

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EVALUACIÓN PRODUCTIVA Y AMBIENTAL DE UN SISTEMA  
SILVOPASTORIL DE *EUCALYPTUS GRANDIS* CON DESTINO A  
MADERA SÓLIDA**

**por**

**Joaquín José ECHEVERRIGARAY QUILLET**

**Jerónimo QUINTELA MARTINEZ**

**Trabajo final de  
grado presentado como uno  
de los requisitos para  
obtener el título de  
Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO**

**URUGUAY**

**2024**

Página de Aprobación

Trabajo final de grado aprobado por:

Director: \_\_\_\_\_

Ing. Agr. Adriana Bussoni

\_\_\_\_\_

Ing. Agr. Mariana Boscana

Tribunal: \_\_\_\_\_

Ing. Agr. (MSc) Oscar Bentancur

\_\_\_\_\_

Ing. Agr. (MSc) Franco Schinatto

\_\_\_\_\_

Ing. Agr. Jorge Esquivel

Fecha: 1 de marzo de 2024

Estudiantes:

\_\_\_\_\_

Joaquín Echeverrigaray

\_\_\_\_\_

Jerónimo Quintela

### **Agradecimientos**

Quisiéramos agradecer a todas las personas que de alguna forma estuvieron involucradas en este trabajo, pero especialmente:

A nuestras tutoras las Ing. Agr. Adriana Bussoni e Ing. Agr. Mariana Boscana, quienes nos dieron la posibilidad de realizar esta tesis y nos orientaron a lo largo de la misma. Destacamos su dedicación e interés por nuestro desarrollo como futuros profesionales, acompañándonos a los trabajos de campo, brindando información e invitándonos a jornadas de capacitación.

Al Ing. Agr. Franco Schinato por su colaboración en el trabajo de laboratorio.

Al departamento de Documentación y Biblioteca por los materiales brindados y la corrección del documento.

A los propietarios y administradores del establecimiento “Santa Magdalena” por permitirnos visitar el predio y obtener datos de interés para la realización de este trabajo.

A nuestras familias, docentes y compañeros con los que hemos compartido estos años dentro de la Facultad.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>PÁGINA DE APROBACIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE TABLAS Y FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>10</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
1.1. OBJETIVOS .....	12
1.1.1. <i>Objetivo General</i> .....	12
1.1.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	12
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
2.1. SISTEMAS AGROFORESTALES (SAF) .....	13
2.2. SISTEMAS SILVOPASTORILES (SSP).....	14
2.2.1. <i>Definición</i> .....	14
2.2.2. <i>Sistemas Silvopastoriles en Uruguay</i> .....	20
2.2.3. <i>Componente Arbóreo – E. grandis W. Hill ex Maiden</i> .....	23
2.2.3.1. <i>Características Generales</i> . .....	23
2.2.3.2. <i>Producción en Uruguay</i> .....	24
2.2.3.3. <i>Tratamientos Silvícolas</i> .....	25
2.2.3.3.1. <i>Poda</i> .....	25
2.2.3.3.2. <i>Raleo</i> .....	27
2.2.4. <i>Componente Animal</i> .....	27
2.2.4.1. <i>Ganadería en Uruguay</i> .....	27
2.2.4.2. <i>Ganadería en Florida</i> .....	29
2.2.5. <i>Viabilidad Financiera</i> .....	30
2.3. HUELLA DE CARBONO .....	31
2.3.1. <i>Emisiones de GEI</i> .....	32
2.3.2. <i>Captura de GEI</i> .....	34
2.3.3. <i>Balance de C y Casos Particulares</i> .....	35
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	36
3.2. TRABAJO DE CAMPO.....	41
3.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	45
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	46
3.5. BALANCE DE CARBONO.....	47
3.5.1. <i>Emisiones de GEI</i> .....	47
3.5.2. <i>Captura de GEI</i> .....	48
3.5.3. <i>Balance Total</i> .....	48
3.5.4. <i>Mercados de Carbono</i> .....	48
3.6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO.....	50
<b>4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>56</b>
4.1 RESULTADOS DE INVENTARIO.....	56
4.1.1. <i>Primera Medición</i> .....	57
4.1.2. <i>Segunda Medición</i> .....	61
4.2. RESULTADOS DE LABORATORIO.....	64
4.3. BALANCE DE CARBONO Y ANÁLISIS AMBIENTAL.....	68
4.3.1. <i>Emisiones</i> .....	68
4.3.2. <i>Captura</i> .....	69
4.3.3. <i>Balance</i> .....	69
4.3.4. <i>Créditos de Carbono</i> .....	70
4.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO.....	71
4.4.1. <i>Inversión y Financiamiento</i> .....	71
4.4.2. <i>Ingresos</i> .....	72
4.4.3. <i>Egresos</i> .....	73
4.4.4. <i>Flujo de Fondos Diagnostico</i> .....	73
4.4.5. <i>Indicadores Financieros</i> .....	74
4.4.6. <i>Análisis de Posibles Escenarios</i> .....	75
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>77</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>79</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>90</b>

## Lista de Tablas y Figuras

Tabla No.	Pág.
<b>Tabla 1</b> Desventajas percibidas por productores de SSP .....	20
<b>Tabla 2</b> Indicadores financieros en distintos escenarios del sistema proyectado .	31
<b>Tabla 3</b> Superficie de los distintos usos del suelo en “Santa Magdalena” .....	39
<b>Tabla 4</b> Dimensiones de las parcelas expresadas en metros .....	42
<b>Tabla 5</b> Tamaño de las parcelas en metros cuadrados y factor de expansión .....	43
<b>Tabla 6</b> Costos de implantación del sistema silvopastoril.....	51
<b>Tabla 7</b> Costo de tratamientos intermedios .....	52
<b>Tabla 8</b> Simulación SAG: producción de madera del sistema según destino .....	53
<b>Tabla 9</b> Valorización de la madera según destino .....	54
<b>Tabla 10</b> Densidades por parcela .....	56
<b>Tabla 11</b> Densidades por hectárea .....	57
<b>Tabla 12</b> Datos dasométricos por parcela en la primera medición .....	57
<b>Tabla 13</b> Datos dasométricos por hectárea en la primera medición .....	59
<b>Tabla 14</b> Datos dasométricos por parcela en la segunda medición .....	61
<b>Tabla 15</b> Datos dasométricos por hectárea en la segunda medición.....	62
<b>Tabla 16</b> Indicadores de crecimiento: Variación de volumen, ICA e IMA .....	63
<b>Tabla 17</b> Determinación de carbono (%C) y CO <sub>2</sub> e por clase diamétrica.....	65
<b>Tabla 18</b> Determinación de carbono (%C) y CO <sub>2</sub> e por parcela .....	66
<b>Tabla 19</b> Caracterización de volumen de madera y carbono por clase diamétrica .....	67
<b>Tabla 20</b> Test de Tukey para CO <sub>2</sub> e/ha por clase diamétrica .....	68
<b>Tabla 21</b> Estimación de las emisiones de CO <sub>2</sub> e promedio 2020-2023 .....	68
<b>Tabla 22</b> Emisiones generadas anualmente por sistema .....	69
<b>Tabla 23</b> Stock de CO <sub>2</sub> e por sitio en 2023 .....	69

<b>Tabla 24</b> Emisiones, captura y balance de carbono por sistema en 2023 .....	70
<b>Tabla 25</b> Cálculos para la generación de bonos de carbono.....	71
<b>Tabla 26</b> Inversión y financiamiento expresado en USD/ha efectiva .....	71
<b>Tabla 27</b> Ingresos expresados en USD/ha efectiva del año 0 al 9 .....	72
<b>Tabla 28</b> Ingresos expresados en USD/ha efectiva del año 10 al 18 .....	72
<b>Tabla 29</b> Egresos expresados en USD/ha efectiva del año 0 al 9 .....	73
<b>Tabla 30</b> Egresos expresados en USD/ha efectiva del año 10 al 18 .....	73
<b>Tabla 31</b> Flujo Neto de Caja diagnostico expresado en USD totales del año 0 al 9.....	74
<b>Tabla 32</b> Flujo Neto de Caja diagnostico expresado en USD totales del año 10 al 18.....	74
<b>Tabla 33</b> FNC sin considerar la ganadería expresado en USD totales del año 0 al 8.....	75
<b>Tabla 34</b> FNC sin considerar la ganadería expresado en USD totales del año 9 al 18.....	75
<b>Tabla 35</b> Indicadores financieros de las distintas situaciones .....	76

Figura No.	Pág.
<b>Figura 1</b> Diagrama de flujo de un SSP.....	15
<b>Figura 2</b> Ubicación del área de medición en el establecimiento “Santa Magdalena” .....	37
<b>Figura 3</b> Padrones y Grupos CONEAT correspondientes a “Santa Magdalena”. 38	
<b>Figura 4</b> <i>E. grandis</i> en filas triples a 3 m y 2 m entre árboles con callejón de 18 m.. .....	40
<b>Figura 5</b> Ubicación de las parcelas del Silvo Sur .....	41
<b>Figura 6</b> Ubicación de las parcelas del Silvo Norte.....	42
<b>Figura 7</b> Medición de DAP y altura de los árboles.....	44
<b>Figura 8</b> Media y mediana de la altura (m) de los árboles por sitio en 2022 .....	58

<b>Figura 9</b> Media y mediana del DAP (cm) de los árboles por sitio en 2022 .....	59
<b>Figura 10</b> Media y mediana del área basal ( $m^2$ ) de los árboles por sitio en 2022	60
<b>Figura 11</b> Media y mediana del volumen ( $m^3$ ) de los árboles por sitio en 2022..	60
<b>Figura 12</b> Media y mediana de la altura (m) de los árboles por sitio en 2023 .....	62
<b>Figura 13</b> Media y mediana del volumen ( $m^3$ ) de los árboles por clase diamétrica .....	67
<b>Figura 14</b> Media y mediana del $CO_{2eq}$ por clase diamétrica .....	67

## Resumen

En un país ganadero como Uruguay, el cuestionamiento a las emisiones de gases efecto invernadero por parte del sector pecuario ha generado gran preocupación. Es por esto que es importante evaluar cuál es el balance de carbono y la viabilidad financiera de un sistema que combina la producción forestal y agropecuaria, tal como lo son los sistemas silvopastoriles. A través de un estudio de caso en la zona centro Sur del país se determinó la cantidad de carbono en una plantación de *Eucalyptus grandis* de 11 años, con una densidad de plantación teórica de 625 arb/ha que fue sometida a distintos tratamientos silvícolas hasta lograr una población final de 154 arb/ha podados hasta los 6 m de altura. Se establecieron en dos estratos (Silvo Norte y Silvo Sur), 11 parcelas permanentes en donde se realizaron dos inventarios en los que se midió para cada árbol Altura, Diámetro a la Altura de Pecho y posteriormente se calculó el Área Basal y Volumen individual, para obtener los mismos parámetros por hectárea. En cada parcela se extrajeron muestras de 3 árboles que corresponden a 3 clases diamétricas que fueron procesados en laboratorio para obtener la densidad de la madera y contenido de carbono. Los resultados reflejaron una superioridad en el comportamiento del Silvo Norte sobre el Silvo Sur, mostrando, en promedio una concentración de carbono en el fuste y corteza de 40,67% sobre un volumen de 100,5 m<sup>3</sup>/ha (IMA de 9,28 m<sup>3</sup>/ha/año); esto se traduce en una captura a los 11 años del cultivo de 12,2 ton/ha/año de CO<sub>2</sub> equivalente. Al contrastar dicha captura con las emisiones ganaderas calculadas a partir de las ecuaciones de IPCC (Hongmin et al., 2006), se estima un balance de carbono de -5,49 ton CO<sub>2</sub>e/ha/año en la totalidad del SSP. Estos resultados servirán para validar la potencialidad de fijación de carbono en un sistema integrado de ganadería y forestación con coeficientes locales. Esto le confiere mayor confiabilidad a un eventual sistema de bonos de carbono. El análisis financiero de este sistema reflejó un Valor Actualizado Neto de 210.415 USD tomando como costo de oportunidad un 7%, considerándose un proyecto viable económicamente; a su vez, la Tasa Interna de Retorno calculada fue de 9,07%. También se realizó un análisis del impacto de la venta de bonos de carbono sobre la viabilidad del proyecto, mejorando los valores explicitados anteriormente. Los resultados obtenidos demuestran la sustentabilidad ambiental y viabilidad económica del sistema.

*Palabras clave:* sistemas silvopastoriles, CO<sub>2</sub> equivalente, balance de carbono, bonos de carbono, indicadores financieros

### Abstract

In a pastoral-driven nation such as Uruguay, the interrogation of greenhouse gas emissions emanating from the livestock sector has instigated profound consternation. In this context, it is crucial to assess the carbon balance and financial viability of a system that integrates forestry and agricultural production, such as silvopastoral systems. Through a case study in the central-southern region of the country, the carbon quantity in an 11-year-old *Eucalyptus grandis* plantation was determined. The plantation had a theoretical planting density of 625 trees/ha and underwent various silvicultural treatments to achieve a final population of 154 trees/ha pruned up to 6 m in height. Eleven permanent plots were established in two strata (Silvo Norte and Silvo Sur), where two inventories were conducted. For each tree, height and diameter at breast height were measured, and subsequently, basal area and individual volume were calculated to obtain these parameters per hectare. Samples were taken from three trees in each plot, representing three diameter classes, processed in the laboratory for wood density and carbon content using spectrophotometry. The results reveal a superior performance of Silvo Norte compared to Silvo Sur, with an average carbon percentage in the stem and bark of 40,67%, over a volume of 100,5 m<sup>3</sup>/ha (9,28 m<sup>3</sup>/ha/year). This translates to an annualized capture until 2023 of 12,2 tons/ha/year of CO<sub>2</sub> equivalent. Contrasting this capture with livestock emissions calculated from IPCC equations (Hongmin et al., 2006) estimates a carbon balance of -5,49 tons CO<sub>2</sub>e/ha/year in the entirety of the silvopastoral system. These results validate the carbon sequestration potential in an integrated livestock and forestry system. This enhances the reliability of a potential carbon credit system. Regarding the financial analysis, the system yielded a Net Present Value of 210.415 USD, considering a 7% opportunity cost, proving to be economically viable. Additionally, the calculated Internal Rate of Return was 9,07%. An analysis of the impact of carbon credit sales on the project's viability was also conducted, improving the values mentioned above. The obtained results demonstrate the environmental sustainability and economic viability of the system.

*Keywords:* silvopastoral systems, CO<sub>2</sub> equivalent, carbon balance, carbon credits, financial indicators

## 1. Introducción

Las características agroclimáticas del Uruguay posibilitan un desarrollo sostenido de la actividad agropecuaria, siendo la ganadería vacuna y la forestación dos de las actividades más importantes del país. Si bien el sector ganadero es quien abarca mayor superficie, ha mostrado una tendencia descendente en los últimos años (Uruguay XXI, 2022), siendo en parte explicado por un crecimiento constante del sector forestal (Dirección General Forestal [DGF], 2022), basado en las condiciones climáticas del territorio, así como un conjunto de condiciones jurídicas y económicas que promovieron la aparición de inversores para posibilitar la expansión del sector.

Actualmente la superficie de pastoreo ganadero abarca unos 14,3 millones de ha, siendo la mayoría sobre campo natural (79%), seguido por un 19% de superficie mejorada y 288 mil ha de pastoreo en superficie forestada (Gorga & Mila, 2022). A junio de 2022 se estimaba un stock vacuno de 11,5 millones de cabezas, mostrando un descenso del 3% con respecto al ejercicio anterior.

La superficie efectiva de bosques implantados corresponde a 1.103.686 ha (6,3% del territorio nacional), concentrándose fundamentalmente en los departamentos de Tacuarembó, Rivera, Paysandú, Río Negro y Lavalleja. Las principales especies cultivadas corresponden a *E. grandis* y *E. dunnii*, y en menor medida *E. globulus*, *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* (DGF, 2022). Los destinos de la producción se pueden resumir en dos grandes grupos, las plantaciones orientadas a la producción de madera de sólida (cuyos productos son destinados a la industria del aserrío y debobinado), en las cuales se realizan tratamientos silviculturales intermedios (podas y raleos) durante el ciclo del cultivo; y los macizos destinados a generar pulpa de celulosa o chips, en los cuales no se realizan dichos tratamientos durante el correr del turno.

El auge de la producción forestal en el país ha impulsado a un gran número de productores a incorporar el componente arbóreo en sus establecimientos, dando lugar a sistemas silvopastoriles (SSP), que integran al componente forestal con el componente pastura y el animal, generando una constante interacción.

Los objetivos de incorporar la actividad forestal con la actividad ganadera a través de estos sistemas pueden ser múltiples y muy diversos. Desde disminuir el

riesgo productivo al diversificar la producción, hasta mejorar la eficiencia del uso del suelo, reducir el impacto del clima sobre la producción ganadera o atenuar el impacto de la producción sobre el medio ambiente (Gallo, 2006).

El presente trabajo sirve como fuente para demostrar la importancia de estos sistemas sobre el medio ambiente, a través de la cuantificación del balance de carbono de un estudio de caso. A su vez, por medio de un análisis financiero y económico se determina la viabilidad del caso, lo cual es información fundamental para estimular la introducción de la actividad en los establecimientos.

## **1.1. Objetivos**

### ***1.1.1. Objetivo General***

El objetivo general de esta investigación es:

Evaluar la contribución económica y ambiental de un Sistema Silvopastoril de *Eucalyptus grandis* con objetivo de madera sólida.

### ***1.1.2. Objetivos Específicos***

Los objetivos específicos de esta investigación son:

- ✓ Estimar el balance de carbono en un sistema silvopastoril.
- ✓ Obtener parámetros locales para la estimación de carbono en plantaciones con objetivos de madera sólida.
- ✓ Determinar la viabilidad financiera de sistemas silvopastoriles en baja densidad en la zona centro sur del país.

## 2. Revisión Bibliográfica

### 2.1. Sistemas Agroforestales (SAF)

Los sistemas agroforestales se practican hace muchos años, pero el concepto nace en las zonas tropicales, en un contexto de escasez de tierras como consecuencia del rápido crecimiento de las poblaciones indígenas, buscando sistemas eficientes que permitan la producción en simultáneo de recursos como la madera y el alimento (Peri et al., 2016).

Es un término que se utiliza para referirse a sistemas y tecnologías de uso del suelo en los cuales las especies leñosas perennes (árboles, arbustos, palma, entre otras) se utilizan deliberadamente en el mismo sistema de manejo con cultivos agrícolas y/o producción animal, en alguna forma de arreglo espacial o secuencia temporal (Nair, 1993). La definición deja en claro que son sistemas en los cuales hay más de un componente, que por medio de diferentes técnicas o manejos se combinan, asocian e interaccionan entre sí (Combe & Budowski, 1979).

De acuerdo a los arreglos espaciales, los SAF pueden ser en filas o columnas alternadas, arbolado en el borde, estratificación vertical, entre otros; mientras que también pueden interactuar en el tiempo, como es el caso de los cultivos migratorios o “Taungya” (Umrani & Jain, 2010). Según Fuchs (2012), se pueden clasificar a los mismos de acuerdo al balance entre la producción de ganado, silvicultura y producción agrícola.

Según Murgueitio et al. (2006), son sistemas diferentes a los que comúnmente estamos acostumbrados a nivel nacional, por lo que para asegurar su éxito es importante tener en cuenta algunos aspectos o implicancias. Estos autores también indican que, para implementar estos sistemas de forma exitosa, debe realizarse un diagnóstico participativo, una caracterización de la zona y definir una línea a seguir de acuerdo a la escala del predio; lo cual es llevado a cabo mediante un conjunto de actividades dentro de las que se encuentran: revisión bibliográfica, visitas predio a predio, diálogo acerca de especies de plantas presentes, análisis grupales sobre oferta ambiental, sistemas de uso de la tierra, producción o comercialización, análisis económico, entre otras.

Experimentos en el sudeste de Estados Unidos han estudiado la disposición de los productores a llevar adelante este tipo de sistemas, ofreciendo que las

principales razones que impulsan su implementación constituyen el mantenimiento de la biodiversidad y la conservación del suelo, sumado a un aumento del valor de la tierra y la calidad del agua. Sin embargo, la falta de información y mercados para comercializar algunos de los productos obtenidos constituyen una traba para su inclusión en los establecimientos (Dyer et al., 2015).

Uno de los SAF más importantes y conocidos lo constituyen los sistemas silvopastoriles, que se abordarán a continuación.

## **2.2. Sistemas Silvopastoriles (SSP)**

Esta sección tendrá como objetivo presentar una introducción al modelo de sistemas silvopastoriles, profundizando en su definición, componentes principales, su funcionalidad, su utilización en Uruguay, entre otros.

### **2.2.1. Definición**

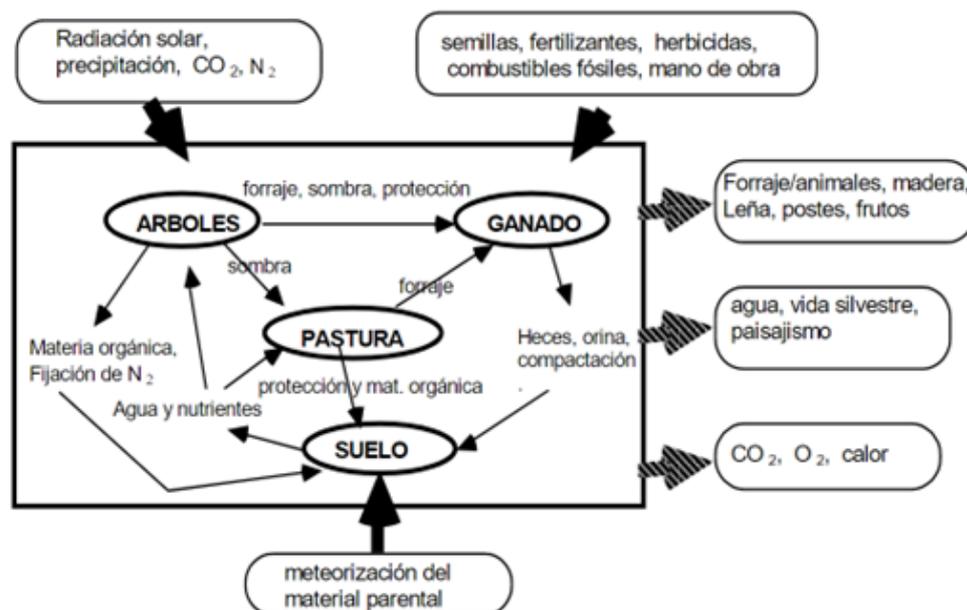
Se caracteriza porque los componentes principales que lo constituyen son los árboles y animales, que conviven en un mismo ambiente junto con la pastura (Cubbage et al., 2012; Russo & Botero, 1996).

Reafirmando este concepto, Peri et al. (2016) los definen de forma idéntica que la definición de SAF establecida por Nair (1993), excluyendo de la misma al componente agrícola; resultando en que los sistemas silvopastoriles son “sistemas y tecnologías de uso del suelo en los cuales las especies leñosas perennes (árboles, arbustos, palmas, etc.) se utilizan deliberadamente en el mismo sistema de manejo con animales de producción, en alguna forma de arreglo espacial o secuencia temporal” (p. 2).

Teniendo en cuenta que los SSP reivindican el concepto de sistema, en la Figura 1 se representa el diagrama de flujo que ilustra el funcionamiento de los mismos, con sus respectivas entradas, salidas e interacciones (Bronstein, 1983, como se cita en Russo & Botero, 2005).

**Figura 1**

*Diagrama de flujo de un SSP*



*Nota.* Tomado de Russo y Botero (2005).

Es necesario para el funcionamiento el ingreso de recursos al sistema que permitan el crecimiento del componente vegetal, como lo son  $\text{CO}_2$ , radiación solar, agua y nitrógeno; de esta forma, se desarrollará la pastura, que actuará como fuente de forraje para el ganado y de materia orgánica para el suelo, así como también permitirá el crecimiento de los árboles, que ofrecen sombra y protección para la pastura y el ganado (Bronstein, 1983, como se cita en Russo & Botero, 2005). Además, aporta materia orgánica y fijará  $\text{N}_2$  al suelo. Además, el autor destaca como fundamental la adquisición de insumos externos como agroquímicos, mano de obra, combustible, entre otros, que permitirán que el sistema se desarrolle.

El ganado es sumamente dependiente de la oferta de forraje de la pastura para crecer. A su vez, contribuye con excretas que mejoran la fertilidad del suelo, mientras que, con el pisoteo lo degradan generando compactación (Bronstein, 1983, como se cita en Russo & Botero, 2005).

Por último, Bronstein (1983), como se cita en Russo y Botero (2005) diferencia las salidas del sistema en aquellas comercializables (madera, carne, animales, frutos, etc.) y las no comercializables (agua,  $\text{CO}_2$ , etc.).

La ganadería históricamente fue la principal producción agropecuaria a lo largo de Latinoamérica, expandiéndose en todas las regiones y trayendo un

conjunto de repercusiones negativas, como la deforestación, degradación de los recursos naturales, disminución de la productividad y menor generación de empleo rural (Calle et al., 2012; Peri et al., 2016). En este marco es que surgen los SSP, con objetivos muy diversos pero que poseen como factor común el buscar recomponer y mejorar la contraparte que llevó el avance y dominancia de la ganadería y agricultura en la región.

A lo largo de Sudamérica la geografía, el clima, la cultura y los mercados son diferenciados, lo que hace variar la forma en la que se presentarán este tipo de producciones.

Los sistemas pueden ser tan variados como la gama de zonas donde se desarrollan, desde sistemas con especies exóticas adaptadas como en Uruguay, hasta sistemas de especies nativas generalizadas en La Pampa (Montes naturales de *P. caldenia* y otras especies nativas adaptados por productores extensivos para el pastoreo vacuno), sistemas forestales agrícolas no integrados en Nueva Zelanda (Plantaciones de *P. radiata*, *C. japonica*, *Acacia spp* o *P. alba* de alta densidad que son llevados a densidades de 150-300 arb/ha para el pastoreo ovino), en el Sur de Estados Unidos los desarrollados con especies de pinos nativos o sistemas de especies exóticas arbóreas combinadas con cultivos agrícolas en Minas Gerais (Uso de clones híbridos de *Eucalyptus* a densidad de 250 arb/ha, asociado con arroz al primer año, soja al segundo año y pasturas perennes a partir del tercer año) (Cubbage et al., 2012).

Como ejemplifican los autores antes citados, hay una gran diversidad de formas en las que se presentan estos sistemas, con distintas especies (nativas y exóticas), marcos de plantación (tamaños de callejón, números de filas, etc.), origen (readaptación de monte ya implantado o a partir de campo natural) y con objetivos variados acorde al gran número de ventajas que ofrecen los mismos (sombra y abrigo para el ganado, diversificación de la producción, lograr mejor balance de carbono en el establecimiento, entre otros).

Según Esquivel et al. (2010), como se cita en Calle et al. (2012), a pesar de la diversidad, hay ciertos factores estructurales que caracterizan este tipo de sistemas. Generalmente los árboles en los SSP de nuestra región son plantados a densidades bajas (mitad o menos que plantaciones convencionales con alta

densidad de árboles por ha) en doble o triple fila, separadas por callejones de entre 15 a 30 m, captando entre el 10 y el 40% de la radiación incidente. En este trabajo también se señala que, dependiendo de la especie y la región, se realizan varios cortes intermedios a partir del año 7 hasta la cosecha final a los 25 o 30 años, obteniendo aproximadamente 30% menos madera que un monte convencional (plantaciones de 1000-1250 arb/ha en marcos de plantación de 3 x 3 o 4 x 2 metros), pero compensado por mejores precios debido al mayor grosor de los fustes. De esta forma, hay crecimiento de pastura para el pastoreo del ganado, el cual suele entrar al sistema a partir de los 18 meses de instalados los árboles.

Una de las principales ventajas a las que responden los SSP es que son uno de los sistemas más sustentables, debido a su gran aporte desde el punto de vista ambiental. Como es de común conocimiento, el ganado es una de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Hogg, 2006), por lo que la combinación de esta actividad junto con la producción de árboles es una estrategia para reducir este proceso. Se destacan estos sistemas por su influencia en el secuestro de carbono, teniendo la capacidad de captar GEI y compensar las emisiones del ganado (Bussoni et al., 2015; Chizmar et al., 2020; Cubbage et al., 2012). A su vez, se ha comprobado una mejora de la calidad del agua presente en la zona donde se han establecido estas prácticas de producción (Calle et al., 2012; Cubbage et al., 2012; Russo & Botero, 2005), así como una protección de las cuencas hidrológicas (Calle et al., 2012; Peri et al., 2016).

Otro aspecto que contribuye a la sustentabilidad de los SSP es su impacto positivo sobre la biodiversidad (Zuluaga et al., 2011; Peri et al., 2016). Se ha comprobado que sistemas silvopastoriles con vegetación compleja tienen la capacidad de albergar importantes niveles de biodiversidad (Harvey et al., 2005, 2006; Sáenz et al., 2007). A modo de ejemplo, se ha visto cómo en Colombia luego de la introducción de árboles en este tipo de arreglo la riqueza de especies de aves ha aumentado significativamente (Zuluaga et al., 2011).

Además de contribuir al secuestro de carbono y a la biodiversidad, se ha comprobado el efecto sobre las propiedades del suelo. En primer lugar, los SSP tienden a promover la conservación del recurso suelo, reduciendo los problemas de erosión (Chizmar et al., 2020; Cubbage et al., 2012; Peri et al., 2016), explicado

fundamentalmente por un estrato arbóreo superior que reduce la velocidad de caída de las gotas de lluvia.

Hay un gran aporte de material vegetal (hojas, raíces, etc.) proveniente de las pasturas y los árboles, que luego de un proceso de mineralización aportan materia orgánica al suelo, contribuyendo a mantener la fertilidad, los niveles de carbono y las condiciones físicas del suelo (Calle et al., 2012; Cubbage et al., 2012; Peri et al., 2016; Russo & Botero, 2005, 1996). A su vez, dado que las raíces son más profundas que las de las pasturas, el componente arbóreo bombea agua y nutrientes de las capas subsuperficiales, haciéndolos más disponibles (Chizmar et al., 2020; Russo & Botero, 2005). Esto hace que los sistemas silvopastoriles provean de gran resiliencia a los suelos frente a la degradación (Calle et al., 2012).

Dado que en una misma área están compitiendo por luz y otros recursos los árboles y gramíneas, el crecimiento de estas últimas se verá limitado en comparación con un sistema libre de componente arbóreo. Estudios pioneros han determinado que la producción de gramíneas del estrato inferior de un SSP solo disminuye significativamente cuando la captura de radiación se encuentra por encima del 50% (Daccarett, 1968).

La baja densidad de árboles establecida por los SSP permite que puedan convivir de forma simbiótica ambos componentes, y que la pastura se comporte de buena manera. Aun así, se sugiere que hay una relación biofísica complementaria entre pastura, ganado y árboles, siempre y cuando la densidad de estos últimos sea modesta (Pent & Fike, 2017).

Por la mejora en sí de las propiedades físicas y químicas del suelo, va a haber un impacto positivo sobre el crecimiento de la pastura (Chizmar et al., 2020; Russo & Botero, 1996). A su vez, las heces del ganado aportan elementos como potasio, nitrógeno y fósforo, los cuales actúan fertilizando la pastura y reduciendo la dependencia de insumos externos (Chizmar et al., 2020; Cubbage et al., 2012).

Se ha comprobado que las especies de pastos desarrolladas debajo de árboles presentan adaptaciones, como una menor relación raíz : parte aérea. A su vez, suelen tener mejoras en el valor nutritivo, expresadas a partir de un menor porcentaje de fibra cruda y mayor contenido de proteína cruda, sumado a una menor presencia de

malezas que reducen la calidad del tapiz y compiten contra los árboles jóvenes (Chizmar et al., 2020; Cubbage et al., 2012; Russo & Botero, 1996).

Según Chizmar et al. (2020) y Cubbage et al. (2012), al verse modificado el microclima por la presencia de árboles la estación de crecimiento de pasto se amplía. Se mantienen los picos en la primavera, pero durante el verano y el invierno los rendimientos son superiores. Además de estas características de las pasturas, el ganado se ve beneficiado por las condiciones que se crean en un SSP (Orefice & Carroll, 2017). Se genera un microclima óptimo para la producción, donde los árboles aportan sombra y protección frente al viento y lluvia. De esta forma, se reduce el estrés climático y se genera un ambiente de confort, donde los animales consumen y producen más (siempre y cuando el manejo sea adecuado); así como también hay evidencia de mejoras en indicadores reproductivos (p.e. porcentaje de preñez) (Garrett et al., 2004).

Otra de las ventajas identificadas se visualiza al momento en que, el riesgo de daño por incendio se ve disminuido al compararlo con una plantación convencional, puesto que la menor densidad de árboles y los callejones actúan como aislantes para su avance (Fedrigo et al., 2018).

Como ya se hizo referencia, son sistemas muy eficientes en el uso del agua y la radiación, pero también muy eficientes en el manejo de la tierra pues aprovecha las zonas marginales que no serían trabajadas bajo otras situaciones, intensificando el uso del suelo. A su vez, se valoriza la superficie de tierra sobre la cual se instala un SSP (Bussoni et al., 2015).

Desde un punto de vista económico, estos sistemas han sido vistos como una forma de diversificar la producción, generando productos de distinto tipo, lo que permite mantener ingresos estables en el largo plazo y minimizar los riesgos financieros (Salton et al., 2014). Frey et al. (2012) hicieron un relevamiento en el norte de Argentina, y obtuvieron que la diversificación de los flujos de ingresos y el menor riesgo a la fluctuación del precio de uno de los commodities es de las principales ventajas de los sistemas silvopastoriles.

A través de relevamientos en distintas regiones se han identificado desventajas reconocidas por los productores a la hora de instalar un sistema de estas características (Tabla 1).

**Tabla 1***Desventajas percibidas por productores de SSP.*

<b>Uruguay (Bussoni et al., 2015)</b>	<b>Norte Argentino (Frey et al., 2012)</b>	<b>Florida, USA (Shrestha et al., 2004)</b>
Mucho tiempo para recuperar la inversión	Complejidad del manejo	Mucho tiempo para recuperar la inversión
Alta inversión inicial	Alta inversión inicial	Aumento de riesgo de incendios
Dstrucción del paisaje visual	Disminución de carga ganadera y aumento de enfermedades	Incertidumbre y falta de apoyo del gobierno
Complejidad del manejo	Incertidumbre y falta de apoyo del gobierno	
Costo de abandonar el proyecto	Radiación a pastura en menor cantidad y calidad	
Disminución de carga ganadera y aumento de enfermedades	Pastura desaprovechada por meses de instalación del monte	
Falta de información para manejo forestal	Tediosidad en manejo y rotura de alambrados por ramas	

### **2.2.2. Sistemas Silvopastoriles en Uruguay**

La ganadería es la principal actividad productiva del país, ocupando una superficie correspondiente al 80% del área nacional, lo que explica la gran cultura pecuaria. La práctica de dicha actividad entre los montes de Eucaliptos o Pinos es muy común en gran parte de los campos forestados, ubicando los animales en zonas donde no hay árboles (vías de drenajes, suelos de mucha pendiente, superficiales, etc.) prestando un servicio de limpieza (Soares de Lima & Scoz, 2017). Como consecuencia, el silvopastoreo ha logrado ser más generalizado en Uruguay que en otros países de la región y el mundo (Cubbage et al., 2012).

La mayor parte de los SSP del país surgen de una adaptación de plantaciones comerciales orientadas a la producción de madera para pulpa o para aserrío, donde a través de contratos con las empresas forestales se permite el pastoreo a una dotación entre 0,4 y 0,5 UG/ha (Fedrigo et al., 2017). Según Tamosiunas (2015), la adopción de sistemas silvopastoriles explícitamente planeados es baja en Uruguay, lo cual hace que la información generada a nivel nacional sea escasa e insuficiente (diseño, especies de árboles, arreglos y estrategias de manejo) (Comisión Nacional de Fomento Rural [CNFR], 2011).

Existe la percepción de que la forestación aumenta los costos y horas de trabajo sin beneficios en el corto plazo (Tamosiunas, 2015); así como también factores culturales que impiden interpretar los beneficios ecosistémicos que estos ofrecen, y falta tecnología multi-rubro y predios piloto en los cuales generar resultados y datos para su adecuada difusión (Pastorini & Acosta, 2011).

A pesar de esto, hoy en día hay una serie de instituciones comprometidas a aportar información respecto a este tipo de sistemas. Dentro del ámbito académico se pueden encontrar a la Universidad de la Republica [UDELAR (Facultad de Agronomía, Facultad de Veterinaria y Polo Agroforestal)], INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) y el Plan Agropecuario; del nodo empresarial a SUSilvo (Sociedad Uruguaya de Silvopastoreo) y la SPF (Sociedad de Productores Forestales); mientras que, del ámbito gubernamental a la DGF, dependencias del MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca) y la DINACEA (Dirección Nacional de Control y evaluación Ambiental) (Sancho et al., 2021).

Si bien existe una amplia diversidad de definiciones que caracterizan estos sistemas, se utilizará la definición brindada por la DGF (MGAP) y el Ministerio de Ambiente en el marco de un proyecto con el PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo): “Integración deliberada y a largo plazo de árboles, ganado y pasturas, que interactúan en forma armónica, propendiendo a la sinergia de sus componentes, con el objetivo de maximizar la producción del sistema en forma sostenible” (Sancho et al., 2021, p. 30).

Según la consultoría llevada a cabo por Sancho et al. (2021), a la fecha había 39 establecimientos que desarrollaban sistemas silvopastoriles, ocupando una superficie efectiva de 6.400 ha aprox. El 80% de los mismos se encuentran en la región sureste del país, mientras que el restante se reparte en el centro-sur (15%) y norte (5%). Una característica en común es que la gran mayoría de los productores son ganaderos que viran hacia este tipo de sistema, debido a los beneficios que aportan para el ganado.

En esta misma consultoría, se entrevista a representantes de las distintas instituciones con el fin de conocer distintos aspectos de la introducción de estos sistemas en el país. Un factor que se desprende de las respuestas es la falta de una visión integradora al momento de la investigación, analizándolo desde la óptica

específica de cada uno de los investigadores (p.e. bienestar animal, producción de pasturas, entre otros); lo cual también se visualiza por parte de los productores, que hacen hincapié en no contar con un asesoramiento integrado (Sancho et al., 2021).

Por otro lado, a pesar de que se hayan hecho esfuerzos institucionales en los últimos años, existe carencia de formación académica para combinar la forestación con la ganadería y de estímulos para la incorporación de los SSP en los establecimientos, puesto que hay escasez de canales de extensión. Hace falta información para poder difundirla, más específicamente en lo que refiere a estudios de la viabilidad financiera de estos sistemas, así como de la cuantificación de los beneficios por los efectos cruzados (Sancho et al., 2021). A su vez, se ve como importante el trabajar en factores culturales para lograr internalizar la forestación en un país tradicionalmente ganadero, en la financiación de la inversión inicial y en la obtención de beneficios por la sustentabilidad del sistema (Sancho et al., 2021).

Cuando se plantea un SSP, se debe elegir el objetivo productivo, la especie arbórea, la densidad y el arreglo (Varella et al., 2016). Para esta actividad el género *Eucalyptus* es el más elegido, debido a que se adapta muy bien a las condiciones, hay conocimiento y cubre la demanda de materia prima para los distintos productos (celulosa, carbón, paneles, postes, madera aserrada y otros usos comerciales) (Paseyro, 2015).

En los SSP relevados a nivel nacional, la especie dominante corresponde a *E. globulus* (56%), asociado a que la principal zona donde se desarrollan estos sistemas es la sureste. A este lo sigue el *E. smithii* (15%), especie surgente en los últimos años como sustitución al *E. globulus* por factores sanitarios, comercialización y de promoción en estos contextos (Sancho et al., 2021).

La mayor parte de los silvos del país se caracterizan por tener arreglos de doble o triple fila (87%), separadas por callejones de 6-8 m (80%) y con densidades superiores a los 900 arb/ ha (82%). El objetivo más común de este tipo de sistemas es la producción de madera para pulpa/fibras (80%), lo cual explica las características antes mencionadas (especie y densidad), así como la falta de podas (74%) y raleos (81%) durante el turno (Sancho et al., 2021).

La base forrajera con la que se identifican es el campo natural, aunque cada vez son más comunes los mejoramientos con leguminosas. Sobre esta se desarrolla

ganadería en pastoreos rotativos o convencionales, a una carga de 0.6-0.9 UG/ha (Sancho et al., 2021).

### **2.2.3. Componente Arbóreo – *E. grandis* W. Hill ex Maiden**

**2.2.3.1. Características Generales.** El género *Eucalyptus* forma parte de la familia MYRTACEAE y subfamilia Leptospermoideas. Presenta alrededor de 700 especies, cuyo centro de origen se reduce al territorio australiano y las islas aledañas, asociando la distribución natural de cada especie a las diferentes situaciones ecológicas (clima y tipo de suelo). Es un género con una gran diversidad de especies, caracterizadas por ser árboles forestales de 30-50 m de altura y de gran adaptabilidad a las diferentes condiciones, lo cual permite seleccionar la especie más adecuada a la variedad de regiones (Brussa, 1994).

La especie *E. grandis* se origina en la costa este de Australia, más específicamente al norte de Nueva Gales del Sur y el sur costero de Queensland; donde el clima es de templado a tropical, con escasas heladas, precipitaciones de 1000-1750 mm anuales distribuidos en mayor proporción en verano y temperaturas entre 25-29 °C del mes más cálido y 5-6 °C el más frío (Boland et al., 2006).

Se distribuyen en alturas costeras medias de 300 m promedio, con excepciones. Prefiere suelos profundos, con capacidad de retención de agua, de texturas limosas y de buen drenaje. Dada su distribución no tienen la capacidad de soportar años de déficit hídrico o muchas heladas (Kelly et al., 1983, como se cita en Brussa, 1994).

La madera cuenta con una albura rosa pálido y un duramen rojo a rosado claro, con textura más bien gruesa (Poynton, 1979, como se cita en Brussa, 1994). De acuerdo a estudios nacionales, la densidad de la madera de *E. grandis* tendrá un 0,95 de probabilidad de tomar valores entre 328 y 599 kg/m<sup>3</sup> (Böthig, 2001). Es materia prima para la industria de la construcción en general, así como para la producción de celulosa y combustible (Brussa, 1994).

En lo que respecta al contenido de carbono en la biomasa no hay muchos estudios que lo estimen. Hay una investigación desarrollada en Ecuador por Díaz y Molano (2001), donde el porcentaje de carbono promedio calculado para *E. grandis* es de 45,1%, dentro del cual, los resultados por compartimento varían desde un

41,8% en la corteza, 48% en el fuste, ramas con 45%, la raíz y las hojas, con 44,1% y 43,5% respectivamente.

Morfológicamente se reconocen por ser árboles de gran tamaño, con ritidoma blanco y un desrame natural muy evidente, así como por tener corteza caduca en fajas largas (Brussa, 1994). Más en detalle, se distinguen por tener hojas discoloras, lanceoladas y péndulas; así como frutos piriformes, con disco incluso, de cuatro a seis valvas algo convexas con ápices convergentes (Boland et al., 2006).

**2.2.3.2. Producción en Uruguay.** Como ha sido mencionado anteriormente, la forestación ha tenido un gran avance en las últimas décadas, logrando al 2021 una superficie efectiva de 1.103.686 ha, siendo los principales departamentos abarcados Tacuarembó, Rivera y Río Negro (DGF, 2021).

En cuanto a las especies, la más forestada corresponde a *Eucalyptus grandis*, seguidos por *Eucalyptus dunnii* y las coníferas *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (DGF, 2022). Aun así, las tendencias son a que en el futuro *E. dunnii* supere a *E. grandis* en superficie forestada, lo cual se explica en la vigésima encuesta de viveros forestales, donde ilustra que a la fecha la especie más producida a nivel vivero es *E. dunnii* (52,8 % del total) (Boscana, 2021).

De acuerdo a la encuesta, la producción de *E. grandis* del año 2021 correspondió a 35.274.431 plantines, obtenidos tanto por propagación clonal (67%) como por medio de semilla (23%), donde el origen nacional de la misma domina por sobre la importación (Boscana, 2021).

Según la Ing. forestal A. Martínez (comunicación personal, 18 de junio, 2023), propietaria del Vivero Zuinandí, “*E. grandis* es una especie que no tiene grandes complicaciones para producir en vivero en condiciones normales. Al ser susceptible al frío, es recomendable la siembra a principio de febrero, para llegar al invierno con una planta de 15 cm de altura y buen sistema radicular”.

Si bien *E. grandis* se distribuye en todos los departamentos del país, concentra su producción en el norte, más específicamente en los departamentos de Tacuarembó (46.896 ha) y Cerro Largo (45.557 ha), seguido por departamentos del litoral como Río Negro y Paysandú (DGF, 2021). Esta distribución se explica porque en esos sitios dicha especie se comporta como la más productiva, lo cual fue comprobado por Balmelli y Resquín (2006).

En los experimentos antes mencionados, se evalúa el comportamiento de la especie en tres condiciones distintas, concluyendo que es la especie de mayor crecimiento y sobrevivencia, explicado por un mayor crecimiento inicial; sumado a un bajo porcentaje de corteza, lo que le brinda mayor productividad relativa al referir a madera descortezada (Balmelli & Resquín, 2006). En los sitios más bajos los rendimientos se reducen notoriamente como consecuencia del efecto del exceso de humedad o heladas, razón por la cual se recomienda sustituirlo por especies como *E. benthamii* o *E. smithii* las cuales manifestaron mejores comportamientos en estas condiciones (Balmelli & Resquín, 2006).

Se ha visto como *E. grandis* es la especie que mejor se comporta en las zonas 7 y 9 de prioridad forestal; no así en los bajos o en la zona 2, donde el *E. globulus* alcanza mejores rendimientos y *E. grandis* los peores, debido a su baja sobrevivencia y crecimiento inicial (Balmelli & Resquín, 2002).

En estos sitios favorables la especie en cuestión manifiesta un incremento medio anual (IMA) normal durante los primeros 5 años, pero a partir de ahí expresa un muy rápido crecimiento en comparación con otras especies que comienzan a mostrar ya una reducción del mismo, alcanzando el IMA máximo entre el año 10 y el 13 de acuerdo al sitio donde se esté desarrollando (Balmelli & Resquín, 2002). Numerosas investigaciones han cuantificado estos crecimientos, estimando valores de IMA máximos de entre 45-76 m<sup>3</sup>/ha/año (Balmelli & Resquín, 2000, 2002, 2006).

Además de las ventajas desde el punto de vista productivo, Balmelli y Resquín (2008) reconocen que “presenta como ventajas adicionales su doble propósito (celulosa y productos sólidos), la seguridad del mercado local y la disponibilidad de materiales de reproducción (semillas y clones) mejorados localmente” (p. 4).

**2.2.3.3. Tratamientos Silvícolas.** Una vez que se ha instalado un monte homogéneo, suelen llevarse a cabo tratamientos silviculturales con el fin de optimizar los crecimientos y concentrarlo en un menor número de individuos. Las actividades más comunes son la poda y el raleo (Van Hoff, 1997).

**2.2.3.3.1. Poda.** De acuerdo a Kurtz y Ferruchi (2000), se define como la eliminación o supresión de las ramas del fuste, mediante un corte neto y limpio, por

medio del empleo de herramientas adecuadas y a partir de un determinado diámetro y altura total de la plantación.

El principal fin de dicha operación es incrementar el valor de la madera al aumentar la proporción libre de nudos y los defectos anatómicos que estos conllevan (Reid, 2009), así como también facilitar aspectos prácticos (desplazamiento de maquinaria, prevención de incendios, entre otros) (Kurtz & Ferruchi, 2000).

Según estudios argentinos llevados a cabo por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), se comprobó que el rendimiento en debobinado de trozas de *E. grandis* libre de nudos incrementa significativamente (Van Hoff, 1997). Además, se reducen los costos fijos de producción en metros cúbicos; y en la medida que la cantidad de defectos sea menor, mayor será el valor y la accesibilidad o demanda de los diferentes mercados (Reid, 2009).

Hoy en día los eucaliptos utilizados cuentan con desrame natural, sin embargo, es un proceso lento y que deja estructuras como los “nudos muertos” que desmerecen la calidad de las tablas; por lo tanto, es importante el diseño de un régimen de poda, donde se defina la intensidad, época y forma (Van Hoff, 1997).

Las estaciones de poda ideales corresponden a otoño e invierno, previo al comienzo de la actividad vegetativa que permita cubrir la herida originada. La intensidad queda definida por indicadores tales como el diámetro a la altura del pecho (DAP) o la altura de árboles codominantes, tal que no altere la tasa de crecimiento de la población. El corte debe realizarse al ras del tronco por encima de la prominencia, por medio de herramientas calificadas que permitan un corte neto y limpio (Kurtz & Ferruchi, 2000).

Se pueden identificar algunos aspectos negativos de la poda, siendo el principal que es una actividad que insume tiempo, mano de obra y es costosa (Collier & Turnblom, 2001, como se cita en Reid, 2009). A su vez, se pueden identificar problemas como el mayor riesgo de vuelco en podas altas, el desarrollo de malezas en sotobosques al promover la entrada de luz, el riesgo de podredumbre y la incertidumbre en el diferencial de precios que se podrá obtener con la madera podada (Reid, 2009).

**2.2.3.3.2. Raleo.** Según Shepherd (1986) se define raleo como una “corta realizada en un cultivo forestal o rodal inmaduro, de modo de acelerar en forma primaria el incremento en diámetro y mejorar la conformación media de los árboles remanentes mediante una adecuada selección” (p. 236). A su vez, en la fuente se enumera una gran variedad de objetivos, que variarán según las circunstancias, pero los principales son: controlar la densidad y tasa de crecimiento para satisfacer alguna demanda del mercado, retirar árboles mal formados para reducir su competencia, aprovechar todos los productos y obtener ingresos intermedios durante el ciclo.

Shepherd (1986) establece que la secuencia de operaciones de raleo se conoce como régimen, y está caracterizado por:

- Inicio del ciclo de raleos.
- Tipo o método de raleo.
- Intervalo entre raleos sucesivos.
- Intensidad de raleo.
- Severidad del régimen.

El tipo de raleo define el orden en el que las distintas clases de copa son retiradas, diferenciándose en raleo por lo bajo (primeros árboles en retirar son los suprimidos), por lo alto (retiran árboles de la clase superior que interfieren con los más promisorios del dosel), selectivo (remoción de árboles de mayor tamaño del rodal, dejando los mejores de la clase codominante para la cosecha final) y sistemático (retiro de árboles según algún patrón de espaciamiento o cosecha) (Shepherd, 1986).

Según Van Hoff (1997), el régimen óptimo para un turno de 15 años para producción de madera de calidad, lo constituyen dos raleos por lo bajo al sexto y décimo año desde la plantación; siendo lo suficientemente flexible para adaptarse a las implicancias del mercado.

## **2.2.4. Componente Animal**

### **2.2.4.1. Ganadería en Uruguay**

Según la Agencia de promoción de exportaciones, inversiones e imagen país Uruguay XXI (2022), Uruguay cuenta con 16,4 millones de hectáreas para uso agropecuario, lo que representa más del 90% de la superficie terrestre del país. La ganadería es la actividad que abarca mayor área y se caracteriza por ser desarrollada

principalmente sobre campos naturales que se complementan con pasturas artificiales. La dotación de recursos naturales y factores productivos le otorgan ventajas comparativas en la producción de alimentos, lo que lo ha posicionado como un proveedor mundial de alimentos y de productos agropecuarios.

En 2021, aproximadamente 106.000 personas trabajaron en actividades de ganadería e industrias relacionadas. De este total, el 70% lo hicieron en la actividad primaria, mientras que el restante 30% fueron empleados por la industria (Uruguay XXI, 2022).

El último censo agropecuario realizado en 2011 evidencia la revolución productiva que vivió el sector agropecuario en Uruguay, con un cambio significativo en el uso relativo de la tierra entre las principales actividades productivas (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2021, como se cita en Uruguay XXI, 2022). Este mismo trabajo muestra que, las tierras destinadas a la agricultura pasaron de representar el 14% de tierras cultivadas en el 2000 al 30% en 2011, mientras que la ganadería pasó del 62% al 40% en igual período. La reducción en el uso de tierra por parte de la actividad ganadera no significó una menor producción, sino que implicó un uso más intensivo del suelo.

Según Aguirre (2019), el 66% de los establecimientos ganaderos de Uruguay son criadores, seguidos por un 24% que realizan ciclo completo y el restante 10% se dedica a la recría. Las principales razas son Hereford y Aberdeen Angus (Vieragro, s.f.).

A través del estudio realizado por Uruguay XXI (2022), se estimó que el sector agropecuario en Uruguay representa entre el 6% y el 7% del PIB (2015-2019). El sector ganadero mantuvo su liderazgo como el principal sector exportador de Uruguay al generar ingresos por U\$D 3.614 millones en 2021, siendo un récord histórico por parte del sector, con un crecimiento de 60% en la comparación interanual. En este trabajo también se señala que, en lo que refiere a las exportaciones, los productos cárnicos totalizaron U\$D 3.047 millones en 2021, lo que correspondió a 717.000 toneladas y un incremento interanual de 34% en volumen.

Según el Dr. S. Nosedá (comunicación personal, 24 de junio, 2023), encargado de Comercio Exterior del Frigorífico La Trinidad, “en estos últimos

años, la exportación de productos ganaderos tuvo cerca de un centenar de destinos. Entre ellos se destacan Asia y el Medio Oriente, Europa y Estados Unidos”.

También afirma que “el sistema de trazabilidad utilizado en Uruguay genera una gran aceptación de los productos en el mercado internacional. En este sentido, Uruguay es considerado un referente a nivel mundial por la trazabilidad del 100% de los productos cárnicos, permitiendo certificar su calidad e inocuidad” (S. Nosedá, comunicación personal, 24 de junio, 2023).

Uruguay es pionero a nivel mundial en la certificación de carne carbono neutro y actualmente son cinco las empresas que llevan la etiqueta Carbono Neutral en sus productos, una declaración de huella ambiental que ha sido verificada bajo los estrictos estándares internacionales de LSQA (Uruguay XXI, 2022).

Además, se comprometió a alcanzar el objetivo de cero emisiones netas de gases de efecto invernadero antes de 2050, En este marco, el sector ganadero se encuentra elaborando una estrategia nacional para el desarrollo de la ganadería climáticamente inteligente. Esta estrategia apunta a reducir significativamente el balance de gases de efecto invernadero en el sector (Uruguay XXI, 2022).

Por eso, para abordar el tema del calentamiento global el país debe obligadamente mirar hacia la ganadería. Uruguay lleva adelante desde 2020 el proyecto Ganadería y Clima con el apoyo técnico de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y financiación del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) (AFP, 2021, como se cita en “Uruguay, el país de las cuatro vacas por persona”, 2021).

Según Bergós (2021), como se cita en “Uruguay, el país de las cuatro vacas por persona” (2021), el objetivo de este proyecto es “reducir las emisiones directas e indirectas de GEI, secuestrar carbono en suelo y revertir los procesos de degradación de la tierra, al tiempo de aumentar la productividad a través de prácticas climáticamente inteligentes” (parr. 6).

#### **2.2.4.2. Ganadería en Florida**

Históricamente, la ganadería ha sido y es una de las principales actividades de la región, predominando los sistemas ganaderos puros o de tipo mixto, con orientación criadora (44%), de ciclo completo (31%) o invernadora (25%), sustentada básicamente sobre pasturas naturales, y registrando niveles de

producción de «carne equivalente» levemente superiores a la media nacional (Carámbula et al., 1986, como se cita en Andregnette, 2011). Sin embargo, se percibe en los últimos años, particularmente a partir de 2004, una tendencia de mejora en los indicadores productivos, los cuales si bien podrían registrar amplios rangos de variación pautan una dirección de cambio altamente significativa (Andregnette, 2011).

Según una encuesta realizada a algunos empresarios dedicados al rubro agropecuario, socios de la Asociación Rural de Florida, el 65% de las empresas indicó que su rubro principal es la producción de carne, 15% dedicados a la producción de lana y 7% producción de granos. En el 2021, Florida fue el segundo departamento que más remitió ganado bovino a faena, representando un 9% del total de la faena (Leániz, 2021).

Florida tiene un aporte del 2% al PBI nacional según datos extraídos de informes de Uruguay XXI y representó un 4,2% del total de exportaciones en el año 2021, lo que implicó 458,6 millones de dólares. Los productos ganaderos ocupan el segundo lugar en cuanto al total de productos exportados por el departamento representados en un 33% por el ganado en pie y, la lana en tercer lugar con un aporte del 7% (Leániz, 2021).

#### **2.2.5. Viabilidad Financiera**

Así como existe una amplia variedad de situaciones en las que se puede presentar un sistema silvopastoril, los valores de retorno económico también son muy distintos acordes a cada panorama, variando de acuerdo a la densidad, especie y destino de la madera. La información generada a nivel nacional e internacional sobre este aspecto de la actividad es muy escasa, acentuándose en aquellos casos en los que la madera es destinada a la industria de la manufactura (Bussoni et al., 2019).

En el trabajo de Lacorte et al. (2016), se ha visto como la introducción de la ganadería a la actividad forestal presenta un retorno anual de 162 U\$D/ha, ubicándose apenas por debajo de lo estimado para plantaciones donde solo se produce madera, que presenta valores de aprox. 170 U\$D/ha. A su vez, en la misma investigación se estimó un indicador importante como lo es la relación kilos de vaquillona: ton de madera producida, que permite conocer el aporte financiero de

la forestación a un sistema ganadero, resultando en valores entre 13,4-22,7 kg/ton madera.

Cubbage et al. (2014) estimaron que es posible obtener una Tasa Interna de Retorno entre 7 y 12% (sin considerar valor de tierra) en este tipo de sistemas; lo cual es significativamente inferior a lo estimado en el trabajo de Lacorte et al. (2016), que ronda en el 34% de TIR.

Por otro lado, Varela (2019) trabaja con un Simulador Forestal Ganadero (SIMFORGAN), que permite simular la interacción de los componentes en un sistema silvopastoril y proyectar los diferentes indicadores financieros.

Para ello se cargan en el sistema los costos unitarios de las actividades para llevar adelante el sistema, los años de inicio y fin de dichos gastos, la tasa de interés, volumen de madera proyectado, entre otros. A su vez, se establecen tres escenarios de acuerdo el valor de la madera en pie (ANEXO A).

De esta forma es que se simularon los resultados económicos para distintos sistemas de producción integrados, obteniendo los valores presentes en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Indicadores financieros en distintos escenarios del sistema proyectado*

	<b>Escenario pesimista</b>	<b>Escenario esperado</b>	<b>Escenario optimista</b>
<b>VAN (USD/ha)</b>	-248,78	805,25	1859,28
<b>MB Forestal anual (USD/ha)</b>	-24,99	80,90	186,79
<b>MB Ganadero anual prom (USD/ha)</b>	37,54	37,54	37,54

*Nota.* Elaborado a partir de Varela (2019).

### **2.3. Huella de Carbono**

La Huella de Carbono (HC) surge con el objetivo de entender la dinámica de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) emitidos por las actividades humanas, en el contexto del consumo y producción de bienes y servicios; de manera de poder ver su impacto en el ambiente.

Es un indicador reconocido a nivel internacional, definido como:

La medida del impacto de todos los gases de efecto invernadero producidos por nuestras actividades en el medio ambiente. Se refiere a la cantidad en toneladas o kilos de dióxido de carbono equivalente

de gases de efecto invernadero, producida en el día a día, generados a partir de la quema de combustibles fósiles para la producción de energía, calefacción y transporte entre otros procesos. (Schneider & Samaniego, 2009, p. 17)

Otra definición corresponde a la suma de las emisiones de GEI, expresadas en Dióxido de Carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) durante el ciclo de vida de un producto o un sistema (De Bris & De Broer, 2010, como se cita en Becoña et al., 2014).

Es un indicador objetivo sumamente útil en la toma de decisiones de individuos, empresas o naciones que busquen concientizar acerca del cuidado ambiental, puesto que permite medir las emisiones de GEI, estimar sus efectos e identificar cómo controlarlos o reducirlos. A su vez, es la puerta para numerosos mercados, que demandan productos de emisiones neutras (Becoña, 2022).

El cálculo se basa en la metodología establecida en la guía de trabajo del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) del 2006, que se encuentra bajo el mandato de la Convención Marco de las Naciones Unidas en Cambio Climático (Hongmin et al., 2006). El camino para su desarrollo fue orientado por entidades interesadas en mejorar la sostenibilidad ambiental de la producción ambiental, tales como FAO o International Dairy Federation (IDF) (Becoña, 2022).

### **2.3.1. Emisiones de GEI**

Uruguay es un país donde las emisiones de GEI por parte del sector agropecuario son muy importantes; y dentro del mismo, la ganadería es una de las principales responsables, asumiendo un 62% de las emisiones totales del país (Massaccesi, 2021).

La mayor parte de las emisiones de GEI por parte del sector ganadero provienen del sector primario, menospreciando la fase industrial (*Uruguay: Informe sobre la Huella Ambiental Ganadera*, 2022). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2017), los principales gases de efecto invernadero emanados por este sector, ordenados por importancia son: metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). De acuerdo con qué categoría, edad, tamaño y alimentación, entre otras características de los animales, es que será la magnitud de dichas emisiones.

Cada gas tiene un potencial de calentamiento diferente, por lo que, para unificar criterios se expresan en unidades de CO<sub>2</sub>e y se establecen para un horizonte temporal de 100 años. Las emisiones totales se calculan como la masa emanada de cada gas por su correspondiente potencial de calentamiento, habiéndose reportado que para el CO<sub>2</sub> es 1, para el CH<sub>4</sub> es 27,2 y para el N<sub>2</sub>O es 273 (Hongmin et al., 2006).

El metano es un gas fuertemente producido en Uruguay, con magnitudes de 799 kton (Muñoz, 2017). El mismo suele ser emitido en un 93% por la fermentación entérica producida en el rumen de los animales, y en menor medida en los sistemas de gestión del estiércol del ganado; por lo que, la cantidad de gas emitida va a depender de la cantidad y calidad de alimento consumida, así como del tipo de tracto digestivo, edad y peso del animal (Becoña, 2022; Muñoz, 2017).

En la medida que la calidad de los alimentos consumidos es superior (mayor digestibilidad y mayores valores de energía), las emisiones son mayores. Debido a que en Uruguay los animales que consumen pastura poseen dietas variables en cantidad y calidad a lo largo del año, son factores que deben ser tenidos en cuenta para la estimación de las emisiones, desarrollándose tablas con coeficientes específicos acorde a cada una de las situaciones (Becoña, 2022).

En cuanto al óxido nitroso, en un sistema ganadero hay emisiones directas como indirectas desde el suelo (volatilización y lixiviación), contabilizando los ingresos de N al sistema por fertilización, excretas o descomposición de alimentos. Mientras que, en lo que refiere a la liberación de dióxido de carbono se encuentra asociado al uso del combustible fósil, estimando 2,98 kg CO<sub>2</sub>e/litro de combustible (Becoña, 2022).

En términos cuantitativos, se ha visto que a nivel nacional se emiten 19.773 Gg CO<sub>2</sub>e por año, de los cuales 18.526 se asocian a los bovinos de carne y el restante a los ovinos. A su vez, se estimó 1.591 kg CO<sub>2</sub>e/ha pastoreo y 18,56 kg CO<sub>2</sub>e/kg carne vacuno PV; así como que del total de emisiones de GEI, aprox. un 70% corresponde a CH<sub>4</sub> y un 30% a N<sub>2</sub>O (*Uruguay: Informe sobre la Huella Ambiental Ganadera*, 2022).

### 2.3.2. *Captura de GEI*

La capacidad de captura de carbono por parte de los bosques se identifica como uno de los instrumentos fundamentales en la transición hacia el desarrollo sustentable. Si bien históricamente se conoció el ciclo de carbono en la naturaleza, recién en 1976 se empezó a reconocer a los bosques como almacenadores de las emisiones de combustibles fósiles, siendo uno de los tantos valores de uso indirecto (IPCC, 2001, como se cita en Amescua & Sandoval, 2004). Según Becoña (2017) “la incorporación de áreas forestales (sistemas silvopastoriles, montes de sombra y abrigo o bosque comercial) en los sistemas ganaderos puede generar reducción de emisiones de GEI y mejorar el balance dentro de estos e incluso, neutralizarlas” (p. 24).

Es importante tener en cuenta que, para conocer cuánto carbono es absorbido por una plantación forestal debe conocerse: producción de biomasa en cada componente en función del tiempo y concentración de carbono en los mismos (Seppänen, 2002).

Uruguay posee una importante biomasa forestal del género *Eucalyptus*, reconocido por ser de los géneros con mayor capacidad para la captura de dióxido de carbono (Fundación Terram, 2012); lo cual corresponde con los inventarios realizados para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que establecen que las masas boscosas del país contribuyen en magnitudes importantes a la fijación de CO<sub>2</sub> (Becoña, 2017).

Aun así, la información nacional acerca de la capacidad de la forestación de compensar las emisiones de los sistemas de producción ganadera es muy escasa. Tal como lo reporta Becoña (2017), se destaca un proyecto silvopastoril conocido como “Los Eucaliptus S.A.”, una plantación de *E. globulus* establecida a una densidad de 1.100 arb/ha en un marco de líneas cada 6 m, donde se estimó una captura anual de CO<sub>2</sub>e/ha de 3.143 kg. Teniendo en cuenta esta magnitud, para los distintos sistemas ganaderos en dicho informe se calcula que es necesario una superficie forestal de entre 0,44-0,59 ha para compensar las emisiones de los animales en una hectárea.

También hay estudios cercanos al territorio nacional, como los desarrollados por INTA en plantaciones sin raleo (1.111-850 arb/ha) y raleadas

(700-500 arb/ha) de *Eucalyptus* en Concordia. En el primer grupo se encontró que al año había una acumulación de carbono en la biomasa total de entre 14 y 21 ton/ha y a los 9 años entre 67 y 92 ton/ha; mientras que, en el grupo de árboles raleados el carbono acumulado en la biomasa total a los 4 años es de 13-17 ton/ha, y de 59-82 ton/ha a los 8 años (García, 2019).

### **2.3.3. Balance de C y Casos Particulares**

El balance de carbono según Canadell y Carlson (2017) se define como “la entrada de CO<sub>2</sub> en la atmósfera procedente de las emisiones de las actividades humanas, compensada por su salida (almacenamiento) a los reservorios de carbono en la tierra o en el océano” (p. 1). Para eso es importante cuantificar cuánto se emite y cuanto se captura en las diferentes actividades productivas.

Numerosos estudios han revelado que, en la última década de los noventa y primera década del siglo XXI, Uruguay ha generado un balance de carbono negativo, es decir, la capacidad de captura de GEI ha superado a las emisiones de los mismos. Esto se explica en gran parte por el auge de la forestación en dicho período, incrementando significativamente la superficie abarcada. Se proyecta para 2030 que Uruguay remueva una magnitud de 12.500 Gg anuales de CO<sub>2</sub>e, lo cual implica una externalidad positiva para el resto del mundo (Caffera & D’Agosti, 2017).

En un experimento llevado a cabo en un campo de Maldonado con monte en arreglo silvopastoril (*E. globulus* en arreglo de fila única 6 x 1,5 m), donde se estudió a partir de modelos de optimización el VAN forestal, ganadero y el balance de carbono resultante de la actividad, se visualiza cómo en estos sistemas se logran beneficios ambientales, siempre y cuando a la hora de diseñarlos se ponga el cuidado del medioambiente dentro de los objetivos prioritarios (Bussoni et al., 2021).

Por esta razón, es importante la presencia de incentivos económicos que estimulen a los productores para integrar los objetivos económicos con los ambientales dentro de estos sistemas.

### 3. Materiales y Métodos

El trabajo se realizó a partir de un estudio de caso que cuenta con Sistemas Silvopastoriles en el Departamento de Florida. El trabajo consta de las siguientes etapas:

- a) Caracterización del sitio de estudio.
- b) Etapa de campo en donde se realizaron dos inventarios forestales en el sistema silvopastoril.
- c) Procesamiento de datos y obtención de las principales variables dasométricos.
- d) Etapa de laboratorio para determinación de características de la madera.
- e) Procesamiento estadístico de datos.
- f) Cálculo del balance de carbono.
- g) Análisis de la viabilidad financiera del SSP en estudio.

También se realizó una entrevista a un informante calificado sobre el mercado de carbono para obtener un panorama acerca de las posibilidades de participación y obtención de beneficios para integrantes del sector agropecuario.

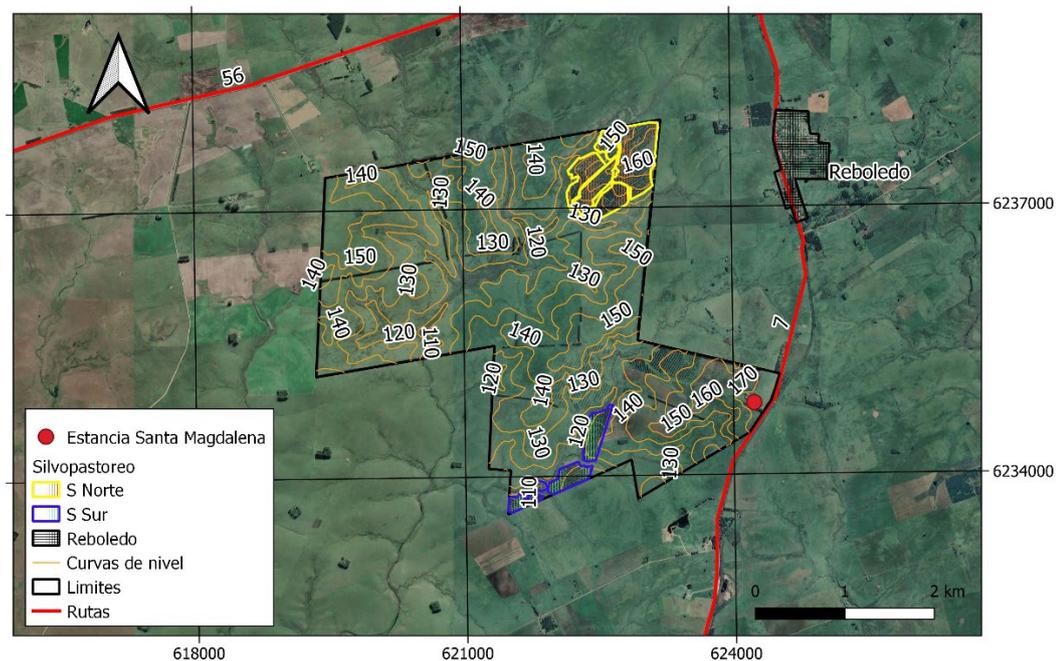
A continuación, se hará una descripción del establecimiento.

#### 3.1. Caracterización del Sitio de Estudio

Este trabajo se desarrolla sobre el establecimiento “Santa Magdalena”, perteneciente a inversionistas extranjeros y administrado por técnicos uruguayos. Se ubica en el departamento de Florida, más específicamente en las inmediaciones de Reboledo. Se accede al mismo por la Ruta Nacional N° 7 “General Aparicio Saravia” a la altura del kilómetro 120.

**Figura 2**

*Ubicación del área de medición en el establecimiento “Santa Magdalena”*

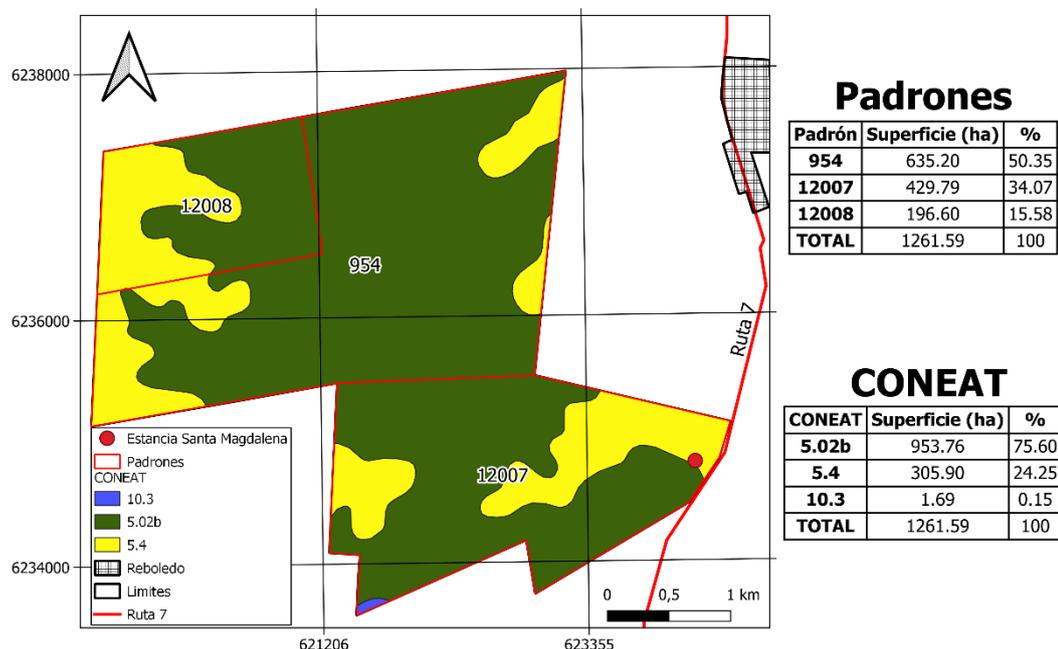


*Nota.* Elaborado a partir de Sutton et al. (2022), en el programa Q-GIS, con las coordenadas  $-34^{\circ}01'14.8''S$ ,  $-55^{\circ}39'10.9''W$ .

El predio está comprendido por tres padrones (954, 12.007 y 12.008) que abarcan una superficie total de 1.261 ha sobre las cuales se realizan diversas producciones. El material parental de los suelos corresponde a la Faja Granitizada Florida, la cual se caracteriza por la presencia de granitos y granodioritas infracorticales con migmatitas y metamórfitos de grado medio a alto; la misma se encuentra comprendida dentro del Terreno Piedra Alta, donde predominan los Brunosoles (Bossi & Gaucher, 2014). Los suelos se encuentran agrupados dentro de los grupos CONEAT 5.4, 5.02b y 10.3 como se muestra en la Figura 3.

**Figura 3**

*Padrones y Grupos CONEAT correspondientes a “Santa Magdalena”*



*Nota.* Elaborado a partir de Sutton et al. (2022), en el programa Q-GIS, con las coordenadas  $-34^{\circ}01'14.8''S$ ,  $-55^{\circ}39'10.9''W$ .

En cuanto a los grupos CONEAT 5.4 y 5.02b, son los suelos que ocupan la mayor superficie del establecimiento y ambas descripciones concuerdan en que son suelos moderadamente profundos y superficiales, de texturas francas, bastante livianas, de fertilidad media a baja y bien drenados (Comisión Nacional de Estudio Agronómico de la Tierra, 2020). Es posible apreciar afloramientos rocosos en algunas zonas del predio.

Según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000 del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (Altamirano et al., 1976), el establecimiento se encuentra sobre la unidad de suelo San Gabriel-Guaycurú. En esta unidad los suelos dominantes (cubren más del 50% de la superficie) son los Brunosoles Subéutricos (Éutricos) Háplicos. Comprenden los suelos de mejor aptitud forestal del Uruguay, formando parte de los suelos aptos, clase III; aunque estos pueden presentar ciertas limitaciones en cuanto a profundidad, baja disponibilidad de agua, preparación dificultosa por rocosidad o pendientes fuertes (Durán & García, 2007).

De acuerdo a un trabajo previo realizado por Balestíe et al. (2022) en el establecimiento, la mayor parte de la superficie está destinada a la ganadería bovina y ovina con un ciclo completo cerrado y una carga de 0,7 y 0,2 unidades ganaderas por hectárea respectivamente, resultando en una carga promedio de 0,9 UG/ha. En este mismo trabajo se señala que sobre esos mismos suelos, también se lleva a cabo la producción forestal, que está comprendida por montes con una densidad inicial teórica de 625 árboles/ha plantados con un arreglo silvopastoril. En la Tabla 3, se representa el uso del suelo con superficie y porcentaje de acuerdo a sus destinos.

**Tabla 3**

*Superficie de los distintos usos del suelo en “Santa Magdalena”*

Uso del suelo	Superficie (ha)	Proporción (%)
<b>Campo natural</b>	577	46
<b>Campo natural mejorado</b>	441	35
<b>Pradera y verdeo</b>	80	6
<b>Monte Silvopastoril</b>	151	12
<b>Otros</b>	12	1
<b>TOTAL</b>	<b>1261</b>	<b>100</b>

En lo que respecta a la ganadería, para la producción vacuna se utilizan razas carniceras como lo son Hereford y Aberdeen Angus y para la producción lanar el Corriedale que se clasifica como doble propósito. La alimentación del ganado se basa en el consumo de forraje de campo natural mejorado con *Lotus subbiflorus* cv El Rincón; además, se suplementa con 1 kg/animal/día a los terneros machos y terneras de mayor desarrollo desde el destete hasta el inicio de la primavera.

Las plantaciones forestales en el predio fueron realizadas en las primaveras de 2012, 2013 y 2019, siendo la primera sobre la cual se desarrolla este trabajo. Se utilizaron plantines provenientes de semillas de *Eucalyptus grandis* de INIA y el diseño de plantación fue de filas triples a 3 m de distancia y 2 m entre árboles con callejones de aproximadamente 18 m (Figura 4). Algunas de las características a destacar de la elección de la especie es el rápido crecimiento de los árboles con buena sanidad y el diseño de plantación que disminuye la competencia por luz, agua y nutrientes entre árboles y con la pastura que crece en el estrato más bajo.

#### Figura 4

*E. grandis* en filas triples a 3 m y 2 m entre árboles con callejón de 18 m



El objetivo de incluir los montes silvopastoriles fue diversificar la producción con una inversión y costos accesibles, de fácil aplicación y que potencie al sistema generando un impacto positivo; sin tener que disminuir la carga animal ni provocar disturbios ambientales. La clave está en que la ganadería aporte liquidez al sistema y la forestación aumente el patrimonio y la rentabilidad (Balestí et al., 2022).

El objetivo de estas plantaciones forestales es la obtención de trozas de buen diámetro y libres de nudos para aserrado; es por ello que han sido sometidas a podas y raleos. Dadas las diferentes ubicaciones y la topografía asociada a las mismas, es que se determinan dos sitios forestales, denominados Silvo Norte y Silvo Sur (Figura 2). El primero se ubica sobre una pendiente en dirección SE-NO con cotas de altura sobre el nivel del mar entre 130 y 160 metros (msnm), mientras que el Silvo Sur se encuentra sobre una superficie de menor altura (120 msnm) con escasa pendiente.

La primera intervención fue en enero del 2016 donde se realizó un primer raleo a desecho bajando el número de árboles por hectárea a 410 y una poda baja a los árboles remanentes hasta los 2,5 metros de altura; posteriormente, durante el verano de 2018 se realizó una segunda poda hasta los 4 metros. En enero de 2020, se realizó un segundo raleo alcanzando una población final de 150 árboles/ha, cuyos rolos fueron destinados a la industria de los puntales. Por último, en mayo de 2021 se realizó la tercera y última poda hasta los 6 metros.

Durante los raleos se retira una cierta cantidad de madera que puede o no ser aprovechada dependiendo principalmente de su volumen. Con el primer raleo

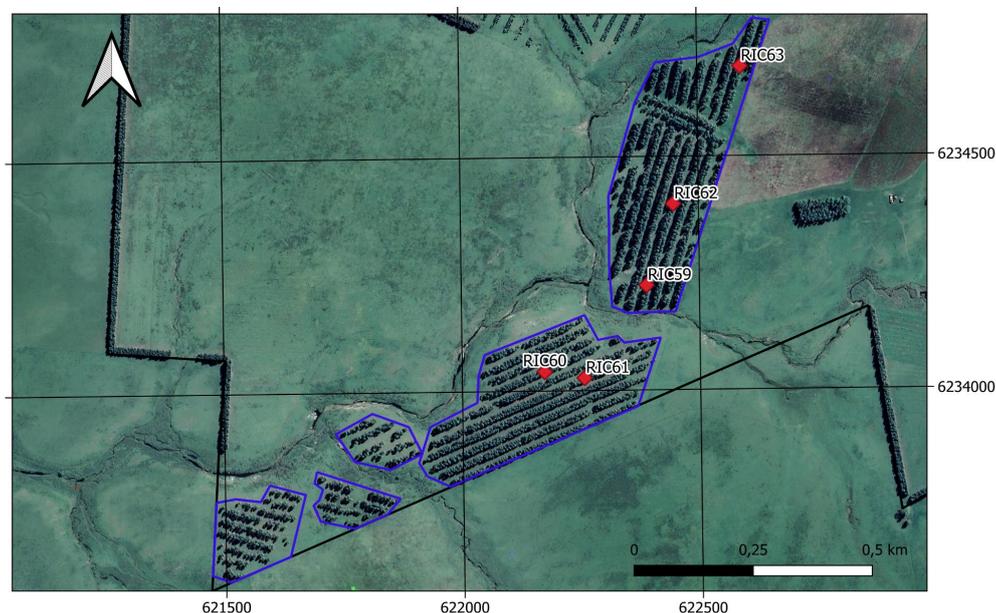
lo que se buscó fue seleccionar los árboles con mejores características y aumentar el espacio disponible para su crecimiento; como consecuencia de esto, la madera generada por los árboles raleados no tuvo otro destino que no fuera el uso doméstico dentro del establecimiento. Sin embargo, en el segundo raleo realizado, si se logró obtener un producto comercial que fueron trozas de 3 metros de largo destinadas a la industria de impregnación.

### 3.2. Trabajo de Campo

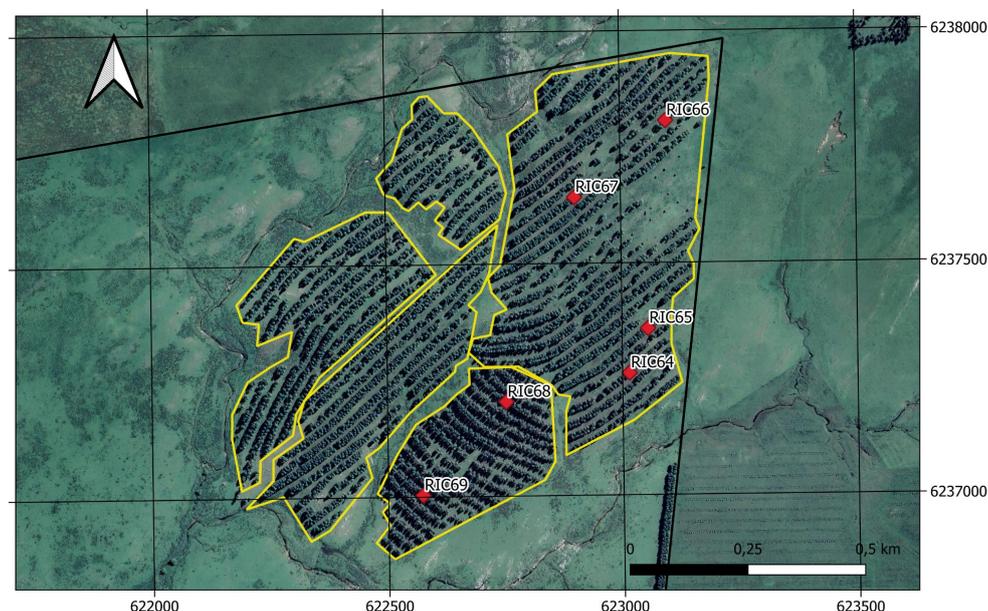
Para obtener datos de interés forestal, se realizó un inventario en el que se midieron 11 parcelas en dos momentos con el fin de evaluar el crecimiento de los árboles de *Eucalyptus grandis* plantados en la primavera de 2012. La primera medición se llevó a cabo el 4 de noviembre y el 17 de diciembre de 2022, y la segunda el 7 de julio de 2023. La ubicación de las parcelas fue al azar intentando cubrir la mayor superficie posible; la distribución de las mismas se encuentra representada en la siguiente figura, clasificando de la parcela RIC59 a RIC63 dentro del grupo Silvo Sur (Figura 5) y de la RIC 64 a RIC 69 como Silvo Norte (Figura 6).

#### Figura 5

*Ubicación de las parcelas del Silvo Sur*



*Nota.* Elaborado a partir de Sutton et al. (2022), en el programa Q-GIS, con las coordenadas  $-34^{\circ}01'30.6''S$ ,  $-55^{\circ}40'27.1''W$ .

**Figura 6***Ubicación de las parcelas del Silvo Norte*

*Nota.* Elaborado a partir de Sutton et al. (2022), en el programa Q-GIS, con las coordenadas  $-33^{\circ}59'55.0''\text{S}$ ,  $-55^{\circ}40'14.6''\text{W}$ .

El tamaño de las parcelas es variable debido a que se buscó incluir dentro de las mismas, por lo menos 20 árboles en pie (Sorrentino Fattoruso, 1997). De esta forma, se marcaron parcelas con las dimensiones expresadas en la Tabla 4.

**Tabla 4***Dimensiones de las parcelas expresadas en metros*

Parcela	Largo	Callejón	Callejón	Callejón	Callejón	Fila	Fila
RIC59	60	8,6	8,8	8,6	8,4	6,2	7,0
RIC60	60	8,6	8,6	8,4	9,1	6,3	6,9
RIC61	60	8,5	8,0	7,4	8,7	7,4	6,6
RIC62	50	8,9	9,0	9,0	8,7	7,0	7,0
RIC63	50	9,8	9,0	8,0	9,0	5,8	6,2
RIC64	60	9,8	11,0	9,5	8,5	5,7	7,0
RIC65	50	7,8	9,5	10,3	8,0	6,0	6,5
RIC66	70	9,7	8,9	9,2	9,1	8,0	7,6
RIC67	60	8,9	9,7	8,2	8,3	7,0	7,0
RIC68	50	7,6	8,4	9,7	6,6	7,0	7,2
RIC69	50	7,9	9,1	7,6	8,5	6,4	6,0
PROM.	56,4	8,7	9,1	8,7	8,4	6,6	6,8

Un aspecto a destacar es que la medida de los callejones fue tomada hasta la mitad del mismo, suponiendo que la otra mitad corresponde a la triple fila de al lado. A su vez, el valor de la fila es la distancia que hay entre las filas de árboles

externas medidas en cada extremo; si se divide dicho valor entre dos, se obtiene la distancia entre filas.

El tamaño de las distintas parcelas se encuentra representado en la Tabla 5. En promedio, la superficie de las parcelas fue de 1368 m<sup>2</sup>.

**Tabla 5**

*Tamaño de las parcelas en metros cuadrados y factor de expansión*

<b>Parcela</b>	<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Factor de expansión (ha)</b>
<b>RIC59</b>	1428	7
<b>RIC60</b>	1437	7
<b>RIC61</b>	1395	7
<b>RIC62</b>	1240	8
<b>RIC63</b>	1195	8
<b>RIC64</b>	1545	6
<b>RIC65</b>	1201	8
<b>RIC66</b>	1838	5
<b>RIC67</b>	1473	7
<b>RIC68</b>	1163	9
<b>RIC69</b>	1136	9
<b>PROMEDIO</b>	<b>1368</b>	<b>7,5</b>

En las distintas mediciones se relevaron los siguientes datos: cantidad de árboles en pie, faltantes y raleados, altura total (H total) y de copa en metros y el diámetro a la altura del pecho (DAP) en centímetros.

Para la realización de esta práctica, se utilizaron dos herramientas distintas (Figura 7). En primer lugar, para cuantificar el DAP, se utilizó una cinta diamétrica que se coloca manualmente sobre el fuste a aproximadamente 1,3 metros de altura. Este método tiene como ventajas su sencillez y bajo costo, pero al realizarse en forma manual puede generar ciertos errores en la medición. La segunda herramienta utilizada fue el Clinómetro electrónico Haglof que permite medir alturas de una forma simple, rápida y precisa. Una vez calibrado con una distancia determinada (20 m), a través de trigonometría determina automáticamente la altura de los puntos de referencia evitando malas lecturas de escala o errores de cálculo.

## Figura 7

### *Medición de DAP y altura de los árboles*



Una vez recabados los datos individuales, se calcularon los valores individuales y promedios para los diámetros a la altura del pecho (DAP prom) y las alturas totales (H prom), área basal (AB) y el volumen (Vol) teniendo en cuenta un factor de forma de 0,4 (Balmelli, 2002).

Conociendo el tamaño de las parcelas, se calculó el factor de expansión de las mismas para multiplicarlo por los distintos valores y obtener los datos por hectárea.

Dentro de cada parcela, se determinaron tres clases diamétricas que comprenden a la totalidad de los individuos y se seleccionaron tres árboles que representan las distintas clases. Sobre estos individuos, se realizó la extracción de tarugos de madera para su posterior análisis en laboratorio. Para ello, se utilizó un calador de Pressler que permite obtener las muestras de madera sin generar grandes daños al árbol. Cada muestra fue correctamente identificada y contiene dos tarugos de cada árbol, uno de la cara interior (entrefila) y otro de la exterior (callejón), eliminando posibles fuentes de variación de las propiedades de la madera.

Con los valores obtenidos de inventario, es posible el cálculo de dos de los indicadores de crecimiento más importantes: Incremento Medio Anual (IMA) e Incremento Corriente Anual (ICA), ambos expresados en  $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ . El IMA es el crecimiento promedio anual hasta cualquier edad desde la instalación del monte; se

obtiene dividiendo el crecimiento acumulado hasta un determinado momento en el tiempo, por la edad de la plantación correspondiente (Prodan et al., 1997). Por otra parte, el ICA corresponde al valor del crecimiento en volumen entre dos mediciones estandarizado por año (Prodan et al., 1997).

### **3.3. Análisis de Laboratorio**

Una vez ingresados los tarugos al laboratorio, fueron sometidos a varios procesos para la determinación del volumen, peso seco, densidad y concentración de carbono. A continuación, se detallan las distintas prácticas realizadas ordenadas cronológicamente.

1. Colocación de los tarugos en tubos de ensayo con agua y mantenerlos sumergidos durante tres días.
2. Tara de la balanza con un vaso de bohemia lleno de agua e introducción de los tarugos. Registro de los pesos de los mismos.
3. Secado de tarugos en estufa de circulación de aire forzada a 105 °C por 48 horas. Registro del peso y repetición del proceso. Control de que el peso sea constante.
4. Molienda de los tarugos en un molino eléctrico y afinamiento utilizando un mortero.
5. En tubos pyrex con rosca, se combinan 0,03 g de material (tarugo) seco y molido, 5 ml de agua desionizada, 5 ml de una solución de  $K_2CrO_7$  1N y 15 ml de  $H_2SO_4$  ppa. Además, se preparan 5 soluciones con una cantidad de carbono conocida para ser utilizadas como escala.
6. Introducción de los tubos pyrex en el bloque digestor a 150 °C durante 30 minutos. Dejarlos enfriar hasta llegar a temperatura ambiente.
7. Utilizando una pipeta, se coloca una porción de la solución en la celda del espectrofotómetro y se registra el valor de absorbancia para la longitud de onda de 600 nm. Repetir el procedimiento para obtener el duplicado técnico.

Para el cálculo del volumen, se tomó como referencia el Principio de Arquímedes que dice: “Todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un fluido recibe un empuje ascendente, igual al peso del fluido desalojado por el objeto” (Vité Terán, 2014, párr. 15). Como la densidad del agua es de  $1 \text{ g/cm}^3$ , el número de

gramos de masa del agua corresponde al número de centímetros cúbicos de volumen del objeto (Paso 2).

Conociendo el volumen y la masa expresada en gramos correspondiente al peso seco de los tarugos (Paso 3), se puede determinar la densidad básica de la madera a través de la siguiente fórmula:  $D = M / V$ ; donde D es la densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), M la masa (g) y V el volumen ( $\text{cm}^3$ ) (ANEXO B).

Continuando con los procedimientos realizados, se llevaron a cabo los pasos 4, 5, 6 y 7 para determinar la concentración de carbono en la madera. Una vez obtenidos los datos de absorbancia, se ajustó un modelo de regresión lineal utilizando los datos de concentración de carbono de la escala y la absorbancia, la cual fue posteriormente utilizada para la estimación de la concentración de carbono de las muestras.

Para transformar la masa de C contenida en la madera a masa de  $\text{CO}_2\text{e}$ , se multiplica a la primera por el coeficiente utilizado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2023), que corresponde a un valor de 3,67.

### **3.4. Análisis Estadístico**

Un aspecto clave a tener en cuenta es que este es un estudio observacional en el que se trabaja sobre una plantación comercial ya establecida, por lo que no hay diseño experimental y tampoco un modelo estadístico que represente la realidad de la muestra.

Con el fin de evaluar estadísticamente los datos obtenidos a campo y en el laboratorio, se llevaron a cabo una serie de procedimientos matemáticos utilizando el software “RStudio”. El principal objetivo es detectar si existen diferencias significativas de las distintas variables dasométricas entre el Silvo Sur y el Silvo Norte y comparar los aspectos vinculados al carbono entre clases diamétricas.

Con el muestreo estratificado realizado y comprobando el cumplimiento de algunos supuestos, se puede alcanzar el objetivo de analizar estadísticamente la población en estudio. El análisis se llevó a cabo con los datos individuales (229 árboles), buscando eliminar la varianza existente entre parcelas y aumentando la precisión de los resultados.

La distribución normal de los datos es uno de los supuestos que se desean verificar previo a realizar las pruebas de comparación, para esto se realizaron los

histogramas para todas las variables de la muestra. La otra condición que se debe cumplir para que la comparación sea válida es que las varianzas sean homogéneas (supuesto de homocedasticidad), para ello se utiliza el Test de Levene que plantea como hipótesis nula que la varianza es igual entre los grupos ( $p$ -valor  $> 0,05$  confirma este supuesto).

Una vez chequeados estos supuestos se procede a la comparación de las medias entre los grupos (Silvo Sur y Silvo Norte), para ello se utilizó la Prueba T de Student que permite determinar si las medias de dos grupos son significativamente diferentes con un 95% de confianza.

En lo que refiere a la comparación entre clases diamétricas, primero se realiza un ANOVA (Análisis de Varianza) que evidencia si existe o no diferencia entre al menos uno de los tres grupos. Si se detecta una diferencia significativa ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), se lleva a cabo un Test HSD de Tukey que permite perfilar la hipótesis alterna del ANOVA creando intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de las clases.

Además, para todas las comparaciones, se presenta un boxplot con el fin de generar una impresión visual de los datos, donde cada barra representa la totalidad de los datos y la línea horizontal negra corresponde a la mediana (estadístico de posición central que parte a la población en dos) y la línea horizontal roja corresponde a la media.

### **3.5. Balance de Carbono**

#### ***3.5.1. Emisiones de GEI***

Para la estimación de las emisiones de GEI, se utilizó la planilla brindada por la Ing. Agr. Adriana Bussoni, la cual se basa en las ecuaciones de estimación de IPCC (Hongmin et al., 2006). Entre los factores que se consideran en las mismas, se pueden encontrar: la ganancia diaria de las distintas categorías, la oferta de forraje, digestibilidad y proteína cruda, además de contemplar el gasto de energía realizado por los animales cuando se encuentran pastoreando.

Para adecuar esta planilla a la realidad de “Santa Magdalena”, se ingresaron los datos de existencias promedio por categoría en los últimos 4 años, que permite estimar en términos de CO<sub>2</sub>e la generación de gases como CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>.

### **3.5.2. Captura de GEI**

En lo que refiere a la fijación de estos gases, se considera a los montes implantados como un sumidero de carbono, por lo que las toneladas de CO<sub>2</sub>e que serán estimadas a través del trabajo a campo y laboratorio sumadas a las extraídas en los raleos, serán consideradas como la captura de GEI.

Los valores de ton CO<sub>2</sub>e calculados, corresponden a lo acumulado únicamente en el fuste y la corteza, por lo que se considera adecuado agregar lo fijado en las ramas. Con este fin, utilizando la función de Petterson (Petterson, 1955, como se cita en Gasparri, 2019) y teniendo en cuenta el DAP y la altura de los árboles, se obtiene la masa de ramas expresada en kg/individuo.

Como resultado de los procedimientos mencionados anteriormente se obtiene un valor de toneladas de CO<sub>2</sub>e/ha en fuste y ramas. No se tiene en cuenta lo fijado en las raíces y el follaje.

La superficie considerada corresponde únicamente a la ocupada por árboles, sin tener en cuenta bajos o zonas de alta pedregosidad ubicadas dentro del SSP pero sin cobertura arbórea; ya que, considerar estas áreas, implicaría sobreestimar la capacidad de captura de carbono.

Con el objetivo de hacer el contraste entre emisiones y captura, los valores serán anualizados, dividiendo la masa de carbono actual entre la edad del monte.

### **3.5.3. Balance Total**

Como fue definido en la revisión bibliográfica, el balance surge del contraste entre las emisiones y la captura de CO<sub>2</sub>e en una determinada superficie. Para el caso de estudio, se realizarán dos balances, uno evaluará el área estrictamente silvopastoril, y el segundo cuantifica el aporte ambiental que genera el monte en estudio sobre todo el predio.

### **3.5.4. Mercados de Carbono**

A través de una entrevista realizada al Ing. Agr. A. Inthamoussu (comunicación personal, 22 de agosto, 2023), consultor en cambio climático y desarrollo sostenible, se destaca la siguiente información:

- El mercado de los créditos de carbono es de tipo voluntario, es decir, quienes participan en el mismo no tienen ninguna obligación de hacerlo; son

relaciones entre el que provee el crédito y quien lo compra. A diferencia de los mercados abiertos, en muchos casos no existe registro disponible.

- A nivel mundial, es un mercado en auge, con una buena demanda por créditos de carbono. En Uruguay comenzó a funcionar en 2018, donde tuvo un crecimiento explosivo y actualmente se encuentra estabilizado.
- Para generar los créditos de carbono se debe presentar una serie de documentos a estándares internacionales como lo son Verra y Gold Standard. Estos organismos son quienes registran los proyectos que luego van a ser comercializados y para ello se deben cumplir una serie de requisitos.
- Los créditos se generan en base a las toneladas de carbono capturadas por encima de la situación base (ausencia de proyecto). Un aspecto a tener en cuenta es que no todo el carbono capturado es transformado a créditos, ya que, para asegurar la permanencia a largo plazo de los mismos, se hace una proyección a 100 años y se promedia la captura de CO<sub>2</sub>. Esto implica que se deben hacer rotaciones de más de un ciclo.
- Algunos de los requisitos que se necesitan para registrar un proyecto son: máximo 3 años desde su inicio, no se pueden realizar sobre ecosistemas naturales y se debe demostrar la adicionalidad del mismo.
- El precio de estos créditos es muy variable, siendo la forma en que se genera el crédito quien determina el valor. En este sentido, los proyectos silvopastoriles pueden generar créditos de alto valor por sus diferentes impactos (ambiental, social y económico).
- Actualmente, las plantaciones forestales típicas venden bonos de carbono a 20 U\$D. En un sistema silvopastoril, se espera un ingreso de por lo menos 25 U\$D/bono.
- A futuro, el mercado de los créditos de carbono tiene mucho para desarrollarse, no solo por el mercado voluntario, sino también por un mercado relacionado con los “Compromisos país”, generando un mercado más firme y de mejores precios. Dentro de estos “Compromisos país”, se destaca la reducción de la intensidad de las emisiones de GEI, preservando el 100% del bosque nativo y aumentando las reservas de carbono a través del manejo forestal.

### 3.6. Análisis Económico y Financiero

Uno de los objetivos del trabajo final de grado fue determinar la viabilidad financiera de este tipo de sistemas, por lo que se realizó un flujo de fondos que permitió estimar diferentes indicadores financieros. Considerando que un flujo se compone de las partidas: inversión, egresos e ingresos, se utilizan una serie de supuestos, así como datos de costos y precios que permiten estimarlos de forma adecuada.

Para comenzar el análisis, se asumió que el objetivo del sistema corresponde a la venta de madera de diámetros gruesos, libre de nudos y de calidad a una edad aproximada de 18 años, obteniendo ingresos intermedios correspondientes al raleo comercial y la ganadería.

La principal inversión considerada correspondió a la compra de 138 ha, estimando su valor a partir del promedio del precio de compraventa de tierra en el departamento de Florida en una serie de años de 2016-2022 (DIEA, 2017, 2020b, 2021b, 2022b, 2023). Vale aclarar que, si bien la inversión en tierra reportada corresponde a 3.660 USD/ha, al llevarlo a hectárea efectiva el costo unitario de la inversión toma un valor superior (5.500 USD/ha efectiva), tal como se expresa en la Tabla 26.

Sobre esta tierra se contempla la instalación del monte de *E. grandis* en los arreglos antes mencionados. Teniendo en cuenta que se trata de una plantación sobre campo natural, se asume que se llevaron a cabo un conjunto de actividades imprescindibles para lograr buenos crecimientos (Tabla 6). Se sugiere un control de hormiga sistemático y un control total de plantas competidoras con glifosato, para luego proceder con el laboreo del sitio. Debido a que la zona en cuestión presenta pedregosidad, se considera que se ejecutó un subsolado para asegurar un adecuado desarrollo radicular de los plantines y que haya una distribución uniforme de la humedad en profundidad, para luego proceder con el laboreo y afinado por medio de herramientas tales como la excéntrica y disquera.

Al momento de la plantación, se contempla una fertilización localizada (10 g Osmocote/planta) para estimular el crecimiento temprano. Se estima un porcentaje de falla del 10%, por lo que se considera un monto de dinero para la

reposición. La aplicación de un herbicida preemergente para prevenir la aparición de malezas constituye la última actividad a tener en cuenta dentro de la plantación.

A excepción de los costos de laboreo que fueron obtenidos de la Cámara Uruguaya de Servicios Agropecuarios (CUSA, 2023), el resto de los costos no son actualizados y están en USD, puesto que se extraen de la “Tercera Encuesta de Servicios Forestales” (Boscana & Arriaga, 2021), fuente considerada objetiva y real para la estimación de costos. Es por esto que, para hacer la presupuestación más precisa, se corrigen por el TC (41 vs 38) y por la inflación (estimado un 8% IPC). A su vez, el costo de plantación propiamente dicho se corrige para la densidad del caso de estudio, puesto que en la fuente en cuestión el costo de la misma está asociado a una plantación de 850 pl/ha. Así, se obtuvo un costo de plantación alrededor de los 668 USD/ha.

**Tabla 6**

*Costos de implantación del sistema silvopastoril*

<b>Costo de implantación (625 plantas/ha)</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo/ha</b>
Presentación del proyecto	USD/ha	<b>15</b>
<b>Preparación del sitio</b>		
Marcación de rodales	USD/ha	<b>20,3</b>
Control de hormigas	USD/ha	<b>35,9</b>
Control de malezas emergidas	USD/ha	<b>57,4</b>
<b>Laboreo</b>		
Subsolado (CUSA, 2023)	USD/ha	<b>105,8</b>
Excéntrica (CUSA, 2023)	USD/ha	<b>71,1</b>
Disquera (CUSA, 2023)	USD/ha	<b>44,7</b>
<b>Plantación</b>		
Plantines + Servicio de plantación	USD/ha	<b>187,7</b>
Reposición	USD/ha	<b>16,6</b>
<b>Post – plantación</b>		
Control de hormigas localizado	USD/ha	<b>51,5</b>
Control de malezas	USD/ha	<b>62,2</b>
<b>TOTAL</b>	<b>USD/ha</b>	<b>668,2</b>

Para la estimación del costo más importante como lo son los tratamientos silvícolas, se consultó al referente en sistemas silvopastoriles J. Dutra Da Silveira (comunicación personal, 18 de setiembre, 2023), aportando los valores presentes en la Tabla 7; mientras que, para las partidas correspondientes al asesoramiento forestal y planimetría e inventarios se consultó a la Ing. Agr. A. Martinez (comunicación personal, 20 de setiembre, 2023).

Por último, el costo de tasas e impuestos para el caso de estudio se obtuvo de la tesis “Evaluación económica y productiva *Eucalyptus grandis* en dos intensidades de raleo en Uruguay” (Balestí et al., 2022), la cual se basó en el mismo establecimiento para realizar la investigación.

**Tabla 7**

*Costo de tratamientos intermedios*

<b>Actividad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo/ha</b>	<b>Costo total</b>
<b>Raleo 2016</b>	124	USD/ha	92	124	11.408
<b>Poda 2016</b>	0,25	USD/árbol	37.720	102,5	9.430
<b>Poda 2018</b>	0,35	USD/árbol	37.720	143,5	13.202
<b>Raleo 2020</b>	13	USD/m <sup>3</sup>	6937	980	90.178
<b>Poda 2021</b>	0,5	USD/árbol	14.168	77	7.084

En cuanto a la generación de ingresos, se pueden diferenciar en dos grupos principales, aquellos generados por la ganadería que tienen un carácter anual, aportando liquidez al sistema y los provenientes de los raleos y cosecha final que se dan en algunos años específicos.

Dada la escasez de información sobre la actividad ganadera en el establecimiento, a modo de ejercicio, se asumió un ingreso por renta de 70 USD/ha afectada/año. Se promedia el precio de arrendamientos ganaderos de los últimos tres años en el departamento (DIEA, 2020a, 2021a, 2022a), penalizando en un 20% por la presencia del monte en gran parte de la superficie.

El primer paso para la estimación de los ingresos correspondientes a la actividad forestal es conocer la cantidad de madera que se produjo en el sistema silvopastoril. Para ello se utilizó el software de INIA conocido como Sistemas de Apoyo a la Gestión (SAG), utilizando los datos de inventario y se tomaron los siguientes supuestos: rolos cuyo diámetro mínimo sea mayor a 30 cm serán destinadas a la exportación en trozas de 5,8 m de largo; aquellos de diámetro mínimo entre 25-30 cm se destinarán a aserradero nacional en trozas de 2,5 m y por

último, aquellas trozas de diámetro entre 9-25 cm de destinarán a la industria de los puntales, cuyo largo es de 3 m.

Al ejecutar la proyección (Tabla 8), se estimó que en el primer raleo (2016) no se extrajo un gran volumen de madera, la cual no se comercializa y fue destinada a consumo propio. En cambio, en el segundo raleo se estima que la cantidad de madera extraída fue del orden de los 75 m<sup>3</sup>/ha, asociado a que fue una operación de mayor magnitud (se raleó un mayor número de árboles y de mayor tamaño). El destino de dicha madera fue la producción de puntales.

**Tabla 8**

*Simulación SAG: producción de madera del sistema según destino*

Actividad	Exportación		Aserrado		Puntales		Desperdicio
	m <sup>3</sup> /ha	Nº trozas	m <sup>3</sup> /ha	Nº trozas	m <sup>3</sup> /ha	Nº trozas	
<b>Raleo 1</b>					0	0	1,2
<b>Raleo 2</b>					75,39	1.166	4,0
<b>Cosecha</b>	197,2	263	64,8	348	45,4	441	3,1
<b>TOTAL</b>	<b>197,2</b>	<b>263</b>	<b>64,8</b>	<b>348</b>	<b>120,79</b>	<b>1.607</b>	<b>8,3</b>

Con el objetivo de valorizar la producción, se busca estimar el precio en pie del monte considerando los posibles destinos de sus trozas. Para ello se descuenta al valor en puerta de fábrica, el costo de cosecha, carga, transporte y enchapado/pintura en caso de ser necesario.

En el caso de las trozas podadas para exportación, el destino final es Asia, fundamentalmente China y Vietnam (Boragno & Boscana, 2022). Al tratarse de un productor independiente, se considera muy difícil la exportación por su cuenta, por lo que se asume la venta a empresas que se encarguen de la comercialización con el exterior, dentro de las que encontramos a COFUSA, AF, FAS, TGL o IDALEN (Boragno & Boscana, 2022). De esta forma, se asume un precio en puerta de fábrica de 100 U\$/m<sup>3</sup>, de acuerdo a lo consultado al Ing. Agr. A. Quintela (comunicación personal, 2 de octubre, 2023), director de AGRIFOX, empresa forestal con experiencia en la comercialización y exportación de este tipo de productos.

El flete es uno de los eslabones más inestables dentro de la cadena forestal, debido a que su tarifa va a ser fuertemente dependiente del valor del combustible (tendiente a la suba), actualizando según una paramétrica ya establecida por las

empresas forestales. Para su estimación se considera un precio de 80 \$/km en camiones de 30 ton., según establece R. Souza (comunicación personal, 29 de setiembre, 2023), empleado de “Transportes El Pinga”; contemplando para cada caso la distancia a cada uno de los destinos y el contenido de humedad con el que van las trozas (ANEXO C).

Cuando los rolos van hacia el puerto de Montevideo (exportación) y alrededores (aserrado) recorren 122 y 100 km respectivamente, con un oreo durante el viaje del 5%; mientras que, en el caso de la madera para impregnación se asume que va con un 70% de humedad y una distancia de 120 km.

La madera de calidad tiene un costo extra, que corresponde a la pintura y enchapado (gang nail), con el fin de evitar que la madera se raje. De esta forma, se asume un costo de 4 USD/m<sup>3</sup> según lo consultado con la empresa vendedora DISTRIMAR (comunicación personal, 2 de octubre, 2023).

Para obtener el valor en pie del monte, lo único que falta es descontar el costo de extracción, cosecha y carga, los cuales en un arreglo silvopastoril son más baratos, teniendo en cuenta que son menos árboles, más gruesos (factor=1), desramados y hay más espacio, facilitando la extracción.

Como resultado de este proceso, se asume un determinado valor en pie de la madera presente en “Santa Magdalena” que se expresa en el cuadro a continuación (Tabla 9).

**Tabla 9**

*Valorización de la madera según destino*

	<b>Exportación</b>	<b>Aserrado</b>	<b>Puntales</b>
<b>Costo cosecha y carga (USD/m<sup>3</sup>)</b>	14	11	13
<b>Costo traslado (USD/m<sup>3</sup>)</b>	8,13	6,67	5,89
<b>Precio en fábrica (USD/m<sup>3</sup>)</b>	100	51,4	56,6
<b>Costo enchapado y pintura (USD/m<sup>3</sup>)</b>	4	0	0
<b>Valor en pie monte (USD/m<sup>3</sup>)</b>	<b>73,87</b>	<b>33,7</b>	<b>37,8</b>

Una vez estimadas las distintas partidas, se procede a realizar el flujo de fondos, a partir del cual se obtendrá un Flujo Neto de Caja anual y se calcularán los indicadores financieros que permitan evaluar la viabilidad del proyecto. Para el caso en estudio, se establece un costo de oportunidad del 7%, teniendo en cuenta la rentabilidad de las inversiones forestales y ganaderas que son llevadas a cabo en la zona.

Estos indicadores corresponden al Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR); siendo el VAN la equivalencia presente de los ingresos y egresos que genera una inversión, mientras que la TIR es la tasa de descuento a partir de la cual los beneficios de la inversión cubren los costos de operación, de inversión y los costos de oportunidad (Álvarez et al., 2020).

#### 4. Resultados y Análisis

Este capítulo se dividirá en varias partes, en la primera, se presentarán y describirán los resultados obtenidos a campo mediante la realización del inventario, en la segunda parte se mostrarán los datos característicos de la madera (peso, volumen, densidad, %C) y en la tercera parte, se ilustran los resultados tendientes a determinar la viabilidad financiera del proyecto.

##### 4.1 Resultados de Inventario

En esta primera tabla de resultados (Tabla 10), se presentan los datos de población en las distintas parcelas. Como se puede apreciar, el promedio de árboles en pie es de 21, lo que coincide con uno de los objetivos planteados a la hora de realizar el inventario (incluir, al menos, 20 árboles por parcela).

**Tabla 10**

*Densidades por parcela*

<b>Parcela</b>	<b>Arb. en pie /parcela</b>	<b>Arb. raleados/ parcela</b>	<b>Arb. faltantes/ parcela</b>	<b>Arb. a la plantación/parcela</b>
<b>RIC59</b>	22	28	33	83
<b>RIC60</b>	20	31	23	74
<b>RIC61</b>	19	38	26	83
<b>RIC62</b>	23	25	23	71
<b>RIC63</b>	15	27	12	54
<b>RIC64</b>	21	49	10	80
<b>RIC65</b>	22	37	12	71
<b>RIC66</b>	21	40	27	88
<b>RIC67</b>	22	36	30	88
<b>RIC68</b>	21	45	5	71
<b>RIC69</b>	22	38	12	72
<b>PROM.</b>	<b>21</b>	<b>36</b>	<b>19</b>	<b>76</b>

A pesar de que el productor reporta una densidad inicial de plantación 625 arb/ha, al momento de realizar el inventario contemplando los faltantes y raleados, se obtuvo un valor promedio menor (560 arb/ha). Puede ser explicado por zonas en las cuales no se pudo plantar y también por la falta de precisión a la hora de llevar a cabo el arreglo estipulado, representado en la Tabla 4, donde se ve que el ancho de callejón promedio es variable.

A diferencia del ítem anterior, la densidad actual estimada es de 154 arb/ha, ajustándose a lo propuesto en el plan de manejo silvicultural. La variación existente entre parcelas se comporta dentro de rangos normales, considerando que se realizaron raleos seleccionando individuos con destino comercial.

**Tabla 11***Densidades por hectárea*

Parcela	Densidad inicial (arb/ha)	Densidad actual (arb/ha)
RIC59	581	154
RIC60	515	139
RIC61	595	136
RIC62	573	185
RIC63	452	126
RIC64	518	136
RIC65	591	183
RIC66	479	114
RIC67	597	149
RIC68	611	181
RIC69	634	194
<b>PROMEDIO</b>	<b>559</b>	<b>154</b>
<b>Desvío estándar</b>	<b>58,5</b>	<b>27,2</b>
<b>CV (%)</b>	<b>10,5</b>	<b>17,6</b>

**4.1.1. Primera Medición**

Como se ilustra en la Tabla 12, la altura promedio (H prom) de los árboles en la primera medición fue de 21,6 m, medida a los 10 años y 2 meses de edad. Si analizamos los valores por área Norte (RIC64 – RIC69) y Sur (RIC59 – RIC63) se observa que los valores más altos se obtienen en área Norte con respecto al Sur, promediando 22 y 21,1 m por parcela respectivamente.

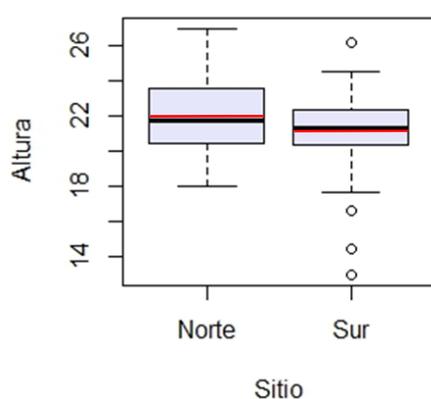
**Tabla 12***Datos dasométricos por parcela en la primera medición*

Parcela	H prom(m)	DAP prom(cm)	AB (m <sup>2</sup> /parcela)	Vol (m <sup>3</sup> /parcela)
RIC59	22,4	30,9	1,7	14,9
RIC60	21,5	29,3	1,4	11,7
RIC61	19,1	24,7	1,0	7,4
RIC62	22,0	28,9	1,5	13,3
RIC63	20,5	26,4	0,8	6,8
RIC64	20,5	31,3	1,6	13,4
RIC65	22,8	31,0	1,7	15,3
RIC66	20,1	27,9	1,3	10,4
RIC67	25,0	33,0	1,9	18,9
RIC68	21,3	31,2	1,6	13,8
RIC69	22,3	30,2	1,6	14,2
<b>PROM</b>	<b>21,6</b>	<b>29,5</b>	<b>1,5</b>	<b>12,7</b>
<b>Desv. est.</b>	<b>1,6</b>	<b>2,4</b>	<b>0,3</b>	<b>3,5</b>
<b>CV (%)</b>	<b>7,3</b>	<b>8,2</b>	<b>21,9</b>	<b>27,6</b>

Al analizar estadísticamente los datos de esta variable, se comprueba su distribución normal (ANEXO D) y una aproximación al cumplimiento de homocedasticidad ( $Pr > F = 0,04576$ ); este valor puede haber sido afectado por los raleos realizados previo a la medición. Cuando se procede a realizar la Prueba T de Student, se obtiene un p-valor de 0,002508 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se asegura con un 95% de confianza que existe una diferencia significativa entre la altura de los árboles del Silvo Sur y del Silvo Norte (Figura 8).

### Figura 8

*Media y mediana de la altura (m) de los árboles por sitio en 2022*

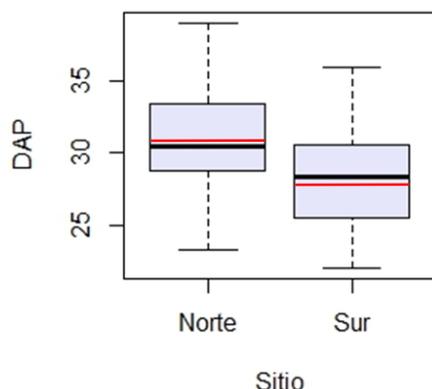


Esta misma tendencia de mayores valores en el Silvo Norte se observa también con los valores del diámetro a la altura del pecho (DAP). En este caso las 11 parcelas promediaron 29,5 cm, mientras que las correspondientes al Silvo Norte alcanzaron una media de 30,8 cm y en el Silvo Sur el DAP promedio fue de 28,0 cm.

Al igual que para la variable altura, se chequearon los supuestos de distribución normal (ANEXO E) e igualdad de varianzas a través del Levene test ( $Pr > F = 0,4589$ ) y se comprobó que las medias para el Silvo Sur y Norte son significativamente diferentes con un p-valor igual a  $1,44 e^{-08}$  (Figura 9).

**Figura 9**

Media y mediana del DAP (cm) de los árboles por sitio en 2022



Una vez pasados los datos anteriores a valores por hectárea (Tabla 13), se pueden observar comportamientos similares: mayor área basal y volumen por hectárea en las parcelas ubicadas en el Silvo Norte con respecto al Silvo Sur.

**Tabla 13**

Datos dasométricos por hectárea en la primera medición.

Silvo	Parcela	AB (m <sup>2</sup> /ha)	AB prom (m <sup>2</sup> /ha)	Vol (m <sup>3</sup> /ha)	Vol prom (m <sup>3</sup> /ha)
Sur	RIC59	11,6	9,4	104,2	80,5
	RIC60	9,4		81,1	
	RIC61	6,9		52,7	
	RIC62	12,3		107,1	
	RIC63	6,9		57,2	
Norte	RIC64	10,5	12,0	86,8	107,3
	RIC65	13,9		127,6	
	RIC66	7,1		56,6	
	RIC67	12,8		128,3	
	RIC68	14,0		119,1	
	RIC69	14,0		125,3	
<b>PROMEDIO</b>			<b>10,9</b>		<b>95,1</b>
<b>Desvío estándar</b>			<b>2,9</b>		<b>29,7</b>
<b>CV (%)</b>			<b>26,5</b>		<b>31,3</b>

En lo que refiere al área basal, se obtuvo un valor promedio de 10,9 m<sup>2</sup>/ha, siendo el mismo de 12 para el Silvo Norte y 9,4 para el Silvo Sur con valores dentro de este último muy bajos como los de las parcelas RIC61 y RIC63. Con el volumen sucede lo mismo, un promedio de 95,1 m<sup>3</sup>/ha y valores promedio de 80,5 m<sup>3</sup>/ha para la zona Sur y 107,3 m<sup>3</sup>/ha para la zona Norte (33% superior).

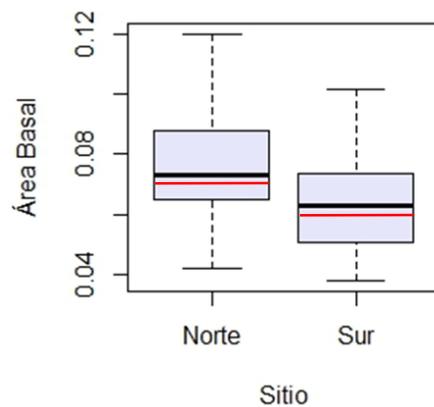
Como fue mencionado en el capítulo de Materiales y Métodos, el análisis estadístico fue realizado con los datos individuales para aumentar la potencia del

mismo, por lo que para estas variables (AB y Vol) los valores que se observan en las figuras no coinciden con los valores de las tablas que están expresados por parcela y por hectárea (siendo valores individuales los representados en las figuras).

Para ambas variables se observa una distribución de los datos que se asemeja a una distribución normal (ANEXO F Y ANEXO G) y se verifica la homocedasticidad con  $Pr > F$  de 0,8596 y 0,2572 para AB y Vol respectivamente. En términos de área basal, se establece una diferencia significativa entre las medias del Silvo Sur y Norte con un p-valor =  $1,802 e^{-08}$  (Figura 10). Lo mismo sucede con el volumen como se observa en la Figura 11, comprobado a través de la Prueba t con un p-valor de  $6,95 e^{-09}$ .

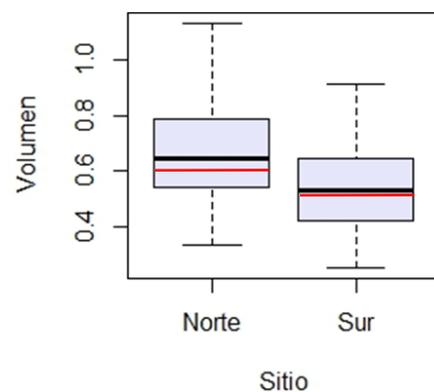
**Figura 10**

*Media y mediana del área basal ( $m^2$ ) de los árboles por sitio en 2022*



**Figura 11**

*Media y mediana del volumen ( $m^3$ ) de los árboles por sitio en 2022*



#### 4.1.2. Segunda Medición

A partir del inventario realizado el 7 de julio de 2023, se pudo comprobar que las tendencias vistas en la primera medición se mantienen sin variaciones. Tal como se ve en las Tablas 14 y 15, el Silvo Norte muestra mejores valores en cuanto a altura y DAP, lo que trae como consecuencia valores superiores de Área Basal y Volumen por ha. Los crecimientos en los 7 meses estudiados no han sido relevantes, mostrando un aumento promedio de 0,8 m de altura y 0,3 cm de DAP.

**Tabla 14**

*Datos dasométricos por parcela en la segunda medición*

<b>Parcela</b>	<b>Hprom(m)</b>	<b>DAPprom(cm)</b>	<b>AB(m<sup>2</sup>/parcela)</b>	<b>Vol(m<sup>3</sup>/parcela)</b>
<b>RIC59</b>	23,6	31,0	1,7	15,8
<b>RIC60</b>	22,9	29,5	1,4	12,7
<b>RIC61</b>	19,8	25,1	1,0	7,9
<b>RIC62</b>	22,8	29,0	1,5	13,9
<b>RIC63</b>	21,6	26,7	0,8	7,3
<b>RIC64</b>	21,7	31,5	1,6	14,4
<b>RIC65</b>	23,9	31,2	1,7	16,2
<b>RIC66</b>	20,5	28,1	1,3	10,8
<b>RIC67</b>	25,2	33,3	1,9	19,4
<b>RIC68</b>	22,0	31,5	1,7	14,6
<b>RIC69</b>	22,7	30,8	1,7	15,1
<b>PROM.</b>	<b>22,4</b>	<b>29,8</b>	<b>1,5</b>	<b>13,5</b>
<b>Desv. est.</b>	<b>1,53</b>	<b>2,4</b>	<b>0,3</b>	<b>3,6</b>
<b>CV (%)</b>	<b>6,8</b>	<b>8,0</b>	<b>21,8</b>	<b>26,7</b>

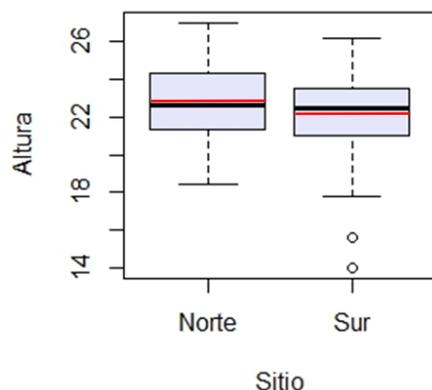
De la misma forma que fueron analizados los resultados obtenidos en el primer inventario, a continuación, se presenta el análisis estadístico realizado para este segundo inventario.

En cuanto a la distribución de los datos, como era de esperarse, los histogramas de las cuatro variables (H, DAP, AB y Vol) continúan presentando una distribución normal (ANEXO H). Además, al realizar el Test de Levene, se obtienen valores superiores a 0,05 en todos los casos (ANEXO I), aceptando la hipótesis nula y confirmando el supuesto de homogeneidad de varianzas.

Al comparar las medias entre sitios para las distintas variables a través de la Prueba T, se observa como para la altura, se obtiene un p-valor de 0,07077 que se puede interpretar como que no existen diferencias significativas entre ambos grupos (Figura 12). Sin embargo, las demás variables si expresan diferencias estadísticamente significativas con p-valores < 0,05 (ANEXO J).

**Figura 12**

Media y mediana de la altura (m) de los árboles por sitio en 2023

**Tabla 15**

Datos dasométricos por hectárea en la segunda medición

Silvo	Parcela	AB (m <sup>2</sup> /ha)	AB prom (m <sup>2</sup> /ha)	Vol (m <sup>3</sup> /ha)	Vol prom (m <sup>3</sup> /ha)
Sur	RIC59	11,7	9,6	110,8	85,9
	RIC60	9,6		88,2	
	RIC61	7,2		56,8	
	RIC62	12,4		112,3	
	RIC63	7,1		61,3	
Norte	RIC64	10,7	12,3	92,9	112,8
	RIC65	14,1		135,0	
	RIC66	7,2		58,6	
	RIC67	13,1		131,9	
	RIC68	14,2		125,4	
	RIC69	14,6		132,7	
<b>PROMEDIO</b>			<b>11,1</b>		<b>100,5</b>
<b>Desvío estándar</b>			<b>2,9</b>		<b>30,8</b>
<b>CV (%)</b>			<b>26,5</b>		<b>30,6</b>

A modo de resumen, en la Tabla 16 se puede ver el aumento relativo en volumen por hectárea entre los inventarios (período de 7 meses, estandarizado por año), representado a través del ICA. A diferencia de lo que se analizó en los cuadros anteriores, las parcelas del Silvo Norte y Silvo Sur no manifiestan diferencias claras en este ítem, presentando valores de ICA en torno a los 9,36 m<sup>3</sup>/ha/año.

Estadísticamente, este indicador no presentó una distribución normal (ANEXO K) y no se detectaron diferencias significativas entre sitios (p-valor = 0,4756).

En lo que refiere al IMA la realidad es otra, mostrando una distribución normal de los datos (ANEXO L) y cómo los valores son significativamente superiores ( $p\text{-valor} = 7,79 e^{-08}$ ) en las parcelas del Norte con respecto a las del Sur, con valores de aproximadamente 10,4 y 7,9 m<sup>3</sup>/ha/año respectivamente.

De los valores de ambos indicadores antes estudiados se puede extraer que, si bien los crecimientos en el período comprendido entre diciembre 2022 y julio 2023 no hubo diferencias en los crecimientos entre sitios (ICA), si lo hubo a lo largo de los 10-10,5 años de plantación, puesto que los valores de IMA del Silvo Norte fueron en promedio superiores a los del Silvo Sur.

Si se contrastan los datos obtenidos a campo con registros bibliográficos, se puede ver como los incrementos de toda la plantación se adecuan a la bibliografía, siempre y cuando se extrapole la densidad del monte en estudio con la densidad de la fuente con la cual se compara (Balmelli & Resquín, 2002).

La sequía que atraviesa el país y la región de Florida en los últimos tres años, puede ser una limitante para el desarrollo de los árboles en el período estudiado. En lo que refiere al periodo entre mediciones, se registraron precipitaciones acumuladas de 265 mm; valor que se encuentra muy por debajo de los promedios para la región.

**Tabla 16**

*Indicadores de crecimiento: Variación de volumen, ICA e IMA*

<b>Parcela</b>	<b>Δ Volumen (m<sup>3</sup>/ha)</b>	<b>Δ Volumen (%)</b>	<b>ICA (m<sup>3</sup>/ha/año)</b>	<b>IMA (m<sup>3</sup>/ha/año)</b>
<b>RIC59</b>	6,55	6,3	11,23	10,22
<b>RIC60</b>	7,12	8,8	12,20	8,14
<b>RIC61</b>	4,07	7,7	6,98	5,24
<b>RIC62</b>	5,21	4,9	8,93	10,37
<b>RIC63</b>	4,16	7,3	7,13	5,66
<b>RIC64</b>	6,13	7,1	10,52	8,58
<b>RIC65</b>	7,44	5,8	12,76	12,46
<b>RIC66</b>	2,05	3,6	3,52	5,41
<b>RIC67</b>	3,62	2,8	6,20	12,17
<b>RIC68</b>	6,32	5,3	10,83	11,57
<b>RIC69</b>	7,38	5,9	12,65	12,25
<b>PROM.</b>	<b>5,46</b>	<b>6,0</b>	<b>9,36</b>	<b>9,28</b>

## 4.2. Resultados de Laboratorio

El primer resultado obtenido en el laboratorio fue el de las variables de la madera como son la masa, el volumen y la densidad. A partir de estos valores se obtuvo una densidad básica promedio para todos los tarugos de  $457,29 \text{ kg/m}^3$ , ajustándose a los registros bibliográficos de la especie, los cuales indicarían que la densidad de la madera de *E. grandis* tendrá un 0,95 de probabilidad de tomar valores entre  $328$  y  $599 \text{ kg/m}^3$  (Böthig, 2001).

Las gráficas que representan los puntos de la escala utilizados para la determinación de carbono y sus respectivas ecuaciones se pueden observar en el ANEXO M.

En la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos a través de los distintos métodos llevados a cabo en el laboratorio, obteniendo el porcentaje de carbono como indicador de referencia. El valor promedio obtenido es de 40,7%. Se ubica por debajo de los escasos registros bibliográficos, que establecen que el porcentaje de carbono en el fuste y corteza de *E. grandis* (componentes extraídos para estimación) es de 45,1% y 41,8%, respectivamente (Díaz & Molano, 2001).

Se puede ver la superioridad en concentración de carbono de los tarugos extraídos del Silvo Norte con respecto a los del Silvo Sur, siendo un 42,8 % en el primer caso -ajustándose a bibliografía- y 38,1% en el segundo caso (Tabla 18).

Tabla 17

*Determinación de carbono (%C) y CO<sub>2</sub>e por clase diamétrica*

Parcela	Clase diamétrica	Volumen (m <sup>3</sup> /ha)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Masa madera (ton/ha)	%C	Masa CO <sub>2</sub> e (ton/ha)
RIC59	1	10,53	383,4	4,0	37,4	5,5
	2	59,75	434,0	25,9	31,9	30,4
	3	33,93	413,1	14,0	33,0	17,0
RIC60	1	30,43	447,6	13,6	40,4	20,2
	2	35,24	395,0	13,9	40,6	20,7
	3	15,41	461,7	7,1	41	10,7
RIC61	1	25,34	420,0	10,6	39,1	15,3
	2	20,31	493,0	10,0	37,6	13,8
	3	7,10	460,5	3,3	39,2	4,7
RIC62	1	36,64	368,7	13,5	35,9	17,8
	2	52,52	391,6	21,0	35,1	27,0
	3	16,94	460,1	7,8	39,3	11,3
RIC63	1	21,89	431,8	9,5	40,2	13,9
	2	24,47	461,9	11,3	38,6	16,0
	3	10,83	426,2	4,6	41,8	7,1
RIC64	1	30,74	467,9	14,4	34,9	18,4
	2	38,16	529,6	20,2	45,0	33,4
	3	17,89	473,0	8,5	46,5	14,4
RIC65	1	11,50	398,2	4,6	45,3	7,6
	2	53,64	507,6	27,2	46,6	46,6
	3	62,44	437,3	27,3	44,3	44,4
RIC66	1	5,96	486,9	2,9	42,1	4,5
	2	31,07	433,4	13,5	44,9	22,2
	3	19,55	471,2	9,2	47,2	15,9
RIC67	1	50,45	415,6	21,0	44,3	34,1
	2	22,20	467,0	10,4	42,6	16,2
	3	55,60	457,8	25,5	39,4	36,8
RIC68	1	16,73	534,6	8,9	41,0	13,4
	2	46,70	553,4	25,8	43,7	41,4
	3	55,63	555,5	30,9	41,4	46,9
RIC69	1	14,71	455,6	6,7	41,3	10,2
	2	49,15	453,2	22,3	42,6	34,8
	3	61,41	543,8	33,4	38,1	46,7

**Tabla 18***Determinación de carbono (%C) y CO<sub>2</sub>e por parcela*

<b>Parcela</b>	<b>% C</b>	<b>Masa CO<sub>2</sub>e (ton/ha)</b>
<b>RIC59</b>	34,09	53,48
<b>RIC60</b>	40,67	52,62
<b>RIC61</b>	38,61	34,22
<b>RIC62</b>	36,78	58,81
<b>RIC63</b>	40,17	37,09
<b>RIC64</b>	42,16	65,82
<b>RIC65</b>	45,40	95,16
<b>RIC66</b>	44,70	43,05
<b>RIC67</b>	42,09	88,52
<b>RIC68</b>	42,00	100,53
<b>RIC69</b>	40,67	90,54

Estadísticamente, los datos de porcentaje de carbono se distribuyen de forma normal y sus varianzas son homogéneas ( $Pr > F = 0,7103$ ); a su vez, la diferencia entre las medias del Silvo Sur y el Silvo Norte, resulta significativa con un p-valor de  $9,798 e^{-05}$ .

En cuanto al dióxido de carbono equivalente, se obtuvo un promedio de 65,44 ton CO<sub>2</sub>e/ha, con valores que oscilan entre los 34,22 ton/ha en RIC61 y 100,53 ton/ha en RIC68 (Tabla 18). Estos valores son el producto de las distintas variables de la madera, por lo tanto, van a seguir existiendo diferencias entre Silvo Norte y Silvo Sur.

Al graficar la distribución de los datos del CO<sub>2</sub>e en el histograma (ANEXO N) no se observa una distribución claramente normal, por lo que se procede a realizar la Prueba de Kolmogorov-Smirnov la cual resulta en un p-valor de 0,2328 por lo que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula (distribución normal).

Para el Silvo Norte, el mayor aporte de volumen en conjunto con los valores aceptables de %C conllevan a obtener una masa de CO<sub>2</sub>e de 80,60 ton/ha en promedio, lo que se adecua a los valores obtenidos por García (2019) para montes de similares características. En cambio, la combinación de los bajos volúmenes de madera y el bajo %C del Silvo Sur, tienen como consecuencia una baja captura de GEI correspondiente a 47,25 ton/ha CO<sub>2</sub>e.

Cuando los datos son segregados por clase diamétrica, se observa que, estadísticamente el volumen de madera no es significativamente diferente entre

clases ( $p$ -valor = 0,09177), pero como se aprecia en la Figura 13, existe una superioridad del mismo principalmente en las clases diamétricas superiores.

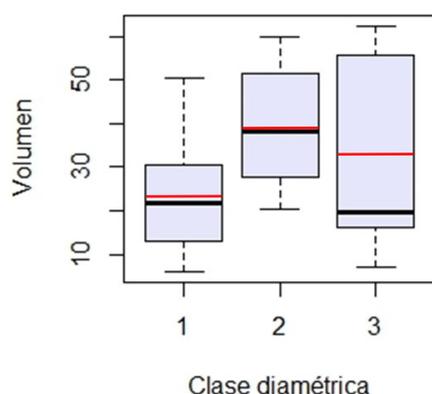
**Tabla 19**

*Caracterización de volumen de madera y carbono por clase diamétrica*

Clase diamétrica	Nº de árboles	Vol/arb (m <sup>3</sup> )	Vol/ha (m <sup>3</sup> )	% C	Masa CO <sub>2</sub> e (ton/ha)
1	72	0,48	23,17	40,2	14,6
2	98	0,60	39,47	40,8	27,5
3	59	0,80	32,43	41,0	23,3

**Figura 13**

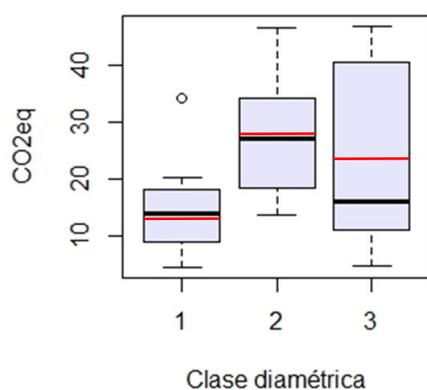
*Media y mediana del volumen (m<sup>3</sup>) de los árboles por clase diamétrica*



Al analizar el comportamiento del dióxido de carbono equivalente según clase diamétrica, se obtiene que las clases 2 y 3 son las que acumulan más CO<sub>2</sub>e/ha (Figura 14); explicado por el mayor número de árboles pertenecientes a la misma y el volumen que los mismos implican (Tabla 19). El resultado del Test de Tukey (Tabla 20) expresa un valor que no detecta diferencias significativas, pero a nivel biológico estas sí pueden ser consideradas como lo es el  $p$ -valor de las clases 1 y 2.

**Figura 14**

*Media y mediana del CO<sub>2</sub>eq por clase diamétrica*



**Tabla 20***Test de Tukey para CO<sub>2</sub>e/ha por clase diamétrica*

<b>Clase diamétrica</b>	<b>Diff</b>	<b>lwr</b>	<b>Upr</b>	<b>p – adj</b>
<b>2 – 1</b>	12,8668	-0,2729	26,0066	0,0559
<b>3 – 1</b>	8,6296	-4,5102	21,7693	0,2534
<b>3 – 2</b>	-4,2373	-17,3770	8,9025	0,7089

### 4.3. Balance de Carbono y Análisis Ambiental

#### 4.3.1. Emisiones

Como resultado de promediar las existencias del período 2020-2023 y calcular la masa de CO<sub>2</sub>e generado por animal, se logra estimar las emisiones de GEI en la totalidad del predio, tal como se expresa en la Tabla 21.

**Tabla 21***Estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub>e promedio 2020-2023*

<b>Categoría</b>	<b>Nº de animales</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub>e / cabeza /año</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub>e / Año</b>
<b>Toro</b>	12	2,97	36
<b>Vaca de cría</b>	395	2,32	915
<b>Tertera</b>	171	1,73	296
<b>Ternero</b>	171	1,73	296
<b>Vaquillona 1-2</b>	229	3,22	736
<b>Vaquillona &gt;2</b>	140	3,44	481
<b>Novillo 1-2</b>	102	2,86	291
<b>Vaca de internada</b>	78	3,49	272
<b>TOTAL</b>	<b>1.298</b>	<b>2,56</b>	<b>3.324</b>

El valor total de ton CO<sub>2</sub>e/cabeza/año corresponde al promedio ponderado, es decir que tiene en cuenta las emisiones de cada categoría y el número de animales que están comprendidos dentro de la misma.

Considerando que la totalidad del rodeo genera 3.324 ton CO<sub>2</sub>e/año en una superficie de 1.261 ha, se estima una emisión anual por hectárea de 2,64 ton de CO<sub>2</sub>e, encontrándose más de 1.000 kg por encima de lo relevado en *Uruguay: Informe sobre la Huella Ambiental Ganadera* (2022). Con este valor, se puede estimar la emisión que se genera dentro del área silvopastoril (Tabla 22), suponiendo un manejo del pastoreo con iguales condiciones (carga, categorías, etc.) en toda la superficie.

**Tabla 22***Emisiones generadas anualmente por sistema*

<b>Sistema</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub>e / año</b>
<b>Santa Magdalena</b>	1.261	3.324
<b>Silvopastoreo</b>	138	364

**4.3.2. Captura**

En lo que refiere a la captura de los gases de efecto invernadero, como ya fue mencionado en el capítulo de Materiales y Métodos, se considera lo fijado en el fuste, ramas y la corteza de los árboles hasta la fecha del segundo inventario.

Para hacer el cálculo más preciso, se tomaron en cuenta la superficie y la masa de CO<sub>2</sub>e para el Silvo Norte y Silvo Sur por separado, dadas las diferencias que estos presentan (Tabla 23).

**Tabla 23***Stock de CO<sub>2</sub>e por sitio en 2023*

<b>Sitio</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub>e/ ha raleadas</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub>e/ ha en pie</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub>e</b>
<b>Silvo Sur</b>	26,29	55,01	51,53	2.801
<b>Silvo Norte</b>	65,72	55,01	87,30	9.353
<b>TOTAL</b>	<b>92,01</b>			<b>12.154</b>

La acumulación de carbono no es lineal durante el turno forestal, sino que sigue una función sigmoide al igual que el aumento en volumen del árbol, pero con el fin de realizar las evaluaciones ambientales, se puede tomar el total de CO<sub>2</sub>e capturado y dividirlo entre la edad del monte, resultando en un valor de captura anual. De esta forma, considerando que el monte al momento de la medición tenía 10 años y 10 meses de edad, el valor de toneladas de CO<sub>2</sub>e capturadas en promedio es de 1.122 ton CO<sub>2</sub>e/año, lo que equivale a 12,2 ton CO<sub>2</sub>e/ha efectiva/año o 8,13 ton CO<sub>2</sub>e/ha afectada/año.

**4.3.3. Balance**

Una vez calculadas las emisiones y la captura de CO<sub>2</sub>e, se puede realizar el balance del mismo. Este surge de la diferencia entre lo emitido y lo capturado anualmente (Tabla 24).

**Tabla 24***Emisiones, captura y balance de carbono por sistema en 2023*

<b>Sistema</b>	<b>Emisiones (Ton CO<sub>2</sub>e/año)</b>	<b>Captura (Ton CO<sub>2</sub>e/año)</b>	<b>Balance (Ton CO<sub>2</sub>e/año)</b>
<b>Santa Magdalena</b>	3.324	1.122	2.202
<b>Silvopastoreo</b>	364	1.122	-758

Valores positivos del balance significan que se están emitiendo más GEI a la atmósfera de lo que está siendo fijado por los árboles como sucede en el balance del Sistema Santa Magdalena. Los montes estudiados capturan casi el 34% del CO<sub>2</sub>e emitido por el total del ganado del establecimiento; sin embargo, hay que tener en cuenta que, por fuera de los rodales en estudio hay otros montes de distintas edades y arreglos (cortinas y SSP de menor edad), de modo que la captura de GEI dentro del predio se estima que se encuentra por encima del porcentaje antes presentado.

Al hacer foco únicamente en la superficie silvopastoril bajo estudio, se destaca un balance negativo, remarcando el servicio ambiental que generan este tipo de sistemas al fijar más carbono del emitido por el ganado. Al contrastar una emisión/ha de 2,64 ton CO<sub>2</sub>e/año contra una captura de 8,13 ton CO<sub>2</sub>e/ha/año, se obtiene un balance de -5,49 ton CO<sub>2</sub>e/ha/año. En términos numéricos, se captura tres veces más carbono de lo liberado por el ganado dentro de la plantación.

Además, si se proyecta el crecimiento del monte hasta el momento de la cosecha, se puede estimar (Tabla 25) una captura anualizada promedio de 14,83 ton de CO<sub>2</sub>e/ha/año, valor que se encuentra por encima del calculado para 2023. Esto se traduce en un balance de carbono con resultados más favorables ambientalmente (valor más negativo).

#### **4.3.4. Créditos de Carbono**

La generación de los créditos de carbono corresponde al promedio de captura anual a lo largo del turno, de esta forma, se debe considerar la biomasa producida a lo largo de los 18 años (estimada por el SAG, ANEXO O) y llevarla a ton de CO<sub>2</sub>e/ha/año tal como se muestra en la Tabla 25.

**Tabla 25***Cálculos para la generación de bonos de carbono*

Actividad	m <sup>3</sup> madera/ha	ton madera/ha	ton C/ha	ton CO <sub>2</sub> e/ha	ton CO <sub>2</sub> e /ha/año
<b>Raleo 1</b>	1,2	0,55	0,22	0,82	0,05
<b>Raleo 2</b>	79,39	34,3	14,76	54,19	3,01
<b>Cosecha final</b>	310,5	141,99	57,75	211,93	11,77
<b>TOTAL</b>	391,09	178,84	72,73	266,94	14,83

Si se toma un precio de 25 USD/bono, es decir, por ton de CO<sub>2</sub>e, se logra una ganancia de aproximadamente 370 USD/ha por la venta de estos. Este ingreso, se puede lograr una vez que el monte alcance el valor promedio de CO<sub>2</sub>e/ha (14,83), el cual se estima que será alcanzado con una edad de aproximadamente 13 años. A modo de resumen, en una superficie efectiva de 92 ha, se lograría un ingreso total de 34.109 USD a los 13 años por la venta de bonos de carbono.

#### **4.4. Resultados del Análisis Económico y Financiero**

##### **4.4.1. Inversión y Financiamiento**

Para llevar adelante el proyecto descrito, fue necesaria una inversión total de 567.434 USD en 138 ha. Este se reparte el 100% en el año 0, siendo el 89% correspondiente a la compra del campo y el restante para la instalación del macizo forestal (Tabla 17).

Para la instalación de una hectárea de monte son necesarios 4.330 USD aproximadamente, correspondiente a la suma del costo unitario de instalación del monte (670 USD) y la compra de una hectárea de campo (3.660 USD). Sin embargo, en este tipo de sistemas se utiliza más superficie de campo que la realmente implicada en el monte, por lo que la inversión debe ser superior.

**Tabla 26***Inversión y financiamiento expresado en USD/ha efectiva*

Año	0	1	2	3
<b>Inversión total</b>	6.168	0	0	0
<b>Tierra</b>	5.500	0	0	0
<b>Monte</b>	668	0	0	0

#### 4.4.2 Ingresos

Los ingresos del proyecto se diferencian en aquellos en efectivo, que se dan a lo largo de la vida del mismo y los valores residuales, recuperados al finalizar el ciclo (Tablas 27 y 28).

**Tabla 27**

*Ingresos expresados en USD/ha efectiva del año 0 al 9*

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Ingresos totales</b>	0	0	0	102	102	102	102	102	2.948	102
<b>Venta exportación</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Venta madera aserrado</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Venta madera puntales</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	2.846	0
<b>Renta ganadera</b>	0	0	0	102	102	102	102	102	102	102
<b>Valor salvamento tierra</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 28**

*Ingresos expresados en USD/ha efectiva del año 10 al 18*

<b>Año</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>Ingresos totales</b>	102	102	102	102	102	102	102	102	24.064
<b>Venta exportación</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	14.567
<b>Venta madera aserrado</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	2.183
<b>Venta madera puntales</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1.714
<b>Renta ganadera</b>	102	102	102	102	102	102	102	102	102
<b>Valor salvamento tierra</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	5.500

El último grupo se refiere a los valores de las inversiones al final del ciclo de vida del proyecto, destacándose el valor de salvamento de la tierra, la cual se considera un activo que no se aprecia ni deprecia, mantiene su valor.

Dentro del primer grupo (ingresos en efectivo), se encuentran aquellos provenientes de la forestación, correspondientes a la venta de madera para exportación, aserrado y puntales en el 2020 (raleos) y 2030 (cosecha final); que representan casi un 73% del valor actualizado de los ingresos (ANEXO P), siendo la más importantes la venta de *E. grandis* para exportación.

Los ingresos derivados de renta ganadera tienen un valor superior a lo expresado en el apartado de Materiales y Métodos, justificado por ser expresado en ha efectivas y no en ha afectadas. Es un ingreso estable, aportando a partir del año 3, cuando el monte tiene un desarrollo tal que permita el pastoreo. Aun así, son

menos significativos para el proyecto que los anteriores, representando un 9% del VAN de los ingresos.

#### 4.4.3. Egresos

Los egresos se componen mayoritariamente de partidas que ocurren de forma puntual a lo largo del ciclo del proyecto, como lo son los tratamientos silvícolas, asesoramiento forestal y planimetría e inventarios; mientras que, las tasas e impuestos se dan de forma anual.

**Tabla 29**

*Egresos expresados en U\$/ha efectiva del año 0 al 9*

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Egresos totales</b>	0	36	20	20	247	20	164	53	1.000	101
<b>Asesoramiento</b>	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Planimetría e inventarios</b>	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0
<b>Tasas e impuestos</b>	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20
<b>Raleos</b>	0	0	0	0	124	0	0	0	980	0
<b>Podas</b>	0	0	0	0	103	0	144	0	0	81

**Tabla 30**

*Egresos expresados en U\$/ha efectiva del año 10 al 18*

<b>Año</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>Egresos totales</b>	20	20	20	20	20	20	20	53	20
<b>Asesoramiento</b>	0	0	0	0	0	0	0	33	0
<b>Planimetría e inventarios</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Tasas e impuestos</b>	20	20	20	20	20	20	20	20	20
<b>Raleos</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Podas</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cuantitativamente, el costo asumido para obtener madera de calidad a través de los tratamientos silvícolas es el más importante, implicando un 78% del valor actualizado de los egresos (ANEXO P).

#### 4.4.4. Flujo de Fondos Diagnostico

A través del Flujo Neto de Caja se presentan, de forma sistemática, el balance entre los beneficios financieros del proyecto (ingresos) y los egresos del mismo (inversión y costos) (Tabla 31 y 32).

**Tabla 31**

*Flujo Neto de Caja diagnostico expresado en U\$D totales del año 0 al 9*

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
FNC	-567.434	-3.340	-1.840	7.507	-13.331	7.507	-5.695	4.507	179.194

**Tabla 32**

*Flujo Neto de Caja diagnostico expresado en U\$D totales del año 10 al 18*

Año	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
FNC	101	7.507	7.507	7.507	7.507	7.507	7.507	7.507	4.507	2.212.079

Durante los primeros tres años el FNC es negativo, producto de que los ingresos aun no son suficientemente altos para cubrir los costos e inversiones de dichos años. Dado que el monte aún no tiene el suficiente desarrollo, no se percibe renta ganadera y por ende no se puede cubrir el monto del asesoramiento ni de los impuestos. Eso implica que el inversor debe hacer aportes propios para financiar esos años.

A partir del cuarto año, cuando comienza a percibirse el ingreso derivado de la ganadería, los flujos netos de caja son en su mayoría positivos; a excepción de los años en los cuales se realizan podas y/o raleos, donde los mismos pasan a ser negativos o muy cercanos a 0.

A modo de resumen, la inversión se concentra al inicio del proyecto, mientras que los egresos ocurren de forma más o menos constante a lo largo del ciclo, justificado por las tasas e impuestos; pero, en los años donde se llevan adelante las podas y raleos se incrementan. En cambio, el grueso de los ingresos es percibido en el último año gracias a la venta de madera, aunque, al comercializar la madera del segundo raleo (2020) también se recibe un monto significativo.

#### **4.4.5. Indicadores Financieros**

Para el análisis de los resultados del proyecto se calculan dos indicadores: Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno.

El VAN al 7% del proyecto se estima en 210.415 U\$D, lo cual al ser superior a 0 significa que el mismo es aceptado. En otras palabras, los ingresos del proyecto son suficientes para costear la inversión realizada, los costos y un 7% de interés sobre los saldos positivos de caja que genera el proyecto; y la suma de todos estos

valores genera un excedente monetario actualizado de 210.415 U\$D totales, equivalente a 2.287 U\$D/ha efectiva y 1.525 U\$D/ha afectada.

A su vez, la TIR se estima en 9,07%, siendo superior al costo de oportunidad de capital establecido en los objetivos (7%). Este indicador refleja la tasa de interés o rentabilidad que ofrece esta inversión.

Al comparar los resultados con los valores de TIR presentados por Lacorte et al. (2016) (34%), se puede apreciar como el sistema en estudio rinde muy por debajo de las posibilidades. En cambio, se ajusta más a lo obtenido por Cubbage et al. (2014), donde el valor de retorno obtenido en Santa Magdalena está dentro del margen presentado en su investigación.

Por otro lado, los valores de VAN por hectárea esperados según Varela (2019) a través del simulador SIMFORGAN son alrededor de los 800 U\$D/ha, lo cual es casi tres veces inferior a los valores estimados para Santa Magdalena. Incluso se puede decir que los valores estimados son similares al escenario más optimista según dicha investigación, lo cual implica un valor en pie de la madera favorable.

#### **4.4.6. Análisis de Posibles Escenarios**

Una de las situaciones a analizar, es solo contemplar en el flujo las partidas provenientes de la forestación, excluyendo del mismo a la ganadería. En este sentido es que al flujo de fondos anterior no se le considera a la renta ganadera. De esta manera, se obtiene el FNC presentado en las Tablas 33 y 34.

**Tabla 33**

*FNC sin considerar la ganadería expresado en U\$D totales del año 0 al 8*

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>FNC</b>	-567434	-3340	-1840	-1840	-22678	-1840	-15042	-4840	169847

**Tabla 34**

*FNC sin considerar la ganadería expresado en U\$D totales del año 9 al 18*

<b>Año</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>FNC</b>	-9246	-1840	-1840	-1840	-1840	-1840	-1840	-1840	-4840	2202731

A partir de este FNC, se ve como en la mayoría de los años el flujo es negativo, lo que está explicado principalmente por los egresos de impuestos y tasas

anuales y los tratamientos silvícolas (principalmente podas). Esto revela la importancia de la ganadería en este tipo de sistemas, al aportar liquidez y evitar los flujos anuales negativos hasta el momento de la cosecha. Los indicadores para de este escenario, se encuentran representados por la Situación 1 en la Tabla 35.

Por otro lado, el VAN y la TIR del flujo exclusivamente forestal corresponden a 133.291 U\$D (1449/ha efectiva) y 8,30 % respectivamente.

Otra situación para considerar sería incluir la venta de créditos de carbono en el Flujo de diagnóstico, que, si bien no es posible generarlos en este proyecto porque ya cuenta con más de tres años de antigüedad, se considera pertinente evaluar el impacto de estos en lo SSP.

Al introducir el ingreso por la venta de estos créditos en el año 2025, se observa el impacto positivo en los indicadores financieros (Situación 2, Tabla 35), confirmando uno de los principios por los cuales se generan estos bonos (aditividad).

**Tabla 35**

*Indicadores financieros de las distintas situaciones*

<b>Indicador</b>	<b>Diagnóstico</b>	<b>Situación 1</b>	<b>Situación 2</b>
<b>VAN (USD)</b>	210.415	133.291	224.569
<b>TIR (%)</b>	9,07	8,30	9,19

## 5. Conclusiones

A lo largo de esta investigación de este estudio de caso, se han ido tratando distintos aspectos de los SSP, enfocándose en dimensiones ambientales y económicas mediante el análisis financiero y del balance de carbono.

En primer lugar, se observó como los diferentes ambientes de cada sitio, determinaron diferencias significativas en la mayoría de las variables dasométricas; lo que podría estar asociado a la topografía ya que dicho factor es la principal variante entre el Silvo Norte y Silvo Sur. El mejor comportamiento del primer sitio a lo largo del turno, se tradujo en valores de IMA superiores; sin embargo, no se encontraron diferencias en lo que respecta al crecimiento durante el período de estudio (ICA). Como fue mencionado en el informe, se cree que la sequía vivida entre 2022 y 2023 fue uno de los principales factores que limitaron la superioridad del Silvo Norte.

Pese a las distintas limitaciones de ambos sitios y la menor densidad de plantación con respecto a la gran mayoría de las plantaciones estudiadas, se concluye que el crecimiento de los árboles se encuentra dentro de los rangos esperados cuando se extrapolan las densidades de árboles (Balmelli & Resquín, 2002).

A su vez, del trabajo se extrae la importancia de lograr una buena producción de madera para capitalizar la capacidad de fijación de carbono de los árboles. En la medida que se logran mejores crecimientos, se producirá más madera, el carbono capturado será mayor y los beneficios ambientales de los SSP se verán maximizados. Es por esto que debe prestar especial atención a los aspectos silviculturales tales como el adecuado diseño de plantación, la marcación de rodales y una buena implantación, así como también factores de manejo como el número de raleos a aplicar. Esto se comprueba al momento en que, como consecuencia de los mejores crecimientos expresados en el Silvo Norte, los valores de captura de CO<sub>2e</sub> con respecto al Silvo Sur son mejores.

Otra conclusión que se desprende de esta investigación es que los máximos responsables de la fijación de C en un sistema silvopastoril son los árboles pertenecientes a las clases diamétricas medias y superiores, explicado por el volumen de madera que estas constituyen y por el número de árboles que pertenecen

a las mismas. En esta misma línea, no se logró establecer ningún parámetro o coeficiente que vincule el diámetro con la captura de carbono.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad, se comprueba a través del caso de estudio que un SSP de estas características ofrece un servicio ecosistémico muy importante. El balance de carbono negativo hace recomendable la introducción de estos sistemas en los establecimientos agropecuarios, permitiendo continuar con la actividad ganadera, de una forma ambientalmente sustentable.

Para lograr un balance de carbono neutro (0) en la totalidad del establecimiento, contemplando el promedio de captura anual de todo el turno, se necesita un monte silvopastoril de 224 ha. En términos porcentuales, es necesario forestar el 23% de la superficie; este valor se encuentra por debajo del reportado por Becoña (2017) para montes de *E. globulus*.

Otro aspecto a destacar dentro del punto de vista ambiental, es que, al ser un monte con destino a madera sólida, el CO<sub>2</sub> fijado, será conservado por mucho tiempo en distintas formas (tablas, muebles, postes, etc.); a diferencia de los montes destinados a la producción de celulosa o energía en los cuales gran parte de esa captura de GEI retorna a la atmosfera.

A partir de los indicadores financieros obtenidos (VAN y TIR), se concluye que los SSP de estas características son viables financieramente. A pesar de la escasa información generada a nivel nacional sobre la viabilidad de este tipo de sistemas, la misma muestra valores similares a los estimados en Santa Magdalena.

Se identifica la importancia de la ganadería en este tipo de sistemas, ya que, al simular la ausencia de ingresos provenientes de la misma, los indicadores financieros se encuentran por debajo de los deseados. A su vez, dicha actividad aporta liquidez al sistema, evitando un FNC negativo durante muchos años y la necesidad de aportes anuales por parte del inversor.

Por último, se reconoce como una oportunidad de capitalizar los beneficios ecosistémicos y ambientales a través de la gestión de los bonos de carbono, siendo un estímulo para el desarrollo de dichos sistemas a nivel nacional. En este mismo sentido, se necesita mayor investigación que permita determinar la edad, densidad, especies y manejos que mejor se adecuan a estos sistemas como fijadores de carbono.

## 6. Bibliografía

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2023, julio). *Calculador de equivalencias de gases de efecto invernadero*. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculador-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero#:~:text=Para%20convertir%20una%20cantidad%20de,de%20carbono%2C%20multiplique%20por%203.67>
- Aguirre, E. (2019). Productividad ganadera de los establecimientos de carne bovina del Censo General Agropecuario. En *Anuario OPYPA 2019* (pp. 497-510). MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Productividad%20ganadera%20bovina\\_0.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Productividad%20ganadera%20bovina_0.pdf)
- Altamirano, A., Da Silva, H., Durán, A., Echevarría, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de Reconocimiento de suelos del Uruguay: Vol. 1: Clasificación de suelos*. MGAP.
- Álvarez, J., Molina, C., Arbeletche, P., Correa, P., Pedemonte, A., & Tamosiunas, M. (2020). *Manual de gestión de empresas agropecuarias*. UdelaR.
- Amescua, A. V. M., & Sandoval, A. Y. (2004). La captura de carbono en bosques: ¿Una herramienta para la gestión ambiental? *Gaceta Ecológica*, (70), 5-18.
- Andregnette, B. (2011). Fundamentos del estudio en sistemas ganaderos de ciclo completo de la región de cristalino: Breve caracterización de la región de cristalino. En A. Simeone (Ed.), *Sistemas de cría y ciclo completo de la región de cristalino* (pp. 11-15). INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2826/1/18429160112091122.pdf>
- Balestí, B., Rachetti, A., & Reggiardo, C. (2022). *Evaluación económica productiva de un sistema de Eucalyptus grandis en dos intensidades de raleo en la zona centro sur de Uruguay* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Balmelli, G. (2002). Mejoramiento genético de Eucalyptus grandis: Resultados en Zona 8. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Visita guiada: Productores forestales zona 8* (pp. 16-23).
- Balmelli, G., & Resquín, F. (2000). *Evaluación de especies de Eucalyptus al quinto año*. INIA.
- Balmelli, G., & Resquín, F. (2002). *Evaluación del crecimiento de especies de Eucalyptus en diferentes zonas de prioridad forestal*. INIA

- Balmelli, G., & Resquín, F. (2006). Productividad de diferentes especies de Eucalyptus sobre areniscas de Tacuarembó-Rivera. En M. Behmaja & O. Pittaluga (Eds.), *30 años de investigación en suelos de areniscas* (pp. 305-312). INIA.
- Balmelli, G., & Resquín, F. (2008). Evaluación productiva de especies de Eucalyptus en Zona 9, a los 13 años. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Día de campo: Silvopastoreo y forestal en Paysandú* (pp. 1-5).
- Becoña, G. (2017). La contribución de áreas forestales en el balance de gases de efecto invernadero de sistemas ganaderos extensivos en Uruguay. *Revista del Plan Agropecuario*, (164), 24-29.
- Becoña, G. (2022). *Factores de emisión y coeficientes para estudios de huella de carbono en Uruguay: Sector ganadero: Manual de consulta*. INIA <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/Libro-huella-de-carbono.pdf>
- Becoña, G., Astigarraga, L., & Picasso, V. D. (2014). Greenhouse gas emissions of beef cow-calf grazing systems in Uruguay. *Sustainable Agriculture Research*, 3(2), 89-105. <http://dx.doi.org/10.5539/sar.v3n2p89>
- Boland, D. J., Brooker, M. I. H., Chippendale, G. M., Hall, N., Hyland, B. P. M., Johnston, R. D., Kleinig, D. A., & Turner, J. D. (2006). *Forest trees of Australia*. CSIRO.
- Boragno, L., & Boscana, M. (2022). *Estadísticas Forestales 2022*. MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2022-04/DGF%20Boletin%20Estadistico\\_2022.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2022-04/DGF%20Boletin%20Estadistico_2022.pdf)
- Boscana, M. (2021). *Vigésima encuesta de viveros forestales: Año 2020*. MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Informe\\_final\\_2.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Informe_final_2.pdf)
- Boscana, M., & Arriaga, M. E. (2021). *Tercera encuesta de servicios forestales: Noviembre, 2021*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/tercera-encuesta-servicios-forestales>
- Bossi, J., & Gaucher, C. (Eds.). (2014). *Geología del Uruguay: Vol. 1: Predevónico*. Polo.
- Böthig, S. (2001). *Proyecto de tecnología de ensayo de productos forestales LATU-JICA (1998-2003): Densidad, dureza y color de Eucalyptus grandis de Uruguay*. LATU; JICA. [https://catalogo.latu.org.uy/opac\\_css/doc\\_num.php?explnum\\_id=568](https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=568)
- Brussa, C. A. (1994). *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Hemisferio Sur.

- Bussoni, A., Boscana, M., & Llanos, E. (2019). Estudios de caso en sistemas silvopastoriles: Análisis productivo y económico. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Producción ganadera y forestal: Análisis de sistemas de producción integrados* (pp. 20-57).
- Bussoni, A., Cabris, J., Fernández, E., Boscana, M., Cubbage, F., & Bentancur, O. (2015). Integrated beef and wood production in Uruguay: Potential and limitations. *Agroforestry Systems*, 89, 1108-1118.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-015-9839-1>
- Bussoni, A., Cubbage, F., & Alvarez Giambruno, J. (2021). Silvopastoral systems and multi-criteria optimization for compatible economic and environmental outcomes. *Agricultural Systems*, 190, 2-13.  
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103118>
- Caffera, M., & D'Agosti, N. (2017). *Estimación del valor económico de la captura de carbono por efecto de la forestación en el Uruguay*. CEPAL.  
<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/47474844-f1d4-40ac-bddd-389941dc0466/content>
- Calle, Z., Murgueitio, E., & Chará, J. (2012). Integración de las actividades forestales con la ganadería extensiva sostenible y la restauración del paisaje. *Unasylva*, 63(239), 31-40.
- Cámara Uruguaya de Servicios Agropecuarios. (2023). *Labores agrícolas febrero 2023*.  
<https://cusa.org.uy/sitio/precios/Labores%20Agricolas%20Febrero%202023.pdf>
- Canadell, J., & Carlson, D. (2017). El balance anual global del carbono. *Boletín de la Organización Meteorológica Mundial*, 66(1), 34-37.  
[https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/8384/1/BolOMM\\_66\\_1%285%29.pdf](https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/8384/1/BolOMM_66_1%285%29.pdf)
- Chizmar, S., Castillo, M., Pizarro, D., Vasquez, H., Bernal, W., Rivera, R., & Cubbage, F. (2020). A discounted cash flow and capital budgeting analysis of silvopastoral systems in the amazonas region of Peru. *Land*, 9(10), Artículo e353. <https://doi.org/10.3390/land9100353>
- Combe, J., & Budowski, G. (1979). Clasificación de las técnicas agroforestales. En G. de las Salas (Ed.), *Taller de Sistemas Agroforestales en América Latina, Turrialba, Marzo 26-30 de 1979* (pp. 17-48). CATIE.  
[https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/786/FOLLETO\\_CLASIFICACION\\_DE\\_LAS\\_TECNICAS\\_AGROFORESTALES.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/786/FOLLETO_CLASIFICACION_DE_LAS_TECNICAS_AGROFORESTALES.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Comisión Nacional de Estudio Agronómico de la Tierra. (2020). *Descripción de Grupos de Suelos CO.N.E.A.T.* MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-03/Descripci%C3%B3n%20de%20Grupos%20de%20suelos%20CONEA\\_T\\_0.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-03/Descripci%C3%B3n%20de%20Grupos%20de%20suelos%20CONEA_T_0.pdf)
- Comisión Nacional de Fomento Rural. (2011). *Adaptación y mitigación al cambio climático en sistemas agropecuarios del Uruguay: Informe final.* MGAP.
- Cubbage, F., Balmelli, G., Bussoni, A., Noellemeyer, E., Pachas, A. N., Fassola, H., Colcombet, L., Rossner, B., Frey, G., Dube, F., Lopes de Silva, M., Stevenson, H., Hamilton, J., & Hubbard, W. (2012). Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforestry Systems*, 86, 303-314. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9482-z>
- Cubbage, F., Mac Donagh, P., Balmelli, G., Morales, V., Bussoni, A., Rubilar, A. R., De La Torre, R., Lord, R., Huang, J., Hoefflich, V. A., Murara, M., Kanieski, B., Hall, P., Yao, R., Adams, P., Kotze, H., Monges, E., Hernández, C., Wikle, J., ... Carrero, O. (2014). Global timber investments and trends, 2005-2011. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 44(1), Artículo eS7. <https://doi.org/10.1186/1179-5395-44-S1-S7>
- Daccarett, M. (1968). *La influencia de árboles leguminosos y no leguminosos sobre el forraje que crece bajo ellos* [Tesis de maestría, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA]. CATIE. [https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/2776/La\\_influencia\\_de\\_arboles\\_leguminosos\\_y\\_no\\_leguminosos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/2776/La_influencia_de_arboles_leguminosos_y_no_leguminosos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Díaz, S. X., & Molano, M. Á. (2001). Cuantificación y valoración económica de la captura CO<sub>2</sub> por plantaciones de género Eucalyptus establecidas por el preca en las cuencas carboníferas de Cesar, Valle del Cauca-Cauca y altiplano Cundiboyacense. *Columbia Forestal*, 7(14), 87-101. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/3210/4701#:~:text=camaldulensis%20en%20el%20an%C3%A1lisis%20de,mas%20altos%20para%20esta%20especie>
- Dirección General Forestal. (2021). *Cartografía Nacional Forestal 2021.* MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Publicacion\\_dgf.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Publicacion_dgf.pdf)
- Dirección General Forestal. (2022). *Superficie Forestal del Uruguay 2022 (Bosques Plantados).* MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2023-01/Superficie%20Plantado%20Informe%202022.pdf>
- Durán, A., & García, F. (2007). *Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación* (Vol. 1). Hemisferio Sur.

- Dyer, J. F., Barlow, B., Kush, J., Morse, W., Teeter, L., & Kever, G. (2015). Factors affecting Alabama landowner interest in harvesting pine straw and willingness to accept prices. *Agroforestry System*, 89(5), 829-839.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-015-9816-8>
- Fedrigo, J., Benítez, V., Santa Cruz, R., Posse, J., Santiago Barro, R., Hernández, J., Mantero, C., Morales Olmos, V., Silveira, D., & Viñoles, C. (2018). Oportunidades y desafíos para los sistemas silvopastoriles en Uruguay. *Revista Uruguaya de Ciencia Política*, 54(209), 20-30.  
<http://www.scielo.edu.uy/pdf/vet/v54n209/1688-4809-vet-54-209-26.pdf>
- Fedrigo, J., Santa Cruz, R., Benitez, V., Courdin, V., Ferreira, G., Posse, J., & Viñoles, C. (2017). Forraje, temperatura y producción animal en un sistema silvopastoril en Uruguay. En J. Chará, P. Peri, J. Rivera, E. Murgueitio, & K. Castaño (Eds.), *Sistemas Silvopastoriles: Aportes a los objetivos de desarrollo sostenible* (pp. 130-135). CIPA.
- Frey, G. E., Fassola, H. E., Pachas, A. N. A., Colcombet, L., Lacorte, S. M., Pérez, O., Renkow, M., Warren, S. T., & Cubbage, F. (2012). Perceptions of silvopasture systems among adopters in northeast Argentina. *Agricultural Systems*, 105(1), 21-32.  
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.09.001>
- Fuchs, H. (2012, 27 de noviembre-2 de diciembre). *Challenges for MRV in agroforestry systems using remote sensing techniques* [Contribución]. DAAD Workshop de la Universidad de Notinga, Dubai y Doha.  
<http://wiki.awf.forst.uni-goettingen.de/wiki/images/d/df/Fuchs.pdf>
- Fundación Terram. (2012, 28 de noviembre). *Estudio de la CONAF establece cuáles son las especies que más capturan CO2*.  
[https://www.terram.cl/2012/11/estudio\\_establece\\_las\\_especies\\_que\\_mas\\_co2\\_capturan\\_en\\_chile/](https://www.terram.cl/2012/11/estudio_establece_las_especies_que_mas_co2_capturan_en_chile/)
- Gallo, L. (2006). Sistemas silvopastoriles. *Revista del Plan Agropecuario*, (119), 30-35.  
[https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R119/R119\\_30.pdf](https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R119/R119_30.pdf)
- García, M. Á. (2019, 9 de setiembre). *Plantaciones de eucalipto para reducir el CO2 atmosférico y mitigar el cambio climático*. Asociación de Ingenieros Agrónomos del Nordeste de Entre Ríos.  
[https://www.aianer.com.ar/noticias/2205\\_plantaciones-de-eucalipto-para-reducir-el-co2-atmosferico-y-mitigar-el-cambio-climatico.html](https://www.aianer.com.ar/noticias/2205_plantaciones-de-eucalipto-para-reducir-el-co2-atmosferico-y-mitigar-el-cambio-climatico.html)
- Garrett, H. E., Kerley, M. S., Ladyman, K. P., Walter, W. D., Godsey, L. D., Van Sambeek, J. W., & Brauer, D. K. (2004) Harwood silvopasture management in North America. *Agroforestry Systems*, 61, 21-33.  
<https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000028987.09206.6b>

- Gasparri, M. P. (2019). *Modelo predictivo de sobrevivencia de cepas de Eucalyptus globulus y evaluación financiera para diferentes alternativas de manejo* [Tesis de Maestría]. Universidad de la República.
- Gorga, L., & Mila, F. (2022). Cadena de la carne vacuna: Situación y perspectivas. En *Anuario OPYPA 2022* (pp. 33-59). MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/book/16089/download>
- Harvey, C. A., Medina, A., Sánchez, D. M., Vílchez, S., Hernández, B., Sáenz, J. C., Maes, J. M., Casanoves, F., & Sinclair, F. L. (2006). Patterns of animal diversity in different forms of tree cover in agricultural landscapes. *Ecological Applications*, 16(5), 1986-1999.
- Harvey, C. A., Villanueva, C., Villacís, J., Chacón, M., Muñoz, D., López, M., Ibrahim, M., Gómez, R., Taylor, R., Martínez, J., Navas, A., Sáenz, J., Sánchez, D., Medina, A., Vílchez, S., Hernández, B., Pérez, A., Ruiz, F., López, F., ... & Sinclair, F. L. (2005). Contribution of live fences to the ecological integrity of agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 111(1-4), 200-230.
- Hogg, J. (2006, 29 de noviembre). *La ganadería produce más gases contaminantes que el transporte*. Naciones Unidas. <https://news.un.org/es/story/2006/11/1092601>
- Hongmin, D., Mangino, J., McAllister, T., Hatfield, J., Johnson, D., Lassey, K., Aparecida de Lima, M., & Romanovskaya, A. (2006). Chapter 10: Emissions from livestock and manure management. En *Guidelines for national greenhouse gas inventories: Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use* (pp. 10.1-10.87). IPCC.
- Kurtz, V., & Ferruchi, R. (2000). La poda como parte de la estrategia para la obtención de madera de calidad. En Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Ed.), *XV Jornadas Forestales de Entre Ríos* (pp. 1-23).
- Lacorte, S. M., Barth, S. R., Colcombet, L., Crechi, E. H., Esquivel, J. I., Fassola, H., & Wick, R. Á. (2016). Silvopastoral systems developed in Misiones and Corrientes, Argentina. En P. Peri, F. Dube, & A. Varella (Eds.), *Silvopastoral systems in Souther South America* (pp. 9-39). Springer.
- Leániz, E. (2021). *Octavo reporte julio-diciembre 2021*. Observatorio Económico de Florida. <https://www.cncs.com.uy/files/Informe%20OEF%202021%20-%20Octava%20edición.pdf>
- Massaccesi, M. (2021, 27 de marzo). El sector agropecuario uruguayo responsable del 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero. *El Agrario*. <https://www.elagrario.com/actualidad-el-sector-agropecuario-uruguayo-responsable-del-75-de-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-44221.html>

- Muñoz, G. (2017, 30 de noviembre). *Ganadería climáticamente inteligente: El caso de Uruguay*. BID. <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/ganaderia-climaticamente-inteligente-el-caso-de-uruguay/>
- Murgueitio, E., Cuellar, P., Ibrahim, M., Gobbi, J., Cuartas, C., Naranjo, J., Zapata, A., Mejía, C., Zuluaga, A., & Casasola, F. (2006). Adopción de sistemas agroforestales pecuarios. *Pastos y Forrajes*, 29(4), 365-381. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269121676003>
- Nair, P. K. R (1993). *An introduction to Agroforestry*. Kluwer Academic Publishers.
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2017). *Serie “Precio de la Tierra”: Compraventas Año 2016*. MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/compraventas\\_anual\\_2016\\_final\\_0.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/compraventas_anual_2016_final_0.pdf)
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2020a). *Serie “Precio de la Tierra”: Arrendamientos 2019*. MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-05/Arrendamientos\\_A%C3%B1o\\_2019%20%283%29.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-05/Arrendamientos_A%C3%B1o_2019%20%283%29.pdf)
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2020b). *Serie “Precio de la Tierra”: Compraventas Año 2019*. MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/Informe\\_DIEA\\_Serie\\_Precio\\_de\\_la\\_Tierra\\_Compraventas\\_A%C3%B1o\\_2019.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/Informe_DIEA_Serie_Precio_de_la_Tierra_Compraventas_A%C3%B1o_2019.pdf)
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2021a). *Serie “Precio de la Tierra”: Arrendamientos 2020*. MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/COMUNICADO\\_Arrendamientos\\_Anuales\\_2020.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/COMUNICADO_Arrendamientos_Anuales_2020.pdf)
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2021b). *Serie “Precio de la Tierra”: Compraventas Año 2020*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/DIEA-COMPRAVENTAS-A%C3%91O-2020.pdf>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2022a). *Serie “Precio de la Tierra”: Arrendamientos 2021*. MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/COMUNICADO\\_Arrendamientos\\_Anuales\\_2021\\_0.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/COMUNICADO_Arrendamientos_Anuales_2021_0.pdf)
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2022b). *Serie “Precio de la Tierra”: Compraventas Año 2021*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/DIEA-COMPRAVENTAS-A%C3%91O-2021.pdf>

- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2023). *Serie "Precio de la Tierra": Compraventas Año 2022*. MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2023-05/DIEA-COMPRAVENTAS-A%C3%91O-2022\\_Definitivo.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2023-05/DIEA-COMPRAVENTAS-A%C3%91O-2022_Definitivo.pdf)
- Orefice, J. N., & Carroll, J. (2017). Silvopasture: It's not a load of manure: Differentiating between silvopasture and wooded livestock paddocks in the Northeastern United States. *Journal of Forestry*, 115(1), 71-72. <https://doi.org/10.5849/jof.16-016>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). *Guidelines for environmental quantification of nutrient flows and impact assessment in livestock supply chains*. <https://www.fao.org/3/bu312e/bu312e.pdf>
- Paseyro, J. (2015, 1 de abril). Más vale especie conocida que otra por conocer. *Revista Forestal*. <https://www.revistaforestal.uy/silvicultura/mas-vale-especie-conocida-que-otra-por-conocer.html>
- Pastorini, V., & Acosta, P. (2011). Aportes del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca para la integración de la forestación en predios ganaderos. En *Anuario OPYPA 2011* (pp. 283-297). MGAP.
- Pent, G. J., & Fike, J. H. (2017). Winter stockpiled forages, honey locust pods, and lamb performance in hardwood silvopastures. En Association for Temperate Agroforestry (Ed.), *Agroforestry for a vibrant future: Connecting people, creating livelihoods, sustaining places: 15<sup>th</sup> North American Agroforestry Conference: Abstract proceedings* (p. 67). <https://www.aftaweb.org/images/documents/15th-NAAC-Easy-to-navigate-Conference-Abstract-Proceedings.pdf>
- Peri, P. L., Dube, F., & Varella, A. C. (2016). Silvopastoral systems in the subtropical and temperate zones of South America: An overview. En P. Peri, F. Dube, & A. Varella (Eds.), *Silvopastoral Systems in Southern South America* (pp. 1-8). Springer.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura forestal*. IICA; GTZ.
- Reid, R. (2009). Growing high-quality sawlogs. En I. Nuberg, B. George, & R. Reid (Eds.), *Agroforestry for natural resource management* (pp. 161-182). CSIRO. [https://library.uniteddiversity.coop/Permaculture/Agroforestry/Agroforestry\\_for\\_Natural\\_Resource\\_Management.pdf](https://library.uniteddiversity.coop/Permaculture/Agroforestry/Agroforestry_for_Natural_Resource_Management.pdf)
- Russo, R., & Botero, R. (2005). *El componente arbóreo como recurso forrajero en los sistemas silvopastoriles*. Sitio Argentino de Producción Animal. [https://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_pasturas/manejo%20silvopastoril/42-componente\\_arboreo.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/manejo%20silvopastoril/42-componente_arboreo.pdf)

- Russo, R., & Botero, R. (1996). Nitrogen fixing trees for animal production on acid soils. En M. Powell (Ed.), *Nitrogen fixing trees for acid soils: A field manual* (pp. 31-39). Winrock International Institute for Agricultural Development.  
[https://www.researchgate.net/publication/236591537\\_Nitrogen\\_fixing\\_trees\\_for\\_animal\\_production\\_on\\_acid\\_soils](https://www.researchgate.net/publication/236591537_Nitrogen_fixing_trees_for_animal_production_on_acid_soils)
- Sáenz, J. C., Villatoro, F., Ibrahim, M., Fajardo, D., & Pérez, M. (2007). Relación entre las comunidades de aves y la vegetación en agropaisajes dominados por la ganadería en Costa Rica, Nicaragua y Colombia. *Agroforestería en las Américas*, (45), 37-48.  
[https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7723/Relaci%c3%b3n\\_entre\\_las\\_comunidades\\_de\\_aves.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7723/Relaci%c3%b3n_entre_las_comunidades_de_aves.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Salton, J. C., Mercante, F. M., Tomazi, M., Zanatta, J. A., Concenço, G., Silva, W. M., & Retore, M. (2014). Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 190, 70-79.
- Sancho, L., Arocena, I., & Ordeig, L. (2021). *Definición, caracterización y cuantificación del área bajo sistemas silvopastoriles, para el seguimiento de las contribuciones establecidas en la Contribución Determinada a nivel Nacional de Uruguay*. MAP; MGAP; GEF; PNUD.  
<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/definicion-caracterizacion-cuantificacion-del-area-bajo-sistemas-silvopastoriles>
- Schneider, H., & Samaniego, J. (2009). *La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.  
[https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Huella\\_carbono\\_prod\\_dist\\_consumo.pdf](https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Huella_carbono_prod_dist_consumo.pdf)
- Seppänen, P. (2002). Secuestro de carbono a través de plantaciones de eucalipto en el trópico húmedo. *Foresta Veracruzana*, 4(2), 51-58.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49740208>
- Shepherd, K. R. (1986). *Plantation Silviculture* (Vol. 22). Martinus Nijhoff Publishers.
- Shrestha, R. K., Alavalapati, J. R. R., & Kalmbacher, R. S. (2004). Exploring the potential for silvopasture adoption in south-central Florida: An application of SWOT-AHP method. *Agricultural Systems*, 81(3), 185-199.
- Soares de Lima, J. M., & Scoz, R. (2017). Aportes de INIA a la construcción de sistemas de producción integrados. *Integración Ganadería Forestación*, (1), 24-34.
- Sorrentino Fattoruso, A. (1997). *Manual para diseño y ejecución de inventarios forestales*. Hemisferio Sur.

- Sutton, T., Dassau, O., Sutton, M., Nsibande, L., & Mthombeni, S. (2022). *QGIS* (versión 3.28) [Software]. Equipo desarrollador QGIS. <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html#>
- Tamosiunas, M. (2015). La integración productiva de árboles y ganado en predios familiares: La visión del productor. *Agrociencia (Uruguay)*, 19(1), 150-157.
- Umrani, R., & Jain, C. K. (2010). *Agroforestry: System and practices*. Oxford Book Company. [https://library.uniteddiversity.coop/Permaculture/Agroforestry/Agroforestry\\_systems\\_and\\_practices.pdf](https://library.uniteddiversity.coop/Permaculture/Agroforestry/Agroforestry_systems_and_practices.pdf)
- Uruguay, el país de las cuatro vacas por persona, busca una ganadería más verde (2021, 24 de marzo). *Swissinfo.ch*. <https://www.swissinfo.ch/spa/afp/uruguay--el-pa%C3%ADs-de-las-cuatro-vacas-por-persona--busca-una-ganader%C3%ADa-m%C3%A1s-verde/46476072>
- Uruguay: Informe sobre la Huella Ambiental Ganadera*. (2022). Ministerio de Ambiente; Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca; Instituto Nacional de Carnes; Instituto Nacional de la Leche; Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. [https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Huella\\_Ambiental\\_Ganadera\\_Informe%2010-2022.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Huella_Ambiental_Ganadera_Informe%2010-2022.pdf)
- Uruguay XXI (2022). *Sector ganadero en Uruguay*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/b28305203e10f6d7b3689eb619160dd922b2036.pdf>
- Van Hoff, E. (1997). Optimización de la producción en plantaciones de eucaliptos. *Revista Sociedad de Productores Forestales*, 2(4), 11-14.
- Varela, F. (2019). Modelo de Simulación Forestal y Ganadero SIMFORGAN. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Producción ganadera y forestal: Análisis de sistemas de producción integrados* (pp. 131-142).
- Varella, A. C., Barro, R. S., Da Silva, J. L. S., Porfirio da Silva, V. P., & De Saibro, J. C. (2016). Silvopastoral systems in the cold zone of Brazil. En P. Peri, F. Dube, & A. Varella (Eds.), *Silvopastoral systems in Southern South América* (pp. 231-255). Springer.
- Vieragro. (s.f.). *Uruguay ganadero*. <https://vieragro.com.uy/invertir-en-uruguay/uruguay-ganadero/>
- Vité Terán, L. (2014). Principio de Arquímedes. *Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4*, 2(3). <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/1872>

Zuluaga, A., Giraldo, C., & Chará, J. (2011). *Proyecto Ganadería Colombiana sostenible: Manual 4: Servicios ambientales que proveen los Sistemas Silvopastoriles y los beneficios para la biodiversidad*. CIPAV.

## 7. Anexos

## Anexo A

*Información para la proyección económica del sistema SIMFORGAN*

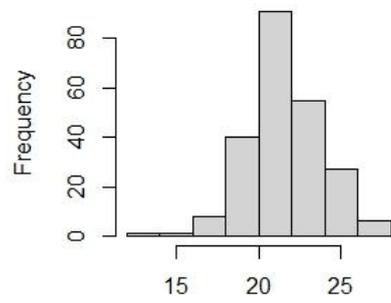
<b>Año inicio</b>	<b>Año fin</b>	<b>Concepto</b>	<b>Valor (US\$/ha)</b>
1	10	Costos administrativos	10
0	0	Laboreo	302
0	0	Mano de Obra Plantación	460
0	0	Plantación	165
0	0	Pre-plantación (Mano de Obra, distribución)	602
0	0	Preparación del sitio	75
1	1	Tratamientos periódicos	47
Volumen madera fin de ciclo (m3)			123,5
Valor MÍNIMO esperado de venta madera en pie (US\$/m3)			17
Valor PROMEDIO esperado de venta madera en pie (US\$/m3)			20
Valor MÁXIMO esperado de venta madera en pie (US\$/m3)			23
Tasa de interés (%)			3

**Anexo B***Variables termodinámicas de la madera*

<b>Tarugo</b>	<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso seco (g)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	4,0948	1,5958	0,3950
<b>2</b>	3,9476	1,7834	0,4617
<b>3</b>	3,5392	1,6130	0,4476
<b>4</b>	4,6443	1,8584	0,4200
<b>5</b>	3,9913	1,9855	0,4930
<b>6</b>	3,4854	1,1864	0,4605
<b>7</b>	3,2274	1,4678	0,4398
<b>8</b>	3,6256	1,4324	0,3795
<b>9</b>	3,4173	1,3567	0,3947
<b>10</b>	3,0018	1,3434	0,4340
<b>11</b>	3,5973	1,3412	0,3834
<b>12</b>	3,5984	1,4661	0,4131
<b>13</b>	2,9190	1,0685	0,3687
<b>14</b>	3,4148	1,3040	0,3916
<b>15</b>	3,9504	1,7191	0,4601
<b>16</b>	3,7202	1,7064	0,4619
<b>17</b>	3,4075	1,4696	0,4262
<b>18</b>	3,9315	1,5189	0,4318
<b>19</b>	2,4133	1,1319	0,4679
<b>20</b>	3,2366	1,6973	0,5296
<b>21</b>	3,4778	1,7266	0,4730
<b>22</b>	3,4151	1,3835	0,3982
<b>23</b>	4,1596	1,7858	0,4373
<b>24</b>	4,1125	2,1759	0,5076
<b>25</b>	4,2376	1,9549	0,4869
<b>26</b>	4,0840	1,8102	0,4334
<b>27</b>	4,2299	1,9624	0,4712
<b>28</b>	5,2473	1,8149	0,4156
<b>29</b>	3,9814	1,8955	0,4670
<b>30</b>	3,6032	1,6334	0,4578
<b>31</b>	3,6337	1,9652	0,5346
<b>32</b>	3,1845	1,9807	0,5534
<b>33</b>	2,8411	1,8508	0,5555
<b>34</b>	4,0299	1,7098	0,4556
<b>35</b>	3,9417	1,7816	0,4532
<b>36</b>	3,9114	2,0437	0,5438
<b>PROM.</b>	<b>3,6998</b>	<b>1,6534</b>	<b>0,4529</b>

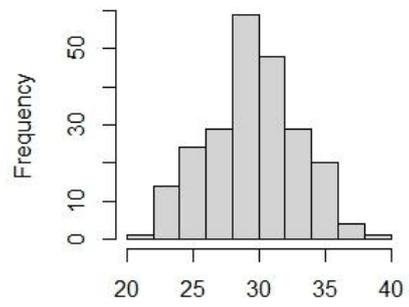
**Anexo C***Estimación de costos de transporte*

<b>CÁLCULO COSTO DE TRANSPORTE</b>			
<b>Exportación</b>			
<i>Pto. Mdeo</i>	\$80	1 km	
ton	\$9.760	122 km	
ton	30	\$9.760	
ton	1	\$325,33	
ton	0,95	\$309,07	
m3	1	8,13 USD	
<b>Aserrado</b>			
<i>Afuera Mdeo</i>	\$80	1 km	
ton	\$8.000	100 km	
ton	30	\$8.000	
ton	1	\$266,67	
ton	0,95	\$253,33	
m3	1	6,67 USD	
<b>Puntales</b>			
<i>Impregnación</i>	\$80	1 km	
ton	\$9.600	120 km	
ton	30	\$9.600	
ton	1	\$320	
ton	0.7	\$224	
m3	1	5,89 USD	

**Anexo D***Distribución de los datos de altura en 2022***Histograma de Altura**

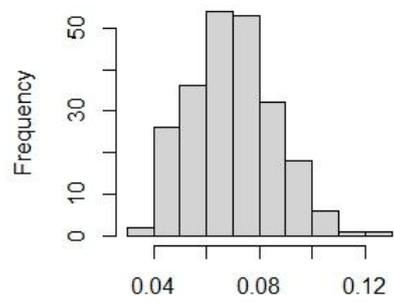
**Anexo E**

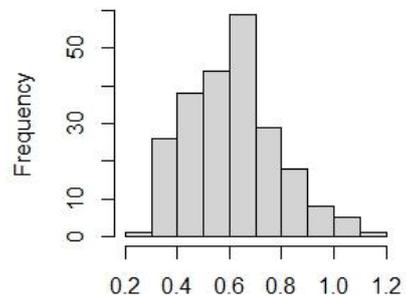
*Distribución de los datos de diámetro a la altura del pecho en 2022*

**Histograma de DAP**

**Anexo F**

*Distribución de los datos de área basal en 2022*

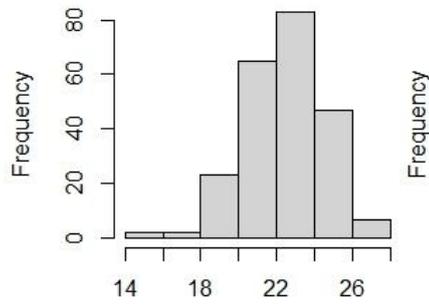
**Histograma de Area BASAL**

**Anexo G***Distribución de los datos de volumen en 2022***Histograma de Volumen**

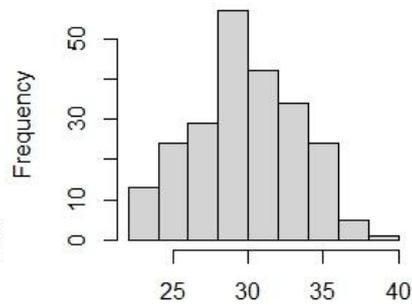
## Anexo H

*Distribución de los datos de inventario en 2023*

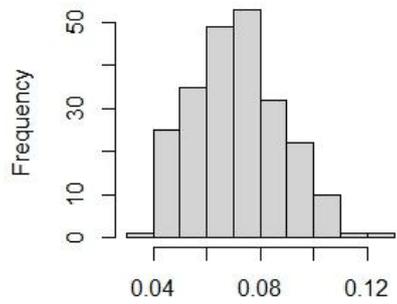
**Histograma de Altura**



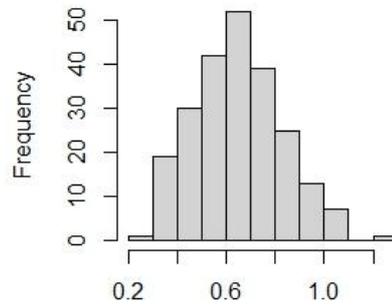
**Histograma de DAP**



**Histograma de Area BASAL**



**Histograma de Volumen**

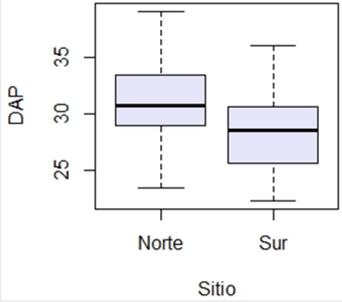
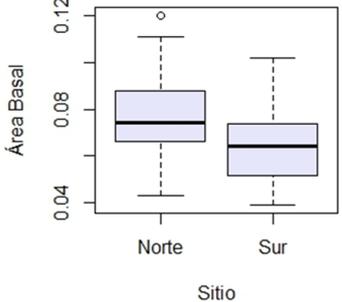
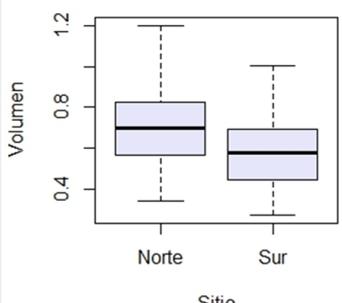


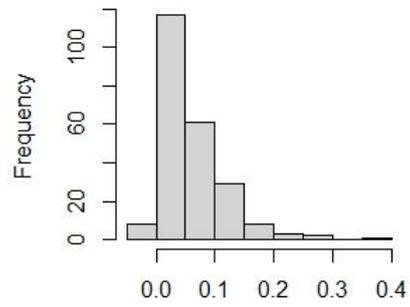
**Anexo I***Test de Levene para los datos de inventario de 2023*

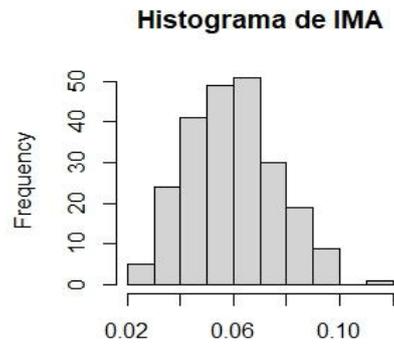
<b>Variable</b>	<b>Pr &gt; (F)</b>
<b>H</b>	0,4111
<b>DAP</b>	0,4916
<b>AB</b>	0,8550
<b>VOL</b>	0,6829

## Anexo J

Comparación de medias (T test) para los datos de inventario de 2023

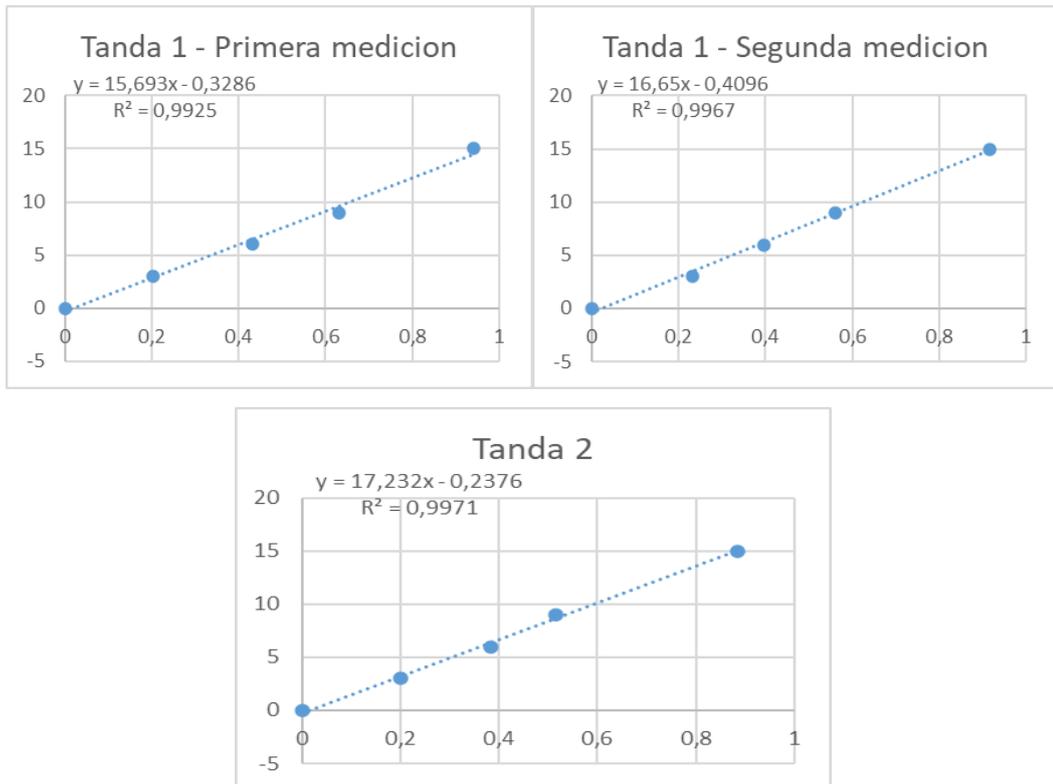
Variable	Boxplot	p-valor
<b>DAP</b>		$4,827 e^{-09}$
<b>AB</b>		$5,712 e^{-09}$
<b>VOL</b>		$5,799 e^{-08}$

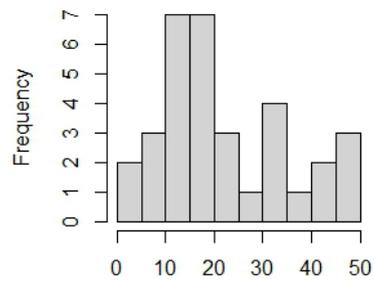
**Anexo K***Distribución de los datos de Incremento Corriente Anual***Histograma de ICA**

**Anexo L***Distribución de los datos de Incremento Medio Anual*

**Anexo M**

*Gráficos y ecuaciones utilizados en la determinación de carbono*



**Anexo N***Distribución de los datos de CO<sub>2</sub>e***Histograma de CO<sub>2</sub>eq**

## Anexo O

### Simulación del trozado a partir del SAG para las tres intervenciones

#### PRIMER RALEO

Troza	Calidad de troza	Diámetro mínimo (cm)	Largo de Troza (m)	Nro de Trozas por árbol	CANTIDAD	Volumen (m3/ha)
1	Exportacion	30,00	5,80	99	0	0,00
2	Aserrado nacional	25,00	2,50	99	0	0,00
3	Puntales	9,00	3,00	99	52	1,00
4	Troza 4	0,00	0,00	0	0	0,00
5	Troza 5	0,00	0,00	0	0	0,00
6	Troza 6	0,00	0,00	0	0	0,00

Altura del tocón  m

Simular trozado
Finalizar

	Volumen (m3/ha)	%
Trozas	1,0	83,3
Desperdicio	0,2	16,7
<b>TOTAL</b>	<b>1,2</b>	<b>100</b>

---

#### SEGUNDO RALEO

Troza	Calidad de troza	Diámetro mínimo (cm)	Largo de Troza (m)	Nro de Trozas por árbol	CANTIDAD	Volumen (m3/ha)
1	Exportacion	30,00	5,80	99	0	0,00
2	Aserrado nacional	25,00	2,50	99	1	0,13
3	Puntales	9,00	3,00	99	1.165	75,26
4	Troza 4	0,00	0,00	0	0	0,00
5	Troza 5	0,00	0,00	0	0	0,00
6	Troza 6	0,00	0,00	0	0	0,00

Altura del tocón  m

Simular trozado
Finalizar

	Volumen (m3/ha)	%
Trozas	75,4	95,0
Desperdicio	4,0	5,0
<b>TOTAL</b>	<b>79,4</b>	<b>100</b>

Altura del tocón  m

1er Raleo
2do Raleo

Calcular trozado de tala rasa
Análisis Económico
Finalizar

	Volumen (m3/ha)	%
Trozas	307,4	99,0
Desperdicio	3,1	1,0
<b>TOTAL</b>	<b>310,5</b>	<b>100</b>

**Anexo P***Valor actualizado por partida*

<b>Partidas</b>	<b>VAN (%)</b>
<b>Inversión</b>	<b>100</b>
Tierra	88
Instalación del monte	12
<b>Ingresos</b>	<b>100</b>
Venta madera de exportación	45
Venta madera de aserrado	6
Venta madera de puntales	22
Renta ganadera	9
Valor salvamento de la tierra	18
<b>Egresos</b>	<b>100</b>
Asesoramiento forestal	1
Planimetría e inventarios	3
Tasas e impuestos	18
Podas	59
Raleos	19