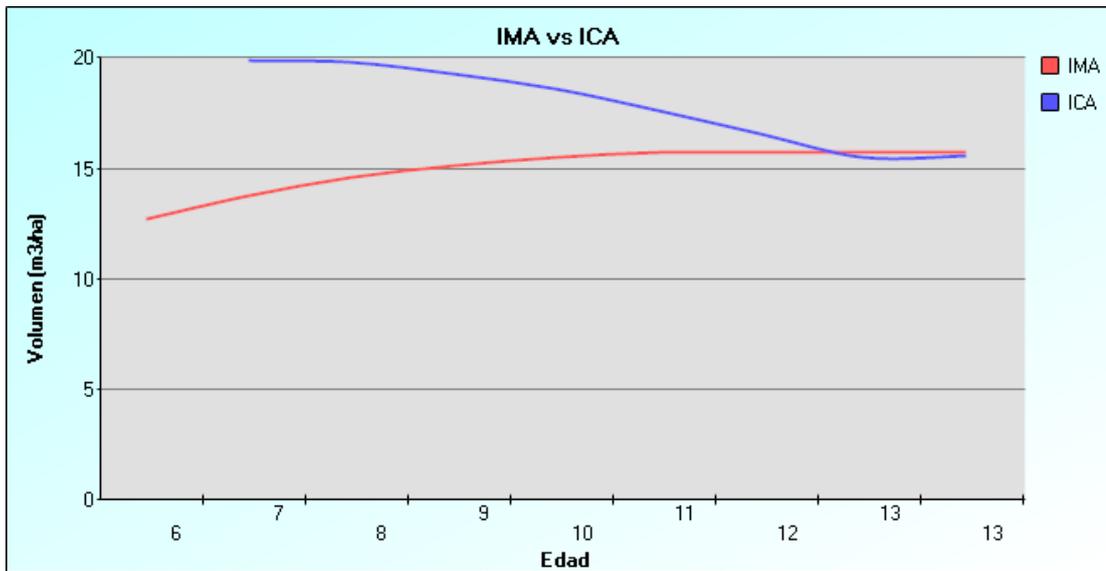


Figura 27 Gráfica de Incremento Medio Anual (IMA) versus Incremento Corriente Anual (ICA) para *SPC*.

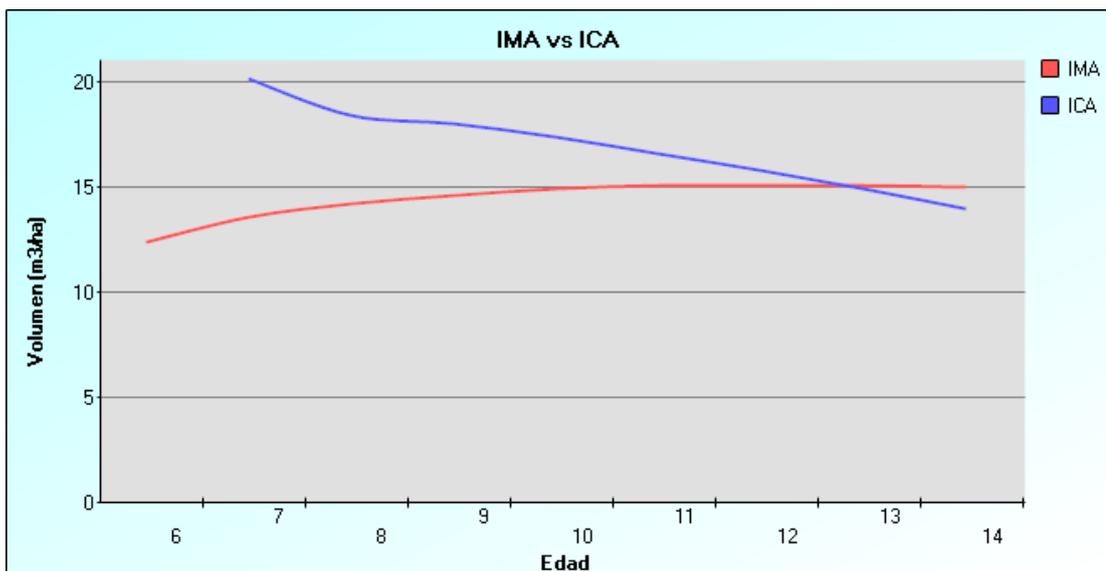
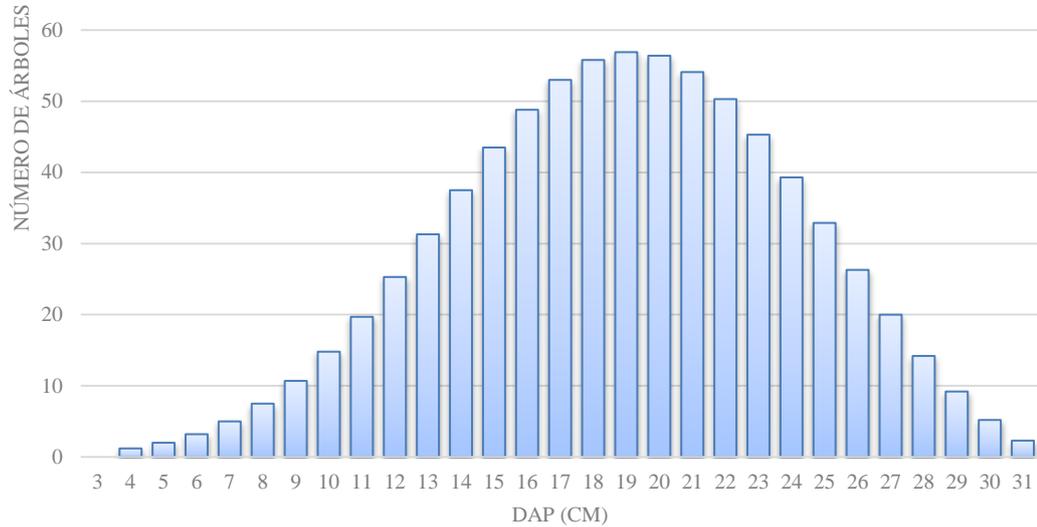


Figura 28 Gráfica de Incremento Medio Anual (IMA) versus Incremento Corriente Anual (ICA) para *SSFC*.

Distribución diamétrica de los árboles según DAP (cm) a los 12 años – *SPC*.



Distribución diamétrica de los árboles según DAP (cm) a los 13 años – *SSFC*.

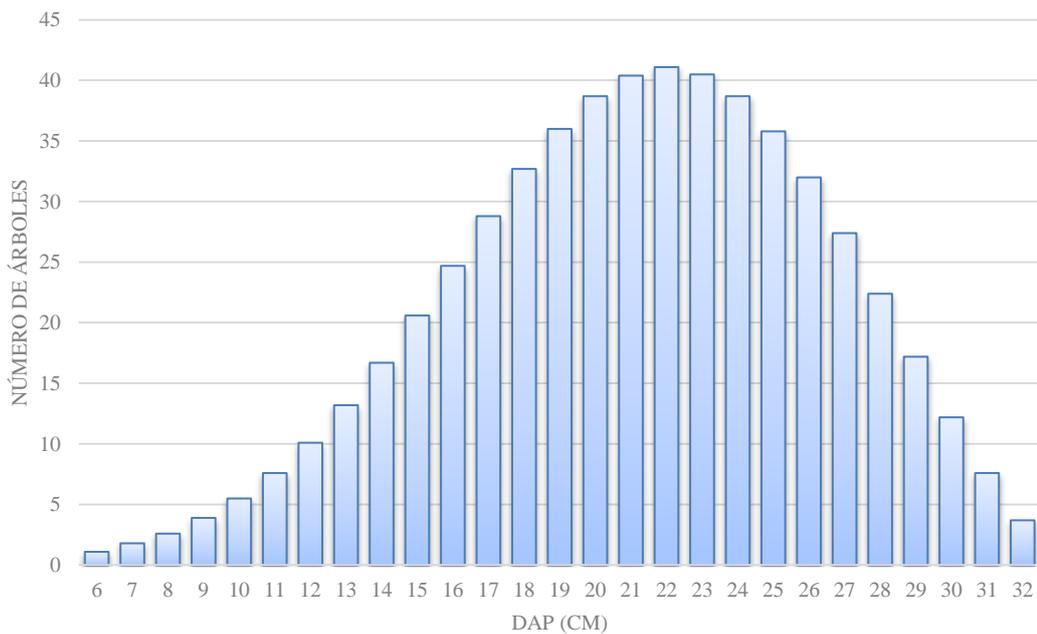


Figura 29. Distribución diamétrica según DAP (cm) pos sistema a turno de cosecha.

Para observar la distribución de la variable DAP (cm) se realizó un histograma según sistema, el cual muestra la distribución de la variable a turno final. Para el caso del *SPC* la misma se concentra entre valores intermedios entre 16 a 22 cm. Mientras que para el *SSFC* se concentran hacia valores mayores entre 20 a 26 cm (Figura 29).

Cuadro 31. Comparación entre la proyección de SAG – INIA y el cálculo de volúmenes reales a los 68 meses de edad (5,7 años).

Sistema	SPC			SSFC			
	Estrato	1	2	3	1	2	3
Edad inicial (años)		3,4	3	3	3,4	3	3
Edad final (años)		5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Volumen proyectado (m³/ha)		55,4	65,8	96,9	35,6	63,8	83,6
Volumen real (m³/ha)		64,8	91,2	113	42,5	71,6	91,7
Diferencia		9,4	25,4	16,1	6,9	7,8	8,1

Según Cuadro 31 se puede observar que si se proyecta mediante SAG-INIA los volúmenes que se obtendrían a los 68 meses de edad y se los compara con los datos reales de campo, el mismo subestima los volúmenes totales a obtener en ambos sistemas en un promedio de 17 m³/ha por debajo para el *SPC* y de 8 m³/ha para el *SSFC*. Dependiendo del sistema y el estrato las diferencias son variables. Se considera que los volúmenes simulados son válidos y que los mismos convergen a las diferencias de producción de los estratos evaluados.

A partir de las Cuadro 32 y Cuadro 33 se proyectaron los volúmenes obtenidos por sistema y estrato a considerar (Estratos 1, 2 y 3), dado que los mismos presentaron diferencias de crecimiento individual y por unidad de superficie.

Para el *SPC* el estrato 1, 2 y 3 presentaron su óptimo de cosecha a los 12 años, siendo los volúmenes de madera a cosechar de 157,4, 180,3 y 195,7 m³/ha respectivamente. Para el estrato 3 se incluyó la proyección a 11 años, sin embargo, se espera un menor volumen y mayor porcentaje de desperdicios. Los IMA esperados van desde los 14 a 18 m³/ha/año según el estrato, siendo el estrato 3 el de mejor rendimiento en comparación al estrato 1 (Cuadro 32).

Cuadro 32. Proyección de volumen cc para *SPC*.

Sistema <i>SPC</i>				
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 3
Edad inicial (años)	5,7			
Población inicial (pl/ha)	799	965	1157	
DAP medio inicial (cm)	13,2	12,8	13,2	
Área basal inicial (m ² /ha)	12,4	14,7	17,2	
DAP máximo inicial (cm)	24	30	21,5	
Hdom edad inicial (m)	13,1	15,4	16	
Edad de cosecha (años)	12	12	12	11
Producción de madera (m ³ /ha)	170,9	196,8	213,2	198
IMA a edad de cosecha (m ³ /ha/año)	14,2	16,4	17,8	18
Madera a cosechar (m ³ /ha)*	157,4	180,3	195,7	175,7
Desperdicio (%)	13,5	16,5	17,5	22,3

* Datos utilizados para los cálculos de indicadores económicos-financieros

Para el *SSFC* el estrato 1, 2 y 3 presentaron una edad de cosecha a los 13 años, siendo los volúmenes de madera a cosechar obtenidos de 126,3, 180,1 y 198 m³/ha respectivamente, con porcentajes de desperdicios que rondan el 4%. Los IMA esperados en este sistema se ubicaron entre los 10,3 a 16 m³/ha/año, siendo el estrato 1 el de menor rendimiento esperado (Cuadro 33).

Cuadro 33. Proyección de volumen cc para *SSFC*.

Sistema <i>SSFC</i>			
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
Edad inicial (años)	5,7		
Población inicial (pl/ha)	502	766	877
DAP medio inicial (cm)	13,4	12,5	13,3
Área basal inicial (m ² /ha)	8,4	11	13,4
DAP máximo inicial (cm)	28	29,9	21,3
Hdom edad inicial (m)	10,9	15,6	16,7
Edad de cosecha (años)	13	13	13
Producción de madera (m ³ /ha)	133,6	188,6	208,5
IMA a edad de cosecha (m ³ /ha/año)	10,3	14,5	16
Madera a cosechar (m ³ /ha)*	126,3	180,1	198
Desperdicio (%)	7,3	8,5	10,5

* Datos utilizados para los cálculos de indicadores económicos-financieros

La edad de cosecha está determinada por el óptimo técnico y el óptimo financiero. Se utilizaron los indicadores económicos-financieros como ser: VAN (Ecuación [10]), TIR (Ecuación [11]), Valor esperado del suelo (Ecuación [12]) y Renta equivalente Anual (Ecuación [13]).

El costo de oportunidad utilizado para el cálculo de los indicadores financieros fue de 5% y 8%. El precio de la madera en pie asume los siguientes precios: *E. globulus* entre 21-23 US\$/m³ dependiendo del sistema (*SPC* 23 US\$/m³ y *SSFC* 21 US\$/m³). Las diferencias son debidas a los costos de cosecha y su logística, así como mayor uso de mano de obra.

La cosecha se proyecta utilizando maquinaria (Harvester+Forwarder). Los costos de cosecha y extracción se estimaron según el sistema en *SPC* 18 US\$/m³ y *SSFC* 19 US\$/m³. El costo del flete se calculó para 250 km a un precio de 0,1 US\$/km/ton.

Se realizaron proyecciones de carga ganadera segura por sistema que se presentan en base a la Cuadro 28, que se incluyen a partir del año 2 de instalación del cultivo forestal. Se estimó una carga ganadera por hectárea año que van para *SSFC* de 0,65 hasta el quinto año del cultivo forestal, luego de 0,6 año 6 y 7, y a partir del octavo año de 0,5 UG/ha. Mientras que para *SPC* al segundo y tercer año de 0,4, entre el cuarto y séptimo año de edad del cultivo forestal de 0,3 y al finalizar el ciclo de 0,2 UG/ha. Los valores de margen bruto ganadero bajo dosel para *SPC* van desde 13 a 26 US\$/ha mientras que para *SSFC* desde 32 a 42 US\$/ha; dependiendo de la carga ganadera que se va reduciendo a medida que la plantación forestal se desarrolla en el tiempo. Para zona libres del cultivo forestal se estimó un margen bruto ganadero de 50 US\$/ha.

El *SPC* es el sistema más denso con una densidad inicial teórica de 1250 arb/ha aproximadamente, por lo que la carga ganadera es más baja que el otro sistema y tiende a disminuir aún más hacia el momento de turno final. El sistema con mayor carga proyectada fue el *SSFC* dado que su distribución en el espacio permite albergar más carga por una mayor disponibilidad de forraje.

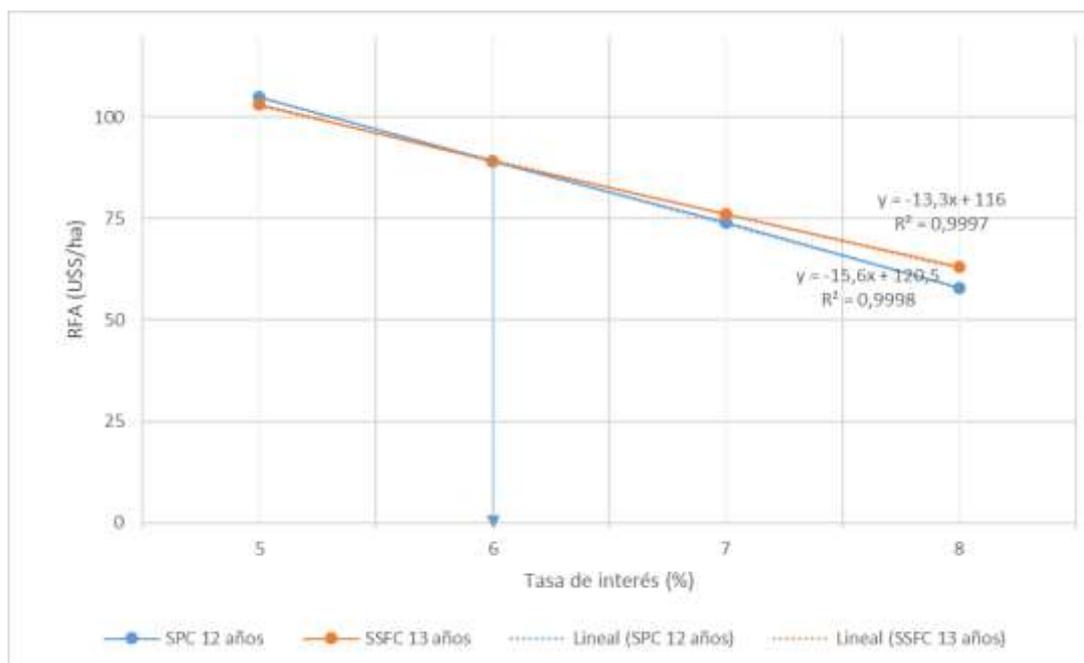
Para los cálculos se asumieron módulos de 50 ha en donde el porcentaje efectivo de cultivo forestal es del 75% del área total, y el ganado ingresa a partir de los 2 años del cultivo forestal. Así mismo se asumió que al año de cosecha el ganado debe ser retirado del área a cosechar. Otro aspecto a considerar que la renta es calculada sobre el área afectada a la forestación y no sobre el área efectiva del cultivo forestal.

Del Cuadro 34 al Cuadro 41, se presentan los resultados de los indicadores económicos financieros de cada sistema, y de cada sistema por estrato de producción, con distintas tasas de interés (5 y 8%). Los Cuadros resultantes se diferencian en si se

considera sólo forestación en áreas afectadas o efectivas, y forestación con ganado bajo dosel y en cortafuegos.

Según Cuadro 34, se puede observar que el mayor retorno por sistema es a los 12 años de edad y 13 años de edad de cosecha para *SPC* y *SSFC* respectivamente. Los resultados financieros al 5% de tasa de interés son mayores para el *SPC* siendo el VES de 2097 US\$/ha y RFA de 105 US\$/ha, mientras que para el *SSFC* el VES fue de 2058 US\$/ha y RFA de 103 US\$/ha. Ambas propuestas fueron rentables y viables en términos económicos financieros. A pesar de que en los valores de VAN existen diferencias, la inversión inicial fue de menor costo en los sistemas *SSFC* y no se pierde área de pastoreo. Si comparamos el VES y RFA por sistema al 5% de tasa de interés el *SPC* representa un 2% más en ambos indicadores en comparación con el *SSFC*. Si lo llevamos al 8% estos valores disminuyen considerablemente siendo el VES y RFA de 731 y 792 US\$/ha y 58 y 63 US\$/ha, para *SPC* y *SSFC* respectivamente (Cuadro 37), siendo mejor optar por el *SSFC*. El punto de equilibrio esta en una tasa de interés del 6%, donde aumentando la misma tiene un mejor rendimiento económico-financiero el *SSFC* (Figura 30).

Figura 30 Punto de equilibrio para tasa de interés.



Cuadro 34. Resultados financieros para forestación, ganadería bajo dosel y cortafuegos sobre área afectada de TIR, VAN, VES y RFA al 5% para los dos Sistemas.

Año de cosecha	<i>SPC</i>				<i>SSFC</i>			
	10	11	12	13	10	11	12	13
TIR (%)	11,6	12	12,1	11,9	13,1	13,5	13,6	13,4
VAN (US\$/ha)	659	803	930	1003	632	817	923	967
VES (US\$/ha)	1706	1934	2097	2134	1775	1967	2083	2058
RFA (US\$/ha)	85	97	105	107	89	98	104	103
Volumen cosechado (m ³ /ha)	138,5	159,8	180,9	197,7	121,2	141,3	161,1	177,3

Según Cuadro 35 y Cuadro 36, se detallan los resultados de los indicadores considerando únicamente el área afectada y efectiva de plantación con una tasa de descuento del 5%. Los resultados para área afectada indican que para el *SPC* se obtiene a los 12 años de edad un RFA y VES de US\$/ha 83 y US\$/ha 1659, respectivamente. Mientras que, para el mismo sistema y año de cosecha, el RFA y VES considerando área efectiva de plantación es de US\$/ha 2212 y US\$/ha 111, respectivamente. Para el *SSFC*, a los 13 años de edad un RFA y VES de US\$/ha 1410 y US\$/ha 71, respectivamente considerando el área afectada a la forestación. Si se considera área efectiva de plantación a la misma edad de cosecha, el RFA y VES es de US\$/ha 1906 y US\$/ha 95, respectivamente.

Cuadro 35. Resultados financieros sólo forestación en área afectada de TIR, VAN, VES y RFA al 5% para los dos Sistemas.

Año de cosecha	<i>SPC</i>				<i>SSFC</i>			
	10	11	12	13	10	11	12	13
TIR (%)	9,9	10,3	10,5	10,4	9,8	10,4	10,6	10,5
VAN (US\$/ha)	491	622	735	796	417	530	620	662
VES (US\$/ha)	1271	1497	1659	1694	1080	1277	1399	1410
RFA (US\$/ha)	64	75	83	85	54	64	70	71
Volumen cosechado (m ³ /ha)	138,5	159,8	180,9	197,7	121,2	141,3	161,1	177,3

Cuadro 36. Resultados financieros sólo forestación en área efectiva de TIR, VAN, VES y RFA al 5% para los dos Sistemas.

Año de cosecha	<i>SPC</i>				<i>SSFC</i>			
	10	11	12	13	10	11	12	13
TIR (%)	9,9	10,3	10,5	10,4	9,8	10,4	10,6	10,5
VAN (US\$/ha)	654	829	980	1061	521	680	816	895
VES (US\$/ha)	1695	1996	2212	2259	1350	1637	1841	1906
RFA (US\$/ha)	85	100	111	113	68	82	92	95
Volumen cosechado (m ³ /ha)	138,5	159,8	180,9	197,7	121,2	141,3	161,1	177,3

Cuadro 37. Resultados financieros para forestación, ganadería bajo dosel y cortafuegos en área afectada de TIR, VAN, VES y RFA al 8% para los dos Sistemas.

Año de cosecha	<i>SPC</i>				<i>SSFC</i>			
	10	11	12	13	10	11	12	13
TIR (%)	11,6	12	12,1	11,9	13,1	13,5	13,6	13,4
VAN (US\$/ha)	305	382	440	458	364	440	493	501
VES (US\$/ha)	568	669	731	724	679	770	818	792
RFA (US\$/ha)	45	53	58	58	54	62	65	63
Volumen cosechado (m ³ /ha)	138,5	159,8	180,9	197,7	121,2	141,3	161,1	177,3

Según Tabla 38 y Tabla 39, se detallan los resultados de los indicadores considerando únicamente el área afectada y efectiva de plantación con una tasa de descuento del 8%. Los resultados para área afectada indican que para el *SPC* se obtiene a los 12 años de edad un VES y RFA de US\$/ha 455 y US\$/ha 36, respectivamente. Mientras que, para el mismo sistema y año de cosecha, el VES y RFA considerando área efectiva de plantación es de US\$/ha 607 y US\$/ha 49, respectivamente. Para el *SSFC*, a los 13 años de edad un VES y RFA de US\$/ha 385 y US\$/ha 31, respectivamente considerando el área afectada a la forestación. Si se considera área efectiva de plantación a la misma edad de cosecha, el RFA y VES es de US\$/ha 520 y US\$/ha 42, respectivamente.

Tabla 38. Resultados financieros sólo para forestación en área afectada de TIR, VAN, VES y RFA al 8% para los dos Sistemas.

Año de cosecha	<i>SPC</i>				<i>SSFC</i>			
	10	11	12	13	10	11	12	13
TIR (%)	9,9	10,3	10,5	10,4	9,8	10,4	10,6	10,5
VAN (US\$/ha)	159	225	275	283	132	194	236	243
VES (US\$/ha)	296	395	455	448	245	340	392	385
RFA (US\$/ha)	24	32	36	36	20	27	31	31
Volumen cosechado (m ³ /ha)	138,5	159,8	180,9	197,7	121,2	141,3	161,1	177,3

Tabla 39. Resultados financieros sólo para forestación en área efectiva de TIR, VAN, VES y RFA al 8% para los dos Sistemas.

Año de cosecha	<i>SPC</i>				<i>SSFC</i>			
	10	11	12	13	10	11	12	13
TIR (%)	9,9	10,3	10,5	10,4	9,8	10,4	10,6	10,5
VAN (US\$/ha)	212	301	366	378	165	249	311	329
VES (US\$/ha)	394	526	607	598	307	435	515	520
RFA (US\$/ha)	32	42	49	48	25	35	41	42
Volumen cosechado (m ³ /ha)	138,5	159,8	180,9	197,7	121,2	141,3	161,1	177,3

Como un segundo análisis de los indicadores financieros se realizó la proyección por estrato según sistemas (Cuadro 40, Cuadro 41) al 5 y 8% de interés en cada caso. Para todos los casos, el estrato 3 supera los demás para los indicadores financieros propuestos.

Cuadro 40. Resultados financieros por estrato para forestación y ganadería bajo dosel y cortafuegos de TIR, VAN, VES y RFA al 5% para los dos Sistemas.

Estrato	<i>SSFC</i>			<i>SPC</i>		
	1	2	3	1	2	3
Año de cosecha	13	13	13	12	12	12
TIR (%)	11,2	13,6	14,4	10,8	12,1	12,8
VAN (US\$/ha)	624	1003	1148	711	924	1067
VES (US\$/ha)	1328	2135	2445	1605	2085	2408
RFA (US\$/ha)	66	107	122	80	104	120
Volumen cosechado (m ³ /ha)	133,6	180,1	198	157,4	180,3	195,7

El estrato 3 da mejores resultados económicos –financieros que del estrato 1 y 2 para ambos sistemas. Si se compara el *SPC* el estrato 3 presentó valores de VES y RFA de 2569 y 128 US\$/ha a una edad de cosecha de 12 años. Estos valores están por encima de los demás estratos 1 y 2 en el orden 33% y 13% para VES y RFA respectivamente. En el caso del *SSFC* a los 13 años de cosecha se obtuvieron valores de VES y RFA menores en el estrato 1 y 2, siendo estos del orden 45% y 13% respectivamente. Las diferencias en ambos indicadores fueron más notorias en el *SSFC* que para el *SPC*. A pesar de los resultados obtenidos por estrato y sistema, todas las combinaciones son viables y rentables en términos económicos-financieros.

Cuadro 41. Resultados financieros (forestación y ganadería bajo dosel y en cortafuegos) de TIR y VAN, VES y RFA al 8% para los dos Sistemas y Estratos.

Estrato	<i>SSFC</i>			<i>SPC</i>		
	1	2	3	1	2	3
Año de cosecha	13	13	13	12	12	12
TIR (%)	11,2	13,6	14,4	10,8	12,1	12,8
VAN (US\$/ha)	263	526	627	285	437	539
VES (US\$/ha)	417	832	992	472	724	893
RFA (US\$/ha)	33	67	79	38	58	71
Volumen cosechado (m ³ /ha)	133,6	180,1	198	157,4	180,3	195,7

4. DISCUSIÓN

4.1 PRODUCCIÓN DE MADERA

El trabajo que tuvo como objetivo evaluar las diferencias de crecimiento a nivel individual y poblacional a nivel de sistemas, incluyó la estratificación en el análisis para una mejor interpretación de los resultados. Al respecto se pudieron establecer diferencias significativas por efecto estrato en DAP para todos los meses ($p < 0,05$) hasta a los 51 meses de edad ($p > 0,05$), mientras que para H presenta diferencias significativas por dicho efecto ($p < 0,01$) para todos los meses evaluados. La variable sobrevivencia resultó ser significativo a partir de los 41 meses de edad del cultivo ($p < 0,01$). Estos resultados reflejan la heterogeneidad entre los estratos, lo que podría equivaler a la calidad de sitio forestal como es citado ampliamente en bibliografía forestal; como aconseja Sorrentino (2000), es conveniente la estratificación ya que refleja el potencial y calidad forestal según la posición topográfica en el terreno. Esto tiene consecuencias cuando se planifica los sistemas Silvopastoriles, ya que los resultados productivos-económicos varían en función del estrato. Por encima de los sistemas forestales adaptados se debe planificar tratando de optimizar tanto la producción forestal y ganadera. En términos promedios, se registraron mayores crecimientos tanto en *SPC* y *SSFC* para DAP en el estrato 3, seguido por el 2 y finalmente con menores valores en el estrato 1 en cada mes.

Para el marco de plantación (*SPC* y *SSFC*) no existieron diferencias significativas para las variables DAP y H ($p > 0,05$) en cada uno de los meses en evaluación, así como tampoco existe interacción Sistema×Estrato ($p > 0,05$). La variable sobrevivencia de árboles, tampoco mostró diferencias significativas entre sistemas, así como tampoco que exista interacción Sistema×Estrato ($p > 0,05$) para cada uno de los meses.

Los espaciamientos evaluados se traducen en un área útil por árbol (m^2/planta) de 8 m^2 y 10 m^2 para *SPC* y *SSFC* respectivamente. Los trabajos de Alves *et al.* 2014, Henskens *et al.* 2001 y Bernardo *et al.* 1998, señalan que árboles con mayor área útil resultan en mayor crecimiento individual en DAP, sin embargo, en los sistemas evaluados no existen tales diferencias. Esto se pueda deber a que las densidades de los sistemas evaluados (1.000 a 1.200 arb/ha) varían en un rango más estrecho que los analizados por estos autores: 100 a 3.000 arb/ha, lo que equivale a una superficie de 100 a $3,3 \text{ m}^2/\text{arbol}$. Esto puede explicar que no se hayan encontrado diferencias por espaciamiento como los trabajos antes citados.

Si se analizan resultados poblacionales, tanto para las variables área basal (m^2/ha) como Volumen total con corteza (m^3/ha) existieron diferencias significativas por efecto sistema (*SPC* y *SSFC*) y estratos ($p < 0,05$), para cada uno de los meses evaluados. Sin embargo en ambas variables no se pudo establecer que exista interacción Sistema \times Estrato ($p > 0,05$). El único mes donde no se pudo establecer diferencias significativas ($p > 0,05$) para volumen por unidad de superficie por efecto sistema fue a los 36 meses, dado que el nivel de sobrevivencia por sistema no fue significativo.

Para altura media de los árboles dominantes, no se pudieron establecer diferencias significativas entre sistemas (*SPC* y *SSFC*), así como tampoco que exista interacción Sistema \times Estrato ($p > 0,05$) para cada uno de los meses evaluados. Sin embargo, se pueden establecer diferencias significativas por el efecto estrato en cada uno de los meses evaluados ($p < 0,01$).

Por lo tanto y dado que no hubo efectos de marco de plantación sobre DAP y H en el crecimiento individual entre sistemas, la diferencia de producción de madera por unidad de superficie (m^3/ha) entre los *SPC* y *SSFC* podrían explicarse por el efecto de la densidad de plantación por unidad de superficie (arb/ha). Al ser esta una variable resultante del volumen individual con corteza y de la densidad del rodal, es de esperar estos resultados. Según Alves *et al.* 2014, Henskens *et al.* 2001, Bernardo

et al. 1998, el volumen por hectárea puede registrar mayores valores en plantaciones de alta densidad dado el efecto de una mayor cantidad de árboles por hectárea. Mientras que las diferencias observadas para volumen por unidad de superficie cc por estrato no sólo son atribuidas a la densidad registrada por cada uno (arb/ha), sino que también a diferencias significativas ($p < 0,05$) para la variable altura total entre los mismos.

Las características de los suelos difieren en la zona de estudio, por lo que las diferencias de crecimiento y rendimiento por estratos para el componente arbóreo podrían explicarse por tales efectos. Como ya fue mencionado, existen diferencias en propiedades edáficas, materiales parentales y posición topográfica local; estos son elementos del paisaje que inciden en el rendimiento de madera y productividad del pastizal. La zona se ubica en un relieve general pronunciado, con sierras, lomadas fuertes y colinas, que contienen zonas de interfluvio (parte alta), laderas medias y bajos, principalmente próximo a las vías de escurrimiento. Los bajos rendimientos en el estrato bajo se pueden explicar porque la principal limitante de esos suelos es el hidromorfismo dado su estado permanente o temporal de saturación de agua, que, a su vez, recibe el agua de las laderas medias e interfluvios; lo que condiciona la vegetación herbácea y arbórea (número de árboles y producción de madera). Como mencionado en Prichett (1986), las especies del género *Eucalyptus* pueden verse afectados en zonas con drenaje imperfecto. Así mismo, las plantaciones ubicadas en el estrato bajo son más susceptibles a heladas lo que podría resultar en un menor rendimiento de madera y mayor mortandad de individuos. Como es reportado por Ravera (2002) y Brussa (1994) la especie *E. globulus* presenta mayor susceptibilidad a eventos climáticos extremos. A esto se le suma, la susceptibilidad a la enfermedad conocida como mancha foliar por *Teratosphaeria nubilosa* como menciona Balmelli (2014), lo que se constató para ese estrato a campo.

En el estrato alto, se registraron los mayores rendimientos, dado que en su mayoría el interfluvio tiene recubrimientos de escaso espesor de lodolita. El basamento cristalino bajo arcilla se vio más alterado y por lo tanto se infiere mayor

desarrollo radicular por mayor profundidad del suelo. Lo que también podría estar ligado a que son suelos con buena capacidad de retención de agua, profundos, texturas medias y bien drenados como menciona Brussa 1994 citado por Prieto González (2011). En algunos sitios a pesar de tener altos contenidos de materia orgánica, horizonte A profundos se registraron bajas producciones debidas al hidromorfismo.

En el estrato bajo se debería analizar la posibilidad de cultivar otras especies forestales que tuvieran mayor resistencia a heladas y anegamientos temporales. Como considera Brussa (1994), citando a *Eucalyptus camaldulensis* y *Eucalyptus tereticornis*, estas podrían ser especies adaptadas a dichas condiciones, sin embargo, se han registrado problemas sanitarios a nivel nacional.

Para futuros trabajos es recomendable considerar parcelas rectangulares que alberguen entre 25 a 40 individuos y ajustar el número de parcelas de acuerdo al coeficiente de variación y error aceptable por estratos. Si se considera el volumen individual por estrato con un error de muestreo menor al 10%, se debería ajustar a 20 y 17 parcelas para *SSF* y *SPC* respectivamente.

Por último, realizar estos ajustes permitirá obtener mejor información sobre resultados productivos y económicos de la producción combinada forestal-ganadera, lo que permitirá hacer mejores recomendaciones según los sitios donde se desarrollan estos sistemas.

4.2 PRODUCCIÓN FORRAJERA

Existen trabajos que demuestran diferencias marcadas para materia seca entre algunas gramíneas debido a factores como la época, precipitaciones, la calidad y cantidad de radiación solar incidente al estrato herbáceo, a la implementación de especies mejoradas o la asociación con especies leñosas o leguminosas (Paciullo *et al.* 2010, Rakocevic *et al.* 2002, Serrano *et al.* 2014). El sistema *SPC* presentó una menor producción de forraje posiblemente influenciado por la mayor densidad de árboles que generaron un incremento en el sombreado afectando la producción de materia seca al igual que lo mencionado por Baruch y Guenni (2007). En términos promedios la producción de materia seca fue un 42% superior en callejones (*SSFC*) respecto al convencional (*SPC*) entre los 42 a 67 meses de edad del cultivo forestal. Si bien Neme y Terzieff (2002) no encontraron diferencias en producción forrajera entre el primer y cuarto año de plantación bajo dosel y a campo abierto; es de destacar que las diferencias podrían ocurrir a partir de los cuatro años de edad como fue encontrado en este trabajo. Independientemente del sistema, el estrato bajo del terreno tuvo una producción promedio mayor que el estrato medio. El estrato bajo es mejor en general que el medio y aparentemente siempre en una proporción semejante.

Es de destacar que *Eucalyptus globulus* es una especie forestal con una copa poco densa y escaso follaje lo cual se traduce en un menor sombreado bajo dosel, lo que favorece el crecimiento del tapiz herbáceo. A su vez, en el *SSFC* la producción de materia seca fue mayor que los testigos. Esto podría indicar que los sistemas con producción de sombra moderada contribuyen a mejorar los rendimientos productivos en las pasturas (Paciullo, 2010).

La producción promedio estacional de forraje encontrada en campo natural a cielo abierto fue inferior a los datos promedios encontrados por Ayala *et al.*, (1993) para la Unidad Sierras de Polanco en pasturas naturales. Por otro lado, el comportamiento de producción forrajera estacional del testigo presentó producción

máxima en otoño y verano, con caídas en invierno al igual que el trabajo de Ayala *et al.*, (1993). Si comparamos el comportamiento por sistema, este varió respecto al testigo, siendo la producción máxima en otoño y primavera. Independientemente de la estación, el **SSFC** siempre estuvo por encima de producción que el **SPC** y testigo, con una caída de producción en invierno y verano no tan notoria como los demás sistemas.

Para el caso de la proteína cruda (%) no se pudo evidenciar diferencias entre los **SPC** y **SSFC**, sin embargo, estos valores son ligeramente mayores que los presentados por los testigos. Los valores de calidad de pasturas obtenidos por De Souza (1985) para pasturas naturales sin cultivo forestal coinciden de forma parcial con los valores promedios encontrados por estación en ambos sistemas. En este sentido los datos promedios para pasturas naturales van desde los 8,1 (valor mínimo) a 14% (valor máximo), siendo los mínimos encontrados por sistema superiores en **SPC** y menores para **SSFC**. Por otro lado, los mínimos de contenido de PC (%) en general fueron en las estaciones de verano y los máximos en las estaciones de invierno en ambos sistemas, lo que coincide con lo registrado por De Souza (1985). Existen muchas causas que pueden explicar esta mejora en la calidad, una de ellas es que las pasturas bajo sombra tienden a ser fisiológicamente más jóvenes prolongando la fase vegetativa (Sousa *et al.*, 2010), o debido a que en estas condiciones se incrementa el nitrógeno soluble total, por la acumulación de nitratos en las hojas como señala Pentón y Blanco (1997). De igual forma se puede observar que los niveles de FDA son mayores en los testigos que en los sistemas **SPC** y **SSFC**, lo cual incide en la capacidad de ingestión y digestibilidad de las especies forrajeras (Serrano *et al.*, 2014). Respecto a las especies de las familias más notorias del tapiz herbáceo tanto fuera como bajo dosel fueron Poaceae y Asteraceae, lo que coincide con lo registrado por Altesor et al (2011) para la región Sierras del Este (Unidad de Polanco) y Silveira (2015) para la región Noreste.

4.3 INDICADORES ECONÓMICOS-FINANCIEROS

Para las proyecciones de volúmenes se trabajó con el SAG-INIA que subestimó los rendimientos, en todos los casos el volumen con corteza obtenido a campo fue superior a los volúmenes proyectados.

En cuanto a los resultados económicos-financieros ambas inversiones son viables y rentables, siendo el turno de corte óptimo en términos técnicos y económicos de 12 y 13 años para *SPC* y *SSFC* respectivamente. Para el primer sistema se obtuvo una TIR en el entorno del 12%, mientras que para el segundo arreglo del 13%, con VAN superiores a cero ya que la tasa de descuento fue del 5%, siendo mayor el valor para *SPC*, lo que coincide con los valores de rentabilidad obtenidos por Cubbage *et al.* (2014) sin considerar el costo de la tierra. Para el caso del VES y RFA este último sistema obtuvo valores del 2% superior que el sistema *SSFC* a una tasa de interés del 5%, con lo que coincide con los resultados obtenidos Lacorte *et al.* (2016). Si bien son dos sistemas para producción de pulpa, el sistema *SPC* obtiene mayor volumen de madera por unidad de superficie (m^3/ha) y por lo tanto en la ecuación final en este caso se obtiene un mayor retorno económico. Los valores de retorno económico varían con la tasa de interés considerada. El aumento en la tasa de interés mejora el resultado económico financiero para el *SSFC*. Estos resultados son una combinación del punto de equilibrio que se encuentra a una tasa de interés del 6%, y que, a su vez, el *SSFC* tiene mayores retornos ganaderos a lo largo de todo el periodo, lo que adelanta ingresos traduciéndose en una mejora de la renta forestal en comparación al *SPC*.

Si lo llevamos a una tasa de interés del 8% estos valores disminuyen considerablemente siendo el VES y RFA de 731 y 792 US\$/ha y 58 y 63 US\$/ha, para *SPC* y *SSFC* respectivamente, siendo mejor optar por el *SSFC*.

Los sitios forestales, determinan la viabilidad financiera de los sistemas. En este sentido, el estrato 3 en comparación con los estratos 1 y 2, es el que obtiene un

mejor rendimiento económico-financiero en ambos sistemas, y por el contrario el estrato 1 de los más bajos.

Con los resultados productivos y económicos obtenidos se podría definir que los estratos 2 y 3 en ambos sistemas son óptimos para la producción forestal y ganadera conjunta. Sin embargo, el estrato 1 podría ser destinado únicamente a la producción ganadera, mejorando los resultados globales del establecimiento.

Estos resultados nos permiten reflexionar sobre las ventajas de diseñar plantaciones que optimicen el uso del espacio y mejoren el aprovechamiento de los recursos para una mejor integración con la producción pecuaria.

Por otro lado, si bien los *SSFC* en este caso no resultaron en un mejor rendimiento económico-financiero con una tasa de interés del 5% comparado con *SPC*, a partir de este trabajo se revela sus ventajas en la producción forrajera y mayores beneficios para la ganadería.

Se debe crear nuevas líneas de trabajo con el objetivo de obtener otros tipos de productos (madera para aserrío, debobinado) los cuales logren mayor valor al momento de la comercialización y que permitan compensar la baja densidad de árboles por superficie. En este contexto, se debería realizar manejos silvícolas intermedios durante el ciclo del cultivo forestal - podas y raleos – lo que determina un sistema más complejo en términos productivos, pero con mayor valor agregado en sus productos. Este manejo también favorecería a la producción de forraje bajo dosel lo que se traduciría en una mayor carga animal en el sistema.

5. CONCLUSIONES

No se observaron diferencias en el crecimiento individual de los árboles entre sistemas, siendo la producción de madera por unidad de superficie mayor en el sistema convencional por el efecto densidad. Los resultados demuestran que en general no existe efecto del marco de plantación para la producción de madera entre los sistemas evaluados, siendo el efecto posición topográfica el más importante para explicar diferencias.

Los sistemas de producción con callejones permiten obtener mayor producción de forraje, traduciéndose en beneficios para el componente ganadero en relación a los sistemas convencionales. Por lo tanto, el marco de plantación tuvo efecto en la producción forrajera para las edades evaluadas.

Para los sistemas evaluados, la producción convencional (*SPC*) obtuvo resultados económicos-financieros, tanto al 5% como al 8% de interés, superiores al sistema de callejones (*SSF*). Sin embargo, cuando se considera el ingreso por ganadería, el *SSF* pasa a ser superior a una tasa de interés del 8%, por lo que se podría concluir que sistema en callejones son más convenientes para la producción ganadera que integra la forestación.

Sería importante continuar trabajando en sistemas que integren y combinen durante el ciclo forestal podas y raleos, lo que permitirá generar otros productos madereros con mayor valor agregado (trozas para aserrío y debobinado) para el sector ganadero.

Asimismo, se deben continuar evaluando sistemas en diferentes regiones del país con diferentes marcos de plantación y especies forestales de forma de contar con información complementaria a este trabajo.

Este trabajo incorpora información detallada de campo y realiza un seguimiento temporal de los componentes del sistema. Es esperable que sus resultados aporten a la discusión de otros trabajos y permitan avanzar hacia modelos integrados de forestación y ganadería. Esto mejorará la permanencia y la rentabilidad de productores ganaderos familiares en el sector agropecuario.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Almada AE, Garat ÁR. 2010. Evaluación del crecimiento de leguminosas forrajeras bajo un monte de *Eucalyptus globulus ssp globulus*. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía, 107 p. Consultado el 5 mar. 2018. Disponible en: <http://biblioteca.fagro.edu.uy/iah/textostesis/2010/3607alm.pdf>
- Altesor A, Ayala W, Paruelo JM. 2011. Bases ecológicas y Tecnológicas para el manejo de pastizales. Montevideo, Uruguay. Serie: FPTA N° 26, INIA. Pp 23-26.
- Alvarez J, Falcao O. 2011. Manual de Gestión de Empresas Agropecuarias. 2ª Edición Corregida y aumentada. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía, UdelaR. Departamento de Publicaciones de la Facultad de Agronomía, UdelaR.
- Alves DHA, Dos Santos Leles PS, Cabrera E, Marques A, Abilio F. 2014. Crecimiento de clone de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* em diferentes espaçamentos. Curitiba, PR. Revista Floresta. v. 44, n. 3, p. 431 - 440.
- AOAC International. 1990. Official Methods of Analysis. 15,167.03. edited by AOAC Internacional (formerly the Association of Oficial Analytical Chemists). Arlington, VA.
- Atangana A, Khasa D, Chang S, Degrande A. 2014. Agroforestry for soil conservation. En Tropical agroforestry, pp. 203-216. Springer.
- Ayala W, Carriquiriy E, Carámbula M. 1993. Caracterización y estrategias de utilización de pasturas naturales en la Región Este. In: Campo natural: Estrategia invernal. Manejo y suplementación. INIA Treinta y Tres. Serie Actividades de Difusión 49. Pp. 1-28.

- Balmelli G. 2014. Impacto de *Mycosphaerella* en Uruguay y variabilidad genética para resistencia a la enfermedad en *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus maidenii*. Tesis de Doctorado. Valladolid, España. Universidad de Valladolid. 136 p.
- Baruch Z, Guenni O. 2007. Irradiance and defoliation effects in three species of the forage grass *Brachiaria*. *Tropical Grasslands*, v.41, p.269-276.
- Becoña G, Ordeig L. 2013. Informe de Consultoría. Huella de Carbono y Comercio exterior en Uruguay. *Uruguay XXI*, pp 9-11.
- Belsky J. 1994. Influences of trees on savanna productivity: tests of shade, nutrients, and tree-grass competition. *Ecological Society of America*. Vol. 75, N° 4, pp. 922–932.
- Bernardino FS, Garcia R. 2009. Sistemas Silvipastoris. *Pesquisa Florestal Brasileira, Brazilian Journal of Forestry Research*, v. 29, n. 60. Sistemas Agrossilvipastoris (Edição Especial) 77-87 p
- Bernardo AL, Reis MGF, Reis GG, Harrison RB, Firme DJ. 1998. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* 104. 1–13
- Boragno L, Boscana M, Arriaga M. 2018. Primera encuesta de servicios forestales (en línea) 11p. Dirección General Forestal (MGAP). Consultado el 3 abr. 2019. Disponible en: http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/informe_final.pdf

- Boscana M, Varela F. 2011. Factores que influyen en la incorporación del rubro forestal en predios agropecuarios de los departamentos de Florida, Flores y Durazno. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 121 p.
- Brauer D, Ares A. 2005. Aboveground biomass partitioning in loblolly pine silvopastoral stands: Spatial configuration and pruning effects. *Forest Ecology and Management*. Volume 219, Issues 2–3, 25 November 2005, Pages 176–184
- Brussa C. 1994. Eucalyptus; especies de cultivos más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado. Montevideo, Hemisferio Sur. 325 p
- Bussoni A, Cabris J. 2010. A financial evaluation of two contrasting silvicultural systems applicable to *Pinus taeda* grown in north-east Uruguay. *Southern Forests: Journal of Forest Science*, v.: 72 3/4, p.: 163 – 171.
- Callero JL. 2008. El Sistema Silvopastoril de la Caja de Jubilaciones y Pensiones Bancarias en sus Centros Forestales 1 y 2. Uruguay. INIA Tacuarembó. Serie de Actividad de Difusión No. 535. Día de Campo - Silvopastoreo y Forestal en Paysandú. 5-8 pp.
- Carámbula M. 1991. Aspectos relevantes para la producción forrajera. INIA. Serie Técnica N° 19. 46 p.
- Carámbula M. 1978. Producción de pasturas. En Pasturas IV. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Centro de Investigaciones Agrícolas “A. Boerger”. Miscelánea N° 18. Montevideo, Uruguay.
- Casellas M, Cedres A, Munka C, Pastorini V, Posse J. 1993. Diagnóstico de Sistemas Agroforestales del Uruguay. Uruguay. Facultad de Agronomía, 122 p.
- Castaño JP, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Auchayna R. 2011. Caracterización Agroclimática del Uruguay. 1980-2009. INIA, Serie Técnica N° 193

- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2012. Huella de Carbono y exportaciones de alimentos. Guía Práctica. 18-19 pp
- Clutter J, Fortson J, Pienaar L, Brister G, Bailey R. 1992. Timber Management: A Quantitative Approach. First. edited by Jerome Clutter [*et al.*]. Malabar, FL: Krieger Publishing Company.
- Cubbage F, Donagh PMac, Balmelli G, Olmos VM, Bussoni A, Rubilar R, Torre RD, Lord R, Huang J, Hoeflich VA, Murara M, Kanieski B, Hall P, Yao R, Adams P, Kotze H, Monges E, Pérez CH, Wikle J, Abt R, Gonzalez R, Carrero O. 2014. Global timber investments and trends, 2005-2011. *New Zeal. J. For. Sci.* 44, S7.
- Cubbage F, Balmelli G, Bussoni A, Noellemeyer E, Pachas A, Fassola F, Colcombet L, Rossner B, Frey G, Dube F, De Silva L, Stevenson H, Hamilton J, Hubbard W. 2012. Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforest Syst.* 86, 303–314.
- Dagang, ABK, Nair PKR. 2003. Silvopastoral research and adoption in Central America: recent findings and recommendations for future directions. *Agroforestry Systems* 59:149-155.
- De Souza PJ. 1985. Producción y calidad de pasturas naturales en el Uruguay. 1^{er} Seminario de Pasturas naturales. Melo, Uruguay.
- DGF (Dirección General Forestal). 2019. Extracción y Producción 2000-2018. (en línea). Montevideo, Uruguay. Consultado 3 abr. 2019. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-forestal/informacion-tecnica/estadisticas-y-mercados/extraccion-produccion-consumo>

DGF (Dirección General Forestal). 2018. Normativa. (en línea). Montevideo, Uruguay. Consultado 3 mar. 2018. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-forestal/normativa/leyes>

DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2018. Estadísticas agropecuarias 2018. Compraventas primer semestre Año 2018. (en línea). Montevideo, Uruguay. 5 p. (Serie “Precio de la Tierra”). Consultado 3 abr. 2019. Disponible en http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/compraventas2018_1ersem2018.pdf

DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2011. Censo General Agropecuario 2011. Datos preliminares. 24 p. Consultado el 1 de junio 2017. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,5,27,O,S,0,MNU;E;2;16;10;6;MNU>

Fassola HE, Lacorte SM, Esquivel J, Colcombet L, Moscovich F, Crechi E, Pachas N, Keller A. 2004. Sistemas silvopastoriles en Misiones y NE de Corrientes y su Entorno de Negocios. EEA Montecarlo, INTA. Disponible en: http://64.76.123.202/new/0-0/forestacion/_archivos/_biblioteca/235%20Silvopastoril%20-%20Fassola.PDF

Faustmann M. 1984. On the Determination of the Value Which Forest Land and Immature Stands Possess for Forestry. English edition edited by M. Gane, Oxford Institute Paper 42, 1968.

Ferrere P, López GA, Boca RT, Galetti MA, Esparrach CA, Pathauer PS. 2005. Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento de *Eucalyptus globulus* en un ensayo Nelder modificado. Invest Agrar: Sist Recur For 14(2): 174-184.

- FAO, 1999. Sistemas Silvopastoriles (en línea). Consultado el 21 oct. 2019.
Disponible en: <http://www.fao.org/3/ah647s/AH647S05.htm>
- Gallo L. 2006. Sistemas Silvopastoriles. Revista del Plan Agropecuario, no. 119, p. 30-35
- Gómez AR, Guerrin L. E. 2011. Evaluación del crecimiento de gramíneas forrajeras sembradas bajo un monte de *Eucalyptus globulus*. (en línea). Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 88 p. Consultado el 14 de mayo 2013.
Disponible en: <http://biblioteca.fagro.edu.uy/cgi-bin/wxis.exe/iah/>
- Hawley RC, Smith DM. 1985. Silvicultura Práctica. 9-36 pp y 242-293 pp
- Henskens F, Battaglia M, Cherry M, Beadle C. 2001. Physiological basis of spacing effects on tree growth and form in *Eucalyptus globulus*. University of Tasmania, Australia. *Trees*. 15: 365–377.
- Hirigoyen A, Rachid C. 2014. Sistemas de Apoyo a la Gestión Forestal. Modelos de Simulación de crecimiento y Análisis Económico. Revista INIA, v. 38, pág. 43-45.
- Horwitz W, Latimer G. 2007. Official Methods of Analysis of AOAC International. 18th ed. Edited by W. Horwitz and G. Latimer. Gaithersburg, Maryland: AOAC International.
- Ibrahim M, Pezo D. 1998. Sistemas Silvopastoriles. Costa Rica. (en línea). 273 p. Consultado el 5 de mayo de 2017. Disponible en: http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4024/Sistemas_silvopastoriles.pdf;jsessionid=8DBD7FF8CE0AA17024C0E35442D5A6FA?sequence=1

- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2011. Serie Técnica N° 193. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009.
- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 1993. Serie Técnica N° 39. Registros físicos en la producción pecuaria.
- INUMET. (Instituto Uruguayo de Meteorología). 2017. Disponible en: <https://inumet.gub.uy/servcli/estadisticasPluviometricas>
- Jackson J, Ash A. 1998. Tree-grass relationships in open eucalypt woodlands of northern Australian: influence of trees on pasture productivity, forage quality and species distribution. *Agroforestry Systems* 40:159–176.
- Klingman DL, Miles SR, Mott GO. 1943. The cage method for determining consumption and yield of pasture herbage. *Journal of the American Society of Agronomy*. Vol. 35, N° 9. 739-746.
- Lacorte SM, Barth SR, Colcombet L, Crechi EH, Esquivel JI, Fassola H, Wick RÁ. 2016. Silvopastoral Systems Developed in Misiones and Corrientes, Argentina. *Silvopastoral Syst. South Am.* 10-39
- Leles PS, Reis GG, Ferreira M, Morais EJ. 2001. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *pellita* sob diferentes espaçamento na região de cerrado, MG. (en línea). *Scientia Forestalis*, n. 59, p. 77-87. Consultado el 15 jul. 2017. Disponible en: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr59/cap06.pdf>
- Mas C, Bermúdez R, Ayala W. 1997. Crecimiento de las pasturas naturales en dos suelos de la Región este. Pp 59-62. En: *Pasturas y Producción animal en áreas de ganadería extensiva*. INIA. Serie Técnica N° 13.

Mendoza P, Lescano C. 1986. Mediciones de pasturas en ensayos de pastoreo. Consultado el 15 de abril de 2018. Disponible en: <http://prodanimal.fagro.edu.uy/cursos/NUTRICION/TEORICOS/2010.Materia%20de%20lectura%20consumoII.pdf>

MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Consultado el 15 de abril de 2018. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-de-recursos-naturales/tramites-y-servicios/biblioteca-digital/carta-de-suelos>

Methol R. 2006. “Sistema de Apoyo a La Gestión de Plantaciones de *Eucalyptus Globulus*.” Revista INIA Serie Técnica:34.

Molina C. 2019. Resultados del monitoreo de empresas ganaderas carpetas verdes 2018/2019. Instituto Plan Agropecuario. Consultado el 15 de noviembre de 2019. Disponible en: https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/monitoreos/33_Resumen%20de%20Carpetas%20Verdes%202018-2019.pdf

Moras G, Vallejos-Barra OS. 2013. Tablas de volumen para árboles individuales de *Eucalyptus globulus ssp. globulus* cultivados en la región sur del Uruguay. Agrociencia, Uruguay, Volumen 17 2:11-24.

Neme EG, Terzieff JM. 2002. Composición específica y productividad de pasturas naturales bajo *Eucalyptus globulus* de 1, 2, 3 y 4 años en la localidad de Cerro Colorado (departamento de Florida) (en línea). Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía, 65 p. Consultado el: 14 de mayo de 2018. Disponible en: <http://biblioteca.fagro.edu.uy/cgi-bin/wxis.exe/iah/>

- Nilsen AR, Skarpe C, Moe SR. 2009. La conducta del ganado con respecto a la distancia a los árboles en Muy Muy, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* No. 47, pp 61-67.
- Nuberg I, George B, Reid R. 2009. *Agroforestry for natural resource management*. CSIRO, Collingwood.
- Oliveira TK, Macedo RLG, Venturin N, Higashikawa EM. 2009. Desempenho Silvicultural e Produtivo de Eucalipto sob Diferentes Arranjos Espaciais em Sistema Agrossilvipastoril. *Pesquisa Florestal Brasileira. Brazilian Journal of Forestry Research*. n. 60, P 1-9
- Oyhantçabal W. 2011. El MGAP y la “huella” de carbono de productos de exportación: una estrategia en defensa de la competitividad. En *Anuario OPYPA 2011*. (en línea). 6 p. Consultado el 3 set. 2014. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/opypa/ANUARIOS/Anuario2011/material/pdf/38.pdf>
- Pastorini V, Acosta P. 2009. Sistemas productivos integrados para un desarrollo sostenible. Uruguay. *Revista de la Sociedad de Productores Forestales*. Nº 37. 15-20 pp.
- Paciullo DSC, Gomide CA, de Castro CRT, Fernandes PB, Müller MD, Pires MDFÁ, Xavier DF. 2011. Características produtivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme a distância das árvores. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(10), 1176-1183.
- Paciullo DSC, Castro CRTD, Gomide CADM, Fernandes PB, Rocha WSDD, Müller MD, Rossiello ROP. 2010. Soil bulk density and biomass partitioning of *Brachiaria decumbens* in a silvopastoral system. *Scientia Agricola*, 67(5), 598-603.

- Pentón G, Blanco F, 1997. Influencia de la sombra de los árboles en la composición química y el rendimiento de los pastos. *Pastos y forrajes*, 20(2).
- Polla C. 2011. Silvopastoreo con ovinos. Uruguay 9p. Artículos Técnicos.
- Prichett W. 1986. Suelos forestales; propiedades, conservación y mejoramiento. México, D.F., Limusa. 634 p.
- Prieto P. 2011. Base cartográfica para el desarrollo de una metodología de monitoreo de propiedades físicas y químicas de suelos forestales. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 110p.
- Rakocevic M, Lavoranti OJ, De Oliveira FC, Medrado MJS. 2002. Avaliação amostral de componente forrageiro em sistemas silvipastoris, pp 1–3.
- Ranieri RP, Reis GG, Reis MGF, Oliveira Neto S, Leite HG, Melido RCN, Lopes HNS, Souza FC. 2013. Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. *Agroforest System* 87: 1295–1307.
- Ravera G. 2002. Crecimiento de *Eucalyptus globulus ssp. globulus* en diferentes sitios y en relación al desarrollo radicular en el valle serrano del arroyo El Soldado, departamento de Lavalleja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 106 p.
- Rosengurtt B. 1979. Tablas de comportamiento de las especies de plantas de campo naturales en el Uruguay. Facultad de Agronomía, UdelaR.

- Rusch G, Skarpe C. 2009. Procesos ecológicos asociados con el pastoreo y su aplicación en sistemas silvopastoriles. *Agroforestería en las Américas*. ISSN 1022-7482. N°47. Disponible en: www.catie.ac.cr/revistas/
- Sala OE, Austin AT. 2000. Methods of estimating Aboveground Net Primary Productivity. *Methods in Ecosystem Science*. Springer. New York. pp. 31-43
- Serrano R, Mora-Delgado J, Piñeros Varón R. 2014. Materia seca comestible en una pastura bajo diferentes coberturas de dosel arbóreo en una zona de Bosque seco Tropical (Bs-T) en el Tolima, Colombia. *Zootecnia Tropical*, 32(4), pp 351-362.
- Silveira D. 2015. Estudio comparativo de la vegetación y cobertura del suelo bajo plantaciones forestales y campo natural. 91 p. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía.
- Simeone A. s.f. *La Forestación y la Ganadería en Uruguay*. Publicación Forestal Oriental-UPM. Montevideo, Uruguay. 59 p.
- Simeone A, Beretta V, Caorsi CJ. 2010. Efecto de la sombra natural sobre la performance estival de vaquillonas pastoreando campo natural de áreas forestadas. *Agrociencia*, 14: 137.
- SNIA (Sistema Nacional de Información Agropecuaria). 2016. “SNIA-Monitoreo Ganadería.” Retrieved (http://dlibrary.snia.gub.uy/maproom/Monitoreo_Agroclimatico/MONITOREO_GANADERIA/CARGA_SEGURA/Carga_Segura.html#tabs-1).
- Somarriba E. 1992. Revisiting de past: an essay on agroforestry definition. *Agrofor. Syst.* 19, 233-240.

Sorrentino A. 1997. Manual para Diseño y ejecución de Inventarios Forestales. Montevideo, Uruguay. Hemisferio Sur. pp 3-13.

Sousa LF, Maurício RM, Moreira GR, Gonçalves LC, Borges I, Pereira LGR. 2010. Nutritional evaluation of “Braquiaraõ” grass in association with “Aroeira” trees in a silvopastoral system. *Agroforestry Systems*, v.79, p.189-199.

7. ANEXOS

ANEXO 1

Evolución de las medias de DAP (cm) y error estándar para la Interacción Mes × Estrato.

Mes	Estrato	Media (cm) Error estándar (cm) ±
41	1	8,23 ± 0,40 b
	2	8,82 ± 0,25 b
	3	10,05 ± 0,28 a
45	1	8,96 ± 0,41 b
	2	9,41 ± 0,25 b
	3	10,37 ± 0,29 a
51	1	10,04 ± 0,41 b
	2	10,57 ± 0,25 ab
	3	11,40 ± 0,29 a
68	1	13,48 ± 0,41 a
	2	12,73 ± 0,25 a
	3	13,11 ± 0,28 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

ANEXO 2

Evolución de las medias y error estándar para H (m) de la Interacción Mes × Estrato.

Mes	Estrato	Media (m) Error estándar (m) ±
41	1	6,88 ± 0,25 c
	2	8,34 ± 0,16 b
	3	10,25 ± 0,18 a
45	1	7,46 ± 0,26 c
	2	9,26 ± 0,16 b
	3	11,03 ± 0,18 a
51	1	8,35 ± 0,26 c
	2	10,41 ± 0,16 b
	3	12,01 ± 0,18 a
68	1	10,17 ± 0,26 c
	2	12,15 ± 0,16 b
	3	13,74 ± 0,18 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

ANEXO 3

Evolución de las medias y error estándar para la variable G de la Interacción
Mes×estrato

Mes	Estrato	Media (m ²) Error estándar (m ²) ±
41	1	0,0065 ± 0,00071 b
	2	0,0071 ± 0,00044 b
	3	0,0086 ± 0,00050 a
45	1	0,0075 ± 0,00073 a
	2	0,0081 ± 0,00044 a
	3	0,0092 ± 0,00050 a
51	1	0,0092 ± 0,00074 a
	2	0,010 ± 0,00045 a
	3	0,011 ± 0,00050 a
68	1	0,017 ± 0,00073 a
	2	0,015 ± 0,00050 a
	3	0,015 ± 0,00044 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

ANEXO 4

Evolución de las medias y error estándar para la Interacción Mes×estrato para Volumen individual con corteza.

Mes	Estrato	Media (m ³) Error estándar (m ³) ±
41	1	0,022 ± 0,0039 b
	2	0,030 ± 0,0023 b
	3	0,043 ± 0,0025 a
45	1	0,028 ± 0,0039 b
	2	0,038 ± 0,0023 b
	3	0,050 ± 0,0025 a
51	1	0,038 ± 0,0040 c
	2	0,053 ± 0,0023 b
	3	0,064 ± 0,0025 a
68	1	0,079 ± 0,0040 b
	2	0,085 ± 0,0023 b
	3	0,094 ± 0,0026 a

Nota: Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) dentro de cada mes.

ANEXO 5

Efecto del marco de plantación en *Eucalyptus globulus* sobre la producción de madera y forraje en Uruguay¹

Boscana Mariana¹, Bussoni Adriana¹, Bentancur Oscar².

¹ Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Ciencias Sociales, Montevideo, Uruguay. mboscana@fagro.edu.uy.

² Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Biometría, Estadística y Computación, Paysandú, Uruguay.

Resumen

Los sistemas silvopastoriles constituyen una modalidad productiva con gran potencial de expansión en Uruguay. El trabajo tuvo como objetivo evaluar la producción de madera y forraje en dos marcos de plantación y densidades de *Eucalyptus globulus* al Este del Uruguay entre los 36 y 68 meses de edad del cultivo forestal: Sistema Convencional (**SPC**) 3,5x2,27 m y Sistema de filas dobles y callejones (**SSFC**) (2x2)+8 m. Se realizaron 5 medidas repetidas de DAP, H y Supervivencia y medidas de producción de forraje cada 45 a 90 días en jaulas de exclusión móviles. Los resultados indican que el marco de plantación no tuvo efecto significativo ($p > 0,05$) sobre valores individuales DAP y H. Se constatan diferencias significativas en producción de madera (m^3/ha) entre sistemas a partir de los 41 meses ($p < 0,05$), debido a que la supervivencia presenta diferencias significativas ($p < 0,01$). A los 68 meses **SPC** produce $83,73 m^3/ha$, mientras que **SSFC** $62,68 m^3/ha$. En **SPC** se evalúa una menor producción de forraje, posiblemente influenciado por un incremento del sombreado que afecta la producción de materia seca. En términos promedios la producción fue de $581,9 (\pm 19,9)$, $378,1 (\pm 39,1)$ y $339,9 (\pm 19,9)$ kg/ha/estación para **SSFC**, **testigo** y **SPC** respectivamente, lo que equivale a un 42% más de producción para el primer sistema respecto al convencional. En general no se establecen diferencias significativas en la calidad del forraje (Proteína y Fibra Detergente Ácida). La información generada se espera que mejore la toma de decisiones, principalmente de productores ganaderos familiares no integrados a la cadena forestal.

Palabras claves: eucalipto, sistema silvopastoril, sistema convencional, marco de plantación,

¹ Artículo a publicar en la Revista Agrociencia Uruguay. Efecto del marco de plantación en *Eucalyptus globulus*

forraje

Effect of the arrangement in *Eucalyptus globulus* on wood and fodder production in Uruguay

Summary

Silvopastoral systems constitute a productive modality with great potential for expansion in Uruguay. The objective of the work was to evaluate the production of wood and fodder in two arrangement and densities of *Eucalyptus globulus* in eastern Uruguay between 36 and 68 months of age of the forest crop: Conventional System (**SPC**) 3,5x2,27 m and System of double rows and alleys (**SSFC**) (2x2) +8 m. Five repeated measures of DAP, H and Survival and forage production measures were performed every 45 to 90 days in exclusion cages. The results indicate that the arrangement had no significant effect ($p>0,05$) on individual DAP and H values. There are significant differences in wood production (m^3/ha) between systems from 41 months ($p<0,05$), because the survival shows significant differences ($p<0,01$). At 68 months **SPC** produces 83,73 m^3/ha , while **SSFC** 62,68 m^3/ha . In **SPC**, a lower forage production is evaluated, possibly influenced by an increase in shading that affects dry matter production. In average terms the production was 581,9 ($\pm 19,9$), 378,1 ($\pm 39,1$) and 339,9 ($\pm 19,9$) Kg/ha MS per station for **SSFC**, **control** and **SPC** respectively, which is equivalent to 42% more production for the first system compared to the conventional one. In general, no significant differences are established in the quality of the forage (Protein and Acid Detergent Fiber). The information generated is expected to improve decision making, mainly from family livestock producers not integrated into the forest chain.

Keywords: eucalyptus, silvopastoral system, conventional system, arrangement, forage

Introducción

A pesar de la rápida expansión que ha tenido Uruguay en las plantaciones forestales, es escasa la información disponible sobre las interacciones de la producción madera y forraje en diferentes marcos de plantación. El país cuenta actualmente con alrededor de un millón de hectáreas efectivas forestadas. Para el año 2018, se destinó unos 16 millones de metros cúbicos para uso industrial, de los cuales alrededor de 10 millones fueron destinados a la producción de pulpa de celulosa ⁽¹⁾. En los últimos años el incremento del valor de la tierra ha impactado fuertemente en la política de adquisición de grandes superficies, por lo que las empresas forestales buscan expandir sus cultivos en predios agropecuarios, principalmente explotaciones ganaderas, dada la complementariedad de los rubros. Estas estrategias han permitido a diferentes productores ganaderos ingresar en la actividad forestal, sin sustituir el principal rubro de su explotación, favoreciendo la diversificación de ingresos y el logro de retornos económicos más estables a largo plazo ^(2, 3).

En los sistemas silvopastoriles se establecen interacciones productivas-económicas, ambientales y sociales que deben ser conocidas para poder proyectar su viabilidad en el mediano a largo plazo. Algunos de las variables del componente arbóreo que cobran importancia en la asociación son la especie forestal, edad del cultivo, la densidad inicial, el espaciamiento y la distribución de los árboles en la plantación. Los mismos determinan no sólo la producción de madera del sistema, sino también, la producción de forraje bajo dosel.

Estudios que comparan altura, diámetro, volumen y sobrevivencia, para distintas especies de *Eucalyptus sp.*, en diferentes marcos de plantación dan información valiosa para definir el arreglo más adecuado según los objetivos de producción. Algunos trabajos han demostrado que el espaciamiento entre árboles tiene poco efecto sobre el crecimiento en altura, sin embargo, tiene efecto en el crecimiento en diámetro individual, dado que existe un aumento en la disponibilidad de espacio y de los recursos ambientales por árbol ^(4, 5). Sin embargo, estos incrementos de crecimiento en diámetro de los árboles individuales no son suficientes para compensar el efecto a nivel poblacional. Por lo tanto, los valores más altos de volumen por hectárea son registrados cuando hay una mayor densidad de árboles por superficie ⁽⁴⁾. Aquellos árboles con mayor área útil por planta presentan mayor crecimiento en diámetro y volumen por árbol, registrándose un crecimiento diferenciado en líneas simples cuando son

comparados con filas dobles ⁽⁶⁾. En relación a la supervivencia, se observa que en marcos de plantación más apretados se obtienen menores porcentajes, lo que evidencia una mayor competencia entre las plantas por menor superficie disponible para el crecimiento ^(5, 7). A su vez, la tasa de crecimiento disminuye a lo largo del tiempo en arreglos más densos, tanto para el DAP como en altura. Sin embargo, a nivel de población, tanto el área basal como el volumen por unidad de superficie (ha) registran mayores valores dado el efecto de una mayor cantidad de árboles por hectárea ⁽⁶⁾. En relación a la intercepción de luz y superficie fotosintética, a densidades de plantación más densos (árb/ha) presentan mayores valores de luz interceptada en comparación con densidades menores ⁽⁸⁾. En síntesis, una mayor área útil por planta (pl/m²) en general se traduce en un mayor crecimiento en diámetro y volumen por árbol. Esto se constata también para la disposición de los árboles: el diámetro y el volumen en filas de plantación simples son mayores en relación a árboles creciendo en filas dobles. A nivel de población, el volumen por hectárea puede registrar mayores valores en plantaciones de alta densidad dado el efecto de una mayor cantidad de árboles por hectárea ^(4, 5, 8). Un bajo rendimiento de madera puede ser compensado por el mayor crecimiento de pasturas bajo dosel por una mayor disponibilidad de luz, aumentando los beneficios globales en el sistema ⁽⁸⁾. A su vez, se establece en general que una menor intensidad de luz hacia el estrato herbáceo por efecto de los árboles (copa, densidad, edad) puede determinar un menor potencial de crecimiento de este último y modificar la composición botánica; sin embargo, esto dependerá de la tolerancia de las especies al sombreado, de las características de los árboles y de la fertilidad del suelo ^(9, 10).

Algunos de los aspectos positivos de los árboles hacia las pasturas son la protección frente a variaciones de temperatura y vientos, favoreciendo la sobrevivencia y permanencia del tapiz, mayor disponibilidad de humedad del suelo lo que permite prolongar el periodo de crecimiento, transferencia de nutrientes, etc ^(9, 11, 12, 13). El resultado de estas interacciones estará determinando la capacidad de carga animal de las pasturas; si bien, el sombreado de los árboles puede contribuir al confort térmico del ganado, estos pueden afectar la producción de pasto al seleccionar áreas de pastoreo y contribuir a la compactación del suelo bajo dosel dada la mayor concentración de animales en las zonas de sombra ^(14, 15). En consecuencia, pueden existir diferentes grados de consumo, de erosión por pisoteo y otros daños físicos y de deposición de orina y heces en distintas áreas del sistema ⁽¹⁶⁾. En sistemas silvopastoriles

en general, los árboles son dispuestos en una o varias filas separados por callejones amplios para maximizar la producción total de forraje y madera, así como también una gestión más eficiente del ganado ⁽¹⁷⁾.

En este contexto, el objetivo general del trabajo fue evaluar el efecto del marco de plantación en términos productivos comparando sistemas de producción convencional y sistemas silvopastoriles en la región Este de Uruguay. Las hipótesis que surgen son que la producción de madera en el **SPC** es similar al **SSFC**, mientras que la producción de forraje es menor en el sistema convencional en comparación al **SSFC**.

Materiales y métodos

Área de estudio

Los estudios de caso corresponden a plantaciones comerciales de *Eucalyptus globulus* (origen Jeeralang) plantados en la primavera del año 2011, en el departamento de Rocha - Uruguay (34°03'28,82" S - 54°05'1,76" W).

La precipitación media anual para la región está entre 1200 y 1300 mm; la temperatura media anual es de 16,8°C, con una máxima media anual entre 21 y 22 °C, siendo el mes de enero el más cálido y la mínima media anual entre 12 y 13 °C en el mes de julio, el mes más frío ⁽¹⁸⁾.

La zona se ubica en un relieve pronunciado, con sierras, lomadas fuertes y colinas, que contienen zonas de interfluvio (parte alta), laderas medias y bajos, principalmente próximas a las vías de escurrimiento. En los Estratos bajos puede haber problemas de hidromorfismo traduciéndose en estados temporales de saturación de agua en el suelo. En los suelos prevalece un pH ácido, en torno al 5; en algunos perfiles edáficos a mayor profundidad aumenta el pH, asociándose a la incidencia de agua subterránea. Los suelos contienen muy bajos valores de P (entre 2 y 3 ppm) a excepción de un Estrato donde el contenido fue de 19 ppm. El contenido de materia orgánica es entre moderadamente rico a muy rico, superiores a 4 %, con máximos de 5,8 % y mínimos de 4,2 %.

Los sistemas y su evaluación

Se evaluaron dos sistemas: sistema de producción convencional (**SPC**) y sistema silvopastoril con callejones y filas dobles (**SSFC**). Para el **SPC** el marco de plantación es de 3,5 m x 2,27 m, lo que equivale a una densidad inicial teórica de 1.258 arb/ha, siendo éste un espaciamiento que es utilizado habitualmente en plantaciones forestales comerciales. Para el **SSFC**, el marco de plantación corresponde a filas dobles de 2 m x 2 m + 8 m, lo que se traduce a una densidad inicial teórica de 1.000 arb/ha. Los espaciamientos evaluados se traducen en un área útil teórica por árbol (m²/planta) de 8 m² y 10 m² para **SPC** y **SSFC**, respectivamente. Los turnos de corta en producción forestal son de 12 años, siendo el destino industrial el chipeado de la madera para producción de celulosa.

La actividad ganadera se desarrolla tanto en áreas de forestación como en zonas no afectadas por el cultivo (como zonas bajas y cortafuegos). La especialización es la recría e invernada. En términos generales, la entrada al sistema son novillos de 1 a 2 años de edad con aproximadamente 240 kg permaneciendo de 2 a 3 años hasta lograr un peso final de 480-490 kg (novillos de más de 3 años), con un sistema de pastoreo rotativo.

A priori, se estratificó la población a evaluar según la altitud del terreno (metros sobre nivel del mar, m.s.n.m), dado que es un factor que puede interferir en las variables forestales a estudiar, estableciéndose 3 Estratos: menor a 70 m.s.n.m (Estrato 1, bajo), entre 70 a 90 m.s.n.m (Estrato 2, medio) y mayor a 90 m.s.n.m. (Estrato 3, alto). Con esto se busca tomar en cuenta la variabilidad de forma de distribuir la muestra entre los estratos a los efectos de realizar un tamaño de muestra menor ⁽¹⁹⁾. En relación al número de parcelas se planteó un nivel de precisión o error de muestreo admisible que se ubica entre el 5 y 10%. Se establecieron en total 30 parcelas para evaluar el crecimiento forestal, con forma rectangular que según cada sistema fue de 216 m² (**SPC**) y 400 m² (**SSFC**). En las mismas se cuantificaron las siguientes variables: DAP (diámetro a la altura del pecho), Altura total (H) y sobrevivencia (%). Se realizaron mediciones en el período 2014-2017, correspondiente a los 36, 41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo. El diseño correspondió a un muestreo aleatorio estratificado, donde se establecieron parcelas al azar en cada Estrato con igual número de repeticiones en cada sistema.

Para evaluar la producción de forraje se evaluó la producción bajo dosel y en áreas testigo

a cielo abierto en los dos sistemas (**SPC** y **SSFC**) para los Estratos bajo y medio, ambos sobre campo natural, expresado en kilos de materia seca por hectárea por estación (kg/ha de MS por estación). A los efectos se instalaron jaulas de exclusión móviles de 1 m² de superficie. En las parcelas seleccionadas se ubicaron en las entre filas de plantación (2 repeticiones por parcela), totalizando 8 jaulas por sistema. También se incorporaron 8 jaulas testigo en zonas no afectadas por el cultivo. La superficie efectiva de corte fue de 0,4 m²; una altura de corte a partir de los 1,5 cm desde el suelo; y frecuencia de corte cada 45 a 90 días. En todos los cortes se realizó el análisis de Proteína Cruda (% PC) y Fibra detergente Ácida (% FDA) corregida por cenizas (FDAmo).

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software R 3.2.1 ⁽²¹⁾. Para evaluar el efecto del marco de plantación y de los Estratos sobre las variables dasométricas DAP, H y volumen total con corteza (m³/ha) así como para producción forrajera, se ajustaron modelos lineales de medidas repetidas en el tiempo, donde el modelo de correlación fue autoregresivo de orden 1 (AR(1)). Para comparar las medias de los efectos significativos se usó la prueba de Tukey al 5%.

Resultados

Forestal

La densidad inicial promedio fue de 1.021 y 1.318 arb/ha para **SSFC** y **SPC**, respectivamente, valores efectivos superiores al marco de plantación teórica. Para la última medición realizada a los 68 meses de edad, la densidad promedio resultó en 715 y 974 arb/ha para **SSFC** y **SPC**, respectivamente, lo que equivale a una sobrevivencia promedio del 70% y 74%. Si bien los porcentajes de pérdida de árboles por hectárea no reflejan diferencias considerables entre los mismos, en términos promedios, existen diferencias por Estrato dentro de cada sistema. En este sentido, a los 68 meses de edad, el Estrato 1 presentó un 49% y 36% de pérdida con diferencia significativa entre **SSFC** y **SPC** respectivamente, con respecto a la densidad inicial. En contraposición el Estrato 3 presentó menores porcentajes de pérdida de densidad respecto a la inicial, siendo para el sistema **SSFC** del orden del 15% y para **SPC** del 17%, no presentando diferencias significativas.

Según el análisis estadístico, no se pueden establecer diferencias significativas en crecimiento individual para DAP y H entre sistemas (**SPC** y **SSFC**), así como tampoco interacción Sistema×Estrato ($p > 0,05$) para cada uno de los meses evaluados. Independientemente del sistema, el Estrato 1 presentó los menores valores productivos, seguidos por el Estrato 2; los valores más altos se encontraron en el Estrato 3. Si comparamos los valores medios de DAP entre Estratos en un mismo sistema, se pueden establecer diferencias significativas para crecimiento en DAP individual por el efecto Estrato, siendo significativo para los 36, 41 meses y los 45 meses de edad ($p < 0,05$; Cuadro 1). A partir de los 51 meses de edad del cultivo, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre Estratos en un mismo sistema (**SPC**, **SSFC**). En términos promedios a los 36 meses de edad, el Estrato 2 tuvo un valor de DAP medio de 7,91 cm ($\pm 0,26$) mientras que el Estrato 3 de 9,52 cm ($\pm 0,28$). Para el **SPC**, el DAP promedio fue de 7,85 cm ($\pm 0,39$) y 9,56 cm ($\pm 0,41$) para el Estrato 2 y 3 respectivamente, mientras que el **SSFC** el DAP promedio para el Estrato 2 y 3 fue de 7,96 cm ($\pm 0,33$) y de 9,49 cm ($\pm 0,39$) respectivamente. Si se observa desde el mes 41 hasta los 51 meses de edad, existen diferencias significativas para las medias de DAP por Estrato, siendo las mismas más notorias entre el Estrato 1 y el Estrato 3. Sin embargo, a los 68 meses no se observan diferencias significativas entre las medias,

igualándose los valores promedios de DAP en cada Estrato.

Para la variable H se encontraron diferencias significativas en todos los meses evaluados por efecto Estrato ($p < 0,01$) como se observa en el Cuadro 1. Para los 36 meses de edad, el Estrato 2 tuvo un valor de H medio de 7,22 m ($\pm 0,31$) mientras que el Estrato 3 de 9,16 m ($\pm 0,35$). Para el **SPC**, la H promedio fue de 7,04 ($\pm 0,47$) y 8,92 m ($\pm 0,51$) para el Estrato 2 y 3 respectivamente, mientras que el **SSFC** la H promedio para el Estrato 2 y 3 fue de 7,39 ($\pm 0,42$) y de 9,40 m ($\pm 0,50$), respectivamente. A los 41, 45, 51 y 68 meses de edad los valores promedios para H son 8,50 ($\pm 0,17$), 9,42 ($\pm 0,18$), 10,27 ($\pm 0,18$) y 12,01 m ($\pm 0,18$) para **SPC** respectivamente, mientras que para el **SSFC** fue de 8,48 ($\pm 0,15$), 9,07 ($\pm 0,15$), 10,24 ($\pm 0,16$) y 12,03 m ($\pm 0,15$) respectivamente.

Para ambas variables, DAP y H, el Estrato 3 es el que presenta las mayores medias en cada mes de evaluación, mientras que el Estrato 1 presenta los valores inferiores.

Cuadro 1. Evolución de las medias y error estándar para DAP y H de la Interacción Mes×Sistema×Estrato.

Mes	Estratos	Media DAP (cm)		Media H (m)	
		Error estándar (cm) \pm		Error estándar (m) \pm	
		SPC	SSFC	SPC	SSFC
36	2	7,85 \pm 0,39 a	7,96 \pm 0,33 a	7,04 \pm 0,47 a	7,39 \pm 0,42 a
	3	9,56 \pm 0,41 b	9,49 \pm 0,39 b	8,92 \pm 0,51 b	9,40 \pm 0,50 b
41	1	8,34 \pm 0,59 b	8,12 \pm 0,54 b	7,02 \pm 0,37 c	6,73 \pm 0,34 c
	2	9,10 \pm 0,38 ab	8,54 \pm 0,32 b	8,13 \pm 0,24 b	8,54 \pm 0,20 b
45	3	10,18 \pm 0,43 a	9,92 \pm 0,37 a	10,34 \pm 0,27 a	10,16 \pm 0,23 a
	1	9,17 \pm 0,60 a	8,76 \pm 0,55 a	7,78 \pm 0,38 c	7,14 \pm 0,35 c
51	2	9,61 \pm 0,39 a	9,21 \pm 0,32 a	9,49 \pm 0,24 b	9,04 \pm 0,20 b
	3	10,43 \pm 0,44 a	10,31 \pm 0,37 a	11,01 \pm 0,27 a	11,04 \pm 0,23 a
51	1	10,49 \pm 0,61 a	9,60 \pm 0,37 b	8,13 \pm 0,39 c	8,57 \pm 0,35 c
	2	10,82 \pm 0,37 a	10,33 \pm 0,32 ab	10,36 \pm 0,24 b	10,45 \pm 0,20 b
68	3	11,36 \pm 0,44 a	11,44 \pm 0,37 a	12,32 \pm 0,27 a	11,69 \pm 0,23 a
	1	13,18 \pm 0,61 a	13,78 \pm 0,54 a	10,36 \pm 0,38 c	9,99 \pm 0,34 c
68	2	12,98 \pm 0,39 a	12,48 \pm 0,32 a	12,11 \pm 0,24 b	12,20 \pm 0,20 b
	3	13,02 \pm 0,44 a	13,20 \pm 0,37 a	13,56 \pm 0,27 a	13,91 \pm 0,23 a

Nota: Medias sin letras en común difieren significativamente ($p < 0,05$) dentro de cada mes y sistema.

A partir de los 36 meses de edad del cultivo se pudo establecer diferencias significativas ($p < 0,0001$) para volumen total por unidad de superficie con corteza (m^3/ha) considerando el efecto del Estrato (Cuadro 2). A los 36 meses de edad, para el **SPC** el estrato 2 tuvo un volumen promedio cc de $21,26 m^3/ha (\pm 3,56)$ mientras que el estrato 3 de $42,05 m^3/ha (\pm 3,90)$. En el **SSFC** el volumen promedio cc fue de $18,58 (\pm 3,30)$ y de $31,28 m^3/ha (\pm 3,90)$ para el estrato 2 y 3 respectivamente. Para el **SPC** a los 41 meses de edad se registró un volumen promedio cc de $34,06 m^3/ha (\pm 3,60)$, a los 45 de $40,72 m^3/ha (\pm 3,60)$, $53,49 m^3/ha (\pm 3,60)$ a los 51 y a los 68 fue de $83,73 m^3/ha (\pm 3,60)$. Para el **SSFC** los volúmenes cc fueron de $24,37 m^3/ha (\pm 3,60)$, $28,65 (\pm 3,60)$, $37,78 (\pm 3,60)$ y $62,68 m^3/ha (\pm 3,60)$ para los 41, 45, 51 y 68 meses de edad del cultivo respectivamente.

Cuadro 2. Evolución de las medias y error estándar para la variable volumen por hectárea cc para la Interacción mes×Estrato×sistema

Mes	Estratos	Media V cc (m^3/ha) \pm Error estándar (m^3/ha)	
		SPC	SSFC
36	2	$21,26 \pm 3,56$ a	$18,58 \pm 3,30$ a
	3	$42,05 \pm 3,90$ b	$31,28 \pm 3,90$ b
41	1	$19,03 \pm 7,59$ b	$11,49 \pm 7,59$ b
	2	$29,98 \pm 4,97$ b	$23,93 \pm 4,97$ ab
	3	$53,18 \pm 5,87$ a	$37,71 \pm 5,88$ a
45	1	$24,47 \pm 7,59$ b	$13,24 \pm 7,59$ b
	2	$38,59 \pm 4,97$ b	$29,05 \pm 4,97$ ab
	3	$59,10 \pm 5,88$ a	$43,65 \pm 5,88$ a
51	1	$31,59 \pm 7,59$ b	$18,08 \pm 7,59$ b
	2	$53,01 \pm 4,97$ b	$39,79 \pm 4,97$ ab
	3	$75,86 \pm 5,88$ a	$55,48 \pm 5,88$ a
68	1	$60,90 \pm 7,59$ c	$39,60 \pm 7,59$ c
	2	$84,42 \pm 4,97$ b	$63,61 \pm 4,97$ b
	3	$105,88 \pm 5,88$ a	$84,82 \pm 5,88$ a

Nota: Medias sin letras en común difieren significativamente ($p < 0,05$) dentro de cada mes y sistema

Forraje

La media de producción estacional para el **SPC** fue de 334,5 ($\pm 39,1$), seguido del **testigo** con 378,1 ($\pm 39,1$) y por último el **SSFC** de 587,5 kg/ha de MS ($\pm 39,1$). El Estrato bajo que corresponde al Estrato 1 forestal, tuvo una media de 462,7 ($\pm 31,9$) y el medio (Estrato 2) 404,0 ($\pm 31,9$) kg/ha de MS, pero sin diferencias significativas ($p > 0,05$) entre estos dos últimos Estratos. Para el **SSFC** el Estrato bajo (Estrato 1) y medio (Estrato 2) tuvo una producción promedio de materia seca de 586,8 ($\pm 55,3$) y 588,1 kg/ha de MS ($\pm 55,3$) respectivamente. El Estrato bajo y medio del **SPC** tuvo una producción promedio de materia seca de 380,1 ($\pm 55,3$) y 288,8 ($\pm 55,3$) kg/ha de MS respectivamente. En el **testigo** el Estrato bajo y medio tuvo una producción promedio de materia seca de 421,2 ($\pm 55,3$) y 335,1 ($\pm 55,3$) kg/ha de MS respectivamente.

En término promedio, la producción de materia seca para el período evaluado entre otoño 2015 y otoño 2017, fue superior en un 42% mayor el **SSFC** respecto al **SPC**. En general e independientemente del sistema, el Estrato bajo tuvo una producción promedio mayor que el Estrato medio. Independientemente del sistema, las estaciones de otoño y primavera fueron de mayor crecimiento, lo que coincide con los picos de producción estacional para nuestro país.

Para todas las estaciones, la producción de pastos bajo dosel fue superior en el **SSFC** en relación al **SPC** y al **testigo**. Para el otoño 2015, el **SSFC** tuvo un 28,7% más de producción bajo dosel en relación al **SPC**, incrementándose la diferencia promedio al 65% y 80% en el otoño 2016 y 2017, respectivamente. Para la estación de invierno del año 2015, el **SSFC** presentó diferencias promedio significativas respecto al **SPC**, lo que se tradujo en un incremento del 32% respecto a este último. Para la estación de primavera del año 2016, no se encontraron diferencias significativas en cuanto a producción promedio de materia seca por hectárea entre sistemas, sin embargo, la primavera del año 2015 tuvo en promedio una alta producción (822,4 y 489,2 kg/ha de MS para **SSFC** y **SPC**, respectivamente). Tanto para el verano 2016 como el del año 2017, se encontraron diferencias significativas en la producción promedio por estación, donde el **SPC** produjo un 51% y 36% menos respectivamente, respecto al **SSFC** (Cuadro 3).

Cuadro 3. Producción de forraje (kg/ha de MS) y evolución de las medias y error estándar para la Interacción Estación por Sistema.

Estación/Edad cultivo forestal (meses)	Testigo	SPC	SSFC
	Media (kg/ha de MS por estación) Error estándar ±	Media (kg/ha de MS por estación) Error estándar ±	Media (kg/ha de MS por estación) Error estándar ±
Otoño 2015 (42 meses)	465,1 ± 80,5 a	493,1 ± 80,5 a	692,2 ± 80,5 a
Invierno 2015 (45 meses)	340,9 ± 78,4 b	395,0 ± 78,4 ab	580,3 ± 78,4 a
Primavera 2015 (48 meses)	526,9 ± 78,0 b	489,2 ± 78,0 b	822,4 ± 78,0 a
Verano 2016 (51 meses)	496,7 ± 78,0 a	336,5 ± 78,0 ab	651,7 ± 78,0 a
Otoño 2016 (54 meses)	432,3 ± 78,0 a	210,1 ± 78,0 b	599,0 ± 78,0 a
Invierno 2016 (57 meses)	218,0 ± 78,0 a	256,6 ± 78,0 a	413,8 ± 78,0 a
Primavera 2016 (60 meses)	211,1 ± 78,0 b	572,5 ± 78,0 a	578,7 ± 78,0 a
Verano 2017 (63 meses)	283,1 ± 78,4 a	157,2 ± 78,4 b	440,5 ± 78,4 a
Otoño 2017 (67 meses)	428,3 ± 80,5 a	100,1 ± 80,5 b	508,4 ± 80,5 a

Nota: Medias sin letras en común difieren significativamente ($p < 0,05$) dentro de cada fila por estación de corte.

Cuadro 4. Comparación de Proteína (%) y Fibra Detergente (%) efecto principal Sistema, según estación de corte

Estación	SPC	SSFC	SPC	SSFC
	Media PC (%) Error estándar ±	Media PC (%) Error estándar ±	Media FDA (%) Error estándar ±	Media FDA (%) Error estándar ±
Verano 2015	9,70 ± 0,42 a	10,05 ± 0,42 a	35,87 ± 0,83 a	35,77 ± 0,83 a
Otoño	10,08 ± 0,11 a	9,20 ± 0,11 a	35,34 ± 0,30 a	35,42 ± 0,30 a
Invierno	9,24 ± 0,17 a	9,57 ± 0,17 a	36,40 ± 1,87 a	36,10 ± 1,87 a
Invierno	10,84 ± 0,37 a	12,86 ± 0,38 a	32,24 ± 0,70 a	32,90 ± 0,70 a
Primavera	13,98 ± 0,34 a	13,01 ± 0,34 a	30,24 ± 0,63 a	29,74 ± 0,63 a
Primavera	9,50 ± 0,23 a	9,29 ± 0,23 a	33,62 ± 1,01 a	32,84 ± 1,01 a
Verano 2016	9,28 ± 0,27 a	7,73 ± 0,27 a	40,49 ± 2,82 a	36,75 ± 2,82 a
Otoño	12,07 ± 0,58 a	13,32 ± 0,57 a	28,62 ± 3,23 a	28,87 ± 3,23 a
Invierno	14,49 ± 0,56 a	14,29 ± 0,56 a	32,63 ± 0,88 a	33,41 ± 0,88 a
Primavera	11,34 ± 1,13 a	14,10 ± 1,13 a	34,65 ± 0,97 a	33,74 ± 0,97 a
Verano 2017	10,78 ± 0,52 a	11,27 ± 0,52 a	34,09 ± 1,70 b	40,86 ± 1,70 a
Otoño	9,02 ± 0,37 a	9,24 ± 0,34 a	41,24 ± 1,11 a	39,67 ± 1,09 a

Nota: Medias sin letras en común difieren significativamente ($p < 0,05$) dentro de cada fila por estación de corte.

No existieron diferencias significativas para los contenidos de PC y FDA por sistema y por Estrato ($p > 0,05$) en cada estación. En términos promedio el contenido de Proteína cruda fue de 10,86% ($\pm 1,83$) y de 11,16% ($\pm 2,25$) para **SPC** y **SSFC** respectivamente, mientras que para Fibra detergente ácido fue de 34,62% ($\pm 3,68$) y de 34,67% ($\pm 3,55$) respectivamente. Únicamente en el verano 2017 existieron diferencias significativas para sistema ($p < 0,05$) para FDA, siendo mayor el valor en el **SSFC** (Cuadro 4).

Discusión

Los resultados para producción de madera señalan que el marco de plantación no tuvo efecto significativo sobre el crecimiento individual en DAP y H ($p > 0,05$) en cada uno de los meses en evaluación. Para estas variables, no existe interacción entre Estratos y sistemas ($p > 0,05$) para cada uno de los meses, por lo que el crecimiento tanto en DAP como en H registra menores valores en el Estrato 1 y mayores en el Estrato 3 en ambos sistemas. La variable sobrevivencia de árboles, tampoco mostró diferencias significativas entre sistemas, así como tampoco que exista interacción Sistema×Estrato ($p > 0,05$) para cada uno de los meses.

Para el caso de la estratificación, se pueden establecer diferencias significativas en DAP para todos los meses ($p < 0,05$) excepto a los 51 meses de edad ($p > 0,05$), mientras que la variable H presentó diferencias significativas entre estratos ($p < 0,01$) para todos los meses evaluados. La sobrevivencia también difirió significativamente a partir de los 41 meses de edad del cultivo ($p < 0,01$) entre Estratos. Estos resultados reflejan cierta heterogeneidad entre los mismos en calidad de Estrato. En términos promedios, se registran mayores crecimientos tanto en **SPC** y **SSFC** para DAP y H en el Estrato 3, seguido por el 2 y finalmente con menores valores en el Estrato 1 en cada mes.

Los espaciamientos evaluados se traducen en un área útil teórica por árbol ($m^2/planta$) de 8 m^2 y 10 m^2 para **SPC** y **SSFC**, respectivamente. Trabajos previos ^(4, 5, 8), señalan que árboles con mayor área útil resultan en mayor crecimiento individual en DAP. En éstos se compararon marcos de plantación mucho más contrastantes y con áreas útiles para los árboles de entre 3 a 20 m^2/ha , e incluso con diferentes especies (*E. urophylla*, *E. grandis* y *E. globulus*) y con diferentes grados de mejoramiento genético.

Se podría pensar que las diferencias de DAP podrían manifestarse a partir de marcos de plantación más extremos. Sin embargo, en los sistemas en evaluación no existen tales diferencias, posiblemente debido a que las diferencias en área útil por árbol entre sistemas no fueron suficientes para generar ambientales contrastantes.

Según estimaciones de crecimiento para *E. globulus* bajo las mismas condiciones de crecimiento y altas densidades por hectárea (densidad promedio de 1100 arb/ha), la altura total promedio puede registrar 10,4 m y un DAP medio de 10,7 cm a una edad de 51 meses

(22). Los resultados promedios obtenidos tanto en el marco de producción convencional como en el sistema silvopastoril evaluados a la misma edad, tuvieron valores promedios similares entre ellos y apenas superiores al simulado del entorno de los 11 m de altura y 11 cm de DAP.

Si se analizan resultados poblacionales, para Volumen total con corteza (m^3/ha) existieron diferencias significativas por efecto sistema y Estratos ($p < 0,05$), para cada uno de los meses evaluados; la mayor producción de madera corresponde la Estrato 3 en ambos sistemas, para todos los meses de evaluación. El único mes donde no se pudo establecer diferencias significativas ($p > 0,05$) para volumen cc por efecto sistema fue a los 36 meses, dado que los niveles de sobrevivencia registrados por sistema tienen poca significancia.

Por lo tanto y dado que no hay efectos de marco de plantación sobre DAP y H en el crecimiento individual, la diferencia de producción de madera por unidad de superficie (m^3/ha) entre los **SPC** y **SSFC** podrían explicarse por el efecto de la densidad de plantación por unidad de superficie (arb/ha). Según (4, 5, 8), el volumen por hectárea con corteza puede registrar mayores valores en plantaciones de alta densidad dado el efecto de una mayor cantidad de árboles por hectárea.

Considerando el componente herbáceo, otros trabajos demuestran diferencias marcadas para materia seca entre algunas gramíneas debido a factores como la época, precipitaciones, la calidad y cantidad de radiación solar incidente al estrato herbáceo, a la implementación de especies mejoradas o la asociación con especies leñosas o leguminosas (15, 23, 24). El sistema **SPC** presentó una menor producción de forraje posiblemente influenciado por el arreglo espacial de los árboles y/o la densidad de árboles que generaron un incremento en el sombreado afectando la producción de materia seca tal como lo encontrado en (25) para el caso de gramíneas tropicales.

En términos promedios la producción de materia seca estacional para el período evaluado fue de 587,5 ($\pm 39,1$), 378,1 ($\pm 39,1$) y de 334,5 ($\pm 39,1$) kg/ha de MS para **SSFC**, **testigo** y **SPC** respectivamente, lo que equivale a un 42% más de producción para el primer sistema respecto al otro. Tomando como ejemplo los datos completos del año 2016 la producción anual forrajera del **SSFC** fue de 2243 kg/MS, valores muy próximos al promedio esperado para la zona (26) e inclusive superior a los valores del testigo de 1358 kg/ha de MS, y con valores intermedios para el sistema **SPC**. Esto se podría deber a una mayor protección de forraje entre las filas de plantación y donde la edad del cultivo forestal no presenta todavía

una alta competencia por el uso de los recursos naturales.

Independientemente del sistema, el Estrato bajo (Estrato 1) tuvo una producción promedio mayor que el Estrato medio, siendo de 462,7 ($\pm 31,9$) y 404,0 kg/ha de MS ($\pm 31,9$) respectivamente. Si lo comparamos con la producción de madera, en términos promedios, se registran menores crecimientos tanto en **SPC** y **SSFC** en el Estrato bajo en cada mes de evaluación, es decir, las condiciones ambientales en la zona baja del paisaje favorecen las especies de pastizal, evidentemente adaptadas a la zona.

Se destaca que *Eucalyptus globulus* es una especie forestal con una copa poco densa y escaso follaje lo cual se traduce en un menor sombreado bajo dosel en comparación a otras especies forestales utilizadas, lo que favorece el crecimiento del tapiz herbáceo. En el **SSFC** se constató una menor interceptación de radiación solar por el dosel de árboles, traduciéndose en un mayor pasaje de radiación PAR del orden del 47% bajo dosel en comparación con el sistema **SPC** (35%). Esto podría indicar que los sistemas con producción de sombra moderada contribuyen a mejorar los rendimientos productivos en las pasturas. Independientemente del sistema, las estaciones de otoño y primavera fueron las de mayor producción de forraje en general, lo que coincide con los picos de producción estacional para nuestro país. Si se compara con los registros pluviométricos promedio histórico para la región de Rocha por estación, el verano, invierno y primavera del año 2015 registraron lluvias superiores al promedio histórico. Para el año 2016, el máximo de lluvias se registró en la estación de otoño (lo que superó ampliamente al acumulado promedio histórico), seguidos por el invierno y primavera. El verano del mismo año, tuvo registros por debajo de los promedios históricos, sin embargo, fue una estación con muy buena producción forrajera. Por último, las precipitaciones acumuladas para el verano y otoño 2017 son muy similares a las registradas en los promedios históricos, siendo similar la producción de forraje en ambas estaciones.

Las características de los suelos difieren en las zonas de estudio, por lo que las diferencias de crecimiento y rendimientos por Estratos para el componente arbóreo pueden explicarse por tales efectos. Existen diferencias en propiedades edáficas, materiales parentales y posición topográfica local. Estos son elementos del paisaje que en diferente grado inciden en el rendimiento de madera y productividad del pastizal. Los bajos rendimientos en el Estrato bajo se pueden explicar porque la principal limitante de esos

suelos es el hidromorfismo dado su estado permanente o temporal de saturación de agua, que, a su vez, recibe el agua de las laderas medias e interfluvios; lo que condiciona la vegetación herbácea y arbórea (número de árboles y producción de madera). El Estrato medio presenta un relieve de laderas medias entre cotas de 70 y 90 m.s.n.m., con laderas convexas en rango de pendientes fuertes, y por lo tanto, predomina el fenómeno de erosión hídrica natural lo que resulta en suelos más superficiales. Estas fuertes pendientes y texturas medias y livianas inciden en que no haya problemas de mal drenaje. En el Estrato alto se registraron los mayores rendimientos, dado que en su mayoría del interfluvio tiene recubrimientos de escaso espesor de lodolita (arcilla) de escasa potencia (espesor). El basamento cristalino bajo lodolita se vio más alterado y por lo tanto se infiere mayor desarrollo radical por mayor profundidad del suelo.

Estos resultados nos permiten reflexionar sobre las ventajas de diseñar plantaciones que optimicen el uso del espacio y mejoren el aprovechamiento de los recursos para una mejor integración con la producción pecuaria. Los espaciamientos más amplios permiten una mayor transmisión de luz y producción de pasto bajo dosel para uso ganadero.

Conclusiones

Se pudo comprobar que el **SSFC** nos permiten tener ventajas en producción forrajera, por lo que permiten una mayor presencia de ganado durante el ciclo forestal. En estos habría que incorporar en el análisis otro tipo de productos a obtener como madera para aserrío, debobinado y otros productos que logren mayor valor al momento de la comercialización y que permitan compensar la baja densidad de árboles por superficie en comparación a sistemas más densos. La información generada permite proyectar resultados productivos para diferentes combinaciones de producción ganado-madera, lo que se espera mejore la toma de decisiones, principalmente de productores ganaderos familiares no integrados a la cadena forestal. Esto permitirá mejorar sus ingresos y ampliar la base productiva, reduciendo riesgos de mercado, lo que debería tener efectos sobre una mayor base de la producción familiar en el medio. Se deberá completar su evaluación incorporando el análisis económico-financiero que permitan evaluar su viabilidad en el largo plazo. Asimismo, se deben continuar evaluando sistemas en diferentes regiones del país con diferentes marcos de plantación y especies forestales de forma de contar con información complementaria a este trabajo.

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento brindado por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de Uruguay a través del Proyecto FPTA 300 "Producción Ganadera y Forestal: Modelos de Integración Económico Ambiental" y a la empresa forestal REDALCO por permitirnos realizar el trabajo de campo y brindarnos información valiosa para lograr los objetivos propuestos.

Bibliografía

(1) Dirección General Forestal. (2019). Estadísticas y Mercados. Uruguay. Consultado el 20 abril de 2019. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-forestal/informacion-tecnica/estadisticas-y-mercados/extraccion-produccion-consumo>

(2) Cubagge F, Balmelli G, Bussoni A, Noellemeyer E, Pachas A, Fassola F, Colcombet L, Rossner B, Frey G, Dube F, De Silva L, Stevenson H, Hamilton J, Hubbard W. (2012). Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforest Syst* 86:303–314

(3) Boscana M, Varela F. 2011. Factores que influyen en la incorporación del rubro forestal en predios agropecuarios de los departamentos de Florida, Flores y Durazno. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 121 p.

(4) Bernardo AL, Reis MGF, Reis GG, Harrison RB, Firme DJ. (1998). Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* 104: 1–13

(5) Alves DHA, Leles PS, Cabrera E, Marques A, Abilio F. (2014). Crescimento de clone de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* em diferentes espaçamentos. *Floresta*, Curitiba, PR, v. 44, n. 3, pp 431 - 440.

(6) Oliveira TK, Macedo RLG, Venturin N, Higashikawa EM. (2009). Desempenho silvicultural e

productivo de eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em Sistema Agrossilvipastoril. Pesquisa Florestal Brasileira. N. 60:01-09.

(7) Ranieri RP, Reis GG, Reis MGF, Oliveira Neto S, Leite HG, Melido RCN, Lopes HNS, Souza FC. (2013). Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. *Agroforest System* 87: 1295–1307.

(8) Henskens F, Battaglia M, CHerry M, Beadle C. (2001). Physiological basis of spacing effects on tree growth and form in *Eucalyptus globulus*. University of Tasmania, Australia. *Trees*. 15: 365–377.

(9) Gallo L. (2006). Sistemas Silvopastoriles. *Revista Plan Agropecuario*.

(10) Bernardino FS, Garcia R. (2009). Sistemas Silvopastoris. *Pesquisa Florestal Brasileira, Brazilian Journal of Forestry Research*, v. 29, n. 60. *Sistemas Agrossilvipastoris (Edição Especial)*, pp 77-87.

(11) Belsky J. (1994). Influences of trees on savanna productivity: tests of shade, nutrients, and tree-grass competition. *Ecological Society of America*. Vol. 75, Nº 4, pp. 922–932.

(12) Fassola HE, Lacorte SM, Esquivel J, Colcombet L, Moscovich F, Crechi E, Pachas N, Keller A. (2004). Sistemas silvopastoriles en Misiones y NE de Corrientes y su Entorno de Negocios. EEA Montecarlo, INTA. Consultado el 15 de enero de 2019. Disponible en: http://64.76.123.202/new/0-0/forestacion/_archivos/_biblioteca/235%20Silvopastoril%20-%20Fassola.PDF

(13) Polla C. (2011). Silvopastoreo con ovinos. Uruguay 9p. Artículos Técnicos

(14) Nilsen AR, Skarpe C, Moe SR. (2009). La conducta del ganado con respecto a la distancia a los árboles en Muy Muy, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* No. 47, pp 61-67.

- (15) Paciullo DSC, Castro CRTD, Gomide CADM, Fernandes PB, Rocha WSDD, Müller MD, Rossiello ROP. (2010). Soil bulk density and biomass partitioning of *Brachiaria decumbens* in a silvopastoral system. *Scientia Agricola*, 67(5), 598-603.
- (16) Rusch G, Skarpe C. (2009). Procesos ecológicos asociados con el pastoreo y su aplicación en sistemas silvopastoriles. *Agroforestería en las Américas*. ISSN 1022-7482. N°47. Consultado el 15 de diciembre de 2018. Disponible en: www.catie.ac.cr/revistas/
- (17) Brauer D, Ares A. (2005). Aboveground biomass partitioning in loblolly pine silvopastoral stands: Spatial configuration and pruning effects. *Forest Ecology and Management*. Volume 219: 176–184.
- (18) Castaño JP, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Auchayna R. (2011). Caracterización Agroclimática del Uruguay. 1980-2009. INIA, Serie Técnica N° 193.
- (19) Sorrentino A. (1997). Manual para Diseño y ejecución de Inventarios Forestales. Montevideo, Uruguay. Hemisferio Sur. pp 3-13.
- (20) Auclair D, Dupraz Ch. (1999). Agroforestry for Sustainable Land-Use. Fundamental Research and Modelling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications. In: *Agroforestry for Sustainable Land-use*. Forestry Sciences. Volume 60. Ed. Auclair, D., Dupraz, Ch. Kluwer Academic Publisher. 1999. Netherlands. Reprinted from *Agroforestry Systems*, Volume 43, Nos. 1-3 (1998/1999).
- (21) R Core Team. Version 0.99.447. (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
- (22) Methol R. (2006). "SAG globulus": Sistema de Apoyo a la Gestión de Plantaciones de *Eucalyptus globulus*. INIA. Serie Técnica N° 158.

(23) Rakocevic M, Lavoranti, OJ, De Oliveira FC, Medrado MJS. (2002). Avaliação amostral de componente forrageiro em sistemas silvipastoris, pp 1–3.

(24) Serrano R, Mora-Delgado J, Piñeros Varón R. (2014). Materia seca comestible en una pastura bajo diferentes coberturas de dosel arbóreo en una zona de Bosque seco Tropical (Bs-T) en el Tolima, Colombia. *Zootecnia Tropical*, 32(4), pp 351-362.

(25) Baruch O y Guenni Z. (2007). Irradiance and defoliation effects in three species of the forage grass *Brachiaria*. *Tropical Grasslands*, v.41, p.269:276.

(26) Carámbula M. 1978. Producción de pasturas. En Pasturas IV. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Centro de Investigaciones Agrícolas “A. Boerger”. Miscelánea N° 18. Montevideo, Uruguay.