

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMIA**

**MODELO DE SIMULACIÓN PARA SISTEMAS DE
SILVOPASTOREO EN REGIONES CENTRO SUR Y SURESTE
DE URUGUAY**

por

Eduardo Fabián VARELA CASADEY

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

julio 2019

PÁGINA DE APROBACIÓN

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (PhD.) Cecilia Rachid, Ing. Com. (MSc.) Jorge Corral e Ing. Agr. (PhD.) Jorge Álvarez el día 29 del mes julio de 2019. Autor: Ing. Agr. Eduardo Fabián Varela Casadey. Director: Ing. Agr. (PhD.) Francisco Diéguez, Co-director: Ing. Agr. (MSc.) Adriana Bussoni.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo permanente a lo largo de todo el proceso de maestría de la Ingeniera Adriana Bussoni quien ha sido sin dudas motor fundamental para arribar a las instancias finales. De igual forma, agradezco al Ingeniero Francisco Dieguez por su dedicación y aporte al trabajo realizado. He tenido la suerte de contar con ambos tutores desde el primer momento quienes han sido por demás generosos en compartir su tiempo y conocimientos conmigo.

En varias instancias, este fue un trabajo realizado en equipo donde se compartieron muchas experiencias de conocimiento y amistad que deseo reconocer en la Ingeniera Mariana Boscana, el Veterinario Eduardo Llanos y la Ingeniera Carolina Munka, así como también a otros integrantes de facultad de Agronomía que siempre han tenido importantes palabras de apoyo como la Ingeniera Martha Tamousinas, el Ingeniero Jorge Álvarez, el Ingeniero Luis Gallo y especialmente al Ingeniero Ruben Jacques que hizo aportes valiosos para este trabajo. A la docente Dra Mariela Bianco de facultad quien ayudó a la distancia y al Dr Roberto Scoz de INIA que acompañó gran parte del proceso.

Fuera del ámbito académico debo agradecer el apoyo de mi familia quien ha sido el principal sostén durante estos años de mucha exigencia; a mi esposa y compañera María José, mis hijos Agustín y Leticia, mi padre Carlos, mi hermana Nuria y quienes ya no están pero sin duda me acompañan

También agradezco a mis compañeros de trabajo donde me desempeño, que han apoyado siempre todas las instancias de formación de la carrera y han minimizado mis ausencias con un esfuerzo adicional.

Muchas gracias a todos.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 ANTECEDENTES SOBRE INTERACCIONES DE LOS COMPONENTES DEL MODELO.....	6
<u>1.1.1 Interacción marco de plantación y radiación absorbida por los árboles</u>	6
<u>1.1.2 Interacción proyección de sombra y confort animal</u>	7
<u>1.1.3 Interacción forestación y producción de pasto</u>	9
<u>1.1.4 Interacción marco de plantación y producción de madera</u>	11
1.2 ANTECEDENTES SOBRE MODELOS.....	12
1.3 HIPÓTESIS.....	16
1.4 OBJETIVOS.....	16
2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	17
2.1 SUPUESTOS DEL MODELO.....	18
2.2 PRIMERA ETAPA: COMPONENTES DEL SISTEMA Y PRINCIPALES VARIABLES.....	19
<u>2.2.1 Descripción de las variables del modelo</u>	22
2.3 SEGUNDA ETAPA: DIAGRAMAS.....	29
2.4 TERCERA ETAPA: ANÁLISIS DE LOS ESTUDIOS DE CASO.....	32
<u>2.4.1 Desarrollo de las funciones utilizadas en el modelo</u>	39
<u>2.4.2 Funciones definidas-ajustadas en base a los casos de estudio</u>	40
2.5 CUARTA ETAPA: FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR SIMFORGAN.....	46
<u>2.5.1 Módulo forestal</u>	46
<u>2.5.2 Módulo forraje</u>	47
<u>2.5.3 Módulo animal</u>	48
<u>2.5.4 Módulo económico</u>	49
<u>2.5.5 Prueba del simulador</u>	49
3. <u>RESULTADOS</u>	50

3.1 RESULTADOS INTERMEDIOS	50
<u>3.1.1 Función de Área de Copa</u>	50
<u>3.1.2 Efecto del marco de plantación en el área libre para pastoreo</u>	51
3.2 MODELO DE SILVOPASTOREO	54
3.3 HERRAMIENTA INFORMÁTICA	63
<u>3.3.1 Módulo proyección forestal</u>	63
<u>3.3.2 Módulo oferta forrajera</u>	66
<u>3.3.3 Módulo consumo animal</u>	70
<u>3.3.4 Módulo resultados económicos</u>	76
3.4 EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR EN BASE A LOS ESTUDIOS DE CASO.....	77
<u>4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN</u>	88
<u>5. CONCLUSIONES</u>	92
<u>6. BIBLIOGRAFÍA</u>	94
<u>7. ANEXOS</u>	100
ANEXO 1: ACCESO A MANUAL DE USO DE LA HERRAMIENTA SIMFORGAN	100
ANEXO 2: DIAGRAMAS UML.....	101
ANEXO 3: MODELO DE SIMULACIÓN PARA SILVOPASTOREO EN REGIONES CENTRO SUR Y SURESTE DE URUGUAY.....	107

RESUMEN

Los sistemas silvopastoriles representan un tipo de producción que combina en un mismo espacio la obtención de forraje, ganado y madera. Uruguay ha sido históricamente reconocido por su industria cárnica, contando con una población bovina que supera las diez millones de cabezas dedicando una superficie de 16 millones de hectáreas. Dicha industria se beneficia de factores climáticos y geográficos que permiten el desarrollo de la producción ganadera, incluyendo el engorde de animales en sistemas pastoriles extensivos en base a campo natural. En los últimos 30 años se observa un crecimiento en nuestro país en el rubro forestal que ha modificado su matriz productiva. Este desarrollo significa un aumento de la superficie forestada sobrepasando el millón de hectáreas afectadas, principalmente con especies del género *Eucalyptus*, lo que ha permitido ubicarse dentro del mercado mundial de pulpa de celulosa de fibra corta. Si bien ha existido siempre la presencia de árboles dentro de los establecimientos ganaderos como proveedores de leña, sombra y otros servicios, es posible avanzar en el desarrollo de los sistemas silvopastoriles de forma tal que se optimicen los beneficios de esta práctica combinada. Por lo tanto, es necesario profundizar en el conocimiento de estos sistemas en nuestro país. Existe poca disponibilidad de herramientas de apoyo a la toma de decisiones que consideren los principales componentes en forma conjunta. En consecuencia, el objetivo de este trabajo consistió en el diseño de un modelo para comprender las principales interacciones que se establecen entre los componentes de un sistema silvopastoril sobre los resultados productivos. El modelo desarrolla las interrelaciones entre los componentes y cuantifica los resultados intermedios y finales del sistema como la producción de materia seca de campo natural bajo los diferentes diseños de plantación, la superficie disponible para pastoreo, las unidades ganaderas que soporta, la producción de madera y los resultados financieros. Este modelo derivó en una herramienta informática que ofrece a través del manejo de las principales variables, la simulación de diferentes escenarios contribuyendo a una planificación más ajustada del uso de los recursos en el predio.

Palabras claves: modelo, simulador, sistema silvopastoril

SUMMARY

SIMULATION MODEL FOR SILVOPASTORAL SYSTEMS IN SOUTHERN AND SOUTHEAST REGIONS OF URUGUAY

Silvopastoral systems represent a type of production that combines forage, livestock and wood in the same space. Uruguay has been historically recognized for its meat industry, with a bovine population that exceeds ten million heads, dedicating an area of 16 million hectares. This industry benefits from climatic and geographical factors that allow the development of livestock production, including the fattening of animals in extensive pastoral systems based on natural fields. In the last 30 years there has been growth in our country in the forest sector that has modified its productive matrix. This development means an increase in the forested area surpassing the one million hectares affected, mainly with species of the Eucalyptus genus, which has allowed it to be located within the world market of pulp of short fiber pulp. Although there has always been the presence of trees within livestock establishments as suppliers of firewood, shade and other services, it is possible to advance the development of silvopastoral systems in such a way as to optimize the benefits of this combined practice. Therefore, it is necessary to deepen the knowledge of these systems in our country. There is little availability of tools to support decision making that consider the main components together. Consequently, the objective of this work consisted in the design of a model to understand the main interactions that are established between the components of a silvopastoral system on the productive results. The model develops the interrelationships among the components and quantifies the intermediate and final results of the system such as the production of natural field dry matter under the different plantation designs, the surface available for grazing, the livestock units that support, the production of wood and the financial results. This model derived in a computer tool that offers, through the management of the main variables, the simulation of different scenarios contributing to a more adjusted planning of the use of the resources in the property.

Keywords: model, simulator, silvopastoral system

1. INTRODUCCIÓN

La actividad silvopastoril es una alternativa de producción posible y efectiva dentro de nuestro país; involucra a productores ganaderos – históricamente parte fundamental de la cadena productiva agropecuaria - y a la creciente presencia de plantaciones forestales que abarcan regiones de todo Uruguay.

Según datos del Censo General Agropecuario (MGAP, 2011), nuestro país cuenta con más de diez millones de cabezas de ganado, con 23.568 explotaciones comerciales ganaderas (57%), que ocupan 10.890.880 hectáreas (MGAP, 2011). En la Figura 1 se observa la superficie ocupada por la ganadería de carne y lana.

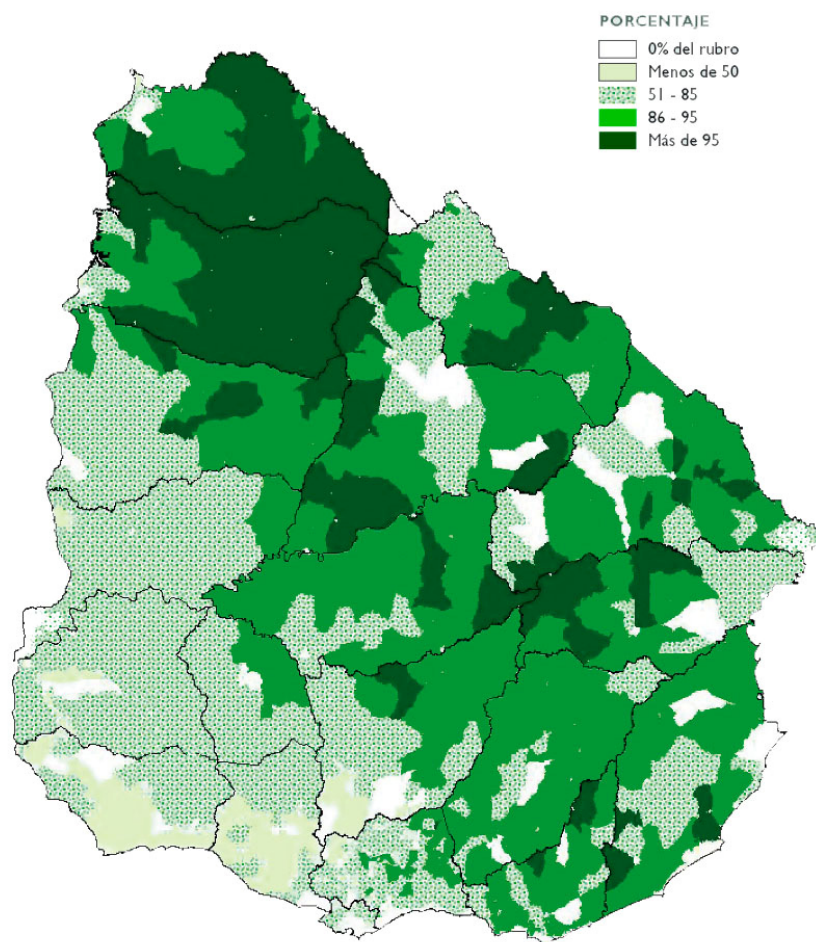


Figura 1: Superficie destinada a la ganadería de carne y lana. (MGAP, 2011)

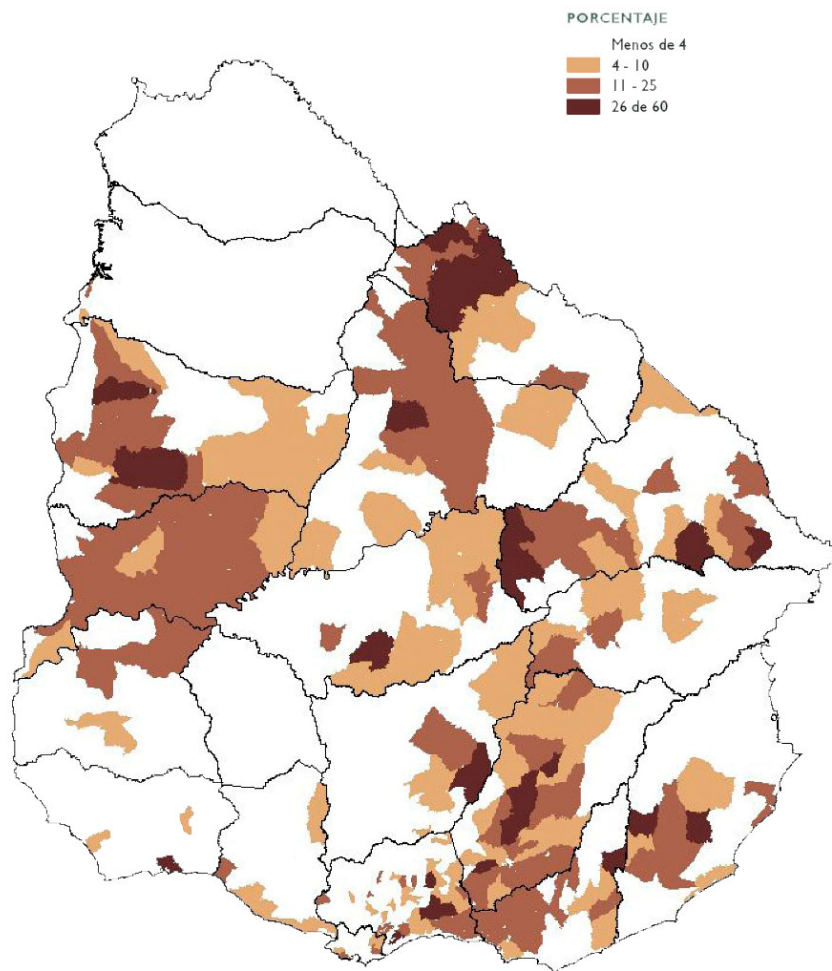


Figura 2: Mapa superficie destinada a la forestación (MGAP, 2011).

En el período 1990 – 2011 se registró un incremento de 62% del área dedicada a la forestación superando actualmente el millón de hectáreas (Figura 2), siendo éste uno de los cambios más importantes en el agro uruguayo de las últimas décadas (MGAP, 2011). Si bien el desarrollo de la forestación está directamente relacionado con la industria de la celulosa y otros productos maderables para aserrío e industria de tableros y contrachapados, también significa una complementariedad como fuente de alimentación para pastoreo de ganado en forma asociada. La información del Censo General Agropecuario (MGAP, 2011), revela la existencia de 785 explotaciones comerciales forestales que manejan 1.243.508 ha de bosques de las cuales un

porcentaje muy alto realizan pastoreo de ganado bajo monte y entre un 71% al 93% de las empresas forestales declaran tener ganado bajo monte (Bussoni et al., 2017).

La forestación puede ser un complemento en los ingresos de los productores, además de brindar servicios ganaderos, las producciones integradas o sistemas silvopastoriles podrían ser biológicamente más productivos, rentables y sustentables (Peri, 2016) (Acosta y Pastorini, 2010). Sin embargo, la incorporación de forestación en predios ganaderos ha sido y es motivo de discusión por parte del sector, las principales barreras (Boscana y Varela, 2011) mencionadas por los productores ganaderos para la adopción de esta práctica son la superficie que se le destina a la forestación que reduce el área de campo natural disponible para pastoreo afectando la carga animal, el manejo de los rodeos bajo el monte, la falta de experiencia en el rubro forestal y la aceptación de los cambios culturales, finalmente los cambios asociados con el paisaje por la presencia de masas forestales.

Por otro lado, productores ganaderos que han incorporado la forestación en sus establecimientos tienen en cuenta algunas ventajas de esta actividad como una mejor utilización del recurso suelo (Ortiz Torres et al., 2018); beneficios para los animales por la disminución del stress térmico del ganado en condiciones de altas temperaturas y protección en las estaciones de frío, lo que reduce las pérdidas en kilos de carne (Simeone et al., 2014a). Dentro de las ventajas se considera también la ecuación económica a largo plazo que permite obtener ganancias por los productos forestales (Boscana y Varela, 2011).

Por otra parte, los sistemas de silvopastoreo disminuyen el impacto ambiental de la ganadería bovina, permiten incrementar la fertilidad del suelo, la profundidad del sistema radicular de los árboles aumenta el área de captación de agua y nutrientes. Hay mayor control de la erosión porque la masa forestal reduce el impacto de la lluvia sobre el suelo, aumenta la infiltración y protege al suelo del viento y de la radiación solar. Existe una mayor actividad de macro y micro fauna por más presencia de materia orgánica en el suelo y aumenta el reciclaje de nutrientes a través del follaje, ramas y residuos del pastoreo. En regiones subtropicales el microclima - humedad y temperatura bajo dosel - se ven afectados. Además de estas ventajas, los bosques son

una importante reserva de carbono (Mahecha, 2002). Los sistemas silvopastoriles también pueden beneficiar la diversidad biológica, donde estos sistemas presentan mayor riqueza y diversidad de especies de aves (Cárdenas et al., 2007).

Desde una aproximación metodológica al problema, cabe mencionar que el enfoque de sistemas en producción agropecuaria, implica el concepto de estudio de un agroecosistema (Hart, 1985), el que se define como un ecosistema modificado por el ser humano que interactúa con factores socioeconómicos y tecnológicos para la utilización de los recursos naturales con fines de producción para la obtención de alimento y servicios (Vilaboa-Arroniz, 2009). De acuerdo con estos autores en un agroecosistema la interacción entre componentes proporciona las características estructurales a la unidad. Así, sus componentes deben presentarse en cierta proporción y arreglo para que se tenga un sistema con una estructura definida. Entre los componentes del sistema se establecen relaciones o interacciones que deben ser entendidas y consideradas al analizar el sistema en su conjunto.

Esto es particularmente cierto para la ganadería con base pastoril puede ser concebida como un sistema biológico complejo en su sentido funcional (Von Bertalanffy, 1972; Vayssières et al., 2011; Turner et al., 2013), considerando las relaciones y regulaciones entre componentes, a lo que se suma la complejidad de interacciones bióticas, si se considera otro componente. Tal es el caso de un monte forestal en sistemas de silvopastoreo. Este, en sentido amplio, refiere a la posibilidad de actividad pastoreo por los animales del forraje que crece en el sotobosque. En un sistema de producción silvopastoril, se reconocen fundamentalmente: el componente animal, el componente forestal y el componente herbáceo; debiendo ser consideradas las características productivas de cada uno de ellos y en forma especial las interacciones bióticas que se establecen a lo largo de los ciclos. Además de éstos, un sistema silvopastoril es afectado por factores ambientales como temperatura, régimen de precipitaciones, radiación incidente, altura sobre el nivel del mar; las características edáficas y el tipo de suelo lo que determina la aptitud y potencial productivo o sitio forestal.

Cabe mencionar que, dentro de un sistema, las principales interacciones que deben ser consideradas son aquellas que afectan la productividad de cada uno de los componentes. En el caso del bosque la sombra proyectada afecta el crecimiento de la pastura bajo dosel por la atenuación de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) que atraviesa las copas y llega a la superficie, así como también cambia las condiciones de humedad relativa del sotobosque (Paruelo y Golluscio, 1994). La densidad de árboles y el diseño o marco de plantación afecta en forma directa el área disponible para pastoreo. Un marco de plantación que disminuya la densidad de árboles aumenta el área de pastoreo pero reduce la producción de madera (Gallo 1998a).

Entonces, la superficie disponible para el pastoreo, así como la producción de materia seca bajo el monte, se encuentran directamente relacionadas con el marco de plantación y es posible, por lo tanto, establecer diseños adecuados que permitan el desarrollo de los componentes animal, pastura y madera en forma combinada.

Los diferentes ciclos productivos de cada uno de los elementos es una característica propia de los sistemas de silvopastoreo que deben integrar las variaciones estacionales anuales de producción de forraje del campo natural, con ciclos que van de uno a tres o más años de engorde animal y finalmente períodos cercanos a los diez años o más para la corta de madera.

Desde un punto de vista económico-productivo, estas características indican cierta complejidad al momento de proyectar un sistema basado en forestación y ganado alimentado a campo natural, estableciendo la mejor distribución para la superficie asignada a cada componente.

La suma de las características expuestas anteriormente destaca la importancia de contar con un modelo conceptual que permita comprender y representar las principales interacciones entre los componentes de un sistema silvopastoril y que sirva de soporte para el desarrollo de una herramienta de simulación.

Se presentan a continuación los principales trabajos de referencia en interacciones de los diferentes componentes del sistema y seguidamente los antecedentes sobre modelos de simulación.

1.1 ANTECEDENTES SOBRE INTERACCIONES DE LOS COMPONENTES DEL MODELO

1.1.1 Interacción marco de plantación y radiación absorbida por los árboles

La producción de madera en masas forestales depende de la cantidad de luz absorbida por la copa y la eficiencia en el uso de la misma. El marco de plantación afecta la distribución espacial, a su vez el espaciamiento reducido entre los árboles provoca un mayor sombreado entre los individuos, disminuyendo la cantidad de luz absorbida por cada capa de hojas (Binkley et al., 2013). Debido a las diferencias estructurales de las copas dentro de un rodal, si bien es difícil determinar un patrón de absorción de luz según el índice de área foliar, se puede calcular a través de mediciones de transmitancia de luz. En el caso de un árbol individual, se agrega la complejidad de que influye la sombra de los individuos vecinos.

Para la estimación de la atenuación de la luz en la copa (Duursma y Mäkelä, 2007), se utiliza la ley de Lambert-Beer para doseles homogéneos; los investigadores encontraron que los doseles presentan la dificultad de no ser homogéneos y requieren gran número y detalle de parámetros, situación que no es aplicable a grandes escalas. En este trabajo se determinó que el área de copa es una buena variable que contempla la forma, el tamaño y la estructura de la misma, y puede utilizarse para estimar la intercepción de la radiación de luz solar. El área de la copa integra los efectos de la forma, estructura y tamaño sobre la intercepción de luz. La forma de la copa influye fuertemente en la intercepción de luz.

Por otra parte, estudios de crecimiento de bosques han demostrado la utilidad de la superficie de área de copa como un índice integrado. Se han encontrado fuertes relaciones entre la productividad de los árboles y el área de copa (Barrio-Anta et al., 2004).

1.1.2 Interacción proyección de sombra y confort animal

Los efectos de la sombra de los árboles, así como la sombra artificial sobre el comportamiento en los animales en pastoreo extensivo ha sido analizado a través del impacto de la temperatura y la humedad sobre el estrés térmico para producción de leche y de carne en nuestra región y en otros países. El modelo incluye esta interacción enfatizando la disminución de energía destinada a mantenimiento corporal.

En el verano 2000 - 2001 se llevó a cabo un estudio en la unidad experimental Palo a Pique de INIA, sobre los efectos de la sombra artificial en el engorde de novillos (Rovira, 2002). Se concluye que animales con acceso a sombra obtuvieron un 14% más de ganancia diaria que aquellos sin disponibilidad de sombra. En este trabajo se concluye que el efecto de la sombra sobre el tiempo en horas que el animal dedica al pastoreo, no mostro diferencias, pero si se observó un cambio en el comportamiento animal en relación a los horarios en que realiza la actividad; los animales que disponen de sombra en días de mucho calor cesan su actividad más temprano en la mañana y la retoman más temprano en la tarde mientras que los animales que no disponen de sombra extienden sus horarios en la mañana y en la tarde.

En el marco del proyecto “Evaluación de la incorporación de la forestación en productores ganaderos y lecheros familiares”, que se ejecuta en forma conjunta por la Comisión Nacional de Fomento Rural y Facultad de Agronomía (Departamentos de Ciencias Sociales y Sistemas Ambientales) con el apoyo de los técnicos de las organizaciones locales y de + Tecnologías, en los departamentos de Flores, Rocha y Lavalleja, fueron colocadas parcelas permanentes para evaluar cambios ambientales y productivos a partir de la instalación de montes forestales con el objetivo de brindar servicios a la ganadería. Las parcelas de monitoreo continuo registran temperatura del aire, temperatura en esferas de Vernon (globos negros), precipitación, producción de forraje en diferentes condiciones y producción de madera para diferentes edades y diseños de cortinas de sombra y abrigo. Se observaron diferencias térmicas en las esferas de Vernon de hasta menos de 10°C bajo el monte con respecto a mediciones bajo el sol, lo que permite inferir una disminución en la pérdida de energía metabólica

destinada a mantenimiento de la temperatura corporal en el animal bajo monte, obtenidas por aportes por convección y radiación bajo árboles (Munka y Bussoni, 2015). En una continuación de este trabajo, la autora demuestra en el caso de una cortina densa de árboles que se llega a reducir hasta en un 80% la velocidad del viento en tormentas severas (Munka et al., 2017) .

En el departamento de Salto se realizaron investigaciones sobre manejo de stress térmico en ganado lechero (C. Saravia et al., 2011), utilizando el índice de temperatura y humedad (ITH) como herramienta para determinar los efectos del stress sobre la producción de leche concluyendo que el stress provoca un menor tiempo de rumia, reducción del bocado, mayor tiempo de fermentación que provoca aumento de temperatura, cambios en los horarios de pastoreo e incrementos en la energía de mantenimiento para disipar el calor corporal.

En la Unidad de Producción Intensiva de Carne (UPIC), para la estación de verano y condiciones de pastoreo de pradera, animales de recría pastoreando áreas de bajo con acceso a sombra natural de montes, experimentaron ganancias de peso en el entorno de 250 gramos diarios superiores a animales sin acceso a sombra (Simeone et al., 2014a).

Fuera de la región, en el sureste de los Estados Unidos, con características de clima subtropical, se estudió el efecto de estas condiciones ambientales sobre el ganado lechero (West, 2003). Se encontró que periodos extensos de altas temperaturas y radiación solar, combinados con alta humedad relativa comprometen las habilidades de las vacas lactantes para disipar los excesos de calor del cuerpo; aquellas vacas con elevada temperatura corporal presentaron un descenso del consumo diario de materia seca, y una reducción de la producción diaria de leche siendo ésta, además, de baja eficiencia. La alta humedad ambiente dificulta la evaporación y con altas temperaturas el ganado no puede disipar en forma satisfactoria el calor y evitar el aumento de temperatura corporal.

En resumen, se puede decir que el bosque actúa como abrigo y protección frente a los vientos en los meses de otoño e invierno y la generación de sombra en verano

reduce el estrés animal, mejorando las condiciones de confort que se reflejan en disminuciones de pérdida de energía para mantenimiento de temperatura corporal que tienen como consecuencia una mejora en la ganancia de peso.

1.1.3 Interacción forestación y producción de pasto

Al considerar el efecto del sombreado en sistemas de silvopastoreo, la densidad y el arreglo espacial afectan la producción de forraje. En un experimento para la evaluación de producción de materia seca *Brachiaria bizantha* cv. Marandú bajo una plantación de *Pinus elliotti* var. *elliotti* x *P. caribaea* var. *hondurensis* a dos densidades - 400 y 250 plantas/ha – y con dos marcos diferentes: uno de filas dobles y otro de filas simples obteniendo como resultado que a igual densidad de plantas la producción de forraje fue más estable en marcos de filas dobles (Lacorte et al., 2016), lo que en parte podría estar explicado por la incidencia de la luz ya que a igual densidad de árboles, el pasaje de luz es mayor en los marcos de filas dobles. Se evaluó la composición botánica y la producción de forraje bajo dosel en suelos rojos oscuros con un marco de plantación de filas dobles con 4 metros entre las filas y 2 metros entre plantas y con un callejón de 19 metros, encontrando que luego de los cinco años de edad de la plantación, estas variables no son afectadas (Lacorte et al., 2016).

La competencia por luz, es el principal factor que determina la producción de forrajeras en sistemas silvopastoriles. Ésta determina un período de tiempo de producción de pasturas, hasta que la intercepción de la luz por el monte es tal que es de esperar que se reduzca al mínimo, por lo que su potencial uso como forraje es nulo en ese momento. En esta situación se considera al monte “cerrado”, refiriendo a la máxima intercepción de luz por las copas, con proyección total de sombra sobre el terreno (Carranza y Ledesma, 2009; Lacorte et al., 2016).

La densidad de plantaciones forestales afecta la producción de materia seca bajo dosel, la oferta de alimento y la capacidad de carga (Gallo, 1998b). En la localidad de Turrialba, Costa Rica, este autor evalúa una pastura compuesta por *Panicum maximum* bajo una población de *Pinus caribaea*, utilizando como indicadores el área basal, el

índice de densidad de rodal de Reineke, el índice de espaciamento relativo y la biomasa de las copas. La menor producción de forraje se relaciona con valores mayores del índice de Reineke. Fueron evaluadas diferentes ecuaciones de regresión para la relación dosel-pastura y densidad del rodal. Los modelos exponenciales negativos y lineales resultaron los que mejor explican la disminución de la producción de pastura frente a los aumentos de densidad del rodal.

Existe una competencia por el espacio en el suelo, por los nutrientes y por la luz entre los árboles y los pastos que componen el tapiz. La especie forestal, la estructura de la copa, la edad de la plantación, así como la densidad de plantas determinadas por el arreglo espacial afectan la competencia por la luz. En especies forrajeras sub tropicales que requieren condiciones elevadas de temperatura, la producción de materia seca se reduce cuando la luz que llega bajo dosel es inferior al 40% (Lacorte et al., 2016).

Según el diseño planteado, los marcos de plantación pueden incluir fajas o callejones entre filas que son áreas libres de árboles y se encuentran expuestas a la radiación solar. En una plantación de *Eucalyptus* sp. con diseño de filas dobles con 4 metros entre filas y 2 metros entre árboles en la fila, más 19 metros de callejón (4x2 +19) se midió la producción de materia seca de *Brachiara brizantha* obteniendo como resultado que después del quinto año, las variables producción de materia seca y composición botánica no fueron afectadas por la copa de los árboles (Lacorte et al., 2016).

Es importante mencionar que existen especies con mayor tolerancia a la sombra que pueden verse beneficiadas por la presencia de árboles que modifican las condiciones ambientales del sistema. Algunas investigaciones realizadas en el sureste de Brasil indican que bajo condiciones de sombra de entre un 40 a 50% se obtuvieron las mejores respuestas en crecimiento de pasturas, morfología y adaptación. En algunos casos la oferta de forraje bajo áreas sombreadas fue superior que en campo abierto, especialmente para condiciones de déficit de agua y nitrógeno. Por ejemplo, *Paspalum regnellii* demostró un mayor crecimiento bajo condiciones severas de sombra (80%) y mejoró el contenido de nitrógeno del forraje (Barro et. al 2012 citado

por Peri, 2016). En trabajos de investigación en curso en Facultad de Agronomía, la especie *Paspalum umbrosum* demostró buen comportamiento bajo condiciones de sombra (Gonzalez-Tálice et al., s. f.). Para el modelo de silvopastoreo construido, se considera un parámetro de reducción de la intensidad de la luz que afecta la productividad de pasturas bajo dosel. a medida que aumenta el sombreado la productividad del campo natural disminuye.

1.1.4 Interacción marco de plantación y producción de madera

La densidad del rodal es una medida del estado de competencia entre los árboles que depende de la cantidad y distribución de la biomasa. Existen densidades de rodal que se ajustan a los objetivos propuestos para la plantación (Gallo 1998a). Se definen diferentes zonas según la densidad de rodal (Langsaeter, 1941) que van desde menor a mayor densidad que pueden utilizarse para manejo de plantaciones (Figura 3); la zona I de sub-utilización del sitio donde el crecimiento por árbol es máximo. Mientras que el crecimiento por unidad de área es decreciente, ésta zona es la aconsejable para producciones silvopastoriles donde se combina la producción de madera con otras actividades como el pastoreo. El resto de la clasificación comprende la Zona II, de transición; la Zona III de máximo crecimiento/ha y la Zona IV de auto raleo.

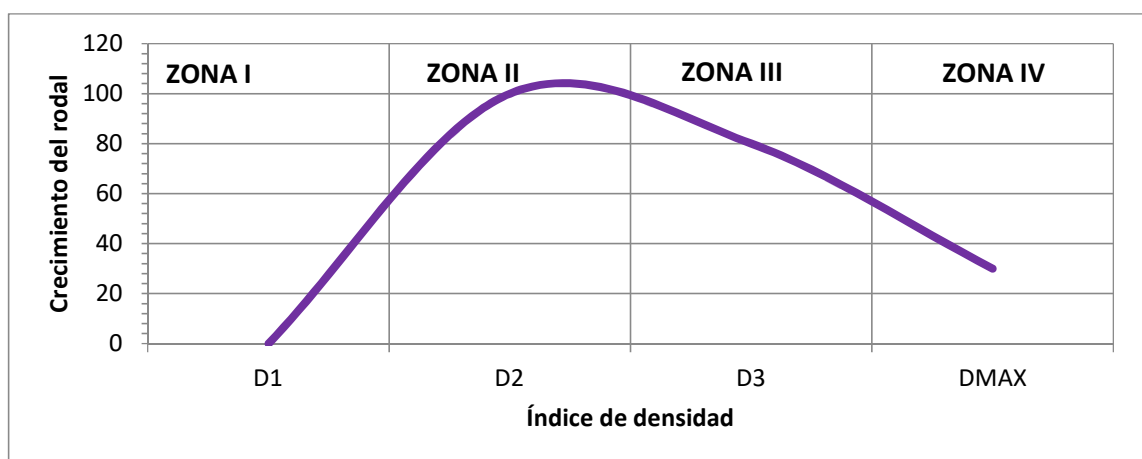


Figura 3.-Crecimiento del rodal según índice de densidad (Gallo, 1998c).

La densidad también tiene un efecto sobre el crecimiento de los árboles como se observa en la Figura 4; al aumentar el número de árboles disminuye el crecimiento medio individual.

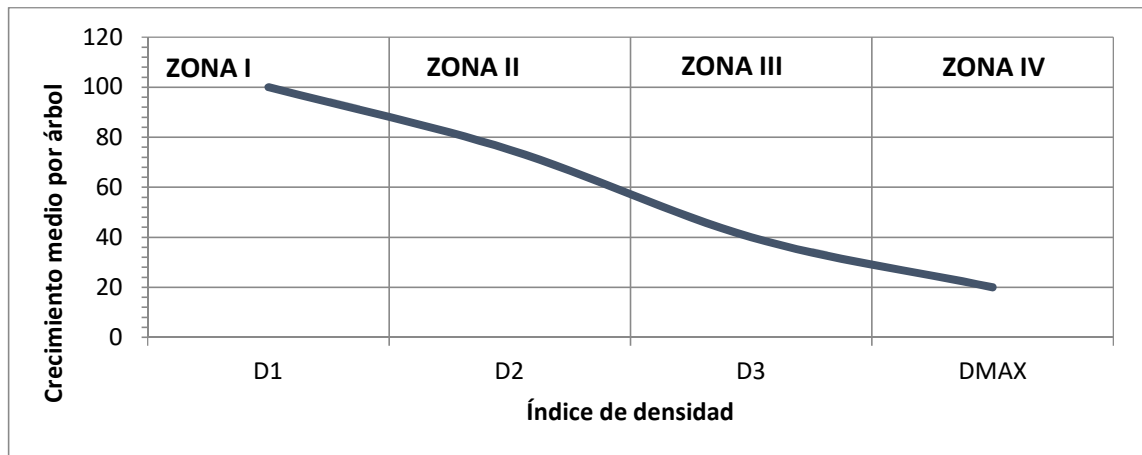


Figura 4.-Crecimiento por árbol según densidad del rodal (Gallo, 1998c).

El manejo de la densidad de plantación deberá estar de acuerdo a los objetivos productivos buscados, pudiendo priorizar la obtención de madera o mantener la carga animal.

1.2 ANTECEDENTES SOBRE MODELOS

En éste trabajo se presenta la construcción de un modelo que incluye los principales componentes e interacciones en sistemas silvopastoriles. Para ello es importante definir a un modelo como una representación abstracta, conceptual, de la realidad que sirve para comprender y transferir conocimiento. Generalmente lo que se intenta modelar es un sistema definido por elementos y con límites establecidos, debiéndose conocer el comportamiento de los elementos y sus interacciones. Pueden construirse modelos físicos, estadísticos (que definen correlaciones entre componentes del sistema), empíricos y mecanicistas. Estos últimos establecen relaciones que explican los mecanismos basándose en leyes científicas conocidas y pueden aplicarse a diversas situaciones (Soto-Aguilar, 2014). Un modelo nos permite abstraer e identificar los procesos involucrados y definir de manera conceptual los componentes para un mejor estudio de los mismos.

Los modelos de simulación pueden tener limitaciones y presentar un grado de falibilidad, no obstante, pueden convertirse en una herramienta de apoyo a la gestión que colabore en la toma de decisiones del productor en la etapa de planificación y permitir monitorear y realizar ajustes a lo largo de la producción. John Passioura advierte en su análisis sobre los modelos de simulación de cultivos que dichos modelos que intentan mejorar nuestro conocimiento de la fisiología de los cultivos y su interacción con el ambiente, son modelos científicos, y por lo tanto son mecanicistas y que salvo excepciones no pueden cumplir sus expectativas, ya que por lo general están viciados por basarse en conjeturas no comprobables sobre los procesos que controlan el crecimiento. Sin embargo pueden resultar una fuente de educación para todos los involucrados en el proceso de desarrollo (Passioura, 1996).

Los modelos desarrollados para abordar problemas agronómicos pueden ser empíricos o mecanísticos, estáticos o dinámicos, determinísticos o estocásticos entre otros. Los modelos dinámicos presentan la particularidad de recalcular las variables de estado durante el proceso de simulación y se ajustan durante el ciclo dependiendo de los procesos y la interacción con otros resultados (Universidad de Murcia, s. f.).

El simulador de silvopastoreo desarrollado está comprendido dentro de los modelos determinísticos ya genera los mismos resultados siempre que se ingrese la misma información. No obstante, el simulador incluye una variable *efectoAño* que tiene un comportamiento aleatorio lo que permite incorporar el azar en las simulaciones. Si se activa esa variable al comienzo de la simulación, se determina en forma aleatoria un número de años “malos” para la producción de forraje lo que afecta los valores productivos de carga animal soportada por el sistema, así como los resultados económicos.

En Uruguay se han desarrollado diferentes modelos de uso agronómico para el uso en sistemas productivos. Se mencionan a continuación algunos de estos modelos que aplican sobre los sistemas ganaderos, pastoriles y forestales. El modelo MEGanE - Modelo de explotación ganadera - (Dieguez Cameroni et al., 2012), explica la relación entre la oferta de materia seca en campo natural y la evolución de un rodeo en

pastoreo considerando la carga animal soportada, en un esquema de balance oferta y demanda.

El modelo de simulación Agrícola-Ganadero de FUCREA (GRIPROCAR-FUCREA), permite estimar el resultado físico y económico de un predio agrícola ganadero, basándose en un criterio de maximización del margen bruto de la empresa, y es aplicable a combinaciones de ganado bovino, ovino, forestación y pastura. El modelo evalúa los usos potenciales del suelo, estrategias ganaderas (cría, invernada), alimentación (uso de suplementos) y rotaciones agrícolas o forestales. Como resultado, genera diferentes escenarios con un componente económico que permite evaluar la mejor alternativa para la explotación de los rubros en forma combinada (Simeone et al., 2014b).

Referente a la producción forestal, el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) desarrolló en el año 2006, para las condiciones de nuestro país, sistemas de apoyo a la gestión (SAG) de plantaciones forestales. Estas herramientas informáticas están basadas en modelos de crecimiento forestal que permiten simular distintas opciones de manejo (Methol, 2008), contemplan aspectos de crecimiento, volumen de madera, calidad y destino de las trozas comerciales que se pueden integrando un análisis económico. Las principales variables consideradas son la especie forestal, la población (cantidad de individuos por hectárea), la tasa de mortalidad, la altura media dominante, el diámetro inicial y el índice de sitio. El simulador realiza una proyección con rangos de hasta 20 años o más. Los modelos han sido actualizados en el año 2014 para *Eucalyptus dunnii*, *globulus*, *grandis* y *Pinus taeda* (Hirigoyen, 2014).

El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), de San Carlos de Bariloche, desarrolló el Modelo Pehuén con el objetivo de mejorar las prácticas de conservación de recursos genéticos forestales en bosques manejados por comunidades locales (Gallo et al., 2004). Un objetivo fue poder utilizar el modelo para comparar el comportamiento de diferentes ecosistemas forestales. Se utilizó para diseñar, la herramienta STELLA debido a su potencialidad para modelar situaciones e interacciones apoyadas en el concepto de CLD (Causal Loop Diagrams). Los CLD son

mapas que representan e ilustran el comportamiento de las diferentes interacciones que se dan entre los componentes de un sistema. A través de diagramas de flujo, tasas de crecimiento y fórmulas que contemplan las principales variables, es posible simular en función del tiempo, sistemas dinámicos.

En cuanto a sistemas de producción forrajera, en Argentina el Consorcio Regional de Experimentación Agrícola ha desarrollado un software llamado “Tablero de control forrajero” (Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola - AACREA, n.d.) utilizando información sobre la tasa de crecimiento (kgMS/ha/día) proveniente de la base de datos del sistema de seguimiento forrajero satelital (UBA, s. f.) que monitorea la oferta forrajera para un lote, establecimiento o región permitiendo a productores y técnicos una planificación más ajustada de sus recursos.

En Nueva Zelanda la empresa Farmax ha desarrollado y comercializa diferentes soluciones informáticas para apoyar la toma de decisiones de productores de ovinos, bovinos y venados. Los simuladores permiten manejar una presupuestación forrajera y también presentan tasas de crecimiento de pasturas de campo natural según regiones y aplicadas a escala predial (pasture growth forecaster) (AgResearch, 1993).

De esta revisión bibliográfica podemos observar que no se dispone de modelos que integren los elementos de un sistema silvopastoril para las condiciones del Uruguay. El contar con una herramienta que permita proyectar los componentes pastura, animales y forestación en forma combinada es estratégico para el desarrollo de la actividad forestal en predios ganaderos.

1.3 HIPÓTESIS

Las hipótesis del trabajo son:

1. El modelo representa las principales interacciones de un sistema silvopastoril.
2. El modelo simula los resultados productivos y económicos del sistema.
3. Los Sistemas forestales que incluyen callejones producen mayor forraje que los sistemas plantados en marcos convencionales.

1.4 OBJETIVOS

El principal objetivo es construir un modelo de simulación en silvopastoreo, que permita comprender las interacciones bióticas entre los componentes de un sistema que combina la producción de madera, la producción de forraje bajo dosel y la carga animal de forma integrada bajo un mismo ambiente.

Como objetivo secundario y a través del modelo de simulación creado se plantea la obtención de resultados productivos y económicos.

Un tercer objetivo es la construcción de una herramienta informática que permita realizar simulaciones basadas en el modelo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en cuatro etapas, en una **primera etapa** en base a los antecedentes se definieron los componentes relevantes del sistema y las variables que inciden en cada componente, así como sus interacciones.

En una **segunda etapa** se desarrolla el modelo funcional a las interacciones; para esto se definieron los diagramas de a) clase, b) actividad y c) secuencia.

Luego, en una **tercera etapa** en base a estudios de caso se estimaron las siguientes funciones: Área de copa, Área sombreada, Reducción de superficie de pastoreo, producción de materia seca y estimación de dotación ganadera. Para la proyección del crecimiento de montes forestales, se emplearon algunas funciones del software Sistema de Apoyo a la Gestión, SAG *Eucalyptus* (Methol, 2003,2006); las funciones empleadas se utilizaron para estimar Área Basal, Altura Individual, Altura Media de los Dominantes, Volumen individual, Volumen por hectárea e Índice de Sitio (Methol, 2006). A partir del volumen comercial proyectado de madera se estimaron los resultados económico-financieros, empleando el Margen Bruto Ganadero y el Margen Bruto Forestal que es el Valor Actual Neto llevado a una base anual.

En la **cuarta** y última **etapa**, basado en el modelo obtenido se crea la herramienta informática de simulación (SimforGan). Finalmente, los resultados obtenidos se comparan con otras situaciones productivas, basadas en estudios de casos.

El principal producto forestal obtenido es madera de diámetros finos de *Eucalyptus ssp.* ya que las rotaciones y manejo silvicultural propuesto tienden a obtener este tipo de producto. Es de destacar que la principal industria forestal en el Uruguay es la producción de celulosa proveniente de fibra corta de *Eucalyptus*.

2.1 SUPUESTOS DEL MODELO

El modelo de silvopastoreo desarrollado incorpora un conjunto de supuestos con la finalidad de acotar su funcionamiento, por lo que la obtención de resultados se debe interpretar con estos supuestos. Se establecen además ciertos valores rango dentro de los cuales el modelo tiene validez como por ejemplo las regiones del país, el tipo de pastura y el destino de la producción forestal entre otros. Se enumeran a continuación los supuestos establecidos a priori:

1. La producción de forraje es para un tapiz de campo natural.
2. La superficie destinada a forestación en cada establecimiento cumple con las disposiciones y regulaciones establecidas.
3. La plantación forestal del modelo se supone en un estado sanitario bueno.
4. La mortalidad de plantas forestales se estima en un 2% anual.
5. A los efectos del presente trabajo se utiliza los siguientes términos como equivalentes: marco de plantación y arreglo espacial. Esto hace referencia a la distancia de las plantas entre filas, la distancia de las filas y la distancia de los callejones.
6. El destino de la producción forestal es madera de diámetros finos de *Eucalyptus ssp.* para producción de pulpa de celulosa o producción de energía.
7. Los coeficientes utilizados en las ecuaciones correspondientes al área de copa son válidos para los marcos de plantación de los casos de estudio. En el caso de otras variantes de marcos de plantación se utiliza un valor máximo teórico para el área de copa estimada.
8. En el caso de utilizar información satelital de productividad primaria neta aérea estimada por teledetección para el cálculo de materia seca, la misma es el promedio del año 2000 a la fecha por lo que se incluyen años buenos, años malos y años estándar de producción.

9. La ganancia en producción de carne corresponde a kilos producidos por el total de animales durante el período considerado.
10. Las condiciones sanitarias del rodeo animal se consideran como buenas.
11. La sombra proyectada por la copa de los árboles sobre la superficie del terreno es obtenida en el zenit.

2.2 PRIMERA ETAPA: COMPONENTES DEL SISTEMA Y PRINCIPALES VARIABLES

Un modelo es una abstracción, es una representación gráfica de una situación que se intenta explicar o analizar. Está formado por objetos que interactúan entre si y cada objeto tiene atributos propios que lo definen y pueden realizar operaciones o métodos (Corral, 2000).

El sistema de silvopastoreo considerado en el presente trabajo, incluye un componente forestal, un componente ganadero y un componente forrajero o pastoril interactuando en un mismo ambiente en forma conjunta; se modelaron los principales componentes: la pastura, el bosque y el componente animal, además de los componentes ambientales como radiación solar, temperatura y productividad potencial del sitio forestal que se expresa a partir de la relación entre la altura media de los árboles dominantes a determinada edad de la plantación.

El modelo incorpora las principales variables de interés, descritas en la Cuadro 1, que conforman las entradas y salidas del sistema y define los procesos que afectan o dependen de esas variables dentro de cada componente.

Los elementos que integran el sistema, presentan interacciones biofísicas que afectan la productividad final del mismo.

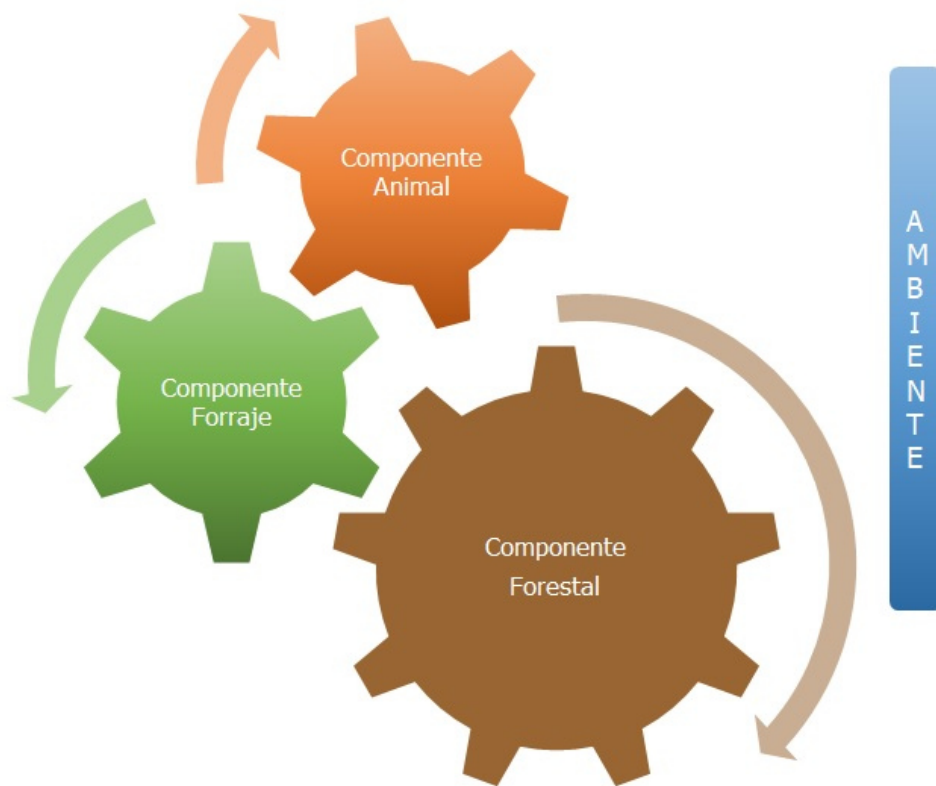


Figura 5: Componentes del sistema de silvopastoreo

Los componentes del sistema (Figura 5), presentan ciclos productivos de diferente duración en el tiempo; en el caso del componente forestal la duración del ciclo es cercana a los diez años para la primer cosecha de madera, en el componente animal el ciclo puede variar de 18 a 36 meses y el ciclo de producción de forraje es anual. Adicionalmente, tanto la ganancia de peso de los animales como la producción de forraje, tienen un comportamiento productivo que varía en forma estacional.

Las etapas biológicas de desarrollo y crecimiento de los componentes también son diferentes y provocan cambios en las interrelaciones a medida que avanzan cronológicamente (Figura 6). A modo de ejemplo una vez implantado un cultivo forestal se debe esperar un tiempo cercano a los dos años para introducir animales en el monte, para evitar daños en las plantas jóvenes, por otro lado, el desarrollo de la copa de los árboles que proyecta la sombra sobre la superficie, tiene un máximo valor

cuando se alcanza el cierre del dosel – aproximadamente a los cinco años – y luego se estabiliza hasta el final de la cosecha.

Los animales cumplen varios ciclos productivos dentro de un turno forestal, por lo que debemos considerar que una vez alcanzado su peso objetivo, deben ser reemplazados por otro lote, como se explicará más adelante. Esos nuevos animales ingresan a un sistema que presenta diferencias con respecto al estado original ya que la superficie, la densidad y la luz que llega al suelo, es diferente en etapas posteriores. Estos aspectos hacen que el modelo de simulación se comporte en forma dinámica (Etienne y Rapey, 1998).

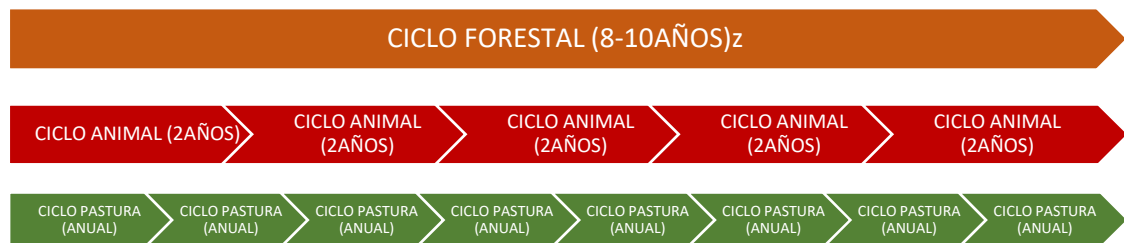


Figura 6: Ciclos de los componentes del sistema

Para la construcción del modelo se determinaron las principales relaciones entre los componentes que afectan a la productividad del sistema. En la mayoría de los casos las interacciones tienen un comportamiento bidireccional favoreciendo una variable y por otro lado disminuyendo el desarrollo de otra. A modo de ejemplo el aumento de la cantidad de árboles – dentro de cierto límite – favorece la producción de metros cúbicos de madera siendo un resultado positivo mientras que por otro lado reduce la producción de pasto bajo dosel lo que afecta la carga ganadera en forma negativa. La sombra proyectada puede disminuir la producción de pasto mientras que mejora el confort térmico para los animales.

2.2.1 Descripción de las variables del modelo

Para poder modelar las interacciones, se identificaron las principales variables relacionadas a cada componente (forestal, pastura y animal) así como variables generales del sistema. Se presentan en el Cuadro 1, las variables utilizadas como entradas y salidas del sistema y más adelante se profundizará sobre cada una de ellas.

Cuadro 1.- Variables consideradas en el Sistema.

VARIABLE	UNIDADES	TIPO (I/O)	DESCRIPCIÓN
Ubicación del establecimiento	Longitud, latitud	Input	Permite determinar la región productiva para el cálculo de materia seca según información satelital.
Superficie total	ha	Input	Superficie del potrero o la suma de los potreros
Superficie efectiva forestada	ha	input	Superficie ocupada por la plantación forestal.
Especie forestal	-	Input	Principal especie que conforma la plantación.
Marco de plantación	mts	Input	Diseño espacial determinado por la cantidad y distancia entre filas, distancia de los árboles en la fila y distancia de callejones.
Densidad de plantas	pl/ha	Output	Número de plantas en una ha.
Producción madera	m ³ /ha	Output	Volumen (m3) de madera producida en el período.
Luz bajo dosel	%	Output	Es la radiación solar (%) que atraviesa el estrato forestal superior y llega al tapiz bajo dosel.
Proyección de sombra	m ²	Output	Área (m2) cubierta por la proyección del dosel.
Duración de las estaciones	días	Input	Invierno, Primavera, Verano y Otoño tienen efectos diferenciales en las producciones de pasto y en las tasas de ganancias, como consecuencia, los días que dure cada estación afectan la producción.

VARIABLE	UNIDADES	TIPO (I/O)	DESCRIPCIÓN
Edad de la plantación para ingreso de los animales	Años	Input	Determina la edad de la plantación para el ingreso de los animales a pastorear bajo forestación.
Categoría animal	-	Input	Determina el peso animal inicial, lo que afecta el consumo estacional de forraje.
Peso inicial de los animales	kg	Input	Es el peso con el que ingresan los animales al sistema.
Peso objetivo de los animales	kg	Output	Es el peso final que alcanzan los animales y una vez logrado, se reemplazan por otros con las condiciones iniciales.
Superficie efectiva de pastoreo	ha	Output	Es el área disponible para el alimento del ganado, que incluye las áreas libres de árboles.
Producción de pasto según estación	kg/MS/ha	Output	Peso (kg) de materia seca producida según la estación. Se consideran los efectos de los marcos de plantación en la producción de pasto.
Tasa de ganancia diaria de peso	kg/día	Input	La ganancia de peso (kg) diaria, dependiendo de la estación del año.
Consumo animal	kg/MS/día	Output	Es el forraje (kg) consumido diariamente en función del peso vivo del animal.
Carga animal	UG/ha	Output	Son las unidades ganaderas (UG) soportadas de acuerdo a la demanda de consumo animal y a la oferta forrajera.
Producción de carne	kg/ha	Output	Producción de carne (kg) durante el período considerado.
Costos forestales	U\$\$/ha	Input	Costos de plantación y manejo de producción forestal.
Costos ganaderos	U\$\$/ha	Input	Costos de producción y manejo ganadero (Sanidad, Mano de Obra, Reposición, Otros)
Ingresos forestales	U\$\$/ha	Output	Valores de venta de madera en pie, descontados, costos de comercialización.

VARIABLE	UNIDADES	TIPO (I/O)	DESCRIPCIÓN
Ingresos ganaderos	U\$\$/ha	Output	Valores de venta de ganado, descontados costos de comercialización.

A continuación, se describen las variables mencionadas en la Cuadro 1:

Ubicación del establecimiento: se define en base a la latitud y longitud y determina la eco- región (Brazeiro et al., 2012) a la cual pertenece el predio. A partir de esta información se estima la producción de forraje, utilizando la base de datos disponible en el proyecto “Observatorio Forrajero” (UBA-LART, 2019), que dispone de una base de datos de producción primaria neta aérea desde el año 2000 a la fecha. Por lo expuesto, la ubicación del establecimiento permite estimar la producción de forraje para campo natural sin forestación, en el caso que no se disponga de registros propios.

Superficie total (ha): refiere a la superficie total del predio, del potrero o la suma de los potreros que la componen.

Superficie ocupada por forestación (ha): son las hectáreas destinadas a la plantación forestal.

Especie forestal: es la especie forestal que conforma la plantación dentro del establecimiento. Diferentes especies tienen distintos desarrollos de su estructura de copa y esto puede modificar su comportamiento en cuanto a la proyección de sombra y la intercepción de luz.

Marco de plantación: el marco de plantación es una medida de manejo que define el arreglo espacial de los árboles y determina la densidad de plantas por hectárea. Generalmente se encuentra en función de los objetivos productivos ya que, si se piensa en priorizar la producción de madera para biomasa o materia prima para fabricación de pulpa, la densidad de plantas debe ser alta; si se busca un objetivo combinado con ganadería deberá dejarse espacio suficiente para pastoreo y aumentar la carga animal, a partir de una densidad forestal menor.

Para el marco de plantación se toma en cuenta si se planta en filas simples o filas dobles, la distancia entre filas, la distancia de los árboles en la fila y la presencia de callejones o fajas libres de árboles como se muestra en la

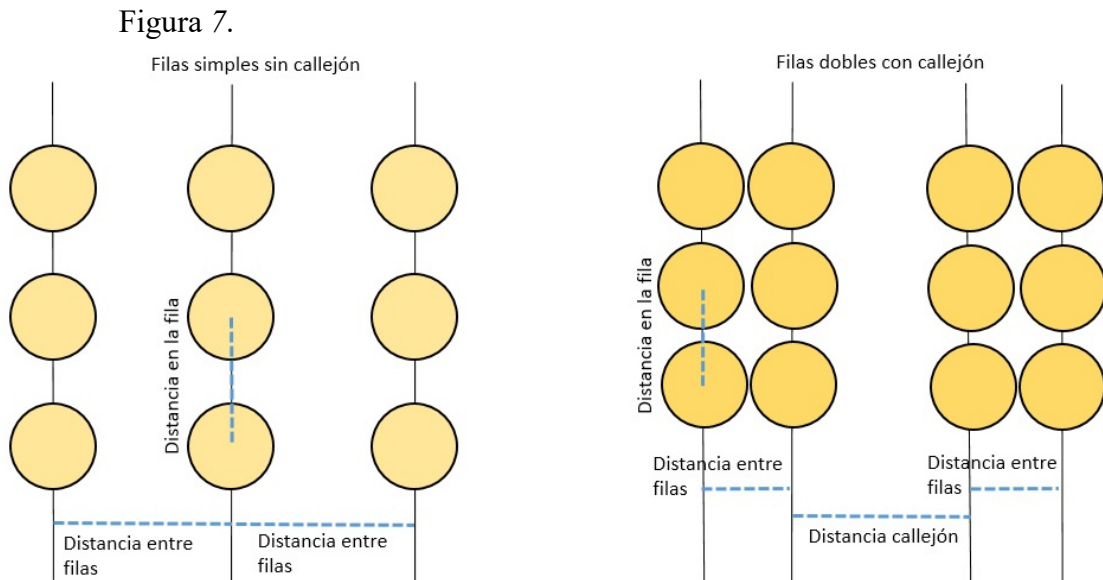


Figura 7: Diferentes marcos de plantación

Duración de la estación: el modelo considera la estacionalidad como un factor ambiental que afecta la tasa de ganancia diaria de peso por parte de los animales, así como la producción de forraje según el momento del año. Si bien la duración en días de cada estación es de 91,25 días, a los efectos de la simulación y en función de la fecha de comienzo se determina la duración real en días por estación/año.

Edad de la plantación para el ingreso de los animales: durante las primeras etapas de desarrollo, la plantación forestal debe protegerse de los posibles daños provocados por el pisoteo, ramoneo y el tránsito de animales, hasta que la misma logre establecerse. Se estima que los animales no deben ingresar hasta completar los dos años de desarrollo de la plantación; factores relacionados a la especie forestal, material genético, si se trata de un rebrote así como la categoría y peso animal pueden incidir

en el momento de permitir el acceso de los animales a pastorear en el monte, por lo que ésta variable se ingresa por parte del usuario de acuerdo a cada caso.

Categoría animal: la categoría del rodeo es un input del sistema e indica el peso inicial de los animales lo cual está relacionado con el consumo diario y con la carga animal que puede soportar el potrero según la estación.

Peso objetivo de los animales: los animales ingresan al sistema con un peso inicial y permanecen en el mismo hasta alcanzar un peso objetivo o peso final. En ese momento el rodeo puede ser sustituido por otro de iguales características o de una categoría distinta.

Peso Animal a la salida de estación (kg): está dado por el consumo diario de materia seca calculado como un porcentaje del peso vivo (entre 2 y 3%), la cantidad de días que permanece alimentándose en la estación del año y por la tasa de ganancia de peso diaria (que también varía en forma estacional). Depende del peso inicial dado por la categoría animal y de la oferta de forraje disponible para consumo. El modelo considera que el factor ambiental temperatura incide en la tasa de ganancia diaria por su efecto sobre el stress térmico. En condiciones estivales con altas temperaturas, el animal aumenta el gasto de energía metabólica destinada a mantener su temperatura corporal en un rango de equilibrio. Cuando la temperatura ambiente es reducida por efectos de la sombra de los árboles, el animal reduce su gasto energético de mantenimiento evitando pérdidas. También en invierno hay una protección del bosque frente a vientos y heladas.

Tasa de ganancia (kg/día): representa el incremento diario en kg de peso del animal. La ganancia diaria está asociada a factores como la raza (Bos Indicus mayor tolerancia a temperaturas altas, Bos Taurus mejor adaptada a condiciones climáticas de Uruguay para ganadería extensiva), la categoría del rodeo y su edad, el estado sanitario y el estado reproductivo que determinan las necesidades y distribución de energía metabólica. También afecta a la tasa de ganancia las características del forraje consumido, la presencia de aguadas, la geografía del terreno y condiciones de confort

animal que varían según la temperatura ambiente y la humedad (Simeone et al., 2014a).

Ajuste de la tasa de ganancia diaria (kg/día): En cuanto a la interacción sombra y stress térmico, el modelo establece un índice en función del porcentaje de área sombreada y se aplica a la tasa de ganancia diaria de kg/animal en el período estival. Para estaciones invernales se establece un índice por protección frente a los vientos de la masa forestal en relación a la densidad de la misma.

Superficie efectiva de pastoreo (ha): es el resultado de la superficie total considerada descontada la superficie efectiva ocupada por el bosque.

Oferta de forraje (kg/MS/estación): es el resultado de la interacción entre la superficie efectiva de pastoreo, la producción en kg/MS/día según la estación de crecimiento (invierno, primavera, verano, otoño), la cantidad de días correspondientes a cada estación, el área sombreada y el porcentaje de luz que llega al suelo. También puede incluirse como parte de la oferta un remanente de forraje (stock) de la estación anterior que no haya sido consumido por los animales. Para el cálculo de la oferta de forraje se consideran los resultados promedio estacionales obtenidos en la serie técnica FPTA- INIA (Bussoni et al., 2019).

Superficie efectiva forestada (ha): es resultado de la interacción entre el diseño de plantación y la superficie total. A los efectos de este trabajo, esta superficie se determina considerando la cantidad de árboles multiplicado por el espacio ocupado por cada individuo: El Área Basal individual + el área de influencia de copa en donde la producción forrajera se ve disminuida. Este valor multiplicado por el total de hectáreas es el área efectiva ocupada por la forestación en el predio, la que a su vez se descuenta del área disponible para producción de forraje. Se consideró que cada árbol ocupa un área potencial de 4m^2 , como se muestra en la Figura 8.

Área máxima individual ocupada (m^2): distancia 1 entre filas (1+1) * distancia 2 en la fila (1+1) = 4m^2 .

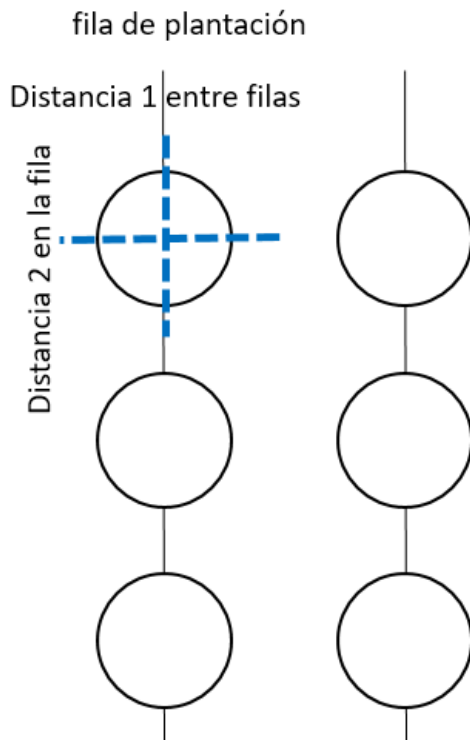


Figura 8: Superficie afectada por el área de influencia del árbol

Finalmente se realiza la sumatoria de área ocupada para la cantidad de árboles por hectárea. Esta última variable depende del marco de plantación definido.

Área de superficie sombreada (%): es el área de copa de los árboles proyectada sobre el suelo. Depende del marco de plantación que determina la densidad de árboles y su arreglo espacial. También depende de la edad del bosque ya que existe una correlación positiva entre la edad y el tamaño de la copa y la especie forestal (Nunes de Moura et al., 2016). El área de superficie sombreada es la sumatoria de área de copa sobre la superficie de pastoreo (Wink et al., 2012), tomando en cuenta el solapamiento de las copas (Figura 9).

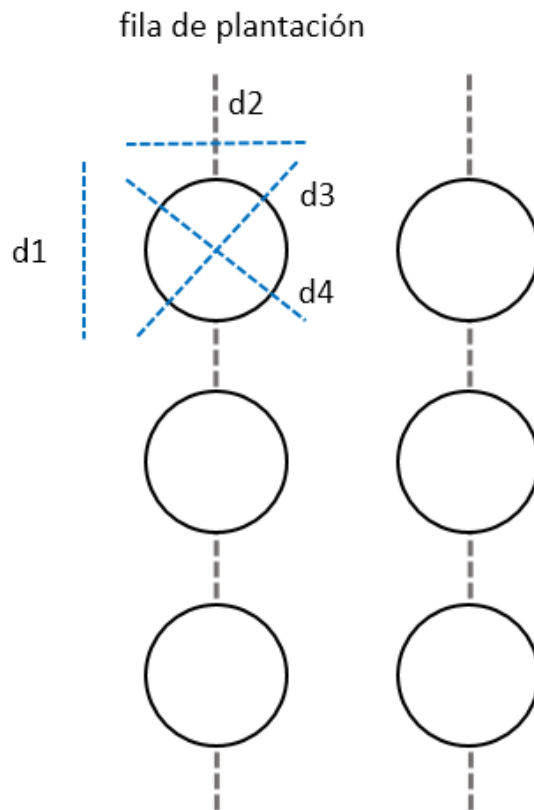


Figura 9: Área de copa y proyección de sombra

Producción de madera (m^3): es el volumen de madera total sin corteza, a lo largo de la rotación forestal. Es el resultado de la interacción entre la densidad de plantas, el marco de plantación, la edad del bosque, la especie forestal y de condiciones ambientales y características del suelo. Para estimar el volumen de madera producida se utilizaron las funciones de SAG INIA para *Eucalyptus globulus* (Methol, 2006) [Ecuación 18].

2.3 SEGUNDA ETAPA: DIAGRAMAS

Para el presente trabajo se diseñó un modelo predictivo y dinámico, utilizando el lenguaje UML (unified model language) (Fowler, 2003) ya que permite comprender y explicar un proceso o conjunto de procesos, obteniendo un Modelo de Dominio que permite modelar la solución a través de un Diagrama de Diseño de Clases.

El lenguaje UML facilita la interpretación de la realidad en un formato gráfico a través de diagramas de clase, diagramas de actividad y de flujo, entre otros; eso representa una ventaja en las etapas de diseño y comprensión del problema, así como la discusión del mismo en grupos interdisciplinarios. Un modelo conceptual desarrollado con UML es a su vez más fácil de codificar o programar lo que facilita la implementación y la escritura del código de programación del simulador (Corral, 2000). Se trata de un protocolo estandarizado y regulado por la organización OMG (Object Management Group, www.omg.org).

Las clases permiten describir los objetos, sus comportamientos y los estados de ese objeto de acuerdo a los valores que tome en determinadas situaciones. El lenguaje unificado de modelado utiliza varios tipos de diagramas que permiten representar gráficamente la estructura general de un sistema mostrando los componentes y sus diferentes tipos de relaciones o interacciones. Los más utilizados son los diagramas de clase, los diagramas de actividad y los diagramas de secuencia (disponibles en ANEXO 2). El diagrama de clases representa funciones, colaboraciones, restricciones e interacciones entre los elementos del sistema. Los diagramas de actividades describen los procesos que abarcan los componentes del sistema. En cuanto a los diagramas de secuencia, éstos representan una serie de eventos que ocurren en un orden cronológico y son utilizados para representar procesos que tienen una evolución en un período de tiempo (Corral, 2000). El lenguaje UML contiene también diagramas de uso, de objetos, de estado y de ejecución.

Los diagramas definidos utilizando el lenguaje UML se convierten en el principal insumo al momento de escribir el código de programación, independientemente del lenguaje de programación a utilizar. Permiten establecer las estructuras y requerimientos del software que se va a desarrollar.

A partir de las variables consideradas, se modelan las clases y sus atributos, así como las relaciones existentes con el resto de los componentes del sistema y se representa en el diagrama de clases que se observa en la Figura 10).

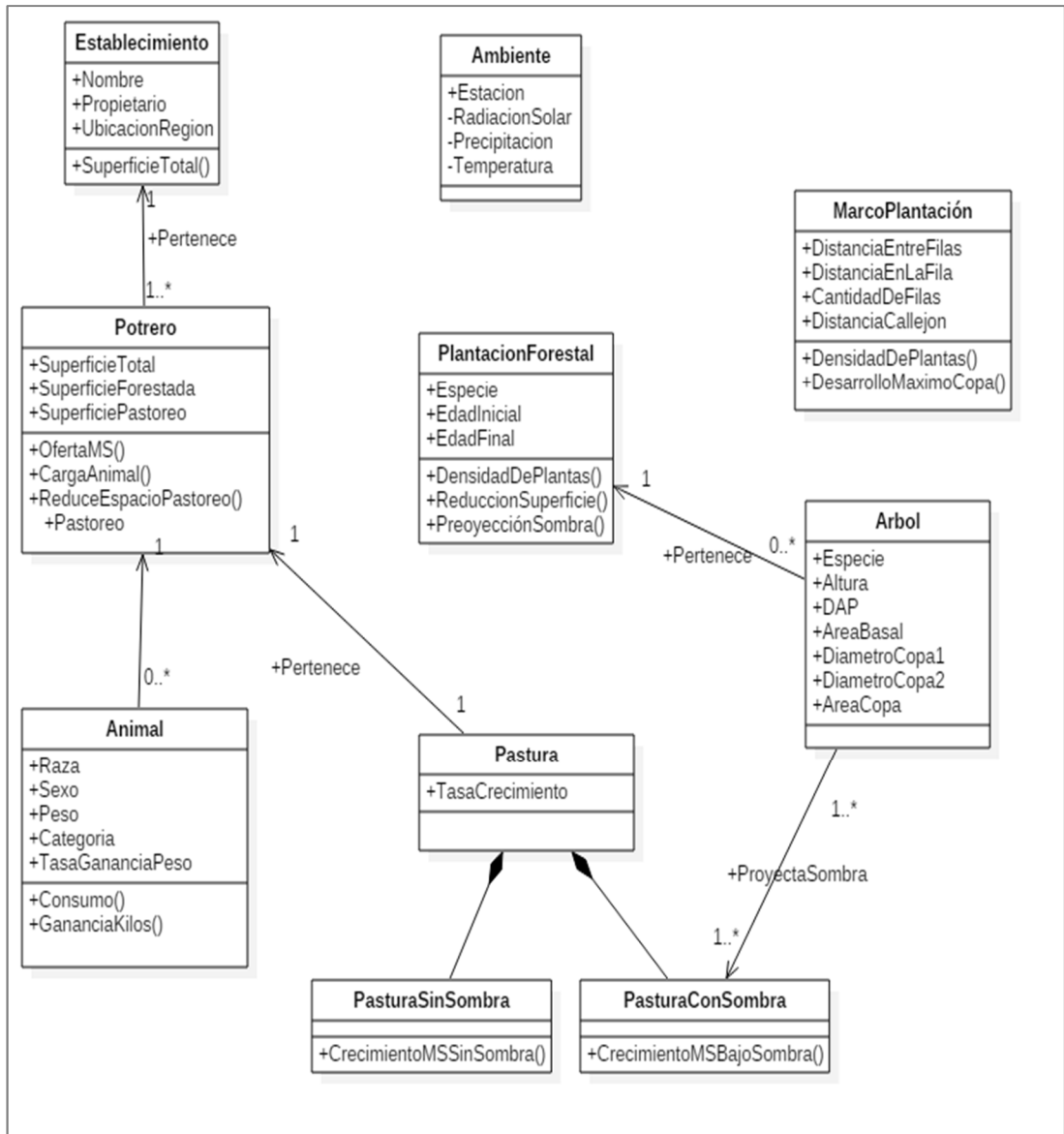


Figura 10: Diagrama de Clases del modelo

2.4 TERCERA ETAPA: ANÁLISIS DE LOS ESTUDIOS DE CASO

Para el diseño del modelo se utilizó información obtenida del proyecto FPTA 300: “Producción Ganadera y Forestal: Modelos de Integración Económico Ambiental” que se llevó a cabo desde el año 2014 hasta el 2017 en el ámbito de Facultad de Agronomía – Udelar, en las zonas centro sur y sureste del país que incluían forestación con ganadería sobre campo natural (Bussoni et al., 2019). Se obtuvo información dasométrica de plantaciones forestales con diferentes diseños de plantación. También se colectó información sobre producción de forraje bajo dosel, para los casos de estudio. Adicionalmente, se realizaron diferentes mediciones durante los tres años sobre radiación solar dentro y fuera de los montes estudiados. Con la información colectada, se construyó una base de datos la cual fue utilizada como insumo en el modelo desarrollado.

El proyecto se realizó en tres establecimientos ganadero-forestales de los departamentos de Maldonado, Rocha y Florida. En dichos predios se definieron parcelas forestales de acuerdo a criterios de suelos, orientación, índice de sitio y marco de plantación. Se realizaron mediciones dasométricas, con lo que se estimó la producción forestal, así como la interacción del componente forestal con el ganadero (Cuadro 2).

Se estimó la producción de forraje a partir de muestras en jaulas de exclusión ganadera en períodos de 45 a 60 días, tanto en áreas bajo dosel como en áreas libres de forestación. Dentro de cada jaula, utilizando cuadrantes de 20x40 cm se tomaron cuatro muestras de pasto, con lo que se calcula la oferta forrajera en la hectárea.

Cuadro 2: Detalle de establecimientos analizados.

		Tipo de Departamento	Especie forestal	Sup. forestada (ha)	Sup. efectiva forestada (ha)	Nro de parcelas permanentes	Nro. de jaulas
ESTAB. 1	MALDONADO	2.12	E.	109 + 89	138,3	31	16
		2.21	globulus				
ESTAB. 2	ROCHA	2.12	E. globulus 25% E. maidenii	334	112	30	24
ESTAB. 3	FLORIDA	2.12	E. dunnii	695	60	10	10
		2.21	E. maidenii				

Los casos de estudio se situaron en las zonas centro, centro sur y sureste de Uruguay correspondiendo a las siguientes eco regiones (Brazeiro et al., 2012): Centro sur, Colinas y lomadas del este y Sierras del este (Figura 11). Estas eco regiones presentan variaciones en los valores de producción de forraje medido como producción primaria neta aérea.

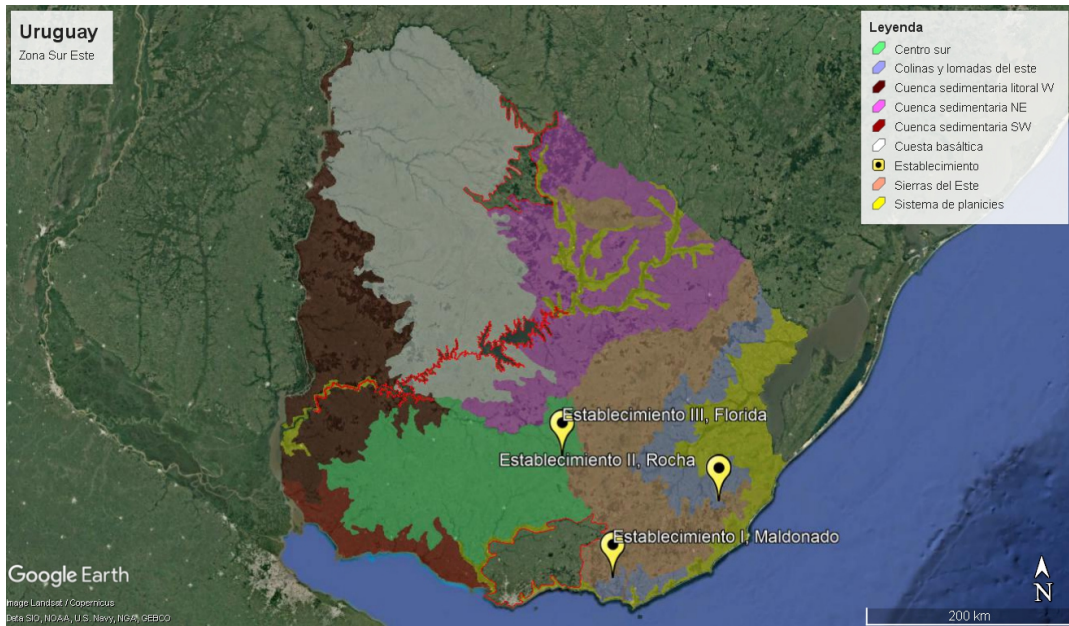


Figura 11: Mapa de Uruguay con eco regiones (Brazeiro et al., 2019) y ubicación de los casos de estudio.

En la Figura 12, Figura 13 y Figura 14, se observa la ubicación de los establecimientos que formaron parte del presente trabajo.

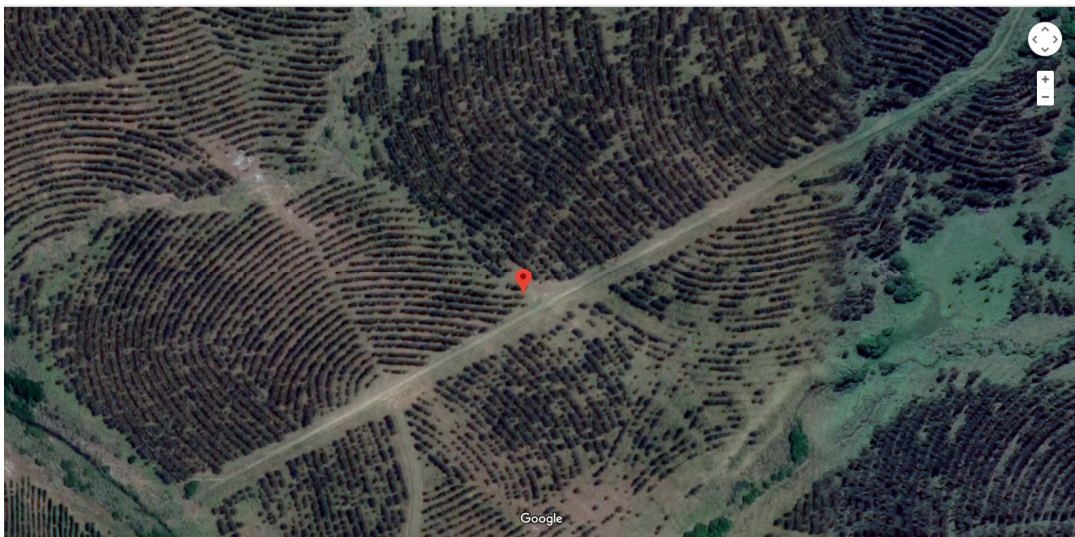


Figura 12: Establecimiento 1, departamento de Maldonado, Uruguay..

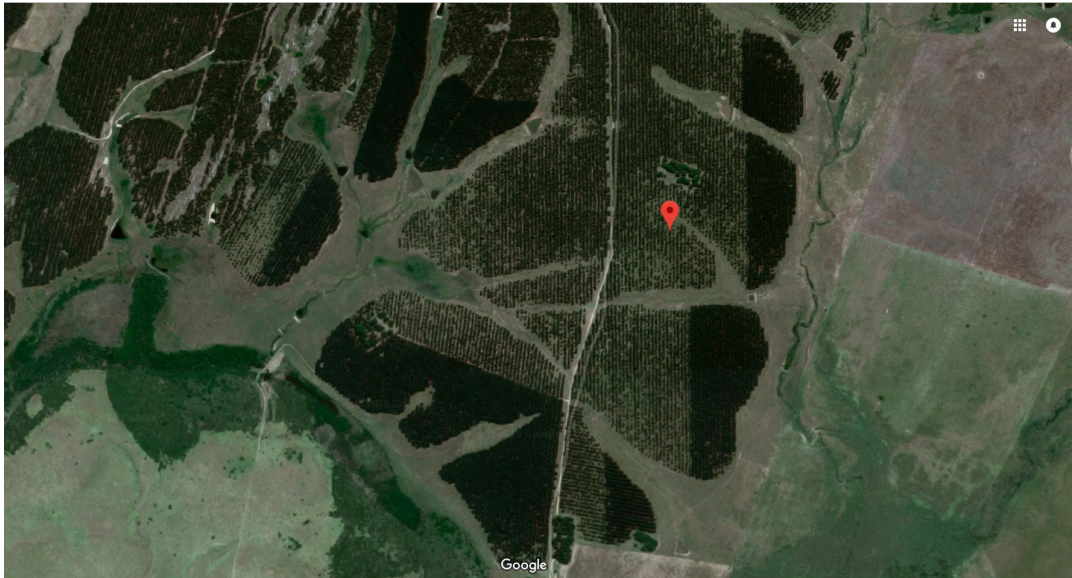


Figura 13: Establecimiento 2, departamento de Rocha, Uruguay.

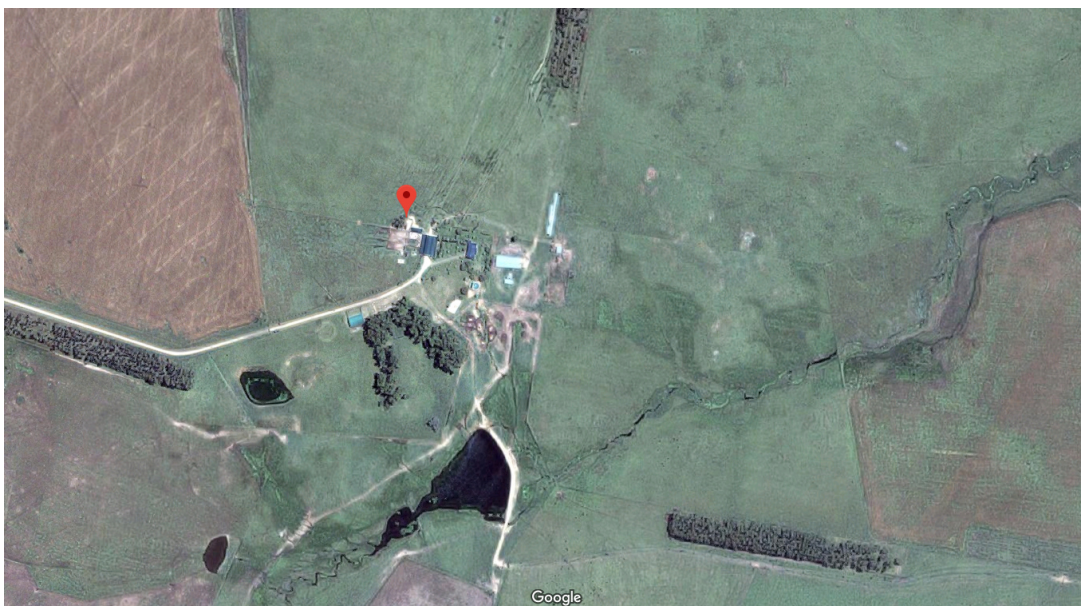


Figura 14: Establecimiento 3, departamento de Florida, Uruguay.

Se midieron las principales variables dasométricas: circunferencia a la altura del pecho (CAP), altura total, altura de copa, diámetros de copa, distancia entre árboles y distancia entre filas; estas mediciones fueron realizadas durante los años 2014, 2015, 2016 y 2017. Para el mismo período se efectuaron mediciones de radiación fotosintéticamente activa midiendo la luz bajo dosel (PAR_B) y la luz en zonas libres de forestación (PAR_A).

Los casos de estudio presentaban diferentes marcos de plantación con variaciones en las distancia en la fila y entre fila como puede observarse más adelante en la Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19 respectivamente, en algunos casos se estudiaron sistemas de filas dobles con callejones libres de forestación, y en otros sistemas de filas simples sin callejones. Los diferentes arreglos espaciales determinaron variaciones en la producción de madera y de pasto. En Cuadro 3 se detalla para cada uno de los casos, la localización, el marco de plantación y la densidad inicial de árboles.

Cuadro 3.- Marco de plantación y localización de los casos estudiados

	Departamento	Sitio	Marco	plantas/ha
ESTABLECIMIENTO 1	MALDONADO	SITIO 1	6 X 1,5	1.100
	Lat.: -34.68962222	SITIO 2	6 X 1,5	1.100
	Lon.: -55.1491416666			
ESTABLECIMIENTO 2	ROCHA	SITIO 3	(2 X 2) + 8	1.000
	Lat.: -34.0653278	SITIO 4	3,5 X 2,27	1.250
	Lon.: -54.079261111			
ESTABLECIMIENTO 3	FLORIDA	SITIO 5	6 X 3	555
	Lat. --33.6732944	SITIO 6	(3 x 2) +15	555
	Lon.: -55.63342222			



Figura 15: Marco de plantación (6 x 1,5), Establecimiento I, Depto de Maldonado.



Figura 16: Marco de plantación (2 x 2) +8, Establecimiento II, Depto de Rocha.



Figura 17: Marco de plantación (3,5 x 2,27), Establecimiento II, Depto de Rocha.

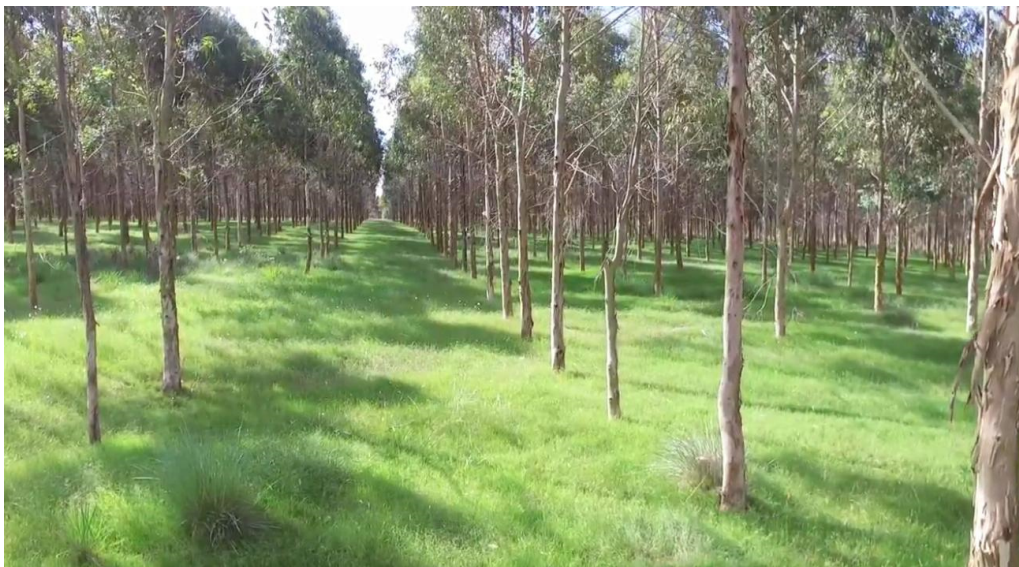


Figura 18: Marco de plantación (6 x 3), Establecimiento III, Depto de Florida.



Figura 19: Marco de plantación (3 x 2) +15, Establecimiento III, Depto de Florida.

Con los datos colectados, se definieron las funciones para el cálculo de las variables **Área de copa**, **Superficie sombreada** y **Superficie disponible para pastoreo**. Estas variables permiten explicar las interacciones entre los componentes y forman parte del funcionamiento del modelo.

2.4.1 Desarrollo de las funciones utilizadas en el modelo

La producción forrajera de campo natural para las condiciones de nuestro país presenta picos estacionales. Para determinar la producción de forraje en el modelo se emplearon los resultados obtenidos en los estudios de caso y, como se mencionó anteriormente, información de la base de datos del monitoreo satelital (UBA-LART, 2019) que ofrece datos de productividad primaria neta aérea de diferentes regiones de Uruguay obtenidas sobre campo natural descubierto, es decir sin forestación.

Para las relaciones que se establecen entre el módulo pastura y el módulo animal se sugiere utilizar las ganancias de peso del modelo de simulación MEGanE (Dieguez Camerón et al., 2012), siendo éste un input que puede ser modificado por el usuario. Estas explican la relación de oferta y demanda y permiten establecer una

presupuestación forrajera dinámica entre la oferta de forraje y la evolución de peso de los animales.

La producción de forraje no se comporta siempre de la misma forma a lo largo de los años debido a variaciones climáticas y diferentes tipos de suelo, se utiliza entonces el concepto de carga segura definido como promedio de las diferentes dotaciones soportadas por un campo para un período de tiempo determinado y considerando la variación de producción de forraje en las estaciones climáticas (A. Saravia et al., 2011).

El crecimiento de los árboles en altura, el diámetro y el área de copa provocan un desarrollo del dosel que genera y proyecta sombra sobre la superficie – sotobosque -, afectando el tapiz herbáceo ya que reduce la cantidad de luz solar que llega al piso (Munka, 2017), disminuyendo la actividad fotosintética y la tasa de crecimiento de la pastura. La expansión del área de copa dependiente del marco de plantación afecta también la superficie disponible para la actividad de pastoreo, afectando la producción de forraje bajo dosel.

2.4.2 Funciones definidas-ajustadas en base a los casos de estudio

Superficie efectiva de pastoreo (ha): La superficie disponible para pastoreo es inversamente proporcional a la densidad de árboles y ésta es determinada por el marco de plantación utilizado como puede observarse en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Marcos de plantación, densidad y superficie disponible para pastoreo., para los casos de estudio.

Caso de estudio	Marco	Diseño de plantación (m)	Densidad inicial de plantas (árboles/ha)	Superficie ocupada (m ² /ha)	Superficie disponible para pastoreo (%)
Maldonado	Marco 1 y 2	6 x 1,5	1.100	4.400	56
Rocha	Marco 3	(2 x 2) + 8	1.000	4.000	60
Rocha	Marco 4	(3,5 x 2,27)	1.250	5.000	50
Florida	Marco 5	6 x 3	555	2.200	78
Florida	Marco 6	(3 x 2) + 15	555	2.200	78

Área de superficie sombreada (%): La información de diámetro de copa se registró en un árbol de cada fila de la parcela evaluada y representan 750 registros sobre un total de 12.758. Para los árboles evaluados se mide los diámetros axiales y radiales. Posteriormente se realizó el cálculo de área de copa para una forma circular y para una forma elipsoidal. Debido a que es necesario conocer la totalidad del área de copa para poder abordar el cálculo de cobertura de la sombra en el piso bajo dosel, se estimó la función de área de copa que permite conocer ese dato para cada árbol.

Para la proyección de crecimiento de la copa individual se tomó como referencia los resultados obtenidos por Nutto y Touza Vazquez (2006) Estos autores evaluaron que el área de copa tiene una alta correlación con el DAP (0.93) así como también con la edad (0.75); trabajo realizado en Galicia para *Eucalyptus globulus*.

$$DC = e^{0.223 - 0.006 * Edad + 0.0417 * DAP - 0.000089 * DAP^2}$$

En base al trabajo mencionado se plantearon diferentes funciones de regresión para estimar el área de copa (Cuadro 5) seleccionando aquella función con mejor coeficiente de correlación r^2 .

Cuadro 5: Regresiones lineales ajustadas.

Variab les	descripci ón	R² ajustado
AreaDeCopa, Edad, AB, AMD	Utiliza área basal y altura de la población	0,5723
AreaDeCopa, Edad, AB_i, Ht_i,	Utiliza área basal y altura individuales	0,7185
AreaDeCopa, Edad, AB_i, Ht_i, Marco, N	Utiliza área basal y altura individuales y agrega marco de plantación y densidad como parte de la función	0,7628

Se utilizó el método *stepwise* o regresión paso a paso, para comprobar si las variables independientes utilizadas en la función de regresión debían efectivamente estar incluidas. El método de regresión paso a paso es un algoritmo que analiza de que manera las variables incluidas mejoran el valor de correlación, descartando aquellas que no aportan significativamente. Para esto se utilizó el paquete estadístico Stata (StataCorp, 2018) alcanzando una nueva ecuación para determinar el área de copa como se verá más adelante [Ecuación 2] (página 60).

A partir de la [Ecuación 2] obtenida se proyecta en el tiempo la evolución del tamaño de copa, su área y la superficie de suelo afectada por la sombra proyectada.

Una vez calculado el área de copa de cada árbol, es necesario conocer también cual es el valor máximo de copa ya que superado ese límite, se da la situación de solapamiento. Para ello, se utilizó la distancia media entre árboles en la fila y entre las filas siendo estas medidas r_1 y r_2 , respectivamente. Debido a que las distancias entre filas y entre árboles en la fila no tienen por qué ser las mismas, se plantea obtener el área de copa máxima a través del área de una elipse

Se considera que el área de copa de un árbol no puede superar la siguiente función:

$$\text{Área de copa hasta solapamiento (elipse)} = \pi * r_1 * r_2$$

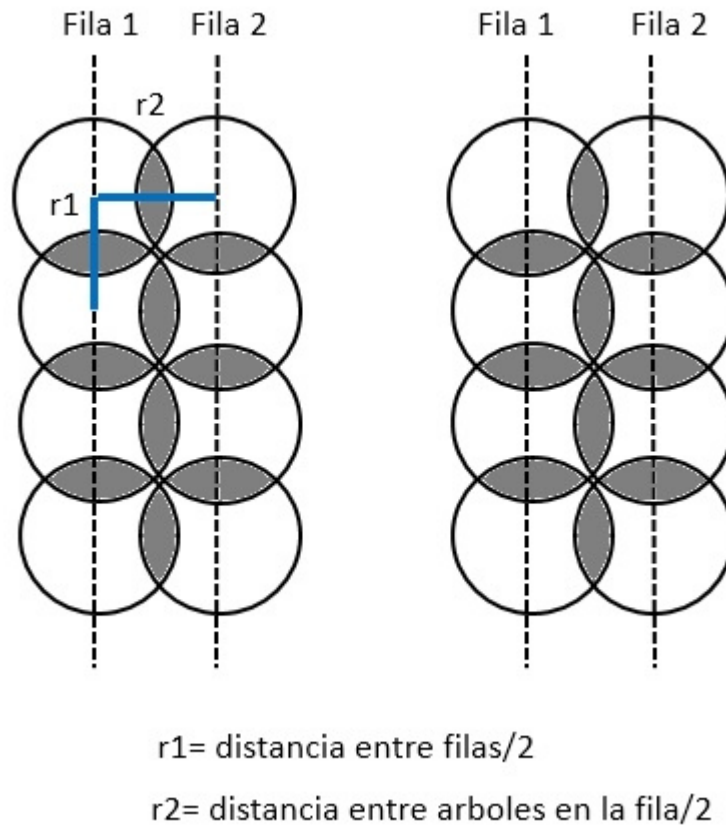


Figura 20: Solapamiento de copas

Copas mayores a éste valor estarían solapadas como se observa en la Figura 20.

Se considera que el Área de copa (AC) se proyecta directamente sobre el suelo por lo tanto la cantidad de árboles por el AC nos da la superficie sombreada.

A partir de la suma del área de copa individual se calcula la superficie de copa en la superficie total afectada por forestación obteniendo el porcentaje de área sombreada (%).

Cantidad de luz que llega a la superficie (% luz bajo dosel): es la diferencia entre la radiación solar fotosintéticamente activa (PAR) medida fuera del bosque y la radiación que es interceptada por la masa forestal (PAR_B). Depende del marco de plantación, de la edad del bosque y de la especie forestal (Duursma y Mäkelä, 2007).

$$\text{Cantidad de luz interceptada} = 1 - (\text{PAR}_B / \text{PAR}_A)$$

Utilizando un ceptómetro modelo LP80, se evaluaron 7 parcelas en Maldonado, 13 parcelas en Rocha y 11 parcelas en Florida (Cuadro 6) , correspondientes a todos los marcos de plantación analizados con el objetivo de observar el comportamiento de la luz bajo dosel en diseños diferentes. Se tomaron registros en todas las estaciones del año y a diferentes edades sobre las mismas parcelas (Rocha: 46, 54, 62, 66 y 69 meses, Maldonado: 22, 50 y 57 meses, Florida: 38, 42, 44, 84,88 y 91 meses).

Cuadro 6.- Número de registros de mediciones de luz en los diferentes estudios de caso

Departamento	Registros Verano	Registros Otoño	Registros Invierno	Registros Primavera	TOTAL
MALDONADO (7 parcelas)	10	7	-	6	23
FLORIDA (11 parcelas)	0	13	7	6	26
ROCHA (13 parcelas)	24	16	9	12	61
TOTAL	34	36	16	24	110

Los resultados obtenidos para el departamento de Rocha indican que para los marcos de plantación que incluyen callejones (distancias entre filas, libres de árboles superiores a 7 metros), la luz que llega bajo dosel medida en todas las estaciones es superior en un rango de 9 a 23% frente al diseño de plantación sin callejones (Cuadro 7).

Cuadro 7.- Resultados medios de valor de radiación par bajo y fuera de dosel

Misma especie, orientación	PAR A fuera Marco 1 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	PAR B debajo Marco 1 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	PAR A fuera Marco 2 (Callejón) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	PAR B fuera Marco 2 (Callejón) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	EDAD (meses)	% Luz Bajo dosel Marco 1	% Luz Bajo dosel Marco 2 (Callejón)	Diferencia
INVIERNO 2015	850,08	261,84	586,20	237,73	46	28	42	14
VERANO 2015/2016	2.346,43	919,58	1.891,42	875,38	54	39	48	9
PRIMAVER A 2016	2.285,03	1.174,18	1.991,54	1.361,26	62	46	69	23
VERANO 2016/2017	2.325,90	980,10	1.760,53	1.065,80	66	42	61	19
PRIMAVER A 2017	238,33	129,75	166,66	100,40	69	54	65	11

El área sombreada y el porcentaje de luz bajo dosel dependen del marco de plantación y de la edad de desarrollo de la plantación forestal, por lo que estos valores se deben relacionar con la producción de forraje bajo dosel, como se explica más adelante.

2.5 CUARTA ETAPA: FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR SIMFORGAN.

La estructura del simulador SimForGan se divide en módulos de acuerdo a sus principales componentes; estos módulos están relacionados entre sí a través de sus interacciones que permiten y explican su funcionamiento. Las interacciones entre las variables que determinan el marco de plantación, la densidad de plantas, la reducción de área para pastoreo, el desarrollo de copa, la sombra proyectada sobre la superficie, la producción de forraje, la carga animal soportada, la reducción de stress térmico, la mejora sobre la tasa de ganancia de peso y los resultados productivos se basan en el modelo creado y brindan soporte al simulador. Cada uno de los módulos maneja las variables inherentes a su componente pero como se mencionó anteriormente, cada variable afecta a la totalidad del sistema.

2.5.1 Módulo forestal

El simulador toma como punto de partida el diseño o marco de plantación propuesto; con la información sobre el número de filas, las distancias entre filas, la distancia entre árboles y la distancia de callejones, se puede conocer la densidad de plantas por hectárea. Los datos iniciales para alimentar el módulo forestal son: en que departamento se encuentra ubicado el establecimiento, la superficie total, la superficie forestada, la edad de la plantación al momento de iniciar la simulación, la edad planificada de cosecha. También se requiere la fecha de inicio de la proyección para obtener la duración total en días de la simulación y los días correspondientes a cada estación. Con los datos iniciales de diámetro a la altura del pecho (DAP), altura media de dominantes (AMD), especie forestal y población inicial, se procede a realizar una proyección de crecimiento para esa población empleando funciones de crecimiento forestal (Methol, 2006) que calcula año a año las variables dasométricas de altura, DAP, área basal y volumen de madera producida.

Se calcula el porcentaje de superficie sombreada, de acuerdo al marco de plantación. A partir de la información recogida y analizada sobre radiación fotosintéticamente activa (PAR) se determina el porcentaje de luz que llega bajo dosel.

También se calcula el área de reducción anual (%) por el efecto del desarrollo de la masa forestal, que va a afectar la superficie de pastoreo.

2.5.2 Módulo forraje

La principal variable de salida del módulo pastura es la oferta de forraje, que conforma la dieta alimentaria para el rodeo animal y que va a determinar su carga en UG. Esta oferta se calcula a través de la producción de materia seca por día en forma estacional, la cantidad de días de cada estación y la superficie de pastoreo. Es afectada por el área sombreada y la cantidad de luz que llega al tapiz así como por la superficie disponible y la estación de crecimiento.

La producción de forraje bajo dosel es un input del sistema y puede ser ingresada si se cuenta con esa información del establecimiento. En caso que no se conozca ese valor, se considera el valor de producción primaria neta aérea correspondiente a la región de Uruguay que se desea simular. Este valor se obtiene a través de información satelital del proyecto "Observatorio Forrajero" (UBA-LART, 2019) que mide diariamente este indicador. La producción primaria neta aérea es medida en condiciones de campo natural sin forestación, es decir fuera del monte por lo que es un valor que se ajusta de acuerdo al diseño de plantación; aquellos marcos de plantación con callejones superiores a los 7 metros, ven incrementado la producción de forraje en un 42% durante el primer tercio de la etapa de desarrollo de la plantación de acuerdo a los casos de estudio. Los diseños forestales sin callejón disminuyen su producción en un 12% a partir del segundo tercio de la etapa de desarrollo de la plantación de acuerdo a los casos de estudio, con respecto a la oferta de forraje estimada fuera del monte.

La superficie de pastoreo depende del área ocupada por el bosque, por lo que se considera una reducción anual, que disminuye la oferta de materia seca.

En algunas situaciones puede existir forraje remanente como consecuencia de una alta producción de materia seca y/o una baja carga animal en la estación precedente; se considera ese forraje remanente – stock – como parte de la oferta de materia seca para la estación que comienza a continuación.

2.5.3 Módulo animal

El módulo animal tiene una importancia directa en la productividad económica del sistema ganadero y está determinada por la variable Carga UG. Sin dudas desde el punto de vista productivo, el interés es obtener el mayor rendimiento de esa variable que depende del consumo del animal y de la oferta forrajera.

El consumo se establece por el peso del animal que está definido por la categoría (novillo +1 año, novillo +3 años, etc.). El modelo considera un consumo diario como el 2 a 3% del peso vivo, en un animal de 380 kg (1 UG) el consumo diario puede ir de 7,6 a 11,4 kg/MS/animal/día. También influye la tasa de ganancia diaria que va acumulando peso al animal y como consecuencia de esto, aumentando el consumo.

El simulador realiza un cálculo de oferta y demanda de forraje teniendo en cuenta dos situaciones: a) estima la carga máxima de animales que puede soportar el área forestada y b) en el caso que se haya ingresado como input la cantidad de animales que conforman el rodeo actual, el simulador permite conocer si ésta se encuentra por debajo, correctamente ajustada o por encima de la carga tolerada por el sistema, con un problema de déficit de alimento. Según sea la situación se podrá ajustar la carga para mejorar la productividad.

Una vez que los animales llegan al peso objetivo, son retirados del sistema y en forma automática mientras continúa el período de simulación, se procede a ingresar un lote con las mismas características iniciales (igual categoría, cantidad y peso). La oferta de forraje no será la misma a lo largo de los años, por lo que el tiempo para que ese rodeo alcance el peso objetivo puede no ser igual al rodeo animal anterior, afectando la carga ganadera (UG/ha).

El módulo animal tiene una salida final donde se compara para la misma superficie el funcionamiento del sistema ganadero con forestación y sin forestación, permitiendo una visualización gráfica entre los resultados de estas dos situaciones.

2.5.4 Módulo económico

En este módulo se desarrollan cálculos económicos del sistema, teniendo en cuenta los principales costos de implantación y mantenimiento de la plantación forestal, los costos del manejo ganadero, así como los ingresos por venta de carne y la madera en el corte al fin del período. Se obtiene como resultado el valor actual neto y el margen bruto forestal para escenarios mínimo, medio y máximo en cuanto a la valorización de la madera.

Si bien cada módulo tiene su lógica y funcionamiento propio, todos son dependientes entre sí en función de sus interacciones.

La información de campo obtenida durante tres años de los casos de estudio es parte fundamental del modelo teórico construido siendo su principal insumo. Se presentarán seguidamente los resultados de campo.

2.5.5 Prueba del simulador

A los efectos de probar el funcionamiento de la herramienta SimForGan en casos productivos, se realizó el taller “Forestando en campos uruguayos, una ayuda para la toma de decisiones”, con productores ganaderos y técnicos de la localidad de San Carlos en el departamento de Maldonado. En el mismo, se llevaron adelante simulaciones de forestación con diferentes marcos de plantación tratando de representar situaciones similares a la de los participantes. El taller fue participativo y generó un intercambio con el público presente donde se recogieron aportes sobre el modelo presentado.

3. RESULTADOS

Los resultados se organizan en dos partes, en principio se presentan los resultados intermedios sobre el desarrollo de copa y área sombreada en los marcos de plantación estudiados y la incidencia de éstos sobre la producción de forraje.

En una segunda parte se presenta el modelo de Silvopastoreo construido, el que permite interpretar a partir de diferentes condiciones productivas las principales interacciones. Finalmente se muestra la herramienta informática que permite ejecutar las simulaciones en diferentes escenarios, lo que se explica a través de ejemplos de simulación.

3.1 RESULTADOS INTERMEDIOS

3.1.1 Función de Área de Copa

En base a los resultados de investigación de Nutto y Touza Vázquez (2006) se obtiene una ecuación ajustada [Ecuación 2], considerando el área basal altura del árbol (m), edad de la plantación (meses), densidad de árboles (plantas/ha) y marco de plantación, presentando un valor de r^2 ajustado de 0,7628 (Cuadro 8).

Cuadro 8.- Datos de regresión lineal

Número de observaciones	922
F (8, 913)	371,27
Prob > F	0,0000
R cuadrado	0,7649
R cuadrado ajustado	0,7628
error cuadrático medio	1,659

	coeficiente	error estandar	t	P> t	[intervalo de confianza 95%]	
S1	-3,547089	0,3915158	-9,06	0,000	-4,315464	-2,778714
S2	-4,333977	0,3666652	-11,82	0,000	-5,053582	-3,614372
S3	-3,744471	0,3989813	-9,39	0,000	-4,527498	-2,961444
S5	0	(omitido)				
S6	-2,448252	0,5444459	-4,49678	0,000	-3,516763	-1,379741
Edad	0,0582528	0,0077069	7,558565	0,000	0,0431276	0,0733781
ab_m2	284,0114	16,60864	17,10022	0,000	251,4159	316,607
Ht_m	0,083338	0,0391979	2,126082	0,034	0,0064095	0,1602665
N	-0,0009068	0,0002811	-3,22582	0,001	-0,0014585	-0,0003551
_cons	3,954487	0,4765532	8,298102	0,000	3,01922	4,889754

Como se explicará más adelante, se construyó la [Ecuación 2] en función de las variables mencionadas.

3.1.2 Efecto del marco de plantación en el área libre para pastoreo

Considerando los marcos de plantación con callejones superiores a 6 m (Caso de estudio 2 y 5) y en base a la EQ3 se obtiene un rango entre 26 a 31% de la superficie sombreada, mientras que en los marcos sin callejones la superficie sombreada se encuentra en un 78% promedio, como se observa en la Cuadro 9.

La superficie para pastoreo se ve afectada por la densidad y por la sombra proyectada. Además de la especie forestal utilizada, la sombra es función del tamaño y área de copa.

El Área máxima sombreada es el producto del área máxima individual (columna 4) y la densidad inicial (columna 3), lo que resulta en el área máxima sombreada en superficie y proporción (columna 5 y 6, respectivamente), (Cuadro 9).

El valor de Área de influencia del árbol es un área en donde se considera que no se desarrolla forraje y se debe descontar del área de pastoreo; el resultado es el Área máxima ocupada por plantas (columna 7), el que se calcula en base al supuesto de

4m²/planta multiplicado por la densidad inicial. La superficie libre para pastoreo (columna 8) es el resultado de descontar el área máxima de influencia ocupada por plantas (columna 7).

Como se observa en el Cuadro 9, los casos 3 y 5 que incluyen callejones libres de forestación, presentan mayor superficie apta para pastoreo en un rango de 60 a 78% y a su vez una menor superficie cubierta por sombra, en el rango de 26 a 31% lo que está relacionado con la densidad de plantas y el marco de plantación. Comparando el caso 3 con el caso 5, el primero presenta prácticamente una densidad mayor en 50% (1.000 pl/ha vs. 555 pl/ha) con una reducción de la superficie de pastoreo del 24%. Si se considera que el principal objetivo es la producción de carne, esto parecería ser una buena combinación de producción de madera y forraje.

En los casos de estudio 4 y 5 se utilizan dos marcos de plantación diferentes con la misma densidad de plantas (555 pl/ha) y se obtiene la misma superficie de pastoreo del 78%, sin embargo el caso 5 con marco con callejones presenta solo un 26% de sombra, frente al 78% del caso 4 de marco sin callejones.

El caso 2 es el que presenta la menor área libre para pastoreo (50%), la cual está en un 78% sombreada. Por otro lado la densidad es la más alta, correspondiendo a situaciones en donde lo que se prioriza es la producción de madera.

Cuadro 9.- Valores máximos de superficie sombreada y libre para pastoreo en los casos de estudio

Caso de estudio	Marco de plantación (m) (1)	Callejón (m) (2)	Densidad inicial (plantas/ha) (3)	Área máxima de copa (m ² /planta) (4)	Área máxima sombreada (m ² /ha) (5)	Superficie sombreada % (6)	Área de influencia ocupada por plantas (m ² /ha) (7)	Superficie libre para pastoreo (%) (8)
1	6 x 1,5	-	1.111	7	7.853	79	4.444	56
2	3,5 x 2,27	-	1.250	6	7.800	78	5.000	50
3	2 x 2	8	1.000	3	3.142	31	4.000	60
4	6 x 3	-	555	14	7.846	78	2.220	78
5	3 x 2	15	555	5	2.615	26	2.220	78

Estos resultados se utilizan como insumos para la simulación, como se mostrará más adelante.

3.2 MODELO DE SILVOPASTOREO

En función del objetivo primario de este trabajo fue desarrollado un modelo de silvopastoreo para la región centro y centro sur de Uruguay considerando las principales interacciones bióticas entre los componentes pastura, animal y forestal. Utilizando éste modelo es posible comprender el funcionamiento productivo de un sistema silvopastoril interactuando con factores ambientales como radiación solar, temperatura, estacionalidad y características del tipo de suelo que afectan el desarrollo forestal.

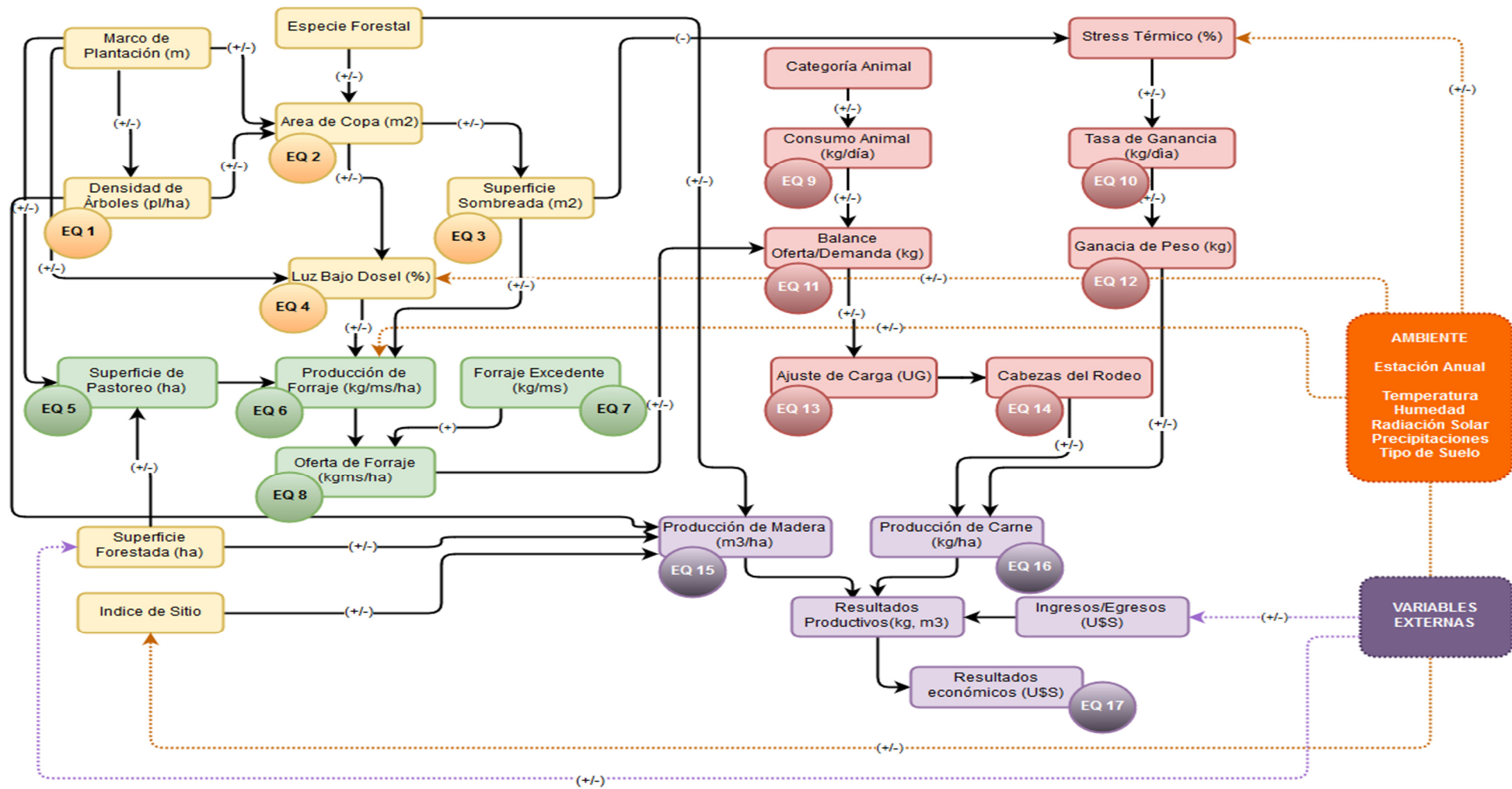


Figura 21: Modelo de Silvopastoreo, principales componentes e interacciones.

En la Figura 21 se representan los principales componentes del modelo y su funcionamiento a través de las interacciones que afectan la productividad del sistema.

En color amarillo se agrupan las variables del componente forestal a saber: **la especie forestal y el marco de plantación**, éste último define en forma directa **la densidad de plantas** y a través del desarrollo de la copa, que también depende de la especie forestal, se proyecta **la superficie de sombra y la luz que llega bajo dosel**. La **superficie forestada**, el **índice de sitio** y el marco de plantación inciden en **la producción de madera (m³/ha)**.

Las variables representadas en color verde, refieren al componente forrajero en donde tenemos **la superficie para pastoreo, la producción de forraje y el forraje excedente** como los principales elementos de **la oferta de forraje** para las condiciones de campo natural consideradas en el modelo. La producción de forraje se ve afectada por la superficie disponible y por la incidencia de la sombra. Finalmente, la oferta de forraje en relación a la demanda de consumo determina la carga animal que el sistema puede albergar.

En color rojo tenemos las variables del componente animal: **la categoría animal** establece el peso inicial y este determina **el consumo diario**, que depende del **balance entre oferta y demanda** de forraje; éste balance incide directamente sobre **el ajuste de carga** soportada por el sistema. **La tasa de ganancia diaria** es afectada por **el stress térmico** que influye sobre la distribución de la energía para el mantenimiento corporal de la temperatura. La presencia de sombra disminuye el stress térmico en estaciones de máximas temperaturas y radiación solar, así como la presencia de árboles reduce los efectos de los vientos en momentos de bajas temperaturas disminuyendo las pérdidas energéticas favoreciendo **la ganancia de peso**. En función de **las cabezas del rodeo** y la ganancia de peso de los animales se conoce el resultado de **producción de carne (kg/ha)**.

Las casillas en color violeta representan las variables productivas del sistema. Así, la producción de madera en forma conjunta con la producción de carne determina **los resultados productivos** del sistema y estos valores unidos a variables **de costos y egresos** permiten analizar **los resultados económicos** financieros. En estos resultados

finales, inciden variables externas al sistema como son los valores de mercado de insumos y productos los que deberán ser definidos para cada situación modelada. También inciden las normativas y regulaciones legales con respecto a las políticas forestales.

Las ecuaciones matemáticas utilizadas en el modelo (Figura 21), se detallan a continuación:

EQ1 Densidad de plantas (pl/ha): se calcula utilizando la distancia de las plantas en la fila ($d1$), la distancia entre filas ($d2$), la distancia del callejón ($d3$) y la cantidad de filas.

$$N = \left(\frac{100}{d1}\right) * \frac{100}{(d2 + d3)} * Filas$$

[Ecuación 1]

EQ2 Área de copa (m^2): es función del marco de plantación, la edad, el área basal individual, la altura total y la densidad de plantas.

$$AC = \alpha MP + Edad * 0.0582528 + AB * 284.0114 + H_t * 0,083338 + N * -0.009068 + 3,954487$$

[Ecuación 2]

Donde **MP** es una variable categórica que identifica el Marco de Plantación, pudiendo tomar valores de 1 a 5, α es un parámetro del marco de plantación que puede tomar valores entre -2,448252 a -4.333977, **Edad** representa la edad de la plantación (meses), **AB** es el Área Basal individual (m^2arb^{-1}), **H_t** es la altura total individual (m), y **N** es la densidad de la plantación (arb/ha).

EQ3 Superficie sombreada (m^2/ha): es la sumatoria de áreas de copa de población, y se calcula como el Área de copa (AC) por el total de plantas (N).

$$Superficie\ sombreada = \sum_{i=0}^N AC$$

[Ecuación 3]

EQ4 Luz bajo dosel (%): se calcula como el cociente entre la radiación bajo dosel (PAR_B) y la radiación en área libre de forestación (PAR_A).

$$LuzBajoDosel = \frac{PAR_B}{PAR_A}$$

[Ecuación 4]

EQ5 Superficie de pastoreo (ha): es el resultado de la superficie forestada (SF) menos el área de influencia (AI) ocupada por los árboles que provoca una reducción en los primeros cinco años de la plantación debido al desarrollo de la misma como se mencionara anteriormente (página 30). Deben considerarse las áreas libres correspondientes a callejones, cortafuegos y caminos.

$$ReduccionArea = N * AI$$

[Ecuación 5]

$$Superficie\ Pastoreo = SF * ReduccionArea$$

[Ecuación 6]

EQ6 Producción de forraje (kg/ha/periodo): se utiliza información histórica para cada estación de crecimiento en campo natural sin forestación y se ajusta de acuerdo a la duración en días de cada estación comprendida en el período analizado (t). Para los marcos de plantación con callejones mayores a 7 metros, el modelo ajusta en un 42% más de forraje para estaciones de crecimiento (EfectoMarco) y en el caso de marcos sin callejones con mayor densidad, el modelo reduce en 12% la producción de forraje (EfectoMarco).

$$Producción\ de\ Forraje = Valor\ de\ tabla * EfectoMarco * t$$

[Ecuación 7]

EQ7 Forraje excedente (kg/ha): es la diferencia entre la oferta (OF) y el forraje consumido (FC) de la estación precedente.

$$\text{ForrajeExcedente} = OF - FC$$

[Ecuación 8]

EQ8 Oferta de forraje (kg/ha/periodo): La producción total de forraje del sistema (PF) debe ajustarse de acuerdo a la superficie disponible para pastoreo (SP) sumando el forraje excedente (FE). Se calcula para cada estación.

$$\text{Oferta de Forraje} = (PF * SP) + FE$$

[Ecuación 9]

EQ9 Consumo animal (kg/MS/día): se considera un valor teórico para el consumo de entre 2 a 3% del peso vivo del animal (PV). El consumo se ajusta al peso del animal al ingreso de cada estación.

$$\text{Consumo Animal} = \%PV$$

[Ecuación 10]

EQ10 Tasa de ganancia (kg/día): se utiliza un valor teórico para invierno, primavera, verano y otoño. El modelo ajusta en un 10% la tasa de ganancia teórica para los sistemas de silvopastoreo.

$$\text{TGD(ajustada)} = \text{TGD} * \text{ajuste} (\%)$$

[Ecuación 11]

EQ11 Balance oferta/demanda: es la diferencia entre la oferta de forraje (OF) y el consumo animal (CA) para la categoría seleccionada, el resultado permite conocer la cantidad de animales que pueden ser alimentados con los kilos de forraje disponibles. Este cálculo se realiza para cada estación debido a que las producciones de forraje varían estacionalmente al igual que el peso en los animales.

$$\text{Balance} = OF - CA$$

[Ecuación 12]

EQ12 Ganancia de peso (kg): es la tasa de ganancia diaria ($\text{TGD}_{\text{ajustada}}$) por los días de permanencia del animal en la estación (t). Cuando finaliza una estación se suma

esa ganancia al peso anterior (P_0) y se determina el nuevo valor (P_1) para la estación siguiente.

$$Ganancia\ de\ kilos = TGD(ajustada) * t$$

[Ecuación 13]

$$Peso\ Animal = P_0 + Ganancia\ de\ kilos$$

[Ecuación 14]

EQ13 Ajuste de carga (UG): en base al concepto de “carga segura” (Dieguez Camerón et al., 2012) se calcula como el cociente entre la oferta de forraje por hectárea y el consumo de un animal de 380 kg (1UG):

$$UG = \frac{Oferta\ de\ forraje}{(380 * \%PV)}$$

[Ecuación 15]

Luego se calcula la carga segura en cabezas por hectárea, convertido a la categoría seleccionada para la proyección como el cociente entre UG (carga segura)/(PesoAnimal/380) lo que permite ajustar según la categoría utilizada y el peso en cada estación:

$$Cabezas\ /ha = \frac{UG}{\left(\frac{PesoAnimal}{380}\right)}$$

[Ecuación 16]

En la Cuadro 10 se presenta un ejemplo para una producción de forraje diario de 9,5 kg y el consumo estimado en un 2,5% del peso vivo de un animal de 380 kg, en la columna final se convierte la carga en Cabezas/ha para diferentes categorías.

Cuadro 10: UG para carga segura y para diferentes categorías

Oferta (kg/día)	Consumo	Carga segura (UG)	Peso animal según Categoría	Carga segura cabezas /ha categoría
	(kg/día) 1UG (2,5 %PV)			
9,5	9,5	1	Terneros (100 kg)	3,8
			Novillos + 1 año (200 kg)	1,9
			Vaca de Cría (380 kg)	1
			Novillos +3años (490 kg)	0,78

EQ14 Cabezas totales del rodeo: es el cociente entre la oferta total de forraje (para la duración de la estación y para toda la superficie de pastoreo) y la demanda de consumo animal de acuerdo al peso al ingreso de la estación. El resultado indica el tamaño del rodeo en cabezas para cada estación.

$$Cabezas\ totales = \frac{OF}{CA}$$

[Ecuación 17]

EQ15 : Producción de madera, se calcula el volumen de madera en m3 utilizando la ecuación propuesta por R. Methol (Methol, 2006):

$$VT = \left[-0.7876 + 0.9873 \ln(G * AMD) - 0.0761 \left(\frac{AMD}{Dt} \right) - 0.00997 * Z7 \right]$$

[Ecuación 18]

EQ16: Producción de carne, corresponde al total de kilos de carne producidos en el establecimiento durante el período proyectado. Se calcula como la diferencia de los pesos de ingreso (P0) y peso final (P1) de todos los animales del rodeo para el período considerado.

$$KilosTotales = \sum P1 - P0$$

[Ecuación 19]

EQ17: Resultados económicos, para determinar los resultados económicos se utiliza el Margen Bruto Ganadero y el Margen Bruto Forestal.

$$MBF = VES \cdot i$$

[Ecuación 20]

$$VAN = \frac{\sum_{n=0}^t FFNe_n}{(1+i)^n}$$

[Ecuación 21]

Donde, VAN es el Valor Actual Neto, $FFNe_n$ es el Flujo de Fondos Neto anual calculado como la diferencia entre los ingresos y los egresos en el año n , i es la tasa de interés anual utilizada como costo de oportunidad, n es el año del flujo actualizado que puede ir desde el momento 0 hasta la cosecha en el año t .

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

[Ecuación 22]

Donde VES es el Valor esperado del suelo que representa la actualización de las infinitas rentas forestales periódicas (Díaz-Balteiro, 1997). Este valor permite calcular la renta forestal anual o margen bruto forestal (MBF) como se muestra en la Ecuación 20.

3.3 HERRAMIENTA INFORMÁTICA

Basados en el modelo de referencia, se elaboró la herramienta informática que funciona como un Simulador Forestal Ganadero al que se denomina SimForGan. Éste puede utilizarse para la realización de proyecciones de crecimiento de forraje, madera y carga animal a través de los valores iniciales para las variables involucradas que se ingresan al sistema.

El simulador fue desarrollado para funcionar en un ambiente web y se encuentra disponible en la página de www.silvopastoreouy.com, para su utilización online es necesario conexión a internet y el uso de un navegador como Mozilla Firefox, Google Chrome, Safari u otro. Su uso es libre y sin costo; la primera vez que se accede se requiere la solicitud de creación de un usuario lo cual responde a fines estadísticos.

Se utilizó lenguaje de programación .Net (Framework 3.5) y una base de datos SQL (DBMS – MySql). El código del software puede ser escrito para otros lenguajes como Java o Python y para otros manejadores de bases de datos (ej: MSSQL, PostgreSQL).

El simulador abarca cuatro módulos relacionados entre sí que comparten la información en función de las interacciones establecidas. Se presenta a continuación las principales pantallas de ingresos de datos para los diferentes módulos. En el ANEXO 1 se adjunta un link al manual de usuario en formato pdf.

3.3.1 Módulo proyección forestal

Es el primer módulo del simulador y debe ingresarse información de la ubicación del predio que permitiera determinar la ecoregión productiva y base a ésta conocer la producción diaria de forraje. Puede ingresarse los datos de longitud y latitud o indicar en el mapa (Google Maps) la localización del predio obteniendo la ecoregión asociada como muestra la Figura 22.

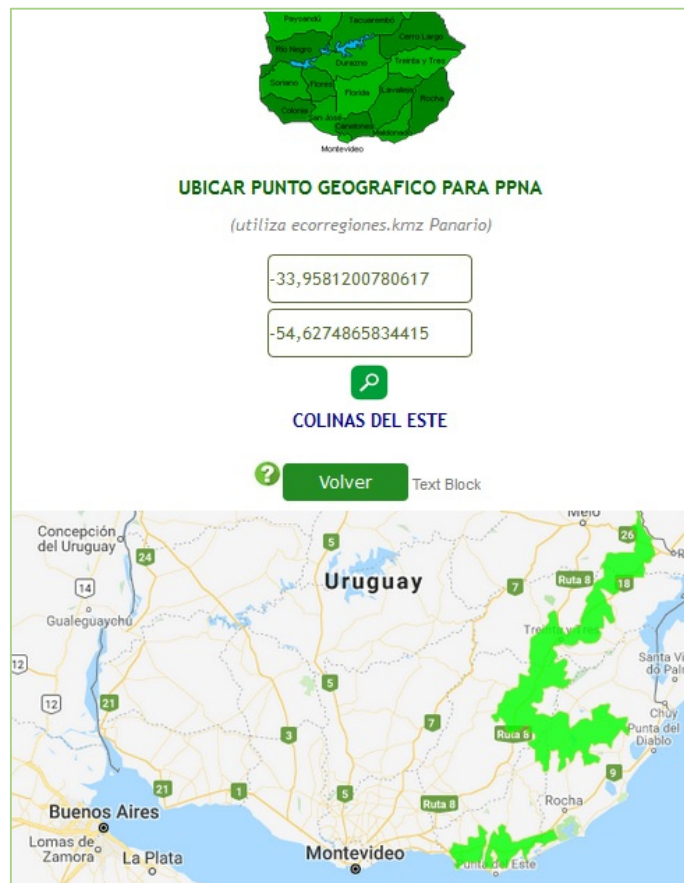


Figura 22: Mapa para determinar la ubicación de un establecimiento en relación a las eco regiones (Brazeiro et al., 2012).

Deben ingresarse los valores para la plantación forestal, en cuanto a superficie efectiva forestada, edad de plantación, altura inicial, diámetro inicial así como las características del marco de plantación en cuanto a distancia en la fila, distancia entre filas y distancia del callejón si lo hubiese como se observa en la Figura 23. Con estos datos se obtiene la densidad (plantas/ha), la superficie para pastoreo disponible, el área cubierta por la sombra, además de valores dasométricos como altura, diámetro, área basal y volumen de madera para cada uno de los años que dura la proyección (Figura 24).

Ubicación del predio	FLORIDA	Distancia ancho callejón (m)	15,00
Superficie total (ha)	300,00	Cantidad de filas	2 Filas
Edad de plantación al iniciar simulación	1,00	Distancia entre filas (m)	3,00
Edad de plantación al finalizar simulación	10,00	Distancia árboles en la fila (m)	2,00
Fecha Inicio de simulación	01/01/2018	Población (Arb/ha) marco	550
Fecha Fin de simulación	01/01/2027	Mortalidad anual árboles (%)	2,00
Especie forestal	E. globulus	Superficie forestada (ha)	100,00
DAP medio inicial (cm)	5,00	Superficie efectiva forestada (%)	80,00
Altura media dominante (m)	4,00	Superficie efectiva forestada (ha)	80,00
		Superficie Reducción año 1-5	0 %

Figura 23: Ingreso de datos para el Módulo Forestal.

Edad	Arboles /ha	DAP (cm)	AMD (m)	AB (m2/ha)	Copa (m2/ha)	Meses	Sombra %	Madera Volúmen (m3)	Espesura FCC	
1,0	550	5,0	4,0	1,1	427,5	12,0	4,3	1,8	RASA	
2,0	539	9,8	7,8	4,0	1.407,7	24,0	14,1	12,4	CLARA	
3,0	528	12,7	10,7	6,7	2.268,1	36,0	22,7	27,6	CLARA	
4,0	517	15,0	13,0	9,2	3.021,8	48,0	30,2	45,2	CLARA	
5,0	507	17,0	15,0	11,5	3.680,5	60,0	36,8	64,1	CLARA	
6,0	497	18,6	16,7	13,5	4.254,7	72,0	42,5	83,5	ABIERTA	
7,0	487	20,1	18,2	15,4	4.753,7	84,0	47,5	103,0	ABIERTA	
8,0	477	21,4	19,5	17,1	5.185,6	96,0	51,9	122,2	ABIERTA	
9,0	467	22,5	20,7	18,7	5.557,9	108,0	55,6	141,0	ABIERTA	
10,0	458	23,6	21,8	20,1	5.877,0	120,0	58,8	159,2	ABIERTA	

Figura 24: Salida de información para Proyección de crecimiento forestal.

El simulador ofrece una visualización gráfica del marco de plantación utilizado y una representación del crecimiento de las copas de los árboles a lo largo de la proyección, en la Figura 25 puede observarse un ejemplo de evolución de las copas a los 3 años, incluyendo el solapamiento para el marco de plantación (3 x 2) + 15,.

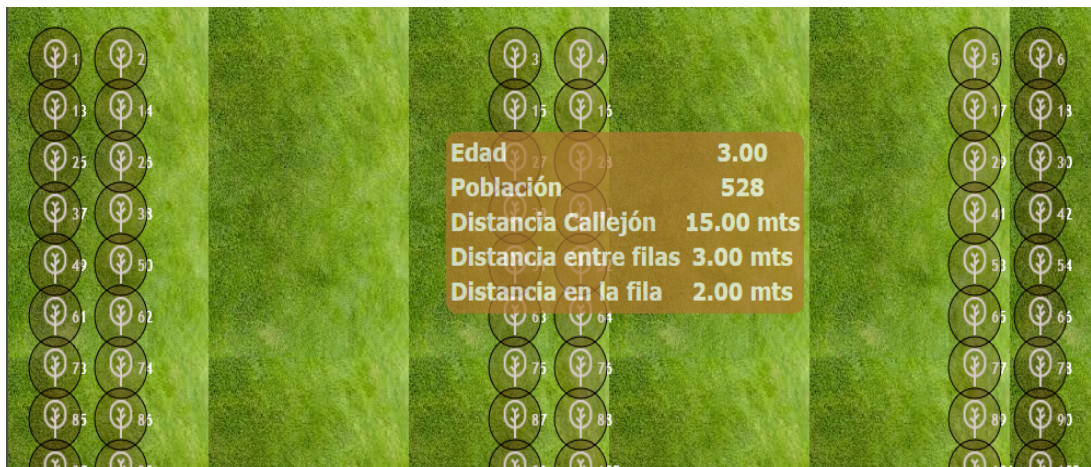


Figura 25: Evolución del crecimiento de área de copa.

3.3.2 Módulo oferta forrajera

En este módulo se ingresan las variables de producción de forraje para las estaciones del año. Si se conoce la información real del establecimiento puede utilizarse la misma, de lo contrario en base a información satelital del proyecto “Observatorio Forrajero” (UBA-LART, 2019), la herramienta accede a la base de datos y determina la producción de forraje para condiciones de campo natural sin forestación para la eco región donde se ubica el establecimiento.

Pastura (tapíz)	CAMPO NATURAL			
Región PPNA para FLORIDA	CENTRO SUR			
Producción Materia Seca	<input type="radio"/> Kg por día <input checked="" type="radio"/> Kg por estación			
PPNA MS (Kg/Estación) <small>(promedio 2000 - 2017)</small>	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
	1149,8	835,5	692,8	1675,6
Utilización MS (%)	50 %			
Reducción superficie pastoreo anual %	0,044000			
Porcentaje de sombra %	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
	4 %	14 %	22 %	30 %
	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
	36 %	42 %	47 %	51 %
	Año 9	Año 10		
	55 %	58 %		






Figura 26: Ingreso de datos para el Módulo Oferta Forrajera.

Tomando en cuenta la superficie para pastoreo y el porcentaje de sombra, se estima la oferta forrajera estacional y se obtienen resultados para una situación libre de forestación y para una situación con el marco de plantación utilizado (Figura 27).

Período estación	Oferta MS Kg/estación	Oferta MS Kg/estación/ha	Sup Pastoreo (ha) SPG	Reduccion superficie	Superficie cubierta con sombra %	Oferta MS Forestación Kg/estación	Oferta MS Forestación Kg/estación/ha
Ver2018	49.908	499	76,48	4,40	2,00	53.438	534
Oto2018	42.234	422	76,48	4,40	3,00	45.220	452
Inv2018	49.028	490	76,48	4,40	4,00	37.497	374
Pri2018	83.780	837	76,48	4,40	5,00	89.704	897
Ver2019	56.858	568	76,48	4,40	7,50	60.879	608
Oto2019	42.234	422	76,48	4,40	10,00	45.220	452
Inv2019	49.028	490	76,48	4,40	12,50	37.497	374
Pri2019	83.780	837	76,48	4,40	15,00	89.704	897
Ver2020	57.490	574	76,48	4,40	17,00	61.555	615
Oto2020	42.234	422	76,48	4,40	19,00	45.220	452
Inv2020	49.028	490	76,48	4,40	21,00	37.497	374
Pri2020	83.780	837	76,48	4,40	23,00	89.704	897
Ver2021	56.858	568	76,48	4,40	25,00	60.879	608
Oto2021	42.234	422	76,48	4,40	27,00	45.220	452
Inv2021	49.028	490	76,48	4,40	29,00	37.497	374

Figura 27: Salida de información para Oferta forrajera.

Es posible visualizar en forma gráfica la producción de forraje para el marco de plantación utilizado versus una situación de campo natural sin forestación donde se representa la disminución de la superficie de pastoreo bajo forestación por efecto de la plantación (Figura 28).

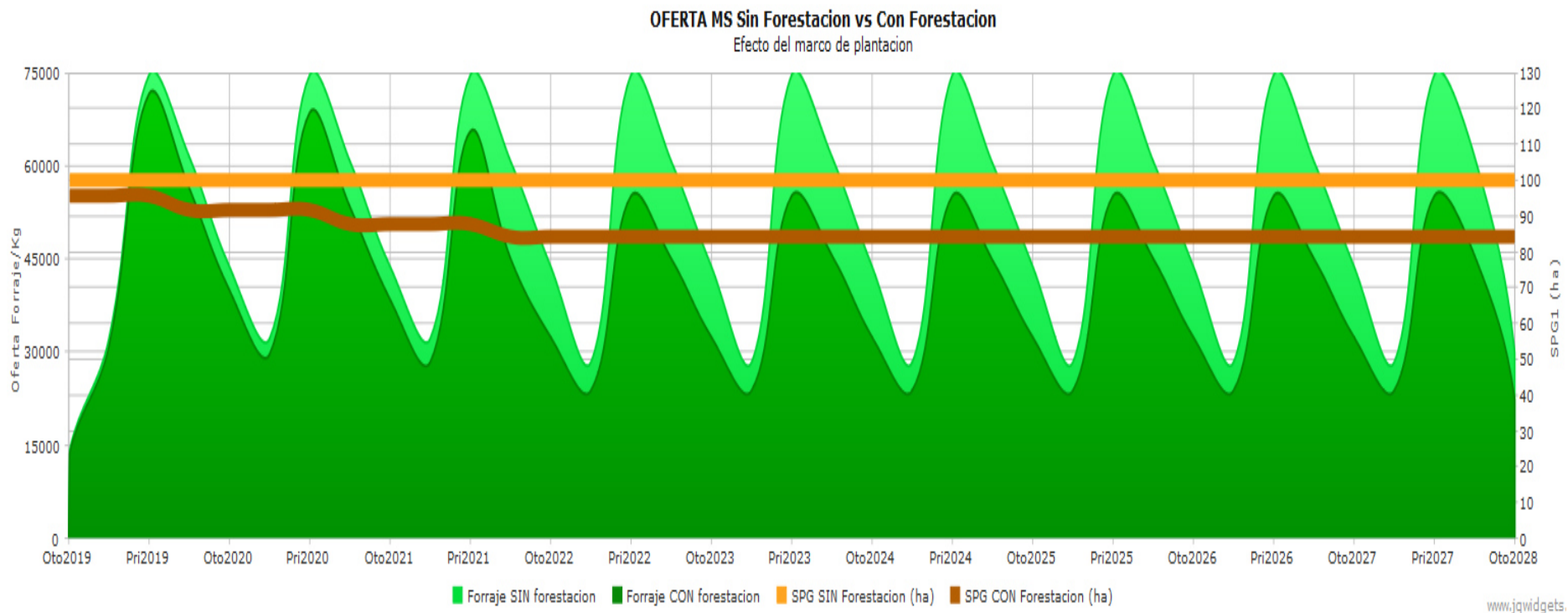


Figura 28: Salida gráfica de oferta forrajera sin forestación vs con forestación.

3.3.3 Módulo consumo animal

Los valores para determinar la evolución en el peso, la demanda de forraje y la capacidad de carga en UG se ingresan en éste módulo. Debe indicarse la categoría animal, su peso inicial, el peso objetivo final de los animales, la cantidad de animales que conforman el rodeo actual de establecimiento, el consumo diario que se estima en un rango de 2 a 3% de su peso vivo, también debe indicarse si se utiliza forraje excedente de la estación anterior y la edad de la plantación para permitir el acceso de animales a la zona forestada. Para los cálculos de ganancia diaria de peso se sugiere una tasa estacional de uso estándar para condiciones de Uruguay y se muestra un porcentaje variable para elevar esa tasa de ganancia relacionada a la disminución de estrés térmico por la presencia de forestación (Figura 29).

Categoría Animal	NOVILLOS + 2 AÑOS			
Peso Inicial (Kg)	330,00			
Peso Objetivo (Kg)	480,00			
Dotación rodeo (cabezas)	50			
Consumo diario en %PV	2,50			
Utilización Excedente MS (%)	100,00			
KgMS/día para 1UG (380kg)	9,50			
Edad Plantación para Ingresar animales	2			
Ganancia diaria sugerida (Kg/día)	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
	0,6000	0,1500	0,0000	0,6000
Efecto mejora del Confort Térmico	10 %			
Valor estimado carne (U\$S/Kg)	1,63			

Figura 29: Ingreso de información para Modulo Consumo animal.

El simulador proyecta para cada estación del período considerado el peso animal, la ganancia de kilos, el balance entre oferta y demanda de forraje y la carga en unidades ganaderas y las cabezas correspondientes para la categoría seleccionada, todo esto a partir del momento de ingreso de los animales a pastorear en la superficie forestada.

Considerando la cantidad de animales que componen el rodeo (información ingresada anteriormente) se compara en este módulo una situación de carga animal sin forestación frente a una situación con forestación (Figura 30), indicando si hay exceso de animales, si se encuentra en el valor máximo soportado o si hay posibilidad de aumentar la carga.

Estación	Peso (Kg) Salida	Demanda total Kg/MS	Oferta PPNA Kg/MS/estación	Balance	Carga Segura UG/ha	Cabezas/ha	Cabezas Sup Total	Kilos MAX	Superficie	_____Sin Forestación_____	Oferta PPNA Ajustada	Balance2	Carga Segura UG/ha	Carga Segura Cabezas/ha	Cabezas Sup Total	Kilos MAXForestacion	SPG	_____Bajo Forestación_____
Oto2019	334,65	15.540	14.665	-875	0,50	0,57	56	260,40	100,00	Excedido 4 Cabezas	14.045	-1.495	0,00	0,00	0	0,00	95,78	NO INGRESAN ANIMALES
Inv2019	334,65	46.140	32.417	-13.723	0,37	0,42	42	0,00	100,00	Excedido 18 Cabezas	31.048	-15.092	0,00	0,00	0	0,00	95,78	NO INGRESAN ANIMALES
Pri2019	389,25	53.100	74.800	21.700	0,87	0,84	84	4.586,40	100,00	Soporta 24 Cabezas +	71.640	18.540	0,00	0,00	0	0,00	95,78	NO INGRESAN ANIMALES
Ver2020	443,85	60.540	61.540	1.000	0,96	0,82	60	3.276,00	100,00	Máx dotación soportada	56.450	-4.090	0,00	0,00	0	0,00	91,73	NO INGRESAN ANIMALES
Oto2020	457,65	63.120	44.523	-18.597	0,51	0,42	42	579,60	100,00	Excedido 18 Cabezas	39.923	-23.197	0,00	0,00	0	0,00	91,73	NO INGRESAN ANIMALES
Inv2020	457,65	63.120	33.417	-29.703	0,38	0,32	31	0,00	100,00	Excedido 29 Cabezas	30.736	-32.384	0,00	0,00	0	0,00	91,73	NO INGRESAN ANIMALES
Pri2020	330,00	45.000	75.800	30.800	0,88	1,01	101	5.514,60	100,00	Soporta 41 Cabezas +	69.614	24.614	0,00	0,00	0	0,00	91,73	NO INGRESAN ANIMALES
Ver2021	384,00	51.840	60.863	9.023	1,07	1,06	70	3.780,00	100,00	Soporta 10 Cabezas +	53.472	1.632	0,71	0,70	61	3.294,00	87,86	Soporta 1 Cabezas +
Oto2021	397,80	54.840	52.546	-2.294	0,60	0,58	57	786,60	100,00	Excedido 3 Cabezas	38.237	-16.603	0,50	0,48	41	565,80	87,86	Excedido 19 Cabezas
Inv2021	397,80	54.840	41.440	-13.400	0,48	0,46	45	0,00	100,00	Excedido 15 Cabezas	37.503	-17.337	0,37	0,35	41	0,00	87,86	Excedido 19 Cabezas
Pri2021	452,40	61.740	83.823	22.083	0,97	0,82	81	4.422,60	100,00	Soporta 21 Cabezas +	74.739	12.999	0,87	0,73	72	3.931,20	87,86	Soporta 12 Cabezas +
Ver2022	330,00	44.520	60.863	16.343	0,97	1,11	82	4.428,00	100,00	Soporta 22 Cabezas +	45.067	547	0,63	0,72	60	3.240,00	84,14	Máx dotación soportada
Oto2022	343,80	47.400	59.866	12.466	0,69	0,76	75	1.035,00	100,00	Soporta 15 Cabezas +	32.227	-15.173	0,44	0,48	40	552,00	84,14	Excedido 20 Cabezas
Inv2022	343,80	47.400	44.883	-2.517	0,51	0,57	56	0,00	100,00	Excedido 4 Cabezas	36.470	-10.930	0,33	0,36	46	0,00	84,14	Excedido 14 Cabezas
Pri2022	398,40	54.360	87.266	32.906	1,01	0,96	96	5.241,60	100,00	Soporta 36 Cabezas +	67.853	13.493	0,76	0,73	74	4.040,40	84,14	Soporta 14 Cabezas +
Ver2023	452,40	61.020	60.863	-157	1,09	0,92	59	3.186,00	100,00	Excedido 1 Cabezas	43.164	-17.856	0,63	0,53	42	2.268,00	80,59	Excedido 18 Cabezas
Oto2023	466,20	64.320	43.523	-20.797	0,88	0,72	40	552,00	100,00	Excedido 20 Cabezas	30.866	-33.454	0,44	0,36	28	386,40	80,59	Excedido 32 Cabezas
Inv2023	330,00	45.540	32.417	-13.123	0,75	0,87	42	0,00	100,00	Excedido 18 Cabezas	22.990	-22.550	0,33	0,38	30	0,00	80,59	Excedido 30 Cabezas

Figura 30: Salida de información de Modulo Consumo animal, analizando la capacidad de carga del sistema sin forestación vs bajo forestación.

Como se puede observar en la salida para una situación bajo forestación, los animales no ingresan a pastorear hasta que la plantación pueda soportar la carga animal sin recibir daños. Finalmente se comparan los kilos de carne producidos en ambas situaciones como se muestra en la Figura 31.

MAXIMO KILOS TOTALES SIN FORESTACION 59

MAXIMO KILOS TOTALES BAJO FORESTACION 53

Figura 31: Kilos de carne producidos sin forestación vs con forestación.

El simulador ofrece una salida gráfica para visualizar la carga animal soportada en un sistema con forestación versus un sistema sin forestación a lo largo del período (Figura 32). También se grafica el balance de oferta y demanda señalando los momentos de déficit forrajero (Figura 32).

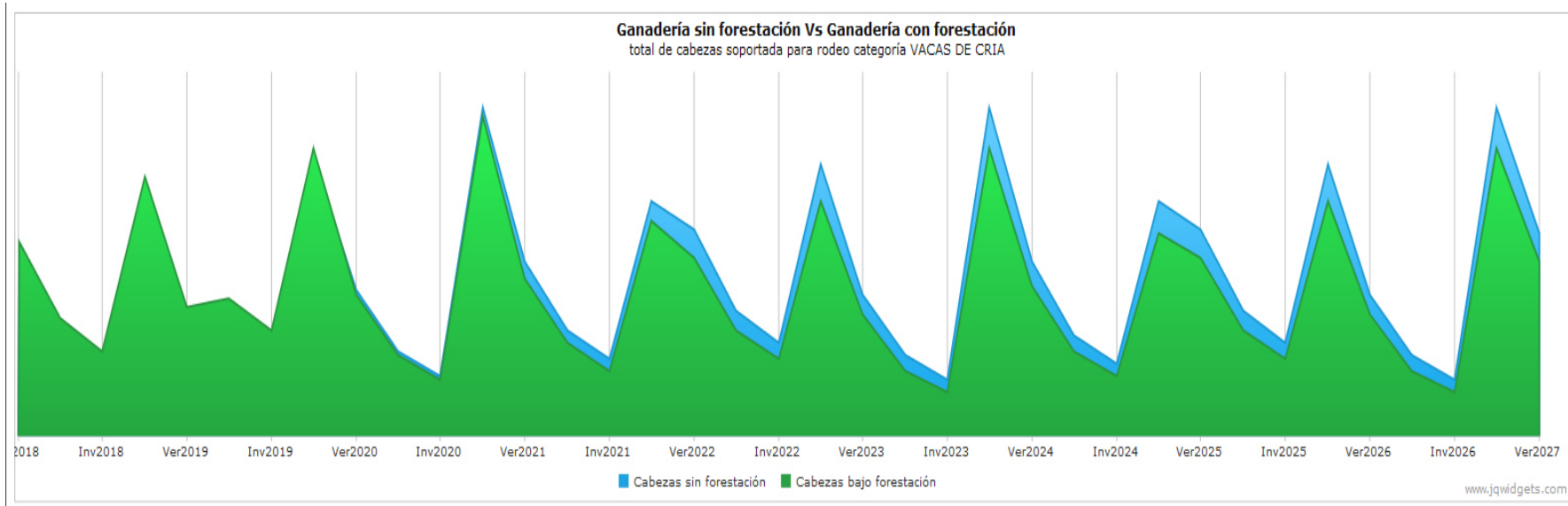


Figura 32: Salida gráfica de carga (UG) soportada en sistema con forestación vs sistema sin forestación.

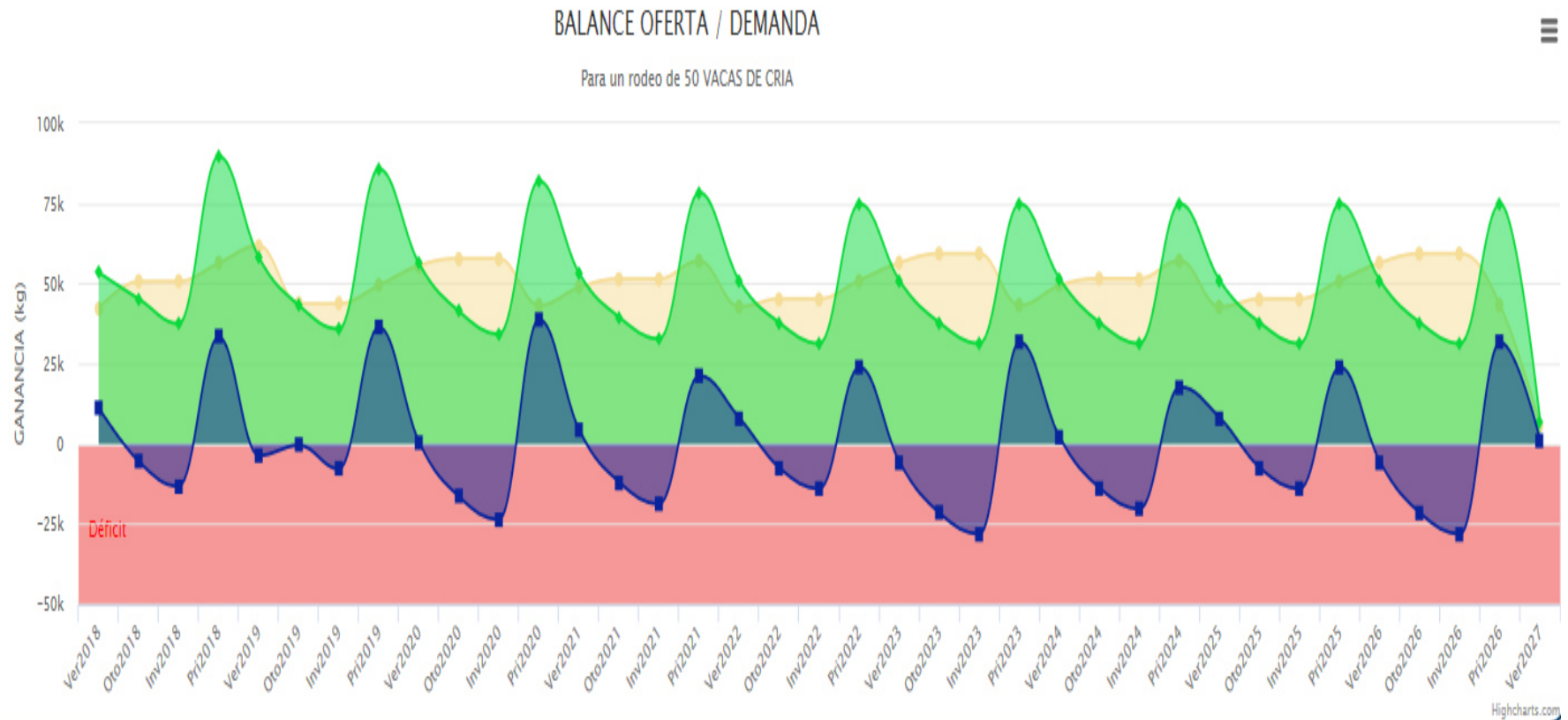


Figura 33: Salida gráfica para balance entre oferta y demanda durante el período proyectado.

3.3.4 Módulo resultados económicos

El simulador dispone de un módulo para proyectar los resultados económicos del período simulado. En el mismo, es posible ingresar las variables relacionadas al costo monetario de implantación del cultivo forestal cubriendo aspectos tales como preparación del suelo, plantas y control de hormigas entre otros. De igual forma se consideran los kilos de carne producidos y se contabilizan como vendidos en el año correspondiente. Se toma en cuenta los costos administrativos de un establecimiento ganadero según información obtenida en las Carpetas Verdes del Instituto Plan Agropecuario (Molina Riccetto, 2018). Los costos e ingresos pueden modificarse, eliminarse e incorporarse nuevos ítems para los cálculos a realizar (Figura 34).

Año inicio	Año fin	Concepto gasto	Tipo	Valor US\$	Cantidad	Total Has	Total	Total US\$ año
1	10	COSTOS ADMINISTRATIVOS	Egreso	10,00	1	100,00	-1.000,00	0,00
0	0	LABOREO	Egreso	302,00	1	100,00	-30.200,00	0,00
0	0	MANO DE OBRA PLANTACION	Egreso	460,00	1	100,00	-46.000,00	0,00
0	0	PLANTACION	Egreso	165,00	1	100,00	-16.500,00	0,00
0	0	PRE PLANTACION (MANO OBRA, DISTRIBUCION)	Egreso	602,00	1	100,00	-60.200,00	0,00
0	0	PREPARACION DEL SITIO	Egreso	75,00	1	100,00	-7.500,00	0,00
2	10	GANADERIA CONSERVACION MEJORAS	Egreso	5,00	1	0,00	0,00	0,00
2	10	GANADERIA GASTOS VACUNO	Egreso	9,00	1	0,00	0,00	0,00
2	10	GANADERIA IMPUESTOS	Egreso	10,50	1	0,00	0,00	0,00

Figura 34: Costos e ingresos del sistema productivo

Se presentan resultados para un escenario conservador, otro por debajo del precio medio y un tercero por encima del precio medio (Figura 35). Se toman los kilos producidos durante cada año de la simulación y los metros cúbicos de madera acumulados al momento de la corta final. El valor para el kilo de carne y para el metro cúbico de madera fue ingresado previamente como inputs del sistema en los módulos correspondientes. Finalmente se realiza una actualización del valor de venta de la madera a corta final para obtener el margen bruto forestal.

Escenario Valor Mínimo esperado (US\$)		Escenario Valor Medio esperado (US\$)		Escenario Valor Máximo esperado (US\$)	
Flujo Neto sin actualizar	178.247,50	Flujo Neto sin actualizar	205.000,00	Flujo Neto sin actualizar	235.750,00
Valor Actual Neto	29.594,60	Valor Actual Neto	49.500,97	Valor Actual Neto	72.381,86
Valor Actual Neto (ha)	295,95	Valor Actual Neto (ha)	495,01	Valor Actual Neto (ha)	723,82
Margen Bruto Forestal Anual	3.469,39	Margen Bruto Forestal Anual	5.803,02	Margen Bruto Forestal Anual	8.485,36
Margen Bruto Forestal Anual (ha)	34,69	Margen Bruto Forestal Anual (ha)	58,03	Margen Bruto Forestal Anual (ha)	84,85
Margen Bruto Ganadero Anual Promedio (ha)	0,00	Margen Bruto Ganadero Anual Promedio (ha)	0,00	Margen Bruto Ganadero Anual Promedio (ha)	0,00

Figura 35: Escenarios proyectados para los resultados económicos.

3.4 EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR EN BASE A LOS ESTUDIOS DE CASO

En el Cuadro 11 se presentan los casos de estudio utilizados para realizar las simulaciones. El período considerado es de 10 años, con una plantación con edad inicial 1 y edad final 10, donde se corta y se vende la madera producida. La categoría elegida es Novillos de más de un año con un peso inicial de 240 kg y un peso objetivo de 395 kg, momento en el cual son retirados para la venta y se reemplazan con un lote de igual característica de peso inicial. Los animales ingresan al monte en el segundo año de crecimiento de la plantación. La producción de forraje es la correspondiente a los valores históricos de producción primaria neta aérea para cada región según el caso de estudio. En la Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40 y Figura 41 pueden observarse los resultados productivos y económicos para cada caso.

Cuadro 11: Casos de estudio utilizados para el simulador

Caso de estudio	Departamento	Eco región	Marco de plantación (m)	Sup. total (ha)	Sup. forestada (ha)	Sup. forestada (%)
1	Maldonado	Sierras del este	(6 x 1,5)	109	76,3	70
2	Rocha	Colinas y lomadas del este	(3,5 x 2,27)	334	26,3	8
3	Rocha	Colinas y lomadas del este	(2 x 2) + 8	334	85,93	26
4	Florida	Centro sur	(6 x 3)	695	40	6
5	Florida	Centro sur	(3 x 2) + 15	695	21	3

Se consideró para los test realizados un valor de madera de *Eucalyptus globulus* de U\$S 20/m³ y un valor de U\$S 1.63 kg/carne. Se tomaron los datos de costos de las empresas ganaderas de la región Este-Noreste y Centro- Este del informe de resultados de Carpetas Verdes del Ejercicio 2017-2018 (Molina Riccetto, 2018).

La producción de forraje se estimó en función de los datos de productividad primaria neta aérea para las regiones comprendidas (AACREA n.d.), como se puede observar en la Cuadro 12 y Figura 36.

Se considera que los animales aprovechan el 50% del forraje excedente de la estación anterior. Al finalizar el primer año de crecimiento de la plantación, se estima un valor para la variable altura media de los dominantes (AMD) de 2 mts y un valor para el diámetro a la altura del pecho (DAP) de 2,5 cm. La superficie efectiva forestada para todos los casos proyectados se consideró como el 80% de la superficie destinada a forestación, lo que excluye las áreas asignadas a caminería y cortafuegos.

Cuadro 12: Producción de forraje promedio de acuerdo al monitoreo satelital.

Caso de estudio	Región	Verano (kg/MS/estación)	Otoño (kg/MS/estación)	Invierno (kg/MS/estación)	Primavera (kg/MS/estación)
1	Sierras del este	1.230,8	861	641,3	1.496
2 y 3	Colinas del este	1.296,4	1.136,9	685,1	1.747,6
4 y 5	Centro Sur	1.149,8	835,5	692,8	1.675,6

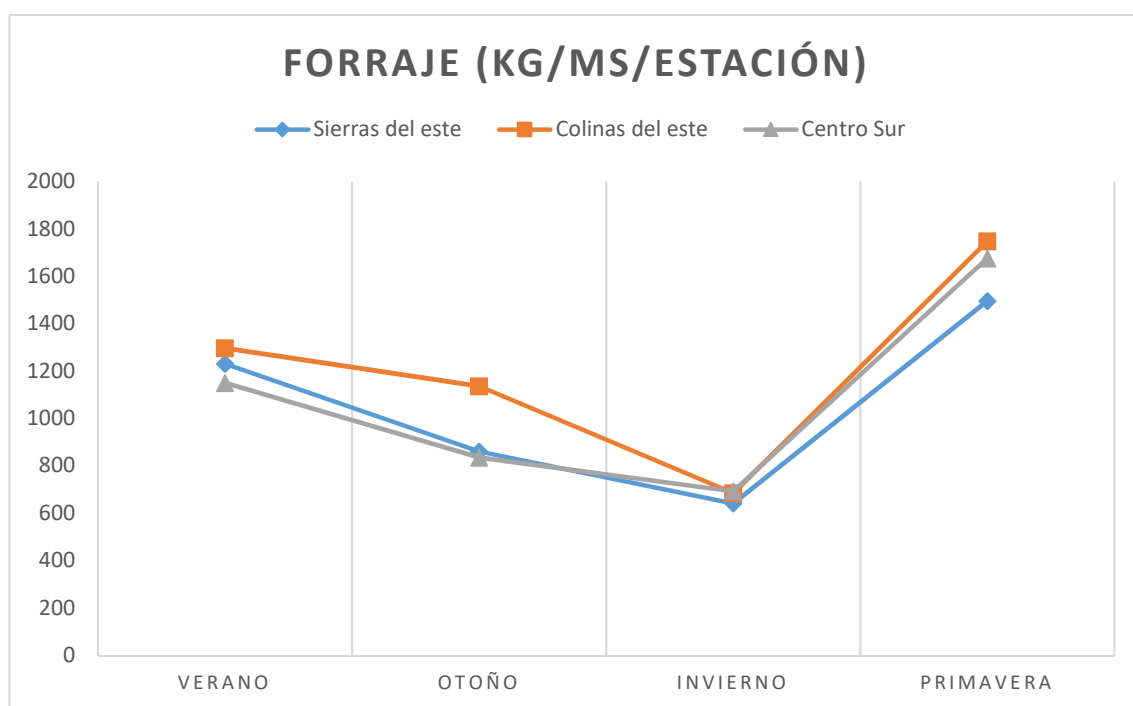


Figura 36: Producción de forraje estacional según eco región.

PRODUCCION	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Sólo Carne (kg)	5.157	9.315	8.182	9.785	9.226	8.224	9.785	9.226	8.182	4.704
Carne (U\$S 1.63/Kg)	8.405	15.183	13.336	15.949	15.038	13.405	15.949	15.038	13.336	7.667
PRODUCCION COMBINADA SILVOP 70 %										
SP Carne (kg)		6.241	5.001	4.838	4.150	3.675	4.362	4.150	3.656	2.103
Carne (U\$S 1.63/Kg)		10.172	8.151	7.885	6.764	5.990	7.110	6.764	5.959	3.427
<i>(PATRIMONIO ACUMULADO EN MADERA, SE HACE EFECTIVO AL MOMENTO DEL CORTE)</i>										
SP Madera (m3)	103	628	1.397	2.301	3.283	4.297	5.316	6.335	7.337	8.319
Madera(U\$S20.00/m3)	2.075	12.574	27.956	46.024	65.679	85.944	106.331	126.719	146.740	166.395
Combinado (U\$S)		10.172	8.151	7.885	6.764	5.990	7.110	6.764	5.959	169.822
RESTO DEL ESTABLECIMIENTO 30 %										
Carne (Kg)	2.166	3.933	3.479	4.131	3.919	3.497	4.131	3.919	3.479	1.991
Carne (U\$S 1.63/Kg)	3.530	6.410	5.670	6.733	6.387	5.700	6.733	6.387	5.670	3.245
RESULTADO COMPARATIVO										
CON Forest.(U\$S)	3.530	16.582	13.821	14.618	13.151	11.690	13.843	13.151	11.629	173.067
SIN Forest. (U\$S)	11.935	21.593	19.006	22.682	21.425	19.105	22.682	21.425	19.006	10.912
Diferencia (U\$S)	-8.405	-5.011	-5.185	-8.064	-8.274	-7.415	-8.839	-8.274	-7.377	162.155

Figura 37: Resultados productivos y económicos para caso de estudio 1.

PRODUCCION	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Sólo Carne (kg)	2.082	3.619	3.114	3.766	3.607	3.129	3.766	3.607	3.114	1.720
Carne (U\$\$ 1.63/Kg)	3.393	5.898	5.075	6.138	5.879	5.100	6.138	5.879	5.075	2.803
PRODUCCION COMBINADA SILVOP 8 %										
SP Carne (kg)		2.335	1.795	1.740	1.456	1.257	1.549	1.456	1.251	721
Carne (U\$\$ 1.63/Kg)		3.806	2.925	2.836	2.373	2.048	2.524	2.373	2.039	1.175
<i>(PATRIMONIO ACUMULADO EN MADERA, SE HACE EFECTIVO AL MOMENTO DEL CORTE)</i>										
SP Madera (m3)	39	229	502	822	1.165	1.519	1.876	2.230	2.577	2.916
Madera(U\$\$20.00/m3)	799	4.586	10.057	16.453	23.312	30.381	37.535	44.604	51.548	58.322
Combinado (U\$\$)		3.806	2.925	2.836	2.373	2.048	2.524	2.373	2.039	59.497
RESTO DEL ESTABLECIMIENTO 92 %										
Carne (Kg)	24.888	42.891	37.341	44.803	42.746	37.397	44.803	42.746	37.341	20.265
Carne (U\$\$ 1.63/Kg)	40.567	69.912	60.865	73.028	69.675	60.957	73.028	69.675	60.865	33.031
RESULTADO COMPARATIVO										
CON Forest.(U\$\$)	40.567	73.718	63.790	75.864	72.048	63.005	75.552	72.048	62.904	92.528
SIN Forest. (U\$\$)	43.960	75.810	65.940	79.166	75.554	66.057	79.166	75.554	65.940	35.834
Diferencia (U\$\$)	-3.393	-2.092	-2.150	-3.302	-3.506	-3.052	-3.614	-3.506	-3.036	56.694

Figura 38:Resultados productivos y económicos para caso de estudio 2.

PRODUCCION	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Sólo Carne (kg)	6.938	11.925	10.402	12.577	11.884	10.452	12.577	11.884	10.402	5.677
Carne (U\$S 1.63/Kg)	11.308	19.437	16.955	20.500	19.370	17.036	20.500	19.370	16.955	9.253
PRODUCCION COMBINADA SILVOP 26 %										
SP Carne (kg)		8.059	6.405	10.008	8.740	7.692	8.566	8.154	7.111	3.831
Carne (U\$S 1.63/Kg)		13.136	10.440	16.313	14.246	12.537	13.962	13.291	11.590	6.244
<i>(PATRIMONIO ACUMULADO EN MADERA, SE HACE EFECTIVO AL MOMENTO DEL CORTE)</i>										
SP Madera (m3)	110	688	1.548	2.559	3.660	4.795	5.944	7.086	8.214	9.315
Madera(U\$S20.00/m3)	2.201	13.760	30.960	51.187	73.203	95.907	118.886	141.728	164.294	186.310
Combinado (U\$S)		13.136	10.440	16.313	14.246	12.537	13.962	13.291	11.590	192.554
RESTO DEL ESTABLECIMIENTO 74 %										
Carne (Kg)	20.086	34.531	30.039	36.114	34.414	30.128	36.114	34.414	30.039	16.323
Carne (U\$S 1.63/Kg)	32.740	56.285	48.963	58.865	56.094	49.108	58.865	56.094	48.963	26.606
RESULTADO COMPARATIVO										
CON Forest.(U\$S)	32.740	69.421	59.403	75.178	70.340	61.645	72.827	69.385	60.553	219.160
SIN Forest. (U\$S)	44.048	75.722	65.918	79.365	75.464	66.144	79.365	75.464	65.918	35.859
Diferencia (U\$S)	-11.308	-6.301	-6.515	-4.187	-5.124	-4.499	-6.538	-6.079	-5.365	183.301

Figura 39: Resultados productivos y económicos para caso de estudio 3.

PRODUCCION	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Sólo Carne (kg)	2.940	5.067	4.337	5.220	5.050	4.357	5.220	5.050	4.337	2.324
Carne (U\$\$ 1.63/Kg)	4.792	8.259	7.069	8.508	8.231	7.101	8.508	8.231	7.069	3.788
PRODUCCION COMBINADA SILVOP 6 %										
SP Carne (kg)		3.742	3.045	3.059	2.818	2.472	2.937	2.818	2.461	1.273
Carne (U\$\$ 1.63/Kg)		6.099	4.963	4.986	4.593	4.029	4.787	4.593	4.011	2.074
<i>(PATRIMONIO ACUMULADO EN MADERA, SE HACE EFECTIVO AL MOMENTO DEL CORTE)</i>										
SP Madera (m3)	28	252	601	1.024	1.484	1.971	2.470	2.972	3.472	3.961
Madera(U\$\$20.00/m3)	576	5.056	12.032	20.480	29.696	39.424	49.408	59.456	69.440	79.232
Combinado (U\$\$)		6.099	4.963	4.986	4.593	4.029	4.787	4.593	4.011	81.306
RESTO DEL ESTABLECIMIENTO 94 %										
Carne (Kg)	49.001	84.241	72.106	86.444	83.899	72.376	86.444	83.899	72.106	38.145
Carne (U\$\$ 1.63/Kg)	79.871	137.312	117.532	140.903	136.755	117.972	140.903	136.755	117.532	62.176
RESULTADO COMPARATIVO										
CON Forest.(U\$\$)	79.871	143.411	122.495	145.889	141.348	122.001	145.690	141.348	121.543	143.482
SIN Forest. (U\$\$)	84.663	145.571	124.601	149.411	144.986	125.073	149.411	144.986	124.601	65.964
Diferencia (U\$\$)	-4.792	-2.160	-2.106	-3.522	-3.638	-3.072	-3.721	-3.638	-3.058	77.518

Figura 40: Resultados productivos y económicos para caso de estudio 4.

PRODUCCION	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Sólo Carne (kg)	1.558	2.649	2.284	2.760	2.641	2.295	2.760	2.641	2.284	1.218
Carne (U\$S 1.63/Kg)	2.539	4.317	3.722	4.498	4.304	3.740	4.498	4.304	3.722	1.985
PRODUCCION COMBINADA SILVOP 4 %										
SP Carne (kg)		1.898	1.522	2.529	2.355	2.062	2.229	2.178	1.876	996
Carne (U\$S 1.63/Kg)		3.093	2.480	4.122	3.838	3.361	3.633	3.550	3.057	1.623
<i>(PATRIMONIO ACUMULADO EN MADERA, SE HACE EFECTIVO AL MOMENTO DEL CORTE)</i>										
SP Madera (m3)	15	134	319	542	786	1.044	1.307	1.572	1.834	2.094
Madera(U\$S20.00/m3)	302	2.688	6.384	10.852	15.724	20.899	26.140	31.449	36.691	41.899
Combinado (U\$S)		3.093	2.480	4.122	3.838	3.361	3.633	3.550	3.057	43.522
RESTO DEL ESTABLECIMIENTO 96 %										
Carne (Kg)	50.383	86.658	74.214	88.973	86.376	74.439	88.973	86.376	74.214	39.252
Carne (U\$S 1.63/Kg)	82.124	141.252	120.968	145.025	140.792	121.335	145.025	140.792	120.968	63.980
RESULTADO COMPARATIVO										
CON Forest.(U\$S)	82.124	144.345	123.448	149.147	144.630	124.696	148.658	144.342	124.025	107.502
SIN Forest. (U\$S)	84.663	145.569	124.690	149.523	145.096	125.075	149.523	145.096	124.690	65.965
Diferencia (U\$S)	-2.539	-1.224	-1.242	-376	-466	-379	-865	-754	-665	41.537

Figura 41: Resultados productivos y económicos para caso de estudio 5.

Se realizó una prueba del simulador para los marcos de plantación estudiados considerando 100 hectáreas forestadas y animales de 240 kg de peso inicial y 390 kg de peso final para todos los casos, observando las variaciones en kilos de carne producida y volumen en metros cúbicos obtenidos en forma anual. Los resultados para la carne en toneladas, se presentan en la Cuadro 13 y los resultados de madera en metros cúbicos. A continuación, en la Figura 42 se observa que aquellos marcos con callejones y menor densidad de plantas permiten una mayor producción de carne mientras que en la Figura 43 se observa que marcos de plantación sin callejones y con mayor densidad favorecen la producción de madera.

Cuadro 13: Toneladas de carne producidas anualmente según marco de plantación

Caso de estudio	Marco de plantación (m)	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6 x 1,5	0	10,2	8,2	8,2	6,8	6	7,5	6,8	6	3,5
2	3,5 x 2,27	0	11,2	8,8	8,5	7,2	6,3	7,7	7,2	6,2	3,4
3	(2x2) + 8	0	11,7	9,2	9,8	9	1,8	9,4	9	7,8	6,2
4	6 x 3	0	11,7	9,3	14,7	12,7	11,1	12,5	11,8	10,3	5,6
5	(3x2)+15	0	11,7	9,6	15,5	14,2	12,2	13,8	13,2	11,4	6

Cuadro 14: Metros cúbicos de madera según marco de plantación

Caso de estudio	Marco de plantación (m)	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año	Año
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6 x 1,5	170	860	1.260	1.480	1.610	1.660	1.670	1.670	1.640	1.610
2	3,5 x 2,27	190	900	1.300	1.520	1.630	1.680	1.700	1.680	1.650	1.610
3	(2x2) + 8	160	840	1.250	1.470	1.600	1.650	1.670	1.660	1.640	1.600
4	6 x 3	90	700	1.090	1.320	1.440	1.520	1.560	1.570	1.560	1.530
5	(3x2)+15	90	710	1.100	1.330	1.450	1.540	1.560	1.580	1.560	1.550

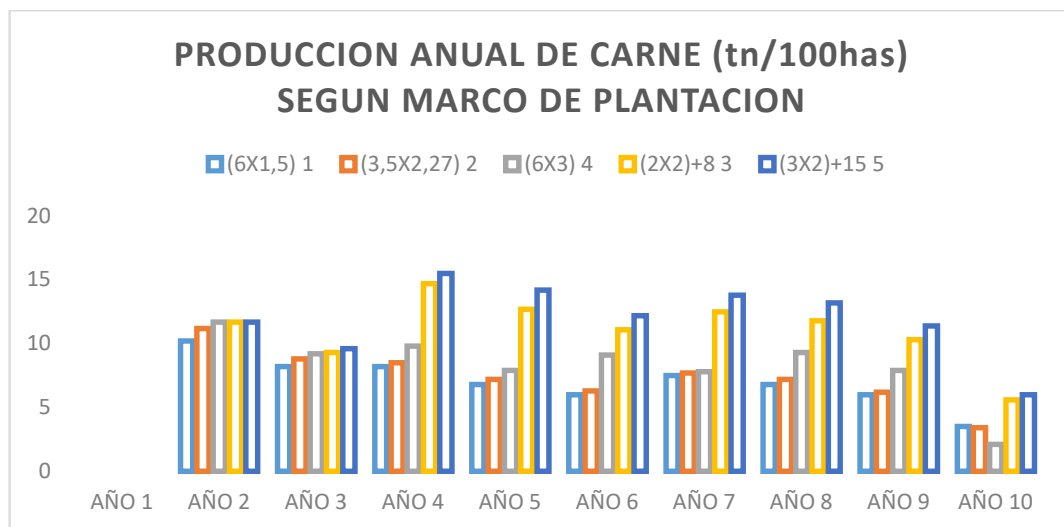


Figura 42: Producción anual de carne según marco de plantación.

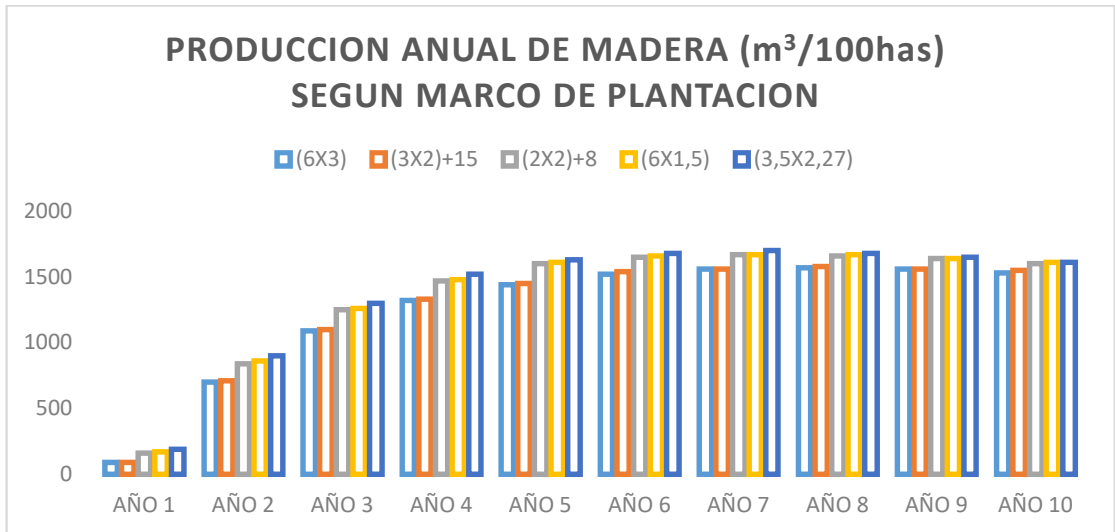


Figura 43: Producción anual de madera según marco de plantación.

Estos resultados permiten argumentar que el marco de plantación incide directamente sobre los objetivos productivos planteados para el establecimiento priorizando la producción de madera en unas situaciones o la producción de carne en otras. No obstante en todas las situaciones es posible realizar la actividad productiva en forma combinada.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

El modelo incorpora los resultados de investigación nacional y regional para estos sistemas en algunos aspectos relevantes como son el confort animal, la luz incidente y la producción de forraje y la producción de madera de acuerdo a los marcos de plantación.

Como mencionado por Acosta y Pastorini (2010) y Peri (2016), es posible encontrar combinaciones que posibiliten sistemas de mayor productividad conjunta. A partir de la modelación se puede obtener sistemas que presentan mayor área de pastoreo y producción de madera con respecto a sistemas de forestación convencional; así los sistemas con marcos de plantación que incluyen callejones, disponen mayor área libre para el ganado y mayor producción de forraje como los casos analizados 3 y 5.

En el presente trabajo se incorpora la superficie sombreada en las proyecciones del sistema lo que permitiría disminuir el estrés térmico como menciona C. Saravia et al.(2011) y Simeone et al. (2014a), aumentando la ganancia de peso en el ganado de carne; esto está considerado en el modelo a través de una mayor tasa de ganancia de peso diario, para los animales bajo monte. Si bien a partir de los datos de campo no se puede obtener un indicador de tasa de ganancia diaria bajo forestación como encontraron Rovira (2002), Simeone et al. (2014a), West (2003) y C. Saravia y Astigarraga (2011), el modelo incorpora esta variable como un elemento a tener en cuenta.

La luz bajo dosel es una variable que determina la producción de forraje; como encontrado en el trabajo de Duursma y Mäkelä (2007) al igual que en Carranza y Ledesma (2009), el área de copa de los árboles incide en la captación de la luz. En este trabajo se incorporan los resultados de luz que llega al tapiz herbáceo en los estudios de caso (Bussoni et al., 2019). Esta producción es gradualmente menor de acuerdo a la superficie sombreada, variable a su vez relacionada a la densidad forestal al igual

que encuentra Gallo (1998a). Asimismo, se incorpora las interacciones de las variables que afectan el área de copa como la edad y el marco de plantación.

En los resultados del presente trabajo, al igual que encuentra Lacorte et al. (2016) en aquellos casos en donde existen callejones, la cantidad de luz que llega al tapiz es mayor, con mayor producción de forraje, en comparación a los marcos de plantación convencionales o sin callejones. Esto pudo observarse en los casos de estudio donde fueron comparados dos marcos de plantación diferentes con alta densidad de plantas en los cuales uno de ellos incluía callejones y el otro no como es el caso 2 y 3. A pesar de que los casos 4 y 5 no son directamente comparables, ya que tienen igual densidad pero diferente marco de plantación, edad y especie forestal, si se proyecta el área sombreada a los 8 años, los resultados arrojan que el caso 4 presenta un 64% de área sombreada, mientras que en el caso 5 se obtiene un 22% de área sombreada. Esto se explica por el marco de plantación y una mayor área de copa individual para el caso 4, lo que se considera una buena aproximación a la realidad de la plantación.

A pesar de que el modelo desarrollado trabaja con rotaciones forestales cortas, la potencialidad de estos sistemas es muy alta: existe la posibilidad de proyectar rotaciones de mayor duración y con un manejo silvicultural más complejo, lo que permitiría obtener productos de diámetros mayores con destino de aserrado o debobinado. Esto podría mejorar el retorno financiero de estos sistemas. Las razones de lo anteriormente comentado en parte se deben a que la incorporación de áreas forestadas en establecimientos ganaderos es reciente en el tiempo, no existiendo la cultura de realizar inversiones de largo plazo en este rubro.

En Uruguay las rotaciones empleadas por parte de los productores ganaderos, tienen como principal objetivo la obtención de madera para pulpa o biomasa. Según datos del año 2018 (Boscana y Boragno, 2019), se destina 10,2 millones de metros cúbicos para la fabricación de celulosa, lo que representa el 64% de la madera extraída, sobre un total de 15,9 millones de metros cúbicos cosechados.

En estos sistemas, el componente forestal es el más estable en el tiempo por lo que la definición inicial del marco de plantación, junto a otras variables locales como la orientación de la plantación, etc. es un aspecto que condiciona la producción de forraje a lo largo del tiempo, la carga animal del sistema y la producción de madera, como también encuentran Gallo, (1998a) y Lacorte et al. (2016).

Considerando el volumen de madera y los kilos de carne como los principales resultados productivos del sistema, se encontró que las principales interacciones entre los componentes son: la superficie destinada a la forestación y el marco de plantación utilizado, que determina la densidad de plantas y la superficie libre para pastoreo. En condiciones de mayor densidad de plantas, la sombra proyectada por las copas de los árboles reduce la luz que llega bajo dosel afectando la producción de forraje lo que disminuye la oferta de pasto para el consumo animal, por lo que se reduce la carga animal soportada. Para marcos de plantación que incluyan callejones y una menor densidad de plantas, la superficie de pastoreo afectada por sombra es menor como encontró (Barro et. al 2012 citado por Peri, 2016). En zonas templadas del sur de Brasil en estaciones de otoño e invierno, pasturas tropicales como *Brachiara* spp., *Panicum* spp. y *Cynodon* spp., mantuvieron su productividad ya que la masa forestal protege al tapiz y mantiene la humedad (Costa Varella et al., 2016) lo que resulta en una mejora de producción de pasto. La interacción entre el componente pastura y el componente animal es a través del balance oferta de forraje y demanda para consumo que tiene como resultado el ajuste de carga soportada.

El componente forestal y el componente animal interactúan por medio de la sombra que permite mejorar las condiciones de confort térmico y la reducción de pérdida de energía de mantenimiento (C. Saravia et al., 2011). Además la superficie disponible para pastoreo es el resultado de la densidad de plantas y del área efectiva forestada.

Los factores ambientales presentan interacciones con los demás componentes del sistema; la estación del año afecta la producción estacional anual de forraje presentando máximos de producción en condiciones estivales y mínimos de

producción en condiciones invernales. La estacionalidad afecta la tasa de ganancia de kilos de los animales y los niveles de consumo en la relación a la duración de la luz solar y a las temperaturas. La temperatura y la humedad ambiente interactúan con las condiciones de pastoreo pudiendo disminuir en condiciones de alta temperatura y humedad la cantidad de alimento consumido a través del tamaño del bocado y la frecuencia y duración del tiempo de pastoreo (Rovira, 2002). El stress térmico afecta el balance homeostático distribuyendo parte de la energía obtenida del consumo al mantenimiento de la temperatura corporal. La estación del año es fuente de variación de la inclinación y duración de la radiación solar recibida por el tapiz forrajero y por la copa de los árboles afectando la radiación fotosintéticamente activa recibida (Duursma y Mäkelä, 2007).

El tipo de suelo en cuanto a su índice de productividad, estructura física, condiciones topográficas y aptitud puede limitar o potenciar el desarrollo de especies herbáceas así como también la especie forestal utilizada.

Como resultado de la actividad de taller con productores ganaderos y técnicos, se incorporó el manejo de la variable “edad de ingreso de los animales al monte para pastoreo” que resulta en una flexibilidad de la herramienta. Esta modificación permite que el usuario ajuste el momento en el que el ganado accede al pastoreo bajo forestación de acuerdo a su planificación.

El modelo desarrollado permite evaluar en una línea temporal los resultados productivos y económicos de diferente grado de integración, tanto para productores ganaderos que analicen incorporar forestación, como productores forestales que evalúen combinar ganadería bajo sus montes. A pesar de que el proceso de toma de decisiones es más complejo que el modelo obtenido, ya que no solo incluye variables económico-productivas como se desarrolló en otras investigaciones (Boscana y Varela, 2011), este trabajo permite dilucidar y esclarecer la evolución de las variables productivas y económicas en el tiempo, en base a trabajos de campo, por lo que aporta en este sentido para la toma de decisiones.

5. CONCLUSIONES

El modelo planteado es integrador de los sistemas involucrados y permite representar las principales interacciones entre los componentes forestación, ganadería y forraje con el ambiente. Asimismo permite proyectar resultados productivos y económicos, considerando las interacciones de sus componentes. En base al análisis de los estudios de caso se sintetiza esas interacciones traducidas en la producción de forraje bajo dosel con una carga animal ajustada.

También, dicho modelo permite anticipar los momentos de déficit de forraje para los animales y planificar los ajustes de carga. En base a la oferta y demanda permite estimar la carga máxima animal (UG) soportada para cada estación.

Por otro lado, el modelo permite simular los cambios en la superficie disponible de pastoreo y en la producción de forraje a través de la interacción con el marco de plantación y la densidad, así como el área de copa y la sombra proyectada, los cuales son sintetizados en el modelo. Se verifica la importancia del factor marco de plantación en la producción de los componentes animal, forestal y pastura. Se encontraron distintos sistemas que permiten priorizar diferentes objetivos productivos. Los diferentes marcos de plantación cambian la productividad de los componentes (animal, forestal, pastura) individualmente. En un futuro se deberían disponer de un simulador de producción de madera incorporando el efecto de diferentes marcos de plantación.

En el taller realizado con productores ganaderos y técnicos, éstos evaluaron que el simulador representa los procesos de crecimiento de forraje bajo forestación y los beneficios en el confort animal de forma muy cercana a la realidad que puede observarse en aquellos establecimientos que realizan esta actividad combinada.

El software creado es una primera herramienta que puede ser enriquecida incluyendo nuevas variables en el sistema o profundizando las ya presentadas. Este fue creado de forma tal que pueda explicar las interacciones bajo efectos forestales

diferentes, con distintos marcos de plantación para servir como una herramienta de comprensión de las interacciones y de la predicción de los resultados de sus variables productivas al incluir forestación en establecimientos ganaderos. En pro de robustecer el modelo sería recomendable contar con nuevas líneas de investigación para profundizar en el comportamiento de otras variables como raza y categorías animales; composición del tapiz forrajero incluyendo especies herbáceas con tolerancia a la sombra y especies forestales con diferentes destinos comerciales obtenidas en densidades bajas y manejo silvicultural.

En el mismo sentido el modelo construido permite incorporar otras interacciones que se pueden profundizar, adicionando nuevos módulos sin perder la funcionalidad del mismo. Se podría mencionar algunos puntos en el que sería importante trabajar a futuro como, el balance de emisiones de gases efecto invernadero y retención de dióxido de carbono en la biomasa forestal, los aportes de materia orgánica del ganado y la biomasa forestal al suelo, la disminución de la erosión, los efectos del pisoteo de los animales en la compactación del suelo y la producción forestal, entre otros.

Finalmente se deberían ampliar las regiones del país para incorporar nuevos escenarios, que presentan aptitud productiva y comercial como el Norte del país, entre otras.

6. BIBLIOGRAFÍA

- AACREA (Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola), s.f. Tablero de control forrajero [WWW Document]. Consultado 4 enero 2019. Disponible en: <http://www.crea.org.ar/tableroforrajero>
- Acosta P, Pastorini V, 2010. Integrar para mitigar efectos del cambio climático y producir sustentablemente: ganadería – forestación. Diversificación y forestación a pequeña escala en Uruguay. Tacurembó (Uruguay). INIA.Serie Actividades de Difusión 57.pp 19-23.
- AgResearch, 1993. Farmax your advantage [WWW Document]. Consultado 5 enero 2019. Disponible en: <http://www.farmax.co.nz>
- Barrio-Anta M, Alvarez-González JG, Díaz-Maroto IJ, López-Sánchez, CA. 2004. Relación altura-diámetro generalizada para "Quercus robur" L. en Galicia. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. N° 18. 141-146.
- Binkley D, Campoe OC, Gspaltl M, Forrester DI. 2013. Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. Forest Ecology and Management. 288, 5-13.
- Boscana M, Boragno L. 2019. Actualidad del sector forestal, en: MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca) (Ed.), MGAP Anuario 2018 Análisis sectorial y cadenas productivas. Montevideo. 229-239.
- Boscana M, Varela, E. 2011. Factores que influyen en la incorporación del rubro forestal en predios agropecuarios de los departamentos de Florida, Flores y Durazno. Tesis Ingeniero Agrónomo. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 121 p.
- Brazeiro A, Panario D, Soutullo A. 2012. Clasificación y delimitación de las eco-regiones del Uruguay. [WWW Document]. Consultado 5 enero 2019. Disponible en: <http://vidasilvestre.org.uy/wp-content/uploads/2012/05/Ecorregiones.pdf>
- Bussoni A, Alvarez J, Cubbage F, Ferreira G, Picasso V. 2017. Diverse strategies for

- integration of forestry and livestock production. *Agroforestry Systems*. 93(1): 333-344.
- Bussoni A, Boscana M, Varela F, Llanos E, Picasso V, Cubbage F, Alconada Magliano, MM, Carricaburu F. 2019. Producción ganadera y forestal: Análisis de sistemas de producción integrados. *FPTA-INIA N° 70*, 144.
- Cárdenas A, Reyes B, Ríos N, Woo A, Ramírez E, Ibrahim M. 2007. Impacto de los sistemas silvopastoriles en la calidad del agua en microcuencas ganaderas de Matiguás, Nicaragua. en: *Encuentro 2007/ Año XXXIX*, N° 77, 70-82.
- Carranza CA, Ledesma M. 2009. Bases para el manejo de sistemas silvopastoriles, en: *Congreso Forestal Mundial*.(13^o, 2009, Buenos Aires, Argentina).
- Corral J. 2000. Notas sobre UML-Material de apoyo para el curso de UML.[Datos sin publicar].
- Costa Varella A, Barro RS, Silva JLS, da Porfirio-da-Silva V, de Saibro JC. 2016. Silvopastoral Systems in the Cold Zone of Brazil, en: Peri, P.L., Varella, A.C., Dube, F. (Eds.), *Silvopastoral System in Southern South America*. Springer. 231-255.
- Diaz-Balteiro L. 1997. Turno forestal económicamente óptimo, una revisión. *Revista Española Economía Agraria*, N° 180. 181-224.
- Dieguez Camerón F, Bommel P, Corral J, Bartaburu D, Pereira M, Montes E, Duarte E, Morales Grosskopf H. 2012. Modelling of an Extensive Cattle Breeding Farm on Basaltic Soils. 120-130.
- Duursma R, Mäkelä A. 2007. Summary models for light interception and light-use efficiency of non-homogeneous canopies. *Tree Physiology*. N° 27, 859-870.
- Etienne M, Rapey H. 1998. Simulating integration of agroforestry into livestock farmers' projects in France. *Agroforestry System*.V 48. 257-272.
- Fowler M. 2003. *UML Distilled third edition, a brief guided to the standard object modeling language*. Addison-Wesley Professional; 3 edition.1-208.

- Gallo L. 1998a. Comparación práctica de diferentes índices de densidad. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Costa Rica.
- Gallo L. 1998b. Crecimiento de *Panicum maximum* bajo *Pinus caribea*: relaciones dosel pradera. Turrialba, Costa Rica.
- Gallo L. 1998c. Crecimiento de *Panicum maximum* bajo *Pinus caribea*: relaciones dosel-pradera. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Gallo ., Letourneau F, Vinceti B. 2004. A modelling case study: options for FGR management in *Araucaria araucana* ecosystems. Challenges in managing forest genetic resource for livelihoods: examples from Argentina and Brazil. International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy. 187-211
- Gonzalez-Tálice J, Fedrigo J, Bussoni A, Rachetti M. s. f. Ensayo Especies C4 Promisorias para Sistemas Silvo-Pastoriles: resultados preliminares en Estación B. Rosengurt – FAGRO.
- Hart R. 1985. Conceptos básicos sobre Agroecosistemas, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 159.
- Hirigoyen A. 2014. Sistema de apoyo a la gestión de plantaciones de eucalipto *globulus*. Actualización 2014. Revista. INIA Uruguay, 38. 43-45.
- Lacorte SM, Barth SR, Colcombet L, Crechi EH, Esquivel JI, Fassola H, Wick RÁ. 2016. Silvopastoral Systems Developed in Misiones and Corrientes, Argentina. En: Peri PL, Dube P, Varella A. (Eds.). Silvopastoral Systems in Southern South America. NY: Springer. (Advances in Agroforestry;11) 10-39.
- Langsaeter A. 1941. Om Tynning I enaldret gran-og furuskog Maddel. Det Norske Skogforoksvesen 8. 131-216.
- Mahecha L. 2002. El silvopastoreo : una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. Revista Colombiana Ciencias Pecuarias, N° 15. 226-231.

- Methol R. 2003. SAG grandis: Sistema de apoyo a la gestión de plantaciones de *Eucalyptus grandis*. INIA Serie Técnica, 131. 1-49.
- Methol R. 2006. Sistema de Apoyo a la Gestión de Plantaciones de *Eucalyptus globulus*. INIA Serie Técnica, 158. 1-41.
- Methol R. 2008. Sistema de apoyo a la gestión de plantaciones de *Eucalyptus* orientadas a la producción de celulosa en Uruguay. INIA Serie Técnica, 173. 1-32.
- MGAP, 2011. Censo General Agropecuario 2011. Resultados definitivos.
- Molina Riccetto C. 2018. 17 años monitoreo empresas ganaderas, resultados del ejercicio 2017-2018 y evolución desde 2001. Montevideo.
- Munka C. 2017. Microclima en sistemas silvopastoriles. 1er Seminario en Sistemas silvopastoriles 63-68.
- Munka C, Bussoni A. 2015. Mas tecnologías para la producción familiar. Avances del Proyecto N°7. [Sin publicar].
- Munka C, Bussoni A, Rachetti M, Boscana M, Gonzalez-Tálice J, Gonzalez A. 2017. Integración de la forestación en predios ganaderos y lecheros familiares: desafíos, potencialidades y herramientas para tomar decisiones. Avances del proyecto No 25. [Sin publicar].
- Nunes de Moura W, Denardin da Silveira B, Pagel Floriano E. 2016. Modelagem do diametro da copa de *Eucalyptus* sp em Cacapava do sul, RS. Uruguaiana, Brasil.
- Nutto L, Touza Vazquez MC. 2006. Modelos de producción de madera sólida en plantaciones de *eucalyptus globulus* de Galicia. Boletín del CIDEU 2. 37-50.
- Ortiz Torres C, Gómez Díaz JD, Domínguez Álvarez FA, Villanueva Morales A. 2018. Influencia de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y *Opuntia ficus-indica* L. Mill en las propiedades físicas y químicas del suelo. Terra Latinoamericana. N° 36, 275-285.
- Paruelo JM, Golluscio R. 1994. Range assessment using remote sensing in Northwest Patagonia. *Journal of Range Management*. Vol 47. 408-502.

- Passioura JB. 1996. Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering. *Agronomy Journal*. N° 88. 690-694.
- Peri PL. 2016. *Silvopastoral Systems in Southern South America*. NY: Springer. *Advances in Agroforestry*. Vol 11.
- Rovira P. 2002. Efecto de la sombra artificial en el engorde de novillos durante los meses de verano. En: INIA Treinta y tres, jornada anual de producción animal resultados experimentales. Treinta y tres. Serie Actividades de Difusión N° 294, 79-95.
- Saravia A, César D, Montes E, Taranto V, Pereira M. 2011. Manejo de rodeo de cría sobre campo natural. Montevideo (Uruguay). Instituto Plan Agropecuario. 78p.
- Saravia C, Astigarraga L, Van Lier E, Bentancur O. 2011. Impacto de las olas de calor en vacas lecheras en Salto (Uruguay). *Agrociencia Uruguay* N° 15. 93-102.
- Simeone A, Beretta V, Caorsi C. 2014a. Cuantificando el efecto de la sombra y el abrigo de los montes sobre la performance animal. Propuestas tecnológicas en Ganadería para un país agrícola, Ganadero. y Forestal. 16ª Jornada Anual de la Unidad de Producción Intensiva de Carne (UPIC). 24-27.
- Simeone A, Buffa JL, Beretta V, 2014b. Ganadería, agricultura y forestación: cuantificando las sinergias entre rubros para un crecimiento armónico. Propuestas tecnológicas en Ganad. para un país agrícola, Ganadería. y Forestación. 16ª Jornada Anual de la Unidad de Producción Intensiva de Carne (UPIC).30-37.
- Soto-Aguilar RN. 2014. Principios agronómicos: bases para una teoría agronómica. Santiago, Chile, Sociedad Agronómica de Chile, 108p.
- StataCorp, 2017. *Stata Statistical Software: Release 15*. College Station, TX: StataCorp LLC.
- Turner BL, Rhoades RD, Tedeschi LO, Hanagriff RD, McCuistion KC, Dunn BH. 2013). Analyzing ranch profitability from varying cow sales and heifer replacement rates for beef cow-calf production using system dynamics.

Agriculture Systems. N° 114. 6-14.

UBA-LART, 2019. Laboratorio de análisis regional y teledetección [WWW Document]. Consultado 3 agosto 2018. Disponible en: www.lart.agro.uba.ar

UBA, s.f. Sistema de seguimiento forrajero [WWW Document]. Consultado 3 agosto 2018. Disponible en: <http://larfile.agro.uba.ar/lab-sw/sw/gui/Inicial.page>

Universidad de Murcia, s. f. Laboratorio de Modelización [WWW Document]. Consultado 3 agosto 2018. Disponible en: <http://www.um.es/fem/PersonalWiki/pmwiki.php/EsModelling/IntroClasses>

Vayssières J, Vigne M, Alary V, Lecomte P. 2011. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. Agriculture Systems. N°104. 146-161.

Vilaboa-Arroniz J. 2009. El concepto de agroecosistemas y su aplicación en la ganadería bovina.[En línea]. 1 diciembre 2018. Disponible en: https://www.colpos.mx/wb_pdf/Veracruz/Agroecosistemas/lectura/1.pdf

Von Bertalanffy L. 1972. The history and status of general systems theory. Academy Management. Vol. 15, N° 4. 407-426.

West JW. 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. Journal Dairy Science. N° 86, 2131-2144.

Wink C, Soares Monteiro J, Reinert DJ, Liberalesso E. 2012. Parametros da copa e a sua relacao com o diametro e altura das arbores de eucalipto em diferentes idades. Scientia Forestalis. N° 40, 57-67.

7. ANEXOS

ANEXO 1: ACCESO A MANUAL DE USO DE LA HERRAMIENTA
SIMFORGAN

http://www.desarrollofv.com/silvopsd/pdf/manualdeuso_v1.pdf

ANEXO 2: DIAGRAMAS UML

El lenguaje UML permite el uso de diferentes diagramas de representación gráfica para establecer el funcionamiento de los objetos dentro del sistema. El diagrama de secuencia es utilizado para modelar las interacciones entre los componentes. En la Figura 1 se representa el paso del tiempo que determinan las diferentes estaciones (otoño, invierno, primavera, verano) y la incidencia en las tasas de crecimiento de forraje y las tasas de ganancia animal. A lo largo del período proyectado (tiempo) los árboles avanzan en su desarrollo que interactúa con la superficie de pastoreo provocando una reducción de la misma. Aumenta también el desarrollo de la copa de los árboles provocando un aumento en la superficie sombreada que interactúa con la producción de forraje. El balance neto depende de la demanda animal y de la oferta de forraje, lo cual va a determinar el manejo de la carga ganadera soportada por la superficie de pastoreo disponible en esa estación.

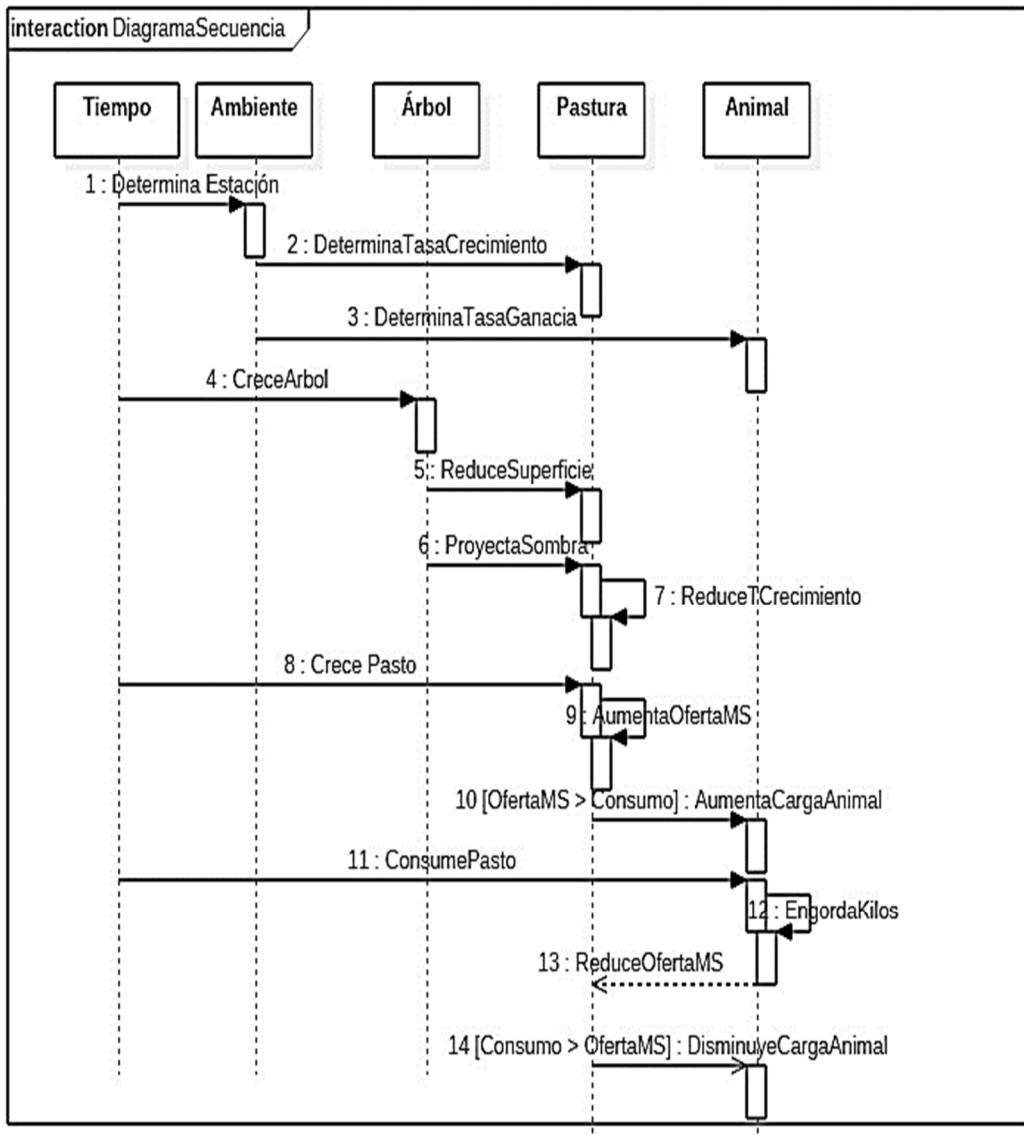


Figura 1: Diagrama de Secuencia del modelo

Los diagramas de actividad representan el flujo de acciones, siendo una actividad una ejecución general entre los objetos que se está realizando en un momento dado dentro de una máquina de estados. El resultado de una actividad es una acción que produce un cambio en el estado del sistema o la devolución de un valor. En la Figura 2 se representa la actividad de ajuste de carga en función del balance entre demanda y consumo. Al iniciar la estación se determina el crecimiento de pasto y la oferta de forraje y simultáneamente se calcula la demanda animal. Con esa información se determina una presupuestación forrajera y en base a ese resultado, se decide si se puede aumentar la carga, si debe mantenerse o si debe reducirse en caso de déficit.

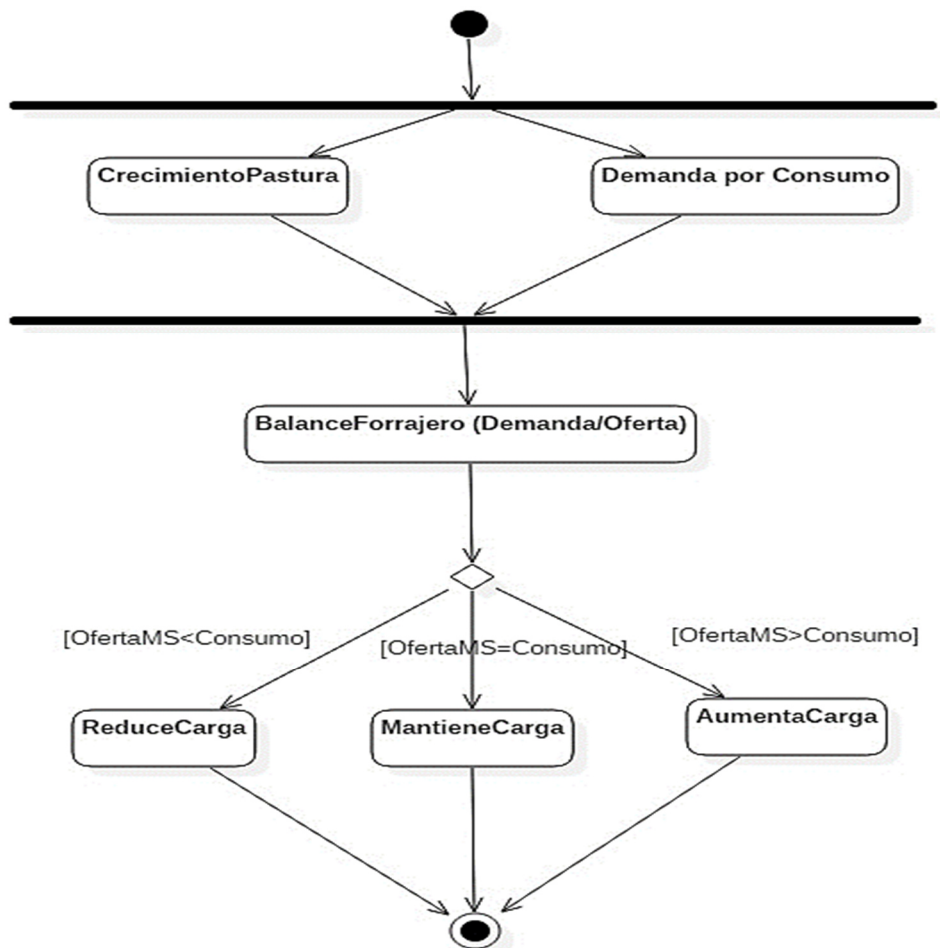


Figura 2: Diagrama de actividad del modelo para ajuste estacional de carga animal.

En cuanto a la actividad de alcanzar el peso objetivo de los animales (Figura 3), éstos consumen forraje como fuente de alimento en forma diaria y de acuerdo a la tasa de ganancia generan un aumento de peso que se va acumulando. Si el aumento de peso generado es menor al peso objetivo, continúan pastoreando el forraje; si el peso objetivo fue alcanzado, los animales abandonan la actividad y son reemplazados por otro lote de iguales condiciones iniciales.

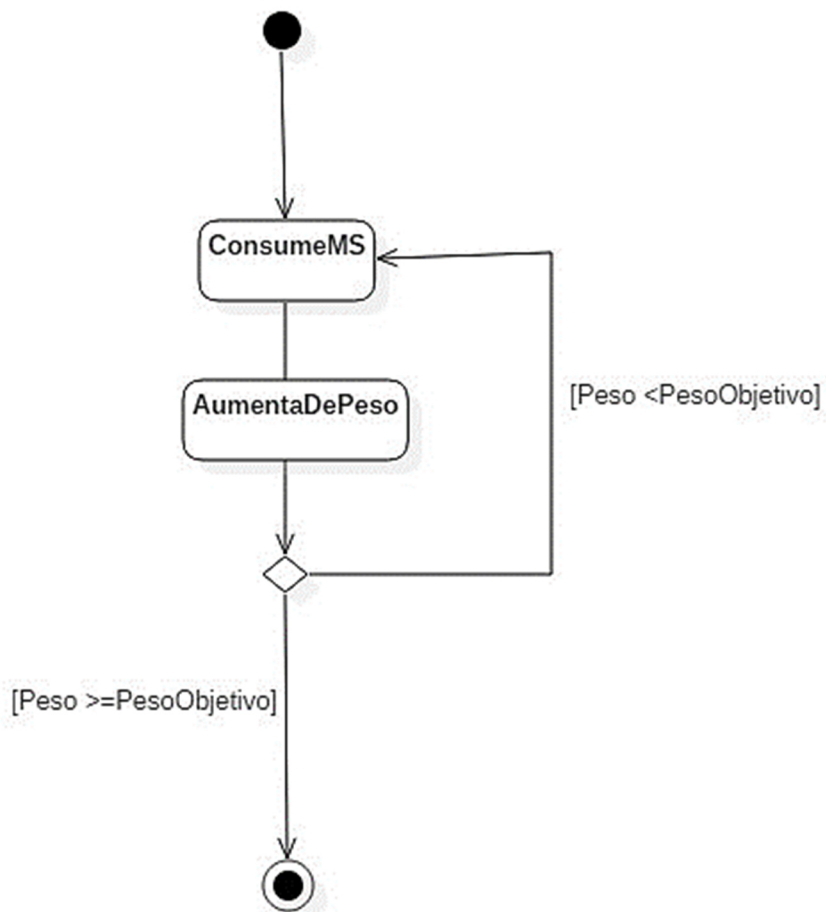


Figura 3: Diagrama de actividad del modelo para consumo animal.

El crecimiento en altura y diámetro a través del tiempo de la plantación forestal, genera un aumento en el tamaño de la copa de los árboles que proyecta sombra sobre la superficie. Este crecimiento depende de la especie forestal utilizada, así como también del marco de plantación utilizado ya que la distancia de un árbol a otro en la fila y entre filas, puede generar un solapamiento de las copas en etapas avanzadas de desarrollo. En la Figura 4, se representa que mientras el desarrollo del área de copa sea menor a la copa de los árboles vecinos, la superficie afectada por la sombra proyectada continúa creciendo y cuando las copas de los árboles comienzan a solaparse, se alcanza el máximo de superficie sombreada.

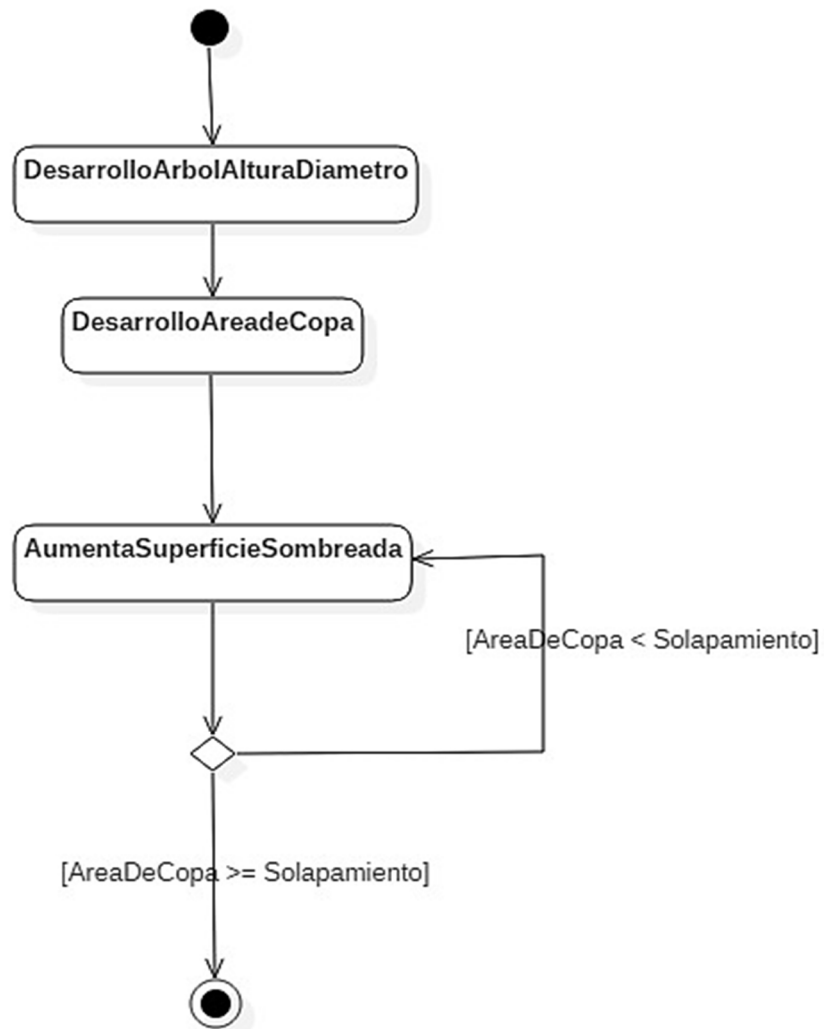


Figura 4: Diagrama de actividad del modelo para aumento del área sombreada que afecta la superficie de pastoreo.

El crecimiento del rodal a lo largo del tiempo, interactúa con la pastura a través de la proyección de sombra como así también por la reducción de superficie libre para pastoreo. Ambos eventos – aumento de la superficie ocupada y proyección de sombra – inciden directamente en la oferta forrajera. En la Figura 5 se observa que la reducción de superficie de pastoreo y el aumento de la superficie sombreada ocurren en forma paralela, independientemente y como consecuencia del desarrollo del árbol.

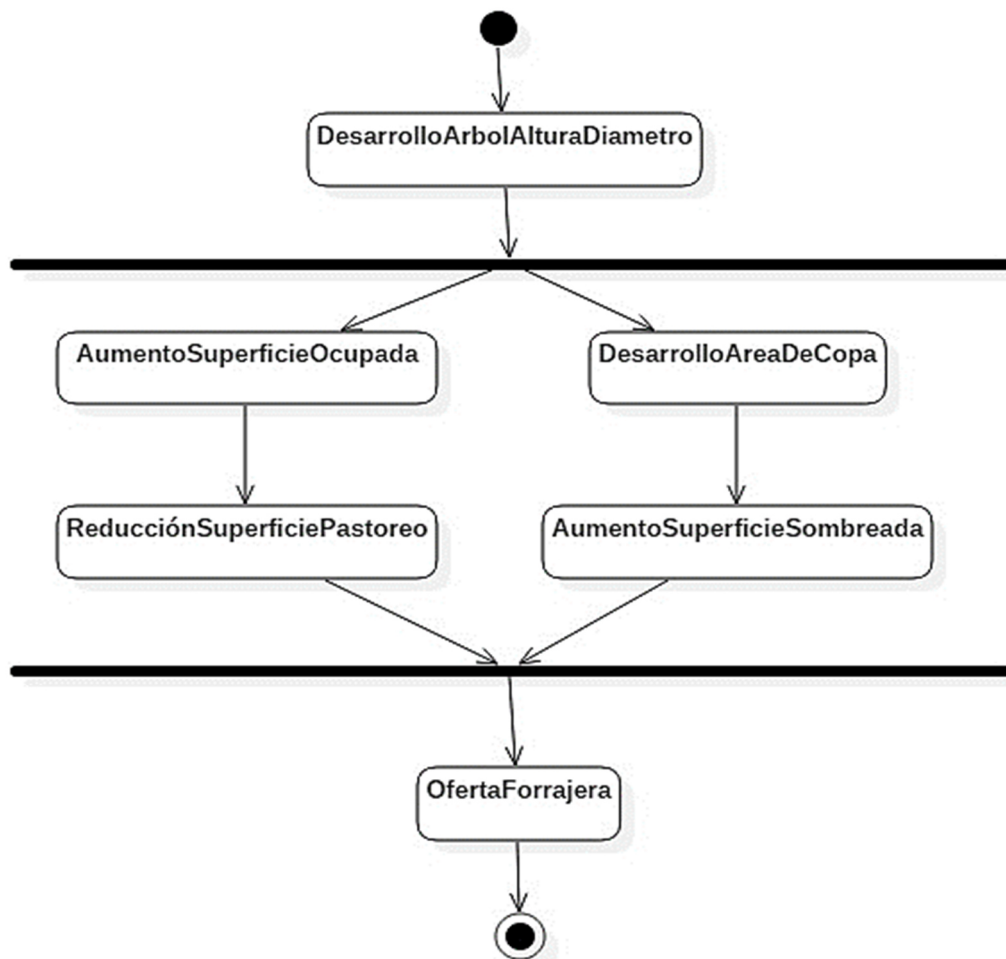


Figura 5: Diagrama de actividad del modelo para la oferta de forraje.

ANEXO 3: MODELO DE SIMULADOR PARA SISTEMAS DE
SILVOPASTOREO EN REGIONES CENTRO SUR Y SURESTE DE URUGUAY

MODELO DE SIMULACIÓN PARA SISTEMAS DE SILVOPASTOREO EN REGIONES CENTRO SUR Y SURESTE DE URUGUAY ¹

Varela Casadey Fabián¹, Bussoni Adriana², Dieguez Cameroni Francisco³

¹ fabianv.uy@gmail.com

² Departamento de Ciencias Sociales. Facultad de Agronomía, Avda. E. Garzón 780. CP
12.900. Montevideo. Udelar.

³ Departamento de Sistemas Ambientales Facultad de Agronomía. Avda. E. Garzón 780. CP
12.900. Montevideo. Udelar.

¹Artículo a publicar en la revista Agrocienza Uruguay. Modelo de simulación para sistemas de silvopastoreo.

RESUMEN

Los sistemas silvopastoriles combinan en un mismo espacio forraje, ganado y madera. En las últimas décadas Uruguay ha consolidado la producción forestal modificando la matriz productiva. Si bien ha existido siempre la presencia de árboles dentro de los establecimientos ganaderos como proveedores de servicios, es posible avanzar en el desarrollo de sistemas silvopastoriles de forma tal que se optimicen los beneficios de esta práctica. Existe poca disponibilidad de herramientas de apoyo a la gestión que consideren los principales componentes en forma conjunta. El objetivo del trabajo consistió en el diseño de un modelo para comprender las principales interacciones que se establecen entre los componentes de un sistema silvopastoril y sus resultados productivos. El modelo desarrolla las interrelaciones entre los componentes cuantificando los resultados intermedios y finales del sistema, como la producción de forraje en campo natural bajo diferentes marcos de plantación; Éstos marcos modifican la productividad individual de sus componentes. Utilizando diagramas UML (Unified Modeling Language), se derivó en el desarrollo de una herramienta que ofrece la simulación de varios escenarios. Se obtienen resultados productivos y financieros proyectando producción de madera, forraje y carne, a lo largo de la rotación, contribuyendo a una planificación más ajustada del uso de los recursos en el predio.

Palabras claves: modelo, simulador, sistema silvopastoril

SIMULATION MODEL FOR SILVOPASTORAL SYSTEMS IN SOUTHERN AND SOUTHEAST REGIONS OF URUGUAY

SUMMARY

Silvopastoral systems combine fodder, livestock and wood in the same space. In recent decades, Uruguay has consolidated forest production by modifying the productive matrix. Although there has always been the presence of trees within the livestock establishments as service providers, it is possible to advance in the development of silvopastoral systems in such a way as to optimize the benefits of this practice. There is little availability of management support tools that consider the main components together. The objective of the work consisted in the design of a model to understand the main interactions that are established between the components of a silvopastoral system and its productive results. The model develops the interrelationships between the components quantifying the intermediate and final results of the system, such as the production of forage in natural field under different planting frames; These frames modify the individual productivity of their components. Using UML (Unified Modeling Language) diagrams, it was derived in the development of a tool that offers the simulation of several scenarios. Productive and financial results are obtained by projecting wood, fodder and meat production, throughout the rotation, contributing to a more adjusted planning of the use of resources in the farm.

Keywords: model, simulator, silvopastoral system

INTRODUCCIÓN

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son una alternativa de producción posible y efectiva dentro de nuestro país; involucra a productores ganaderos – históricamente parte fundamental de la cadena productiva agropecuaria - y a la creciente presencia de plantaciones forestales que abarcan regiones de todo Uruguay.

La forestación puede ser un complemento en los ingresos de los productores ganaderos, los que podrían ser más productivos, rentables y sustentables (1,2). Una de las principales barreras para la adopción de estos sistemas es que la superficie forestada reduce el área para pastoreo (3), si bien los SSP tienen beneficios en el uso del suelo (4). Una ventaja importante de estos sistemas es la disminución del stress térmico del ganado, lo que mejora la productividad de carne y leche (5-7) y aumenta el confort animal (8-10).

En un SSP se reconocen los componentes animal, forestal y herbáceo, debiendo considerarse las interacciones bióticas. Lo afectan factores ambientales como temperatura, precipitaciones, radiación, entre otros, lo que determina el potencial productivo. Una interacción relevante para la productividad es la sombra proyectada por el dosel forestal, que afecta el crecimiento de la pastura por la atenuación de la radiación (11) y a su vez la luz absorbida por el dosel forestal incide en la productividad de madera (12). También es importante considerar el marco de plantación; se encontró (13) que la producción de forraje fue más estable en marcos de filas dobles explicado por la incidencia de la luz, ralentizando la condición de monte cerrado que se alcanza con el cierre de copas (14), por lo que existen densidades de rodal que se ajustan a los objetivos propuestos para la plantación (15).

Una característica propia de estos sistemas es que combinan diferentes ciclos: la producción anual de forraje, ciclos de uno o más años de engorde animal y ciclos forestales de mediano a largo plazo, lo que aumenta la complejidad de su modelación.

Las interacciones de los componentes y los efectos que pueden ser positivos para uno y restar para otro, resultan en que se dispone de pocos modelos que permitan simular los mismos en un período de varios años ^(16,17); en Uruguay se dispone del modelo de simulación Agrícola-Ganadero de FUCREA ⁽¹⁸⁾.

Otros modelos ⁽¹⁹⁾ han desarrollado en la producción ganadera el balance forrajero y la carga animal posible en campo natural ⁽²⁰⁾. Los modelos de proyección forestal para las condiciones de Uruguay son los SAG ^(21,22), que modelan crecimiento y producción de diferentes especies de *Eucalyptus ssp* y *Pinus taeda*.

Todo esto resalta la importancia de contar con un modelo que integre los principales componentes e interacciones, que permita representar un sistema silvopastoril de soporte para el desarrollo de una herramienta de simulación y obtener resultados productivos y económicos

El objetivo del trabajo fue construir un modelo de simulación en silvopastoreo, que permita comprender las interacciones bióticas entre sus componentes y simular la evolución de las interacciones y sus resultados.

MATERIALES Y MÉTODOS

En una primera etapa y en base a los antecedentes se definieron los componentes relevantes del sistema, y sus interacciones. En una segunda etapa se desarrolla el modelo funcional a las interacciones; aplicando diagramas UML. Posteriormente utilizando estudios de caso en 3 establecimientos con 5 marcos de plantación ⁽²³⁾, se estimaron las funciones de área de copa, área sombreada, reducción de superficie de pastoreo, producción forrajera y dotación ganadera. Para la proyección del crecimiento forestal, se emplearon algunas funciones del SAG *Eucalyptus* ⁽²¹⁾, a partir del volumen comercial se estimaron los resultados económico-financieros. En la última etapa, basado en el modelo obtenido se diseñó el simulador SimforGan.

El modelo incorpora un conjunto de supuestos a saber: la producción ganadera se realiza sobre campo natural, la producción forestal tiene como destino la industria de celulosa, los coeficientes utilizados para estimar área de copa son válidos para los marcos de plantación de los casos de estudio; para otros marcos de plantación se utiliza un valor máximo teórico.

Componentes del sistema y principales variables

Un modelo es una abstracción, una representación de una situación que se intenta explicar o analizar. Está formado por objetos que interactúan entre si y posee atributos propios que lo definen pudiendo realizar operaciones o métodos ⁽²⁴⁾. El modelo incorpora las principales variables de interés, descritas en el Cuadro 1, que conforman las entradas y salidas del sistema definiendo los procesos que involucran esas variables para cada componente.

Se cumplen varios ciclos de animales dentro de un turno forestal, una vez alcanzado el peso objetivo, se reemplazan con otro lote, haciendo que el modelo se comporte en forma dinámica ⁽¹⁷⁾. Para modelar las interacciones, se identificaron las principales variables (ver Cuadro 1), que se utilizan como entradas y salidas del sistema.

Cuadro 1.- Variables consideradas en el Sistema.

VARIABLE	UNIDADES	TIPO (I/O)	DESCRIPCIÓN
Ubicación del establecimiento	Longitud, latitud	Input	Determina la región productiva para el cálculo de materia seca según información satelital ⁽²⁷⁾ .
Superficie total	Ha	Input	Superficie del potrero
Superficie efectiva forestada	Ha	Input	Superficie ocupada por la plantación forestal.
Especie forestal	-	Input	Principal especie que conforma la plantación.
Marco de plantación	m	Input	Diseño espacial determinado por la cantidad y distancia entre filas, distancia de los árboles en la fila y callejones (ver).
Densidad de plantas	pl/ha	Output	Plantas por hectárea.
Producción madera	m ³ /ha	Output	Volumen producido en el período en una hectárea en base a SAG ⁽²¹⁾ .
Luz bajo dosel	%	Output	Radiación solar que atraviesa el estrato forestal y llega al tapiz bajo dosel.
Área de superficie sombreada	m ²	Output	Área cubierta por la proyección del dosel.
Duración de las estaciones	días	Input	La cantidad de días afecta las producciones de pasto y las tasas de ganancias.

VARIABLE	UNIDADES	TIPO (I/O)	DESCRIPCIÓN
Categoría animal	-	Input	Vaca, Novillo o Ternero; determina el peso animal y afecta el consumo.
Peso inicial de los animales	kg	Input	Peso de ingreso al sistema.
Peso objetivo de los animales	kg	Output	Peso final alcanzado..
Superficie efectiva de pastoreo	ha	Output	Área disponible para alimentación del ganado.
Producción de pasto según estación	kg/MS/ha	Output	Materia seca producida estacionalmente.
Tasa de ganancia diaria de peso	kg/día	Input	Depende de la estación y condiciones de sombra.
Consumo animal	kg/MS/día	Output	Forraje consumido diariamente.
Carga animal	UG/ha	Output	Unidades ganaderas (UG) soportadas en base a ⁽²⁰⁾ .
Año ingreso de animales al monte	año	Input	Edad de plantación forestal que permite ingresar animales a pastorear.

VARIABLE	UNIDADES	TIPO (I/O)	DESCRIPCIÓN
Producción de carne	kg/ha	Output	Producción de carne (kg) durante el período considerado.
Costos forestales	u\$/ha	Input	Costos de plantación y manejo de producción forestal en diferentes etapas del cultivo.
Costos ganaderos	u\$/ha	Input	Costos de producción y manejo ganadero (Sanidad, Mano de Obra, Reposición, Otros en base a ⁽²⁵⁾).
Ingresos forestales	u\$/ha	Output	Valores de venta de madera en pie.
Ingresos ganaderos	u\$/ha	Output	Valores de venta de ganado en establecimiento..

La variable *Marco de plantación* toma en cuenta la distancia de los árboles en la fila y la presencia de callejones o fajas libres de árboles (Figura 1).

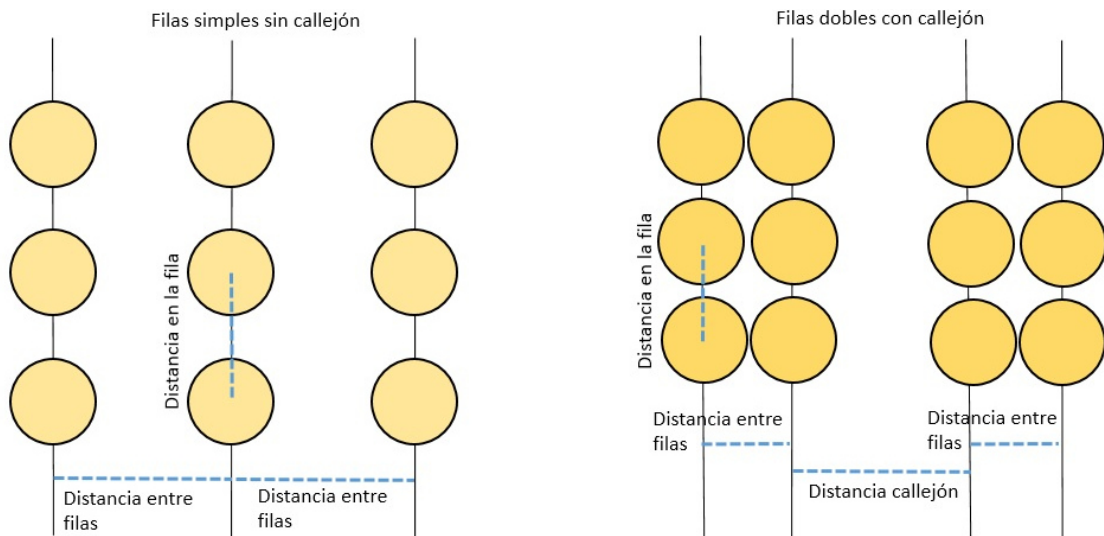


Figura 1: Diferentes marcos de plantación

La variable *Peso objetivo de los animales* está determinado por el consumo diario de materia seca calculado como un porcentaje del peso vivo (2-3 %), la cantidad de días que permanece alimentándose en la estación del año y la tasa de ganancia de peso diaria que varía en forma estacional. Depende del peso inicial y la oferta de forraje disponible La *tasa de ganancia diaria* (kg/día) está condicionada por la interacción sombra y stress térmico; el modelo establece un índice en función del porcentaje de área sombreada y se aplica a la tasa de ganancia diaria animal en el período estival. Para estaciones invernales se establece un índice por protección frente a los vientos; adicionalmente, la *superficie de pastoreo* es el área

considerada, descontado el área efectiva plantada. Finalmente, la variable *área de superficie sombreada* es el área de copa de los árboles proyectada sobre el suelo.

La segunda etapa consistió en desarrollar un modelo predictivo y dinámico, utilizando el lenguaje UML ⁽²⁶⁾ que permite interpretar la realidad en un formato gráfico a través de diagramas, que facilitan la implementación del código de programación ⁽²⁴⁾. El UML utiliza varios tipos de diagramas principalmente el diagrama de clase que representa funciones, colaboraciones, restricciones e interacciones entre los elementos del sistema (Figura 2.)

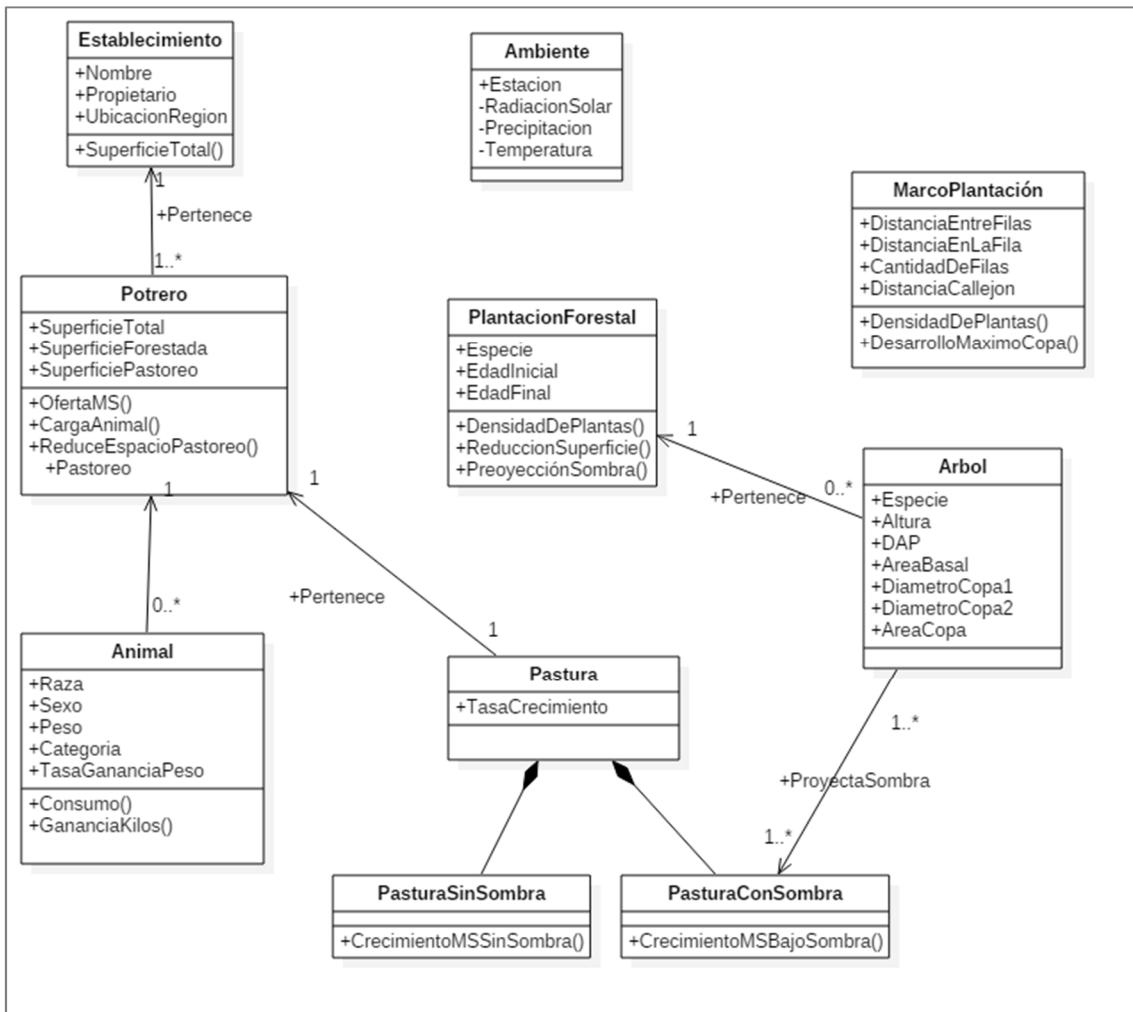


Figura 2: Diagrama de clases del modelo.

Los casos de estudio se sitúan en las eco regiones ⁽²⁷⁾: Centro sur, Colinas y lomas del este y Sierras del este. El modelo emplea como valores por defecto los resultados obtenidos en los estudios de caso y adicionalmente información de PPNA ⁽²⁸⁾ .

Para las relaciones establecidas entre el módulo pastura y el módulo animal se sugiere utilizar las ganancias de peso del modelo Megane ⁽²⁰⁾, siendo éste un input que puede ser modificado por el usuario. Estas explican la relación de oferta y demanda y permiten establecer una presupuestación forrajera dinámica entre la oferta de forraje y la evolución de peso animal.

La producción varía a lo largo de los años debido al clima y tipo de suelo, se utiliza entonces el concepto de carga segura considerando la variación de producción de forraje en las estaciones climáticas ⁽²⁹⁾.

Los árboles proyectan sombra, afectando el tapiz herbáceo por la reducción de luz solar ⁽⁹⁾, disminuyendo la tasa de crecimiento de la pastura. La expansión del área de copa dependiente del marco de plantación afecta también la superficie disponible para pastoreo.

Funciones definidas-ajustadas en base a los casos de estudio

Superficie efectiva de pastoreo (ha): es función de la densidad de árboles y el marco de plantación (Cuadro 2).

Cuadro 2. Marcos de plantación, densidad y superficie disponible para pastoreo, para los casos de estudio.

Caso de estudio	Marco	Diseño de plantación (m)	Densidad inicial (árboles/ha)	Superficie ocupada (m ² /ha)	Superficie disponible
					para pastoreo (%)

Maldonado	Marco 1 y 2	6 x 1,5	1.100	4.400	56
Rocha	Marco 3	(2 x 2) + 8	1.000	4.000	60
Rocha	Marco 4	(3,5 x 2,27)	1.250	5.000	50
Florida	Marco 5	6 x 3	555	2.200	78
Florida	Marco 6	(3 x 2) + 15	555	2.200	78

Área de superficie sombreada (%): Para la proyección de la copa se inicialmente el trabajo de Nutto ⁽³⁰⁾:

$$DC = e^{0.223 - 0.006 * Edad + 0.0417 * DAP - 0.000089 * DAP^2}$$

A partir del método stepwise se estima el área de copa (Cuadro 3); se selecciona aquella función con mejor valor de r² ajustado obteniendo la nueva ecuación (Ecuación 2) que se utiliza en este trabajo para estimar el diámetro de copa.

Cuadro 3: Regresiones lineales

variable	descripción	R ² ajustado
AreaDeCopa, Edad, AB, AMD	Utiliza área basal y altura	0.5723
AreaDeCopa, Edad, AB_i, Ht_i,	área basal y altura individuales	0.7185
AreaDeCopa, Edad, AB_i, Ht_i, Marco, N	agrega marco de plantación y densidad	0.7628

A partir de estos resultados se proyecta la evolución del tamaño de copa, área y la superficie de suelo afectada por la sombra.

Superado el área máxima de copa (ACmax), existirá solapamiento, por lo que el área de copa máxima es:

$$ACmax = \pi * r1 * r2$$

Siendo r_1 y r_2 la distancia media entre árboles en la fila y entre filas, respectivamente.

Cantidad de luz que llega a la superficie (% luz bajo dosel): es la diferencia entre la radiación solar fotosintéticamente activa (PAR) medida fuera del bosque (PAR_A) y la radiación interceptada (PAR_B). Depende del marco de plantación, la edad del bosque y la especie forestal ⁽³¹⁾.

$$\text{Cantidad de luz interceptada} = 1 - (\text{PAR}_B / \text{PAR}_A)$$

Funcionamiento del simulador

SimForGan se divide en módulos relacionados a través de interacciones.

Módulo forestal

El simulador parte del marco de plantación; el número de filas, distancias entre filas, árboles y callejones. Para el módulo forestal se ingresa ubicación del establecimiento, superficie, superficie forestada, edad de plantación, edad de cosecha y fecha de inicio de la proyección. Luego se requiere de datos iniciales de DAP, AMD, especie y población inicial. Se proyecta el crecimiento para esa población ⁽³²⁾ que calcula anualmente las variables altura, DAP, área basal y volumen.

Se calcula la superficie sombreada, porcentaje de luz que llega bajo dosel y área de reducción anual (%) de la superficie de pastoreo.

Módulo pastura

La principal variable es la oferta de forraje que determina la carga ganadera en Unidades Ganaderas (UG); en base a la producción de materia seca para cada estación, la cantidad de días y la superficie de pastoreo. Es afectada por el área sombreada y la cantidad de luz que llega al tapiz.

La producción de forraje es un input del sistema y puede ser ingresado si se conoce ese dato, de lo contrario se considera el valor de PPNA correspondiente a la región que se desea simular. Este valor se obtiene del proyecto "Observatorio Forrajero" (28). El modelo ajusta el valor PPNA asumiendo que marcos de plantación con callejones superiores a los 7 metros, incrementan la producción de forraje en un 42 % durante el primer tercio de la plantación. Adicionalmente, en marcos de plantación sin callejón disminuye la producción en 12 % a partir del segundo tercio del cultivo. El forraje excedente puede transferirse a la siguiente estación.

Módulo animal

Está determinado por la variable Carga UG. El interés es obtener el mayor rendimiento dependiendo del consumo animal y oferta forrajera.

La oferta y demanda de forraje tiene estima dos situaciones: a) la carga máxima de animales que puede soportar el área forestada y b) en el caso que se ingresa la cantidad de animales, el se informan posibles excedentes y la carga adecuada por estación y edad forestal.

Alcanzado el peso objetivo, los animales se retiran del sistema y se procede a ingresar un lote con las mismas características. La oferta de forraje no será la misma a lo largo de los años, por lo que el tiempo para que el nuevo rodeo alcance el peso objetivo será mayor. Finalmente, se comparan estos resultados con un sistema sin forestación.

Módulo económico

Se incluyen los costos de implantación y mantenimiento de cultivo forestal, costos del manejo ganadero, así como los ingresos por venta de carne y madera en el período. Se obtiene como resultado el valor actual neto y el margen bruto forestal para escenarios mínimo, medio y máximo en cuanto a la valorización de la madera.

RESULTADOS

Modelo de silvopastoreo

En la Figura 3 se representan los principales componentes del modelo y su funcionamiento a través de las interacciones que afectan la productividad del sistema.

Las variables del componente forestal son: **la especie forestal y el marco de plantación**, éste último define en forma directa **la densidad de plantas** y a través del desarrollo de la copa, que también depende de la especie forestal, se proyecta **la superficie de sombra y la luz que llega bajo dosel**. La **superficie forestada**, el **índice de sitio** y el marco de plantación inciden en **la producción de madera (m³/ha)**.

Las variables del componente forrajero son: **la superficie para pastoreo, la producción de forraje y el forraje excedente** como los principales elementos de **la oferta de forraje** para las condiciones de campo natural consideradas en el modelo. La producción de forraje se ve afectada por la superficie disponible y por la incidencia de la sombra. Finalmente, la oferta de forraje en relación a la demanda de consumo determina la carga animal que el sistema puede albergar.

Las variables del componente animal son: **la categoría animal** que establece el peso inicial y determina **el consumo diario** que depende del **balance entre oferta y demanda** de forraje; el cual incide directamente sobre **el ajuste de carga** soportada. **La tasa de ganancia diaria** es afectada por **el stress térmico** que influye sobre la distribución de la energía para el mantenimiento corporal de la temperatura. La presencia de sombra disminuye el stress térmico en estaciones de máximas temperaturas y radiación solar, así como la presencia de árboles reduce los efectos de los vientos en momentos de bajas temperaturas disminuyendo las pérdidas energéticas favoreciendo **la ganancia de peso**. En función de **las cabezas del rodeo** y la ganancia de peso de los animales se conoce el resultado de **producción de carne (kg/ha)**.

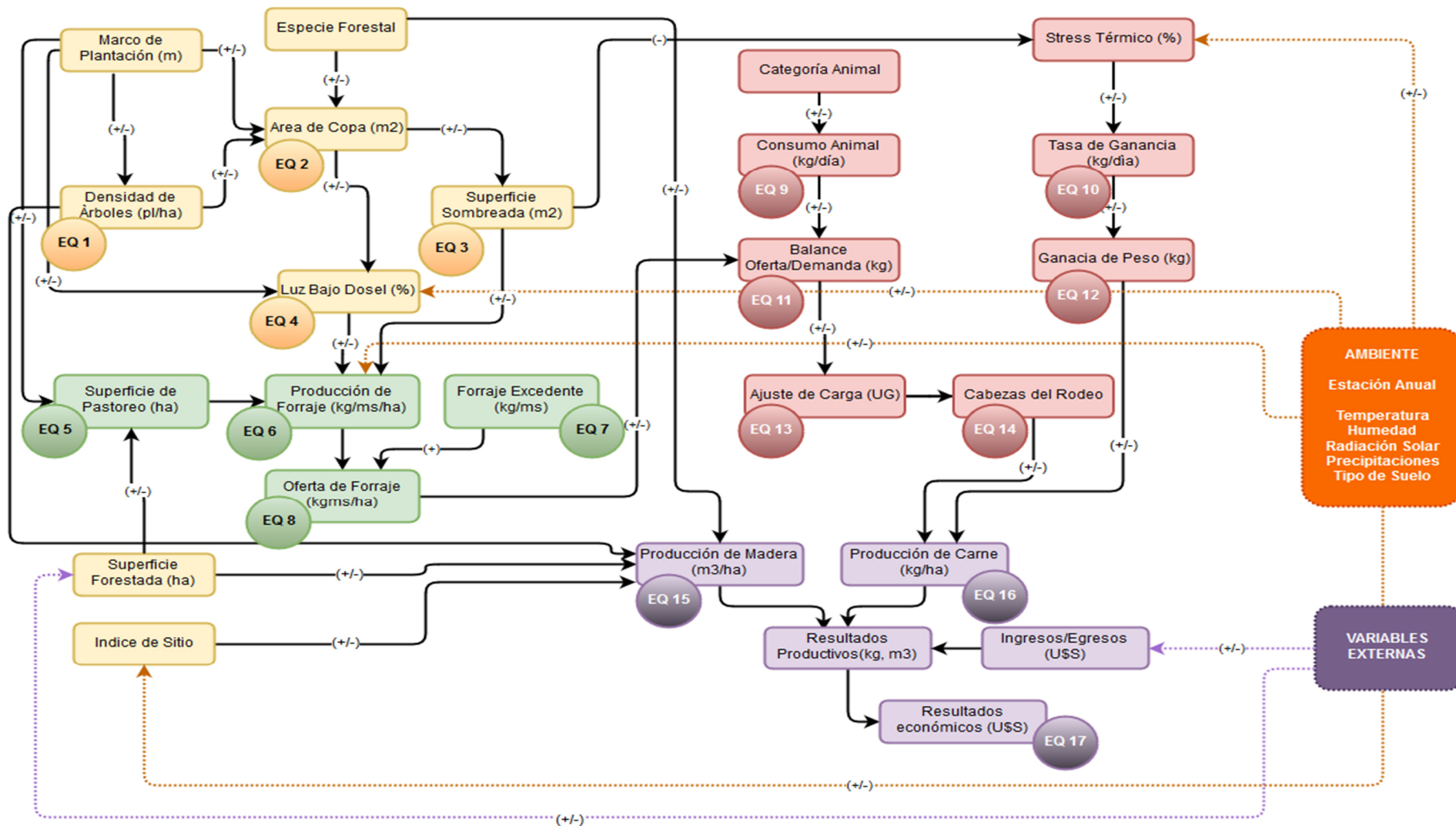


Figura 3.- Modelo de Silvopastoreo, principales componentes e interacciones

Finalmente la producción de madera en forma conjunta con la producción de carne determina **los resultados productivos** del sistema y estos valores unidos a variables **de costos y egresos** permiten analizar **los resultados económicos** financieros. En estos resultados finales, inciden variables externas al sistema como son los valores de mercado de insumos y productos los que deberán ser definidos para cada situación modelada. También inciden las normativas y regulaciones legales con respecto a las políticas forestales.

En la Figura 3 se indican las ecuaciones matemáticas utilizadas en el modelo, las que se detallan a continuación:

EQ1 Densidad de plantas (pl/ha): se calcula utilizando la distancia de las plantas en la fila (d_1), la distancia entre filas (d_2), la distancia del callejón (d_3) y la cantidad de filas.

$$N = \left(\frac{100}{d_1}\right) * \frac{100}{(d_2 + d_3)} * Filas$$

[Ecuación 1]

EQ2 Área de copa (m^2): es función del marco de plantación, la edad, el área basal individual, la altura total y la densidad de plantas.

$$AC = \alpha MP + Edad * 0.0582528 + AB * 284.0114 + H_t * 0,083338 + N * -0.009068 + 3,954487$$

[Ecuación 2]

Donde **MP** es una variable categórica que identifica el Marco de Plantación, pudiendo tomar valores de 1 a 5, α es un parámetro del marco de plantación que puede tomar valores entre -2,448252 a -4.333977, **Edad** representa la edad de la plantación (meses), **AB** es el Área Basal individual ($m^2\text{arb}^{-1}$), **H_t** es la altura individual (m), y **N** es la densidad de la plantación (arb/ha).

EQ3 Superficie sombreada (m²/ha): es la sumatoria de áreas de copa de población, y se calcula como el Área de copa (AC) por el total de plantas (N).

$$Superficie\ sombreada = \sum_{i=0}^N AC$$

[Ecuación 3]

EQ4 Luz bajo dosel (%): se calcula como el cociente entre la radiación bajo dosel (PAR_B) y la radiación en área libre de forestación (PAR_A).

$$LuzBajoDosel = \frac{PAR_B}{PAR_A}$$

[Ecuación 4]

EQ5 Superficie de pastoreo (ha): es la superficie forestada (SF) menos el área de influencia (AI) ocupada por los árboles (N) que provoca una reducción en los primeros cinco años de la plantación debido al desarrollo de la misma como se mencionara anteriormente. Deben considerarse las áreas libres correspondientes a callejones, cortafuegos y caminos.

$$Superficie\ Pastoreo = SF * N * AI$$

[Ecuación 5]

EQ6 Producción de forraje (kg/ha/periodo): se utiliza información histórica para cada estación de crecimiento en campo natural sin forestación y se ajusta de acuerdo a la duración en días de cada estación comprendida en el período analizado (t). Para los marcos de plantación con callejones mayores a 7 metros, el modelo ajusta en un 42% más de forraje para estaciones de crecimiento (EfectoMarco) y en el caso de marcos sin callejones con mayor densidad, el modelo reduce en 12% la producción de forraje (EfectoMarco).

$$\text{Producción de Forraje} = \text{Valor de tabla} * \text{EfectoMarco} * t$$

[Ecuación 6]

EQ7 Forraje excedente (kg/ha): es la diferencia entre la oferta (OF) y el forraje consumido (FC) de la estación precedente.

$$\text{ForrajeExcedente} = OF - FC$$

[Ecuación 7]

EQ8 Oferta de forraje (kg/ha/periodo): La producción total de forraje (PF) se ajusta de acuerdo a la superficie disponible para pastoreo (SP) sumando el forraje excedente (FE). Se calcula para cada estación.

$$\text{Oferta de Forraje} = (PF * SP) + FE$$

[Ecuación 8]

EQ9 Consumo animal (kg/MS/día): se considera un valor teórico para el consumo de entre 2 a 3 % del peso vivo del animal (PV).

$$\text{Consumo Animal} = \%PV$$

[Ecuación 9]

EQ10 Tasa de ganancia (kg/día): valor teórico estacional, ajustando un 10 % para los sistemas con sombra.

$$\text{TGD(ajustada)} = \text{TGD} * \text{ajuste} (\%)$$

[Ecuación 10]

EQ11 Balance oferta/demanda: diferencia entre la oferta de forraje (OF) y el consumo animal (CA) para la categoría seleccionada. Este cálculo se realiza para cada estación debido a que las producciones de forraje varían estacionalmente al igual que el peso en los animales.

$$Balance = OF - CA$$

[Ecuación 11]

EQ12 Ganancia de peso (kg): es la tasa de ganancia diaria ($TGD_{ajustada}$) por los días de permanencia del animal en la estación (t). Cuando finaliza una estación se suma esa ganancia al peso animal anterior (P_0) y se determina el nuevo valor (P_1) para la estación siguiente.

$$Peso Animal = P_0 + (TGD(ajustada) * t)$$

[Ecuación 12]

EQ13 Ajuste de carga (UG): en base al concepto de “carga segura” (20) se calcula como el cociente entre la oferta de forraje y el consumo de un animal de 380 kg (1UG):

$$UG = \frac{Oferta\ de\ forraje}{(380 * \%PV)}$$

[Ecuación 11]

EQ14 Cabezas totales: cociente entre la oferta total de forraje (para la duración de la estación y para toda la superficie de pastoreo) y la demanda de consumo animal de acuerdo al peso al ingreso de la estación.

$$Cabezas\ totales = \frac{OF}{CA}$$

[Ecuación 14]

EQ15 : Producción de madera (m³): volumen de madera utilizando la ecuación propuesta por R. Methol (32):

$$VT = \left[-0.7876 + 0.9873 \ln(G * AMD) - 0.0761 \left(\frac{AMD}{Dt} \right) - 0.00997 * Z7 \right]$$

[Ecuación 15]

EQ16: Producción de carne (kg): total de kilos producidos en el establecimiento durante el período proyectado. Se calcula como la diferencia de los pesos de ingreso (P0) y peso final (P1).

$$KilosTotales = \sum P1 - P0$$

[Ecuación 16]

EQ17: Resultados económicos: para determinar los resultados se utilizan el Margen Bruto Ganadero y Margen Bruto Forestal.

$$MBF = VES . i$$

[Ecuación 17]

$$VAN = \frac{\sum_{n=0}^t FFNe_n}{(1 + i)^n}$$

[Ecuación 18]

Donde, VAN es el Valor Actual Neto, FFNe_n es el Flujo de Fondos Neto anual calculado como la diferencia entre los ingresos y los egresos en el año *n*, *i* es la tasa de interés anual utilizada como costo de oportunidad, *n* es el año del flujo actualizado que puede ir desde el momento 0 hasta la cosecha en el año *t*.

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

[Ecuación 19]

Donde VES es el Valor esperado del suelo que representa la actualización de las infinitas rentas forestales periódicas ⁽³³⁾. Este valor permite calcular la renta forestal anual o margen bruto forestal (MBF) como se muestra en la [Ecuación 17].

Herramienta informática SimForGan

Basados en el modelo de referencia, se construyó el simulador forestal ganadero (SimForGan); una herramienta informática para la realización de proyecciones de crecimiento de forraje, madera y carga animal.

Se utilizó lenguaje de programación .Net (Framework 3.5) pudiendo ser escrito para otros lenguajes y soporta diferentes manejadores de bases de datos. El mismo se encuentra disponible en www.silvopastoreouy.com.

Prueba del Simulador

Se realizó una prueba del simulador para los marcos de plantación estudiados considerando 100 hectáreas forestadas y animales de 240 kg de peso inicial y 390 kg de peso final para todos los casos, observando las variaciones en kilos de carne producida y volumen en metros cúbicos obtenidos en forma anual. En la Figura 4 se observa que marcos con callejones y menor densidad de plantas permiten una mayor producción de carne mientras que marcos de plantación sin callejones y con mayor densidad favorecen la producción de madera (Figura 5).

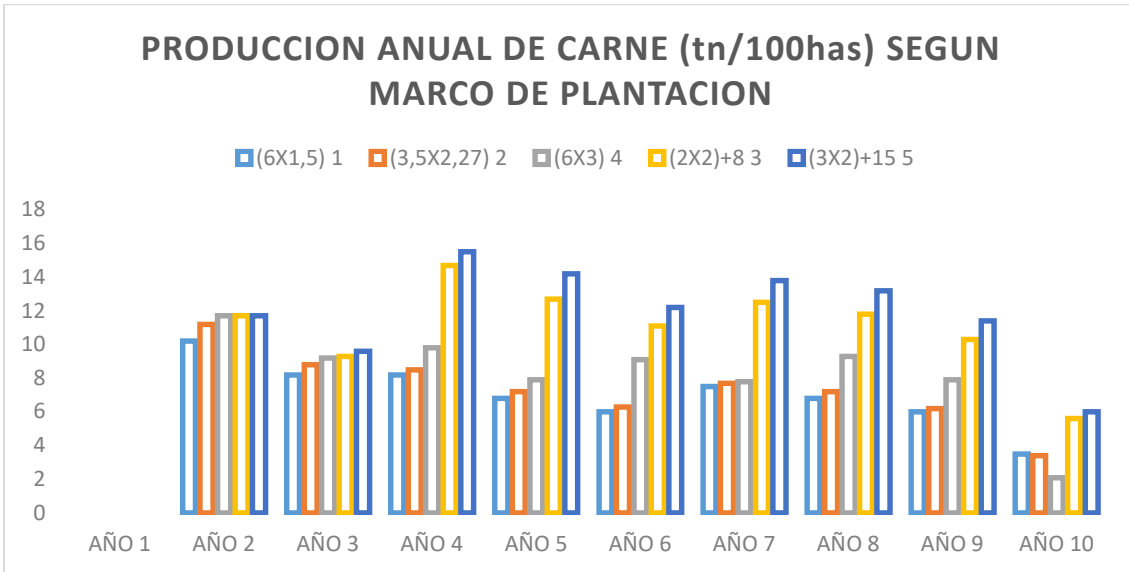


Figura 4: Producción anual de carne (ton/100ha) según marco de plantación.

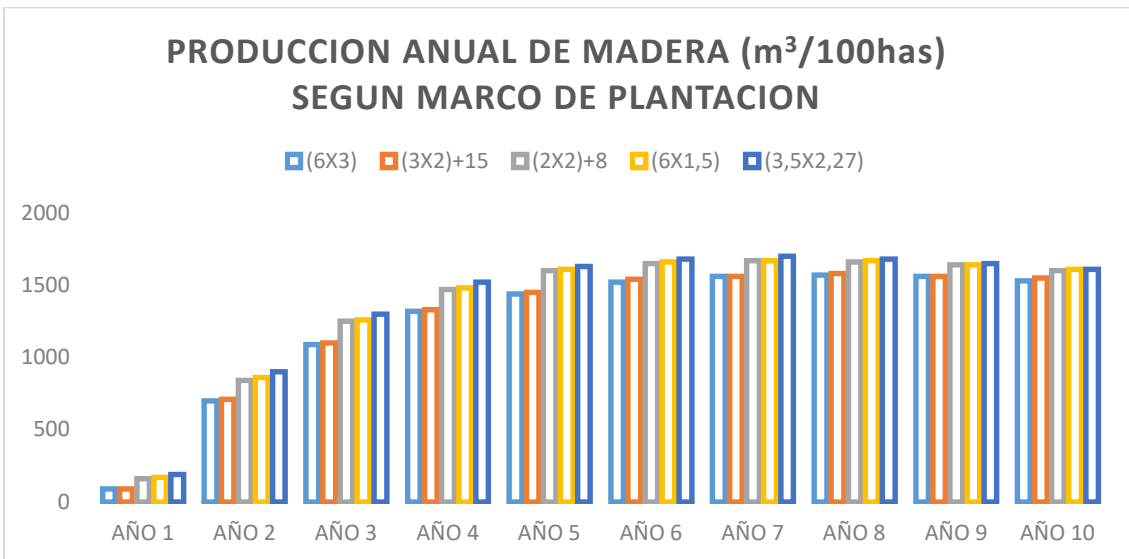


Figura 5: Producción anual de madera (m³/100ha) según marco de plantación.

Como se muestra con los resultados, el marco de plantación incide directamente sobre los objetivos productivos planteados para el establecimiento.

DISCUSIÓN

El modelo incorpora los resultados de investigación nacional y regional para estos sistemas en algunos aspectos relevantes como son el confort animal, la luz incidente y la producción de forraje y la producción de madera de acuerdo a los marcos de plantación.

Es posible encontrar combinaciones que posibiliten sistemas de mayor productividad conjunta ^(1,34). A partir de la modelación se puede obtener sistemas que presentan mayor área de pastoreo y producción de madera con respecto a sistemas de forestación convencional; así los sistemas con marcos de plantación que incluyen callejones, disponen mayor área libre para el ganado y mayor producción de forraje como los casos analizados 3 y 5.

En el presente trabajo se incorpora la superficie sombreada en las proyecciones del sistema lo que permitiría disminuir el estrés térmico ^(5,29) aumentando la ganancia de peso en el ganado de carne; esto está considerado en el modelo a través de una mayor tasa de ganancia de peso diario, para los animales bajo monte. Si bien a partir de los datos de campo no se puede obtener un indicador de tasa de ganancia diaria bajo forestación ⁽⁵⁻⁷⁾, el modelo incorpora esta variable como un elemento a tener en cuenta.

La luz bajo dosel es una variable que determina la producción de forraje ^(14,31) y el área de copa de los árboles incide en la captación de la luz. En este trabajo se incorporan los resultados de luz que llega al tapiz herbáceo en los estudios de caso ⁽²³⁾. Esta producción es gradualmente menor de acuerdo a la superficie sombreada, variable a su vez relacionada a la densidad forestal ^(15,35). Asimismo, se incorpora las interacciones de las variables que afectan el área de copa como la edad y el marco de plantación. Comparando el caso 3 con el caso 5 (Cuadro 2), el primero presenta prácticamente una densidad mayor en 50 % (1.000 pl/ha vs. 555 pl/ha) con una reducción

de la superficie de pastoreo del 24%. Si se considera que el principal objetivo es la producción de carne, esto parecería ser una buena combinación de producción de madera y forraje.

En los casos de estudio 4 y 5 se utilizan dos marcos de plantación diferentes con la misma densidad de plantas /ha (555 pl/ha) y se obtiene la misma superficie de pastoreo del 78 %, sin embargo el caso 5 con marco con callejones presenta solo un 26% de sombra, frente al 78 % del caso 4 de marco sin callejones.

El caso 2 presenta la menor área libre para pastoreo (50%), la cual está en un 78 % sombreada. Por otro lado la densidad es la más alta, correspondiendo a situaciones en donde lo que se prioriza es la producción de madera.

En los resultados del presente trabajo al igual que en aquellos casos en donde existen callejones (13), la cantidad de luz que llega al tapiz es mayor, con mayor producción de forraje, en comparación a los marcos de plantación convencionales o sin callejones. Esto pudo observarse en los casos de estudio donde fueron comparados dos marcos de plantación diferentes con alta densidad de plantas en los cuales uno de ellos incluía callejones y el otro no como es el caso 2 y 3. A pesar de que los casos 4 y 5 no son directamente comparables, ya que tienen igual densidad pero diferente marco de plantación, edad y especie forestal, si se proyecta el área sombreada a los 8 años, los resultados arrojan que el caso 4 presenta un 64 % de área sombreada, mientras que en el caso 5 se obtiene un 22 % de área sombreada. Esto se explica por el marco de plantación y una mayor área de copa individual para el caso 4, lo que se considera una buena aproximación a la realidad de la plantación.

Si bien el modelo trabaja con rotaciones forestales cortas, la potencialidad de estos sistemas es muy alta: existe la posibilidad de proyectar rotaciones de mayor duración y con un manejo silvicultural más complejo, lo que permitiría obtener productos de diámetros mayores con destino de aserrado o debobinado. Esto podría mejorar el retorno financiero de estos sistemas. Las razones de lo anteriormente comentado en parte se deben a que la incorporación de áreas

forestadas en establecimientos ganaderos es reciente en el tiempo, no existiendo la cultura de realizar inversiones de largo plazo en este rubro.

En Uruguay las rotaciones empleadas por parte de los productores ganaderos, tienen como principal objetivo la obtención de madera para pulpa o biomasa. Según datos del año 2018 ⁽³⁶⁾, se destina 10,2 millones de metros cúbicos para la fabricación de celulosa, lo que representa el 64 % de la madera extraída, sobre un total de 15,9 millones de metros cúbicos cosechados.

En estos sistemas, el componente forestal es el más estable en el tiempo por lo que la definición inicial del marco de plantación, junto a otras variables locales como la orientación de la plantación, etc. es un aspecto que condiciona la producción de forraje a lo largo del tiempo, la carga animal del sistema y la producción de madera ^(13,15).

Considerando el volumen de madera y los kilos de carne como los principales resultados productivos del sistema, se encontró que las principales interacciones entre los componentes son: la superficie destinada a la forestación y el marco de plantación utilizado, que determina la densidad de plantas y la superficie libre para pastoreo. En condiciones de mayor densidad de plantas, la sombra proyectada por las copas de los árboles reduce la luz que llega bajo dosel afectando la producción de forraje lo que disminuye la oferta de pasto para el consumo animal, por lo que se reduce la carga animal soportada. Para marcos de plantación que incluyan callejones y una menor densidad de plantas, la superficie de pastoreo afectada por sombra es menor ⁽³⁴⁾. En zonas templadas del sur de Brasil en estaciones de otoño e invierno, pasturas tropicales como *Brachiara* spp., *Panicum* spp. y *Cynodon* spp., mantuvieron su productividad ya que la masa forestal protege al tapiz y mantiene la humedad ⁽³⁴⁾ lo que resulta en una mejora de producción de pasto. La interacción entre el componente pastura y el componente animal es a través del balance oferta de forraje y demanda para consumo que tiene como resultado el ajuste de carga soportada.

Los factores ambientales presentan interacciones con los demás componentes del sistema; la estación del año afecta la producción estacional anual de forraje presentando máximos de producción en condiciones estivales y mínimos de producción en condiciones invernales. La estacionalidad afecta la tasa de ganancia de kilos de los animales y los niveles de consumo en la relación a la duración de la luz solar y a las temperaturas. En condiciones de alta temperatura y humedad la cantidad de alimento consumido a través del tamaño del bocado y la frecuencia y duración del tiempo de pastoreo pueden disminuir ⁽⁶⁾. El stress térmico afecta el balance homeostático distribuyendo parte de la energía obtenida del alimento al mantenimiento de la temperatura corporal; la sombra y el abrigo permiten mejorar las condiciones de confort y reducen las pérdidas de energía de mantenimiento ⁽¹⁰⁾. La estación del año es fuente de variación de la inclinación y duración de la radiación solar recibida por el tapiz forrajero y por la copa de los árboles afectando la radiación fotosintéticamente activa recibida ⁽³¹⁾.

El tipo de suelo de acuerdo a sus condiciones de aptitud forestal puede limitar o potenciar el desarrollo de la especie forestal utilizada, entre otros aspectos.

El modelo desarrollado permite proyectar el balance de forraje y consumo como el simulador Megane ⁽²⁰⁾, agregando el componente forestal, el efecto de la sombra y la consecuencia sobre el ganado. El SAG forestal ⁽³⁷⁾ fue creado para plantaciones en marcos convencionales, sin considerar el efecto del marco de plantación.

Los resultados de producción de madera son una aproximación de estos sistemas y para estas especies, por lo que es la mejor referencia disponible para proyectar. El simulador desarrollado integra los dos modelos en forma conjunta, con las interacciones entre las producciones forestal y ganadera.

CONCLUSIONES

El modelo planteado es integrador de los sistemas involucrados y permite representar las principales interacciones entre los componentes forestación, ganadería y forraje con el ambiente, obteniendo resultados productivos y económicos, considerando las interacciones de sus componentes. En base al análisis de los estudios de caso se sintetiza esas interacciones traducidas en la producción de forraje bajo dosel con una carga animal ajustada.

Asimismo, dicho modelo permite anticipar los momentos de déficit de forraje para los animales y planificar los ajustes de carga. En base a la oferta y demanda permite estimar la carga máxima animal (UG) soportada para cada estación.

Por otro lado, el modelo permite simular los cambios en la superficie disponible de pastoreo y en la producción de forraje a través de la interacción con el marco de plantación y la densidad, así como el área de copa y la sombra proyectada, los cuales son sintetizados en el modelo. Se verifica la importancia del factor marco de plantación en la producción de los componentes animal, forestal y pastura.

Se encontraron distintos sistemas que permiten priorizar diferentes objetivos productivos, Los diferentes marcos de plantación cambian la productividad de los componentes (animal, forestal, pastura) individualmente. En un futuro se deberían disponer de un simulador de producción de madera incorporando el efecto de diferentes marcos de plantación.

El software creado es una primera herramienta que puede ser enriquecida incluyendo nuevas variables en el sistema o profundizando las ya presentadas. Este fue creado de forma tal que pueda explicar las interacciones bajo efectos forestales diferentes, con distintos marcos de plantación de manera que pueda servir como una herramienta de comprensión de las interacciones y de la predicción de los resultados de sus variables productivas al incluir forestación

en establecimientos ganaderos. Para robustecer el modelo sería recomendable contar con información sobre el comportamiento de otras variables como raza y categorías animales; composición del tapiz forrajero incluyendo especies herbáceas con tolerancia a la sombra y especies forestales con distintos destinos comerciales. Por último, se debería ampliar las regiones del país para incorporar nuevos escenarios.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta P, Pastorini V. Integrar para mitigar efectos del cambio climático y producir sustentablemente: ganadería – forestación. Seminario Técnico Diversificación y forestación a pequeña escala en Uruguay. INIA. Tacuarembó. 2010;57. Disponible en: <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos compartidos/14432111110101142.pdf>
2. Peri PL. Silvopastoral Systems in Southern South America [Internet]. Vol. 11. 2016. Disponible en: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-24109-8>
3. Boscana M, Varela E. Factores que influyen en la incorporación del rubro forestal en predios agropecuarios de los departamentos de Florida, Flores y Durazno. 2011. Tesis Ingeniero Agrónomo, Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 121p.
4. Ortiz Torres C, Gómez Díaz JD, Domínguez Álvarez FA, Villanueva Morales A. Influencia de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y *Opuntia ficus-indica* L. Mill en las propiedades físicas y químicas del suelo. *Revista Terra Latinoamericana*. 2018;36(3):275-85.
5. Simeone A, Beretta V, Caorsi C. Forestación y Ganadería: cuantificando el efecto de la sombra y el abrigo de los montes sobre la performance animal. Propuestas tecnológicas en ganadería para un país agrícola, ganadero y forestal. 16ª Jornada Anual de la Unidad de Producción Intensiva de Carne (UPIC). 24-27.
6. Rovira P. Efecto de la sombra artificial en el engorde de novillos durante los meses de verano. 2002; En: INIA Treinta y tres, jornada anual de producción animal resultados experimentales. Treinta y tres. Serie Actividades de Difusión N° 294, 79-95.
7. West JW. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. *Journal Dairy Science* [Internet]. 2003;86(6):2131-44. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X)

8. Munka C, Bussoni A, Rachetti M, Boscana M, Gonzalez-Tálice J, Gonzalez A. Integración de la forestación en predios ganaderos y lecheros familiares: desafíos, potencialidades y herramientas para tomar decisiones. 2017; Avances del proyecto N°50. [Sin publicar].
9. Munka C. Microclima en sistemas silvopastoriles. 1er Seminario en sistemas silvopastoriles. 2017;63-8.
10. Saravia C, Astigarraga L, Van Lier E, Bentancur O. Impacto de las olas de calor en vacas lecheras en Salto (Uruguay). *Agrociencia Uruguay*. 2011;15(1):93-102.
11. Paruelo JM, Golluscio R. Range assessment using remote sensing in Northwest Patagonia. *J Range Manag*. 1994;408-502.
12. Binkley D, Campoe OC, Gspatl M, Forrester DI. Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. *For Ecol Manage* [Internet]. 2013;288:5-13. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.002>
13. Lacorte SM, Barth SR, Colcombet L, Crechi EH, Esquivel JI, Fassola H, et al. Silvopastoral Systems Developed in Misiones and Corrientes, Argentina. *Silvopastoral Syst South South Am*. 2016;10-39.
14. Carranza CA, Ledesma M. Bases para el manejo de sistemas silvopastoriles. En: XIII Congreso Forestal Mundial [Internet]. 2009. Disponible en: <http://ecaths1.s3.amazonaws.com/forrajicultura/ManejoSistemasSilvopastoriles.pdf>
15. Gallo L. Comparación práctica de diferentes índices de densidad. Costa Rica: CATIE; 1998. 23 p.
16. Balandier P, Bergez JE, Etienne M. Use of the management-oriented silvopastoral model ALWAYS: Calibration and evaluation. *Agrofor Syst*. 2003;57(3):159-71.
17. Etienne M, Rapey H. Simulating integration of agroforestry into livestock farmers' projects

- in France [Internet]. Vol. 43, Agroforestry Systems. 1998 [citado 6 de julio de 2015]. p. 257-72. Disponible en: http://download.springer.com.proxy.timbo.org.uy:443/static/pdf/178/chp%253A10.1007%252F978-94-017-0679-7_16.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Fchapter%2F10.1007%2F978-94-017-0679-7_16&token2=exp=1436225491~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F178%2Fchp%25253
18. Simeone A, Buffa JL, Beretta V. Ganadería, agricultura y forestación: cuantificando las sinergias entre rubros para un crecimiento armónico. Propuestas tecnológicas en ganadería para un país agrícola, ganadero y forestal. 16ª Jornada Anual de la Unidad de Producción Intensiva de Carne (UPIC). 2014;30-7.
 19. AgResearch. Farmax your advantage [Internet]. 1993 [citado 1 de mayo de 2019]. Disponible en: <http://www.farmax.co.nz>
 20. Dieguez Cameroni F, Bommel P, Corral J, Bartaburu D, Pereira M, Montes E, et al. Modelling of an Extensive Cattle Breeding Farm on Basaltic Soils. 2012;120-30.
 21. Methol R. Sistema de Apoyo a la Gestión de Plantaciones de Eucalyptus globulus. 2006.
 22. Hirigoyen A, Varela F. Gestión en plantaciones de Eucalyptus globulus. Actualización 2014. Rev Inia. 2014;38:43-5.
 23. Bussoni A, Boscana M, Varela F, Llanos E, Picasso V, Cubbage F, et al. Producción ganadera y forestal: Análisis de sistemas de producción integrados. Inia (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria), editor. FPTA-INIA_N°70. 2019;144.
 24. Corral J. Notas sobre UML-Material de apoyo para el curso de UML. 2000. [Sin publicar].
 25. Molina Riccetto C. 17 años monitoreo empresas ganaderas, resultados del ejercicio 2017-

- 2018 y evolución desde 2001. Montevideo; 2018.
26. Fowler M. UML Distilled third edition, a brief guided to the standard object modeling language. 2003.
 27. Brazeiro A, Panario D, Soutullo A. Clasificación y delimitación de las eco-regiones del Uruguay [Internet]. 2012. Disponible en: <http://vidasilvestre.org.uy/wp-content/uploads/2012/05/Ecorregiones.pdf>
 28. UBA-LART. Laboratorio de análisis regional y teledetección [Internet]. 2019 [citado 8 de marzo de 2019]. Disponible en: www.lart.agro.uba.ar
 29. Saravia A, César D, Montes E, Taranto V, Pereira M. Manejo de rodeo de cría sobre campo natural. 2011. 14 p.
 30. Nutto L, Touza Vazquez MC. Modelos de producción de madera sólida en plantaciones de eucalyptus globulus de Galicia. Boletín del CIDEU 2. 2006;37-50.
 31. Duursma RA, Mäkelä A. Summary models for light interception and light-use efficiency of non-homogeneous canopies. Tree Physiol [Internet]. 2007;27(6):859-70. Disponible en: <http://treephys.oxfordjournals.org/content/27/6/859.abstract>
 32. Methol R. SAG grandis: Sistema de apoyo a la gestión de plantaciones de Eucalyptus grandis. INIA, editor. Rev Inia. Serie Técn. 2003;42.
 33. Diaz-Balteiro L. Turno forestal económicamente óptimo, una revisión. Revista española de economía agraria. 1997;181-224.
 34. Costa Varella A, Barro RS, Silva JLS da, Porfirio-da-Silva V, de Saibro JC. Silvopastoral Systems in the Cold Zone of Brazil. En: Peri PL, Varella AC, Dube F, editores. Silvopastoral System in Southern South America. Springer; 2016. p. 231-55.
 35. Gallo L. Crecimiento de Panicum maximum bajo Pinus caribea: relaciones dosel pradera.

Turrialba, Costa Rica; 1998.

36. Boscana M, Boragno L. Actualidad del sector forestal. En: MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca), editor. MGAP Anuario 2018 Análisis sectorial y cadenas productivas [Internet]. Montevideo; 2019. p. 229-39. Disponible en: <https://www.presidencia.gub.uy/comunicacion/comunicacionnoticias/datos-exportaciones-forestales>
37. Methol R. Sistema de Apoyo a la Gestión de Plantaciones de Eucalyptus globulus. Rev Inia. 2006;Serie Técn:34.